

連続砂防堰堤を持つ河川の 水温形成に関する研究

A STUDY ON THERMAL ENVIRONMENT IN RIVER REACH WITH A SERIES OF SABO DAMS

鷺見 哲也¹・水野 貴視²・河口 洋一³

Tetsuya SUMI, Takashi MIZUNO and Yoichi KAWAGUCHI

¹正会員 博(工) 大同大学 准教授 工学部建築学科土木・環境専攻
(〒457-8532 愛知県名古屋市南区白水町40)

²非会員 大同大学 工学部都市環境デザイン学科

³非会員 徳島大学 教授 ソシオテクノサイエンス研究部

In previous researches (e.g.: Nakano et al, 1996), it is estimated that habitat for cold water fish will be decreasing in Hokkaido area, Japan, if water temperature go up several degrees by global warming. In summer, habitat for *Siretoko Peninsula* (20 degree is limit temperature) comes severer in daytime by radiation in Siretoko Peninsula, and Sabo dam series is suspected as a factor further heating.

In this study, under an assumption that dam makes wide, shallow, and slow flow area and they make further heating effects by radiation/sensitive heat flux, field investigations on micro meteorology, temporal/spatial water temperature change and flow field are done in two domains with/without dam series in the Kanayama River. Furthermore small experiment also done to know heat flux magnitude of dam fall's heating effect

Result shows that: (1) radiation's effect is larger in dam series domain than another. (2) This effects are estimated by flow field with wide water surface and slow velocity made by river bed shape with flat dam. (3) At dam falls, heating effect is negligible or cooling effect is larger by latent heat. By further research, explanation of heating effects by falls taking warm air at pools is expected.

Key Words : Sabo Dam, River water temperature, Siretoko Peninsula, latent heat transport at fall

1. 本研究の背景と目的

地球温暖化による諸々への影響のうち、淡水水域生物への影響は主に1990年代に入ってから研究が盛んに行われてきている¹⁾。その中でも冷水性の淡水魚類への影響について、冷水性魚類については警鐘が鳴らされており、北海道のオシロコマ *Salvelinus malma* は、1990年初頭比で+2℃で生息域が激減し、知床半島全体では絶滅すると予測されている²⁾。

地球温暖化による魚類の生息環境影響は、①直接的な生息環境要因としての水温そのものの上昇と、②そのほか生活史にかかる要因(餌環境、融雪の加減による流れ場への影響など)が考えられる。本研究では水温そのものの影響に限定して扱うこととする。

本研究の調査地のある知床半島に絞ると、オシロコマの個体群の現状については、文献³⁾⁴⁾が詳しい。水温環境の厳しい7月～9月の夏の水温環境について見ると、夏場に晴天の多い西岸(ウトロ)側15河川のうち、水温の高い川が多く、曇りの多い東岸(羅臼)側19河川については相対的に低い川が多い。知床半島では、ダムが多い河川ほど水温が高く、オシロコマの生息密度が低いことが示されている⁵⁾⁶⁾。文献³⁾で見ても、2013年8月に最高水温が20℃を超えた川は羅臼側にはないものの、ウトロ川の5河川で超過しており、うち4河川が高密度の連続砂防堰堤を持つ河川であった。

そこで本研究では、地球温暖化(平均気温による水温上昇)の影響を一旦横に置き、連続砂防堰堤が配置された区間では、夏場において水温のより大きい区間上昇を

もたらすものと仮定して、現地観測を行い、場の仮説と簡易なモデル化を行った上で、影響の度合いについて考察を行った。本研究の対象は、背景としての平均気温上昇や基底水温メカニズムではなく、区間での水温上昇幅の大きさとする。

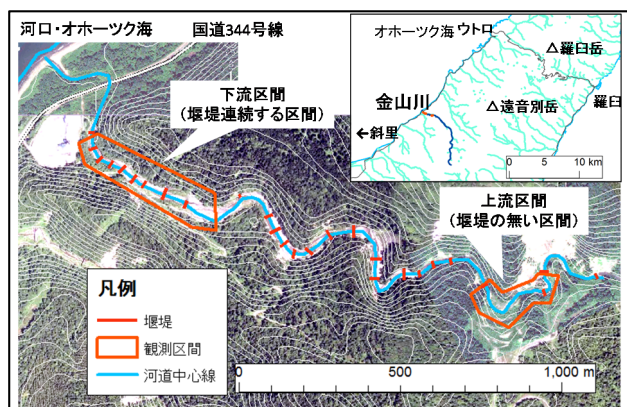


図-1 金山川現地調査区間

2. 現地の概要

知床半島の中央は第四紀の火山であるが半島全体は第三紀の海底堆積層の隆起によってできている⁸⁾。海岸付近まで迫っているため、北西側・南西側へと削る河川の多くは、海岸付近まで河床勾配が大きい上に、谷の下刻も若く土砂生産が多い。よって沿岸道路や林道等の維持のために河川下流部に連続砂防堰堤を持つ河川が多い。

また文献³⁾で示された水温については、堰堤群の有無に限らず、上流部での基底水温は川毎に大きく異なり、上流域に崩壊地を持つ湧水起源かどうかなど、差が大きく、夏場の平均水温で比べても8℃ほど幅がみられる。よって基底水温が高い河川においては、冷水性魚類生息場への気候変動の影響は大きくなる。その上で、堰堤の連続により、上流に対する区間下流での水温上昇幅がより大きくなるとすれば、その堰堤などのあり方を検討する必要がある。

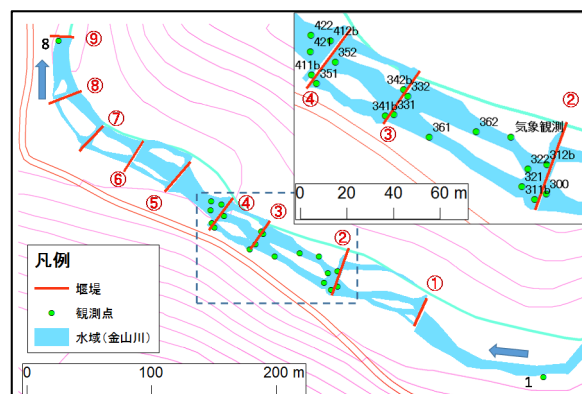
本研究の対象河川は、金山川で、知床半島西側の河川群のやや南寄りに位置する、流路延長11.5km、流域面積23.9km²の準用河川である。下流部では2km以内に22基の堰堤が設置されている。文献³⁾では基底水温が高い部類に属し、真夏の快晴日昼間の河口付近の水温は21℃ほどまで上昇することが事前にわかっている。

本研究での現地調査での観測区間は2区設けた。

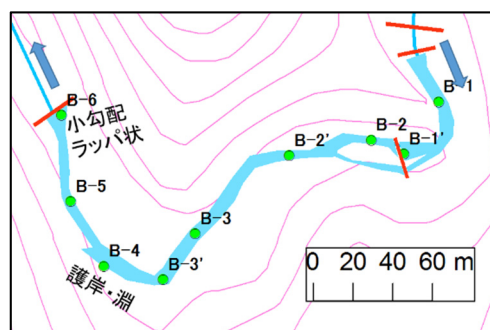
下流の連続堰堤区間は延長447m、平均河床勾配1/34、堰堤9基を持つほぼ直線の区間である。堰堤は、堤頂が水平の一般的な不透過なコンクリート製で越流幅は20～30m、一基のみ透過型であった(図-2(a)の④の堰堤)。これのみ落差が4mであったほかは、下流側プール水面との差は2m以内である。

下流部は上流の堰堤が少ない区間は、延長300m、平均河床勾配1/33、堰堤1基のみ含む湾曲部を持つ。堰堤より下流部の無堰堤区間は区間長260m、勾配1/52であり、

下流湾曲部の外湾部にやや深い淵(水深0.60m)があるほかは、水深0.3m以内の早瀬・平瀬となっている。



(a) 下流区間 (連続堰堤区間)



(b) 上流区間 (堰堤少ない区間)

図-2 金山川現地調査区間

3. 現地での水温上昇調査

(1) 流れ場に関する調査

GPS測量(D-GPS)及び水準測量により水域等の平面分布および河道の縦断を調査した結果を図-2および図-3に示す。

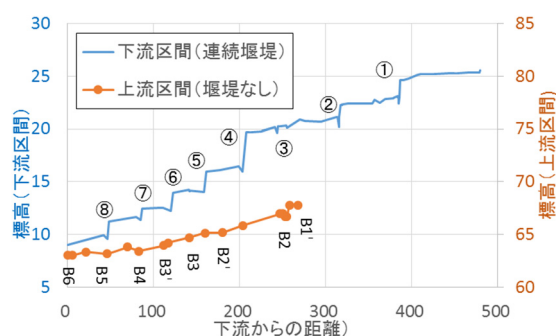


図-3 縦断面図



(a) 下流堰堤③ラップ状水域 (b) 上流：一様勾配の流れ

写真-1 現地の様子

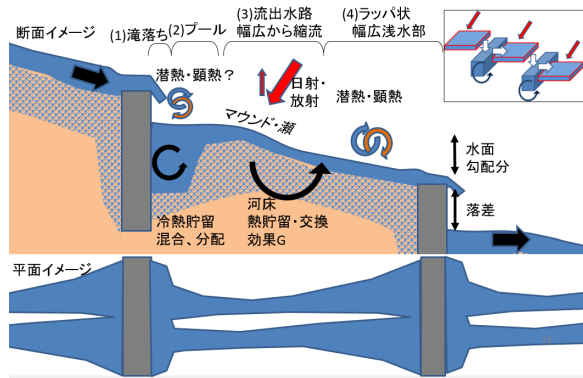


図-4 概念図

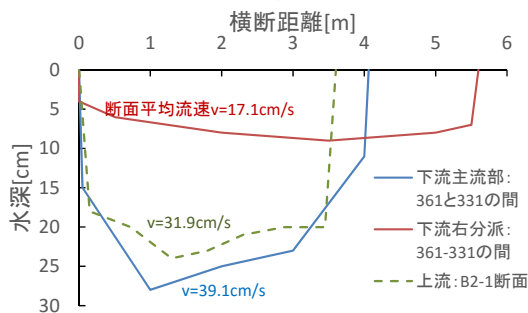


図-5 水路横断面 (一部)

連続堰堤区間では、堰堤間で繰り返される場の特徴が見られる。(1)堰堤部滝落ち、(2)滝壺プール部、(3)プール直下マウンドとその越流部(瀬、下流急勾配)、(4)堰堤越流部に向かって浅い流れにラッパ上に水面が広がっていく低勾配流路(写真-1(a)、図-4)、の4つである。

上流区間では直線部は一樣勾配の流れで、湾曲部の一部のみ水深60cmの淵となっている。堰堤付近以外は水面幅が3～4.3mと狭く(図-5)、日射の受光面積は小さい。

堰堤区間に注目すると、プール下流部には洗掘・流下した土砂の堆積したマウンドできており、多くの堰堤区間で左右に流れが分かれ、このマウンドを乗り越える部分からしばらくは勾配も流速も大きくなりながら水面幅が小さくなったのち、(4)の水路部のラッパ状の緩勾配で広い水面幅の遅い流れ(図-5)となり、下流端の堰堤越流部では幅20-30mに広がった3cm以下の水深となり滝落ちする。(4)では日射の影響が大きいと予想された。左右に分かれた流れの多くは一方が主流となり、図-2(a)の区間では左岸側がこれにあたる。断面平均流速は、(3)のマウンド下流区間で50cm/s程度、ラッパ状区間滞筋部で30cm/s程度である一方、右岸分派では(3)にて20cm/s前後、(4)では水面幅の小さい深い場所で10cm/s以下、堰堤近くで浅くなるにつれて15cm/s程度となった(図-5)。

(2) 水温形成に関する調査

河道での水温上昇を引き起こす熱収支の成分には図-6の4つが挙げられる。上下流の夏場の昼間の温度上昇幅の要因について調査するため、上記2区間において、多地点連続水温計測を行うとともに、気象要素の計測も行

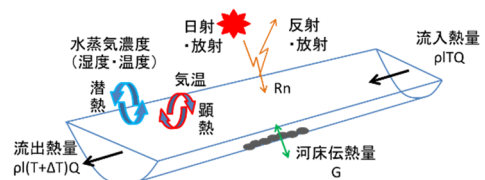


図-6 河川水温形成と熱収支

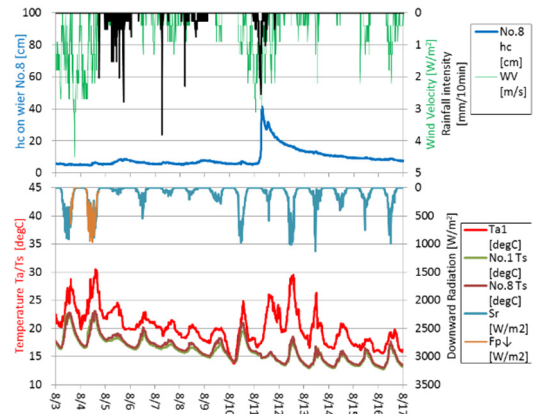


図-7 気象条件水温変化 (2014年)

(h_c : 下流端限界水深, T_a : 気温, 放射は日射量, 一部放射収支を示す。水温 T_s は上下流端No.1及び8の水温を示す。)

った。現地での10時から14時にかけてはいずれの区間も日射が水面に入る条件であるが、その前後は地形の影響で影が差す部分が発生する。

水温計測は2014年8月2日～18日に下流区間のみ、2015年7月12日～8月31日には2つの区間において実施した。図-2の観測点に水温自記計(Onset社HOBOペンダントロガーUA002)を温度補償作業の上、ペグなどで水深中間深さに設置した。気象計測はDavis社Vantage Pro2を河道脇に設置し、風速(高さ2m,10分平均)、1mでの温湿度、日射強度(一部期間放射収支計測)、雨量強度をそれぞれ10分間隔自動記録した。ただし、気象と水温を同時並行計測できた期間は、2014年8月2日～17日、2015年8月14～16日に限られた。

2014年の同時計測期間の気象と下流区間上下流端の水温変化を図-7に示す。雲の少ない晴天で流量の少ない8月3,4日および10日の水温が20℃を超えており、オショロコマの生息環境として厳しいことがわかる。

図-8に、2015年8月15日の上下流区間の水温計測の詳細について示す。上流無堰堤区間では瀬の下流部でやや日射に対する応答があるが、区間全体での変動幅は0.5℃程度と小さい。一方で下流部では、多くの地点で、日射への反応が強く、流れの深い部分や上下流での変化は緩やかで、流程全体で上流から下流にかけて1.5℃ほどの上昇をみせていることがわかる。

4. 流路部における水温上昇に関する簡易分析

2014年の下流区間は高密度で水温計を配置したことか

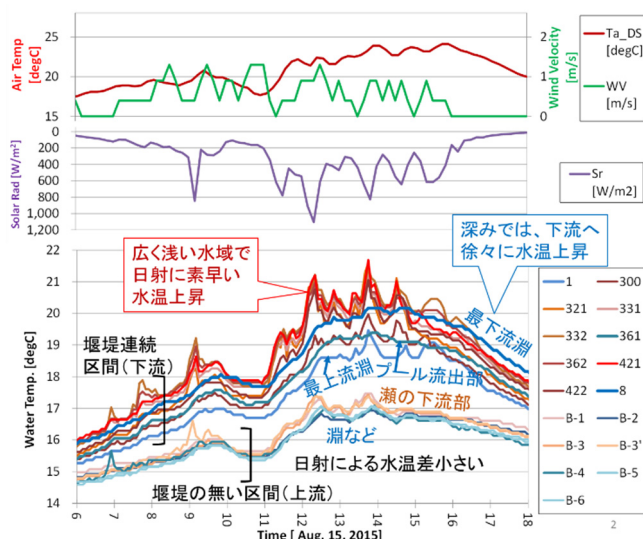


図-8 気象条件水温変化 (2015年)

(Ta:気温, Sr:日射強度 (短・長波), WV:10分平均風速)

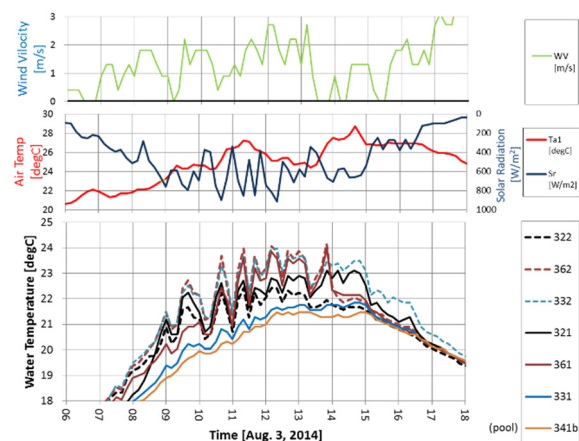


図-9 下流区間堰堤②③の水温変化 (2014年)

ら、堰堤②③間の水温変動を図-9に見る。この区間では分派しており、右岸水路部(322,362,332)は強い水温応答を見せ、傾きは332と362において 0.00330 および $0.00301^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ で少流量で浅く広い水面を持つためとみられる。日射が弱くなるとすぐに低下するのは、プール部のまだ冷たい水が上流から供給されるからであると考えられプール部での混合が全体水温を決める重要な要素の一つであると言える。主流部では水温の場所ごとの分布が大きく、主流部では水温変化の小さい場所がある(331の感度は $6.01 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$)。

各地点のプール部との水温差を強い日射による上昇量と仮定し、日射強度との関係を図-10に示す。水温上昇は日射以外にも図-6の要素が含まれ、特に潜熱・顕熱の輸送 (今回の気象条件では前者は冷却、後者は加熱) の風による影響を例えば文献10)の様に輸送係数を用いて評価するのが望ましい。ただし、周辺地形が複雑であり、バルク係数を理想的に適用できる条件にはない。本稿ではこの評価は別に置き、日射による影響を取り上げる。

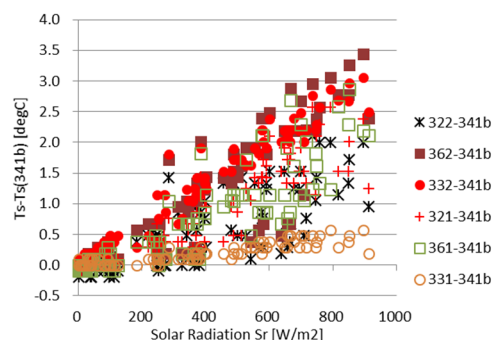


図-10 各地点水温のプール部(341b)との差と日射強度(2014年)

この図の傾きを、日射強度に応じて生じたプールの流出から水温上昇量 ΔT であるとする、プールから観測点上流の流れ場において、区間水面上の面積 As と有効入射強度 $Rn=Sr(1-\alpha)$ (アルベド考慮、日中の一部観測値(図-7)に基づき日中の長波の放射収支は無視した)、同区間の流量 Q から、熱収支 $\rho l Q \Delta T=As Rn$ により $\Delta T/Sr=(1-\alpha)As/\rho l Q$ と表される。水の比熱容量 l 、密度 ρ 、アルベド $\alpha=0.07$ 、および測量・流量観測の結果を用いて算出した。左側の主流では流量 $0.0277\text{m}^3/\text{s}$ を用いると331の地点で感度は $7.20 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ となり、右分派流量 $0.00723\text{m}^3/\text{s}$ の感度は332地点で $0.00276^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ となった。2割程度の上下の差はあるものの、同じオーダーで説明でき、日射が支配的な温度環境であることが明らかになり、図-4右上のカスケード的な日射を受ける流路とプール部混合の繰り返し構造での水温形成と推測された。

ここで、滝落ち部での落下の間の水温変化は無視できると考え、現地にてマニュアル計測したところ、落下前後での水温変化は検出できなかった。しかし、蒸発による周辺大気のコールド効果など一般によく言われている効果のオーダーを知るため、5章にて実験を行う。

5. 滝落ちにおける水温変化への影響

上記では、滝落ち部での温度変化が無視できると仮定して議論を行った。本章では現地のマニュアルによる観測では検出できなかった滝落ち落差部での水温変化について、小規模な屋外実験を行い、気象条件による水温変化の程度と簡単な理論的検討と合わせて議論する。

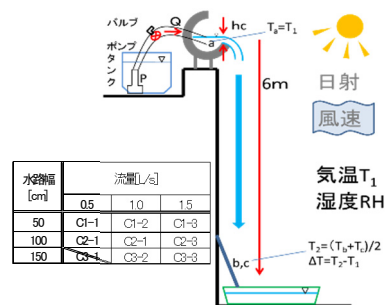


図-11 実験概略図と条件

(1) 実験方法

実験装置の概略は図-11のとおりである。高落差のある砂防ダムのように水を滝落ちさせるために、高さ6m

の位置に越流部（a点）を置き、ポンプを使いタンクから水を流し込み溢れさせた。越流部は15cm前後の塩ビパイプを使用して全周の1/4を切り取り、幅1cmの薄板の水平な張出しを設けて越流させた。自由落下運動を仮定した落下時間は1.1秒である。図-11中表のように水路幅と流量を変化させた。発泡スチロール板上に落とし、b、c点として水温観測点とした。各点の水温 T_a 、 T_b 、 T_c を熱電対ケーブルを設置して時系列モニタを行い、安定した時間帯の水温を記録した。落下後水温（ T_b 、 T_c ）の平均値から落下前水温 T_a を引いた水温差 ΔT を水温変化量として捉えた。影響を与える気象条件については、日射・風速についても計測したが機器の不調により、気温・湿度による整理のみを行った。各ケースでの気温と湿度は各ケースの実験の前後の計測を行いその平均値を取った。

表-1 実験時間帯の平均値

日付	天候	気温[°C]	湿度[%]	飽差[hPa]
7月27日	晴れ	34.0	55.5	23.7
7月29日	晴れ	35.6	48.2	30.1
9月04日	晴れ	29.6	44.0	23.2
9月15日	曇り	28.6	40.6	23.2
9月28日	晴れ	29.6	28.9	29.6
10月05日	曇り	23.3	37.6	17.8
10月19日	晴れ	24.4	42.1	17.7
11月09日	曇り	20.2	79.3	4.9
11月16日	曇り	20.2	47.7	12.4
11月23日	曇り	17.7	63.6	7.4

(2) 実験結果と考察

実験日とその主な気象条件は表-1のとおりで、気温は17.7～35.6°Cであり、湿度は28.9～79.3%であった。気温が高く乾燥した日は9月28日であり、11月9日が最も湿度の高い日であった。

落下の様子であるが、膜状に落下するのは1m前後までであり、着地時にはすべてが粒状に至っていた。

水温差を縦軸に、横軸と凡例に種々の影響要素を置いた結果を示す。図-12左は、水温に対する気温の差である相対気温 $T_0 - T_1$ を横軸とし、凡例を限界水深別に分けて示したものある。水温 T_1 は落下前の水温 T_a を採用している。図-12右は湿度を横軸として着目した図である。

ほとんどのケースでは気温が水温よりも高いにも関わらず、落下前後で水温は低下した。相対気温が8°Cを超えないと水温は上がりづらく、湿度が低いほど水温は下がりやすい結果がみられた。限界水深の変化（単位幅流量）は、水温変化へほとんど影響しなかった。

ここで、蒸発のしやすさに影響する物理量として飽差（飽和水蒸気圧 e_s とその場の水蒸気圧 e の差）を横軸にとったものを図-13に示した。RHは相対湿度(%)である。

$$e_s - e = e_s(1 - RH/100) \quad (1)$$

$$e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5 \times T}{T + 237.3}} \quad (2)$$

図-13を、相対気温別にみると飽差の値が大きいと水温が下がりやすい結果がみられた。その上で、相対気温が高い程プロットが上がる傾向がある。潜熱による水か

ら空気中への熱量輸送による冷却効果は、飽差10hPaに対し水温が1°C弱低下、また、顕熱（伝熱による加熱効果）が空気中から水への熱量の輸送は、相対気温の1/3倍ほど上昇させる事が見てとれる。水表面での蒸発速度は風速（この場合は落下速度）と飽差の積に比例することから、ここでは潜熱による変化を飽差に比例させ、顕熱も相対気温に比例させた式に誤差最小で回帰させると、次式を得た。

$$\Delta T = 0.272(T_0 - T_1) - 0.084(e_s - e) \quad (3)$$

再現される水温差と実測値を比較すると図-14のようになった。全体として説明できるものの、0.5°C前後までは誤差がある状況である。

潜熱の飽差に対する傾き0.084°C/hPaについて、仮定を置きながらも理論的に検討した。図-15のように、水が

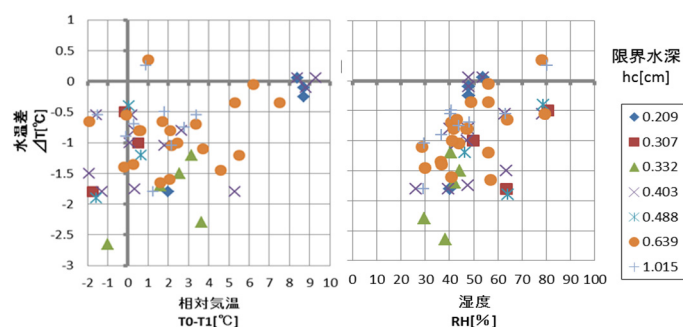


図-12 水温変化相対気温・湿度の関係（限界水深別）

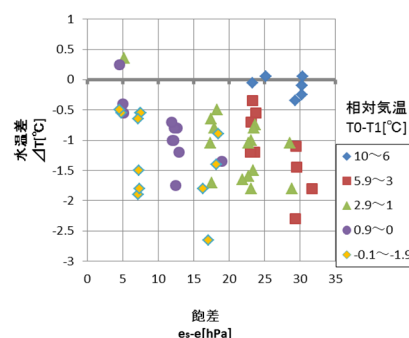


図-13 水温差と飽差（相対気温別）

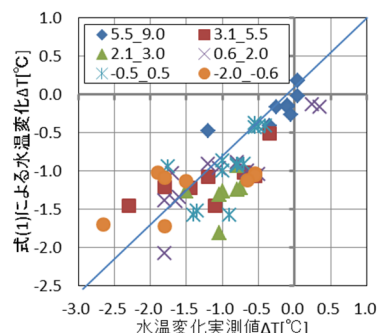


図-14 式(1)による再現結果と実測値の比較

落差6mを1.1秒で自由落下運動するとし、実際の現象では1mほど膜状落下して粒状に移行したが、ここでは落下直後から直径2mm球形状に落下するものとし、その落下平均速度≒粒回りの風速 $v=5.64$ m/sと仮定した。蒸発

速度の係数 β のみ未知パラメータとして計算したところ、 β の文献値⁹⁾の3.48倍であることがわかったが、この参考値は湛水面からの蒸発で上空の風速を見る仮定で条件が異なる。実験では水粒周りの風速が大きいために蒸発速度が大きく評価されたこと整合している。

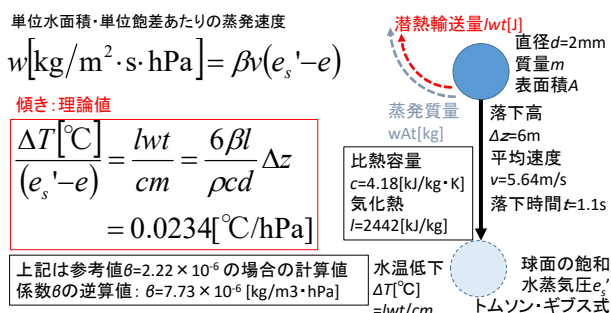


図-15 滝部の水粒の潜熱による冷却効果

(3) 現地での滝部分に関する考察

現場のスケールに戻してこの効果について考察する。例えば落差が2m(実験の1/3倍)では平均速度が3.2m/s、落下時間は0.65s(同59%)となり式(3)の潜熱の冷却効果の係数は上記の式上で36%の0.0302に減少する。顕熱も接触時間役6割に減ることからの顕熱の係数は気温と水温差に対して0.160倍の上昇効果に抑えられる。

そして、実験では2mmから1cmの限界水深での落下条件であるが、現場では3cm以上である。体積当たりの表面積(立体に見た径深の逆数)は小さくなり、顕熱、潜熱ともに現象スケールの逆数の比のオーダー(1/5倍程度)に抑えられると考えられる。よって、上記の落差が小さい効果も合わせると、水温では1°Cに近いオーダーの変化は期待できない。また、膜状から粒状への分裂が十分に発達しないまま滝つぼに落ちていることも体積当たりの表面積は増えないことも同様となる。

6. まとめと課題

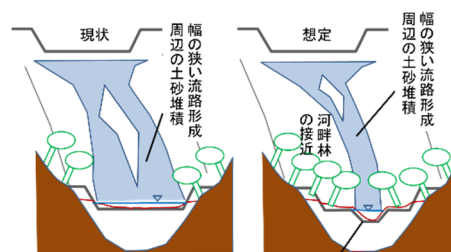
本研究からは、以下を結論として得た。

- ・連続堰堤区間と通常区間を比較した結果、堰堤直上部の幅広い流れ場の日射による水温上昇が大きく、区間での水温上昇幅を大きくする要因であると考えられる。
- ・連続堰堤区間での流れ場は、縦断方向に大きく4つの場に分けられる。平たい流れ場では速やかに日射にตอบสนองして水温上昇するが、プール部の混合により下流では徐々に水温上昇し全体として加熱する構造である。
- ・区間での日射による水温上昇が抑えられるためには、河畔林等による入射の抑制、受光面積を小さくするための水面幅の狭い流れ場、通過時間を小さくする断面積の小さい流れ場、が必要である。また、左右岸地形や植生(河畔林)による入射面積の評価とその効果の検証が必要である。(図-16)
- ・滝落ち部の小規模実験では、真夏の昼間は、顕熱による上昇よりも、気温の高さが飽差も高くすることで蒸発による潜熱冷却の効果が大きく表れた。

・現場スケールでの滝落ち部での現象は、低落差や限界水深(単位幅流量)の大きさにより、実験で現れた水温変化より圧縮され、現地では検出されにくい。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

- ・滝落ちがプールに空気連行することによる水温変化への影響は明らかではない。
- ・水温上昇を抑制する流れの自己形成(流れ場・土砂輸送の作用系)を考慮した堰堤形状等の検討(図-16)。



土砂水理学的検討の必要性 ← 切り欠きの幅と深さの設定

図-16 日射の効果を抑制する砂防堰堤形状の検討

謝辞

本研究は科学研究費(基盤研究(b))「世界遺産・知床の自然を脅かす気候変動とダム: 冷水性サケ科魚類の応答と保全策の提案」(代表: 河口洋一)の助成を受けた。

参考文献

- 1) 谷口義則・中野繁: 地球温暖化と局所的環境攪乱が淡水魚類群集に及ぼす複合的影響: メカニズム, 予測そして波及効果, 陸水学雑誌, Vol.61, pp.79-94, 2000.
- 2) Nakano S., F. Kitano and K. Maekawa: Potential fragmentation and loss of thermal habitats for charrs in the Japanese archipelago due to climatic warming, *Freshwater Biology*, Vol.36, pp.711-722, 1996.
- 3) 北海道森林管理局: 平成25年度知床半島におけるオシロコマ生息等調査事業報告書, 2014.
- 4) 北海道森林管理局: 平成26年度知床半島におけるオシロコマ生息等調査事業報告書, 2015.
- 5) 谷口義則・岸大弼・河口洋一: 知床半島東西両岸の37 河川における河川性サケ科魚類個体群の現状—特に河川工作物の影響を中心に—, 知床博物館研究報告, Vol.23, pp.37-46, 2002.
- 6) 谷口義則・岸大弼・三宅洋・河口洋一・岩田智也・三橋弘宗・野崎健太郎・村上正志・西川絢子・加藤千佳・中野繁: 知床半島の河川におけるオシロコマおよびサクラマス個体群の現状. 知床博物館研究報告, Vol.21, pp.43-50, 2000.
- 7) Kishi, D., Murakami, M., Nakano, S., & Maekawa, K.: Water temperature determines strength of top-down control in a stream food web. *Freshwater Biology*, Vol.50, No.8, pp.1315-1322, 2005.
- 8) 斜里町立知床博物館編: 知床の地質, 北海道新聞社, 2009.
- 9) 上田政文: 湿度と蒸発—基礎から計測技術まで, 新訂 農業気象の測器と測定法, 日本農業気象学会編, 2000.
- 10) 近藤純正: 水面のバルク輸送係数, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.3, pp.50-55, 1992.

(2016. 4. 4受付)