

# 河川減水域における水温構造の決定要因に関する研究

長岡技術科学大学建設工学課程4年 武田 渚  
指導教員 細山田 得三

## 1. はじめに

河川環境を考慮する上で水温は重要な検討項目である。魚類の生息適温の上限は 28°Cとされている。ダム等の取水により、減水区間が生じた場合、夏季に河川水温の上昇が顕著となる場合がある。河川の減水区間とは、人為的な行為によって河川水が減少している区間である。

河川水は静水状態ではないため、運動方程式を解く必要がある。河川の運動を解く方法には空間的に1次元、2次元、3次元の運動方程式があり、いずれも連続条件式（質量保存）と連立させて解くことになる。水温の時空間分布は基本的には熱エネルギーの移流・拡散方程式であり、前述の2つの方程式と連成させて3つの方程式（連続式、運動方程式、熱エネルギーの移流拡散方程式）を解くことによって求められる。水温の問題は、河川の数値計算の問題とは異なり独特の困難さを有しているように思われる。具体的には1) 多くの経験式が用いられている、2) 気象データを用いる必要があるが、遠方にあり代用できるかどうか不明である、3) 過去の資料を引用したり、経験則を使う場合、参照資料に誤植がないかチェックできない、4) どの量がどの程度の感度を持っているか把握しづらい、5) 水面上の樹木の被覆率（太陽の直達放射への影響）など、データとして取得することが不可能に近いなどの問題である。

本研究では、あらためて水温環境を決定する諸要因に対する既往文献調査を行い、その特徴について調べた。さらに熱流入・流出に関する経験式のレビューを行い、その特性を調べるとともに、それらを使った簡易的な数値シミュレーションを実施し、水温環境を予測する諸要因の影響について考察した。また、夏季には実験水槽による太陽光への暴露実験を実施して、太陽光および大気から入射する種々のエネルギーによる水槽内部の温度構造の変化を調べた。

## 2. 水温環境を決定する要因に関する文献調査

### 2.1 熱収支計算についての文献調査

本研究は、前述したように、既往の熱輸送計算について、例えば運動量や質量の保存と同程度の厳密さで計算が行われているかや疑問を感じるものが動機となっている。熱収支計算は河

川減水域における熱環境を予測するために重要なものである。しかし、文献、テキスト、参考書によって温度収支を表す計算式の表記が異なることがある。その違いに関して同等性を確認することは困難な面があり、また、基本的な考え方が異なる場合やその資料を引用しても変数の説明が欠落したりして計算が実行できない場合もある。河川減水区間においては日照をはじめとする様々な気象要素が影響を与えていることが予想される。河川水温変化の結果を正しく得るためにも、正しい熱収支計算式を引用する必要があると考える。そこで、8冊の参考書を用いて温度収支計算式に関する文献調査を行った。

各参考書において共通することは、実際に数値を入れて計算ができるかどうか不明確であるということである。また、式の表記が等しい場合であっても地中熱伝道を考慮しているか否か、参考書によって異なるため、定義が一樣ではないといえる。反射率のアルベドに関しては、数値については触れられていない参考書や、おおよその値で解決している参考書が見られる。数値計算においては、定義の違いが結果に大きく影響してくるため、不適切であると考えられる。河川水温の数値計算においては、これらの温度収支計算式の見直しが必要であると考えられる。

### 2.2 ダムと河川水温関係についての文献調査

取水施設を設けて河川水を河道外に輸送するためにはダムや堰、落差工といった河川横断構造物を設ける必要がある。そのようにして一時的に河川水を滞留させ湛水域を作り、河川水の取水を行う。ダムは河川の平均水深よりもかなり水深が深く、河川水表面から入射する熱エネルギーが水面に局在化することや、水面付近の水温が高くなることで密度の軽い水が上方に、重い水が下方に集中することで安定成層となり、鉛直方向に強い温度成層が形成される。ダムから下流に対して放流した水温が下流の減水域の水温を決定するための境界条件になっている。ダムの水温環境についても既往研究について調べておく必要がある。

既往の研究では、冬季以外はダム湖の水温分布特性として水深が深くなるほど水温が低下し

ていることが示されている。一方、ダム湖の水深の小さい場所と、放流水温がほぼ一致するという示されている。これにより、ダム湖の水深が大きい場所の水温と放流水温はどのような関係が生じるのかを明確にする必要があると考える。また、減水区間での河川水温の変化が、通常状態の河川水温の変化よりも顕著に表れるのかを解析する必要があると考える。

### 3. 自然環境下で円筒水槽に流入する熱と水温分布

#### 3.1 観測の概要

自然状態の水塊が自由水面を通して熱を加えられた場合、どのような温度環境を示すかを調べることは、河川減水域の水温環境を調べる上で基礎的な知見を与えるものと思われる。特にできるだけ複雑な条件を含まない単純な状況での熱の輸送を調べることが確かな知見を得るための手始めとなる。

本研究では直立した塩ビ製(内径 13cm, 塩ビ厚 4mm, 高さ 50cm)の円筒に水を入れ、側面と底面からの熱の流入を極力遮断した状況で長時間室外に暴露する実験を実施した。

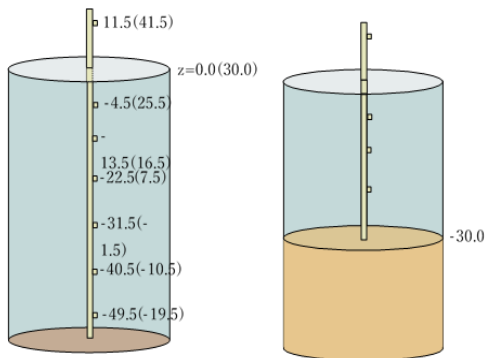


図-2 塩ビ製円筒水槽内部の模式図



図-3 断熱材で被覆した塩ビ円筒水槽の設置状況

#### 3.2 観測の結果

図-4には観測された水温の鉛直方向分布の時間変化および一部についてアメダスデータの気温と風速を比較のために示す。このカラーコンターは、横軸が時間、縦が鉛直方向座標であり、1次元の温度分布の時間方向の変化を示している。いずれも最上段は円筒水槽上面(水面+11.5cm)の気温である。円筒水槽上面から入射した熱エネルギーがほぼ分子拡散によって鉛直下方に伝搬している。水槽内部は水を混合させたり対流を引き起こしたりする要因はなく、風による水面付近の乱流の混合は顕著ではないものと推測される。また当然ながら、日中の加熱期と夜間の冷却(減熱)が交互に現れていることがわかる。

図-4 上段については7月下旬(7.21-28)のデータとアメダス(風速・気温)データを示す。7月22,23,24,25日付近には気温が低く、風速がやや強めで風速変動も見られる。この時期の範囲のうち後期は長岡市に洪水警報が発令されており、雨が水槽内部に侵入し、かつ風速変動によって温度の拡散が強まったため、水温が低くかつ円筒水槽内部で一様化している。洪水が終息したあとの好天で温度成層が再度形成されている。

図-4 下段では7.29~8.11の間の変化を示しており、この時期は大きな気象擾乱もなく、安定的に加熱・減熱が繰り返されている。地盤内部の温度分布は水部よりも鉛直方向の温度差が少ないことがわかる。

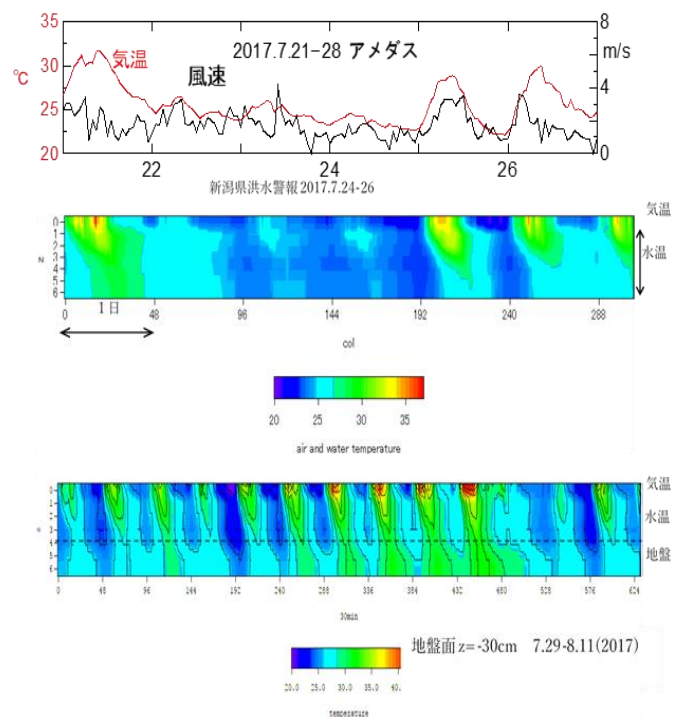


図-4 水温の時空間変化

図-5 はこれらのデータをあらためて時系列として表示したものである。水温分布と気温分布はほぼ完全に対応しており、河川減水域での水温を決定する要因として気温が寄与していることは間違いない。しかしながら、一方で気温と水温の差による熱移動、すなわち顕熱が有効なのか、長波放射か、あるいは直達放射（太陽光）によるものなのか不明である。

また、河川減水域の水温に対して最も寄与率が高いのは重回帰分析の結果このような太陽放射ではなく、流入流量であるという見解も示されており、減水域に入射する熱エネルギーの寄与率がどの程度なのかについて今後とも検討する必要があると思われる。

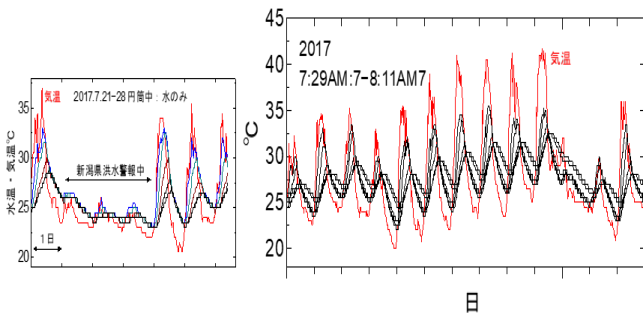


図-5 気温、水温、地温の観測値の時系列

#### 4. 1次元の熱伝導方程式の計算

自然界における河川・湖沼・海洋における熱輸送および水温環境を予測する手法は基本的には流体運動と熱輸送方程式を連成させて熱の時空間における再分布を求め、密度と比熱を除くことで水温の時間発展を求める。本来は、流体運動による熱の発生（乱流のエネルギー散逸など）や連続条件式に対して非圧縮性の仮定を用いない、など高度な手法を用いることが求められるが、自然界における水温の範囲が0~30°C程度に限定されることや流速が速くても数[m/s]程度という条件の範囲では非圧縮性の近似を用い、境界からの熱の流入出と流れと拡散による熱の輸送に限定して解析をすることが許容されるものとする。そのため、使用する方程式系は非圧縮性の連続式、NS方程式、熱（温度）の輸送方程式の3本に限定する。

以下に鉛直方向の水温分布の時間変化を示す。上端が水面に、下端は水槽底にそれぞれ対応し、左端は7月1日午前6時の計算開始時点に、右端は8月15日に対応している。初期水温分布はいずれも14°Cで一様としており、水槽下部の20cmは土砂となっている。気象条件はアメダス（長岡）の1時間間隔のものを利用した。雲量0，比湿0.00622，透明度が上より1,4,8[m]のデータを示す。以下の水温の時空間構造は

図の上端部の変動は昼夜の変動であり、45周期の変動が加えられており、その円筒水槽内部の水温変動が示されている。7月下旬は洪水警報が発令されるなど、やや低温傾向だったことを反映して水温の上昇は小さいが8月初旬（計算2週目以降）では徐々に加熱が進んでいる。

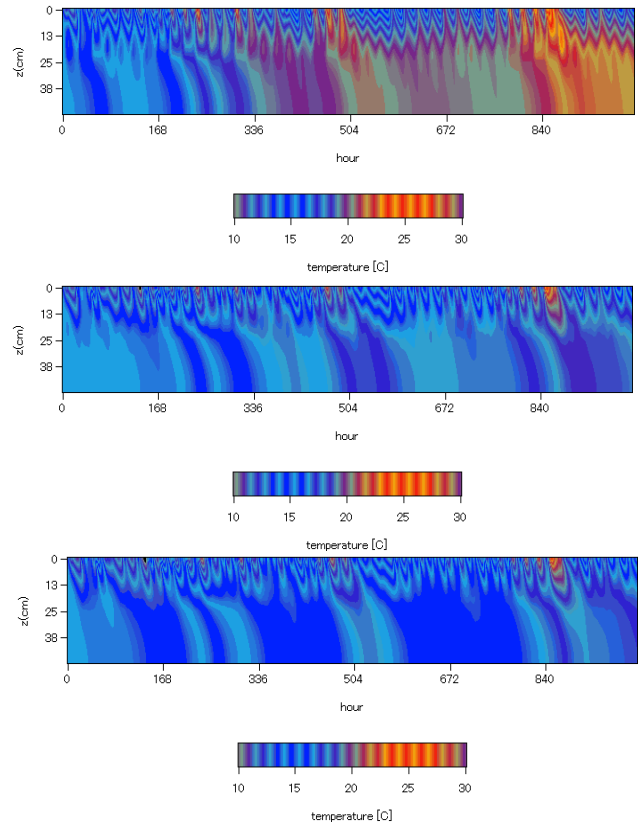


図-6 水温の時空間構造

日中の変動が顕著に表れているのは最大で水深25cm程度であり、それよりも下部は昼夜変動の影響が小さく、長期的な季節変動を受けてゆっくり加熱されている。また等温度線は下部に向かって右に傾斜しており、下部には時間遅れで到達していることがわかる。

上記の比較は透明度によるものであり、上段側の透明度が低いほど水温が高くなっている。透明度が低い場合、深部への直達放射は減少するが、その分、水面付近に熱が滞留し、その熱が拡散によって深部に伝えられるという過程によって加熱されているものと思われる。

図-7は透明度と水温の関係を表す事前調査の結果である。透明度Dsが小さい場合、水面から入射した太陽光は水深深くに到達できず、鉛直方向に急激に減少している。透明度を徐々に上げていくと光が深部にまで到達している。その結果、水温上昇（1時間後の水温上昇量ΔT）は透明度が小さいほど、深いところと、浅いところ

ろの差が大きくなり、透明度が大きくなると水温の深淺方向の差が小さくなり一様化している。河川減水域は表層の薄くて透明度の高い部分と下部の高濁度（低透明度）という近似に近い短波放射の環境になると思われる。透明度が鉛直方向に急激に変化する場合の計算を考慮していく必要がある。

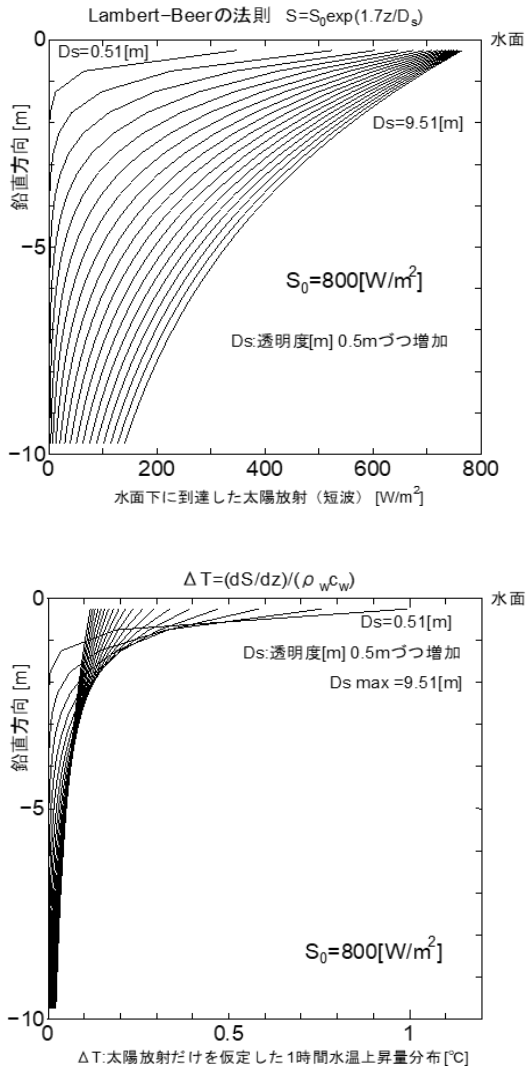


図-7 透明度の変化に対する水温環境の変化

## 5. まとめおよび考察

本研究によって河川減水域における水温環境を予測するための計算式の確認とそれらに含まれるパラメータの感度について概略を把握することができた。特に計算式が持つ水温環境への影響力について知見を得ることができた。熱流入の式から推定されるように、雲量、比湿の上昇が水温の上昇、透明度の下降が水面付近の水温の上昇およびそれに伴う水域全体の水温上昇に作用することを確認した。また雲量についてできるだけ現実のデータを使う必要があることが分かった。また水部の下部に位置する飽和土

砂の水温環境は比熱や密度を考慮した結果、温度拡散係数が水のおよそ2倍程度であり、それを考慮した数値計算や室内実験でも定性的に確認することができた。

観測と計算の定性的な一致は確認できたが、定量的な一致性については確認できていない。その理由として、両者を一致させるための未知パラメータの推定という障害があるからで、いわゆる逆問題（結果からパラメータを推定する問題）を考えることが、今後の検討課題である。本研究によって熱環境の予測に関する種々の計算式の全体的な感触をつかむことができたと考えている。今後は、ダムに流入する熱の水温への影響を調べる数値計算を行い、河川減水域に流入する与条件としての熱量について検討していく。

## 参考文献

- 1) 宮中取水ダム試験放流検討委員会総括報告書
- 2) 細山田得三, 金城雄也「河川減水域における流れと水温輸送に関する2次元モデルの適応」長岡技術科学大学 工学研究科修士論文
- 3) 細山田得三, 増山亮輔「河川減水域における熱環境の変動特性および水温予測のための平面2次元数値モデルの開発」長岡技術科学大学 工学研究科修士論文
- 4) 国土交通省, 北陸地方整備局, 信濃川河川事務所, 信濃川中流域水環境改善検討協議会 [www.hrr.mlit.go.jp/shinano/shinanogawa\\_info/mizukan/index.html](http://www.hrr.mlit.go.jp/shinano/shinanogawa_info/mizukan/index.html) (2018/1/25)
- 5) 室田明, 道奥康治 「積分成層模型による貯水池水温構造の解析に関する研究」土木学会論文集 第369号/II-5 1986年5月
- 6) 藤田博行, 岡部健士 「ダム減水区間における水温分布の再現モデル」土木学会支部論文集 四国支部技術研究発表会講演概要集 vol.10 2004年 102-103
- 7) 落合雄太, 梅田信 「複数のダム湖を対象とする水温構造の検討手法について」土木学会支部論文集 東北支部技術研究発表会講演概要集 vol.48 2011年 II-60
- 8) 金子新, 武正治, 横田洋文 「南畑ダムの水温変化について」土木学会支部論文集 土木学会西部支部研究発表会講演集 1976年 113-114
- 9) 岡部健士, 竹林洋史 「正木ダム減水区間における水温分布特性とその改善案の検討」土木学会委員会論文集 水工学論文