# G P V を利用したダム下流河川における 河川水温管理モデルの提案

A PROPOSAL OF STREAM TEMPERATURE MANAGEMENT USING GPV AT THE DOWNSTEAM FROM A DAM RESERVOIR

> 梶川勇樹<sup>1</sup>・矢島啓<sup>2</sup>・檜谷治<sup>3</sup> Yuki KAJIKAWA, Hiroshi YAJIMA and Osamu Hinokidani

<sup>1</sup> 正会員	博(工)	鳥取大学助教	工学部土木工学科	(〒680-8552	鳥取市湖山町南4-101)
<sup>2</sup> 正会員	博(工)	鳥取大学准教授	工学部土木工学科	(〒680-8552	鳥取市湖山町南4-101)
<sup>3</sup> 正会員	工博	鳥取大学教授	工学部土木工学科	(〒680-8552	鳥取市湖山町南4-101)

It is very important to predict the influence on the downstream from a dam reservoir by the effluent because of the river environmental protection of the future. In this paper, the stream temperature management system at the downstream from a dam reservoir was proposed. The 1-dimensional numerical model by the MacCormack scheme was used for prediction of the variation of the stream temperature, and the simple formula of the streambed heat transfer was introduced into the heat transfer equation in this model. The validity of the numerical model was shown from the simulated results for the field observation. Moreover, the applicability of the numerical model using the GSM-GPV was examined, and the stream temperature management system using the GPV was proposed.

Key Words : stream temperature, dam reservoir, numerical model, streambed heat transfer, GSM-GPV

# 1.はじめに

一般にダム貯水池における問題点として,微細粒子の 長期浮遊に伴う濁水の長期化,富栄養化によるアオコの 大量発生,および受熱期の水温成層形成に伴う低層の冷 水化・貧酸素化等が挙げられる.一方,ダム下流河川に おいては,ダムより放流された濁水,冷水の流下により, 河川環境への影響が懸念されている.特に,冷水放流問 題については,下流部の農林水産業へ冷水害をもたらす とともに,河川生態系へ大きな影響を与えることが知ら れている<sup>1)</sup>.近年では,ダム建設に伴う河川流量の減少 により,河川水温の異常昇温問題も発生している<sup>2),3)</sup>.現 在,鳥取県東部に位置する千代川水系袋川に建設中の殿 ダム貯水池においても同様の状況が発生する恐れがあり, 今後のダム下流河川における水質・生態環境保全の観点 からも,予めダム放流水の流下に伴う影響を予測し,評 価できるシステムを構築しておく必要がある.

このようなダム放流水による下流河川への影響を予測 評価する場合,まず,河川水質項目の中で最も重要とさ れる河川水温を精度良く予測する必要がある.従来より, 河川水温の再現・予測に関する研究は数多く行なわれて

おり,現在のところ,河川縦断方向における時空間的な 水温変動を高精度に再現できるまでに発展している<sup>2,5)</sup>. ところで,このような河川水温のモデリングに関しては, 熱収支要素の評価に河床伝熱量を無視している場合が見 受けられる3,4,これは,ある程度以上の水深になると河 床伝熱量の影響が小さくなる<sup>2)</sup>という点に起因している が,本研究で対象とする袋川は比較的急峻な山地河川で あるため, 平水時の水深はかなり浅い. 従って, モデル の構築に当たっては河床伝熱量の考慮が不可欠となるも のの,熱伝導方程式等の導入5,0は河床地温が得られてい ない場合にその適用が難しい.さらに,従来の研究では, 予測モデルの妥当性の検討<sup>2),5)</sup>あるいは河川環境の変化に よる影響評価<sup>3),4)</sup>という観点から,過去の観測水温との比 較を目的として,気象データには観測に基づく既知の データを使用している.しかし,本研究では,ダム放流 水による下流河川への影響を事前に予測できるシステム の構築を最終目標としているため,システムの妥当性に ついては予報された気象データによる検討が必要となる.

以上より,本研究では,まず山地河川などの浅水流場 でも河川水温を再現できる数値計算モデルの構築を行う. その際,河川水温に対する河床伝熱量の特性から,河床 伝熱量の簡易算定式を導入する.次に,ダム放流水によ



る下流河川への影響予測を想定し,予報気象データとし てGPV (Grid Point Value)と呼ばれる気象庁が公開して いる気象の客観解析値を用いたモデルの適用性について 検討する.最後に,最終的なダムサイトでの操作支援シ ステムを視野に入れた河川水温管理モデルを提案する.

## 2.対象河川の概要と水温モニタリング調査

図-1に本研究で対象とした袋川の概要を示す.袋川は, 鳥取県東部を流れる1級河川千代川の支流であり,流路 延長は28.4km,流域面積は95.5km<sup>2</sup>である.図に示す本 川 :殿での河床勾配は約1/50であり,本川 :宮ノ下 でも約1/100と比較的急勾配な河川である.現在,本川 :殿(千代川合流点より上流14.8km)において,平成

23年度の完成予定に向け殿ダム貯水池が建造中である. 水温調査は,2005年9月~11月期に実施した.対象区間 は,図-1に示す本川 :殿から本川 :宮ノ下までの約 10km区間とし,本川4ヶ所,支川4ヶ所に水温計を設置 した.水温計測には,メモリー式小型温度計(Onset社, StowAway Tidbit)を用いた.図-2に観測期間における宮 ノ下地点のハイドロ・ハイエトグラフを, また, 図-3に 本川水温および気温 (鳥取地方気象台)の時間変動をそ れぞれ示す.まず,図-2より,観測期間内では10月23日 に中規模な出水が発生し,その後は出水以前よりも比較 的流量の多い状態が継続している.図-3を見ると,出水 が発生した23日以降,上下流での水温差が小さくなって いることが分かる.これは,流量増加に伴う影響と考え られ,日最高最低の水温較差および気温較差による過去 の検討から,袋川では殿での流量が2m<sup>3</sup>/s以上になると 上下流での水温差が小さくなることが明らかにされてい る<sup>7)</sup>.また,図-4は支川 および支川 の水温と気温と の相関を取ったものである.ただし,図は気温上昇に伴



う水温上昇の時間遅れを考慮し,支川 では気温測定時 刻から3時間遅れ,支川 では2時間遅れで相関を取って いる.図から分かるようにその相関は高く,また,その 他の支川についても時間差を考慮することにより高い相 関が得られた.従って,GPVを用いたシステム構築では, 図に示される回帰式より気温から支川水温を推定する.

#### 3.河川水温予測モデルと計算方法

#### (1) 1次元流れの基礎方程式

流れの基礎方程式には,以下の1次元不定流の連続式 および運動方程式を用いた.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{tr} \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \left( \frac{\partial H}{\partial x} + i_f \right)$$
(2)

ここに, t:時間, x:流下方向座標, A:流積, Q:流水 流量,  $q_t$ :流路単位長さ当たりの側方流入流量, g:重 力加速度, H:水位,  $i_f$ :エネルギー勾配であり, エネル ギー勾配 $i_f$ についてはマニング則より算定した.

### (2) 1次元熱収支方程式

河川水による熱の移流・拡散については,以下の1次 元熱収支方程式を用いた.

$$\frac{\partial}{\partial t} (A\theta) + \frac{\partial}{\partial x} \left( Q\theta - AD_t \frac{\partial\theta}{\partial x} \right) = \frac{bH_T}{c_w \rho_w} + q_{tr} \theta_{tr}$$
(3)

ここに, $\theta$ :水温, $D_t$ :流下方向の熱拡散係数,b:水面幅, $H_T$ :単位面積当たりの全熱収支量, $c_w$ :水の比熱,  $\rho_w$ :水の密度, $\theta_t$ :側方流入水温である.



図-5 各支川の流域図([]内は全流域面積に対する比率)

全熱収支量H<sub>T</sub>には以下の熱収支要素を考慮した<sup>2-6)</sup>.

$$H_{T} = Q_{S} + Q_{L} + Q_{E} + Q_{H} + H_{b} + H_{f}$$
(4)

ここに, $Q_s$ :短波放射による有効放射量, $Q_L$ :長波放射による有効逆放射量, $Q_E$ :潜熱輸送量, $Q_H$ :顕熱輸送量, $H_b$ :河床伝熱量, $H_f$ :粘性逸散による熱量である.

各熱収支要素の計算式については紙面の都合上割愛す るが,短波放射による有効放射量 $Q_s$ あよび長波放射によ る有効逆放射量 $Q_L$ にはMurakamiら<sup>8)</sup>の式を使用し,潜熱 輸送量 $Q_E$ あよび顕熱輸送量 $Q_H$ には水面蒸発散量の算定 に修正Shulyakovskiy式を用いた方法を使用した<sup>3),6)</sup>.また, 粘性逸散による熱量 $H_f$ には佐渡<sup>6)</sup>と同様の式を使用した. ただし,有効短波放射は全て水体に吸収されるものとし, 河畔植生・地形による日射の遮蔽効果は考慮していない.

最後に,河床伝熱量H<sub>b</sub>に関してであるが,厳密には Basharら<sup>50</sup>のように鉛直1次元の熱伝導方程式を解き,河 床面下の地温分布を求めH<sub>b</sub>を算定すべきである.しかし, この方法では初期地温分布が必要となり実用的ではない. 一方,佐渡らによれば,Pivovarovによる式が実用的で精 度も良いとされている<sup>60</sup>.しかし,Pivovarov式では初期 平均地温が必要となるため,本研究のように河床地温を 測定していない場合,いずれにしても適用が困難となる. そこで,本研究では,河床伝熱量の水温変動に対する減 衰作用<sup>2,60</sup>に着目し,同様の特性を再現できるよう1時間 前の水温を用いて,以下のような式で評価した.

$$H_{b}(m\Delta t) = K_{ab}\sqrt{\frac{\theta^{*}-\theta}{m\Delta t}}$$
(5)

ここに, $K_{\theta b}$ :河床伝熱量に関する係数, $\theta^*$ :1時間前に おける水温,m:1時間前からの計算ステップ数, $\Delta t$ :計 算時間間隔である.上式は,前時間との水温差を縮小さ せる方向に働き,また,Pivovarov式とほぼ同形となって いることから,適用可能であると考えられる.

## (3) 計算方法と計算条件

基礎方程式の差分化には,従来より常射流混在場で適 用されているMacCormack法を採用した.離散間隔は  $\Delta t$ =1.0sec, $\Delta x$ =50.0mとし,マニングの粗度係数はBray式 <sup>9)</sup>よりn=0.048とした.境界条件として,上流端(殿)で は流量および水温を与え,下流端(宮ノ下)では自由流 出条件とした.側方境界では,流入支川の流量および水 温を与えた.ただし,流量については,図-1に示す本川

: 宮ノ下で観測された流量に,図-5に示す流域面積比 を乗じて殿および各支川の流量を算定した.



4.河川水温予測モデルの検証

前章で構築した河川水温予測モデルについて,2章で 述べた水温観測を対象とした再現計算を行い,観測結果 との比較から本予測モデルの妥当性について検証する.

(1) 気象条件について

観測期間における気象データについては,殿および鳥 取地方気象台で観測されたデータを使用した.表-1に, 使用した気象条件と観測点を示す.ここで,殿と気象台 では130m程度の標高差があるため,気象条件に対して 標高による補正を行う必要がある.

まず,気温については殿および気象台の両地点で観測 されているため,各標高点の気温を線形補間によって推 定した.次に,気圧については標高と気温との関係より 各標高点の気圧を与えた.また,相対湿度については気 象台で観測されているものの,標高により気温が異なる ため,相対湿度も標高で異なるものと考えられる.そこ で,本研究では,空気中に含まれる水蒸気の絶対量は気 象台~殿区間で等しいものとし,各標高点での気温によ る飽和水蒸気量とその水蒸気の絶対量から各点の相対湿 度を推定した.その際,相対湿度が100%を超える場合 があるが,これらは全て100%として扱った.

#### (2) 観測期間における水位変動の比較

図-6に,本川 : 宮ノ下における観測期間の観測値と 計算値による水位変動の比較図を示す.図より,計算値 は観測値に比べて低流量時に若干水位が低く現れている ものの,出水時のハイドロの立ち上りやピーク水位,お よびその逓減傾向を良好に再現できていることが分かる.

#### (3) 河川水温変動の比較

図-7に,観測期間における本川 および本川 での観 測値と計算値による水温変動の比較図をそれぞれ示す. ここで,式(5)における*K*<sup>(()</sup>は試行錯誤的に2.5×10<sup>4</sup>として いる.図より,両観測点において計算値は観測値を良好 に再現できていることが分かる.しかし,10月1日およ び14日前後は,計算値が観測値よりも高く表れており対



応が悪い.これは,図-6から分かるように低流量の時で ある.つまり,本予測モデルでは河道横断形状に台形複 断面を想定しているため,低流量時には水深が浅く,川 幅は広く再現されてしまう.そのため,日射・気温の影 響を強く受け,水温が高く再現されたものと考えられる. このような低流量時の再現性を上げるためには,流量と 水面幅との関係式の導入<sup>4,5</sup>等が必要になると考えられる.

また,図-8に観測期間における日最高水温と日最低水 温の観測値と計算値の比較図をそれぞれ示す.図から分 かるように,計算値は概ね観測値から±1 以内で再現で きており,気象条件および河川条件による変動誤差を考 慮すれば,本予測モデルの妥当性が確認される.

## (4) 河床伝熱量式の効果について

本研究では,河床伝熱量の算定に式(5)を使用しているが,その導入効果の有無については疑問が残る.そこで,ここではその導入効果について考察する.図-9に河床伝熱量を考慮しない場合( $K_{\ell\ell}=0.0$ )の計算結果を,また,図-10に(a)晴天期間および(b)雨天期間における本川での熱収支の時間的変化をそれぞれ示す.まず,図-9より,河床伝熱量を考慮しない場合,計算値は観測値を再現できておらず,晴天期間は5以上の差が生じている.図-10(a)を見ると,河床伝熱量を考慮しない場合,水温



上昇の影響により潜熱量が大きく負の値を示している. 一方,考慮した場合にはその様な傾向は表れず,河床伝熱量は昼間には負,夜間に正となり,佐渡<sup>®</sup>による観測結果同様,水温変動を減衰させる作用を再現できている. また,図-10(b)より,雨天期間は流量・水深の増加により,河床伝熱量はほぼ無視できる状態が再現されている. ここで,図-10(a)に示される河床伝熱量が小さいにも関わらず,図-9では大きな誤差が表れている原因は,主に上流域で発生した誤差が蓄積し,下流域に伝搬したためである.上流域では河床伝熱量が大きな値を示しており, また,全有効短波放射が水体に吸収されるとしていることからも,このような結果になったものと考えられる.

以上,本研究で導入した河床伝熱量の簡易推定式に関し,定性的にはその効果を再現できることが確認された.

5.GPVを用いた河川水温管理モデル

ダム放流水による下流河川への影響予測を想定し, GPVを用いたモデルの適用性について検討するとともに, ダム操作支援システムにおける河川水温管理モデルにつ いて提案する.対象流域では出水による影響が数日程度 継続することから,ここでは1週間先までの予測を目的 とし,全球数値予報モデルによるGSM-GPVを用いた.



(1) 気象要素の推定方法について

GSM-GPVから得られる気象要素は,対象地点近傍に おける12時間毎のデータ(気圧,風速,気温,相対湿度, 降水量)であるが,本予測モデルでは毎時のデータが必 要となる.また,日射量および雲度の気象要素が不足し ているため, GPVで得られた情報からこれらの値を補 完・推定する必要がある.そこで,本研究ではまず,実 測による2005年9月~10月期におけるGSM-GPV同様の12 時間毎の気象要素を情報源とし,過去10年間(1995年~ 2004年)の気象データを用いて,2005年の毎時の全気象 要素を補完・推定できるモデルを構築した.具体例とし て,以下に2005年9月16日00:00~12:00を対象として説明 する.まず,情報源として2005年9月16日の00:00と12:00 におけるGSM-GPV同様の気象要素が既知である.次に, 16日前後3日間における過去10年間の00:00と12:00を対象 とし,次の条件: 気圧±7.5hPa, 気温±2 相対 湿度±10%, 降水量±10mm/12hrを満たす日を検索する. そして,以上の条件を満たした日の全気象要素を用い, 00:00~12:00間の毎時の平均値を算定する.最後に,2005 年9月16日00:00~12:00間の気象について,既知の要素に ついてはその平均値による補完を,未知のものについて はその平均値を推定値とする.以上のような方法である.

図-11に,上記の推定モデルにより作成した2005年9月 ~10月期における(a)気温,(b)日射量,および(c)雲度の 推定値と実測値の比較図を示す.ここで,(b)日射量に ついては,鳥取地方気象台で観測されていないため,米 子測候所との比較図を示す.図より,本推定方法により 良好に補完・推定ができていることが分かる.特に, GSM-GPVでは得られない気象要素についても推定でき ており,次節の水温予測にも以上の推定方法を使用する.

(2) GPVを用いた河川水温予測



GPVは2005年9月16日~10月10日までのものを使用した. 気象条件には,GPVおよび推定モデルによる推定値を用 いたが,日射量については,まず米子の日射量を推定し, 米子と殿での日射量回帰式より殿の日射を推定した.ま た,上流端境界では,放流量および水温は別途構築中の 予測システム<sup>10</sup>により既知であるとし,観測値を与えた.

予測結果として,図-12に晴天期間および図-13に曇天 期間における(a)気温,(b)日射量および(c)水温の比較 図をそれぞれ示す.まず,晴天期間における図-12(c)を 見ると,予測水温は4日目程度まで概ね再現できており, それ以降徐々に再現性が低下していることが分かる. 図-12(a),(b)を見ると,特に気温は5日目以降の誤差が 大きい.これは,GPVにおける長期予報の精度低下によ るものと考えられる.一方,曇天期間である図-13を見



ると,10月7日の気温予報精度の低下により,予測水温 も再現性が大きく低下している.これは,7日夜半~8日 にかけて天候が悪化し,雨天に変化した時である.した がって,天候が雨天に変化する場合は,降雨発生時刻の 予測の困難さからも,GPVによる水温予測の精度は低下 するものと考えられる.ここで,雨天後の10月9日は流 量増加の影響により,予測水温と観測値は一致している. この時の殿での流量は1.85m<sup>3</sup>/sであり,2章の観測結果よ り得られた2m<sup>3</sup>/sとほぼ一致し,その妥当性が伺える.

また,図-14にGPVを用いた計算値と観測値による日 最高・最低水温の比較図を示す.図より,日最高水温に 対してバラツキが大きいものの,これは先述の天候変化 点に当たる時である.この天候変化点を除けば,GSM-GPVを適用することにより,3日程度までの河川水温を ±2 以内で予測できるものと考えられる.出水の継続時 間を考慮すれば,この予測期間は概ね十分だと考えられ, さらに,日本周辺の狭域を対象とした数値予報モデルで あるMSM-GPVあるいはRSM-GPVを併用することによ り,その予測精度は向上するものと考えられる.

最後に,図-15に,本研究で構築した水温予測モデル とGPVによるダム下流河川の水温管理モデルを示す.ま ず,ダムサイトでは気象業務支援センター等からGPVの オンライン配信を受け,同時に放流量・放流水温等の予 測モデル<sup>10</sup>による将来予測の結果が計算条件として自動 入力される.そして,本予測モデルにより1週間先まで の河川水温予測を行い,その上で,ダム貯水池内の水質 管理を含めた最適な放流位置・放流量を決定する.現在, このようなダム下流河川への影響を詳細に予測するシス テムは無く,今後の河川環境保全の観点からも,このよ うなシステムの構築が重要になるものと考えられる.



## 6.おわりに

本研究では、ダム放流水による下流河川への影響を予 測できるシステムの構築を最終目標とし、殿ダム下流河 川である袋川を対象として河川水温予測モデルの構築を 行った.予測モデルには河床伝熱量の簡易算定式を導入 し、その妥当性について検討した.また、GSM-GPVを 用いた本予測モデルの適用性について検討し、3日程度 までならば±2 以内で予測できることを示した.最後に、 GPVを用いた河川水温管理モデルについて提案した.

謝辞:本研究で使用したモデルは,国土交通省中国地方 整備局殿ダム工事事務所からの鳥取大学における受託研 究「殿ダム貯水地内及び下流河川の水質予測評価」の研 究成果を使用している.また,GPVについては(財)日本 気象協会よりご提供頂いた.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 高月豊一:ダム築造と下流水稲田の冷水被害問題について、 土木学会誌,第46巻,2号,pp.19-23,1960.
- 近藤純正:河川水温の日変化(1)計算モデル-異常昇温と魚の大量死事件 ,水文・水資源学会誌, pp.184-196, vol.8.No.2, 1995.
- 3) 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,水工学論文集,第49巻, pp.1183-1188,2005.
- 4) 吉田貢士,宗村広昭,樋口克宏,戸田修,丹治肇:河畔林 密度の違いが河川水温環境に与える影響について,水工学 論文集,第49巻,pp.1543-1548,2005.
- Bashar A. Sinokrot and Heinz G. Stefan: Stream Temperature Dynamics: Measurements and Modeling, *Water Resources Research*, Vol.29, No.7, pp.2299-2313, 1993.
- 6) 佐渡公明:河川水の熱収支に関する基礎的研究,土木学会 論文報告集,第330号, pp.69-79, 1983.
- 7) 鳥取大学:「殿ダム貯水地内及びダム下流河川の水質予測 評価」受託研究成果報告書,平成18年3月.
- 8) 矢島啓,道上正規,檜谷治,宇田康弘:浅い汽水湖におけ る密度成層破壊の数値解析,水工学論文集,第44巻, pp.993-998,2000.
- 9) 河村三郎:土砂水理学 ,森北出版, pp.211-212, 1982.
- 10) 例えば,矢島啓,吉川栄,石黒潤:選択取水方式がダム貯 水池の長期・短期の水質保全に与える影響に関する研究, 水工学論文集,第50巻,pp.1375-1380,2006.

(2007.9.30受付)