

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

WATER TEMPERATURE IN THE DOWNSTREAM OF MASAKI DAM AND NUMERICAL EXAMINATION OF IMPROVEMENT PLAN

岡部健士¹・竹林洋史²

Takeshi OKABE and Hiroshi TAKEBAYASHI

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

This research is concerned with unnatural rise of water temperature occurring in the so-called 'decayed reach' downstream of Masaki Dam, in Tokushima Pref., Japan, where the low water discharge has been remarkably reduced due to water diversion for power generation. Characteristic of water temperature in the decayed reach is described and analyzed based on the results of field observation executed in August 2002 and 2003. It is shown that the water temperature may raise as much as 8°C from the one in the state of nature. It is also pointed out that sensible heat transfer, short-wave radiation, and lateral heat transfer from ground water under exposed gravel bars seem to dominantly affect the water temperature of the observation reach. A one-dimensional mathematical model to simulate the variation of stream water temperature is presented and identified especially with regard to the decayed reach of the Masaki Dam. Effect of water temperature improvement plan for the dam is quantitatively examined using the present model.

Key Words : *water temperature, dam, decayed reach, field observation, mathematical model, improvement plan, numerical examination*

1. まえがき

ダム水路式水力発電を行うダムの直下流から発電用水放流地点までの間は減水区間と呼ばれる。ここでは、洪水放流時を除く、いわゆる平常時の河川流量が流域に固有の基底流量から大幅に減少するとともに、ダム貯水池の流送土砂捕捉による、顕著なアーミングを伴う河床変動が急速に進行することなども相俟って、河川環境が著しく悪化するのが一般的である。このような減水区間における流況や河床形態の変化の影響は、景観、親水性、水質、生態系など河川環境を構成する全ての面に及び、地域社会からは、豊かで、うるおいのある河川環境の保全・復元に強い要望が寄せられている。

正木ダムは、徳島県・勝浦川の勝浦郡上勝町正木地先において1977年に竣工した徳島県営の多目的ダムである。このダムの集水面積は94.7km²、有効容量は1,190万m³であり、発電用を含む利水容量は、夏期・冬期別に、それぞれ360万m³および1,060万m³と設定されている。このうち、発電用水は、堤体の直上流に設けた取水口からの水(最大使用量=10.0m³/s、常時使用量=2.35m³/s)を圧力ト

ンネルで約8km下流まで導水し、有効落差132.6mのもとに行われている。とくに夏期には、設定された利水容量が小さいこともあって、4~5m³/s程度は見込まれる基底流入流量の全てが発電に当てられる。このため、竣工後は減水区間の平常時流量が残流域からの流出による高々0.10m³/s程度までに減少した。そして、先述のような河川環境の悪化が生じたことは言を待たないが、その軽減を図るため、2001年の水利権更新を期に、0.30m³/sの環境維持放流が開始された。

筆者らは正木ダムの環境維持放流の効果に関するモニタリング調査¹⁾を実施するなかで、減水区間の水温が夏期に異常に上昇することを確認した。そして、このような水温上昇が、まず植物プランクトンや付着藻類の種構成や現存量さらには底生動物相や魚類相が溪流本来の姿に復することの妨げになっており、その抑制が当該区間の環境改善に有効であろうと推察した。

本研究では、2002および2003年夏期に実施したモニタリング調査に基づき、減水区間における水温分布の特性と支配因子を把握した。また、観測された水温の時・空間変動の再現モデルを構築し、これを用いて水温環境の改善案を検討した。

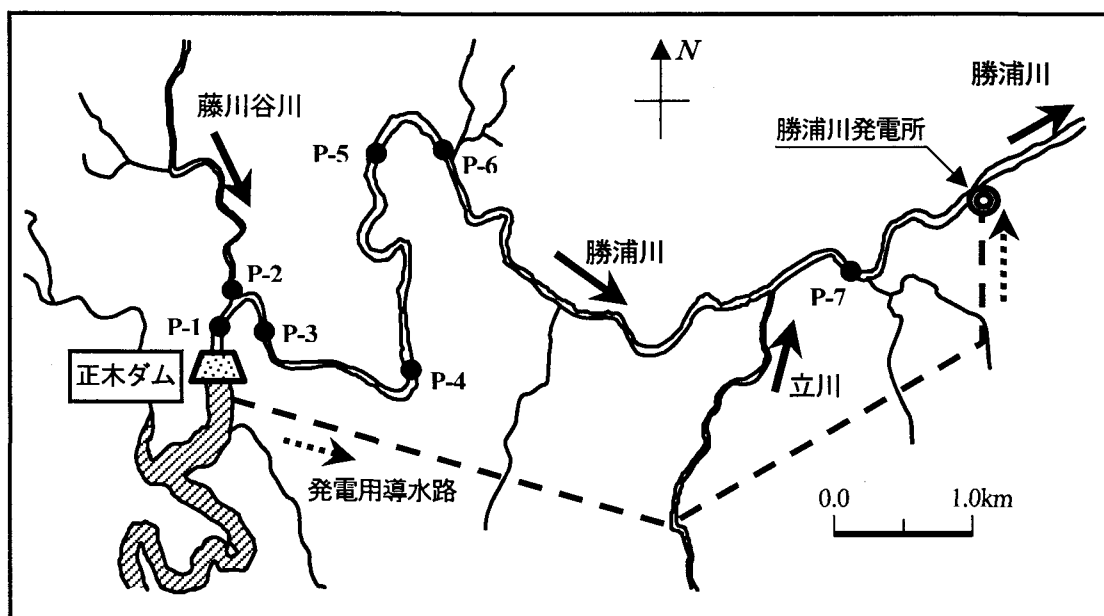


図-1 正木ダム減水区間の水系と水温計測地点

2. 水温モニタリング調査

(1) 正木ダム減水区間の概要

図-1に、正木ダム減水区間の概要を示す。該当区間は正木ダムから勝浦川発電所までの約8kmで、河道は急激な屈曲を繰り返している。平均河床縦断勾配は約1/110、河床幅は概ね20～50mであるが、全区間にわたって急勾配の瀬と、場所により水深が5mにも達する淵が連続しているとともに、ダムの下流約3.5km付近には高さ2m程度の取水堰が2基設置されている。河道の両岸には、区間の大半で四国に特有の急峻な山腹斜面が迫っているが、左支川・藤川谷川の合流点付近とダムの下流3～4.2kmの範囲に比較的開放された区間がある。

当該区間の本川河道には、上述の藤川谷川、右支川・立川のほか、いくつかの小溪流が合流している。ただし、これらからの合流流量は高々 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、平常時の河川流量は、環境維持流量を合わせても最下流で $0.4\text{m}^3/\text{s}$ 程度にすぎない。それ以外の用水は全て発電用導水路を通り、途中で立川からの取水と合流して発電所に達したのち本川に放流されている。

(2) 調査方法

本調査では、2002と2003年の7～9月期に、貯水池内の水温鉛直分布とダムサイトでの気温、および減水区間内の本川沿い水温分布を、いずれも5分間隔で連続・自動計測した。2003年には、本川水際の地中水温の計測も追加した。温度計測にはメモリー式小形温度計（Onset社製、TBI32-05+37）を用いた。また、2002年には、河道の瀬・淵構造を把握するための縦・横断測量も行った。

a) 貯水池内の水温とダムサイトの気温

計測位置は、ダムから約100m上流・流木網場の地点とした。網場の係留ロープからステンレスワイヤーを垂らし、温度計を水面下0.5、1.0、2.0、3.0、5.0、10.0、17.0および24.0mの8点に取り付けた。気温計測にも水温と同じ温度計を用い、ダムサイトの木陰で実施した。なお、貯水池の洪水操作が予定された際には事前に池内の温度計を引き上げたので、欠測期間もかなりあった。

b) 減水区間の流水温と地中水温

計測地点は、図-1に示す7点（P-1～P-7）とした。このうち、P-2は、藤川谷川下流端の同支川内であり、他は全て本川流路内に位置する。本川内の計測地点としては平瀬状の箇所を選び、金網を巻いて保護した温度計を水際から1～2m入った位置の河床上に鉄杭で固定した。

2003年に追加した地中水温計測の地点としては、P-1、P-3、P-4およびP-6を選んだ。これらの地点には河道片側に幅が比較的広く平坦な砂礫堆があり、大気や日射で高温に熱せられた表層砂礫の熱量が、その下方の地中水を経て流水に伝導しているものと予想されたためである。水温計は、金網で保護したのち、水際から1～2m離れた場所で、流水水位より3～4cm下がった位置に埋設した。

c) 河床形状と低水水面形の測量

2002年洪水期の終了後、ダム下流約4.5kmの区間を対象に、左右の水際点の平面位置と標高および河床横断形状の測量を行った。測量断面は、瀬頭、瀬の中間（1～2箇所）、瀬尻、淵頭、淵の中間（2～3箇所）、淵尻に位置するように設定した。各横断測量断面では、まず左右の水際点の平面公共座標と標高をトータルステーションで精密測量したのち、河床の横断形状をノンブリズム距離計により簡易測量（誤差は2～3cm程度）した。

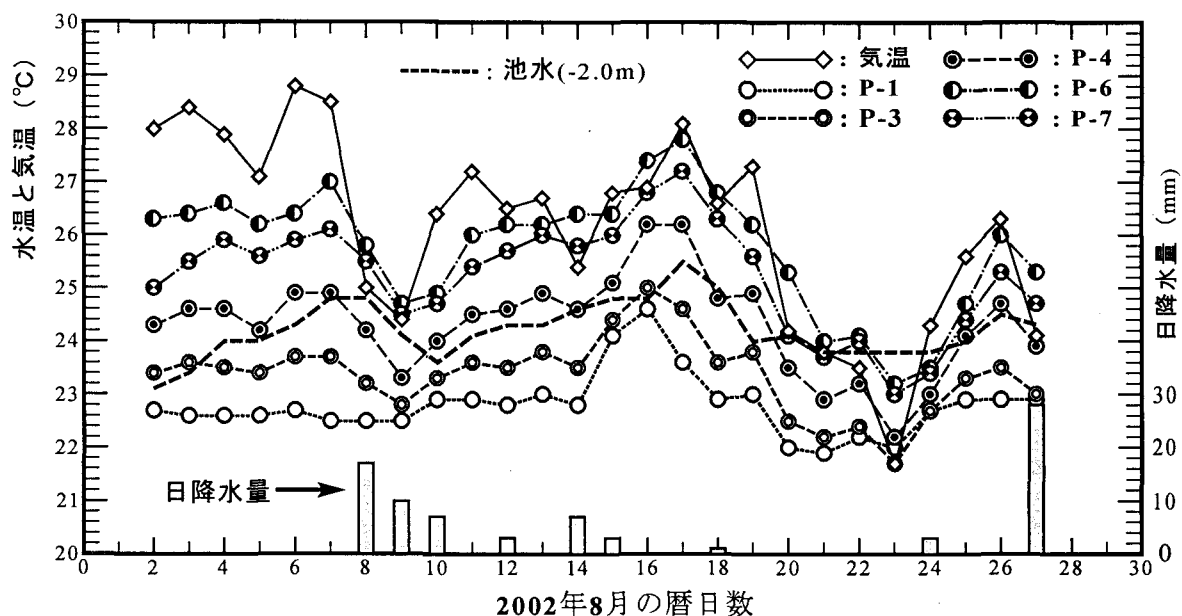


図-2 2002年8月における水温と気温の日平均値および日降水量の変動

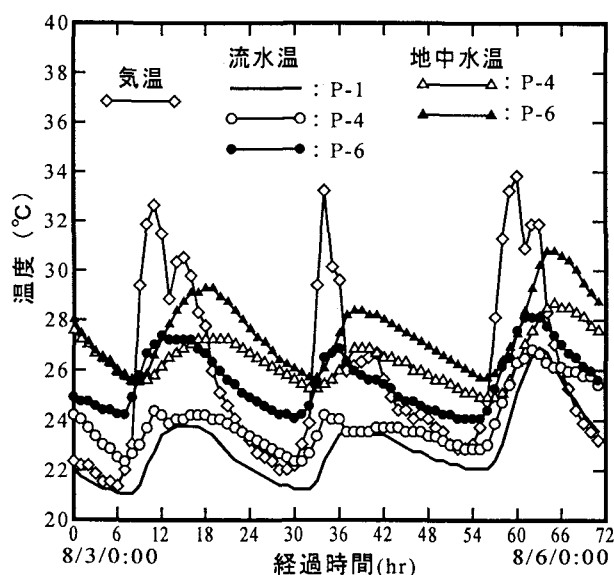


図-3a 水温・気温の時間変化（晴天日）

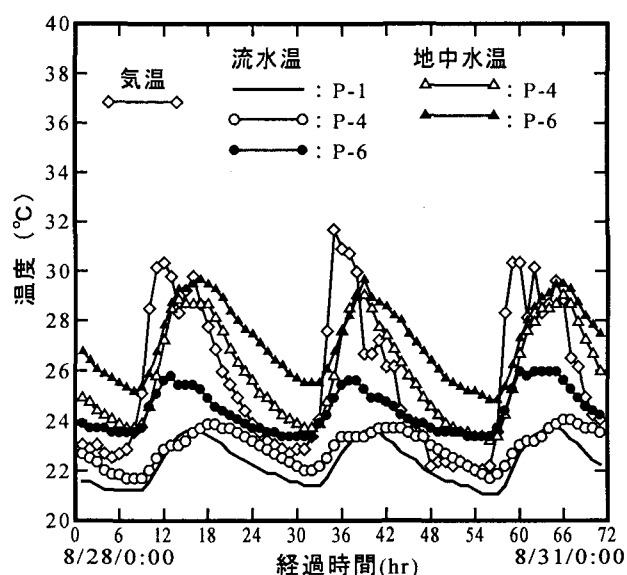


図-3b 水温・気温の時間変化（曇天日）

(3) 調査結果

a) 日平均水温

図-2に、2002年8月2日から同27日の期間における水温と気温の日平均値の変動をダムサイトでの日降水量とともに示した。この期間の前後1～2週間は台風による出水のため欠測期間となっている。作図では、煩雑化を避けるため、一部の計測点の結果を削除した。ここで貯水池内の水温として水面下2.0mの結果に着目したのは、環境維持放流用の取水が水面下2mまでの選択取水形式でなされていることを考慮してのことである。

ところで、ダムがない自然状態での河川水温に相当する貯水池流入水の水温は、期間の始めには約19℃であったが、徐々に上昇して、中旬には21℃に達し、その後は

ほぼ一定値に保たれていた。これを図-2の結果と比較すれば、減水区間では自然状態より最大で8℃近い水温上昇が生じているものと言える。

はじめに池水温と測点P-1の水温とを対比すると、後者が1～2℃程度低い状態で推移していることがわかる。これは、ダム上流面に付設した取水塔で取水された水がその底部（水面下約20mで、このレベルでの池水温は約20℃）に達して放流管に取り込まれ、さらに堤体内を通過する間に冷却されているためである。

減水区間では、日によらず水温が流下とともにほぼ一様に上昇する傾向が認められる。ただし、P-6からP-7の間では、最大で1.5℃程度の低下が生じている。2003年7月に立川合流点前後で水温の追加計測をした結果、上記の

水温低下の原因は右支川・立川（図-1参照）からの低温水の合流にあることが確認された。

減水区間内での水温上昇量（P-1とP-6の水温差）は曇天、雨天の日には1～2℃程度であるが、晴天日には4℃近くにも達している。

気温と減水区間の水温を比較すると、その変動傾向がよく似ていることが分かる。とくに、P-6およびP-7の水温は、8月8日以降、数値的にも気温との差が小さい。これは、主として顕熱輸送と日射供給量が主体的な役割を果たすなかで、減水区間の下流部に至ると水温が平衡水温に到達していることを示唆しているものと思われる。

b) 水温の日内経時変化

図-3aおよび図-3bは、2003年8月にP-1、P-4およびP-6で得られた計測資料をもとに、それぞれ概ね晴天あるいは曇天が続いた3日間（それぞれ、8月3日～5日および8月28日～30日）における気温、流水温および水際近傍地中水温の時間変化を描いたものである。ただし、晴天、曇天といっても、8月4日と5日の正午前後に数ミリの降雨があり、一方、同29日の午前中は晴天状態であったなど、厳密には天候が一定してはいなかった。

減水区間の流水水温は、晴天、曇天によらず時間的にかなり激しく変動していることが見て取れる。そして、ここでも水温と気温との間にかかなり高い相関が認められる。もちろん、P-1の水温を基準としたP-4およびP-6のその上昇量は、晴天日において曇天日におけるより明らかに大きい。また、気温変動とくに午前中の気温上昇に対する水温の応答状況が、晴天日と曇天日では異なっている。すなわち、晴天日には、気温からさほど遅れることなく水温も上昇するが、曇天日には、水温上昇が気温より3時間程度遅れるようである。そして、この傾向は、P-4よりもP-6において顕著である。また、さほど明瞭ではないが、晴天日の方が気温ピークに対する水温ピークの遅れが大きいようにも見える。以上のような晴天日と曇天日との相違は、言うまでもなく日射の有無によるものであるが、先にも触れたP-1の水温を基準にしたP-4およびP-6の水温上昇量における相違は高々1℃程度で、水温の日内変動幅に比して小さくなく、当該減水区間に関する限り、日射の効果は気温より2次的なものと言えそうである。その主な原因は、両岸に迫る急峻な山腹斜面や水際沿いに密に分布する高木による、水面への直接日射の遮蔽にあるものと思われる。

つぎに、地中水温の挙動に着目する。当初の予想に反し、晴天日と曇天日の地中水温に際立った相違点が見当たらない。両者を詳細に対比すると、P-4において晴天日より曇天日に地中水温のピーク値が高いことや、早朝の水温低下が晴天日より曇天日に著しいことに気づくが、これらの原因は不明である。ついで、地中水温と流水温を対比すると、晴天、曇天で量的な相違はあるものの、2～6℃の水温差がほぼ常時維持されており、地中水から流水に伝導する熱量がかなりあるものと推察される。

3. 数値計算モデルによる水温変動の再現

1次元の不定流モデルと熱収支モデルを組み合わせて、河川水温の時・空間変動の数値計算モデルを作成し、観測結果の再現計算を通して、その同定を行った。ただし、適用対象を正木ダム減水区間に限ったモデル構築をするとの立場より、とくに熱収支のモデリングにおいては、普遍的な適用性に拘らなかつた。

(1) 基礎式

基礎式としては、以下に記述する1次元不定流の連続式と運動式および1次元熱収支式を用いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_s \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial(AT)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(QT - AD_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{B_{ws} H_{ws}}{c_w \rho_w} + h_G + q_s T_s \quad (3)$$

ここに、 t = 時間、 x = 流下方向の座標、 A = 流積、 Q = 流水流量、 q_s = 流路単位長さ当たりの側方流入流量、 H = 水位、 I_E = エネルギー勾配、 T = 断面内の平均水温、 T_s = 流入水の水温、 B_{ws} = 水面幅、 H_{ws} = 水面単位面積当たりの熱収支量、 h_G = 高温の水際地中水から供給される流路単位長さ当たりの熱量、 c_w = 水の比熱、 ρ_w = 水の密度、 D_M = 運動量の分散係数、 D_H = 水温の分散係数、 g = 重力加速度である。ところで(3)式には、河床面を介した熱移動や降雨の影響を表現する項を入れておくのが望ましい²⁾。しかし、前者は、夏期には小さいという報告があるし³⁾、モデル化も困難なことから、無視することとした。一方、降雨は、雨天日の水温上昇量が小さく、これ自体を問題視するに及ばないことより、考慮の対象外とした。

基礎式に含まれる水理量のうち、 I_E はManning式、 D_M と D_H はともにFisher式により計算することとした。

(3)式の H_{ws} としては、(4)式のように顕熱輸送量 ϕ_s 、潜熱輸送量 ϕ_L 、有効日射供給量（短波放射） ϕ_{SR} および有効逆輻射量（長波放射） ϕ_{LR} の4項目を考慮した^{2),3),4)}

$$H_{ws} = \phi_s + \phi_L + \phi_{SR} + \phi_{LR} \quad (4)$$

上式の各項の計算式を逐一記載することは紙面の関係上省略するが、 ϕ_s と ϕ_L には水面蒸発量の算定に修正Shulyanovski式を用いる方法、 ϕ_{SL} には、雲量を考慮したBrunt-山本式を適用している³⁾。また、 h_G は、後述する再現計算の中で適合値を経験的に見出すこととした。

(2) 基礎式の数値解法

基礎式の数値解析では、流量の定義点を流積と水温の定義点から上流側にずらせた不等間隔のスタッガード格

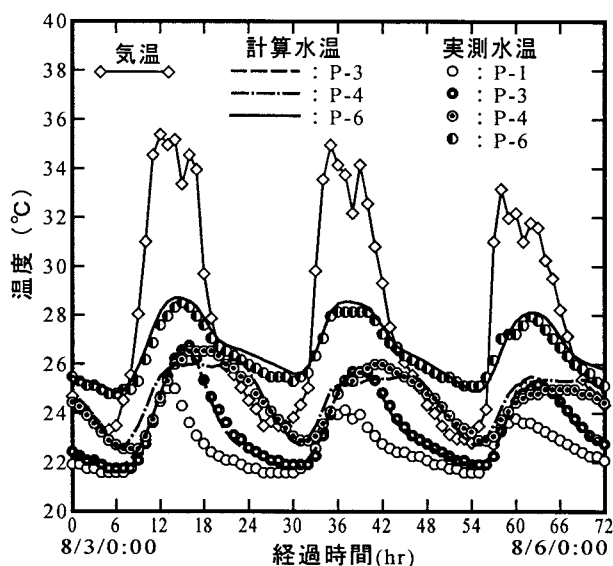


図-4a 計算値と実測値の比較（晴天日）

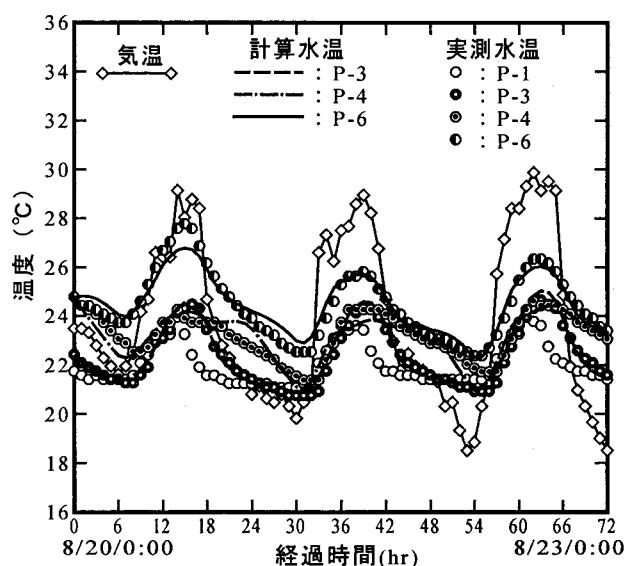


図-4b 計算値と実測値の比較（曇天日）

子を採用し、各式を時間前進の有限体積法による陰解法⁵⁾で離散化した。このとき、形式として非線形になっている(2)式は、あらかじめ左辺第2項の Q^2 を Q_0Q のように線形化しておいた(Q_0 は1計算ステップの初期における流量値)。また、移流・分散方程式の形式をとる(2)式および(3)式については、移流速度(あるいは流量)と分散係数がコントロールボリューム内で一定と近似して得られる指数関数を含んだ離散化式を、さらにハイブリッド法で近似法して計算時間の短縮を図った。これらの離散式からなる連立1次方程式の数値解法としてはTDMAを利用した。

しかし、上述の数値解法を瀬や淵が連続した正木ダム減水区間に適用すると、常・射流の遷移が起こる箇所でも流量に数値振動が発生し、流積や水温の計算値にも波及した。これを回避するために最近の進歩が目覚ましい常射流混在流れ用モデルの導入も考えられたが、現段階では、流れ計算の精度低下には目をつぶる、例えば、1ステップ前の射流あるいは限界流側流量をそのまま常流側にシフトさせる、取水堰のように支配断面の発生が明らかな断面では限界状態を仮定した流積計算を行う、フルード数が2.0以上の断面は擬似等流とみなすなど、強制的に安定化させる方法をとっている。

(3) 再現計算例

2002年8月3日～5日および同20日～22日という、それぞれ晴天日と曇天日が連続した3日間を対象に、水温計測点P-1からP-6に至る約4.2kmの区間における水温変動の再現計算を実施した。

計算断面には、縦横断測量を行った133断面をそのまま採用するものとし、測量結果から各断面の縦断追加

距離と水位・水面幅関係データを作成して入力した。流量は、上流端から環境維持流量 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ が定常的に流入し、藤川谷から一定量 $0.04\text{m}^3/\text{s}$ が合流するものとした。水温の上流端条件および藤川谷からの流入水温条件としても、P-1およびP-2の実測水温時系列データをそのまま入力した。

水面を介した熱収支量 H_{ws} の計算に必要な気象関係データのうち、気温と相対湿度にはダムサイトでの実測値を、日射量には現地から10km程度離れた徳島市内での実測値を当てた。このほか、計算には風速と雲量のデータも必要であるが、現地でこれらを実測していないので、徳島地方气象台での観測情報を参考しながら推定したものを入力せざるを得なかった。

最後に、(3)式に導入した水際地中水からの熱供給量 h_c や前節(3, b)で指摘した山腹斜面や河畔樹木の日射遮蔽率の評価法が問題となったが、現段階ではこれらをモデル化するまでには至っていない。本文の計算では、仮に両者は場所的にのみ変化するものとみなし、それらの縦断分布を、河道状況や計算結果と実測結果の適合性をみながら試行錯誤的に推定した。

図-4a、図-4bで、水温時間変化の計算値と実測値を比較している。晴天、曇天によらずある程度良好な再現性が認められる。ただし、P-4では、計算値と実測値の間に定性的傾向の相違も現れている。これは、P-3とP-4の間に大規模で深い淵が2個あり、現実の水温が2次元、3次元的な挙動をしているためではないかと思われる。これを除いた適合性の高さは、無論、地中水からの熱供給量と日射遮蔽率の調整によるものであるが、正木ダム減水区間への適用に特化する限り、満足すべき水温計算モデルが得られたものと考えている。

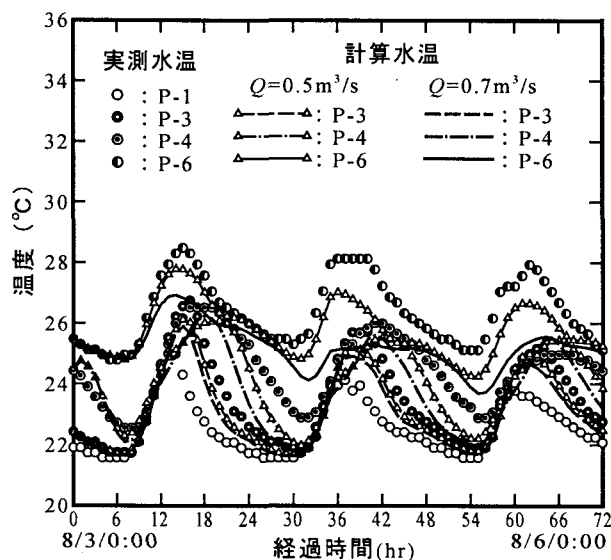


図-5a 流量増加のみによる効果の検討

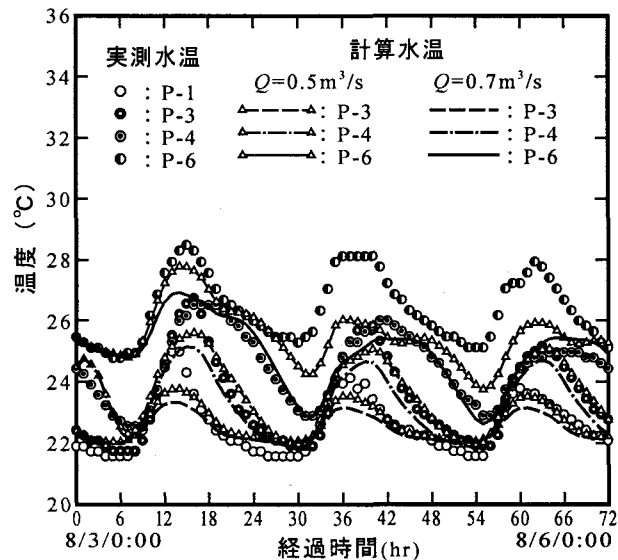


図-5b 流量増加と放流水温低下の効果の検討

4. 水温改善案の検討

正木ダム減水區間で夏期に起こる異常な水温上昇の原因は、貯水池表層の高温水の選択的取水と、流量減少に伴う熱の長期滞留にある。したがって、水温環境改善の方策としては、①取水位置の変更による放流水温の引き下げと、②放流量増大による熱排出の促進が考えられる。ただし、①には放流水の濁度増加や冷水放流の危惧が付随し、②には水利権の制約があるので、効果に関する定量的な予測に基づく十分な事前検討が必要である。以下では、その第一歩として、2002年8月の晴天連続期間に着目し、減水區間上流端での流量・水温の条件変化がその下流の水温分布に及ぼす影響を検討した数値計算例を紹介する。

図-5aは、環境維持流量を現在の $0.3\text{m}^3/\text{s}$ から $0.5\text{m}^3/\text{s}$ あるいは $0.7\text{m}^3/\text{s}$ に増加させた結果である。流量の伝播速度が小さいので、実質的な効果は1日目の午後以降でないと現れてこない。2日目以降について見ると、とくにP-6の最高水温の低下が顕著である。概括的に見て、P-1を基準にした他の点の温度上昇量は、流量増加量にほぼ反比例するように抑制されるものと言えよう。ただし、環境維持流量の変更は実務上かなり困難なので、今後は、放流水の総量は維持したまま流量に日内変化を付すなどの工夫が必要と思われる。

図-5bでは、上述のような流量増加に加えて、上流端の流入水温を 22°C の一定値に保つ場合の結果を示した。なお、正木ダムの場合、この水温の層は、現在の取水高さより3m程度下がった位置に、ほぼ定期的に存在している。さて、ここでも対策と効果発現の間に半日から1日のズレがある。これは、流量規模が小さいことによる当然の結果である。2日目以降について、

図-5aの結果と比較してみると、上流半分の間では水温低下が明らかであるが、下流端付近では、日内最高水温が少し低下する程度に止まっている。

5. あとがき

本研究では、徳島県・正木ダムの減水區間の水温環境に着目し、まず、現地観測により夏期の異常な水温上昇の実態を把握するとともに、その主要支配因子として、水・気間温度差による顕熱輸送、山腹や樹木による遮光の影響を受けた日射の短波放射および砂礫堆地下水からの熱供給などの重要性を確認した。ついで、不定流モデルと熱収支モデルを組み合わせた1次元水温数値計算モデルを新たに構築し、正木ダム減水區間への適用に特化する立場からその同定を行った。最後に、同定されたモデルを用いて、環境維持放流量の増加や取水水温の低減などの対策案が当該減水區間の水温環境改善に及ぼす効果を概略的に予測した。

参考文献

- 1) (社)土木学会四国支部：ダム水環境改善事業・河川環境調査合併調査報告書「勝浦川」，平成10～15年度。
- 2) 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。
- 3) 砂川義雄・加藤均・立川貴重：一次元コントロールボリューム法による河川水温解析，四国電力四国総合研究所研究期報，No.81，pp.33-42，2003。
- 4) 佐渡公明・杉山一郎：河川水温に影響する水理・気象要素に関する基礎的研究，水工学論文集，第44巻，pp.1257-1262，2000。
- 5) 荒井忠一：数値流体工学，第2章，東京大学出版会，1994。

(2004.9.30 受付)