

冷水性淡水魚類生態に適した河川水温環境に関する研究

内藤淳也⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘

(1) 中国電力(株)

要 旨

地球温暖化により 21 世紀末には気温が 1.8~4.0℃上昇すると予測されている。河川においては気温の上昇に伴う河川水温上昇が問題視され予測、研究が行われてきた。温度は生物の生息環境を支配する要因の一つである。生物の中でも魚類は温度変化に対して敏感であり、特にサケ科の魚類などの冷水性魚類に対する影響が大きいと考えられている。そこで本研究では今後も従来の冷水性淡水魚類に適した河川水温環境を維持していくための二つの水温管理手法に着目した。まずは発電放流水による管理である。ダム貯水池では夏場は成層化が進み、取水する層の高さによって水温は異なる。通常は、稲作やアユの生育環境の観点から冷水放流が問題となるが、逆に温暖化対策として夏場に適当な冷水が放流されれば河川水温の上昇を抑制することができる。次に、河川地形が河川水温に対して与える効果である。河道内の淵の形成・維持は、水温の低い水塊の保持に効果的であり、さらに河岸からの湧水の流入が冷水環境形成に与える影響は大きい。

九頭竜川では冷水性魚類であるサクラマスが生息している。市荒川発電所からは上流のダムから取水された水温の低い発電放流水が合流しており、夏季の本川水温を低下させる効果が期待される。鳴鹿大堰までの流下区間では、日射を受けて再び水温は上昇していく。鳴鹿大堰の湛水区間を経て、その下流の福松大橋地点では右岸側に淵が形成されるとともに、河岸からの湧水流入が確認されており上下流と比べ低い水温環境が形成されている。

九頭竜川の水温環境について小型メモリー式水温計 (StowAway Tidbit Optic StowAway, 30 分間隔, 温度精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) を用いて長期現地観測を行った。さらに、河川の熱収支を考慮した 1 次元, 2 次元の水温予測モデルを用いて観測データの再現を行うとともに、条件変化に伴う水温影響予測を行った。さらに、水温が上昇したと仮定した際のサクラマスが生息可能な水温環境を維持するためのダム放流や河川地形管理について考察した。

キーワード : 河川水温, 地球温暖化, 九頭竜川, 河川地形, 水力発電, サクラマス

1. 序論

1.1 背景

地球温暖化は人間の産業活動によって排出される温室効果ガスが原因で起こるとされ、20 世紀末に問題提起され現在では広く認識され対策が行われている。しかしながら現在も温室効果ガスの排出量は増え続けており、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC) が

2007 年に公表した第 4 次報告書において、地球温暖化について社会・経済動向のシナリオ毎に検討され、21 世紀末には気温が 1.8~4.0℃上昇すると予測されている (Solomon et al., 2007)。地球温暖化がもたらす影響は多岐にわたるが、河川においては気温の上昇に伴う河川水温の上昇が問題視され研究、予測が行われている (新井, 2000)。温度は生物の生息環境を支配する要因の一つであり、とりわけ魚類は温度変化に対する反応が陸上の生物よりも敏感であるので

地球温暖化が与える影響は大きいと懸念されている。特にサケ科の魚類などの冷水性魚類がその影響が最も大きく受けると考えられ、場合によっては局所的な絶滅などが危惧されている。

1.2 目的

本研究では上記のような地球温暖化の影響を考慮し、今後も従来の冷水性淡水魚類に適した河川水温環境を維持するための水温管理手法を検討する。

まずはダムからの放流水による水温管理である。ダム貯水池では夏場は成層化が進み、放水する層の高さによって放流水温は異なるため選択取水設備により適当な水温の水を放流することができる。また、水力発電のために長距離にわたり管路を通して本川に合流する水は、その区間を流下した水とは水温に違いが生じる。山形県の日向川では約7kmの発電導水管によって5月下旬から8月中旬の水温が1.24～2.26℃低下すると推計されており、また、信濃川水系破魔間川では発電放流水が本川よりも6～8℃低いという観測結果もある(小倉・山本, 2005)。冷水放流は稲作やアユの生育環境の観点から悪影響であるとして問題となるが、逆に温暖化対策として夏場に適当な冷水が放流されることは地球温暖化による河川水温の上昇を抑制することが出来ると考えられる。

次に河川地形が河川水温に与える効果である。水温に対して河川地形の与える効果は大きい。例えば水路のような河川と、自然状態に近い網状河川では水温の多様性が異なる。また、砂州があることで浸透による水温の変化などもある。河道内の淵の形成・維持は水温の低い水塊の保持に効果的であり、さらに河岸からの湧水の流入が冷水環境形成に与える影響は大きい。

1.3 研究の流れ・手法

本研究では九頭竜川流域を調査区域とし、冷水性魚類であるサクラマスを対象とする。九頭竜川の水温構造を把握するために小型メモリー式水温計を用いた長期現地観測を行った。さらに河川の熱収支を考慮した1次元、2次元の水温予測モデルを用いて観測データの再現を行うとともに、地球温暖化によって気温が上昇したときの水温影響予測を行った。さらに水温が上昇したと仮定した際のサクラマスが生育可能な水温環境を維持するためのダム放流や河川地形管理について考察した。

2. 地球温暖化と淡水魚類生態

地球温暖化が生物に様々な影響を与えることが指

摘されている(樋口ら, 2009)。例えば、気温の上昇は開花時期や繁殖時期など生物季節を早める。また、各種生物の分布域は北上あるいは高所化し、海水面の上昇により海岸域などでは珊瑚礁の島が縮小するなどの影響がある。同時に各地域で個体数の増減をもたらす。そして、各種生物の温暖化に対する応答が異なっていることから、これまでの食う、食われるという関係、送受粉、種子散布、寄生などの生物間の相互作用に影響が出ると考えられている。

生物の中でも魚類は特に水温変化に対する耐性が弱く、水温は魚類の生活を考える上で非常に重要な鍵となる変数であると考えられている。Mgnuson et al. (1979)は夏季の生息場所の水温によって、冷水性魚類(11-15℃)、準冷水性魚類(21-25℃)、温水性魚類(27-31℃)に分類した。

田中(2008)に従って魚類が地球温暖化によって受ける影響について述べる。日本列島の淡水魚は主に、温暖期に黒潮に乗って分布を南から北に広げようとするハゼ科の魚、寒冷期に親潮に乗って北から南に分布を広げようとするサケ科の魚、日本の湛水域に隔離されているコイ科の魚という三つの要素で構成されている。地球温暖化はハゼ科、コイ科の魚類にとっては良い影響があり、最も悪影響を受けるのは、冷水性のサケ科の魚類であるとされている。夏季の最高水温が河川内での分布下限を決定する温度障壁として働くとされている。サケ科の魚類は水温が上昇した場合、分布域は北上していく。

Nakano et al. (1996)は年平均気温が1～4℃上昇した時のアメマスの分布域の縮小を示した。分布域の南限付近では淡水型個体の出現率が高くなるが、そのような陸封型の魚類は水温の上昇によって生息域が上流域に向かって狭められていく。しかしながら、河川構造物による阻害もあるため、上流へと移動することが出来ないことも考えられ、そのような場合、局所的な絶滅も考えられる。1994年には異常渇水に加えて、高温日の連続による河川水温の上昇が起こり魚の大量死が報告されている(近藤, 1995)。

魚類の分域南限を決定する夏季の最高水温である温度障壁や、水温選好はサケ科の魚類の中でも差があり、年齢や体調などにも依存する。多くの魚類にとって生存可能な温度範囲のほぼ中間の温度付近に成長にとっての最適水温があるがそれも種ごとに異なっている。イワナ類のブルックトラウトやサッカ一類などは致死高温限界の手前で減少し始めるが、致死高温まで増加し続ける(Fig. 1)(McCormick et al., 1977)。冷水性魚類カジカ(カサゴ目カジカ科)大卵型は室内実験の結果、生育適温は21℃から24℃であると報告されている(伊藤ら, 2007)。

また、水温の変化が魚類の種間競争を変更する可能性が指摘されている。ニッチの類似した複数の魚類が流程上で接触異所性分布している場合には、気温上昇によって直接死に至らないとしても一方の競争種に有利な温度条件となることで他方の種が競争的に排除される可能性がある(谷口・中野, 2000)。

本研究で対象とするサクラマスに関して述べる。井上ら(2010)が神通川でサクラマスに発信器を取り付け、サクラマスが定位する場所を調査した結果、サクラマスは日最高気温の上昇に伴い、おおむね25℃より水温が低い上流へと移動していったこと確認されている。佐藤(2001)はサクラマスの摂食と水温の関係を求める水槽実験を行っている。実験によると18~22℃ではサクラマス幼魚の摂食活動が見られたが、24℃でその活動が停滞し始め、26℃の場合ではほとんどの個体が摂食活動を止めた(Fig. 2)。佐藤(2001)は実験と野外調査からサクラマスの成長停滞水温は24℃以上であると結論づけている。真山は目名川で食性の日周変化などの現地調査から18℃前後が摂食活動に悪影響の出る臨界温度であると推定しており(真山, 1992)、自然状態では阻害が始める水温は実験よりも低い可能性がある。

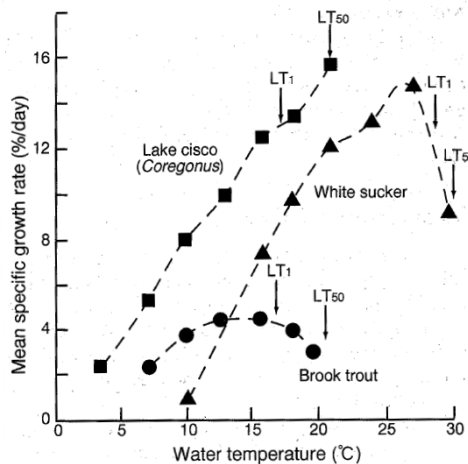


Fig. 1 Relation between water temperature and growth rate. LT_{50} : fatality rate of 50% (McCormick et al., 1977)

3. 河川地形と水温

水温は気温の変化に伴う日変動や季節変動が大きいが、同様に河川地形や地下水などが与える影響も大きい。例えば水路のような河川と、自然状態に近い網状河川や蛇行河川では水温の多様性が異なる。

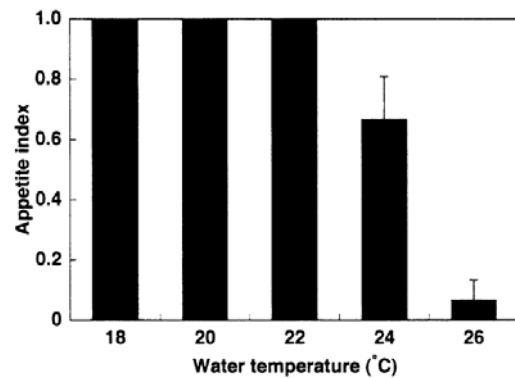


Fig. 2 Relation between water temperature and appetite index of *Oncorhynchus masou*(佐藤, 2001)

Arscott et al. (2001)が行った調査では、縦断方向の水温変化は一番に標高、次に方位角に最も影響される。そして、河川地形(最大水深、勾配)や被覆率、流速などのローカルな要因が次いで重要である。河川連続体仮説によると4から5次の河川が最も水温が高い。上流は樹木の遮蔽により水温が低く、下流ほど日射により水温が高いことに加えて、流量が増加していくにつれて水温が温められにくくなるためである(Vannote et al., 1980)。しかし、湧水や河川浸透水が発生している場合はそれらの方が他の要因に従っての水温変化よりも重要であることもある(Arscott et al., 2001)。湧水のほとんどは細流、わんど、池と関係しており、これらの環境が水温環境の多様性を高める。湧水(地下水温)も気温の上昇に伴って上昇すると考えられるので注意が必要である。

Gostner et al. (2011)は同一河川で異なる地形的な特徴を持つ5地点でロガーによる水温観測を行った。自然状態に近い網状の地点、蛇行した地点(S1,S2,S3)では、人為的に水路化された地点よりも水温の変動が大きいことを示した(Table 1)。

Table 1 Average, standard deviation and coefficient of variance of water temperature on each sites (Gostner et al., 2011)

Site	Series 08/10			Series 11/10		
	mean	sd	c_v	mean	sd	c_v
S1	16.2	0.62	0.039	6.3	0.36	0.058
S2	13.3	0.26	0.019	9.0	0.57	0.063
S3	16.9	1.36	0.081	7.1	0.86	0.122
S4	11.4	0.04	0.004	8.4	0.02	0.002
S5	12.7	0.00	0.000	8.6	0.00	0.000

Fig. 3は水温に影響を与える主要な流路を示したものである(Arscott et al., 2001)。最も水温の多様性が高まるのは氾濫原に止水域(背水や孤立した水域)があるときである。砂州が存在する河川では浸透による水温の変化がおり、はっきりとした瀬と淵があれば淵の下流側で浸透した水が下流の瀬で流れ出

る現象が起こり、水温の多様性が高まる。深い淵であれば下層では日射が届きにくいいため、低水温の層が保たれる。瀬淵があれば淵の河床から河床にもぐりこんだ伏流水によって水温に対するバッファリング機能が働く。

淵がサクラマス親魚の越夏に果たす役割は大きく、捕食からの避難場所、増水時の避難場所、夜間における睡眠場所としても機能している。神通川ではダム直下の 10m 以上の淵がサクラマスの生息場所となっていることが確認されている（田子ら, 2006）。井上ら（2010）によるとサクラマスは越夏時に淵で確認され、その面積は 0.15~1.9ha で、水深は 1.3m~12.5m の範囲であった。またサクラマスはブロック群の間隙に定位することが確認されている。

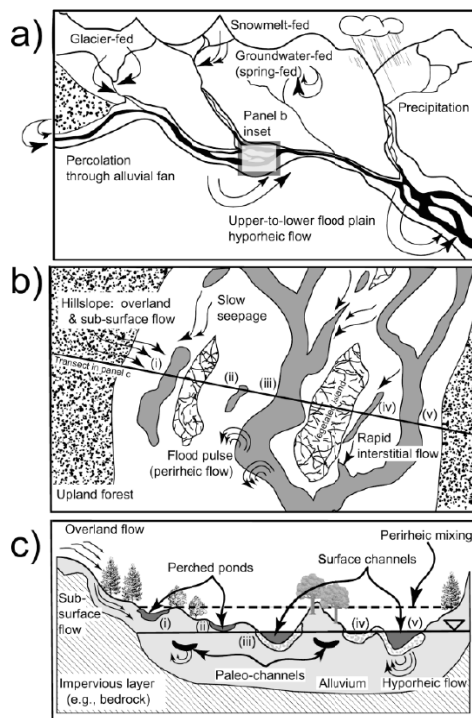


Fig. 3 Schematics of (a)catchment (b)reach (c)cross section showing major flow paths influencing water temperature : (Arscott et al., 2001)

4. 九頭竜川の水溫構造

4.1 検討対象地点

本研究では九頭竜川を対象とした。九頭竜川は、その源を福井県と岐阜県の県境の油坂峠（標高 717 m）に発する、幹川流路延長 116km、流域面積 2,930 km²の一級河川である。調査したのは Fig. 4 に示す市荒川発電所から鳴鹿大堰を経て福松大橋までの区間である。市荒川発電所からは上流にある下荒井ダムで取水された発電放流水が放流されて本川に合流しており、夏季の本川水温を低下させる効果が期待され

る。しかし、鳴鹿大堰までの流下区間では日射を受けて再び水温は上昇していく。鳴鹿大堰下流の福松大橋地点では右岸側に淵が形成されるとともに、河岸からの湧水流入が確認されており上下流と比べて低い水温環境が形成されている。その地点ではサクラマスの生息が確認されている。

鳴鹿大堰は堤高 5.7m、総貯水容量 667 千 m³の可動堰であり、洪水調節や上水などを目的として平成 16 年に作られた。水温が常時観測されており、そのデータを入手した。



Fig. 4 Study area

4.2 現地調査

水温構造を把握するために、現地調査を 2 回行った。調査地点は Fig.5, Fig.6 に示すとおりである。

1 回目は 2011 年 5 月 28 日に行い、九頭竜川本川支川に計 10 個の水温計を設置した。設置した温度計は小型メモリー式水温計 Onset: StowAway Tidbit Optic StowAway である。温度の計測範囲は -5℃~+37℃で精度は ±0.2℃である。30 分ごとに内臓メモリーに水温を記録するように設定した。2 回目の調査は 2011 年 9 月 13 日に行い、1 回目に設置した水温計を 4 地点に於いて回収することができたが、他の 6 個の水温計は洪水による流失、礫で埋まるなどの理由で回収することが出来なかった。回収できた温度計のうち 1 つは故障により観測値に異常が見られデータを用いることが出来なかった。観測データが得られたのは Fig. 4 の地点 1, 地点 3, 地点 4 に設置されていたものである。なお、調査を行った両日も各地点で水温・水質の測定を行っている。

市荒川発電所地点から鳴鹿大堰上流までの間では計 5 個の温度計を設置した (Fig.5)。市荒川発電所地点では本川に左岸側から発電放流水が合流しており、さらに支川も合流している。調査地点は放流水が合流する前の本川上流、発電所放流路、左岸側支川、そしてそれらが合流したあとの下流 3 地点の計 5 地点である。

現地水温を計測した結果を Fig. 5 にまとめた。5 月 28 日の調査では発電所上流では 15.1℃、放流口で

は 14.3℃, 左岸支川では 15.7℃, それらの合流後では上流側から順に 14.6℃, 14.8℃, 14.9℃という結果であり, 放流口での水温が本川, 支川より低く, 下流では水温が低下し, それが流下につれて上昇していくことが分かった。9月13日の調査では発電所上流では 23.5℃, 放流口では 19.3℃, 左岸支川では 24.4℃, それらの合流後では上流側から順に 19.7℃, 20.5℃, 21.0℃という結果であった。夏場ほど発電放流水が水温に与える効果は大きいことが分かった。また上流の下荒井ダムの発電所取水口での水温を計測したところ, 19.6℃であり, 取水されてから放流されるまで山中を鉄管で送水される間に水温が低下していることが分かった。

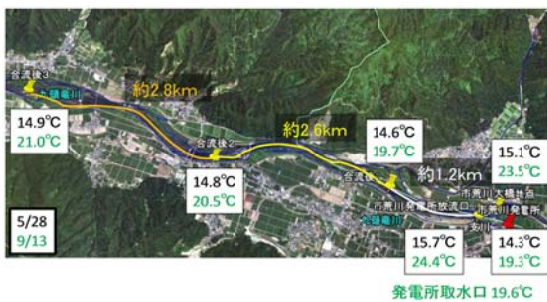


Fig. 5 Observed data (downstream of Power plant)

鳴鹿大堰地点では鳴鹿大堰の直下で合流する左岸側支川の永平寺川, そして下流の福松大橋上流右岸地点では表層, 下層, 湧水発生地点の計 4 個の温度計を設置した (Fig.6)。湧水発生地点とは右岸沿いに連続的に水温を観測していき最も低い水温が確認された地点である。

現地でも水温を計測した結果と同時帯の鳴鹿大堰の水温を Fig. 6 にまとめた。5月は鳴鹿大堰で 14.2℃, 永平寺川で 16.2℃, 福松大橋上流で表層 15.0℃, 湧水の湧き出し口で 10.8℃, 9月は鳴鹿大堰で 20.2℃, 永平寺川で 25.2℃, 福松大橋上流で表層 21.5℃, 湧水の湧き出し口は 16.9℃であった。鳴鹿大堰での水温と永平寺川の水温差は, 9月は約 5℃と大きかったが, 流量に差があるため, その下流では永平寺川の影響はそれほど大きくはないと考えられる。福松大橋右岸地点では鳴鹿大堰での水温よりも約 1℃高く, 流下するにつれて水温が上昇していることが確認された。湧水発生地点ではそれより約 5℃低い水温が低かった。

なお, 現地調査でも福松大橋右岸側地点においてサクラマスが生息していることが確認された。この地点は淵になっておりブロック群もあり, 前述のようにサクラマスが好む地点である。



Fig. 6 Observed data (downstream of Naruka weir)

次に, 連続データとして, 鳴鹿大堰と回収された 3 つのデータロガーの水温データを Fig. 7 に示す。降水量, 流量, 気温を Fig. 8 に示した。降水量と気温は気象庁が福井市で観測したもので, 流量は鳴鹿大堰で観測されたものである。Fig. 8 とあわせて見ると分かるように 5月から8月になり気温が上昇していくにつれて水温も上昇している。また, 洪水で降水量と流量の大きいときは全ての地点で水温が下降しており地点ごとの水温差も小さい。九頭竜川の支川である地点 3 (永平寺川) の水温がもっとも高いが, これは平水時の流量が最も少ないことに起因すると考えられる。地点 1 (合流後) の水温が最も水温が低く特に 7月下旬からは他の 3 地点と比較して差が大きくなっている。これは現地調査でも見られたように, 発電放流水が合流して本川の水温を下げているためと考えられる。

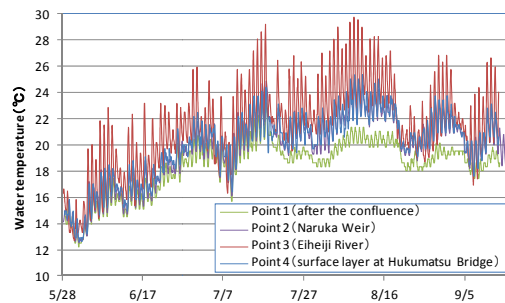


Fig. 7 Observed value of water temperature

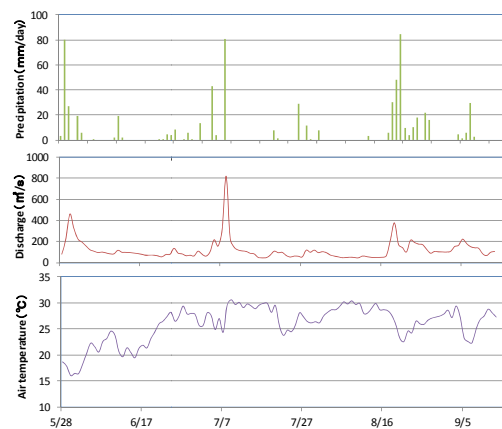


Fig. 8 Precipitation, discharge and air temperature

鳴鹿大堰で連続計測されている過去の水温データと福井市の気温との間の回帰式を作成した結果以下の回帰式が得られた (Fig. 9)。

融雪期 (1月～5月)

$$y = 0.5314x + 3.3998 \quad (1)$$

融雪期以外 (6月～12月)

$$y = 0.5923x + 4.8530 \quad (2)$$

またデータロガーで観測した水温データからも以下の回帰式が得られた (Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12)。

地点1 (合流後2)

$$y = 0.5013x + 5.4350 \quad (3)$$

地点3 (永平寺川)

$$y = 0.7092x + 2.8868 \quad (4)$$

地点4 (福松表層)

$$y = 0.6117x + 4.0459 \quad (5)$$

ここに y は水温, x は気温である。

Stefan and Preud'homme(1993)は、北米ミネソタにおける複数の河川水温と気温の観測記録より、次式のような回帰式を提案しており、この0.864という係数がアメリカにおいて1つの基準となっている (新井, 2000 ; Stefan and Preud'Homme, 1993)。

$$T_w = 0.864T_a + 2.91 \quad (6)$$

ここに、 T_w は水温, T_a は気温である。

また、過去に日本で山地河川を中心にして得られた回帰式の勾配は積雪寒冷地を除けば0.68～0.89である (山辺, 1970)。これらを九頭竜川の観測データから得られた回帰式と比較すると、気温に関する水温の応答は今得られた回帰式の方が小さく応答が鈍いことがわかる。その理由としては、九頭竜川では上流に大きな貯水容量を有する真名川ダムや九頭竜ダムがあり、さらに、これらを水源とする水力発電系統が発達しており、気温によらず年間を通じて安定した水温構造が発達していることがあげられる。

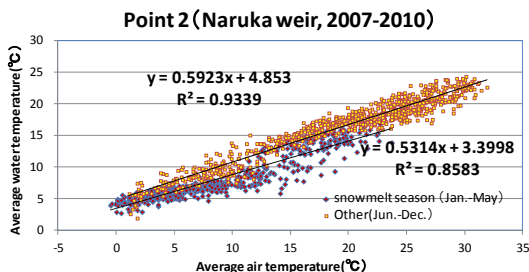


Fig. 9 Relation between air temperature and water temperature at Naruka weir (2007-2010)

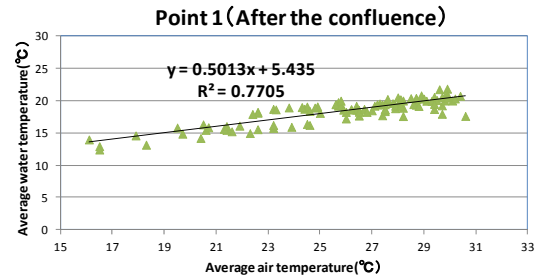


Fig. 10 Relation between air temperature and water temperature at Point 1 (2011/5/28～9/13)

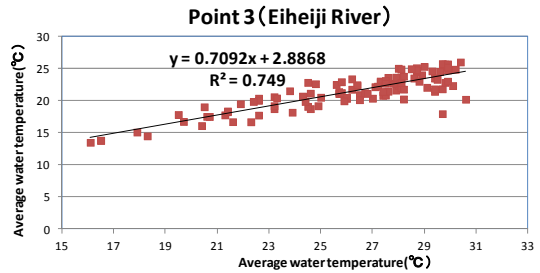


Fig. 11 Relation between air temperature and water temperature at Point 3 (2011/5/28～9/13)

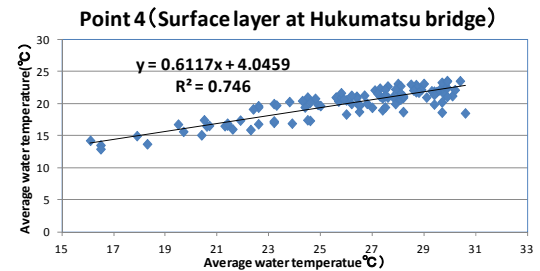


Fig. 12 Relation between air temperature and water temperature at Point 4 (2011/5/28～9/13)

次に福松大橋右岸の湧水の水温特性を検討するために、これと同等な水質と予測された永平寺町上水道課が測定した周辺の井戸の水温データを入手した。地下水の水温は気温の季節変化と対応しておらず、8月であっても11～13°Cの水温が保たれている。

4.3 市荒川発電所が水温に与える影響

本節では、次章で市荒川発電所からの発電放流水が本川の水温に及ぼす影響について考察するため、連続的な水温データを得られなかった地点における水温の逆算・推定を行った。

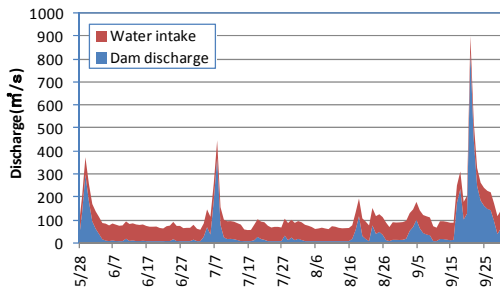


Fig. 13 Water intake and discharge from Shimoarai dam

Fig. 13 は下荒井ダムの放流量と取水量を示したものである。放流された水は九頭竜川を流れ、取水された発電用水は市荒川発電所から九頭竜川に合流する。図からわかるように、平水時はほとんどの水は取水に用いられ、ダムからの放流水の方が大きな割合を占めるのは総流量が 100(m³/s)を超えるような場合のみである。従って、合流後の水温は、平水時は発電用に取水された水の水温の、洪水時はダム放流水の水温の影響が大きいと考えることが出来る。

本研究では発電水の水温は5月28日と9月13日の2度の現地調査結果があることからその期間は線形に上昇し続け、9月13日以降は維持されると仮定した。また合流前の本川の水温は鳴鹿大堰の過去の水温観測値から得られた回帰式で与えた。合流後の水温は市荒川発電所の取水堰である下荒井ダムの放流量と取水量のデータを用いて重みをつけ、上記の本川と発電放流水温が完全混合したものと水温を予測した。流量、水温をそれぞれ合流後 Q , T 、本川合流前 Q_1 , T_1 , Q_2 , T_2 とおくと、合流後の水温 T は次式で求めた。

$$T = \frac{Q_1}{Q} T_1 + \frac{Q_2}{Q} T_2 \quad (7)$$

Fig. 14 は5月28日～9月30日までの期間で計算したものである。Fig. 13 とあわせてみればわかるように、平水時は発電水温に近い水温となる。

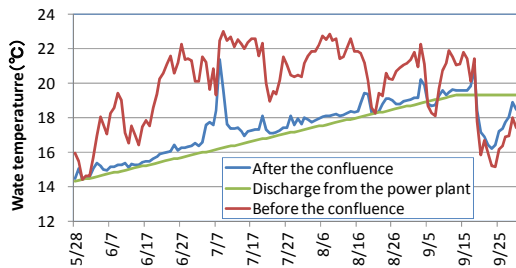


Fig. 14 Water temperature before and after the confluence, discharge from the power plant

Fig. 15 は①現在、②発電所がなかったとした場合、③ダム放流量と取水量を半分ずつにした場合に分けて、合流後の水温を示したものである。発電所がなかった場合は本川上流の水温がそのまま用いられ、半分の水を取水した場合は取水を減らしたことになるので、合流後の水温は現在よりも高くなる。

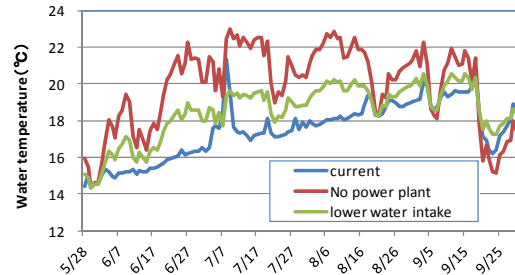


Fig. 15 Water temperature after the confluence based on intake conditions by the power plant

5. 一次元モデルを用いた河川水温予測

5.1 概要

水温予測は多く行われており、温暖化による気温上昇を踏まえた水温予測を行い、サケ科の魚類の生息場所が減少する(温度障壁を超える地点が増える)ことを予想した研究も行われている。大きく分けて二つの手法が用いられている。一つは回帰式を用いたものである。もう一つは平衡水温、熱収支による解析である。

回帰式は1次回帰式が用いられることが多い。北野らは地下水温を気温から、水温を水源温度と流下距離から求める回帰式を用いて、気温が1-4°C上昇したと仮定したときの水温を予測し、河川の下流側に温度障壁を超える地点が増えると推定している(北野ら, 1995)。

対象領域、対象とする時間スケール、期間の違いによって、シミュレーションの手法は異なると考えられる。宮本ら(2009)は流域地形則と一次元熱輸送方程式により水温予測を行った。その際、求める精度に応じて拡散項、非定常項などを無視している。

Sinokrot et al. (1995) は一次元の水温モデルを用いて、地球温暖化による水温上昇が魚類の生息可能な環境をどの程度減らすかを確かめるシミュレーションを行った。上流側の流入水温がダム表層か深層か、湧水であるか、また地下水の50%が上流から流れ残りが均等に湧出する場合など条件を変え、予測を行い、湧水や深層放流の効果を指摘している。その際、魚類にとって限度と考えられる水温を1週間超えた場合に生息できなくなると仮定している。

前章で検討したような河川内での水温の異質性を再現予測するには3次元モデルを用いることが最もよく再現できる。しかしながら長期間にわたって、広範囲の予測を行うことは計算負荷の観点から現実的ではない。まず最も簡便な1次元モデルを用いて、流下につれての水温の上昇、発電放流水・湧水の合流を再現する。

本研究では熱収支を考慮した予測を行った。以下でそのモデルの基礎式について概説する。

水の連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA) = 0 \quad (8)$$

x は流れ方向の座標, A は断面積, u は流速である。

運動量保存則

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = i - \frac{gn^2 u^2}{h^3} \quad (9)$$

h は水深, i は河床勾配, n はマンニング係数。

水温収支則

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{H}{\rho C_w} \quad (10)$$

T は水温, D_x は x 方向における拡散係数, H は発生熱量, ρ は水の密度, C_w は水の比熱である。

熱収支

(1) 短波放射式 (Beer 式) Q_s ($\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

$$Q_s = Q_0 e^{-\eta_1 z} \quad (11)$$

ここに Q_0 は水面での短波放射量, η_1 は減衰係数, z は水深である。

$$Q_0 = (1 - \alpha)(1 - \beta)Q_{in} \quad (12)$$

ここに, α は表層吸収率, β は反射率, Q_{in} は入射量である。

(2) 長波放射 (Stefan-Boltzman 式)

a) 水面からの長波放射 (単位: $\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

$$Q_{LR} = \varepsilon \sigma T_k^4 \quad (13)$$

ここに ε は放射率, σ は Stefan-Boltzman 定数 ($=2.0411 \times 10^{-7} \text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}_f \cdot \text{K}^4$), T_k は絶対水温である。

b) 大気からの長波逆放射 (単位: $\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

$$Q_{La} = 0.937 \times 10^{-5} \sigma T_2^6 (1 - R) \quad (14)$$

ここに T_2 は水面以上 2m のところの絶対気温,

R は水面反射率である。

c) 雲による長波逆放射の増加

$$Q_{LAC} = (1 + 0.17n^2)Q_{La} \quad (15)$$

ここに n は雲量である。

(3) 水表面における水と空気の熱交換量 (単位: $\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

$$H = -\rho_a C_w C_H U (T_a - T_s) \quad (16)$$

ここに U は流速, T は温度, ρ は密度, C_w は空気の定圧比熱, C_H は定数 ($1.3 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$) である。添字 a と s はそれぞれ空気および水表面に対応する。

(4) 蒸発における熱損失 (単位: $\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

$$E = -\rho_a C_p U (q_a \psi_a - q_s) \quad (17)$$

ここに, ψ_a は相対湿度, C_p は定数 (1.4×10^{-3}) である。 q は比蒸気圧であり, 次式で示される。ただし, t は水温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

$$q = 0.0418 \times t^2 - 0.6216 \times t + 13.0068 \quad (18)$$

5.2 再現計算

市荒川発電所から発電放流水が九頭竜川に合流する地点から下流の鳴鹿大堰までの水温変化を, 1次元水温予測モデルを用いて検討する。

水温の観測データが得られた 5/28~9/13 までの期間のデータを用いて再現性を確認した。その際の入力条件は下記のとおりである。流量は下荒井ダムからの総放流量を用いた (Fig. 13)。気象データは福井市で観測された気象庁の観測値を用いた (Fig. 16, Fig. 17)。メッシュサイズは $dx=400(\text{m})$ で, タイムステップは $dt=0.001(\text{day})$ とした。上流端は市荒川発電所の放流水が本川に合流した地点として, 水温は前章で述べた方法で与えた。

計算した結果得られた水温を地点 1 (合流後 2) 地点のデータロガーによる水温データに加え, 調査日に計測した合流後の 3 地点の水温データから水温の

計算値の補正を行った。

水温の季節変化は再現できていない時期もあったが6月から8月へと水温が上昇していく傾向は再現できていた。これらの季節変動を再現することは難しいと考え、この期間の平均気温を一致させるように式(10)の熱量発生項を補正した結果、両者の平均気温の差は0.52℃から0.03℃になった。流下方向の水温変化の再現性を確かめるために現地観測データがある合流後の3地点の水温を確認した結果、補正を行うことで水温計算値はより計測値に近づくことが確認できたので、以下ではこの条件で計算を行うこととした。

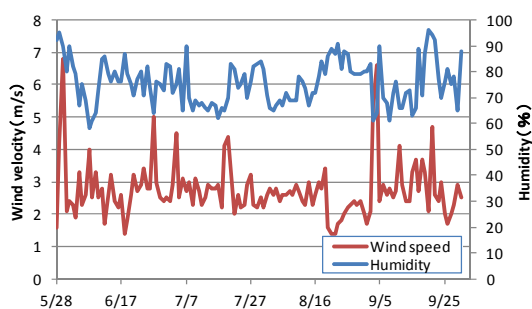


Fig. 16 Input condition (wind speed, humidity)

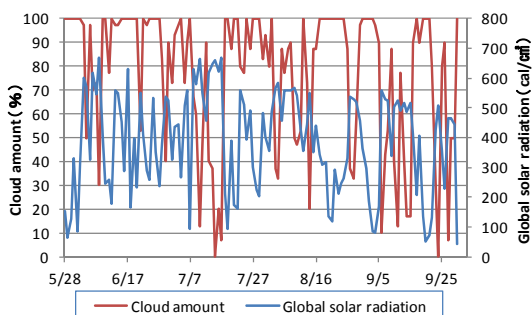


Fig. 17 Input condition (cloud amount, global solar radiation)

5.3 条件変化に伴う水温影響予測

気温が上昇したと仮定したときに、本川と発電放流水が混合した上流端の水温をどの程度にすればよいか検討する。特に8月の初旬に平水が続き、水温の上昇が最も懸念されることからこの期間の水温、特に最も気温が高かった8月8日に着目した。

流下に伴う水温変化を Fig. 18 に示す。現況の九頭竜川では市荒川発電所からの発電放流水が合流することで水温が低下し(22.9℃→18.1℃)、流下するにつれて熱交換により水温が上昇していき、鳴鹿大堰まで流下するところには20.8℃まで上昇することが再現されている。前にも述べたように夏場は合流前の本川と発電放流水の水温差が3℃以上あるため流量

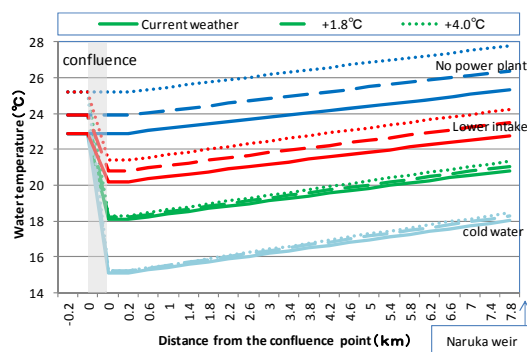


Fig. 18 Calculation result of water temperature

比によって合流後の水温が大きく異なる。図には発電所がなく、取水が全く行われない場合、取水量をダム流量の半分まで減らした場合、取水量をそのままにして発電放流水をさらに水温低下させた場合も比較のために示している。

現在の発電放流水の合流が維持された状態で地球温暖化が進行した時、気温上昇によって本川上流水温は上昇するが、発電放流水温に変化がなかった場合は、合流後に一気に冷却されることから気温上昇に伴う水温変化は小さくなる。その後は、流下につれて水温は上昇するが、気温が高いほど上昇する幅がわずかに大きい。

次に、発電所がない場合について述べる。発電所からの放流水は夏場の水温上昇を大きく抑える効果が期待できるが、発電所がない場合、気温が上昇した影響が本川の水温上昇となってそのまま下流に伝わる。サクラマスの子息にとって厳しくなる24℃以上の河川区間が大部分となることがわかる。

5月に観測された放流水温(14.3℃)が夏場も保たれたと仮定した場合、同様に発電放流の影響が大きい場合、気温の上昇に関わらず、冷水が流入すれば合流後水温は低い状態で維持される。

一方、取水量を減らした場合、合流後の水温が現況と発電所がない場合の中間ほどにまで低下して、そこから流下するにつれて上昇する。

これらの結果を総合する。水温が上昇しても発電所の放流水温は変わらないという仮定の下では、現在のような発電所の運用が行われたとき、気温が上昇してもサクラマスの子息可能な閾値と考えられる24℃を超えない。冷水放流が行われた場合は18℃の低水温が鳴鹿大堰まで保たれ、サクラマスの子息の観点からは最適と考えられる。発電所がなくなった場合は4km流下すると、気温が上昇した場合は合流した時点で24℃を超える。取水量が減少し発電が活発に行われなくなった場合も、気温が4℃上昇した場合は鳴鹿大堰よりも上流で気温が24℃を超える。

なお、発電放流は上流の真名川ダムなどのダム貯水池の水温構造により放流水温が決定される。ここでは、温暖化後も一定と考えたが、実際にはダム湖も温暖化の影響を受けて表層を中心に温度上昇することが予想される。それでも、ダム湖の深層は低温が維持されると考えられるが、このダム湖の水温上昇の影響は、少なからず下流にも影響してくると考えられ、発電放流水温も上昇すると考えられる。

6. 二次元モデルを用いた河川水温予測

6.1 概要

三次元のモデルを用いることが望ましいが、三次元で長期間の予測を行うことは計算負荷が大きいため、本研究では平面二次元モデルを用いて予測を行い、その中で特に淵で湧水が発生している地点では鉛直 2 次元モデルを用いより詳細な予測を行ういわば準 2 次元の予測を行った。一次元モデルではなく二次元モデルを用いる利点は淵がある地点の流速や水温の変動を予測できることである。

以下に二次元鉛直モデルの基礎方程式を示す。
水の連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

x, y は流れ方向及び鉛直方向の座標、 u, v は x, y 方向における流速である。

運動量保存則

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (21)$$

A_x, A_y は x, y 方向における渦動粘性係数、 g は重力加速度、 ρ は水の密度である。

水温収支則

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{H}{\rho C_w} \quad (22)$$

T は水温、 D_x, D_y は x, y 方向における拡散係数、 H は発生熱量、 C_w は水の比熱である。

静水圧近似

$$\frac{Dv}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + A_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (23)$$

$\Downarrow A_y \cdot A_x = 0$ と仮定して

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - g \quad (24)$$

熱収支式は前章で用いたモデルと同様である。

6.2 計算条件

メッシュサイズは $dx=10(\text{m})$ 、 $dz=0.1(\text{m})$ 、タイムステップは $dt=0.01(\text{day})$ である。流量は鳴鹿大堰の放流量を用いた。気象条件は前章で用いたものと同様である。流入水温は鳴鹿大堰の観測値を用いた。湧水の水温は夏場の井戸の水温を参考にして 12°C とした。湧水は発生場所の水温を常に一定と設定することで表現した。淵の形状は最大水深を 3m 、 5m と変えて計算した (Fig. 19, Fig. 20)。湧水が発生する位置の違いによる水温の変化についても検討した。位置は水深を変えて 3 地点とし、浅い順に A, B, C と呼ぶ。

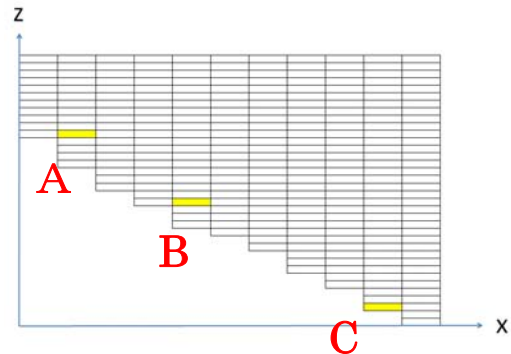


Fig. 19 Mesh of the calculation (depth:3m)

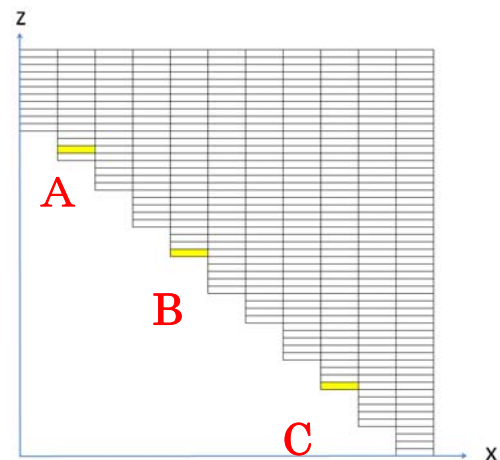


Fig. 20 Mesh of the calculation (depth:5m)

6.3 計算結果

はじめに水深が3mの場合と5mの場合の水温構造を比較する。水深が3mの場合は最高水温が表層の22.82℃で、最低水温が最深部の22.14℃であり鉛直方向の水温差は大きくない (Fig. 21)。水深が5mの場合は最高水温が表層の22.30℃、最低水温が最深部20.87℃であり水温差は水深が3mの場合よりも大きく (Fig. 22)、下層に水温の低い層が保たれている。水深が3mの場合では下層であっても日射が届き、また、流速も相対的に高いために上流から流入している水が下層にも供給されるため水温が低下しないと考えられる。

湧水の発生位置を変えた場合について述べる。湧水発生場所よりも水深が低い部分では水温が湧水の影響を受けて水温が低下する。まず、水深3mの場合について述べる、湧水発生地点Aの場合は約12℃の水塊が下層に広く形成される (Fig. 23)。湧水発生地点Bの場合は下層に約13℃の水塊が形成される (Fig. 24)。湧水発生地点Cの場合、下層は約17℃の水塊があるものの、中層では22℃となり他の発生地点ほど有効な範囲が広がらない (Fig. 25)。水深が5mの場合も同様の傾向が見られた。湧水発生地点Aの場合は水深3mの場合と同様に約12℃の水塊が形成されるがその範囲が広い (Fig. 26)。湧水発生地点Bの場合は約19℃の水塊ができ水深が3mのときと比較して水温が高い (Fig. 27)。湧水発生地点Cでも水深3mのときと比較して広い範囲で低水温の層ができる (Fig. 28)。

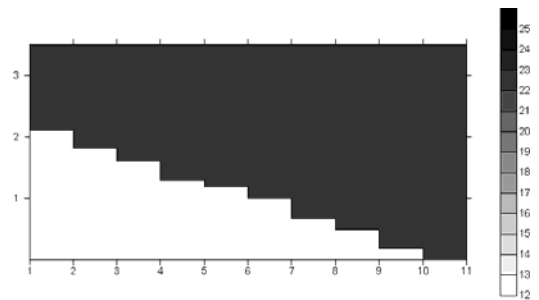


Fig. 21 Distribution of water temperature (depth:3m)

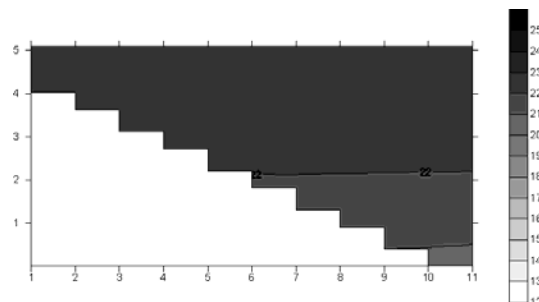


Fig. 22 Distribution of water temperature (depth:5m)

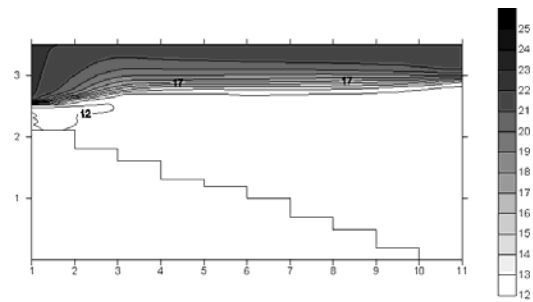


Fig. 23 Distribution of water temperature (depth:3m, spring point A)

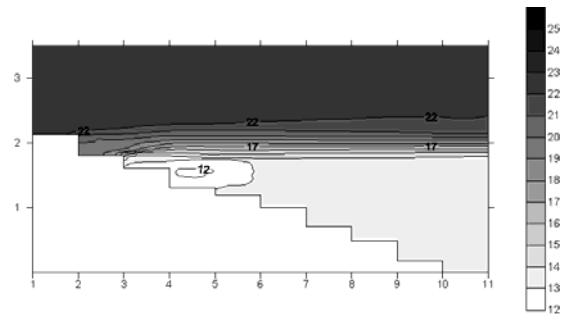


Fig. 24 Distribution of water temperature (depth:3m, spring point B)

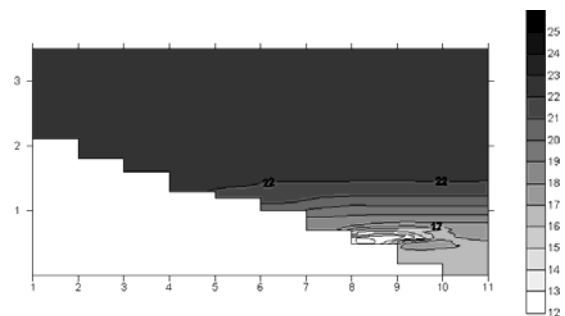


Fig. 25 Distribution of water temperature (depth:3m, spring point C)

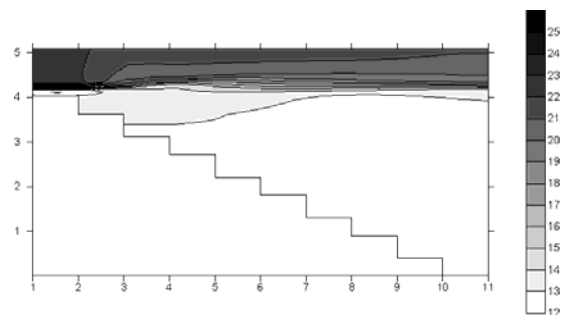


Fig. 26 Distribution of water temperature (depth:5m, spring point A)

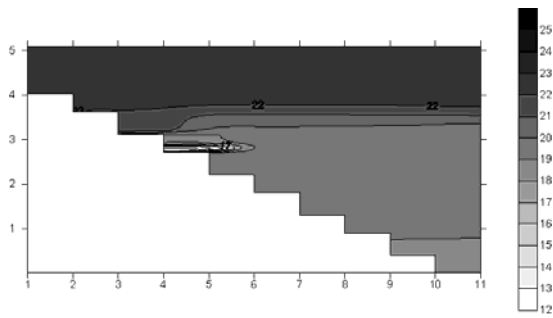


Fig. 27 Distribution of water temperature (depth:5m, spring point B)

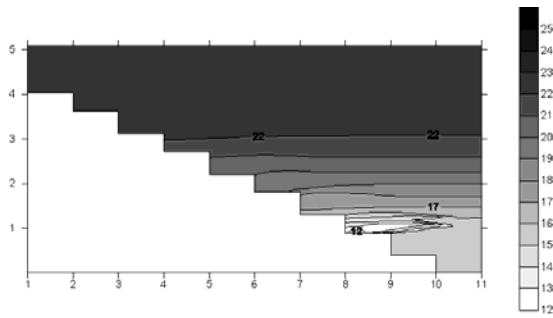


Fig. 28 Distribution of water temperature (depth:5m, spring point C)

水深による表層、中層、底層の水温を Fig. 29 に示す。これによれば、洪水時に淵の内部で混合がおき淵内部での水温は一樣となるが平水時には表層が底層より最大約 6°C の水温が高くなる。しかし、水深が 3m の場合には平水時でも層による水温差は大きくない。

井上ら(2010)によるとおおむね 1.5m 以上の淵でサクラマスの子息が確認されているが、今回の計算結果では、水深が 3m では表層と底層の温度差は大きくなく混合しており、水深が 5m 以上になって水深による水温の差が顕著に見られることが確認された。また湧水が発生している場合はその地点よりも深い場所では夏季に水温低下が見られることや発生する水深の違いによって低水温層の水温や位置が異なることが確かめられた。河川に湧水が発生しても本流の流速が速い地点で湧いている場合は湧出してすぐに拡散してしまうため、その水が滞留するような地形があることがサクラマスにとって重要であると考えられる。

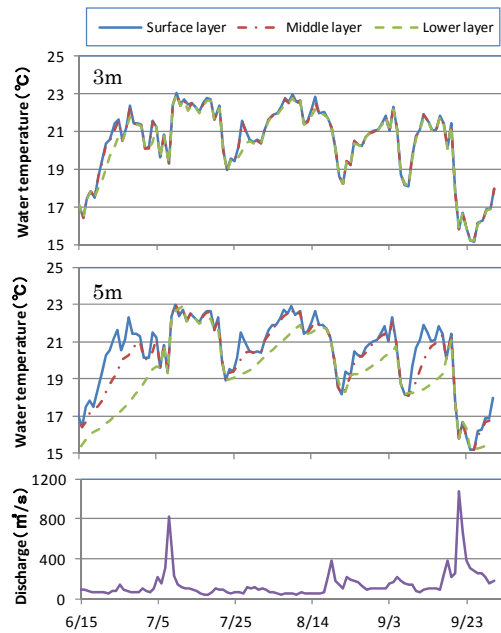


Fig. 29 Calculated water temperature prediction at the surface, middle and bottom layer of the pool which has 3m and 5m depth and inflow discharge

7. 結論

本研究では九頭竜川のサクラマスの生息可能な水温環境について水温モデルを用いて予測計算した。気温上昇に対して現在の水温環境を維持するための手法として発電放流水と河川地形に着目した。

得られた結論を以下に示す。

(1) 現地調査により、市荒川発電所の放流水が本川に合流することによる水温低下と、合流後の流下に伴う水温上昇、福松大橋右岸地点の湧水の効果を確認することができた。

(2) 1次元モデルを用いて発電所放流水合流後の水温の予測計算を行った結果、発電所からの放流水の水温の低さと流量が現在のままであれば気温が上昇しても鳴鹿大堰までの区間はサクラマスの温度障壁と考えられる 24°C を超える地点はないと予測された。24°C を超える地点が現れるのは、発電が一切行われない場合や、取水量が減り気温が上昇した場合と推測され、発電放流水が冷水性魚類に与える正の影響が示唆された。

(3) 2次元鉛直モデルを用いて淵のもたらす水温環境や湧水の与える影響について考察した結果、水深が 5m 以上では水深による水温の差が顕著に見られることが確認され、夏季の避難場所としての可能性があることが示唆された。また湧水の発生により、低水温層が効果的に維持されることが考えられ、また、こうした湧水が効果的に滞留するような河川地

形が形成されることがサクラマスにとって重要であると考えられる。

今後の課題としては、温度障壁を超えない水温層が存在すれば、サクラマスはその場所で生息可能であると考えられる。ただし、そのような低水温の水塊の体積が小さい場合は生息可能な個体数は限られる。河川全体で、サクラマスの生息可能な環境容量を維持するためには、今回の検討で行った河川縦断方向の検討（本川水量の維持、発電放流水の合流とその水温、流下に伴う水温変化など）、河川地形の検討（河道内の砂州形態、瀬・淵構造、湧水の流入と滞留構造など）を組み合わせて、そのような空間をどれだけ多く作ることが出来るかを評価することが必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省近畿地方整備局福井河川事務所の協力を得た。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 新井正 (2000) : 地球温暖化と陸水水温, 陸水学雑誌, 61(1), pp. 25-34.
- 伊藤忍・石井健太郎・東信行・五十嵐勇氣 (2007) : 水温上昇に伴うカジカ大卵型 (*Cottus pollux*) の成長特性の変化, 応用生態工学会研究発表会講演集
- 井上 創・千田 庸哉・仮谷 伏竜・稲葉 修一・坂本 健太郎・宮島 重保・山崎 憲人・立野 祐輔 (2010) : 神通川におけるサクラマスの越夏場所の特性について, 応用生態工学会研究発表会講演集.
- 小倉紀雄・山本晃一 (2005) : 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系, 技報堂出版.
- 北野文明・中野 繁・前川光司・小野有五 (1995) : 河川型オショロコマの流程分布に対する水温の影響および地球温暖化による生息空間の縮小予測, 野生生物保護, 1(1), pp. 1-11.
- 近藤純正 (1995) : 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, 8(2), pp. 184-196.
- 佐藤弘和 (2001) : 河畔林の被陰がサクラマスの成長に及ぼす影響-夏季河川水温を指標とした解析, 日林誌, 83, pp. 22-29.
- 田子泰彦・辻本良・村木誠一 (2006) : 維持流量設定後における神三ダム直下の大きな淵での水温と溶存酸素量の改善, 応用生態工学, 9(1), pp. 63-71.
- 田中哲生 (2008) : 地球温暖化と淡水魚の盛衰, 温暖化と生物多様性, 岩槻邦夫・堂本暁子編著, 築地書館.
- 谷口義則・中野 繁 (2000) : 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, 61(1), pp. 79-94.
- 樋口広芳・小池重人・繁田真由美 (2009) : 温暖化が生物季節, 分布, 個体数に与える影響 (地球温暖化--日本における影響の総合評価), 地球環境, 14(2), pp. 189-198.
- 宮本仁志・菅原康之・道奥康治 (2009) : 上・中・下流域における河川水温の形成要因に関する解析的検討, 水工学論文集, 53, pp.1153-1158.
- 真山紘 (1992) : サクラマス *Oncorhynchus masou* (Brevoort) の淡水域の生活および資源培養に関する研究, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 46, pp. 1-156.
- 山辺功二 (1970) : 山地河川の流出水温について, 水温の研究, 14(4), pp. 42-47.
- Arcscott, D.B., K. Tockner and J. Ward (2001): Thermal heterogeneity along a braided floodplain river (Tagliamento River, northeastern Italy), Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 58(12), pp. 2359-2373.
- Gostner, W., A. Peter, A.J. Schleiss (2011): Temperature regime in a braided river system: an indicator for morphological heterogeneity and ecological potential, 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia.
- Magnuson, J.J., L.B. Crowder, P.A. Medvick (1979): Temperature as an ecological resource, American Zoologist, 19(1), pp. 331-343.
- McCormick, J.H., B.R. Jones, K.E.F. Hokanson (1977): White sucker (*Catostomus commersoni*) embryo development, and early growth and survival at different temperatures, Journal of the Fisheries Board of Canada, 34(7), pp. 1019-1025.
- Nakano, S., F. Kitano, K. Maekawa (1996): Potential fragmentation and loss of thermal habitats for charrs in the Japanese archipelago due to climatic warming, Freshwater Biology, 36(3), pp. 711-722.
- Sinokrot, B., et al. (1995): Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs, Climatic Change, 30(2), pp. 181-200.
- Solomon, S., et al., IPCC, (2007): Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, Cambridge University Press.

Stefan, H.G., E.B. Preud'Homme (1993): Stream temperature estimation from air temperature. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 29(1), pp. 27-45.

Vannote, R., et al.(1980): The river continuum concept. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 37(1), pp. 130-137.

(論文受理日 : 2012 年 6 月 8 日)

Study on Environment of River Water Temperature Suitable for Cold Water Fish Habitat

Junya NAITO⁽¹⁾, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

(1) The Chugoku Electric Power Company

Synopsis

Water temperature is very important factor for cold water fish habitat. But river water temperature is predicted to increase by global warming. In order to clarify how fish habitat may be lost, we conducted field survey in the Kuzuryu River and simulated river water temperature by 1D and 2D numerical models calculating heat exchange between atmosphere and water. To maintain cold water fish habitat, we evaluated the cooling effects of input water temperature from a power station suitable for cold water fish that depend on amount and temperature of discharged water from upstream dam. We also studied effects of water depth and spring water intrusion at deep pool areas in the river channel.

Keywords: water temperature, global warming, Kuzuryu river, river geomorphology, hydropower generation, *Oncorhynchus masou*