

ダムによる水温レジームの変化：その定量化

Alternations of water temperature regime by dams: Quantification

研究第三部 上席主任研究員 一柳 英隆
研究第三部 上席主任研究員 岩城 安英
研究第三部 環境技術開発室長 大杉 奉功
研究第三部長 原田 昌直

ダムによる水温レジームの変化について、2ダムを対象とし、複数の指標を用いてダムの流入水温と放流水温を比較することで解析した。指標は、生物影響を考慮したものであり、平均的な水温、高温や低温の温度や期間、積算温度、季節および短期的変動、季節性に関するものが含まれている。2ダムとも放流水温の上昇が認められた。短期的な変動は、ダムにより小さくなることが多いが、温暖な季節には温度の急激な変化（とくに水温の低下）が認められた。それらは出水時にダムの放流口を変えることで引き起こされていた。
キーワード：水温レジーム、ダム、積算温度、短期変動、選択取水、定量化

Alternations of water temperature regime in caused by dams were analyzed by comparing the inlet and outlet temperatures of the dam lakes using quantitative indicators for 2 dams in Japan. The indicators are considering impacts on aquatic organisms, and those includes average water temperature, degree and period of high and low temperature, accumulated temperature, seasonal and short term fluctuation, and seasonality. Temperature of outlets was higher than that of inlets. Although short-term fluctuations were usually smaller in outlet water, sharp temperature dropping were often observed during the warmer season. They were caused by changing outlets of dam body during heavy rain.
Key words : thermal regime, dam, accumulated temperature, short-term fluctuation, selective intake facilities, Quantification

1. はじめに

河川性の生物にとって水温はもっとも影響が大きい環境要素の一つである。とくに魚類や昆虫などの無脊椎動物を含む変温生物にとっては、代謝率に直接影響し、成長や発育の速度、アクティビティーなど生物的反応を改変する。その結果、各種の河川における分布の流程上の位置や地理的な分布を制限し、各所の生物学的生産や分解など生態系プロセスも影響をうける（たとえば、Allan & Castillo, 2009）。

河川にダムができた場合、ダム下流河川の水温レジームは大きく変化する（Allan & Castillo, 2009）。この温度変化により、河川性の生物は影響をうける（谷田・竹門, 1999; Allan & Castillo, 2009）。一般に、ダム湖など大きな止水域は、鉛直的な温度勾配が生じるために、温暖期には貯水池の水面付近の温度が高くなる。温暖期に表層から下流へ放流した場合には、下流河川の水温は高くなり、冷水性魚の種の多様性が低下したり（Lessard & Hayes, 2003）、ライフサイクルが短くなる（Hayashi, 1996）などの現象が生じる。一方で、ダム湖の低い層から放流された場合には、ダム下

流は温暖期に低水温となり、低水温に適応した種が優占するなどの現象が生じる（内田1987; Uchida 1990; Stevens et al. 1997; Pardo et al., 1998）。このように、季節ごとにダム下流の水温がダムの存在により上昇や下降し、そのことが生物に影響する。また、ダム湖という大きな水体を通過することにより、水温の短期的な変動が変化する（一般には、変動性が小さくなる）。変温性の生物にとっては、その変動性の大きさが生理活性に影響する。たとえば、昆虫では変動温度下で幼虫期を過ごした個体は一定温度で過ごした個体よりも成虫になってからの適応度が高くなる場合がある（Huey & Berrigan, 1996）。短期変動のダムによる変化の河川生物への影響の検出例はほとんどないが、このようなダムによる短期的な変動の変化の影響も、実際の河川において生じている可能性は否定できない。

これらのダムによる水温改変の下流河川生態系に対する影響を小さくするために、近年、多くのダムで選択取水設備が設けられている。選択取水設備では、貯水池内の鉛直的な温度勾配を利用し、概ね流入水と等しい温度層から放流することで、下流への影響を低減化しようとするものである。たとえば、下久保ダム（埼

玉県)では、選択取水設備設置後に、春から夏にかけての冷水現象が改善されたことが知られている(池淵, 2009)。ただし、下久保ダムでは、春から秋のダム下流水温は、ダム上流とほぼ等しいものの、冬季の水温は選択取水設備設置後もダム上流よりも高いままである。一般的に河川に比べて広いダム湖湖水表面は、太陽放射の大きなエネルギーを受ける。そのために、常に上流から流入する水温と等しい水温で下流に放流することは困難である。どの時期にどの程度の温度変化が生物や生態系にとって影響が低いかを明らかにすることは今後の課題といえるだろう。

ダムによる環境改変の影響を評価するためには、インパクト-レスポンスにおけるインパクトもレスポンスも定量的な数値指標に置き換えることが必要である。たとえば、流量レジーム(流況)に関しては、各季節の流量や季節性、大小各種のイベントを含めた数値指標により、流況改変について検討がなされている(たとえば、Riis et al., 2008)。しかし、ダムの温度改変を定量的な指標で評価しようとした試みはほとんど認められない。

本報文は、まず、ダムがどのような水温レジームの変化をもたらしているのか、さまざまな時間スケールにおいて記述する。その結果から、ダムによる温度改変の影響を検討するための温度指標を複数提案し、それを用いて、ダムによる温度の影響を具体化する。環境影響評価では、過去10年の幅に放流水温が収まるかどうかを基準にして考えることが多くある(たとえば、国土交通省東北地方整備局, 2017、国土交通省近畿地方整備局, 2013)。ここでは、今後、それを超えて、実際にダムによりどのような水温レジームの改変がなされ、どのような影響があるのかを解析していく一助としたい。

2. 対象ダム

苫田ダム(岡山県)と徳山ダム(岐阜県)を解析対象とした。それぞれのダムの諸元を表-1に示す。両ダムともに選択取水設備を有している。

表-1 解析対象ダムの諸元(ダム諸量データベース <http://mudam.nilim.go.jp/home>、およびダム便覧 <http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html> より)

ダム名	北緯	東経	水系河川	ダム形式	目的	堤高(m)	集水面積(km ²)	湛水面積(ha)	総貯水容量(千m ³)	有効貯水容量(千m ³)	湛水開始年月
苫田ダム	35度7分	133度52分	吉井川水系	重力式コンクリート	洪水調節・不特定利水・灌漑・上水道・工業用水・発電	74.0	217.4	330	84,100	78,100	2004年5月
	39秒	40秒	吉井川								
徳山ダム	35度40分	136度30分	木曾川水系	ロックフィルダム	洪水調節・不特定利水・上水道・工業用水・発電	161.0	254.5	1,300	660,000	380,400	2006年9月
	2分	7分	揖斐川								

苫田ダムの選択取水設備は、最低水位189.0m～常満210.5mの間は、任意に選択できる。運用としては水深7m(水位追従)からの取水を基本とし、取水位置の水温が過去10年変動幅の上限を上回る場合には上限水温と等水温層から取水、下限を下回る場合には下限水温と等水温層から取水するとしている。また出水時、取水位置のSSが流入水のSSより高い場合には、表層からの取水をしている。

徳山ダムの選択取水設備の運用としては、管理開始時には、取水範囲の中で可能な限り流入水温と同じ水温層、かつ、SS濃度が25mg/L以下の水温層から取水することとし、全層が25mg/L以上となった場合は表層取水する運用としていた。ただし、現在は、ダムからやや高い水温(流入水温から+3℃程度)で放流する運用を行っている。これは、ダム下流における取水と流量確保との関係により、夏場に流量が多い区間が生じ、その区間において温度上昇が起こらないまま低い水温で流れることの対策として、目標とする水温が地元漁業協同組合の要望等により策定されたためである(管理者である水資源機構からの情報)。

いずれのダムにおいても、ダムからの放流量が選択取水設備の流量限界を超える場合には、水位維持放流設備や堤体下部にある常用放流設備から放流されることになる。

3. 方法

(1) 水温レジーム変化のグラフ検討

指標を用いた統計的な解析に先立ち、季節変化、日周期変化などについて、グラフ作成により記述した。ダムの水温は、各ダムの管理所から提供を受けた流入および放流の時刻(毎正時)データを用い、流入・放流の比較からダムによる影響を検討した。

a. 日平均の季節変化

年に120日以上データがある年(苫田ダム:2005、2006、2008～2010、2012～2014年、徳山ダム:2008～2015年)を使用し、日平均データを用いて、季節変化を記述した。

b.日較差

年に120日以上のあるデータがある年(苦田ダム:2005、2006、2008～2010、2012～2014年、徳山ダム:2008～2015年)を使用し、日最高水温と日最低水温の差を日較差とした。

c.短期的な変動

年に120日以上のあるデータがある年(苦田ダム:2005、2006、2008～2010、2012～2014年、徳山ダム:2008～2015年)を使用し、日平均の前日との差を計算した。

d.日周変化

日周変化については、温度が高い時期と低い時期として8月と2月を抽出し、解析した。時刻ごとに流入と放流が両方揃っているデータを使用し、片方だけのものは使わなかった。一ヶ月のうち、15日以上のあるデータがある年月を使用した。8月の解析使用年は、苦田ダム:2005、2006、2008～2010、2012～2014年、徳山ダム:2008～2015年だった。2月の解析使用年は、苦田ダム:2005～2010、2012～2014年、徳山ダム:2008～2015年だった。ただし、徳山ダムは1、3、7、10、13、16、19、22(とくに10と22)時のデータがないことが多いことを記しておく。

(2) 水温レジーム指標とその統計

流入・放流ともに90%以上(329日以上)の日数がある年(苦田ダム:2005、2006、2008、2009、2012、2014年、徳山ダム:2009、2010、2012～2014年)を

解析に使用し、表-2の24指標について解析した。

ここで、指標1～9は、水温の高低に関する指標である。指標1は平均的な温度、2、6、7は高温側の温度や期間、3～5は低温側の温度や期間を表している。8および9は積算温度であるが、積算温度は、発育限界温度以上の温度(発育有効温度)×日数で表され、変温生物の発育は積算温度により左右され、変温動物の発生・年間世代数などの予測に用いられる(たとえば、藤崎, 2014の総説参照)。発育限界温度は生物によって異なる。たとえば、水生昆虫の場合には、0℃近いものから10数℃までの変異がある(たとえば、石綿ほか, 2014)。一般に温暖地に適応した生物は高く、寒冷地に適応した生物は低いが、今回は0℃と10℃の2温度について計算した年積算温度とした。

指標10～20は変動性の指標である。10は、年の変動の大きさを示す年較差である。11～20は短期的な変動をしめす、日較差、前日との差を表している。ここで、短期的な変動は洪水期(または温暖期)と非洪水期(または寒冷期)で違った挙動を示していたため(結果参照)、短期的な指標に関しては、洪水期(6-10月)と非洪水期(11-5月)に分けた。

指標21～24は、季節性の指標である。温度が最も高くなった日、最も低くなった日、平均的な温度が高い季節(重心)が含まれている。温度の重心としては、0℃または10℃以上の積算温度を用いた。これらは発育量が大きい季節分布の片寄りを示す指標である。

統計的な解析は、R ver.2.15.1(R Core Team,

表-2 温度指標のリスト

指標番号	温度指標	単位	算出方法
1	平均水温	℃	日平均の年平均値。欠測データは、欠測直前日および欠測直後日の平均値を挿入。ただし、年間の比較も考慮し、うるう年の2月29日は削除して計算。
2	最高水温	℃	時刻データからの年最高水温。
3	最低水温	℃	時刻データからの年最低水温。
4	5℃以下の日数	日	日平均が5℃以下になった年間日数。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同じ
5	10℃以下の日数	日	日平均が10℃以下になった年間日数。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同じ
6	20℃以上の日数	日	日平均が20℃以上になった年間日数。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同じ
7	25℃以上の日数	日	日平均が25℃以上になった年間日数。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同じ
8	積算温度(0℃)	日度	0℃以上の温度×日数の年累積。欠測データは、欠測直前日および欠測直後日の平均値をいれた。ただし、うるう年の2月29日は削除して計算。低温適応型の変温動物の発生・成長の指標。
9	積算温度(10℃)	日度	10℃以上の温度(当該温度-10℃)×日数の年累積。欠測データは、欠測直前日および欠測直後日の平均値をいれた。ただし、うるう年の2月29日は削除して計算。高温適応型の変温動物の発生・成長の指標。
10	年較差	℃	最高水温と最低水温の差。
11	日較差中央値(非洪水期)	℃	非洪水期(1-5月、11-12月)の日較差(日の最高水温と最低水温の差)の年中央値。
12	日較差中央値(洪水期)	℃	洪水期(6-10月)の日較差の年中央値。
13	日較差最大値(非洪水期)	℃	非洪水期の日較差の年最大値。
14	日較差最大値(洪水期)	℃	洪水期の日較差の年最大値。
15	前日差最大値(非洪水期)	℃	非洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の年最大値。前日よりも高くなる場合にプラス。前日または当日が欠測の場合、データなし。
16	前日差最大値(洪水期)	℃	洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の年最大値。前日よりも高くなる場合にプラス。欠測データの扱いは指標15と同じ。
17	前日差絶対値の中央値(非洪水期)	℃	非洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の絶対値の年中央値。前日からの変化が大きな場合に大きな値を示す。欠測データの扱いは指標15と同じ。
18	前日差絶対値の中央値(洪水期)	℃	洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の絶対値の年中央値。前日からの変化が大きな場合に大きな値を示す。欠測データの扱いは指標15と同じ。
19	前日差最小値(非洪水期)	℃	非洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の年最小値。前日よりも低い場合にマイナス。欠測データの扱いは指標15と同じ。
20	前日差最小値(洪水期)	℃	洪水期の日平均値の前日との差(当日-前日)の年最小値。前日よりも低い場合にマイナス。欠測データの扱いは指標15と同じ。
21	最高水温日	年通日	7日の移動平均が最高水温になった日。移動平均を用いたのは、ある特異的な1日だけに左右されにくい平均的に温度が高い月日を抽出するためである。欠測データは、欠測直前日および欠測直後日の平均値をいれた。ただし、うるう年の2月29日は削除して計算。
22	最低水温日	年通日	7日の移動平均が最低水温になった日。移動平均を用いたのは、ある特異的な1日だけに左右されにくい平均的に温度が低い月日を抽出するためである。欠測データおよび2月29日の扱いは指標21と同様。
23	積算温度重心(0℃)	年通日	0℃以上の積算温度の重心。季節(日)が年の循環変数であるので、ベクトルとして合成。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同様。
24	積算温度重心(10℃)	年通日	10℃以上の積算温度の重心。季節(日)が年の循環変数であるので、ベクトルとして合成。欠測データおよび2月29日の扱いは指標1と同様。

2012) を使用した。一般化線形混合モデル (GLMM) を用いて、各ダムにおいてダムごとに年をランダム要因として対応させ、ダム流入・放流を要因とし、AIC を利用したモデル選択により、流入・放流の違いが温度の予測に影響するかどうかを判断した。

4. 結果

(1) 水温レジーム変化のグラフ検討

a. 日平均の季節変化

図-1 および図-2 に苦田ダムおよび徳山ダムの季節変化を示した。図-1 は、1年を1本のラインで示しており、図-2 は、複数年をまとめて月ごとにボックスプロットで示している。水温は2月に最低となり、8月に最高となった。この傾向は、放流と流入で変わらなかった。図-2 の下には、上下流の温度差 (放流 - 流入) を示した。放流水温は、一般に流入水温よりも高く、その傾向は徳山ダムで顕著だった。季節的な変化をみると、苦田ダムでは、4月の放流水は流入水よりも低

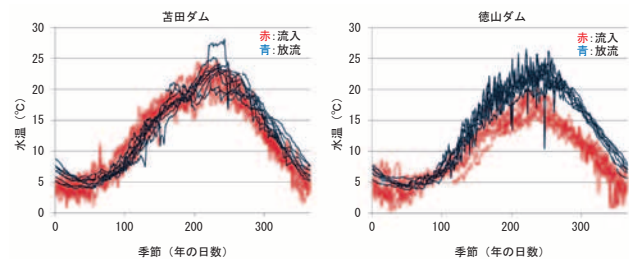


図-1 苦田ダムと徳山ダムの流入・放流水温の季節変化。各年を1ラインとして示した

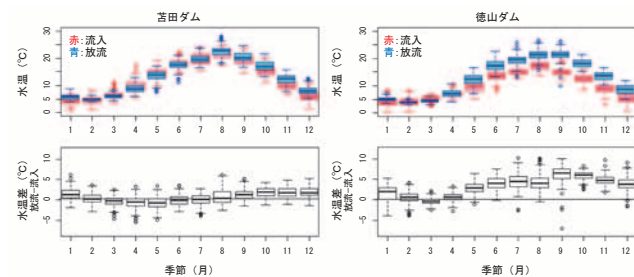


図-2 苦田ダムと徳山ダムの流入・放流水温の季節変化 (月ごとのボックスプロット)

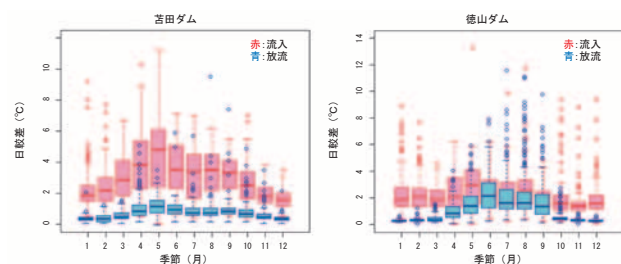


図-3 苦田ダムと徳山ダムの日較差 (月ごとのボックスプロット)

いことが多く、温度が流入水と比較して最も高くなるのは、11～12月だった。徳山ダムでも傾向は苦田ダムと類似しており、3月には流入水温と同じかやや低い温度となり、温度が流入水と比較して最も高くなるのは、9月だった。

b. 日較差

日較差を月ごとに複数年をまとめてボックスプロットにしたものが図-3 である。両ダムともに、流入水の日較差は、12月にもっとも小さくなり、5月に最大となった。放流河川は、両ダムともに著しく小さくなった。とくに1月や12月は、流入水で2°C程度の日較差だったが、放流水ではほとんど0°Cになった。放流水の日較差は、5-10月に大きくなった。この時期、中央

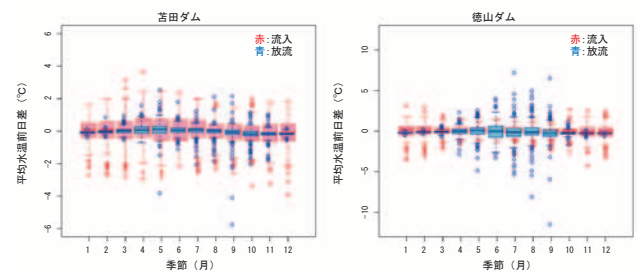


図-4 苦田ダムと徳山ダムの平均水温前日差 (月ごとのボックスプロット)

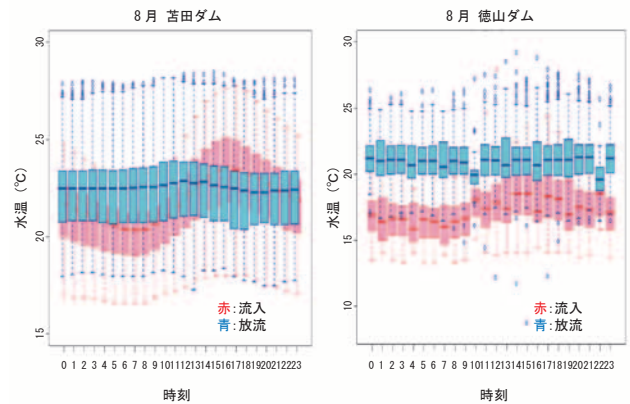


図-5 苦田ダムと徳山ダムの8月の日周変化 (時刻ごとのボックスプロット)

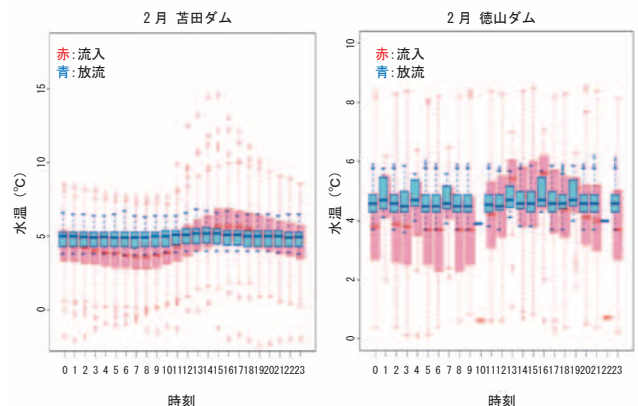


図-6 苦田ダムと徳山ダムの2月の日周変化 (時刻ごとのボックスプロット)

値としては流入水の日較差よりも大きくならないものの、飛び離れ点として示されたものの値は、放流水でも大きな値を示していた。とくに徳山ダムはその傾向が顕著で、一日に10℃以上の変化を示す日があることも確認された。

c. 短期的な変動

短期的な変動としては、日平均水温の前日との差で示した。それを月ごとにボックスプロットにしたものが図-4である。一般的には放流水温の前日差は、流入水温のそれと比べて小さいことが多かった。しかし、放流水温は極端に前日と異なることがあり、とくに、夏期にその傾向が強かった。放流水における夏期の極端な低下は、流入水では起こらないような変化が生じており、両ダムともに前日からの低下の最大値は、放流水のものであった。

d. 日周変化

8月および2月の日周変化を、それぞれ図-5および図-6に示した。ここでは、毎正時ごとの24時間をボックスプロットに示した。徳山は、一部の年に、1、3、7、10、13、16、19、22（とくに10と22）時のデータがないことが多く、その時刻は他の時刻と年間の違いにより違う傾向を示すので注意であるが、傾向は捉えることができる。流入水では、8月も2月も午後（13-17時、とくに16時ごろ）にピークを示し、朝（6-8時）に最低となった。放流水では、そのピークがごく小さくなった。

(2) 水温レジーム指標の統計

ダムごとの流入と放流の比較結果である。

平均温度、最高水温、最低水温とも、2ダムとも放流の方が流入よりも高かった。最高最低水温の差である年較差は、統計学的には苦田ダムで小さくなり、徳山ダムで大きくなったが、放流と流入の差は、それほど大きなものではなかった。低温日（5℃以下、10℃以下）の日数は2ダムとも少なくなった。高温日（20℃以上、25℃以上）の日数については、20℃以上の苦田ダムをのぞき、多くなった。積算温度は、いずれも増大した。

短期的な変動（日較差、前日との差）は、非洪水期には両ダムともに放流で小さくなった。洪水期には、変動が大きくなる場合があり、それは徳山ダムで顕著だった（日較差は大きく、前日差最大値は高く、最低値は低かった）。

季節性（最高水温になった日、最低水温になった日、0℃または10℃の積算温度重心）については、統計的には早遅が検出される場合があるものの、大きな違いは生じていなかった。

5. 議論

(1) 調査対象ダムにおけるダムによる水温レジーム改変の実態

苦田ダムと徳山ダムのダム下流（放流）の上流（流入）との比較から、ダム下流において特徴的なものは以下である；①高い水温、②日周変化の消失、③夏期における温度の急激な変化（おもに低下）。

高い水温としては、苦田ダムでは平均水温で1℃、徳山ダムでは3～4℃ほど下流で高かった（図-1、2、表-3、4）。下流では、高水温日が多く、低水温日が少なく、また、積算温度も大きく、ダム下流は温度が上流と比較して高いことが分かった。しかし、この差分のうち、ダムによる影響がどの程度含まれているかは明確ではない。今回の水温レジームの解析では、上下流（流入および放流）の比較からダムおよびダム湖による水温レジーム改変の抽出を試みている。ダムの上下流の比較はダムの影響検出にしばしば用いられる手法であるが、ダム運用前も下流の方が（標高が低い方が）平均水温は高いので、これらの下流における高水温のすべてがダムによる改変とはいえない。とくに、苦田ダムの場合、温度の上下流の違いはごくわずかであり、影響としてはかなりわずかであると考えても差し支えないと言える。また、徳山ダムの場合には、流入水温測定地と放流水温測定地の本来（ダムがない場合の）水温の違いと、ダム下流における取水・流量確保の関係により、夏場に流量が多い区間が生じ、その区間の温度上昇が起こらないまま流れることを考慮し、流入水温よりも3℃程度高い放流水温が策定されている（管理者である水資源機構からの情報）。つまり、徳山ダムでは、放流水温は流入水温よりも3～4℃高いものの、この大部分は管理者により意図されたものと考えられる。

他方で、日周的な変動の消失は顕著である。ダム上流など、ダムの影響がない通常の河川で見られる朝低く、午後に高くなるという変化は、ダム下流では認められない（図-5、6）。

短期的な変動として特徴的なことは、夏期に急激な温度変化が起こることで、とくに徳山ダムにおける温度低下は著しい（図-3、4、表-3、4）。この夏期における放流水温の大きな変化は、多くの場合、降雨の際に生じる。たとえば、苦田ダムにおける2013年9月4日の日較差は、流入水温で1.3℃、放流水温で7.4℃だった。この日、放流水温は0時で20.8℃だった水温は、10時には13.4℃となった。流入量は、9:50に234m³/s、放流量は14:33に202m³/sになった。苦田ダ

ムの選択取水設備からの最大取水量は20m³/sである。それ以上の放流の場合、100m³/sまでは通常の放流設備に加え、堤体の中位にある水位維持放流設備から、100m³/sを超える場合には堤体下部にある常用放流設備から放流される。9月の水温鉛直プロファイルは、表層で27-28℃であるが、中層では15℃前後、底層では7℃前後であるので、この低水温が放流されることになった。なお、このときの選択取水深は7m程度で変化していない。このような放流量が多くなった際に標高の低い放流施設から放流する結果、出水が多い夏期には温度の急激な低下がダム下流ではしばしば生じている可能性が高いと思われる。

(2) 水温レジームの変化の生物・生態系影響

温度は時空的に大きな変動を示す。この変異は、地理的位置や河川の流程上の位置、河川規模など空間的な変異と、日変動・季節変動、長期的な気候変動などの時間的な変異がある。それぞれの生物は、その場所に対応して、その他環境要因などによる空間的な変異と時間的な変異に適応し進化してきたと考えられる(たとえば、Johnston & Bennett, 1996)。

水温レジームの変化は、もともとその場に生息していた生物を減少させたり、他の場所に生息していた生

物の侵入を促進したりする可能性がある。

とくに徳山ダムでは、ダム下流の温度が高かった。10℃以上の積算温度は、1000日度大きかった(表-4)。今後、どのような種が実際に増えたり減ったりしたのかは検証されなければならないが、ダム直下では10℃程度の発育限界温度の種は生息不可能だったものが、現時点では容易に定着できることを示している。また、徳山ダムでは、ダム運用により下流の流量が増えた区間があり、夏期にその場所を大きな流量で温度上昇が小さいまま通過するために、その下流では水温がダム管理開始前よりも下がったと指摘されることがある(中日新聞, 2010)。ダムによる流況の変化により流程での水温変化に違いが生じることとあわせて、下流河川の広い範囲での評価を行っていく必要もあるだろう。

短期的な変動の変化については、単純に生物・生態系への正負の影響を判断するのは難しい。日周期変動の生態影響は、多くの研究成果がある(Vannote and Sweeny, 1980; Ward and Stanford 1982)。しかし、日周期的な変動の大きさの影響は多様であり、同種であっても平均的な温度の高低によっても異なる。たとえば、あるチョウの仲間では、比較的低い温度では、日周変動は恒温下よりも成長が促進されるものの、発育限界

表-3 苦田ダムにおける温度指標の流入と放流の比較。一般化線形混合モデル(GLMM)におけるAICを用いたモデル選択により流入と放流の違いがモデルに取り込まれた場合には、放流が流入と比較してどのように異なるかを記した。GLMMの空欄は流入・放流の違いが統計上予測に影響していなかった場合を示す

指標番号	温度指標	単位	流入		放流		GLMM
			平均	SD	平均	SD	
1	平均水温	℃	12.4	0.3	13.2	0.4	高
2	最高水温	℃	24.7	2.4	26.4	1.1	高
3	最低水温	℃	0.7	0.7	4.2	0.5	高
4	5℃以下の日数	日	58.2	11.0	26.3	25.8	少
5	10℃以下の日数	日	153.5	4.6	142.3	6.0	少
6	20℃以上の日数	日	51.8	23.9	57.0	29.0	
7	25℃以上の日数	日	0.0	0.0	4.7	10.0	多
8	積算温度(0℃)	日度	4533.6	104.2	4814.0	156.0	大
9	積算温度(10℃)	日度	1523.6	118.8	1667.1	163.3	大
10	年較差	℃	24.1	3.0	22.2	1.3	小
11	日較差中央値(非洪水期)	℃	2.2	0.2	0.5	0.1	小
12	日較差中央値(洪水期)	℃	3.2	0.4	0.9	0.1	小
13	日較差最大値(非洪水期)	℃	7.9	1.3	2.9	0.6	小
14	日較差最大値(洪水期)	℃	6.7	0.4	3.9	1.5	小
15	前日差最大値(非洪水期)	℃	2.1	0.3	1.2	0.3	小
16	前日差最大値(洪水期)	℃	1.9	0.3	1.1	0.6	小
17	前日差絶対値の中央値(非洪水期)	℃	0.5	0.0	0.1	0.0	小
18	前日差絶対値の中央値(洪水期)	℃	0.5	0.1	0.2	0.0	小
19	前日差最小値(非洪水期)	℃	-2.9	0.7	-1.2	0.5	大
20	前日差最小値(洪水期)	℃	-2.3	0.3	-1.8	0.4	
21	最高水温日	年通日	220.8	10.4	233.0	10.0	遅
22	最低水温日	年通日	29.7	16.4	46.8	8.6	遅
23	積算温度重心(0℃)	年通日	241.6	3.1	232.1	3.2	早
24	積算温度重心(10℃)	年通日	241.1	3.2	231.9	3.8	早

表-4 徳山ダムにおける温度指標の流入と放流の比較。一般化線形混合モデル(GLMM)におけるAICを用いたモデル選択により流入と放流の違いがモデルに取り込まれた場合には、放流が流入と比較してどのように異なるかを記した。GLMMの空欄は流入・放流の違いが統計上予測に影響していなかった場合を示す

指標番号	温度指標	単位	流入		放流		GLMM
			平均	SD	平均	SD	
1	平均水温	℃	9.9	0.3	13.3	0.3	高
2	最高水温	℃	22.8	3.4	28.0	2.2	高
3	最低水温	℃	0.1	0.2	4.4	0.6	高
4	5℃以下の日数	日	68.4	23.9	34.4	23.0	少
5	10℃以下の日数	日	188.4	12.3	141.0	6.0	少
6	20℃以上の日数	日	0.0	0.0	82.8	12.2	多
7	25℃以上の日数	日	0.0	0.0	1.8	1.5	多
8	積算温度 (0℃)	日度	3603.8	91.4	4860.9	118.3	大
9	積算温度 (10℃)	日度	751.6	59.0	1740.5	68.0	大
10	年較差	℃	22.6	3.4	23.6	2.6	大
11	日較差中央値 (非洪水期)	℃	1.9	0.2	0.3	0.0	小
12	日較差中央値 (洪水期)	℃	2.0	0.2	1.3	0.2	小
13	日較差最大値 (非洪水期)	℃	8.1	3.3	4.1	0.4	小
14	日較差最大値 (洪水期)	℃	7.5	3.2	8.1	2.9	大
15	前日差最大値 (非洪水期)	℃	2.0	0.5	2.0	0.5	
16	前日差最大値 (洪水期)	℃	1.3	0.2	3.6	0.8	大
17	前日差絶対値の中央値 (非洪水期)	℃	0.4	0.0	0.1	0.0	小
18	前日差絶対値の中央値 (洪水期)	℃	0.3	0.0	0.4	0.1	
19	前日差最小値 (非洪水期)	℃	-2.7	0.7	-2.3	0.8	大
20	前日差最小値 (洪水期)	℃	-2.0	0.4	-4.4	2.4	小
21	最高水温日	年通日	237.8	14.2	235.8	18.7	早
22	最低水温日	年通日	34.4	15.0	48.0	7.5	遅
23	積算温度重心 (0℃)	年通日	235.6	4.3	224.8	4.4	早
24	積算温度重心 (10℃)	年通日	233.4	6.4	224.8	4.9	早

に近い高い温度では日周変動は負の影響が認められている (Brakfield & Kesbeke, 1997)。これらの影響をどのように考えればよいかは、今後検証されなければならない。しかし、温暖な季節に10℃前後急激に低下するような温度変化が起こり得るとすれば、留意する必要がある。水温差の大きいところに魚類等の変温動物を入れた際には、悪影響が生じることは魚類関係者の間でよく知られたことである (たとえば、秋山ほか, 2003)。今後、どのような種がどの程度急低下に対する耐性を有するのか、データを蓄積して解析する必要がある。

(3) 水温指標とその利用

Ward (1992) は、水生昆虫の主要な温度要素として、1) 最低温度、2) 低温期間の長さ、3) 発育限界温度以上の期間、4) 有効積算温度、5) 成熟限界温度 (たとえば、その種が羽化する最低温度)、6) 最高温度、7) 最高温度になった日 (季節)、8) 日周期、9) 春の温度上昇率、10) 秋の温度下降率を挙げている。本論文で用いた指標には、Wardの1) ~ 8) は含まれている (ただし、特定の種を対象としていないために、温度などは複数設定している)。9) や10) に関連する温度の上昇率や下降率を生物の分布や生息と直接的に関係づけた例は

ほとんどないが、ある生物の行動 (冬眠からの目覚め、羽化、繁殖など) がある特定の温度以上になったときに発現することは認められている (たとえば、草野・福山, 1987)。複数種の相互作用を考えるとときに、それぞれの行動が起きる時間的な間隔も意味をもつ場合には (たとえば、被食者と捕食者の羽化のタイミング)、温度上昇率 (言葉を変えれば、ある温度と別の温度に達する時間の差) も生物群集にとって意味をもつことが想定される。すなわち、ある特定の温度に達した日や別の温度に達した日の差を指標に加え得るかもしれない。

今回検証した指標は定量的な数値として表すことができる。これはインパクト-レスポンスを考える上で、有効な方法である。たとえば、今回の水温レジームの指標を用いて、複数のダムで水温レジームの変化を類型化し、生物相と対応させ、どのような種や種群がどのような水温レジームの変化によって増減するのか抽出することができれば、結果として水温レジームの変化が生態系にどのような変化を及ぼすのか類推することも可能となる。今後、生物相と対応を図りつつ、ダムの水温変更の影響を検討する際の指標を取捨して効率化することが求められている。

謝辞

この研究の一部は、国土交通省近畿地方整備局から水源地環境研究センターに発注された「管理ダムにおける環境影響分析・評価業務」において検討した内容を含んでいる。業務成果の報文への利用を許可された国土交通省近畿地方整備局、水温データを提供された国土交通省中国地方整備局苫田ダム管理所と独立行政法人水資源機構徳山ダム管理所へ感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 秋山信彦・北野忠・上田雅一 (2003) 川魚完全飼育ガイド。マリン企画、東京。143pp.
- 2) Allan, J.D. and Castillo, M.M. (2009) Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters, Second Edition. Springer, Dordrecht. 435pp.
- 3) 中日新聞 (2010) ぎふ海流 第3章 断ち切られた川④ 徳山ダム 川の変化。中日新聞2010年2月21日岐阜版第1面
- 4) 藤崎憲治 (2014) 昆虫の生活史戦略。藤崎憲治ほか編『昆虫生態学』朝倉書店、東京。pp.8-48
- 5) Lessard, J.L. and Hayes, D.B. (2003) Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. River Research and Applications 19: 721-732.
- 6) Hayashi, F. (1996) Life cycle of *Protohermes immaculatus* (Megaloptera: Corydalidae) accelerated by warm water overflowing a dam. Aquatic Insects 18: 101-110.
- 7) 池淵周一 (編著) (2009) ダムと環境の科学 I ダム下流生態系。京都大学学術出版会、京都。285pp.
- 8) Huey, R.B. and Berrigan, D. (1996) Testing evolutionary hypotheses of acclimation. In: Johnston, I.A. and Bennett, A.F. (eds) "Animal and Temperature: Phenotypic and Evolutionary Adaptation". Cambridge University press, Cambridge. pp.205-237.
- 9) 石綿進一・齋藤和久・高村岳樹 (2014) 神奈川県内の河川水温の推移とその影響について。神奈川工科大学環境化学技術研究所研究成果報告書第4号。神奈川工科大学工学教育研究推進機構。pp.32-40.
- 10) Johnston, I.A. and Bennett, A.F. (eds) (1996) Animal and Temperature: Phenotypic and Evolutionary Adaptation. Cambridge University press, Cambridge. 419pp.
- 11) 国土交通省近畿地方整備局 (2013) 九頭竜川水系足羽川ダム建設事業環境影響評価書
- 12) 国土交通省東北地方整備局 (2017) 子吉川水系鳥海ダム建設事業環境影響評価準備書
- 13) Krakefield, P.M. and Kesbeke, F. (1997) Genotype-environment interactions for insect growth in constant and fluctuating temperature regimes. Proceedings of the Royal Society of London B 264: 717-723.
- 14) 草野保・福山欣司 (1987) 東京都五日市町盆堀川における仮称ナガレタゴガエルの体の大きさと繁殖活動。爬虫両棲類学雑誌 12: 65-71.
- 15) Pardo I, Canbell I. C. & Brittain J. E. (1998) Influence of dam operation on mayfly assemblage structure and life histories in two south-eastern Australian streams. Regulated Rivers: Research & Management 14: 285-295.
- 16) R Core Team (2012) . R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- 17) Riis, T., Suren, A.M., Clausen, B. and Sand-Jensen, A. (2008) Vegetation and flow regime in lowland streams. Freshwater Biology. 53: 1531-1543.
- 18) Stevens L. E., Shannon J. P. & Blinn D. W. (1997) Colorado River benthic ecology in Grand Cnyon, Arizona, USA: dam, tributary and geomorphological influences. Regulated Rivers: Research & Management 13: 129-149.
- 19) 谷田一三・竹門康弘 (1999) ダムが河川の底生動物に与える影響。応用生態工学 2: 153-164.
- 20) Uchida S. (1990) Distribution of Plecoptera in the Tamagawa River system, central Japan. In: Campbell, I.C. (ed) " Mayflies and Stoneflies", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 181-188.
- 21) Vannote R.L. and Sweeny, B.W. (1980) Geographic analysis of thermal equilibria: A conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities. American Naturalist 115:667-695.
- 22) Ward, J.V. (1992) Aquatic Insect Ecology 1. Biology and Habitat. John Wiley & Sons, New York. 438pp.
- 23) Ward, J.V. and Stanford, J.A. (1982) Thermal response in evolutionary ecology of aquatic insects. Annual Review of Entomology 27: 97-117.