

気候変動が流域の河川水温に及ぼす影響解析

AN IMPACT ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE ON STREAM TEMPERATURES IN A RIVER BASIN

宮本仁志¹・菅原康之²・道奥康治³

Hitoshi MIYAMOTO, Yasuyuki SUGAHARA and Kohji MICHIOKU

¹正会員 博士(工学) 神戸大学准教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 修士(工学) (株)神戸製鋼所(前 神戸大学大学院学生)(〒651-8585 神戸市中央区脇浜町2-10-26)

³フェロー会員 工学博士 神戸大学教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

In this paper, an impact analysis of future climate change on stream temperatures is carried out by using a thermal energy conservation equation. Examined here is the Ibo River at Hyogo prefecture, Japan, where 27 observation points have been placed to continuously monitor the stream temperatures for three years. A theoretical solution of the thermal energy equation is derived by using the method of characteristics and Taylor-series approximation, which estimates a longitudinal variation of water temperature. The observation clearly indicates that the monthly-averaged stream temperatures in the whole basin are strongly affected by the amounts of precipitation in the snow and rainy seasons, air temperatures and plant activities in the river streams. The impact analysis of future climate change on the stream temperatures of the Ibo River demonstrates that both the change in river discharge and that in air temperature have predominant effects on the stream temperature formation in the river network system.

Key Words: river basin environment, stream temperature, climate change, sensitivity analysis, water quality monitoring, Ibo River

1. 序 論

河川流域全体を包括的に捉えて治水・利水・環境保全に資する整備と管理を進める考え方が定着しつつある。筆者らは流域管理の適切なあり方を模索して、地形・地理情報をパラメーターとして流域の環境解析を実施してきた¹⁻⁵⁾。前報¹⁾では試験流域での水温観測結果^{4,5)}に基づき、流域各部の水温形成要因を検討した。その結果、流域の上・中・下流部における水温形成要因の違い、また、日・半旬・月と現象の時間スケールを変化させたときの水温変動特性の違いを明らかにした。

本論文では、前報¹⁾に引き続いて流域各部の河川水温に焦点をあて、将来の気候変動が水温形成に及ぼす影響を感度分析によって考究する。また、得られた知見を今後、河川水温の地形則モデル²⁾に反映させることを念頭において検討する。

河川水温は、灌漑用水や水力発電用水、工場冷却用水などの利水や⁷⁾河川の生態環境へ様々な影響を与え、最も重要な河川環境指標のひとつとして考えられる。既往の研究事例としては、上流域森林の影響に関する研究^{9,10)}や魚類の生息環境に関する研究¹¹⁾、などが挙げられる。しかしながら、それらの多くは上流部の小流域や支川の一部に対象区間が限定された研究である^{9,12-14)}。

地球の気候変動が河川水温に及ぼす影響に関する研究としては、StefanとSinokrot¹⁵⁾や白岩ら¹⁶⁾などが挙げられる。白岩ら¹⁶⁾は全球モデルで予測された気候変動条件をもとに、気温を2もしくは5℃上昇させたときの河川水温への影響や降水量変化、融雪の影響を流域規模で検討しており興味深い。

IPCCの第4次報告書(IPCC-AR4)⁶⁾では多くの全球モデルを用いて気温と降水量の変化が予測されている。しかしながら、特に降水量の予測値は全球モデルにより大きく異なる¹⁷⁾。さらに、全球から地域へ¹⁸⁾、そして本研究で対象とするような流域・河道規模への精度良いダウンスケーリング手法は確立されておらず、河川水温への影響予測を困難なものにしている。

本論文では、IPCC-AR4に示される全球大気海洋結合大循環モデル(AOGCMs)¹⁹⁾と気象庁の地域気候モデル(RCM20)²⁰⁾の予測結果より気温・降水量変化を概算し、気候変動の河川水温への影響に関する感度分析を実施する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、対象流域と河川水温の経年変化が示される。次に、河川水温の解析モデルと気象・水文量などの入力諸条件が示される。そして、気候変動が河川水温の流域内分布に及ぼす影響が季節別に評価される。最後に、得られた成果がまとめられる。

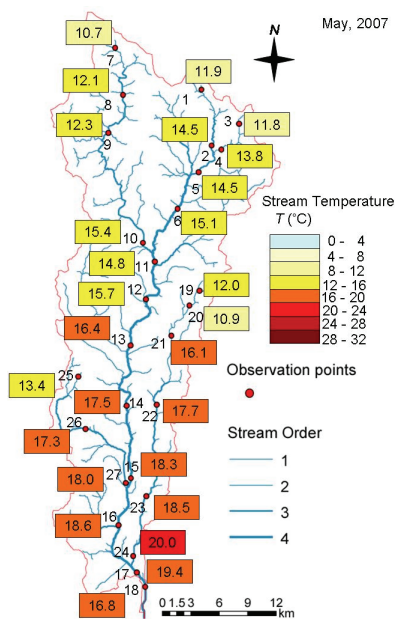


図-1 揖保川の河道網，水温計の設置位置，2007年5月の月平均水温

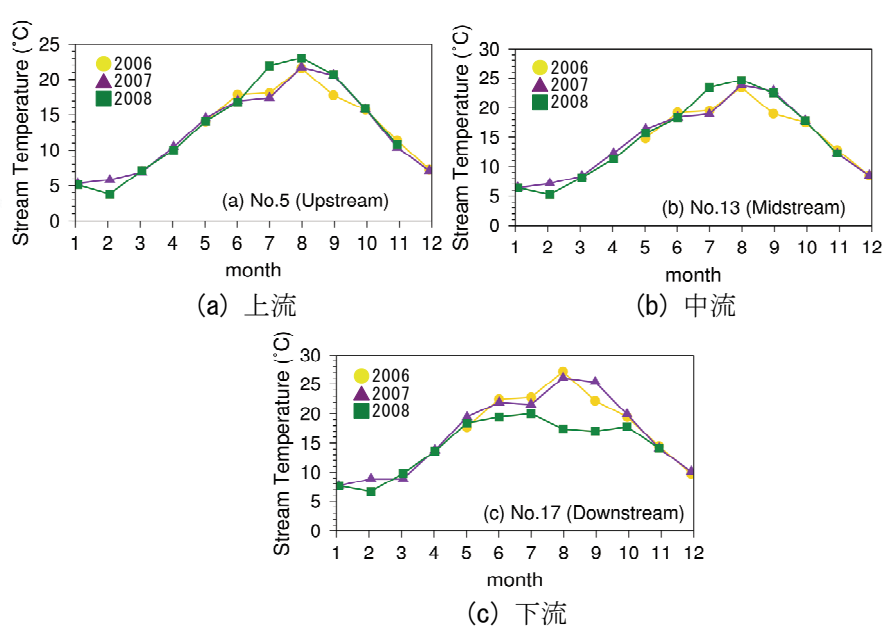


図-3 河川水温の経年比較

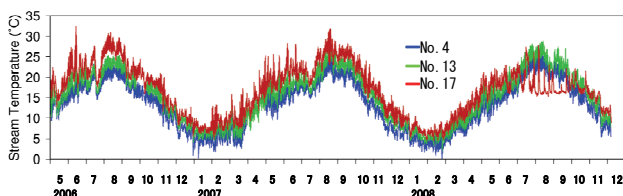


図-2 上・中・下流部における河川水温時系列
(揖保川：上流：No.4，中流：No.13，下流：No.17)

2. 対象流域と河川水温の経年変化

図-1に対象とした揖保川流域の河道網，水温計の設置位置，および2007年5月の月平均水温を示す。流域面積は810km²，幹川流路延長は70km，流域人口は20万である。土地利用は，流域全域で山地84%，農地11%，市街地5%である。上流はほぼ森林で覆われ，中・下流で河川沿いに田・農用地，建物用地が広がる。水温観測点は河道位数ごとに数点選び，流域全域がカバーされるように27点を設定した。水温は一時間ごとに自動計測され内部メモリに蓄積される。月平均水温は年間を通じて上流から下流にかけて上昇し，図-1に示す2007年5月では上下流間の昇温幅は約9℃である。

図-2に上・中・下流部における河川水温時系列を示す。年最高水温はどの年も8月に，最小は2007年では1月，2008年では2月にそれぞれ現れる。下流では2008年の7～10月頃にかけて水温が著しく低くなる特異性が見られるが，これはオオカナダモの大量発生により水温計設置部への日射が長期的に遮られたためと考えられる。

図-3に上・中・下流部における月平均河川水温の経年比較を，図-4に対応する月平均気温・月降水量・雪日数を示す。図-3に示す月平均水温について，2008年の水温

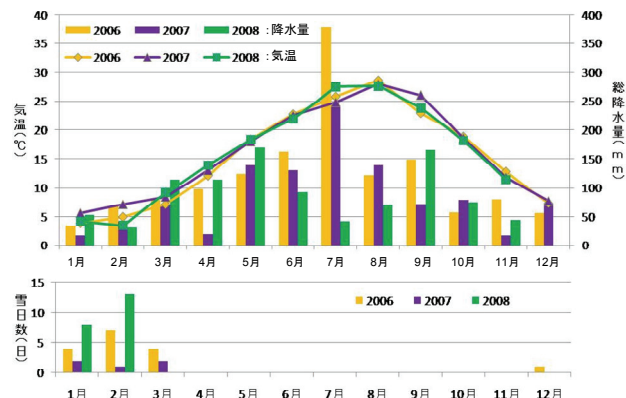


図-4 月平均気温，月降水量，雪日数の経年変化

は，7月に上・中流で他の年より大きくなり，2月に全流域で他の年より小さくなる。これらは図-4に示すように，2008年に梅雨期の降水量が少なかったこと，冬季には気温が低く積雪量が多かったことにそれぞれ起因すると考えられる。特に7月の降水量は，梅雨末期にあたるため3年間で値がばらついており，2006年の降水量は2008年の約9倍であった。これより，上述のオオカナダモの大量発生は梅雨期の出水で流失する機会が少なかったためと推察される。以上のように，積雪量や降雨量，気温および水性植物の活性度などが流域規模で河川水温に大きく影響していることがわかる。

3. 解析モデル

(1) 基礎方程式と解析解

基礎方程式は，次に示す一次元熱保存式である。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = -V \cdot \frac{\partial T_w}{\partial x} + \frac{1}{c_w \rho_w h} H_{wb} + \frac{q_x}{A} (T_{wl} - T_w) \quad (1)$$

$$H_{wb} = (1 - V_{shade}) H_s + H_a - H_{br} - H_{la} - H_{se} + H_{bed} \quad (2)$$

ここに、 T_w ：河川水温、 V ：流下方向断面平均流速、 A ：流水断面積、 c_w ：水の定圧比熱、 ρ_w ：水の密度、 h ：水深、 H_{wb} ：水面・潤辺からの熱フラックス、 H_s ：短波放射量、 V_{shade} ：河畔林植生の遮蔽率、 H_a ：長波放射量、 H_{br} ：長波逆放射量、 H_{la} ：蒸発に伴う潜熱量、 H_{se} ：熱伝達に伴う顕熱量、 H_{bed} ：潤辺からの熱フラックス、 x ：流下方向座標、 t ：時間座標、 q_x ：単位長さ当りの横流入量、 T_{wl} ：横流入水の水温、である。

筆者らの一連の研究^{13,4)}では、式(1)を解いて水温解析を行うにあたり解析的なアプローチを選択する。簡易な予測手法を指向するものである。それは序論で述べたように河川流域全体の環境解析を最終的に目指しているためである。その場合、一要素である河道区間の水温形成解析はできるだけ簡便かつ物理的見通しのよいものが望まれる。

水温の流下方向変化を推定するための解析解を示す。解の導出には特性曲線法を用いた。式(2)に組込まれる長波逆放射や潜熱フラックスのモデル式において、 T_w の高次非線形項は平衡水温 T_{weq} に関してテイラー級数展開することによって線形近似した⁴⁾。流水断面は広幅長方形とした。河川など流水環境での水温形成においては移流項などが卓越するというSinokrotとStefanの知見から¹⁴⁾、本研究では分散項は無視できると仮定した。得られた解析解は以下のようである。

$$T_w(s) = T_w(x, t) = T_w\left(x, \frac{x}{V} + t_0\right) = \exp\left\{\frac{x/V+t_0}{t_0} \alpha(r) dr\right\} \times \left[\int_{t_0}^{x/V+t_0} \beta(r) \left\{ \exp\left(-\int_{t_0}^{x/V+t_0} \alpha(c) dc\right) \right\} dr \right] + T_{w0}(0, t_0) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ -4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 - \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \times \exp\left\{ a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e \right) \right\} - \rho_a c_p C_c W + \Delta H(0) \right\} - \frac{q_x}{A} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ (1 - V_{shade}) H_s + H_a - S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^4 + 4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 T_{weq} - \gamma_{la} (e_{weq} - e_a) + \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \exp\left\{ a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e \right) \right\} T_{weq} + \rho_a c_p C_c W T_a + \sum_{i=1}^M \{ (\Delta H(i\Delta t) - \Delta H((i-1)\Delta t)) T_w(s - i\Delta t) \} \right\} + \frac{q_x}{A} T_{wl} \quad (5)$$

ここに、 S_{br} ：黒体と水面との放射比率(=0.97)、 σ ：ステファン・ボルツマン定数、 c_p ：空気の定圧比熱、 γ_{la} ： $\rho_a L_{la} C_E (0.622/p) W$ (ρ_a ：空気の密度、 L_{la} ：蒸発に伴う潜熱量、 C_E ：水蒸気輸送係数、 p ：大気圧、 W ：風速)、 ΔH ：河床熱容量の変化量、 T_a ：気温、 (a_e, b_e, c_e, d_e) ：経験定数(2.303, 7.5, 237.3, 0.7858)、 C_c ：顕熱輸送係数、 e_{weq} ：平衡水温に対する水蒸気圧、 e_a ：大気の水蒸気圧、である。

得られた解析解の形式や水面・潤辺からの熱フラックスのモデル化は宮本・道典⁴⁾と同じである。また、河畔林植生の遮蔽効果については宮本¹⁾と同様にモデル化されている。本研究では短波放射量を全天日射として評価することから、河畔林の植生高さ、植生密度、河川からの距離をパラメーターとして遮蔽効果を推定する吉田らのモデル¹⁰⁾を採用した。現地観測から得た河畔林の植生高、植生密度、河川からの距離を用いて遮蔽率 V_{shade} を計算し、式(2)に示すように短波放射量を補正することで植生による日射遮蔽効果を評価した。

(2) 気象・水文量などの入力情報

解析に用いる気象データは、気象庁ホームページ²¹⁾より揖保川流域に近い姫路と一宮のデータをダウンロードして用いた。河川水温に関しては各観測点の水温を用いた。流量に関しては、兵庫県引原ダムの管理日報および国土交通省姫路河川国道事務所の流量観測値を用いた。

4. 結果と考察

(1) 熱保存式における各項の感度分析

まず、式(1)の一次元熱保存式における短波放射、長波放射、潜熱など生成項の各項を比較し、河川水温形成に影響する因子を検討する。各項を個別に-100~100%変化させた時の予測水温と従来の水温との間の変化量を算出し、水温変化における各項の影響を検討した。図-5は、中流部における2006年9/25~10/9の15日平均の感度分析結果である。図中の各線の傾きより、水温変化への寄与が最も大きい項は長波放射である。続いて、長波逆放射、短波放射、河床伝熱、横流入、潜熱、顕熱の順となる。これより、半月程度の時間スケールにおける水温形成過程に対しては気温の寄与が最も大きくなることがわかる。

(2) 気候変動が河川水温に及ぼす影響

a) 気候変動シナリオと入力データ

将来(2080-2100年もしくは2070-2099年)の気温、降水量の変化の推算値としては、気象庁の地域気候モデル(RCM20)²⁰⁾と全球大気海洋結合大循環モデル(AOGCMs)¹⁹⁾の計算結果を用いた。表-1に本論文で参照したSRESシナリオと気温増加量・降水量変化率を示す。一方、将来の河川水温を予測する際に必要な流量・水深・湿度、そして境界条件としての上流側水温の予測値は、現在の

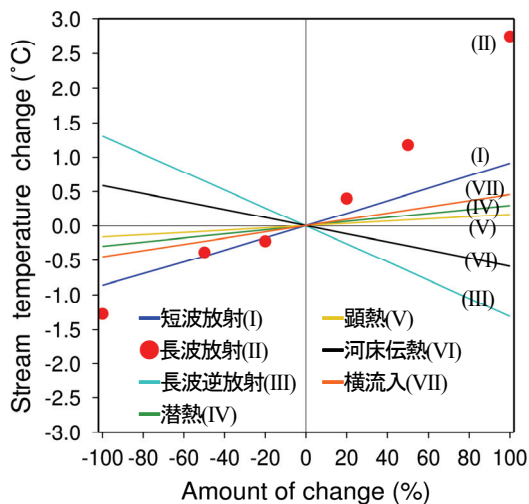


図-5 河川水温形成要因の変化率と水温変化
(2006年9/25~10/9,15日平均, No.14)

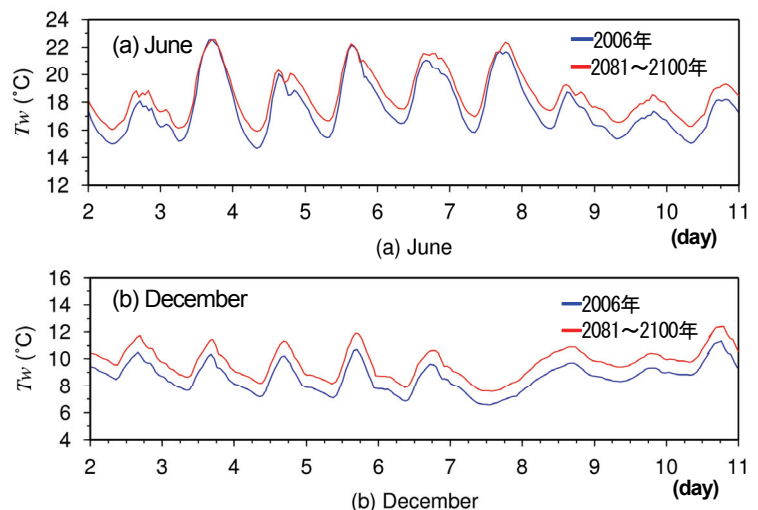


図-6 2006年と2081-2100年の水温時系列の比較
(6,12月, No.11~12)

観測データより、降水量-流量、流量-水深、気温-湿度、気温-上流側水温の間での回帰分析から求めた。それぞれの線形回帰モデルにおける観測値と予測値の間の決定係数 R^2 は、0.95(降水量-流量(月平均))、0.98(流量-水深)、0.86(気温-湿度(晴天時))、0.70(気温-上流側水温(平均))であった。

河川水温は気温や降水量、流量などの気候変動に伴って変化し、将来の水温予測にはそれらを的確に評価して解析に組み入れる必要がある。本論文における観測値の回帰分析からのデータ入力では、より大きな空間スケールの気候変動の動力学構造が取り入れられていない点で、十分ではないと考えられる。しかしながら、ここで対象とするような河川セグメント規模の空間スケールでの変動予測は、現段階では不明な部分が多い。IPCC-AR4では降水量・流量の予測値は用いられた全球モデルにおいても大きく異なる¹⁷⁾。さらに、気候変動予測結果の全球から地域、そして河道規模空間スケールへのダウンスケーリングに関しては、地域気候モデル(Regional Climate Model)や統計ダウンスケーリング法(Statistical Downscaling Methods)が鋭意研究されているが、ピンポイントの地点情報を精度よく与える手法は未だ確立されていないのが現状と考えられる。

従って本論文では、気象変動予測の地点情報が精度よく得られない現段階において実施可能な影響解析のひとつとして、回帰分析で入力データを与えることによって河川水温変化の感度分析を行う。そして気象変動の予測情報として、全球モデル¹⁹⁾や地域モデル²⁰⁾の気温・降水量変化を感度分析結果にあてはめることにより、将来の河川水温の変化傾向を検討する。なお、河畔林など流域の植生条件の変化に関しては、流域観測で調査した現状の植生条件を数値化し、河畔林植生の遮蔽効果としてモデルに組み込んだ。この植生条件の将来変化予測を解析に組み入れることも、入力データの精緻化と併せて今後の課題となる。

表-1 用いたSRESシナリオと気温、降水量の予測値

モデル名	AOGCM								RCM20			
解析区間	東アジア								西日本太平洋側			
SRESシナリオ	A1F1シナリオ				B1シナリオ				A2シナリオ			
期間	2080年								2090年			
月	6月	8月	10月	12月	6月	8月	10月	12月	6月	8月	10月	12月
気温増加量(℃)	5.48	5.48	5.51	6.95	3.00	3.00	3.04	3.88	2.3	1.5	2.8	3.0
降水変化率(%)	14	14	11	21	8	8	4	15	10	30	10	-20

以下の解析では、流域における上・中・下流の代表地点としてNo.4,12,16をそれぞれ選んだ。これは、河川流量や水深、河川水温の観測データがほぼ欠測なく揃っており、それらの値がモデルパラメーターの最適化をはじめとしてモデル解析に直接使用できたためである。

b) 中流域における河川水温予測

図-6に、2006年と2081-2100年における水温時系列の比較を示す。シナリオは気象庁地域気候モデルRCM20のA-2である。解析期間は、比較的降水量が多く流量が増加すると予測される6月と、最も気温上昇量が大きいと予測される12月を対象とした。RCM20の解析結果より、2081-2100年の6月と12月の気温変化はそれぞれ+2.3、+3.0°C、一方、降水量の変化率はそれぞれ+10%、-20%となっている。図-6より、両月ともに河川水温は2006年よりも上昇し、6月、12月での昇温量の10日間平均値はそれぞれ0.92°C、1.1°Cとなる。図-6(b)に示す12月の河川水温は、どの時刻も平均的に約1.1°C上昇しているのに対し、図-6(a)の6月水温は日中での昇温が抑制される日がみられる。梅雨時の6月は降水量が多く、2081-2100年の河川流量も大きく増加するシナリオであるため、気温上昇に伴い水温はある程度上昇するが、流量増加により日中の水温上昇は全体として抑えられている。これより、気象・水文条件が異なる6、12月では将来の河川水温の昇温率が異なり、気温のみならず降水量・流量の変化が河川水温形成に影響していることが確認される。

c) 気候変動幅を考慮した河川水温の感度分析

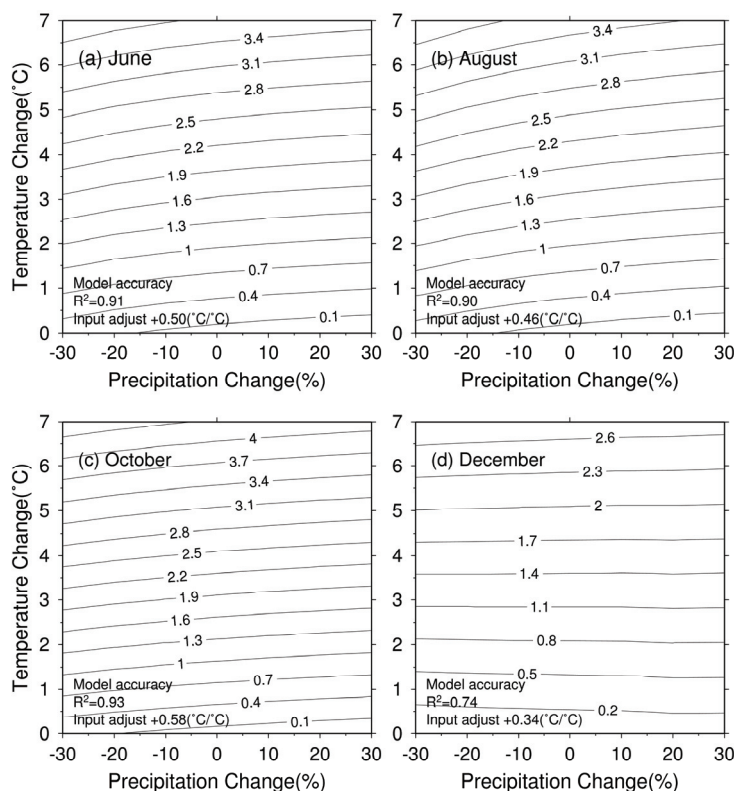


図-7 気温、降水量の変化に伴う6, 8, 10, 12月の水温変化

(No.11~12. R^2 : 2006年観測水温よりモデルを最適化したときの観測/計算水温間の決定係数, Input adjust: 観測水温/気温間の線形回帰より, 上流側水温を補正した際の気温1℃あたりの水温変化量(°C/°C))

表-2 将来の河川水温上昇量(°C)(No.11~12)

モデル	AOGCMs		RCM20	平均
	A1F1	B1	A2	
シナリオ				
6月	2.8	1.5	1.0	1.8
8月	2.7	1.5	0.7	1.6
10月	3.3	1.8	2.0	2.4
12月	2.8	1.5	1.2	1.8

表-3 将来の河川水温上昇量(°C)(6月)

モデル	AOGCM		RCM20	平均
	A1F1	B1	A2	
シナリオ				
上流No.4	2.5	1.3	1.0	1.6
中流No.12	2.8	1.5	1.2	1.8
下流No.16	3.0	1.6	1.3	2.0

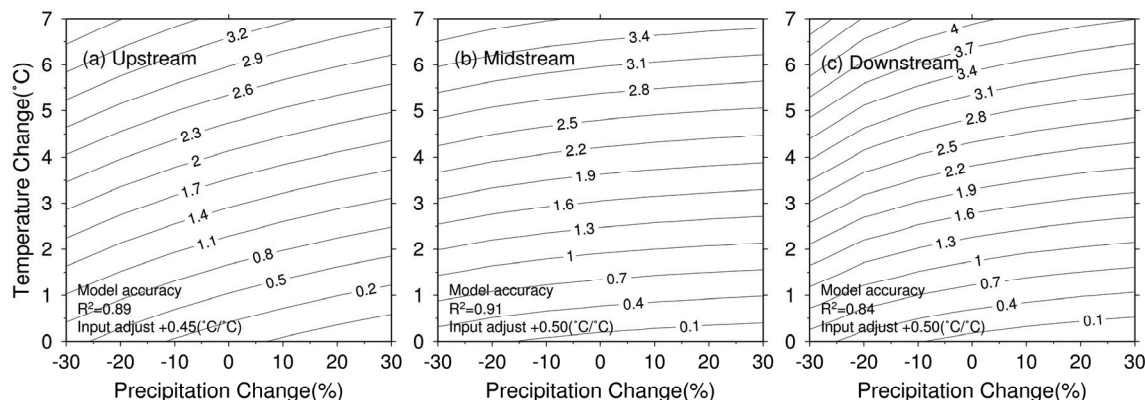


図-8 気温・降水量の変化に伴う水温変化(6月) (a)No.4, (b)No.12,(c)No.16

(R^2 : 2006年観測水温よりモデルを最適化したときの観測/計算水温間の決定係数, Input adjust: 観測水温/気温間の線形回帰より, 上流側水温を補正した際の気温1℃あたりの水温変化量(°C/°C))

気温・降水量の予測値は、用いられた気候モデルやIPCCのSRESシナリオ⁶⁾によって異なる。そのためここでは前節と同じ解析手法を用いて降水量と気温を系統的に変化させ、対応する河川水温の変化を等値線図に描いて全体としての傾向を検討した。また、表-1に示した3つのシナリオの将来予測値を用いて河川水温の上昇幅を評価した。

まず、中流を対象として気候変動が河川水温に及ぼす影響を季節別に検討する。図-7に、水温解析モデルを用いて求めた、気温・降水量の変化に伴う河川水温変化量の等値線図を示す。図中の R^2 は、水温解析でのモデルパ

ラメーターを2006年の観測水温を用いて最適化した際、モデル精度の指標として算出した観測水温と計算水温との決定係数である。一方 Input adjustは、水温と気温との線形回帰によって算定した上流側水温の補正量を、気温1℃あたりの水温補正量(°C/°C)として提示したものである。表-2は、上述の3つのシナリオにおける気温・降水の予測値に対応させて、図-7より求めた将来の河川水温の昇温量である。気温変化の範囲は0~7℃、降水量変化の範囲は-30~30%とし、河川水温の昇温量は各月の10日間平均値とした。図-7に示す等値線の傾きから、6, 8, 10月では気温だけでなく降水量の変化も河川水温

に影響することがわかる。一方、12月には、流量が少ないため降水量変化の水温への影響はほとんどなく、気温変化の影響しか表れていない。表-2より、気温上昇が最大のAOGCMsのA1F1シナリオでは、2.7~3.3℃の水温上昇が予測されるのに対して、気候モデルの空間解像度が高いRCM20のA2シナリオでは昇温幅が0.7~2.0℃となる。シナリオごとの予測値は異なるが、いずれも降水量変化が小さく気温上昇が大きい10月での昇温が最も大きく、その逆の傾向を示す8月で最も小さい結果となる。

次に、気候変動が河川水温に及ぼす影響の流下方向変化を検討する。図-8に上・中・下流における将来6月の気温・降水量変化に対する河川水温変化の解析結果を、表-3には表-1の各シナリオに対応する河川水温の予測結果をそれぞれ示す。図-8から、降水量が増加すると水温の上昇幅が小さくなることがわかる。河川水温には気温上昇のみならず降水量・流量の変化も大きく影響することが再確認される。表-3より、最も気温上昇が大きく見込まれるAOGCMのA1F1シナリオでは、上・中・下流で2.5~3.0℃の河川水温の上昇が、RCM20のA2シナリオでは1.0~1.3℃の上昇が見込まれる。いずれのシナリオにおいても、上・中流より下流での水温上昇量が大きい予測結果となった。気候モデルやシナリオ間で予測結果に大きな幅があることから、今後、多くの気候モデル・シナリオの予測結果を用いた系統的な水温予測およびその結果の適切な評価を行うことが必要となる。

以上より、河川水温の形成には気温のみならず流量の変化が大きく影響することがわかった。したがって、河川水温の地形則モデル²⁾では長波放射に加えて流量の流下方向における増加特性を精度良くモデル化する必要があると考えられる。

5. 結 論

本論文では、揖保川水系を対象にして河川水温の経年変化を検討するとともに、気候変動が河川水温に及ぼす影響を水温解析モデルにより感度分析した。得られた主な成果を以下に列挙する。

- ① 観測より、河川水温はその年の積雪量や梅雨時における降水量、気温および水性植生の活性度などに強く依存し、それらの影響は水系全体に及ぶことがわかった。
- ② 熱保存式における生成項の比較より、半月程度の時間スケールにおける水温形成過程に対しては、気温の影響が最も大きいことがわかった。
- ③ 気候変動が河川水温に及ぼす影響を感度分析した結果、②で得られた気温変化のみならず流量の変化が河川水温の形成に大きく影響することがわかった。

年度科学研究費補助金(萌芽研究: No.20651010)から補助して頂きました。水温観測の実施にあたり、国土交通省姫路河川国道事務所、兵庫県龍野土木事務所、揖保川漁業協同組合の関係各位には便宜を図って頂きました。神戸大学大学院学生、中山和也氏には現地観測データの整理にご協力頂きました。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮本仁志, 菅原康之, 道奥康治: 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, 第53巻, pp.1153-1158, 2009.
- 2) 宮本仁志, 道奥康治: 流域地形則を用いた河川水温分布モデル, 水工学論文集, 第52巻, pp.1069-1074, 2008.
- 3) Miyamoto, H., Michioku, K. and Yasuyuki Sugahara: Relative importance on each component in a thermal energy equation for stream temperature prediction, *The 8th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2008)*, Proc. CD-ROM, 2008.
- 4) 宮本仁志, 道奥康治: 流域水温の連続観測と解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.1105-1110, 2007.
- 5) Miyamoto, H. and Michioku, K.: Stream temperature observations and equilibrium temperatures in a river basin, *Proceedings of the XXXII LAHR Congress*, Proc. CD-ROM, 2007.
- 6) IPCC: *Climate Change 2007, Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104, <http://www.ipcc.ch/index.htm>, 2007.
- 7) 新井 正, 西沢利栄: 水温論, 297p, 共立出版, 1974.
- 8) Webb, B.W.: Trends in stream and river temperature, *Hydrological Process*, Vol.10, pp.205-226, 1996.
- 9) Sridhar, V. et al.: Prediction of stream temperature in forested watersheds, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.40, No.1, pp.197-213, 2004.
- 10) 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.
- 11) Theurer, F.D. et al.: Interaction between riparian vegetation, water temperature, and salmonid habitat in the Tucannon river, *Water Resources Bulletin*, Vol.21, No.1, pp.53-64, 1985.
- 12) Chen, Y.D. et al.: Stream temperature simulation of forested riparian areas: I. Watershed-scale model development, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.304-315, 1998.
- 13) Chen, Y.D. et al.: Stream temperature simulation of forested riparian areas: II. Model application, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.316-328, 1998.
- 14) Sinokrot, B.A. and Stefan, H.G.: Stream temperature dynamics: Measurements and modeling, *Water Resources Research*, AGU, Vol.29, No.7, pp.2299-2312, 1993.
- 15) Stefan, H.G. and Sinokrot, B.A.: Projected global Climate change impact on water temperatures in five north central U.S. streams, *Climate Change*, Vol.24, pp.353-381, 1993.
- 16) 白岩淳一, 風間聡, 沢本正樹: 気候変動による河川水温の影響, 水工学論文集, 第50巻, pp.1063-1068, 2006.
- 17) Kundzewicz Z.W. et al.: *Freshwater resources and their management*. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.173-210, 2007.
- 18) Christensen, J.H. et al.: 2007: *Regional Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and USA, pp. 848-940, 2007.
- 19) Cruz, R.V. et al.: *Asia. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.469-506, 2007.
- 20) 気象庁: 地球温暖化予測情報第6巻, http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/GWP/V_06/index.html, 2005.
- 21) 気象庁HP: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>.

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、費用の一部を平成21

(2009. 9. 30受付)