

流域水温の連続観測と解析

MONITORING AND ANALYSIS OF STREAM TEMPERATURES IN A RIVER BASIN

宮本仁志¹・道奥康治²
Hitoshi MIYAMOTO and Kohji MICHIOKU

¹正会員 博士(工学) 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工学博士 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

In this paper, we reported monitoring results of stream temperatures in the Ibogawa river basin, Hyogo, Japan as well as proposed a theoretical solution for the stream temperature prediction derived from the thermal energy equation with the method of characteristics and Taylor-series approximation. The spatial distributions of the average stream temperatures in observation showed their gradual increase behavior from the upper stream to the river mouth. The comparison of average temperature time-series between the main stream and tributary indicated much difference in their temperature change. Nice agreement was confirmed from comparison between the observed temperature and the theoretical solution, so that the derived theoretical solution had a powerful capability for the stream temperature prediction.

Key Words: basin environment, water quality, stream temperature, river monitoring, thermal conservation analysis

1. 序 論

近年, 流域一貫の総合土砂管理や健全な水循環保全などに代表されるように, 流域全域で整合した水環境整備が重要となっている。治水, 利水, 生態環境の諸要素が流域で相互にバランスされた流域環境を創出するためには, それらの要素を統一的に整理できる新たな視座が必要と考えられる。どのような因子がその視座となりえるのかはまだよく分からないのが現状であるが, 筆者らは河道位数則に代表される流域地形特性がその候補であると考えて検討をはじめている¹⁾。

本研究は, この検討を実流域で検証するために, 重要な流域環境因子の一つとしての河川水温を全流域スケールで連続モニタリングし, その初期経過を報告するとともに, 今後の河道地形則とのリンクを念頭において隣り合う上下流二地点での河川水温変化の簡易予測手法を提案し, これを検証するものである。本研究では熱保存式に基づく簡易な予測手法を志向するが, それは上述のように流域スケールの環境解析を最終的に目指しているためであり, 一要素である水温の解析は出来る限り簡便かつ物理的見通しのよいものが望まれるためである。本稿において河川上下流の隣接二地点での水温変化簡易物理モデルが確立された後, 流域全域でのそれら地点間のリンクは河道地形則によって関連付けることとなり, 今後研究を進める予定である。

河川水温は, 水田灌漑など農業用水や発電所・工場冷却水など工業用水に代表される利水²⁾に加えて, 溶存酸素の律速因子であるとともに河川の生態環境を様々な形で制限するため, 最も簡単に計測できる流域環境の基礎的指標として考えられる。河川水温に関する既往の研究は多く, 上流域森林の影響に関する研究³⁾や魚類の生息環境に関する研究⁴⁾, 地球気象変動に関する研究⁵⁾などが例挙げられ, 河川水温の適切な管理について議論が行われている。しかしながら, それらは上流部小流域や支川の一部が対象区間となっている研究が多く, 本研究で最終目標とするような流域全域を一貫して対象としたものは少ない。一方, 河川水温予測法については, 1990年代以降の計算機技術の発達により, 数値解析手法を用いて熱保存式などの基礎方程式を解くものが多く^{3), 6-7)}, 本研究で扱うような解析的アプローチは近年では少ない。

本論文の構成は以下のとおりである。まず, 観測対象流域と水温計設置状況の概要が紹介される。次に, 一次元熱保存式に仮定・近似を施すことにより河川水温変化の解析解が導出される。そして, 観測結果の考察と解析解の検討が行われ, 最後に結論と今後の課題が示される。

2. 観測流域の概要

(1) 対象流域

図-1に対象流域の位置を, 表-1に流域概要を示す。観

測対象とする流域は、兵庫県南西部において瀬戸内海に流入する一級河川揖保川水系である。揖保川の流域面積は約810km²、幹川流路延長は約70km、流域の人口は約20万人であり、兵庫西播磨地方の社会、経済、文化の基盤をなす流域となっている。図-1より流域は羽状型を呈しており、上・中・下流域が明確に認識できる比較的単純な流域構造を有している。

(2) 水温観測

図-2に、揖保川流域の河道網と水温プローブ設置箇所を示す。流域地形形態の特性を定量的に表現する河道位数ごとに観測点を数点選び、流域全域がカバーされるように24観測点を設定している。各観測点において水温計は、流失を防ぐためにワイヤーロープによって杭や橋脚などに固定されており、錘によって河床に沈めて設置されている。各水温計の設置地点での水深は、上流・下流といった流域での位置関係や流量の変化に依存するが、おおよそ10～260 cmである。流域の各観測点に設置された水温計によって1時間毎365日周年の水温モニタリングが行われる。用いた水温計(Onset: HOBO Water Temp Pro)は、通常の水温範囲で計測誤差が約0.17℃程度であり、内部メモリーにより連続計測が行われる。

3. 解析方法

一次元熱輸送方程式の各項に仮定・近似を施すことにより河川水温変化を推測するための解析解を導出する。

(1) 基礎方程式

基礎式は次に示す一次元熱輸送方程式である。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + V \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A D_x \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{q_x}{A} (T_{wl} - T_w) + \frac{1}{c_w \rho_w A} (H_{ws} B + H_{bed} P_w) \quad (1)$$

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、 D_x :流下方向水温拡散係数、 q_x :流下方向単位長さ当り横流入量、 T_{wl} :横流入水の水温、 c_w :水の定圧比熱、 ρ_w :水の密度、 H_{ws} :水面からの熱フラックス、 H_{bed} :潤辺からの熱フラックス、 B :水面幅、 P_w :潤辺長、 x :流下方向座標、 t :時間座標、である。また、水面熱フラックス H_{ws} は次式で与えられる。

$$H_{ws} = (H_s - H_{sr} + H_a - H_{ar} - H_{br} - H_{la} - H_{se}) \times (1 - \alpha_{veg}) \quad (2)$$

ここに、 H_s :短波放射量(日射量)、 H_{sr} :短波反射量、 H_a :長波放射量、 H_{ar} :長波反射量、 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、 α_{veg} :河畔植生による遮蔽効果係数、である。

(2) 解析解の導出

a) 解析解

まず、以下の仮定のもとに基礎式(1)を簡略化する:(i) 流域水温の形成に支配的な因子は水面・潤辺からの熱フ



図-1 観測流域の位置

表-1 観測流域の概要

流域人口 [万人]	流域面積 A[km ²]	幹川流路延長 [km]	河川数	総流路延長 L[km]	河川密度 R ₀ =L/A
20	810	70	47	291	0.359

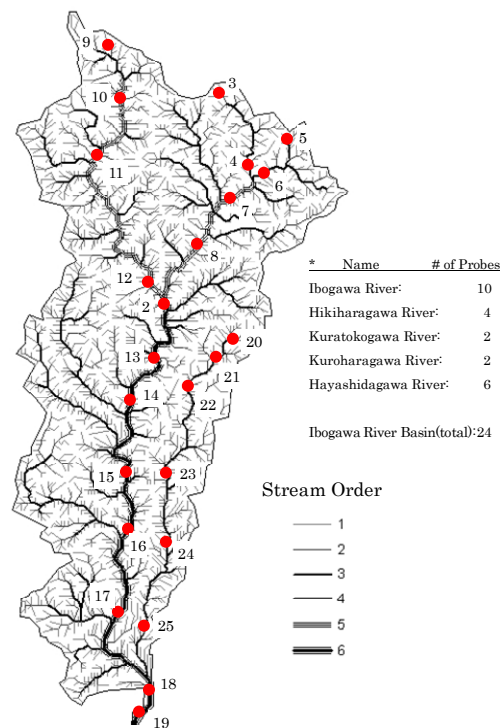


図-2 水温プローブ設置位置

ラックスであるとし、式(1)の右辺第一項(拡散項)と第二項(横流入項)を無視できる、(ii) 流水断面形状は広幅長方形断面で近似される、(iii) 河畔植生による遮蔽効果は無視できる($\alpha_{veg} = 0$)。なお、これらの仮定の中で、横流入項や河畔植生の影響などは無視できない解析河道区間もあることが予想される。横流入量とその水温や植生の遮蔽効果係数などの値が分からないこともあり現段階では無視する仮定を選択しているが、今後、検討を加える予定である。これより式(1)は次式となる。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + V \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{1}{c_w \rho_w h} (H_{ws} + H_{bed}) \quad (3)$$

ここに、 h : 平均水深である。

式(3)は一階偏微分方程式であり、その右辺を T_w に関する線形な形式、

$$\frac{1}{c_w \rho_w h} (H_{ws} + H_{bed}) = \alpha(x, t) T_w + \beta(x, t) \quad (4)$$

で表現できれば特性曲線法によって解析解が導出される。
すなわち、

$$\frac{dt}{ds} = 1, \quad \frac{dx}{ds} = V \quad (5a, b)$$

で表される平均流速 V によって移動する新座標 s を導入すると、特性曲線、

$$t = s + t_0 = \frac{x}{V} + t_0 \quad (6)$$

の上で式(3),(4)は次の常微分方程式に帰着する。

$$\frac{dT_w(s)}{ds} = \alpha(s) T_w(s) + \beta(s) \quad (7)$$

境界条件を

$$T_w = T_{w0}, \quad \text{at } s = 0; \quad x = 0, t = t_0 \quad (8)$$

とすると、式(7)の解は、

$$T_w(s) = T_w(x, t) = T_w \left(x, \frac{x}{V} + t_0 \right) = \exp \left[\int_{t_0}^{x/V+t_0} \alpha(r) dr \right] \times \left\{ \int_{t_0}^{x/V+t_0} \beta(r) \left(\exp \left[- \int_{t_0}^{x/V+t_0} \alpha(c) dc \right] \right) dr \right\} + T_{w0}(0, t_0) \quad (9)$$

となる。これより、熱フラックスが式(4)の形式で与えられて、式(8)より上流側の境界条件が与えられれば、式(9)によって下流側の河川水温 T_w が代数的に求められる。

b) 熱フラックスの表現方法

熱フラックスを式(4)の形式に帰着させるために、ここでは、水面からの熱フラックス H_{ws} の各項(式(2))と潤辺からの熱フラックス H_{bed} の近似的表現を検討する。具体的には、 T_w の高次非線形項を含む項については平衡水温 T_{weq} のまわりにテイラー級数展開することによって、各項の式を線形近似することとする。ここで平衡水温 T_{weq} とは式(3)の左辺がゼロとなったときに得られる水温であり、同一の気象条件の下で水塊が終局的に達する温度と定義される。以下に、熱フラックス各項の定式化と必要に応じて近似方法を示す。

短波放射量 H_s について：本研究ではアメダス観測値を利用することを考慮して、以下のように毎時の短波放射量 H_s を推定した。すなわち、アメダスにより一日の日照時間 N_d が与えられたとき、全天日射量の日平均値 H_{sd} は以下の式で推定される^{8,9)}。

$$H_{sd} = \left(a + b \frac{N_d + \Delta N}{N_0} \right) H_{s0d}, \quad \left(0 < \frac{N_d}{N_0} \leq 1 \right) \\ = c, \quad \left(\frac{N_d}{N_0} = 0 \right) \quad (10a, b)$$

一時間毎の短波放射量 H_s は、この日平均値 H_{sd} による一日の総日射量を、アメダスによる時間毎の日照時間 N を用いて比例配分させることによって次式より推定した。

$$H_s = \gamma_s (a + b N) H_{s0}, \quad (0 < N_d/N_0 \leq 1) \\ = \gamma_s c H_{s0}, \quad (N_d/N_0 = 0) \quad (11a, b)$$

ここに、

$$\gamma_s = \frac{H_{sd} \times T_0}{\sum (a + b N) H_{s0}} \quad (12)$$

γ_s : H_{sd} と H_s の日平均値とを合わせるための調整係数、 $(a, b, c, \Delta N)$: 実験定数であり本研究では回転式日照計の値 (0.244, 0.511, 0.118, 0)^{8,9)}を使用、 H_{s0} , H_{s0d} : 大気上端での日射量の瞬時値および日平均値⁹⁾, N_0 : 可照時間⁹⁾, T_0 : 一日の秒換算値、である。式(11)の $(a, b, c, \Delta N)$ は本来ならば実測値による調整が必要であるが、本研究では式(10)での係数値をそのまま転用した。

短波反射量 H_{sr} について：次式を用いた。

$$H_{sr} = \gamma_{sr} H_s \quad (13)$$

ここに、 γ_{sr} : 短波反射率 (= 0.07) である。

長波放射量 H_a について：次式を用いた。

$$H_a = \sigma \theta_a^4 (c_a - d_a \sqrt{e_a}) \quad (14)$$

ここに、 σ : ステファン・ボルツマン定数、 θ_a : 気温 T_a (°C) に対応する絶対温度 (= $T_a + 273.15$) (K)、 (c_a, d_a) : 経験定数 (0.44, 0.081)、 e_a : 大気の水蒸気圧 (hPa)、である。アメダスでは相対湿度 $r_h = e_a / e_{sat}$ と気温 T_a が与えられるので、飽和水蒸気圧 e_{sat} 、

$$e_{sat}(T) = \exp \left[a_e \left(\frac{b_e T}{T + c_e} + d_e \right) \right] \quad (15)$$

を算出することにより大気の水蒸気圧 e_a が求められる。ここに、 T : 温度 (°C)、 (a_e, b_e, c_e, d_e) : 経験定数 (2.303, 7.5, 237.3, 0.7858)⁹⁾、である。

長波反射量 H_{ar} について：次式を用いた。

$$H_{ar} = \gamma_{ar} H_a \quad (16)$$

ここに、 γ_{ar} : 長波反射率 (= 0.03) である。

長波逆放射量 H_{br} について： H_{br} は、一般に次式で与えられる。

$$H_{br} = s_{br} \sigma \theta_w^4 \quad (17)$$

ここに、 s_{br} : 黒体と水面との放射比率 (= 0.97)、 θ_w : 水温 T_w (°C) に対応する絶対温度 (= $T_w + 273.15$)、である。式(17)は T_w に関して4次式になっているので、上述のとおり、式(17)を次式のように平衡水温 T_{weq} まわりにテイラー級数展開して一次の項まで採用することによって線形近似する。

$$H_{br}(T_w) = S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^4 + 4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 \times (T_w - T_{weq}) + O((T_w - T_{weq})^2) \quad (18)$$

蒸発に伴う潜熱量 H_{la} について: H_{la} は、一般に次式で与えられる。

$$H_{la} = \rho_a L_{la} C_E \frac{0.622}{p} (e_w - e_a) W \quad (19)$$

ここに、 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、 e_w, e_a : 水面および大気の水蒸気圧、 W : 風速、である。 e_w は式(15)に水温 T_w を適用することによって与えられるため、式(19)についても平衡水温 T_{weq} まわりにテイラー級数展開して、次の線形近似式を用いることにする。

$$H_{la} = \gamma_{la} (e_{weq} - e_a) + \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \times \exp\left\{a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e\right)\right\} \times (T_w - T_{weq}) + O((T_w - T_{weq})^2) \quad (20)$$

ここに、

$$\gamma_{la} = \rho_a L_{la} C_E \frac{0.622}{p} W, \quad (21)$$

e_{weq} : 平衡水温 T_{weq} に対する水蒸気圧、である。

熱伝達に伴う顕熱量 H_{se} について: 次式を用いた。

$$H_{se} = \rho_a c_p C_c (T_w - T_a) W \quad (22)$$

ここに、 c_p : 空気の定圧比熱、 C_c : 顕熱輸送係数、である。

潤辺での熱フラックス H_{bed} について: 河床を熱容量 C_v 、熱拡散係数 κ 、厚さ D_{bed} のスラブ部材と仮定し、過去の水温履歴から代数的に H_{bed} を推定できる次の Jobson の推定式¹⁰⁾を用いる。

$$H_{bed} = \Delta H(0) T_w(s) + \sum_{i=1}^M \{(\Delta H(i\Delta t) - \Delta H((i-1)\Delta t)) T_w(s - i\Delta t)\} \quad (23)$$

ここに、

$$\Delta H(i\Delta t) = H(i\Delta t) - H[(i+1)\Delta t] \quad (24)$$

$$H(t) = C_v D_{bed} \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-\kappa(2n+1)^2 \pi^2 t}{4D_{bed}^2}\right] \sin\left[\frac{(2n+1)\pi}{2}\right] \right\} \quad (25)$$

であり、 $H(t)$ は $t = 0$ で河床表面温度が 1°C 増加したときの $t = 0 \sim t$ の間の河床の熱容量の増加を表している。 (C_v, κ, D_{bed}) の値は、Jobson¹⁰⁾ の示した砂河床に対する値と Hondzo と Stefan¹¹⁾ の数値解析による最適値を参考にして、 $(2.9 \times 10^6 \text{ J/m}^3/\text{K}, 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}, 0.25 \text{ m})$ をそれぞれ与えた。また、本研究では Δt は 1 時間とし 1 日前までの水温履歴を考慮した。

以上より、 H_{ws} の各項と H_{bed} が T_w の一次式(式(4)の右辺)で記述される。具体的には、式(4)の α, β は以下の

ようになる。

$$\alpha = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ -4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 - \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \times \exp\left\{a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e\right)\right\} - \rho_a c_p C_c W + \Delta H(0) \right\} \quad (26)$$

$$\beta = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ H_s - H_{sr} + H_a - H_{ar} - S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^4 + 4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 T_{weq} - \gamma_{la} (e_{weq} - e_a) + \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \exp\left\{a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e\right)\right\} T_{weq} + \rho_a c_p C_c W T_a + \sum_{i=1}^M \{(\Delta H(i\Delta t) - \Delta H((i-1)\Delta t)) T_w(s - i\Delta t)\} \right\} \quad (27)$$

(3) 計算方法

上流側の境界条件(式(8))およびアメダスによる気象条件が与えられれば、式(9)、(26)、(27)を用いて下流側の任意点における河川水温の時間変化が代数的に推定される。なお、式(9)中の積分計算については、Mathematica による数値積分によってその値を求めた。

4. 結果と考察

(1) 観測水温の時系列

図-3に各観測点における河川水温の時系列を示す。横軸はジュリアン日であり、平成18年5月1日～28日の4週間に対応している。図-3より、上流から下流域までほぼ位相の揃った河川水温変動となっているのがわかる。以下では、このような水温時系列データを用いて流域水温の空間分布および時間変動特性を検討する。

(2) 平均水温の空間分布

2006年5月の平均水温の流域分布を図-4に示す。これより、上流から下流への平均水温の増加特性を確認できる。河川の移流熱と水面熱交換を考慮した解析によって、流下方向の水温変化を記述できる可能性を示唆している。また、揖保川本川に比べて左支川の林田川(観測点: #20～25)の方が流下方向の水温増加率は大きい。これは、国土交通省の流量観測(暫定値)によれば2006年5月において本川(龍野地点)で月平均約 $38 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、支川林田川(構地点)で約 $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ となっていることから、本川に比較して林田川の流量が $1/7 \sim 1/8$ 程度に少ないことに起因していると考えられる。今後さらに検討する必要がある。

揖保川本川と支川林田川の河川水温変化の違いを少し詳細に見るために、10日間平均の河川水温の時系列を図-5に示す。図-5(a)に示す揖保川本川においては(観測点: #5～8, 2, 13, 14)、流下方向への水温変化はわずかずつではあるが系統的に上昇している。また、水温変化の位相もほぼ同一である。季節的には、受熱期に向けて単調に上昇しているのではなく、5月中旬や7月上旬の水温

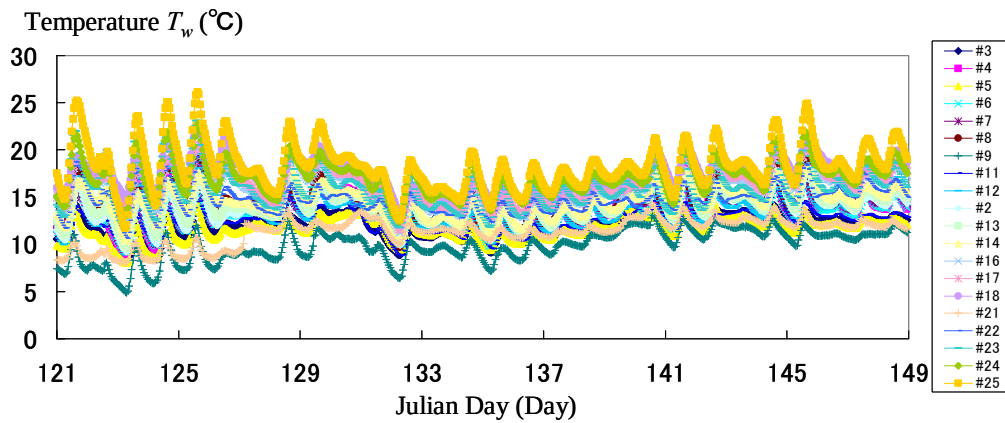


図-3 河川水温の時系列(2006年5月1日～5月28日)

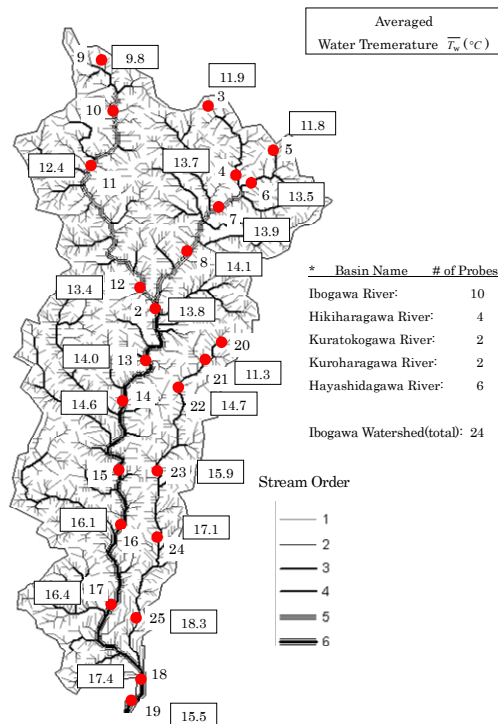


図-4 平均水温の流域分布(2006年5月の平均)

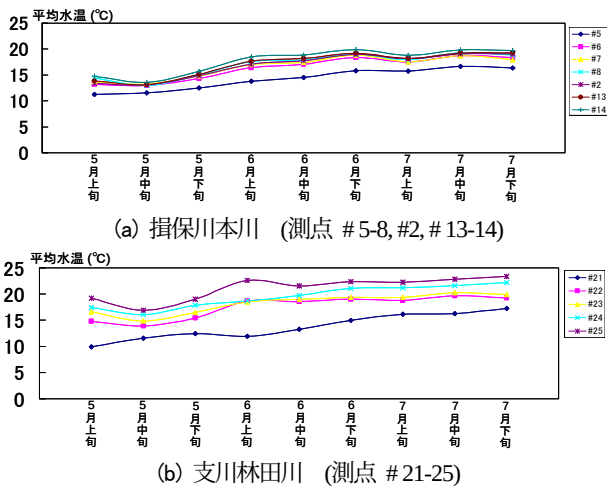


図-5 10日間平均の河川水温の時系列

変化に見られるように、降雨や台風の影響により水温が

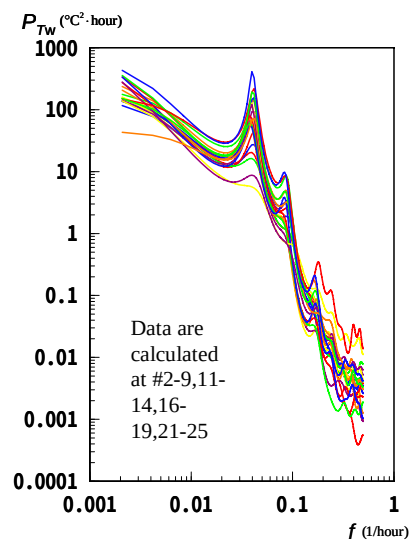


図-6 水温変動時系列のパワースペクトル(2006年5月)

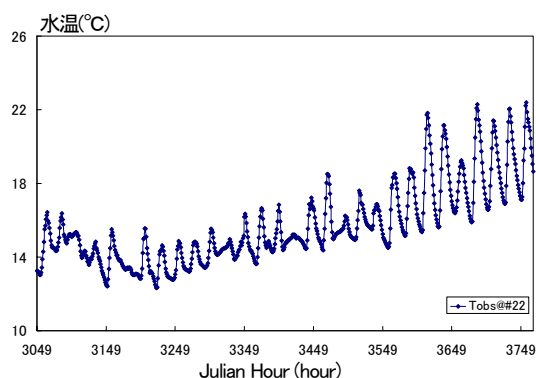
減少する時期も確認される。一方、図-5(b)に示す支川林田川の河川水温は(観測点：#21～25)、本川とはまったく対照的な挙動を示し、水温上昇率は本川に比較して大きいことがわかる。これは上述のように、林田川の流量が本川よりも小さいことに起因していると考えられる。さらに、6月上旬の水温変化に着目すると、その位相は観測点間で一致していないことがわかる。この原因については今後さらに検討が必要であるが、農繁期の灌漑取水や大雨時の上流側のダム操作など人為的操作の影響が考えられる。

(3) 水温変動スペクトル

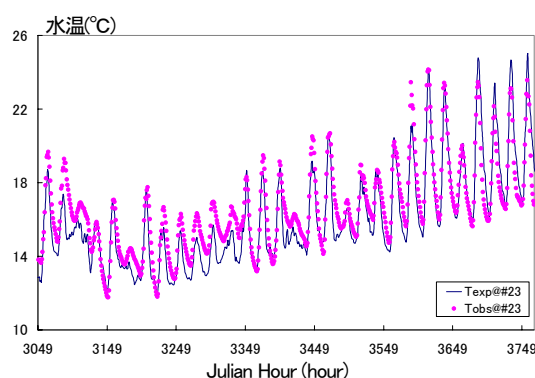
次に、図-3に示す水温変動の統計特性を調べるために時系列のスペクトル解析を行った。図-6に各観測時系列の周波数スペクトルを示す。これより、全ての観測時系列について24時間周期(周波数約0.04 (1/hour))が卓越しており、河川水温解析における日周熱収支成分の重要性が再確認される。

(4) 流下方向への水温変化の解析

以上のような河川水温特性を3章で導出された河川水温解析によって再現し、その妥当性を検証する。図-7に観測値と解析解との比較を示す。ここでは、支川林田川



(a) 測点#22の水温時系列



(b) 測点#23の推定水温(実線)と観測水温(プロット)の時系列

図-7 解析解による水温時系列の推定結果

の観測点#22の水温時系列(図-7(a))を境界条件として与え、気象条件としては気象庁HP¹²⁾から姫路観測所のアメダスデータをダウンロードし、9,020m下流側の観測点#23の水温時系列を推定した。林田川は、流域からの小河川合流がほとんどなく、解析モデルに導入されている水面・河床熱フラックスの影響が水温形成の主因となる河道区間であるため、検証の区間として選定した。なお、現時点では平均流速 V と平均水深 h の正確な情報が得られていないため、#23において観測値と推定値の偏差の二乗和が最小となるように(V , h)をモデルパラメータとして同定し、理論解を求めた。平均誤差は約1.0°C、最適解を与える(V , h)は(2.85m/sec, 30cm)となった。流況から判断して流速 V がやや大きく評価されているが、図-7(b)に示すように解析の簡便性にも関わらず本理論解は比較的長時間にわたる実測値の挙動をよく再現していると考えられる。今後、関係諸機関の観測データや河川での実測値を用いて流速・水深の値を検証してモデルを最適化させるとともに、さらに、水温解析に要する(V , h)などの河川情報を河道位数則などに基いて推定し、地形特性に基づいた流域規模の河川環境解析手法を構築する予定である。

5. 結 論

本研究では、揖保川水系を対象として河川水温の流域全域における連続モニタリングを実施し、河川上下流の隣り合う二地点間で河川水温変化を代数式で予測する簡易解析手法について検討を行った。河川水温の連続観測では、流量が異なる本川と支川で流下方向への水温の変化特性にかなりの違いが見られること、一日周期の水温変動はどの観測点でも卓越しており熱収支の日周変化成分の影響が顕著なこと、などが明らかになった。一方、水温解析に関しては、代数的に解が得られるように近似化された水温解析に基づく推定値は実測値と良好に合致しており、流速・水深など流況情報に関して課題は残るが、本研究で提案する河川水温の簡易解析モデリングの可能性が示された。

今後、流域全域にわたる水温解析に必要な流速 V 、水深 h などの河川情報に関しては河道地形則に依拠する解析を実施し、最終的に河川水温と流域地形特性との関連性を定式化する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、文部科学省21世紀COEプログラム(安全と共生のための都市空間デザイン戦略、リーダー：重村 力 神戸大学教授)から一部費用の補助を受けた。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いた。神戸大学学生田中千尋氏・向 和哉氏には解析・観測の遂行にあたり補助を受けた。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Miyamoto, H., Michioku, K. et al: GIS application to evaluate relation of stream order to population distribution in river basins, *Proc. of 7th International Conference on Hydroinformatics*, Vol.3, pp.2181-2187, 2006.
- 2) 新井 正, 西沢利栄: 水温論, 297p, 共立出版, 1974.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Sinokrot, B.A. and Stefan, H.G.: Stream temperature dynamics: Measurements and modeling, *Water Resources Research*, Vol.29, No.7, pp.2299-2312, 1993.
- 7) Younus, M., Hondzo, M. and Engel, B.A.: Stream temperature dynamics in upland agricultural watersheds, *Journal of Environmental Engineering*, Vol.126, No.6, pp.518-526, 2000.
- 8) 近藤純正: 水環境の気象学 一地表面の水収支・熱収支一, 350p, 朝倉書店, 1994.
- 9) 近藤純正, 中村 亘, 山崎 剛: 日射量および下向き大気放射量の推定, *天気*, Vol.38, pp.41-48, 1991.
- 10) Jobson, H.E.: Bed conduction computation for thermal models, *Proc. of ASCE*, Vol.103, No.HY10, pp.1213-1216, 1977.
- 11) Hondzo, M. and Stefan, H.G.: Riverbed heat conduction prediction, *Water Resources Research*, Vol.30, No.5, pp.1503-1513, 1994.
- 12) 気象庁HP: <http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>.

(2006.9.30受付)