

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

ANALYTIC EXAMINATION ON PRINCIPAL FACTORS OF RIVER TEMPERATURE FORMATION IN UPPER, MIDDLE AND LOWER STREAMS OF 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学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士課程前期過程 (同上)

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(同上)

In this paper, relative contributions of each component in a thermal energy conservation equation are examined for stream temperature prediction in a river basin. Examined here is the Ibogawa River, at Hyogo prefecture, Japan, where 27 observation points have been set up to monitor the stream temperatures continuously in the whole basin extent. We examine relative contributions of each component in the thermal energy equation in terms of different time scales, i.e., one-day, five-day, and one-month time scales as well as at different locations, i.e., upper, middle, and lower reaches of the river system. The solution of the thermal energy equation is derived using the method of characteristics and Taylor-series approximation. It is found out that the solar radiation is much significant on temperature fluctuations for all of the time scales and all locations. The effects of long wave radiation become more important for the one-month time scale. The shading effect of vegetation in upper reaches and the lateral inflow including large tributaries have much influence on river temperature formation.

Key Words: river basin management, water quality, stream temperature analysis, thermal energy equation, component balance

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に代表されるように, 流域全域で整合した河川整備が重要となっている. この流域一貫の河川環境課題に対し, 筆者らは河道位数のような地形特性を考慮した指標が課題を解く鍵になると考え, 研究を展開している^{1,4)}. 前報¹⁾では, 流域地形則を用いて河川水温予測のための分布モデルを定式化し, 試験流域²⁾での観測値と比較した. その結果, 土地利用の違う流域各部での流入水温など, 水温形成要因の違いを考慮する必要が示唆されたが, それでも流域全域での河川水温変化が概ね推定されることを確認した. また, 流域地形則とのアナロジーを仮定して, 河川環境に負荷を及ぼす土地利用や人口の流域分布を等比数列型の数学モデルで定式化し, 地形則との関連性などを考究しつつある^{3,4)}.

本論文では, 試験流域での水温観測結果に基づき, 前報¹⁾で課題にあがった流域各部での河川水温の形成要因を検討する. 具体的には, 河川水温に関する一次元熱保

存式の各項のバランスを算定し, 土地利用が異なる上・中・下流域での水温形成要因の違い, 日・半旬・月と時間スケールを変化させたときの違いを検討し, 得られた知見を水温の地形則モデル¹⁾に展開させることを意図する.

河川水温は, 水田灌漑など農業用水や発電用水, 工場冷却用水など利水への影響⁵⁾に加えて, 河川の生態環境を様々な形で規定する. そのため, 河川水温は基本的な水環境指標のひとつとして考えられる. 河川水温に関する既往の研究は非常に多く⁶⁾, 例えば, 上流域森林の影響に関する研究^{7,8)}や魚類の生息環境に関する研究⁹⁾, 地球気象変動に関する研究¹⁰⁾などが挙げられる. しかしながら, それらは上流部小流域や支川の一部を対象とした研究が多い^{7,11,12)}. また, いくらか河川規模の違う河道区間を対象にした研究¹³⁾でも, 本研究のように流域全域を意識して水温形成要因を相対的に比較評価したものではなく, さらに, 本論文で検討するような, 時間スケール変化による水温形成要因の違いを系統的に取り扱った研究は筆者らの知る限り見あたらない.



図-1 観測流域の位置

本論文の構成は以下のとおりである。まず、対象とする試験流域と水温観測の概要が示される。次に、河川水温の一次元熱保存式、河畔林遮蔽効果のモデル化、気象・水文量などの入力データなど、解析方法が示される。解析モデルの妥当性が検討された後、流域位置や時間スケールの違いによる水温形成要因の差異が議論される。最後に得られた成果がまとめられるとともに、地形則モデルへの展開に向けた今後の課題が言及される。

2. 試験流域と河川水温観測

図-1に試験流域の位置を示す。試験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。流域は羽状型を呈しており、上・中・下流が比較的明確に認識できる単純な構造である。揖保川の流域面積は810km²、幹川流路延長は70km、流域人口は20万である。

図-2に揖保川流域での土地利用、河道網および水温ロガー設置位置を示す。水温ロガーに関しては、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27の観測点を設定している。水温は一時間毎に自動計測され水温ロガー内のメモリに蓄積される。土地利用の概略は流域全域で山地84%、農地11%、市街地5%であり、図-2に示す土地利用分布から上流域(水温ロガーNo.1~10)はほぼ森林で覆われ、それ以南の中・下流域で河川沿いに田・農用地、市街地など建物用地の面積が大きくなる。

本論文では解析対象として、森林部を流れる水温ロガーNo.3~4間を上流域、田・農用地部を貫流するNo.12~13間を中流域、建物用地の割合が大きくなり、右支川栗栖川(No.25~27)が流入するNo.14~16間もしくは支川林田川(No.19~24)が流入するNo.16~17間を下流域として選定した。

図-3に2007年7月の月平均水温分布の観測値を示す。月平均水温は上流から河口へかけて上昇しており、その昇温幅は約6℃程度である。下流域で合流する支川林田川、栗栖川での水温が本川水温より約1℃程度高くなるが、これは本川流量に比べて支川流量がかなり小さく、

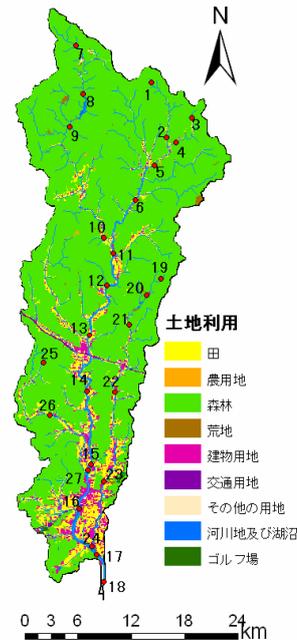


図-2 揖保川流域の土地利用、河道網および水温ロガー設置位置

水温が日射の影響をより大きく受けるためと考えられる。さらに、支川林田川のNo.20の水温には注意を要する。この観測点の水温は周辺山地からの地下水の湧水温であり、年間を通して他の観測点とは違う時系列挙動を示す。図-3に示す月平均水温においても、No.19~20間で日射などにより流下に伴って昇温するはずが降温している。

3. 解析方法

(1) 解析モデル

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。

本論文を含む筆者らの一連の研究²⁾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。熱保存式に基づく簡易な予測手法を指向するものであるが、それは序論で示した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る。その場合、一要素である河

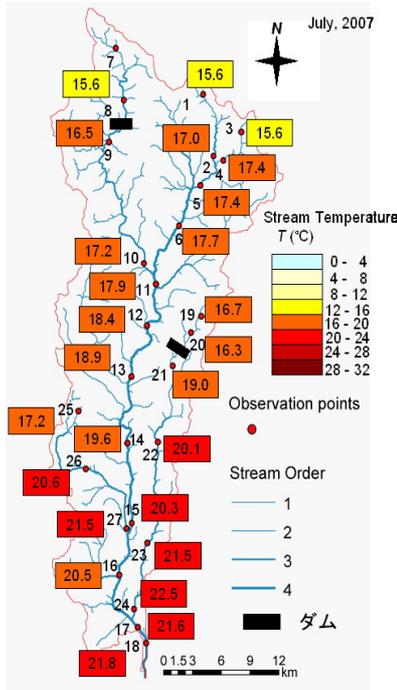


図-3 2007年7月における月平均水温分布

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。

以下に解析解の概略を示す。解析解を導出するにあたり、流水断面は広幅長方形とした。また、SinokrotとStefan¹³⁾の数値解析による知見にならい、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ため分散項は無視できると仮定した。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・道奥²⁾と同じであり、横流入項と後述の河畔林植生の遮蔽効果モデルをここでは新たに導入した。

式(1)は一階偏微分方程式であり、右辺を T_w に関する線形な形式

$$\frac{1}{c_w \rho_w h} H_{wb} + \frac{q_x}{A} (T_{wl} - T_w) = \alpha(x, t) T_w + \beta(x, t) \quad (3)$$

で表現できると特性曲線法により解析解を導くことができる。ここで、

$$\frac{dt}{ds} = 1, \quad \frac{dx}{ds} = V \quad (4)$$

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

$$t = s + t_0 = \frac{x}{V} + t_0 \quad (5)$$

の線上で式(3),(4)は次の常微分方程式に帰着する。

$$\frac{dT_w(s)}{ds} = \alpha(s) T_w(s) + \beta(s) \quad (6)$$

境界条件を、

$$T_w = T_{w0}, \quad \text{at } s = 0; \quad x = 0, t = t_0 \quad (7)$$

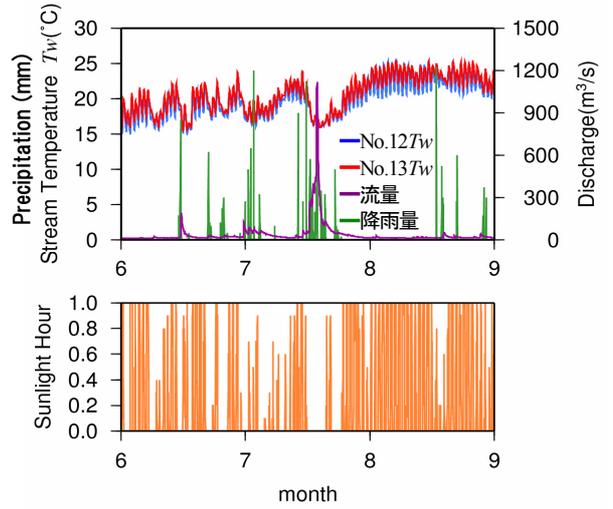


図-4 中流域における2006年6月～8月の気象・水文学と河川水温の時系列

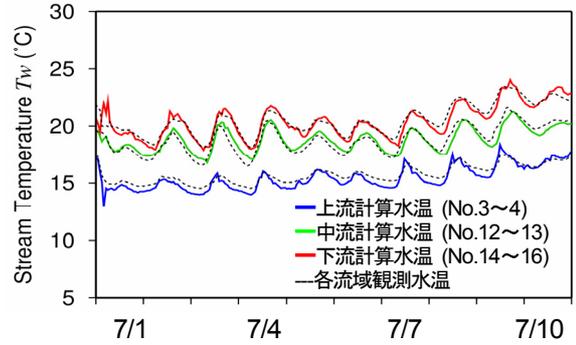


図-5 解析水温と観測水温の時系列

とすると、式(6)の解は、

$$T_w(s) = T_w(x, t) = T_w \left(x, \frac{x}{V} + t_0 \right) = \exp \left\{ \int_{t_0}^{x/V+t_0} \alpha(r) dr \right\} \times \left[\int_{t_0}^{x/V+t_0} \beta(r) \left\{ \exp \left(- \int_{t_0}^{x/V+t_0} \alpha(c) dc \right) \right\} dr \right] + T_{w0}(0, t_0) \quad (8)$$

となる。式(3)に示す右辺の線形化では、長波逆放射や潜熱フラックスの予測式に現れる T_w に関する高次非線形項を、平衡水温 T_{weq} 周りにテイラー展開して線形近似した。式(8)の α , β は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ -4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 - \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \times \exp \left\{ a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e \right) \right\} - \rho_a c_p C_c W + \Delta H(0) \right\} - \frac{q_x}{A} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{1}{c_w \rho_w h} \left\{ (1 - V_{shade}) H_s + H_a - S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^4 + 4S_{br} \sigma (T_{weq} + 273.15)^3 T_{weq} - \gamma_{la} (e_{weq} - e_a) + \gamma_{la} \frac{a_e b_e c_e}{(T_{weq} + c_e)^2} \exp \left\{ a_e \left(\frac{b_e T_{weq}}{T_{weq} + c_e} + d_e \right) \right\} T_{weq} + \rho_a c_p C_c W T_a + \sum_{i=1}^M \{ (\Delta H(i\Delta t) - \Delta H((i-1)\Delta t)) T_w(s - i\Delta t) \} \right\} + \frac{q_x}{A} T_{wl} \quad (10)$$

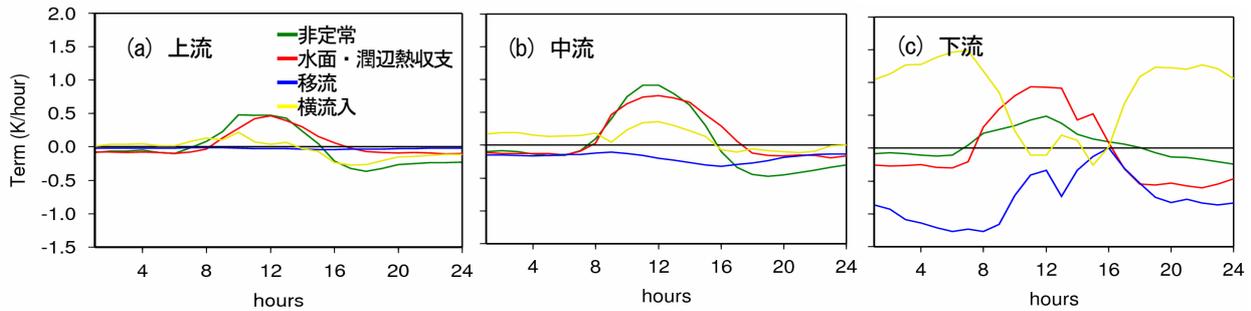


図-6 上・中・下流域における解析モデル各項の日変化(2006年10月3日)

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, $\gamma_{la} : \rho_a L_{la} C_E (0.622/p) W$ (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 : 大気中の圧力, 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。

なお、各項のバランスを検討する際、式(1)の右辺最終項の横流入項は、実測水温を与えることによって、式(1)において解析水温との誤差が最小になるように算出した。したがって、本論文の横流入項にはさまざまな誤差成分も含まれる。それでも筆者らがこの項を誤差項ではなく横流入項とするのは、後述の第4章において解析結果を解釈する際、横流入項として考えると水温形成現象の合理的な解釈が得られるからであり、その意味で筆者らは誤差を含むものの、ほぼ横流入項の挙動を示していると判断している。

(2) 河畔植生による日射遮蔽効果のモデル化

河畔植生による日射の遮蔽効果に関するモデルや評価方法は数多く提案されている。Sridharら⁷⁾のモデルでは、植生の葉面積などをパラメーターとして遮蔽率を算出し、直達日射が補正される。一方、SinokrotとStefan¹³⁾は、河川水温の観測値と数値モデルから植生遮蔽率の最適値を算出し、遮蔽率が河川や季節により大きく変化することを示している。また、吉田ら⁸⁾は、対象河畔林の植生高さ、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モデルを提案している。本論文では、解析モデル中の短波放射量を全天日射として評価している²⁾ことから、吉田らのモデル⁸⁾を採用し日射遮蔽効果を表現することにした。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。

(3) 気象・水量などの入力データ

解析に用いる気象データは、揖保川流域(姫路・一宮)のデータを気象庁ホームページ¹⁴⁾より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。

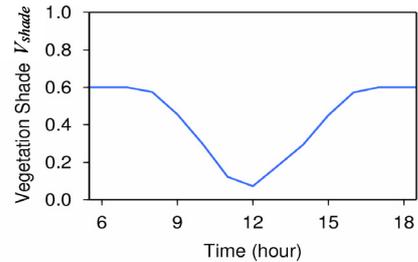


図-7 上流区間における日射遮蔽率

流量データに関しては、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データを用いた。解析対象とした上流域(水温ロガーNo.3~4)では流量の観測値が揃っていないため、月例の定期観測で得られた流量の瞬時値をもとに他の地点の流量時系列を参考に流量を推定した。

図-4に、中流域(水温ロガー: No.12~13)における、2006年6月~8月の気象・水文量と河川水温の時系列を示す。これより、降雨や出水など気象・水文量の変化と河川水温の変化の間には明確な相関関係があることがわかる。その時間スケールは、水温時系列上にスパイク状に現れる日周変動の周期より大きく、概ね半月程度と考えられる。本論文の最終節ではこの半月を含み、日・半月・月の3つの時間スケールにおいて河川水温変化の要因分析を行う。

4. 結果と考察

(1) 解析モデルの妥当性の検証

図-5に解析モデルを用いて求めた水温と観測水温の時系列を示す(2006年7月1日~10日)。これより解析水温は観測水温と非常によく一致しており、解析モデルが最適化されていることがわかる。この最適化に際しては、中・下流域においては水温予測地点の流量が、上流域では横流入が水温の再現に最も影響を与える因子であった。解析水温と観測水温の平均誤差は上・中・下流それぞれの区間において、0.39, 0.36, 0.33°Cであり、計算値と観測値の決定係数は0.87以上であった。以下では、この解析モデルを用いることで水温形成要因の検討を行った。

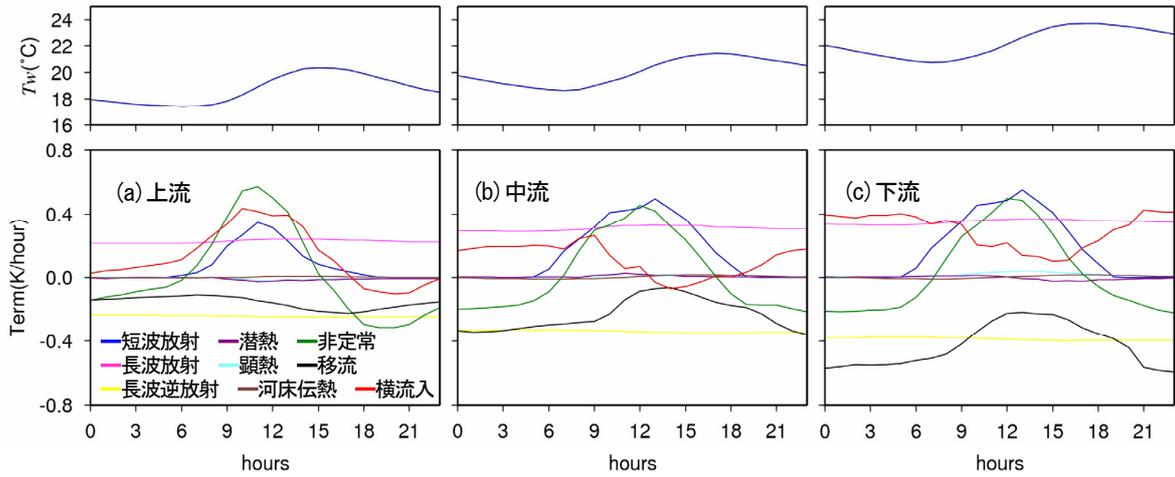


図-8 日周変化における解析モデル各項のバランス (2006年7月晴天時平均)

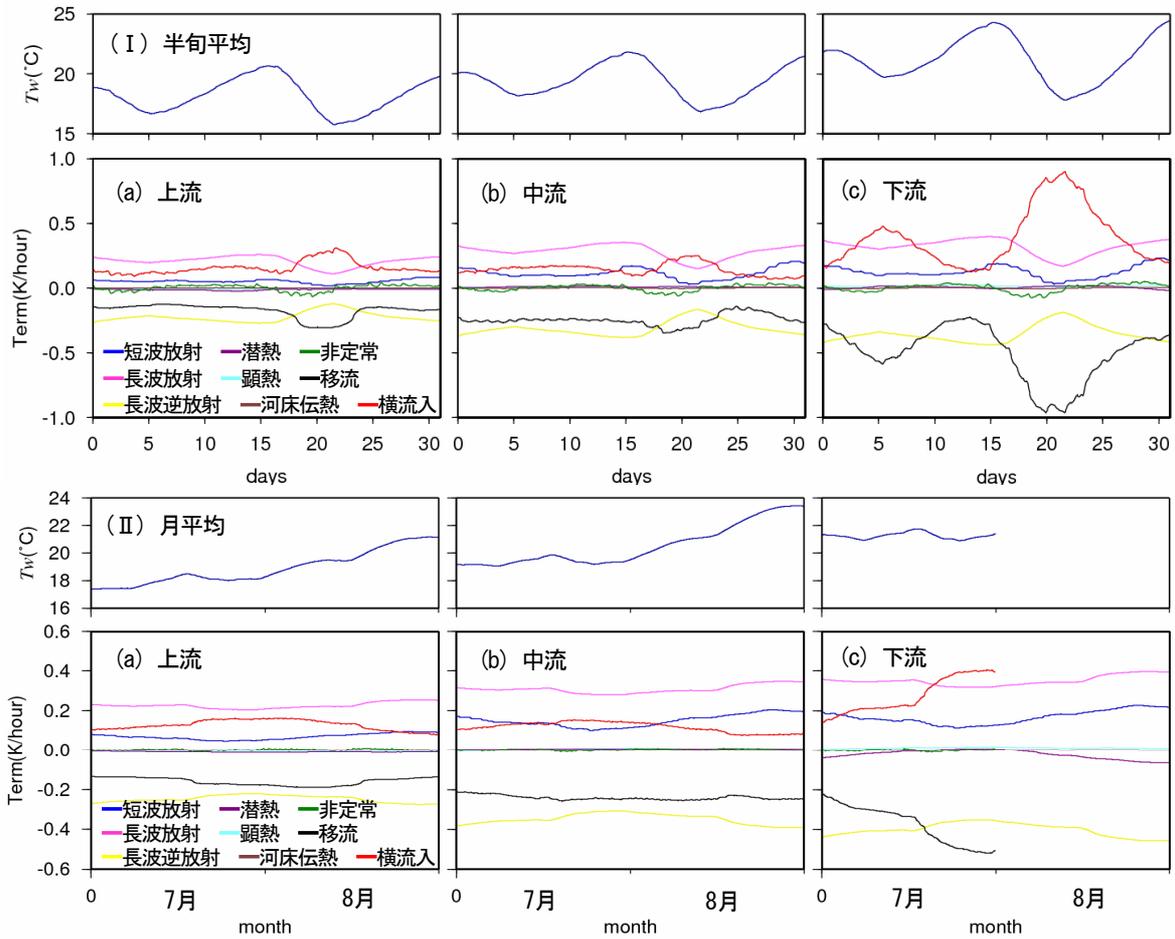


図-9 半月・月平均における解析モデル各項のバランス (2006年7月-8月)

(2) 上・中・下流域における河川水温の形成要因

解析モデルの非定常項、水面・潤辺からの熱収支、移流、横流入の日周期変化を図-6に示す。ここでは、秋季の晴天時の典型的な特徴である2006年10月3日の時系列を示している。図-6(a)に示す上流域から図-6(c)の下流域に流下するに伴い、移流・横流入の影響が大きくなり、また、水面・潤辺からの熱収支量も大きい値をとる。これらはそれぞれ、流下に伴う流量の増大、森林域の河畔植生遮蔽効果の減少と標高の低下に伴う気温上昇に対応

するものと考えられる。特に上流域において水面・潤辺の熱収支量が小さいのは、図-7に示すように河畔林遮蔽モデルによる日射減少が大きく効くためである。以上より、どの区間においても水面・潤辺からの熱フラックスが水温形成に大きく影響を及ぼすことと、下流に行くほど移流・横流入の影響が大きくなることがわかる。

(3) 日・半月・月平均河川水温の変化要因

次に、解析モデルの各項バランスが時間スケールを変

えることによってどのように変化するかを検討した。時間スケールとしては、上述の日周期の変化に加えて、水文学量・気象量の変化が卓越する半月の変化、季節変化に対応する月変化を対象とした。

図-8に日周時間スケールでの解析モデル各項の時系列を示す。日中において非定常項と短波放射の変化がほぼ同期していることから、短波放射の影響が水温変化に支配的であると考えられる。長波放射、長波逆放射は上流域から下流域に流下するに伴って大きくなるが、一日を通してほぼ一定値をとり、水温日周変化にはあまり寄与しない。流域全域で、潜熱・顕熱・河床伝熱が水温形成に及ぼす影響はほぼ無視できる。さらに水温変化に及ぼす横流入項の寄与に関しては、図-8(a)の上流域ではその影響は日中に河川水温の昇温をより加速させる方向に働き、図-8(b)の中流域では昇温を抑える方向に作用する。図-3に示すNo.20での地下水湧水温がこの時期の流域全域の地下水温を代表すると仮定すると、上流域では河川水温に比べて高温の水が、中流では低温水が、それぞれ横流入していると考えられ、ここで得られた各項バランスの傾向に一致する。さらに、図-8(c)に示す下流域においては支川からの高温水流入の影響も大きいと考えられる。

図-9に半月および月平均の解析モデル各項のバランスを示す。図-9(c)の8月の月平均の移流、横流入、月平均水温の値は、水温データの欠測のため算出されていない。半月以上の長時間スケールでは、日周期の水温変化において支配的であった短波放射の影響が小さくなり、水温の非定常性も小さくなるのがわかる。一方、長波放射・長波逆放射項の変化が半月・月平均の河川水温変化と関連するようになり、長時間の水温形成には気温変化の影響が大きく寄与することが推察される。半月の時間スケールでは、特に、移流・横流入項の影響が顕著になるが、これは降雨による出水など気象・水文学量の変化に対応する。さらに、日周変化と同様に潜熱・顕熱・河床伝熱の影響は小さく、湖沼などの閉鎖性の停滞水域と異なり河川のような流水環境ではこれらの影響は第一近似としては無視できると考えられる。

5. 結 論

本論文では、河川水温に関する一次元熱保存式に河畔林の日射遮蔽効果を取り入れた解析モデルを用いて、上・中・下流域など流域位置や日・半月・月など時間スケールの違いによる河川水温の形成要因を検討した。得られた成果を以下に列挙する。

① 上・中・下流域における河川水温形成の主要因は水面からの熱フラックスである。上流域では河畔林による日射遮蔽効果が大きく影響する。また、下流にいくほど流量増加により、相対的に移流と横流入の寄与が大きくなる。

- ② 日周変化における水温形成要因は、短波放射である。長波放射、長波逆放射は値が大きいがほぼ一定値をとり、水温変動の日周変化にほとんど寄与しない。潜熱・顕熱・河床伝熱の影響は小さい。
- ③ 半月、月など長時間スケールにおいては、短波放射の影響は小さくなり、その一方で長波放射、長波逆放射の変化が半月、月平均水温の変化と関連するようになる。

本論文では、上流域の河畔植生の遮蔽効果や下流域の横流入水が河川の水温形成に大きく影響を及ぼすことが再確認された。今後、森林など土地利用形態と流域地形特性との関連性を検討し、植生の遮蔽効果を河川水温の地形則モデル¹⁾に組み入れることを検討する予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、費用の一部を平成20年度科学研究費補助金(萌芽研究: No.20651010, 研究代表者: 道奥康治)から補助いただきました。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。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 宮本仁志, 橋本翼, 道奥康治: 河道位数を用いた土地利用と人口の流域分布モデルと流域間比較, 投稿中.
- 4) Miyamoto, H., Michioku, K., Tanaka, C. and Tanaka, T.: 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.
- 5) 新井 正, 西沢利栄: 水温論, 297p, 共立出版, 1974.
- 6) Webb, B.W.: Trends in stream and river temperature, *Hydrological Process*, Vol.10, pp.205-226, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 気象庁HP: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>.

(2008. 9. 30受付)