水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 8, No. 2 (1995) PP. 197-209

河川水温の日変化 (2)観測による検証

—異常昇温と魚の大量死事件—

Diurnal temperature variation of the river water (2) Observational verification

近藤純正*・菅原広史*・高橋雅人* (東北大学理学部)

Junsei KONDO・Hirofumi SUGAWARA・Masato TAKAHASHI *Geophysical Institute, Tohoku University*

谷井迪郎** (谷井養鱒場)

Michio TANII *Tanii Fish Farm*

In the previous paper, Kondo (1995) has shown a calculation model of the river water temperature. Using the model, the daily variation of the water temperature at a fixed point and the temperature profile along the river can be estimated from routine meteorological parameters. These estimations well simulate the observations. The first observation of the daily maximum and minimum water temperature was made for four summers at Akiyamazawa Brook, Miyagi prefecture. The second observations of the water temperature profile was carried out at Akiyamazawa Brook and Hirose River. The third one of the daily temperature variation was made at Hirose River.

An estimation of a rise in water temperature followed by river conservancy shows that the maximum water temperature is sensitive to the water depth and current speed. An incident of mass death of fish, occurred in extraordinary hot summer of 1994 at a pond of fish farm which draws water from Akiyamazawa Brook, may be caused by unusual hot water as a result of brook conservancy which widens the width and shallows the water depth.

Key word: River water temperature, Heat budget, Unusual hot water, River conservancy

前報で示した河川水温の計算モデル(近藤, 1995)によって, 水温の日変化ならびに河川の流れに沿う水温分布を計算することができる。これらの計算値は観測結果をよく説明できる。その1は宮城県秋山沢川で行われた4年間の夏期の日々の最高・最低水温の観測, その2は秋山沢川および広瀬川で実施した水温分布の観測, その3は広瀬川における水温の日変化の観測である。

河川改修に伴う水温上昇の見積もりをしてみると, 最高水温は河川の水深と流速に敏感である。秋山沢川の水を利用した養魚場で, 異常暑夏の1994年に魚の大量死事件があったが, これは河道の拡幅によって水深が浅くなったことで生じた水温の異常上昇が原因と思われる。

キーワード: 河川水温, 熱収支, 河川水の異常昇温, 河川改修

I. はしがき

河川の水温は, 源流点を出発してから上昇または下降しながら観測点に到達する。前報(近藤, 1995)では水温の時間変化を解く計算モデルを示した。それに必要な気象要素は日平均気温, 最高・最低気温,

比湿, 日平均風速, 日照時間(観測のある場合は日平均日射量), 河川パラメータは水の流れに沿って測った平均水深, 平均流速, 源流点からの距離である。

本報告では, 宮城県蔵王町の秋山沢川の水を利用した養魚場で観測された毎日の最高・最低水温を計算で再現する。秋山沢川は1989年8月6~7日の台

*東北大学理学部地球物理学教室 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉
Geophysical Institute, Tohoku University, 980, Japan

**谷井養鱒場 〒989-09 宮城県蔵王町遠刈田温泉字北原尾1-91
Tanii Fish Farm, Kitaharao 1-91, Toggatta-Onsen, Zao-Machi, Miyagi, 989-09, Japan

風13号にともなう豪雨で氾濫したため、河川改修を行なっている。その前後の水温を比較する。

ついで、1994年7月29日と10月8日に秋山沢川の源流から下流にかけて実施した河川水温の縦断観測、および7月19日と25日の仙台市の広瀬川の上流から下流にかけての縦断観測、さらに7月25～26日の広瀬川の宮沢橋付近における水温日変化の観測によってモデルの検証を行なう。

これらの結果から、河川の改修が水温変化をもたらすことを示し、自然をできるだけ保つ改修のありかたを考えたい。また、1993年は80年ぶりに生じた冷夏年、翌1994年は逆に異常な暑夏年であったが、異常気象も水温に著しく影響することを示したい。

主 な 記 号

[] 内は本論文で用いる数値

下付き添え字「M」：日平均値を指す

下付き添え字「G」：河床の土壤に関する量を指す

下付き添え字「W」：水に関する量を指す

C_{HU} ：水面から大気への顕熱輸送の交換速度 (ms^{-1})

C_{PP} ：空気の熱容量 (20°C で $1.21 \times 10^3 \text{ JK}^{-1} \text{ m}^{-3}$)

C_{GG} ：河床の土壤の熱容量 [$2.6 \times 10^6 \text{ JK}^{-1} \text{ m}^{-3}$]

C_{WW} ：水の熱容量 ($4.2 \times 10^6 \text{ JK}^{-1} \text{ m}^{-3}$)

day ：1月1日からの日数、 $day=152$ は6月1日

d_G ：地温の日変化を生じる有効な深さ [0.073 m]

d_w ：河川の平均水深 (m)

e ：水蒸気圧 (hPa)

f_{CHU} ：水面の交換速度にかかる係数、 $f_{CHU}=1$ は普通の水面、 $f_{CHU}>1$ は水しぶきを上げる河川

f_{FOREST} ：樹林等による遮蔽の係数、 $f_{FOREST}=1$ は完全な樹林内の河川、 $f_{FOREST}=0$ は天空がすべて見える河川、ただし正午頃の日射遮蔽率の流路平均値を表すものとする

G_G ：河床の土壤への地中伝導熱 (Wm^{-2})

$L\downarrow$ ：下向きの大気放射量 (Wm^{-2})

$l_x = V\tau$ ：源流点からの距離 (m)

l_Y ：河川の流水面の幅 (m)

N ：日照時間 (hr)

Pr ：降水量 (mmd^{-1})

$Q = l_Y d_w V$ ：流量 ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

q ：空気の比湿 (kgkg^{-1})

q_{SAT} ：気温 T における飽和比湿 (kgkg^{-1})

$R\downarrow = (1 - \text{ref}_w) S\downarrow + \epsilon L\downarrow$ ：入力放射量 (Wm^{-2})

$\text{ref}_w = 0.06$ ：水のアルベード (一定と仮定)

$S\downarrow$ ：日射量=全天日射量 (Wm^{-2})

T ：気温 (K または $^\circ\text{C}$)

T_B ：河床の土壤面の温度 ($^\circ\text{C}$)

T_G ：河床の地中温度 ($^\circ\text{C}$)

T_0 ：源流水温 ($^\circ\text{C}$)

T_{max}, T_{min} ：日最高気温、日最低気温 ($^\circ\text{C}$)

T_w ：水温 (K または $^\circ\text{C}$)

$T_{w,max}, T_{w,min}$ ：日最高水温、日最低水温 ($^\circ\text{C}$)

T^* ：平衡水温 (K または $^\circ\text{C}$)

t ：太陽時の時刻 (s)

U ：風速 (ms^{-1})

V ：河川の平均流速 (ms^{-1})

X ：風が水面を吹く長さ (m)、 $[X=3 \times l_Y \text{ とする}]$

$\Delta = (dq_{SAT}/dT)_T$ ：飽和比湿の変化率 (K^{-1})

δT^* ：平衡状態における水温日変化の振幅 ($^\circ\text{C}$)

$\epsilon = 0.96$ ：水の長波放射に対する黒体度

ι ：水の気化の潜熱 (20°C で $2.45 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$)

κ ：飽差分に相当する潜熱輸送量 (Wm^{-2})

μ ：飽和湿度の条件における赤外放射・顕熱・潜熱交換の係数 ($\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ：ステファンボルツマン定数

λ_G ：河床の土壤の熱伝導率 [$2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$]

ρ ：空気密度 (20°C で 1.20 kgm^{-3})

$\tau = l_X / V$ ：源流点から l_X までの経過時間 (s)

$\tau_0 = C_{WW} d_w / \mu$ ：水温のレスポンス時間 (s)

$\omega = 2\pi / 86400$ ：1日周期の周波数 (s^{-1})

II. 観 測

1. 場 所

1) 秋山沢川

秋山沢川は阿武隈川の上流にある支流の一つで、遠刈田温泉の市街地から国道457号を南に行くと西に扇状地があり、その南端を屏風岳から東向きに水は流れ、国道の秋山沢橋(図-1のD)と直交している。最上流の第3号砂防ダム(現在工事中)の上流側100mより上流では樹林に覆われ、水流の幅は2～6m、水は岩間の段々で水しぶきをたてながら流れている。本研究では、この砂防ダムの上流側30mの地点を源流点 ($l_X=0$ 、標高610m、図-1のA)と定義する。その下流では周辺一帯の広い範囲の樹木は伐採されている。第3号砂防ダムから約300m下流には第

図一 秋山沢川の地図。A：源流点，B：養魚場の取水口的位置，C：放水口的位置，D：秋山沢橋

2号砂防ダムが、さらに約300m下流には第1号砂防ダムがある。水はこれらの砂防ダムには溜っていない、その下端の穴（水抜き暗渠）を流れている。ここまでの河床の大部分は自然状態で、水は2～3筋となり蛇行しながら流れている。第1号砂防ダムから下流の河床の大部分は床固工によりほぼ平らにされている。国道に架かる秋山沢橋（ $l_x=2950\text{m}$ ，標高=380m，図一のD）までの河道幅は25～42m，平均27mある。河道に沿って約25～120mごとに落差約1.3～2.7mの人工の滝が設けられている。この改修工事の計画高水流量は $200\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ，計画雨量は 53mm hr^{-1} ，粗度係数は0.055，河床勾配は $1/50\sim 1/25$ ，計画水深は1.8～2.2mとされている。

1994年7月29日の測定によれば，流水面の平均幅は $l_r=15\text{m}$ ，流量は $Q=0.48\text{m}^3\text{s}^{-1}$ であった。この l_r と Q を1994年夏期（渇水）の平均状態とみなす（表一）。

また，大雨のあった後の9日目，流量のほぼ落ち着いた1994年10月8日に測ってみると $Q=1.29\text{m}^3\text{s}^{-1}$ であった。さらに源流点から下流に向かって300mの距離ごとに流水面の幅を測ったところ，最小～最大幅は4～9m，8～39m，8～23m，20～22m，19m，23～26m，18～26m，13～26m，26～27mであった。この測定から $l_r=19\text{m}$ とした。 Q と l_r が大きいのは，9月22日の豪雨と9月29日の26号台風に伴う大雨による洪水後のためである。それゆえ，10月8日の Q と l_r は，流量の多いときの値と見なすこととし，1993年の多雨の夏期（豊水）の平均状態として用いる（表一）。

2) 広瀬川

広瀬川は蔵王連峰の船形山と熊野岳の間に源が

図二 広瀬川の地図。A：源流点，B：新川川のJR鉄橋，E：牛越橋，L：宮沢橋，M：広瀬橋

あり，仙台市を東向きに太平洋に注ぐ河川である（図二）。上流の支流の一つ，新川川に架かるJR鉄橋の下（位置（標高280m，図二のB）を源流からの距離 $l_x=5\text{km}$ の地点と定義する。1994年7月25日17時現在，この地点の水温 $=20.53^\circ\text{C}$ ，流水面の幅は10mであった。上流部では枝別れした小さな沢が多く，源流点の決め方は難しいので，便宜的に次のように定義する。JR鉄橋の下（地点で，新川川へ注ぐ幅1mの小さな沢がある。この沢の200m上流地点（標高290m，図二のA）まで行くことができ，その地点の水温を源流水温 T_0 と定義する。 $T_0=15.88^\circ\text{C}$ ，新川川に注ぐ直前の地点の水温 $=16.90^\circ\text{C}$ であった。

ここから広瀬橋（図二のM）のすぐ上流地点（ $l_x=36.5\text{km}$ ，標高=10m）までの区間の水温を観測した。

2. 観測方法

1) 秋山沢川の最高・最低水温

源流点から約2000mのところ谷井養魚場がある。その取水口は $l_x=1890\text{m}$ （図一のB），排水口は $l_x=2120\text{m}$ （図一のC）にある。養魚場の水中には板付きのU字状の最高・最低温度計が設置されており，毎日16時頃に当日の最高水温を，9時頃に当日の最低水温を読み取ることにしている。最高・最低温度計は2～3年のうちに破損することがあり，取り替えている。養魚場の水深は1mあり，流量は $0.35\text{m}^3\text{s}^{-1}$ （夏）または $0.18\text{m}^3\text{s}^{-1}$ （冬）と多いので，この最高・最低水温は河川の水温を十分代表している。

1994年7月29日，後述の電気水温計との比較によれば，最高・最低温度計の水銀柱は相対的に 1.4°C 低温であったので，1992～1994年の観測値は $+1.4^\circ\text{C}$ の補正を行う。それ以前は不明なので，補正は施さない。

2) 縦断観測

河川の上流から下流までの水温の縦断観測は、サーミスタ電気水温計(東邦電探社製)を用いた。観測に先立ち検定した。

水温は、橋のある地点では、橋の上から電気水温計を流れの中央部につり下げて測定した。水面から0.1mの水深で水温を測ることとした。広瀬川には所々に水深1m程度の淵がある。その水温の鉛直分布を測ってみると、上下で0.1°C以内の差しかなく、水温は鉛直方向に等温と見なしてよい。

3) 水温日変化

広瀬川の宮沢橋のすぐ下流の地点($l_x=36\text{km}$, 標高=15m, 図-2のLの下流の黒丸印)で電気水温計のセンサーを水面から0.06mの深さに設置して観測した。また、もう一つの電気水温計を河床の土壤中に設置し、地中温度を観測した。そのほかの地点では、棒状温度計も用いた。

3. 河床の土壌パラメータ d_G の決定

広瀬川の牛越橋のすぐ下流の地点($l_x=28.6\text{km}$, 標高=40m, 図-2のE)で水温および河床の地中温度の時間変化を観測し、以下の方法によって、モデル計算に必要な「地温の日変化の生じる有効な深さ d_G 」を算定した(原理は近藤, 1995, 参照)。

河床面の温度 $T_B (=T_w$: 水温)の日変化の振幅を A_1 とし、

$$T_B = A_1 \cos(\omega t - \phi) + T_{BM} \quad (1)$$

で変化するとすれば、地中伝導熱は次式で表される。

$$G_G = A_1 \omega^{1/2} (c_G \rho_G \lambda_G)^{1/2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \phi\right) \\ = c_G \rho_G d_G \frac{\partial T_w}{\partial t} + \omega c_G \rho_G d_G (T_w - T_{GM}) \quad (2)$$

ここに

$$d_G = \left(\frac{\lambda_G}{2\omega c_G \rho_G}\right)^{1/2} \quad (3)$$

河床面からの深さ z における地中温度の振幅は

$$A = A_1 \exp\left[-z\left(\frac{\omega c_G \rho_G}{2\lambda_G}\right)^{1/2}\right] \quad (4)$$

で表される。

1994年8月14日～15日の観測によると $T_{BM} (=T_w) = 27.7^\circ\text{C}$, $A_1 = 1.75^\circ\text{C}$, 深さ $z = 0.12\text{m}$ において $A_1/A = 2.33$ であった。河床土壌のサンプルから間隙率=0.44を測定し、乾燥土壌の熱容量 $=1.3 \times 10^6 \text{ JK}^{-1}\text{m}^{-3}$ として、 $c_G \rho_G = 2.6 \times 10^6 \text{ JK}^{-1}\text{m}^{-3}$, $\lambda_G = 2$

$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を得た。その結果、 $d_G = 0.073\text{m}$ と算定された。

4. 複雑傾斜河川の水面の交換速度 $C_H U \times f_{CHU}$

多くの河川の源流域は傾斜が大きく、水は岩を越えしぶきを上げながら流れている。そのため大気との熱交換は平坦地の河川上における熱交換よりも大きいと考えられる。そのような場所の交換速度は、後述(式15, 16)の $C_H U$ に係数 f_{CHU} を掛けたものと考ええる。

この係数を求めるために、1994年7月25日に広瀬川上流の小さな沢(前記の源流点付近)で距離 $l_x = 0 \sim 200\text{m}$ にわたり水温の縦断観測を行った。図-3のプロットは水温の観測値である。これら5点は図-13の左端に重ねてプロットされたものと同じである。この沢の幅は $l_y = 1\text{m}$ あり、上空は完全に樹木に覆われ日射量はほとんどゼロである。樹木の温度は気温 T に等しいと見なしてよいので、入力放射量は赤外放射量 σT^4 に等しい。水塊のラグランジュ的な温度変化の計算(本論文で計算する方法)によって求めた結果、 $C_H U \times f_{CHU} = 0.022\text{ms}^{-1}$, $f_{CHU} = 6$ を得た。図-3の実線は $f_{CHU} = 6$ とした場合の計算値である。点線は $f_{CHU} = 1$ とした場合の計算値であるが観測値を説明できない。これらの計算では、 $T = 24.2^\circ\text{C}$, $e = 26.7\text{hPa}$, $U = 0.5\text{ms}^{-1}$, $d_w = 0.1\text{m}$, $V = 0.3\text{ms}^{-1}$ の観測条件を用いた。

この結果は、秋山沢川の改修前の水温の計算に用いる。

図-3 広瀬川の源流点付近の水温。四角印：観測値、実線： $f_{CHU} = 6$ とした場合の計算値、点線： $f_{CHU} = 1$ とした場合の計算値

III. モデル計算の概要

河川水は放射量や気温などの大気側の条件(時刻 t の関数)のほか, 河川水の厚さ d_w (水深), 流速 V , 河床の土壌の熱容量 $c_g \rho_g$ や熱伝導率 λ_g によって支配される。このため水温は, 源流を出発してからの経過時間 τ と, 太陽時の時刻 t の関数になる。詳細は前報(近藤, 1995)に示されている。

十分な距離の下流では移流の効果は相対的に小さくなり, 水温は τ によらず時刻 t のみの関数となる。このときの日平均水温を平衡水温という。

1) 平衡水温 T^*

平衡水温は次式で近似できる(前報の式7)。

$$T^* \approx T_M + \frac{R_M \downarrow - \varepsilon \sigma T_M^4 - \kappa}{\mu} \quad (5)$$

ただし

$$R_M \downarrow = (1 - \text{ref}_w) S_M \downarrow + \varepsilon L_M \downarrow \quad (6)$$

$$\kappa = \rho C_H U_M [q_{SAT}(T_M) - q_M] \quad (7)$$

$$\mu = 4\varepsilon \sigma T_M^3 + c_p \rho C_H U_M + \rho C_H U_M \Delta \quad (8)$$

2) 水温の日平均値 T_{WM} とレスポンス時間 τ_0

源流点 $l_x = 0$ における水温を T_0 , 水塊の平均流速を V , 水塊が源流点を出てからの経過時間を $\tau (= l_x / V)$ とすれば, 河床温度の日平均値 $T_{GM} (= T_{WM}$: 水温の日平均)は次式で表される。

$$(T_{GM} - T_0) = (T^* - T_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right] \quad (9)$$

ただし

$$\tau_0 = \frac{C_w \rho_w d_w}{\mu} \quad (10)$$

水温のレスポンス時間 τ_0 は水深 d_w に比例する。式(9)によれば, 日平均値 T_{GM} は時間 τ とともに変化し, 最終的に T^* に近づく。図-13の一点鎖線で T_{GM} が示されており, $\tau \rightarrow \infty$ の T_{GM} が T^* である。

3) 気象条件

仙台市の広瀬川については仙台と新川の2地点のアメダスデータの平均値, 宮城県蔵王町の秋山沢川については宮城県川崎と白石の2地点のアメダスデータの平均値を気象条件として用いる。

まず, 雲の影響を表す係数 $B = S_M \downarrow / S_{Mf} \downarrow$ を計算する。ただし, $S_M \downarrow$ は日照時間から推定した日平均日射量(近藤, 1994, p. 89), $S_{Mf} \downarrow$ は快晴日の日平均日射量の計算値である(近藤, 1994, p. 88)。そうし

て各瞬間の日射量は次式から計算する。

$$S \downarrow = B \times S_f \downarrow \quad (11)$$

ただし $S_f \downarrow$ は快晴時の全天日射量の時刻 t における瞬間値である(近藤, 1994, p. 87)。

下向き長波放射量 $L \downarrow$ (1日中一定の仮定)は, 快晴日の下向き長波放射量の日平均値 $L_{Mf} \downarrow$ (計算値)と上記の B を用いて計算する(近藤, 1994, p. 90)。

樹林による遮蔽の係数 f_{FOREST} を用いると, 入力放射量は次式で表される。

$$R \downarrow = (1 - f_{FOREST})(1 - \text{ref}_w) S \downarrow + f_{FOREST} \sigma T^4 + (1 - f_{FOREST}) \varepsilon L \downarrow \quad (12)$$

アメダスにおける最高・最低気温の観測値を T_{max} , T_{min} としたとき, 気温の日変化は次式で与える。

$$T = T_M + B_1 \cos(\omega t - \alpha_1) + B_2 \cos(2\omega t - \alpha_2) \quad (13)$$

$$B_1 = -(T_{max} - T_{min}) / 2.09$$

$$B_2 = -0.2 B_1$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.785 \text{ rad}$$

上式の日平均気温 T_M については, 秋山沢川の最高・最低水温の計算では $T_M = (T_{max} + T_{min}) / 2$ とし, それ以外ではアメダスの日平均気温を用いる。

風速の日変化は, 日平均風速の観測値を U_M としたとき, 次式で与える。

$$U = [U_M - 0.5 U_M \cos(\omega t - \alpha_1)] (1 - f_{FOREST}) \quad (14)$$

ただし $\alpha_1 = 0.785 \text{ rad}$ (風速は15時に最大)。 $U_M < 0.5 \text{ ms}^{-1}$ の日は $U_M = 0.5 \text{ ms}^{-1}$, また, $U < 0.5 \text{ ms}^{-1}$ となれば $U = 0.5 \text{ ms}^{-1}$ と修正する。

水面の顕熱輸送の交換速度 $C_H U$ は, 近藤(1994, p. 172)を参考にして次式で与える。

$$C_H U = (C_H U)_{U=0} + 0.00566 (U^{0.8} / X^{0.2}) \quad (15)$$

$$(C_H U)_{U=0} = 0.001 \text{ ms}^{-1}$$

$$X = 3 \times l_Y \text{ とする}$$

水温が高くなったときは, 自然対流を考慮し, 次式で与える(近藤, 1994, p. 171)。

$$C_H U = 0.0012 \{ T_w - T + 0.11 [e_{SAT}(T_w) - e] \}^{1/3} \quad (16)$$

単位は, e : 水蒸気圧(hPa), $e_{SAT}(T_w)$: 水温 T_w に対する飽和水蒸気圧(hPa)である。式(15)と(16)の大きい方を各時刻の $C_H U$ として用いる。

式(15)は平坦地を流れる河川の水面に対するものである。改修前の秋山沢川は, 岩間の段々でしぶきを上げて流れていたのので, 係数をかけた $C_H \times f_{CHU}$ ($f_{CHU} = 6$)を交換速度として用いる。

比湿はアメダスでは観測されていないので、仙台管区気象台における日平均水蒸気圧を用い、1日中一定と仮定する。

IV. 計算に用いる数値

計算の時間ステップとして、 $d\tau=600s$ を用いるが、固定点における水温の感度計算(表-3, 表-4)では $d\tau=60s$ を用いる。

1. 秋山沢川の日々の最高・最低水温の計算

源流点から谷井養魚場(図-1参照)までの距離を $l_x=2000m$ とし、河川の平均水深 d_w と平均流速 V を与えると、各時刻の水温が計算できる(近藤, 1995)。 $l_x=2000m$ 地点では、毎日14時に最高水温が、5時(=14+15時)に最低水温が起きるとし、それらの時刻の $\tau=l_x/V$ の時間前に源流点を出発した水塊の温度変化を計算する。計算に必要な河川の条件を表-1に示した。上流では水は3筋にもなっている場所もあるので、表に示した流水面の幅 l_y は水面部分の幅の合計であり、その $l_x=0\sim 2000m$ 区間の平均値である。

前報で示したように、経過時間 $\tau(=l_x/V)$ の小さい範囲では夜間の水温変化は $\pm 1^\circ C$ 程度であることから、源流水温 T_0 は次のように仮定する。養魚場における最低水温の観測値を $T_{w,min}(obs)$ として、

$$1992\sim 1994年: T_0 = T_{w,min}(obs) \quad (17)$$

河川の改修前の秋山沢川に対しては、顕熱輸送の交換速度にかかる係数は $f_{CHU}=6$ 、正午前後の日射量の樹林による遮蔽の係数 $f_{FOREST}=0.3$ とみなして計算した。 $f_{CHU}=6$ と大きいいため、夜間でも $l_x=0\sim 2000m$ 区間における水温上昇は夏期には $2^\circ C$ 程度と見込まれるので、次のように仮定した。

$$1987年: T_0 = T_{w,min}(obs) - 2^\circ C \quad (18)$$

蔵王町北原尾には出口川という小川がある。この小川はV字形の地形を流れ、樹木等により日当たりがほとんどなく、秋山沢川で定義した源流点の上流に相当する。出口川の水を利用した別の谷井養魚場において測定した夏期の水温日較差は $2^\circ C$ 程度であることから、秋山沢川の源流水温は日変化がないと仮定して以後の計算を行なう。

2. 河川の流れに沿う水温分布の計算

源流点を出発した水塊の水温が経過時間 τ とともにどのように変化するかを計算する。この計算に必要な気象と河川の条件を表-2に示した。広瀬川で

表-1 秋山沢川の夏期における平均状況

年	1987 改修前	1992 平年	1993 冷夏	1994 暑夏
d_w (m)	0.2	0.1	0.15	0.08
V (ms ⁻¹)	0.45	0.4	0.45	0.4
l_x (km)	2	2	2	2
f_{CHU}	6	1	1	1
f_{FOREST}	0.3	0	0	0
Q (m ³ s ⁻¹)	0.63	0.64	1.29	0.48
l_y (m)	7	16	19	15

表-2 水温観測日の気象と河川の条件。 $T^* \sim S_M \downarrow / S_{Mf} \downarrow$ は計算から出てくる数値である。*印は縦断観測中のアスマン乾湿計による観測の平均値。

項 目	縦 断 観 測			水温日変化	
場 所	広瀬川	秋山沢川	秋山沢川	宮沢橋下	宮沢橋下
月	7	7	10	7	7
日	18, 19, 24, 25	29	8	25	26
day	202	210	281	206	207
T (°C)	—	24.7*	16.9*	—	—
T_M (°C)	23.4	—	—	24.3	25.0
T_{max} (°C)	27.2	—	—	29.5	29.5
T_{min} (°C)	20.9	—	—	21.1	21.4
e (hpa)	25.6	22.7*	15.1*	27.0	27.8
U_M (ms ⁻¹)	1.9	1.1	2.0	2.0	1.7
N (hr)	2.2	3.5	0.5	2.8	4.9
T_o (°C)	15.8	16.8	11.5	15.8	15.8
d_w (m)	0.2	0.08	0.15	0.17	0.17
V (ms ⁻¹)	0.33	0.4	0.45	0.12	0.12
l_x (km)	0~37	0~3	0~3	36	36
Q (m ³ s ⁻¹)	1.0	0.48	1.29	1.0	1.0
l_y (m)	15	15	19	50	50
T^* (°C)	26.0	27.2	16.8	27.5	29.4
δT^* (°C)	2.26	3.58	1.28	2.77	3.27
τ_o (hr)	7.90	3.95	7.33	7.40	7.82
$S_M \downarrow$ (Wm ⁻²)	148	170	80	158	193
$S_M \downarrow / S_{Mf} \downarrow$	0.49	0.56	0.42	0.53	0.64

は気象条件がほぼ等しい、1994年7月の19, 24~25日に観測したので、18日も含めた4日間の平均気象条件を用いる。

3. 固定点における水温日変化の計算

広瀬川の宮沢橋のすぐ下流の地点($l_x=36km$, 標高=15m, 図-2のLの下流の黒丸印)で1994年7月25

日～26日に水温の日変化を観測した。この場所の河川の水流量は $l_r=50\text{m}$ である。その下流には堰が設けられ河床はほぼ一様に平らにされており、水深 $d_w=0.17\text{m}$ である。観測により河川の流量 $Q=1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ とした。その他の条件は表-2の最後の2列に示してある。この地点は τ/τ_0 が十分に大きく、平衡水温の状態に近いと見なされるので、 $\tau=36\sim72\text{hr}$ までの範囲を計算し図-14に示す。

V. 計算と観測の比較

1. 秋山沢川の日々の最高・最低水温

1) 1992年の秋山沢川

図-4の上段は日照時間から計算した日平均日射量、中段は降水量、下段は最高水温の観測値(プロット)と計算値(実線)であり、6月1日～8月31日までの92日間を示している。最高水温の計算値はほぼ観測値を再現している。

図-4 秋山沢川における1992年6月1日～8月31日までの日々変化。
(上)日照時間から計算した日平均日射量
(中)降水量
(下)丸印：最高水温の観測値、実線：計算値

最高水温の計算誤差は次のことによって説明できる。すなわち、この計算では、気象条件として一定の日変化パターンを与えているので、源流点を水塊が発見して $\tau(1.2\sim1.4\text{時間})$ の短時間内に、たとえば晴天日なら太陽が雲に隠れるとか、曇天日なら太陽が照るなどの変化があると、実際の水温は計算値と違ったものになる。さらに、河川条件を3か月間一定と設定していることも誤差の原因となる。50mm以上の降雨日のあとで、最高水温の観測値が計算値より低くなっているのは、増水によって水深 d_w が設定値より大きくなったためと考えられる。前報で示したように、 τ の小さい範囲では、水温は流量 Q の関数となり、水温に及ぼす流速の変化は水深の変化と同等であるので、ここではこれらの一方のみを考えればよい。

図-5 水温の観測値(横軸)と計算値(縦軸)の比較
(上)最高水温、(下)最低水温

図一六 図一四に同じ、ただし1993年。

図一五は最高水温と最低水温について、観測値(横軸)と計算値(縦軸)の比較である。下段の図で最低水温が一对一の直線上に並んでいることは、式(17)の仮定がほぼ正しかったことを意味している。

2) 1993年(冷夏多雨年)の秋山沢川

図一六と図一七は1993年についての同様な関係である。8月28日(day=240)の最高水温の計算値は観測値より4°Cも高くずれている。これは前日に125mmの大雨があり、増水したためである。将来、新バケツモデル(近藤, 1993)を併用して、日々の流量も求めるようにすれば、計算は改善されるであろう。

1993年は降雨日が多く、低温であったため、最高水温は20°Cを超えることはなかった。

3) 1994年(暑夏少雨年)の秋山沢川

図一八と図一九は1994年についての同様な関係である。夏の終わりの8月19日~24日(day=231~236)の連続降雨日を除くと、晴天の異常高温日が続き、水深は浅くなり、水温は上昇した。7月15日(day=196)には、快晴で水温が異常に上昇し、養魚場(図

図一七 図一五に同じ、ただし1993年。

一参照)ではギンザケの稚魚15万匹が大量に死亡した。また8月7日(day=219)の快晴日には残っていたニジマスが死亡全滅した。このような異常昇温はこの養魚場を開いてこの18年間、初めてのことであった。

他の年と比べて気付くことは、1994年の図一九の上段で観測値と計算値の間でバラツキが大きいことである。この年は河川の水深が浅かったために、水深の僅かな変動と、一日内の気象の変動が水温に敏感に影響したものと考えられる。もう一つ気付くことは、同図下段において、最低水温の計算値が観測値に比べて1°C程度高いことである。これは、源流水温は最低水温の観測値よりも1°C低温であったと考えられ、早朝の養魚場にくるまでの間に大気からの顕熱・潜熱の供給によって1992年や1993年よりも

図－8 図－4に同じ、ただし1994年。

余分に昇温したとみればよい。
冷夏年と暑夏年といった気候の違いと、それによって起こる水深の違いが水温に及ぼす影響については、第VI章で具体的に議論する。

2. 河川改修前(1987年)の最高・最低水温
河川の改修前の結果を図－10と図－11に示した。1987年の最高水温の上昇量は、異常冷夏の1993年のそれにほぼ等しいことがわかる。改修後の平年の気候条件と見なされる1992年と比べると、改修前の最高水温は低いことが理解できる。

3. 河川の流に沿う水温分布
1) 秋山沢川
図－12の上段は1994年7月29日の正午以後、秋山沢川で行った水温の縦断観測(プロット)と計算(実線)の比較である。各図の上側の目盛りは源流点からの距離*l_x*で、観測値を見る座標である。各図の下側の目盛りは経過時間*τ*であり計算値を見る座標である。実際の河川の流速と水深は一定ではなく*l_x*によって変化するので、厳密な意味では*l_x*と*τ*は一対一に對

図－9 図－5に同じ、ただし1994年。

応しないことに注意すべきであるが、観測値と計算値はよく対応している。
観測値と計算値の違いは、水塊が流れている途中で気象条件と水深・流速が変化することによって生じる。これを感度計算で調べた。表－3の第1列目に示す標準条件がそれぞれ単独に第2列目に示すぶんどけ変化したとき、*l_x* = 2 kmおよび*l_x* = 3 kmの地点における水温の変化を第3、4列目に示した。この感度計算を参照すれば、図に現われた観測値と計算値の違いは各条件の変動によって生じることが理解できる。
図－12の下段は1994年10月8日正午以後に行った同様な観測と計算の比較である。両者の違いは±1℃以内であり、気象と河川条件の変動から起こりうる誤差の範囲内で一致している。

図-10 図-4に同じ、ただし1987年.

図-12 秋山沢川における水温の縦断観測（プロット）と計算値（実線）の比較。
(上)1994年7月29日, (下)1994年10月8日

図-11 図-5に同じ、ただし1987年.

表-3 秋山沢川の水温の感度計算(1994年7月29日). 標準条件のときの水温は $l_x = 2$ kmの地点で 23.38°C , $l_x = 3$ kmの地点で 25.51°C であり, この温度との差を右2列にそれぞれ示した.

標準条件	条件の変化	水温の変化($^\circ\text{C}$) $l_x=2$ km $l_x=3$ km	
気温 $T=24.7^\circ\text{C}$	$+1^\circ\text{C}$	+0.13	+0.18
蒸気圧 $e=22.7$ hpa	$+1$ hpa	+0.12	+0.17
日照時間 $N=3.5$ hr	$+1$ hr	+0.48	+0.63
風速 $U_M=1.1$ ms $^{-1}$	$+1$ ms $^{-1}$	-0.01	-0.29
係数 $f_{CHU}=1$	$+1$	-0.01	-0.52
水深 $d_w=0.08$ m	$+0.01$ m	-0.59	-0.66
流速 $V=0.4$ ms $^{-1}$	$+0.05$ ms $^{-1}$	-0.56	-0.62

2) 広瀬川

図-13は広瀬川における1994年の水温の縦断観測(丸印: 7月19日午後, 三角印: 7月24日~25日の日中~夜間, 四角印: 7月25日午後)と計算(実線)の比較である。源流点を水塊が3時間ごとに出発した場合を8本の実線で示してある。

丸印と四角印は午後の観測であり, 日平均水温の計算値(一点鎖線)の上のほうにプロットされているのに対し, 三角印は昼夜にわたる観測であり, 一点鎖線の上にプロットされていることは納得できる。

4. 固定点における水温日変化

図-14のプロットは1994年7月25日14時50分~26日18時($t=38.8\sim66\text{hr}$)に観測した水温である。下側の実線は7月25日の気象条件を, 上側の実線は26日の気象条件を用いて計算した水温の日変化である。この2本の実線の差は, 主として日射量の違い35 Wm^{-2} によるもので, 表-2を参照すると, 25日の平均日射量=158 Wm^{-2} , 26日の平均日射量=193 Wm^{-2} である(ただし仙台と新川のアメダスの平均日照時間から計算)。

この両日は晴れたりくもったりの天気であったことを考慮すると, 計算値は観測値とよく対応している。ちなみに $t=55\sim61\text{hr}$ は晴れており, $t=62\sim66\text{hr}$ は雲がでてきた。

VI. 議 論

1. 河川条件の影響

渇水の1994年夏は秋山沢川と広瀬川とも, 流量(=水深×流速×流水の幅)は測定しやすい場所における実測によって得たものである。また多雨年の1993年の秋山沢川についての流量は, 1994年10月8日(豊水状態)における実測値に等しいとした値である。しかし水深, 流速, 流水の幅の流路平均値は誤差を含んでいるため, 最高水温の計算値が観測値に合うように多少の調整を行ない, かつ, 流量の実測値と矛盾しないように設定した。そこで, このように設定した水深・流速が水温の計算値にどの程度の誤差を生むかを検討しよう。

水温は気象条件(日射量, 気温, 比湿, 風速)と河川条件(水深と流速)の両方の関数である。

図-15と図-16の実線とプロットは, それぞれ図-6と図-8に示したものと同じである。1993年は冷夏多雨年, 1994年は暑夏少雨年であった。仮に1993

図-13 広瀬川における水温の縦断観測(丸印: 1994年7月19日の午後, 三角印: 7月24~25日の日中~夜間, 四角印: 7月25日午後)と計算値(8本の曲線)の比較。

図-14 広瀬川の宮沢橋の下流で観測した水温の日変化(プロット)と計算値(2本の実線)の比較。

年が1994年と同じ水深・流速であったとした場合の計算値を図-15に点線で示した。水深・流速だけの違いが実線と点線の差である。水深・流速を大きく変更しても, 1993年の最高水温は2~4℃程度しか高くない。図-15(1993年)の点線と図-16(1994年)の実線の差が気象条件だけの違いから生じたものとみなしてよい。

逆に1994年が1993年と同じ水深・流速であったとした場合を図-16に点線で示した。この点線上に, 降雨後の水深・流速が増加したとみなされる日の最高水温のプロットがのっている。しかし, 水深・流速が大きかったとしても, 1994年の最高水温は1993年の最高水温よりも全般的に高いことがわかる。この図における実線と点線の差は3~5℃程度となり

図-15 秋山沢川の最高水温。

丸印：1993年の観測値、実線：1993年の条件の計算値、点線：水深と流速のみ1994年の条件としたときの計算値

図-16 秋山沢川の最高水温。

丸印：1994年の観測値、実線：1994年の条件の計算値、点線：水深と流速のみ1993年の条件としたときの計算値

1993年における差よりも大きい。これは1994年のほうが日射量が多く、最高水温と最低水温の差を大きくしたことによる。つまり、水温は晴天日ほど水深・流速に敏感になるのである。

要約すると、1993年は多雨で水深が深くなったことと、気温が低くかつ日射量が小さかったことの両方で最高水温はあまり上昇しなかった。一方、1994年は少雨で水深が浅くなったことと、気温が高かつ日射量が大きかったことの両方で最高水温が異常に上昇した。

2. 河川改修の影響

河川改修の影響として次の3つが考えられる。

(a) 樹林伐採による日射遮蔽の係数 f_{FOREST} の減少

(b) 河床の平坦化による顕熱の交換速度にかかる係数 f_{CHU} の減少

(c) 河道拡幅による水深 d_w と流速 V の減少

夏期の条件($T^* < T$)では、(a)(c)は最高水温を上昇させ、(b)は下降させるように作用する。(a)については図-14の2本の実線の違い、あるいは秋山沢川の晴天日、曇天日の日々の最高水温の変化の幅で理解できる(図-4, 6, 8)。(b)については、源流域で起こりうる問題であり、図-3の実線($f_{CHU}=6$ の場合)と点線($f_{CHU}=1$ の場合)の差から理解できる。一般的には、 $C_H U$ の替わりに $C_H U \times f_{CHU}$ を用いることは、風速を大きくしたことと同等で、風速の強い日の水温は日平均値、振幅ともに小さくなる。(c)については図-15と図-16の実線と点線の比較で見た通りである。

秋山沢川の水を利用した養魚場でギンザケが大量死した、1994年7月15日(day=196)の快晴日を例として、(a)(b)(c)の効果を具体的に調べることにしよう。この日の条件は、 $T_{min}=20.3^\circ\text{C}$, $T_{max}=34.0^\circ\text{C}$, $e=26.2\text{hPa}$, $U_M=0.8\text{ms}^{-1}$, $N=12\text{hr}$ である。 $T_0=16.8^\circ\text{C}$ とし次の順序で河川を改修したとした場合を計算し表-4に示した。ただし、流量は変化せず $Q=0.48\text{m}^3\text{s}^{-1}$ (1994年夏の流量)とする。河道の幅 l_Y は流水面の幅である。

(注： $l_Y=5.3\text{m}$ は表-1の7mと異なる。しかし5.3mと7mの違いが結果に生じる差は、式(8)の右辺 $X(=3 \times l_Y)$ を通してのものであり、 0.1°C 以下である。)

- (1) 改修前： $l_Y=5.3\text{m}$, $f_{FOREST}=0.3$, $f_{CHU}=6$,
 $d_w=0.2\text{m}$, $V=0.45\text{ms}^{-1}$
- (2) 樹林伐採：まず $f_{FOREST}=0.3 \rightarrow 0$
- (3) 河床平坦化：さらに $f_{CHU}=6 \rightarrow 1$
- (4) 河道拡幅：さらに $l_Y=5.3\text{m} \rightarrow 15\text{m}$,
したがって $d_w=0.2\text{m} \rightarrow 0.08\text{m}$,
 $V=0.45\text{ms}^{-1} \rightarrow 0.4\text{ms}^{-1}$

表-4によれば、快晴日には、(4)河道拡幅の影響がもっとも大きく、最高水温を高くする。しかし曇天日は影響が小さい。注目すべきは、岩間の段々の流れを平坦化すると顕熱・潜熱の交換が小さくなるため、快晴日も曇天日もともに水温が低下する。改修後の快晴日の最高水温は改修前に比べて $5.9^\circ\text{C}(=28.2-22.3)$ 上昇したことになる。(注：この例は、気温の高い夏期についての結果であり、気温の低い冬期には河床の平坦化は逆に水温を上昇させ、河道拡幅は水温を下降させることになる。)

表一4 河川改修と水温(°C)。ただし1994年7月15日、 $l_x = 2$ kmの地点

天 気	快晴($N=12$ hr)		曇天($N=0$ hr)	
水 温	最低	最高	最低	最高
(1)改修前	18.1	22.3	18.3	20.4
(2)樹木伐採	18.1	23.1	18.3	20.5
(3)河床平坦化	17.0	21.4	17.3	18.3
(4)河道拡幅	17.4	28.2	18.0	20.5
観測値	17.4	28.1	—	—

VII. ま と め

前報(近藤, 1995)で示した河川水温の計算モデルが観測によって検証された。

- (1) アメダスデータを使って計算した秋山沢川の日々の最高水温は、標準偏差 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の誤差で観測結果と一致する。
- (2) 河川水深が浅く(または流速が小さく)、日射量が多く、気温が高く、水蒸気が多いほど、最高水温は高くなる。
- (3) 特に水深が浅いときの水温は、水深の僅かな変動と、一日内の気象の変動が水温に敏感に影響する。
- (4) 河床の平坦化による顕熱・潜熱輸送量の減少は、夏期の最高水温を 2°C 程度低くする。
- (5) 河川改修として、河道の拡幅(従って水深が浅くなること)が水温にもっとも大きな影響を与える。
- (6) 1994年の水温の異常上昇は、降雨が少なくて水深が浅くなったことと、日射が強く異常暑夏であったことの両方で生じたものである。
- (7) 秋山沢川の改修後の最高水温は、 $l_x = 2$ kmの地点で渇水年の夏の高温快晴日には、改修前に比べて 5.9°C 高くなったと見積もることができた(表一4)。
- (8) 秋山沢川および広瀬川における水温の縦断観測、ならびに固定点における水温日変化の観測とも、モデル計算をよく検証できた。
- (9) 源流域の自然河川で見られる河床の著しい起伏・段状構造は水面と大気間の顕熱・潜熱交換量を大きくする。この効果を表すファクターとして $f_{chu} = 6$ が求められた。ほぼ平坦な河床となる中流域において $f_{chu} = 2 \sim 3$ の可能性もあるが、観測精度からして、この正確な値の見積もりは困難である。 $f_{chu} = 2 \sim 3$ 程度なら水温の計算結果に最大 1°C

程度しか差違は生じない。本論文では、1987年の秋山沢川以外ではすべて $f_{chu} = 1$ として計算した。

(10) 今後、新バケツモデルによって地中の貯留水量と河川流量(つまり水深と流速)の日々変化を計算すれば、水温の予測精度は向上すると考えられる。この場合には精度もあがるので、源流水温の日変化($\pm 1^\circ\text{C}$ 程度)も考慮しなければならない。

研究結果からの提言：

改修後の秋山沢川は、河床面のかなりの部分がコンクリートで覆われ左右方向に平らにされている。このような改修は各地の小河川で見られる。しかし、自然河川に見られるように河床面が左右方向に僅かな傾斜をもち、渇水時にも深い流水の部分が残る、その平均水深が 0.15m 以下にならなかったとすれば、夏の晴天日における最高水温の上昇は約 5°C も低く抑えられていたことになる(図一16)。これはまた、蒸発による水の損失の抑制にもつながる。水温の異常上昇と魚の大量死事件を契機として始めた本研究の結果が、今後の河川改修の参考になれば幸いである。

謝辞

気象データの入手に際して仙台管区気象台調査課の皆さんにご協力をいただいた。また、宮城県大河原土木事務所建設第二課の小野守男係長には秋山沢川の図面等を見せていただいた。ここに謝意を表します。

(追記)本研究がほぼまとまった段階で、筆者らは結果を宮城県の担当者に渡し、さらに後日の1994年11月22日、日本気象学会東北支部講演会において公表した。11月24日の新聞には、「宮城県河川課は、渇水時にも水深を保てるように、環境に配慮した形で秋山沢川の再改修の方針を固めた」と報じられた。われわれの研究結果が活かされたことは意義深いことである。

参 考 文 献

- 近藤純正, 1993: 表層土壌水分量予測用の簡単な新バケツモデル。水文・水資源学会誌, 6(4), pp. 344-349.
- 近藤純正(編著), 1994: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支。朝倉書店, pp. 348.
- 近藤純正, 1995: 河川水温の日変化(1)計算モデル。水文・水資源学会誌, 8(2), 184-196
- (受付: 1994年10月29日, 受理: 1994年12月20日)