

VII - 8

河川での熱収支と水質の日周変動に関する基礎研究

○東北大学 学生員 松本浩一
東北大学 正 員 後藤光亀
東北大学 正 員 大村達夫

1. はじめに

近年、都市の中小河川では多自然型工法など親水と生態系を意識した河川改修が見受けられる。しかし、川幅、水深、流量や並木等の植生による日陰の有無を考慮して河川の水温や水質をモデル化する試みはなされていない。本研究の最終目的は、河川改修工事に伴う環境変化が河川の水温及びDOへ及ぼす影響を評価するモデルを構築することである。本報では、まず都市河川での水温及びDOの日周変化の調査結果について考察を加えた。更に、河川水温予測モデルを提案し、熱収支について検証を行った。

2. 河川水温及び水質の日周変化調査

1996年11月7日から8日にかけて策川（宮城県仙台市太白区富沢付近）において水温と水質の日周変化調査を行った。対象区間は550mで区間内において流入及び流出はない。断面形状はコンクリート護岸の2面張りである。当日の流量は1日を通して0.11m³/sでほぼ一定であり、川幅B、水深h、流速Vは0m～400mの区間でB=7m、h=15cm、V=0.08m/s程度、400～550mの区間でB=2m、h=30cm、V=0.15m/s程度であった。測定項目は上流0m地点で水温、DO、日射量、気温、比湿、風速、下流550m地点で水温、DOとした。

気象データ、水温、DOの日周変化を図1に示す。550m地点での水温の振幅が0m地点の振幅に比べて1℃程大きくなっている。0～7時及び13～24時には流下に従い水温が減少し、7～13時には上昇している。DOについては、夜間は550m地点の方が0m地点に比べ0.2～0.5mg/l低く、日中では最大1.5mg/l程高くなった。夜間では再曝気による酸素の溶け込みよりも微生物の呼吸分解による消費が若干上回っていると推察される。日中においては水温の上昇によって再曝気、増殖、呼吸、光合成の影響が大きくなるが、当河川では河床に付着性藻類が観察されており、無機栄養塩類も光合成阻害にならない量が測定されている(DT-N=1.7～2.1mg/l、DT-P=0.1～0.16mg/l)ので、日中の上下流でのDOの差は付着性藻類による影響が大きく現れたものと言える。

3. 水温モデル式

水温の予測式(1)は流下方向1次元の河川に対し、川幅B、水深h、間隔dxの水塊BOXへの熱エネルギー収支式で表したものである。この式では、浅い水深の河川で観測される河床での反射日射量の分を考慮し、日射エネルギーの河川水と河床部への分配を河床面の日射反射率 ref_B を導入することで決定している。なお河床面以深の温度変化は熱伝導方程式によって計算する。

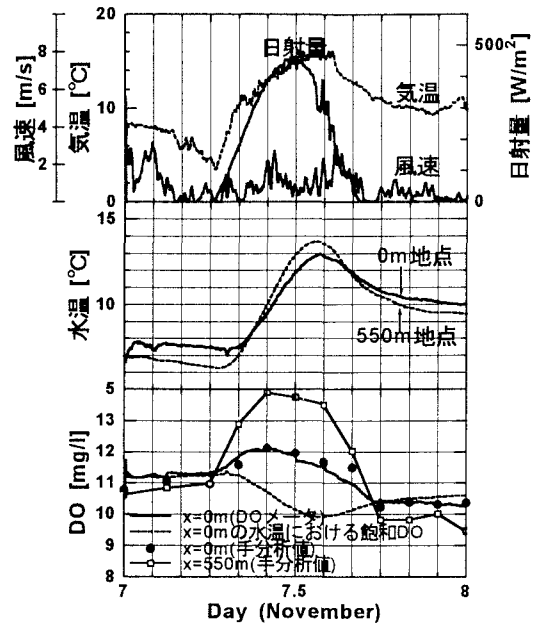


図1 策川観測データ

$$c_w \rho_w (B h dx) dT_w = B dx (S_1 + S_2 + L \downarrow - L \uparrow - H - IE) + B dx \{ (1 - ref_B) S_B - G_S \} + c_w \rho_w (Q_{in} T_{min} - Q_{out} T_{wout}) \quad [J/s] \quad (1)$$

$$G_S = \int_h^d c_g \rho_g \frac{dT_g}{dz} dz \quad [W/m^2] \quad (2)$$

ここで、 S_1 : 日射が河床に到達するまでに水塊に吸収される量 $[W/m^2]$ 、 S_2 : 河床反射日射が大気側へ射出されるまでに吸収される量 $[W/m^2]$ 、 $L \downarrow$: 大気放射量 $[W/m^2]$ 、 $L \uparrow$: 長波逆放射量 $[W/m^2]$ 、 H : 潜熱 $[W/m^2]$ 、 IE : 水表面での顕熱 $[W/m^2]$ 、 G_S : 河床部の貯熱量変化 $[W/m^2]$ 、 ref_w : 水面の日射反射率、 ref_B : 河床面の日射反射率、 T_r : 日射の減衰率、 S_B : 河床面到達日射量 $[W/m^2]$ 、 $(1 - ref_B) S_B$: 河床面吸収日射量 $[W/m^2]$ 、 $c_w \rho_w$: 水の熱容量 $[J/m^3/K]$ 、 $c_g \rho_g$: 河床部の熱容量 $[J/m^3/K]$ 、 z : 水面から鉛直下向きにとった座標 $[m]$ 、 d : 河床温度の日変化が無視できる深さ $[m]$ 、 T_w : 水温 $[K]$ 、 T_a : 気温 $[K]$ 、 T_g : 河床温度 $[K]$ 、 V : 流速 $[m/s]$ 、 $Q_{in,out}$: 各々水塊BOXに入るあるいは出ていく流量 $[m^3/s]$ 、 $T_{w,in,out}$: 各々水塊BOXに入るあるいは出ていく水の温度 $[°C]$ である。

4. 水温モデルの検証の結果及び考察

式(1)において移流項を省き鉛直1次元の熱フラックス収支式に変形すると次式ようになる。

$$G_w = S_1 + S_2 + L \downarrow - L \uparrow - H - IE + (1 - ref_B) S_B - G_S \quad [W/m^2] \quad (3)$$

ここで、 G_w は水塊の貯熱量変化である。熱フラックスの符号は、鉛直下向きを正とする。一方、水表面上での反射

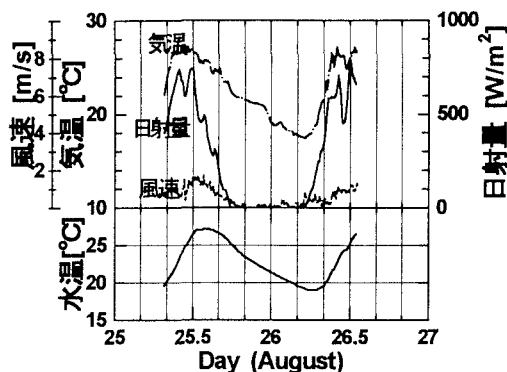


図2 気象データと水温

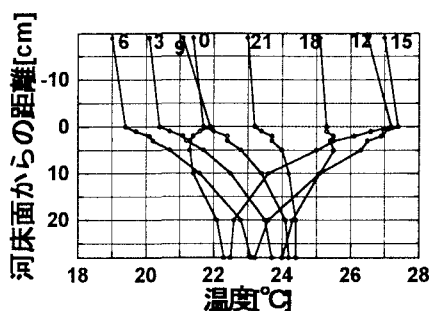


図3 温度鉛直分布(添字は時刻)

日射量を $S \uparrow$ とすると水表面での熱フラックス収支式は次式で表される。

$$G_w = (1 - \text{ref}_w) S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow - H - IE - G_s \quad [W/m^2] \quad (4)$$

また、 G_w は次式で定義される。

$$G_w = \int_0^z c_w \rho_w \frac{dT_w}{dz} dz \quad [W/m^2] \quad (5)$$

水温モデルの妥当性の検証の1つとしてこの熱フラックス収支式について、移流のない次元の熱収支実験装置を用いて検証を行った。実験装置は厚さ30cmのコンクリート製の河床部と水深20cmの水塊部からなり、側面及び河床部底面は発泡スチロールによって断熱した。測定項目は日射量、風速、気温、比湿、水表面上での反射日射量、水表面温度、河床温度分布である。図2に実験当日1996年8月25日～26日の気象データ及び水表面温度を、図3に水温及び河床温度の鉛直分布を示す。

熱フラックス収支式(3)～(5)による計算結果を図4に示す。式(3)と式(4)の右辺の違いは日射の吸収に関する項だけであり、夜間については等しくなる。式(3)の両辺の差は夜間で $\pm 50 W/m^2$ 程度で、日中は G_w の方が最大時で $200 W/m^2$ 小さくなっているが、全体の傾向は表している。これは G_w の計算に用いる水温変化量は水表面温度をもって深さ方向に一様としたので、この点については今後の検討を要する。

図4の上段と中段のグラフは式(3)の右辺の各項についてプロットしたものである。上段の $(1 - \text{ref}_w) S \downarrow - G_s$ は河床面から水塊に向かう顕熱量であり、河床面吸収日射量と河床部の貯熱量変化の差で表される。 $S_1 + S_2 + L \downarrow - L \uparrow$ は水塊へ

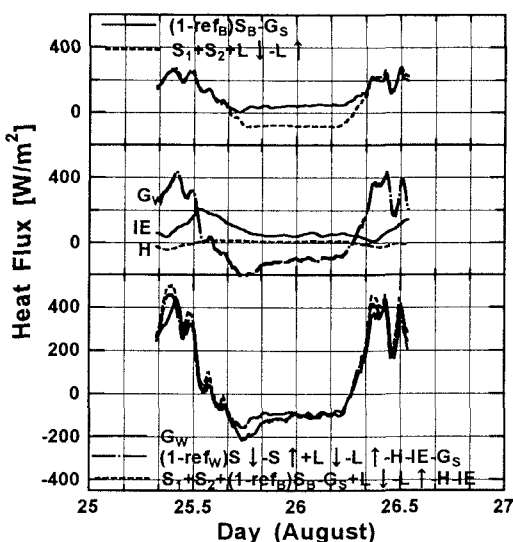


図4 モデルによる熱収支

吸収される日射量と長波放射の収支量の和である。夜間の熱収支は河床からの伝導熱によって水塊へ $50 W/m^2$ 程度の熱が供給されるものの、それを上回る $-100 W/m^2$ の放射冷却及び若干の潜熱、顕熱によって水温は低下する。日中の熱収支は日射量の増加に伴い、水塊への吸収量 $S_1 + S_2$ 及び河床到達日射量 S_B が大きくなり、それぞれ符号が負のフラックスである長波放射収支量 $L \downarrow - L \uparrow$ 、河床伝熱量 $-G_s$ 、潜熱 IE 、顕熱 H の総和を上回ると水温が上昇していく。

笹川の水温は次のように説明できる。水塊をラグランジェ的に見た場合、夜間の水塊の熱収支に寄与するのは河床伝熱量、長波放射収支量、潜熱、顕熱である。調査日は11月上旬で放射冷却が顕著であるため、流下するにつれ水温は減少していく。6時頃日が昇り、1時間後には水温が上昇し始める。以後日射の寄与の大きい13時頃までは、流下するにつれ水温は上昇し、12時を過ぎると日射量は減少していく。

また、河床の日射反射率 ref_w は水表面上での反射日射量 $S \uparrow$ の実測から次の式で算出される。

$$\text{ref}_w = \frac{S \uparrow - \text{ref}_w S \downarrow}{S_B - T_r} \quad (6)$$

この実験系において算出された ref_w は、太陽の南中時において約20%であった。

5. おわりに

11月上旬の笹川では、550mの流下距離で日中約1°Cの温度差及び1.5mg/lのDOの差を生じていた。今後本報で提案した水温予測モデル式を用いて、笹川の実測値による検証及び川幅・水深を変えての感度解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 近藤 純正(1994), 水環境の気象学, 朝倉書店
- 2) 川島博之、鈴木基之(1984), 浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル, 化学工学論文集, 10, 475-481