

多摩川の水温変化の実態と形成要因に関する 研究

2013年

木内 豪

東京工業大学大学院総合理工学研究科 准教授

共同研究者：辛卓航 東京工業大学大学院博士課程

目 次

1. 序論

1. 1 研究の目的

1. 2 研究の概要

2. 多摩川の水温と水・熱収支の分析

2. 1 分析の対象域とデータ源

2. 2 分析の方法

2. 3 結果と考察

3. 多摩川の水温と水・熱収支の実態観測

3. 1 通年モニタリングの概要と結果

3. 2 集中観測の概要と分析結果

4. 結論

1. 序論

1. 1 研究の目的

河川水温は、水質と生態系健全性を支配する基本要素の一つであり、物理的・化学的・生物的な様々な過程に影響を及ぼす(Caissie, 2006)。河川における水生生物の地理的分布、成長率、再生産、生物相といった多くの観点にも影響する。ほとんどの水生生物、特に魚類は温度選好性を有しており(Billman et al., 2006)、もし水温が上限閾値を超えて上昇すれば、成長や再生産といった生物過程は低下したり、止まったりする(Eaton et al., 1995)。

河川水温に関しては、これまで、気候変動の影響に注目して多くの研究が行われており、気候変動が河川水温や総体としての熱環境（サーマルレジーム）を変化させ、最終的には魚類やほかの生物種に影響を及ぼすことが示されている(Magnuson et al., 1990; Mohseni et al., 2003; Rahel et al., 1996; Stefan et al., 1995)。一方、都市化はより直接的に河川の水温・熱環境に影響を及ぼすことから、人間活動が河川水温に及ぼす影響も着目されてきているが(Webb et al., 2008)、これまでは自然河川の様々な熱の取得と損失が検討され、都市が河川の水温だけでなく熱収支に及ぼす影響まで踏み込んで詳しく分析された事例はない。Kinouchi et al. (2007)は、東京において冬期から春先にかけて河川水温が $0.11\sim 0.21^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の割合で上昇していることを見い出すとともに、この上昇は都市の排水放流によるとしているが、熱収支の分析までは行っていない。本研究の対象である多摩川も、人口密度の極めて高い都市域を流れており、人間活動の影響が様々な形で多摩川に及んでいると考えられるものの、その実態把握や原因分析などはなされていない。そこで、本研究では、多摩川の水温・熱環境の実態を明らかにするとともに、都市域の人間活動がどの程度、そして、どのように、河川水温や熱収支に影響しているのか、また、自然的過程がどの程度、人工的な影響を緩和しているのか、等について理解を深めるための検討を行った。これにより、流域内外の人間活動が河川の水温・熱環境に及ぼす影響度合いをよりよく理解した上で、河川の環境管理や生物保全を行っていくことが可能になると考えられる。

1. 2 研究の概要

本研究では、多摩川の本川における水温を主たる研究の対象としている。まず、既存データを用いて、過去 20 年間（1990～2010 年）における多摩川本川の縦断区間（距離 50km 以上）の水温の時空間的变化の実態を冬期と夏期に分けて整理するとともに、河川水温に影響する要因を特定するため、河川流量や、下水処理場放流水の温度・水量、気温との関係について分析する。これらの分析によって、上流の貯水池からの放流の影響や、多摩川本川からの取水の影響、そして、下水処理水放流の影響について、考察を行う。また、2011 年 4 月～2013 年 3 月にわたって、河川水温や下水処理水の放流水温について独自の連続計測を行い、それらの実状を詳細に把握することにより、夏期における水温形成や水温の時空間変動に対する下水処理水の機能を明らかにする。加えて、各種の自然的要因や人為的要因が水温形成に及ぼす影響度合いを定量化するため、人為的影響の度合いが異なる多摩川本川のいくつかの区間を対象として、水収支と熱収支の分析を行い、熱収支の観点からの、水温形成にとって影響度合いの大きい要因を明らかにする。これによって、夏期と冬期において下水処理水の影響度合いが大きく異なることや、地下水涵養や支川流入といった自然的要因によっても水温が影響を受けていることを示す。

2. 多摩川の水温と水・熱収支の分析

2. 1 分析の対象域とデータ源

多摩川水系の本川を本研究の対象とした(図 2.1、表 2.1)。多摩川の流域面積は 1240km²で、上流は主に森林に覆われる一方、下流域は高度に都市化されている。流域の人口密度は 3400 人/km²と非常に高い。中下流の河川沿いには 8ヶ所に下水処理場が位置しており(表 2.2、図 2.2)、1990 年に処理人口率が 78%であったが、2010 年には 99%に上昇しており、その分、河川への処理水放流が増大していると見られる。また、河川水は何ヶ所かの堰で上水、農業用水、工業用水として取水されており、河川の水量に影響していると考えられる。このように、河川には様々な要因によって人工的影響が及んでいるものと考えられる。

多摩川本川における河川水温の経年的変化と水・熱収支を分析するため、河川水温・流量・下水処理水・気象条件に関する既存データを活用した。河川水温と流量は、それぞれ、11ヶ所(S1~S11)と9ヶ所(S1~S9)で測定されている(図 2.1、表 2.1)。これらのデータは、各月のある1日において水温で2~4回、流量で1回測定された結果で、1990~2010年のデータが国土交通省より入手可能である。下水処理水の情報、東京都下水道局より提供されたデータで、1990~2009年の月別放流量と1993~2009年の月平均放流水温の測定結果が含まれる。

多摩川の上流では、ダムからの放流水が河川水温に影響を及ぼすと考えられる。そこで、1990~1995年および2005~2010年の月平均ダム放流水温を東京都小河内ダム管理報告書から入手した。さらには、自然的な熱交換過程に関わる気象条件として、M1~M4における気温、全天日射量、日照時間、気圧、風速と相対湿度の時間データを気象庁から入手した(図 2.1、表 2.1)。

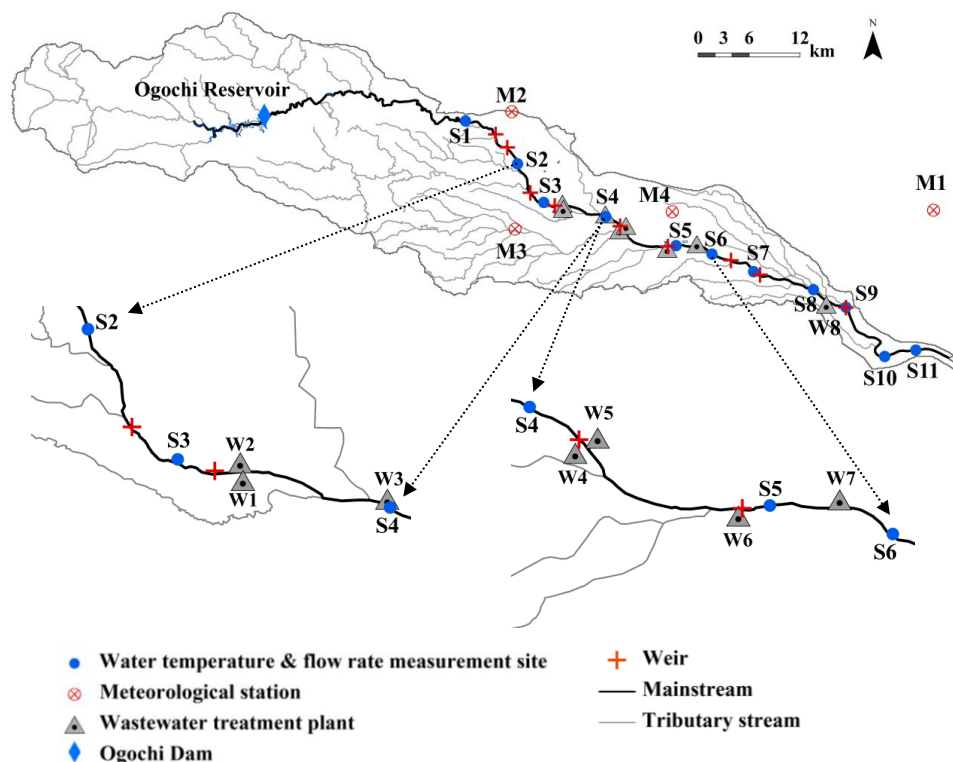


図 2.1 多摩川水系・本川・支川・小河内ダム・下水処理場・取水堰及び計測地点

表 2.1 地点記号と名称の対応関係

記号	名称	記号	名称	記号	名称
S1	調布橋	S6	多摩川原橋 (石原)	S11	大師橋
S2	永田橋	S7	多摩水道橋	M1	アメダス(東京)
S3	拝島橋	S8	二子橋	M2	アメダス(青梅)
S4	日野橋	S9	田園調布堰	M3	アメダス(八王子)
S5	是政橋	S10	六郷橋	M4	アメダス(府中)

表 2.2 多摩川本川沿いに位置する下水処理場 (水再生センター) の概要

記号	名称	下水道方式	放流量 ¹⁾ (千 m ³ /日)	処理人口 (人)	処理区内の人口普及率(%)
W1	八王子水再生センター	分流	105	333,220	98
W2	多摩川上流水再生センター	分流	167	466,152	99
W3	錦町下水処理場	合流	46 ²⁾	93,251 ³⁾	100
W4	浅川水再生センター	分流	78	250,258	96
W5	北多摩第二水再生センター	合流	44	140,608	100
W6	南多摩水再生センター	分流	111	369,091	99
W7	北多摩第一水再生センター	合流	185	497,556	100 (概成)
W8	等々力水処理センター	分流	300 ⁴⁾	570,000 ⁵⁾	99 ⁶⁾

- 1) 高度処理と高級処理の合計 (W3, W8 以外は 23 年度の実績)、2) 21 年度の実績
 3) 20 年度末、4) 現況処理能力 (矢上川を含む)、5) 計画処理人口、6) 川崎市の 4 処理場全体の普及率

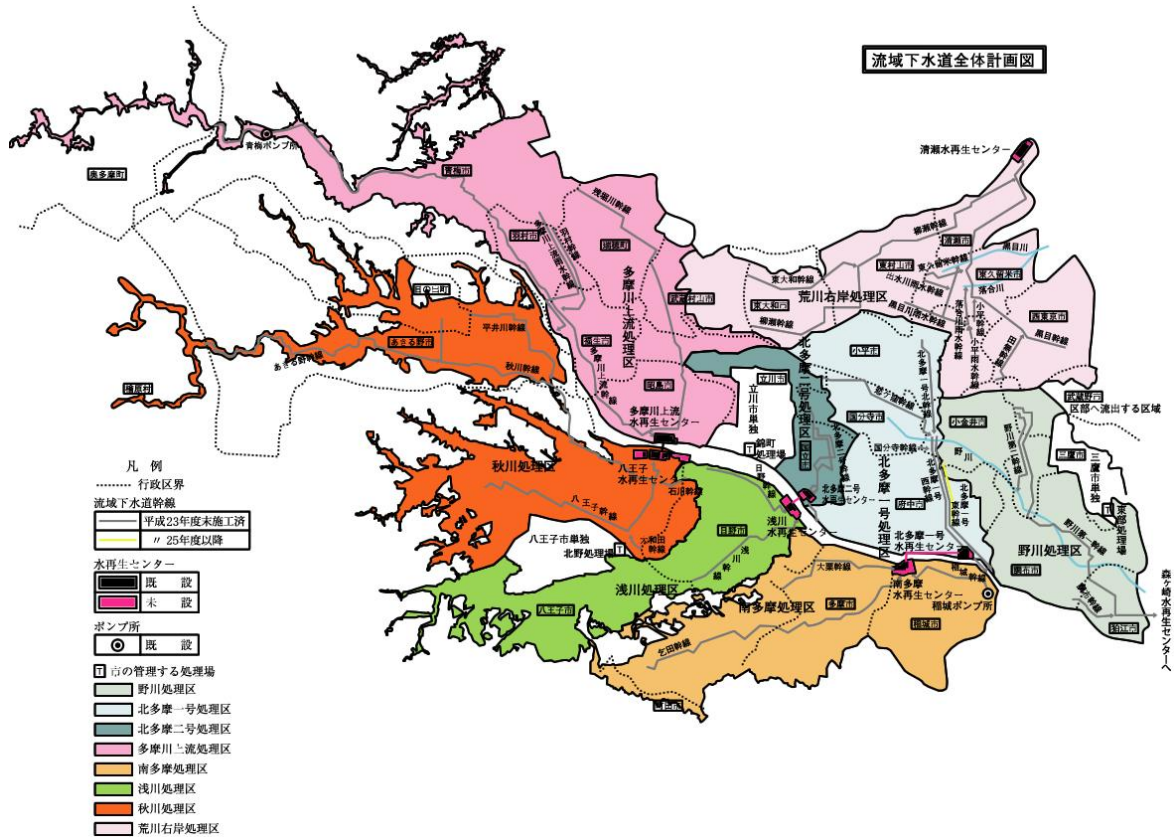


図 2.2 多摩川沿川における東京都の流域下水道全体計画

2. 2 分析の方法

2. 2. 1 水収支

河川の水・熱収支は、河川水とそれを取り囲む外界との自然的・人工的な水・熱交換過程に依存して物理的に決定される（図 2.3）。自然的過程には、水面や河床を通じた熱交換、支川や地下水からの熱流入が含まれる。また、人工的過程としては、取水、排水、土地利用や植生の変化、気候変化が挙げられる。いくつかの研究では、水面や河床を通じた自然的な熱交換に着目して水温予測モデルを構築し(Caissie et al., 2007; Hebert et al., 2011; Sinokrot and Stefan, 1994; Webb and Zhang, 1997)、日射、長波放射、潜熱、顕熱、河床伝導熱、移流熱といった過程の相対的影響度合いが解析されている。

図 2.3 に示される各過程を定量化するため、人工影響の度合いの異なる 4 つの区間（S2~3, S3~4, S4~6, S5~6）を選定した。各区間では、表 2.3 に示す数の流入支川、下水処理場、取水堰が存在している。

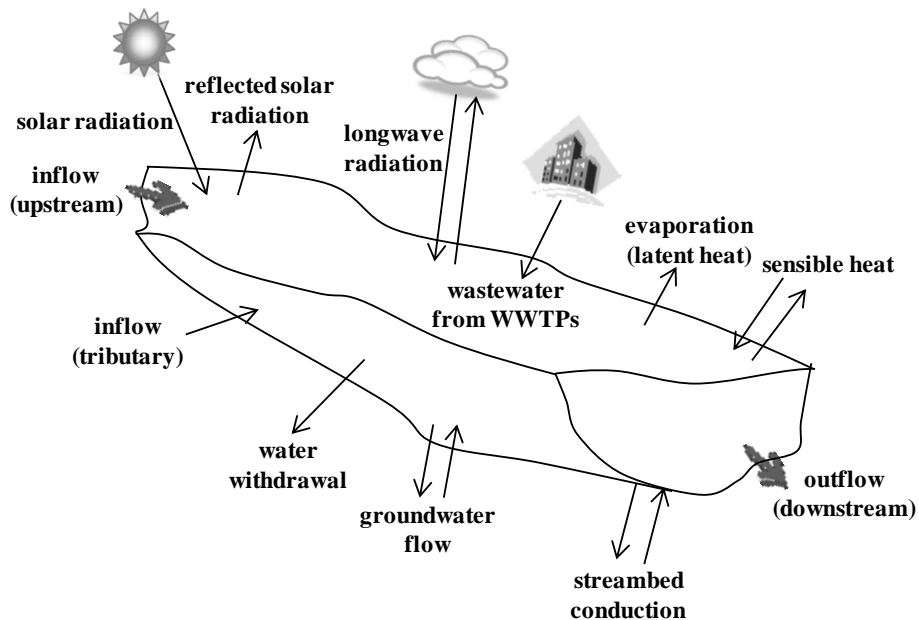


図 2.3 河道区間における水・熱収支に関連する過程

表 2.3 各区間における支川・処理場・取水堰の数

区間	支川	処理場	堰
S2-3 (永田橋—拝島橋)	2	0	1
S3-4 (拝島橋—日野橋)	2	3	1
S4-6 (日野橋—多摩川原橋)	2	4	2
S5-6 (是政橋—多摩川原橋)	0	1	0

各区間において、下流から流出する流量は、その上流側で異なる経路から流入する水量の合計に等しいとすると、

$$Q_o = Q_i + Q_t + Q_w + Q_{other} \quad (1)$$

となる。ここで、 Q_o は下流側流量、 Q_i 、 Q_t 、 Q_w はそれぞれ、上流側流入量、支川からの流入量、下水処理水の放流量である。 Q_{other} はそれ以外の直接定量化ができない分を意味する（例えば、地下水や取水量）。式(1)において、 Q_{other} は $Q_{other} = Q_o - Q_i - Q_t - Q_w$ として計算される。

2. 2. 2 熱収支

熱収支は式(2)から計算される。

$$H_o = H_i + H_t + H_w + H_r + H_{other} \quad (2)$$

ここで、 H_o は下流側から流出する熱量、 H_i 、 H_t 、 H_w は上流側、支川、処理場放流水により流入する熱量である。 H_r は水面における熱交換量、 H_{other} は他の要因による熱交換量で、例えば、河床における熱伝導や地下水による熱移流、取水による熱流出である。無降雨時のデータを用いているので、降水は無視した。熱輸送量 H_o 、 H_i 、 H_t 、 H_w は次のように定義される。

$$H = C_p \rho Q T \quad (3)$$

ここで、 $C_p \rho$ は水の熱容量 ($\text{TJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 Q は河川流量(Q_o 、 Q_i 、 Q_t) あるいは下水放流量(Q_w) ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)で、 T は河川や放流水の水温($^\circ\text{C}$)である。水面での熱交換量 H_r は、

$$H_r = R_{net} \times A \quad (4)$$

ここで、 A は水表面積(m^2)、 R_{net} は水面での正味放射量($\text{TJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)で、次のように表す。

$$R_{net} = R_{is}(1 - \alpha_s) + R_{ld} - R_{lu} - J_s - J_l \quad (5)$$

ここで、 R_{is} は入力日射量、 α_s は水面のアルベド(0.06)、 R_{ld} は下向き長波放射量、 R_{lu} は上向き長波放射量、 J_s と J_l は顕熱と潜熱である。

日平均の下向き長波放射量は次のように与えた(Kondo, 1994)。

$$R_{ld} = (1 - \beta) [1 - (1 - \varepsilon_{ac}) F_c] \sigma (T_a + 273.2)^4 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ac} = 1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} T_a^2) \quad (7)$$

$$F_c = 0.826 N_c^3 - 1.234 N_c^2 + 1.135 N_c + 0.298 \quad (8)$$

ここで、 N_c は日照率、 F_c は雲占有率、 T_a は日平均気温($^\circ\text{C}$)、 ε_{ac} は晴天時の大気放射率、 σ はステファンボルツマン定数($4.9 \times 10^{-15} \text{ TJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ K}^{-4}$)、 β は長波の反射率(0.03)である。

上向き長波放射量 R_{lu} は次式より求めた。

$$R_{lu} = \varepsilon_s \sigma (T_s + 273.2)^4 \quad (9)$$

ここで、 T_s は水温($^\circ\text{C}$)、 ε_s は水面の射出率(0.97)である。

顕熱と潜熱 (J_s と J_l) は式(10)と(11)で表す(Sinokrot and Stefan, 1993)。

$$J_s = 0.61 \rho_w \lambda \frac{P_a}{1000} \text{Wf} \ln(T_s - T_a) \quad (10)$$

$$J_l = \rho_w \lambda Wftn(e_s - e_a) \quad (11)$$

ここで、 ρ_w は水の密度(kg m^{-3})、 λ は水の気化熱 (TJ kg^{-1})、 P_a は気圧(hPa)、 e_s は飽和水蒸気圧(hPa)、 e_a は空気の水蒸気圧 (hPa)、 $Wftn$ は風速関数($\text{m hPa}^{-1} \text{ day}^{-1}$)である。

風速関数 $Wftn$ は次のように与える(Gulliver and Stefan, 1986)。

$$Wftn = 0.0000(\Delta\theta_v)^{1/3} + 0.000085u_2 \quad (12)$$

ここで、 $\Delta\theta_v$ は気温と水温の温位差、 u_2 は水面上 2 m の風速(m/s)である。

$\Delta\theta_v$ は次式により計算される。

$$\Delta\theta_v = T_s \left(1 + \frac{0.378e_s}{P_a} \right) - T_a \left(1 + \frac{0.378e_a}{P_a} \right) \quad (13)$$

露場で計測された風速は次式により水面上 2m の風速に変換した(Macdonald et al., 1998)。式中の u_h は高さ h (m) の風速 (m s^{-1})、 h' (m) は上空風速を定義する高さ(50 m)、 z_0 は水面の粗度(m) (1.0×10^{-4} m)、 z_0' は草地上の粗度(m)である。粗度長の風向依存性は Kuwagata and Kondo (1990) を参考に与えた。

$$u_2 = u_h \left(\frac{\ln \frac{h'}{z_0'}}{\ln \frac{h}{z_0'}} \right) \times \left(\frac{\ln \frac{2}{z_0}}{\ln \frac{h'}{z_0}} \right) \quad (14)$$

2. 2. 3 地下水と取水による熱交換

地下水と取水による熱交換は、次式により推定される。

$$H_{estimate} = C_p \rho \times Q_{other} \times T_s \quad (15)$$

ここで、 Q_{other} は式 (1) から求まり、地下水と取水の合計となる。 T_s には、地下水涵養が起きている場合には各区間の上下流端における水温の平均を用いる。これゆえ、 $H_{estimate}$ と H_{other} を比較することによって、地下水と取水の量を検証することができる。

2. 2. 4 下水処理水の影響が無い場合の河川水温推定

河川水温に処理水が及ぼす影響を簡便に推定するため、処理水流入がないと仮定した場合に各区間下流端から流出する水量と熱量をそれぞれ ($Q_o - Q_w$) と ($H_o - H_w$) によって求める。よって、この時の下流端水温 T_o' は次のように表される。

$$H_o - H_w = C_p \rho (Q_o - Q_w) T_o' \quad (16)$$

測定された Q_o と Q_w 及び計算された H_o と H_w を使うと、S4 と S6 における、下水処理水の放流が無かった時の水温が得られる。この式を適用する際、 R_{lu} は従前と変わらないとした。

2. 3 結果と考察

2. 3. 1 河川の水量・水温

図 2.3 には多摩川の水期(12~2月)および夏期(7~9月)の水温の経年変化を示す。冬期、上流地点(S1~S3)では経年的変化トレンドは見いだせないが、S4とその下流の地点では経年的に増大傾向にあることがわかる。これには、多摩川沿いの下水処理場からの放流量とその水温の増大が関係している可能性が示唆される。なお、夏期にはこのような増大傾向は見られない。

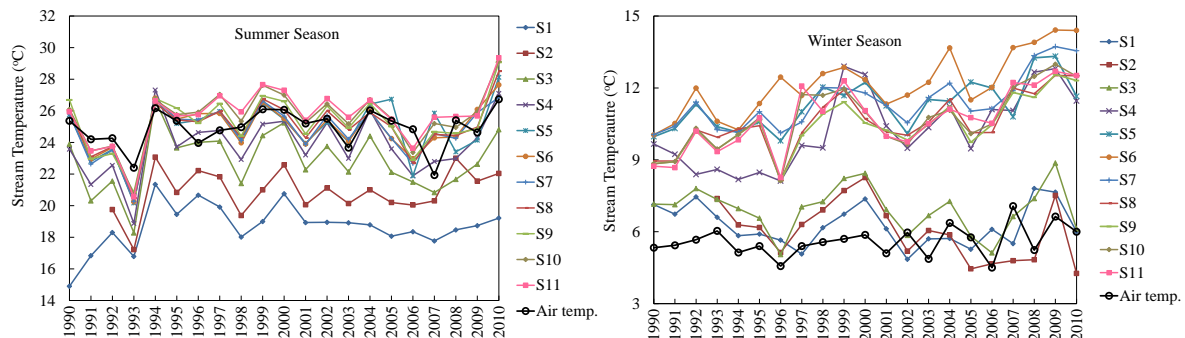


図 2.3 1990~2010年における各地点の水温経年変化(左:夏期、右:冬期)

図 2.4 と 2.5 は、各地点・平常時における月別の流量・水温の 5 あるいは 6 年間の平均を示す。変動係数 σ/μ の平均値(σ と μ は月別流量と水温の標準偏差と平均値を意味する)も示されている。夏期(7~9月)と冬期(12~2月)のいずれも、S1-S2の間で、取水による急激な流量減少が見られ、その後、下水処理水と支川の流入により回復している。夏期、低水条件において、水温は日射の影響を強く受ける(Hockey et al., 1982; Webb et al., 2003)ことから、多摩川においても、流量減少が水温に強い影響を及ぼし得る。図 2.5a によると、単位距離当たりの水温変化は、S1 と S2 および S2 と S3 の間でそれぞれ 0.32 と 0.40°C/km であり、河川水は流量減少の影響により、S2~3の間でより加熱されている考えられる。

夏期において、長期的な水温変化の傾向は見られず、縦断的には徐々に温度が上昇していた(図 2.5a)が、冬期には、時空間的に顕著な水温変化の特徴が見いだされた(図 2.5b)。2006~2010年においては、S4 から S11 において水温が以前の期間よりもかなり高いことがわかる。S4 から S11 における平均水温は 1990~1995、1996~2000、2001~2005、2006~2010 の各期間でそれぞれ 9.8、10.8、10.6、12.3°Cであった。水温上昇は S4 で特に顕著で、1990~1995 と 2006~2010 の間で 3.6°C 上昇していた。S4 から S11 の水温に比べると、S1 から S3 における長期的変化はほとんどなく、これらの地点においては排水がほとんどないと、土地利用変化も小さいことによると見られる。

冬期における縦断方向の水温変化は、S1 から S3 までのほぼ一定の水温、S3 から S6 までの連続的な上昇(S6 で最大となる)、そして、それより下流でやや低下するという特性を示す。特に、S3 と S4 の間では平均 3.8°C の上昇が見られる。短い距離で大きな変化があることから、この区間で 3 か所に下水処理場からの放流があることと関係すると思われる。上流地点(S1~S3)では夏期と違い、河川水温は、流量減少にも関わらず比較的安定している(図 2.5b)。

次に、ここで整理された水温の時間的・空間的変化の主要な要因を同定する。まずは、下水処理場からの放流量と水温の経時的変化を比較し、人間影響の変化について検討した。本川沿いに位置する 8 つの処理場(W1~W8)のうち、W1~W3 と W4~W7 は S3~S4 と S4~S6 の間に位置する。図 2.6 は、これらの処理場からの年間放流量と冬期及び夏期における平均水温を示しており、

冬期における放流水温の長期的上昇傾向を示している。さらに、W1~W3 と W4~W7 における放流量の上昇傾向も明らかで、過去 20 年間に 2 倍に達している。これらの特徴は、人口増加と下水道ネットワークの拡大に関連していると考えられ、冬期の処理水温上昇は、民生・商業部門における水・エネルギー消費量の拡大に起因している(Kinouchi, 2007)。

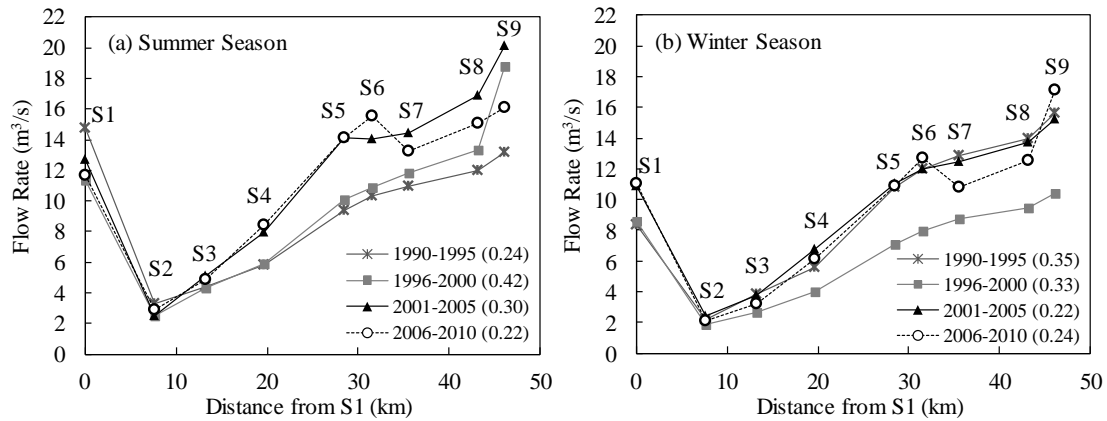


図 2.4 S1 から S9 の夏期(a)と冬期(b)の河川流量
各プロットは、5 あるいは 6 年間の月別測定結果の平均を示す。

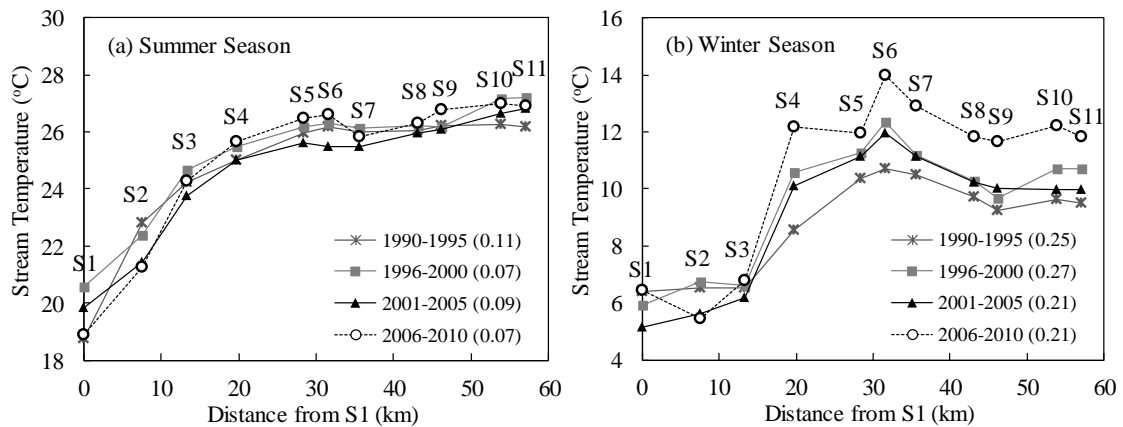


図 2.5 S1 から S11 の夏期(a)と冬期(b)の水温変化
各プロットは、5 あるいは 6 年間の月別測定結果の平均を示す。

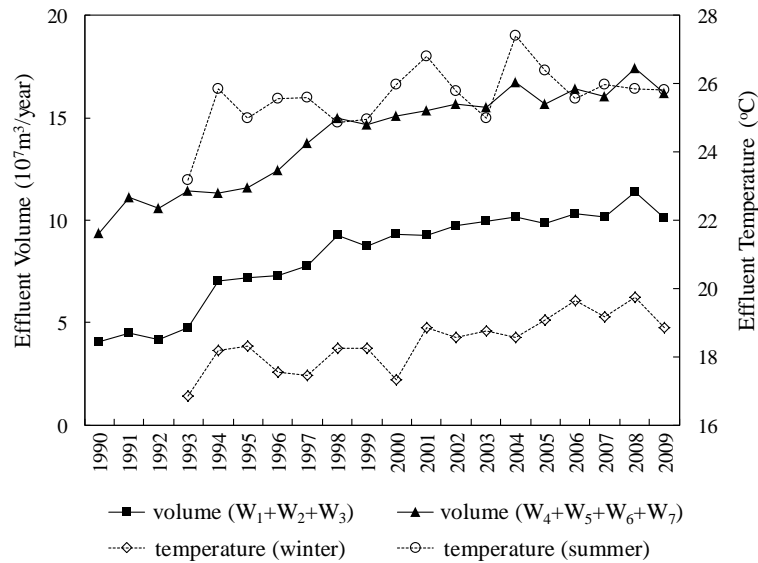


図 2.6 下水処理場からの年間総放流量(1990～2009)と冬期と夏期における平均温度(1993～2009)

冬期間における S4 及びそれより下流地点における長期間の河川水温上昇は、下水処理場からの放流量と放流水温の上昇と強く関係していると考えられる。河川水温上昇の程度は地点ごとに異なるが、それは、処理場の位置にも関係していると思われる。例えば、S3 と S4 の間の急激な変化は、河川の低水条件下における下水処理場(W1～W3)からの放流水に起因していると思われる。また、S6 で確認された最高水温は下水処理場 (W4～W7)からの放流水の影響が現れていると思われる。W4～W7 からの放流量は W1～W3 からの放流量のおよそ 2 倍であるが、S4 と S6 の間の水温上昇は、S3 と S4 の間のものよりも小さい (ただし、1990～1995 は例外)。これは、おそらく河川の流量自体が大きくなり、処理水の影響が比較的軽減されたことによるとと思われる。

冬期の S3～4 と S4～6 における河川水温変化に対する処理水の影響を明らかにするため、水温変化 $(T_o - T_i)$ (T_i と T_o は、それぞれ、各区間の河川上下流端における水温を意味する) を $Q_w T_w / (Q_w T_w + Q_i T_i)$ に対してプロットした (図 2.7)。加熱された処理場からの放流水が本川に及ぼす影響は $Q_w T_w / (Q_w T_w + Q_i T_i)$ によって表すことができる。ここで、 Q_i は S3 あるいは S4 における流量、 Q_w と T_w は各区間内に位置する処理場からの放流量の合計と放流水温の平均である。この結果から、相関性は確認できるものの、河川水温上昇が処理水のみでは説明しきれないことがわかる。また、 $Q_w T_w / (Q_w T_w + Q_i T_i)$ の値から、W4～W7 の放流水の影響 (黒印) は W1～W3 (赤印) に比べて相対的に小さいことがわかる。このことは、冬期間において、S4 から S6 の間の水温上昇が S3 から S4 までの水温上昇に比べて、とりわけ、1996～2000、2001～2005、2006～2009 の期間において小さいことをうまく説明している。蒸発・対流・長波放射による熱損失は、水温上昇によって増大する (Prats et al., 2012) ことから、S4 から S6 における水温変化が小さいのは、水面における熱交換が大きいことにもよると思われ、このことは、後で示すように、S4～S6 における H_r が負の大きな値であることと関係していると思われる。

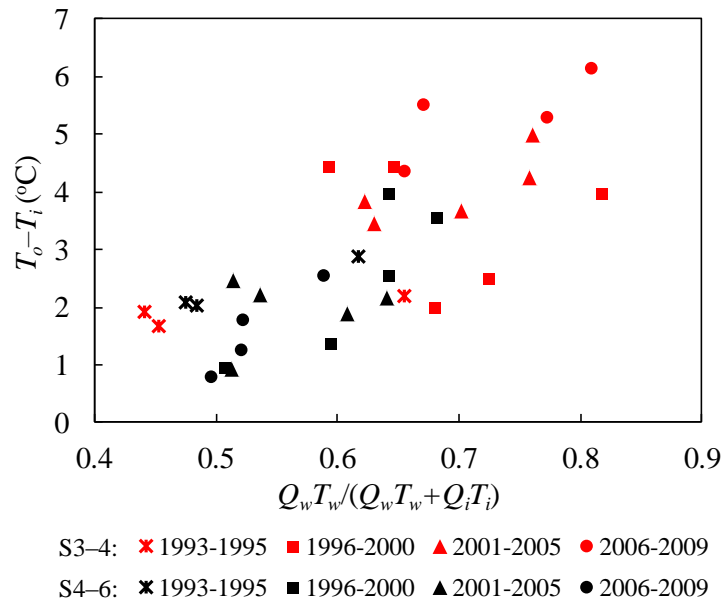


図 2.7 水温差 ($T_o - T_i$) と区間 S3-4 及び S4-6 における放流水による影響 $Q_w T_w / (Q_w T_w + Q_i T_i)$ の関係。各プロットは、冬期における各期間の平均値を示す。

2. 3. 2 気温と水温の関係

地球や都市の温暖化による大気効果も、水温の長期的・縦断的变化を引き起こす要因となる。この大気効果を他の要因と切り離すため、気温と水温の関係を調べた。

図 2.8 は、4 地点 (S1、S3、S4、S6) における 1990～1995 年と 2005～2010 年の気温と水温の関係を示す (S1 は M2、S3 は M3、S4 と S6 は M4 で計測された気温を用いている)。ここで、水温は週平均の気温と比例的に相関があることが示されている (Kinouchi et al., 2007; Mohseni et al., 1999) ことから、気温の平均時間は水温計測前 1 週間とした。

S1 では 2 期間のプロットが重なるとともに、気温がおよそ 15°C 以上では、水温が気温より低くなっていることがわかる。これはダムによる比較的冷たい貯水が放流されたことによる影響であると考えられる (なお、夏期の月平均水温は 1990～1995 年で $7.7\sim 19.0^{\circ}\text{C}$ 、2005～2010 年で $15.2\sim 18.9^{\circ}\text{C}$ であった)。また、気温がおよそ 5°C 以下になっても、水温は 5°C 程度に保たれているが、これは S1 地点の水温がダムからの比較的暖かく一定温度の放流水により制御されていることによる (冬期の月平均水温は、1990～1995 年で $6.0\sim 11.9^{\circ}\text{C}$ 、2005～2010 年で $5.6\sim 10.5^{\circ}\text{C}$ であった)。したがって、S1 地点における水温はダム放流水により強く影響されていると言える。S3 地点における証拠は明確ではないが、S1 と同様に 1 : 1 の線からプロットが、わずかではあるが乖離する傾向を示しており、S3 地点でもダムの影響は残っていると見られる。

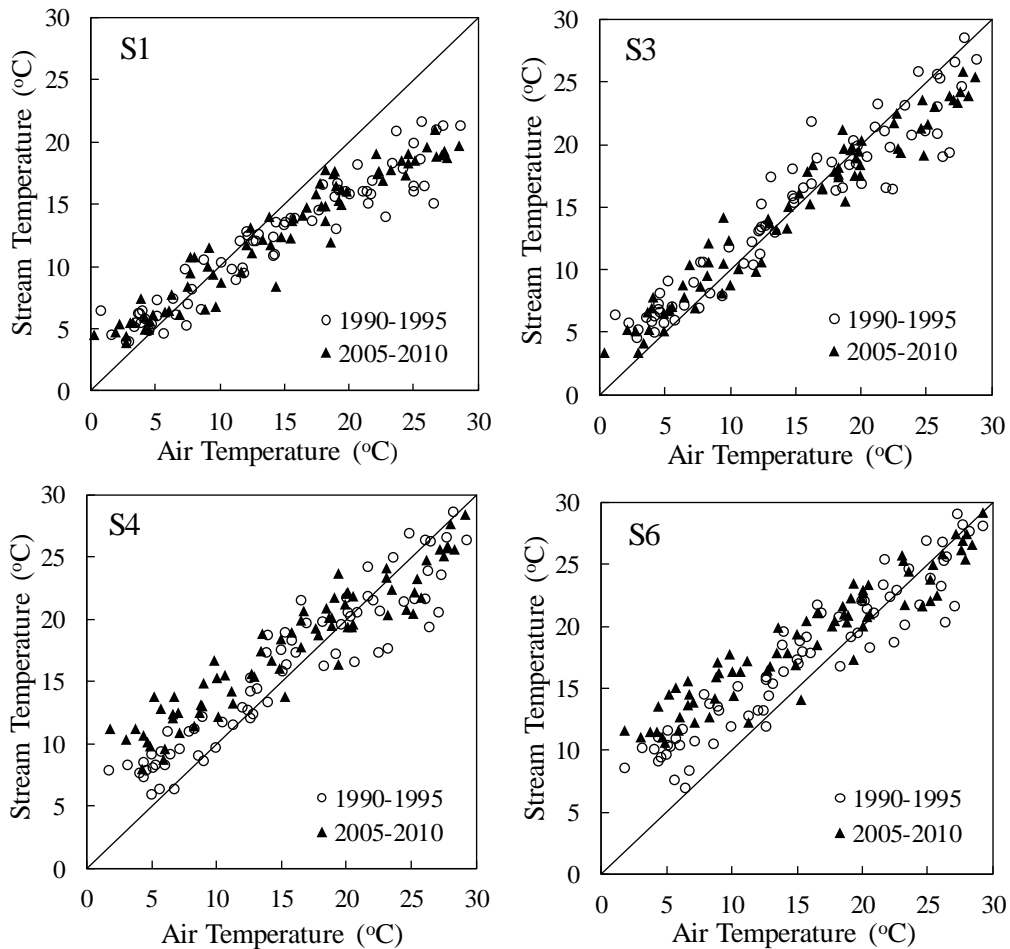


図 2.8 S1、S3、S4、S6 における気温と水温の関係

S4 と S6 におけるプロットによると、気温が 15°C 以下のときに、最近(2005~2010)では水温が気温に対してより高くなっている。このことは、過去 20 年間に於ける河川の温暖化が、気温上昇の影響ではなく、図 2.6、2.7 で見たような下水処理場からのより大きな熱流入によるものであることを示唆する。気温がおおよそ 15°C 以上のとき、S4 と S6 の水温はほぼ気温に近く、このことは、温暖期には下水処理水流入に対して河川水温はほとんど影響されないことを示す。これは、下水処理水の温度が河川水温に近いことに起因する(図 2.5a と 2.6)。

2. 3. 3 水・熱収支

区間 S2~3、S3~4、S4~6、S5~6 の水・熱収支の解析結果を図 2.9~12 に示す。これらの図で、流量と熱フラックスは何日分かの観測データの平均を示す。平均をとったデータの日数は流量を示す図のカッコ内に示す。分析年はデータの有無および平常時の流量であるかどうかの条件によって選んだ。

区間 S2~3 では (図 2.9)、支川流入 Q_i が大きな流量増大要因である一方、 Q_{other} は 2004 年冬期を除き負の値となっており、相当量の取水が行われていたことを示す。支川による熱流入は正味の熱量増大に大きく寄与し、ダム流入の影響緩和に役立っている。一方、水面での熱交換 H_r は小さく二次的である。ほとんどの時期で、 $H_{estimate}$ は H_{other} と類似しており、このことは、取水や地下

水涵養による流出が支配的で熱損失が発生していることを意味している。

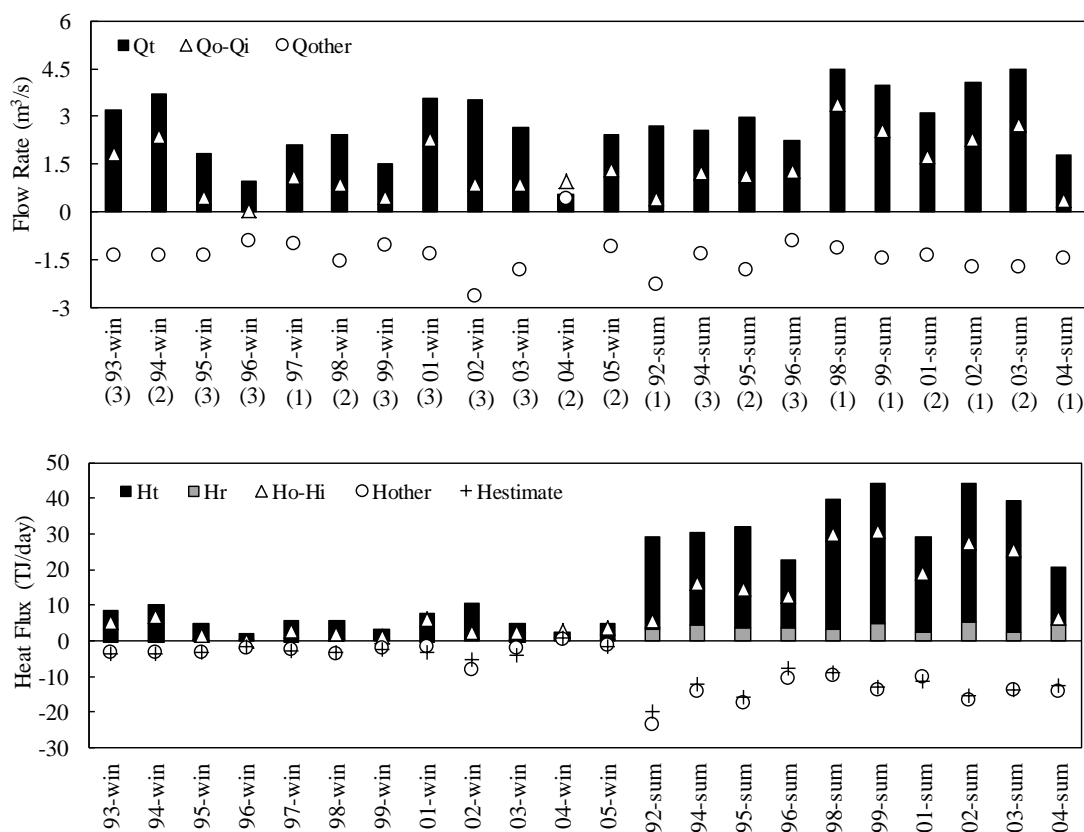


図 2.9 S2-3 における冬期と夏期の水・熱収支。 Q_i , Q_o , Q_w , Q_t , H_i , H_o , H_r , H_w , H_t は実測値から、 Q_{other} と H_{other} は式(1)、(2)から、 $H_{estimate}$ は式(15)から計算した。

下水処理水の流入がある区間 S3~4 (図 2.10)と S4~6 (図 2.11)では、処理場からの放流量 Q_w と熱量 H_w が冬期・夏期ともに水・熱収支上の増加要因である一方、支川の影響(Q_t と H_t)はとりわけ冬期で小さい。水面での熱交換(H_r)は、冬期は熱損失、夏期は熱取得に貢献するものの、その量は比較的小さい。いずれの区間でも、 $H_{estimate}$ の値は H_{other} に近いが、いくつかの期間では、 $H_{estimate}$ の絶対値がわずかに過小評価となっている。例えば、S3~4 の夏期 (図 2.10) や、S4~6 の 94-sum (図 2.11) である。これらの過小評価は、地下水がやや低い水温で河川に流入していると仮定すれば説明でき、そのような状況は、夏期に地下水水位が河川水位よりも高ければ起こり得る。

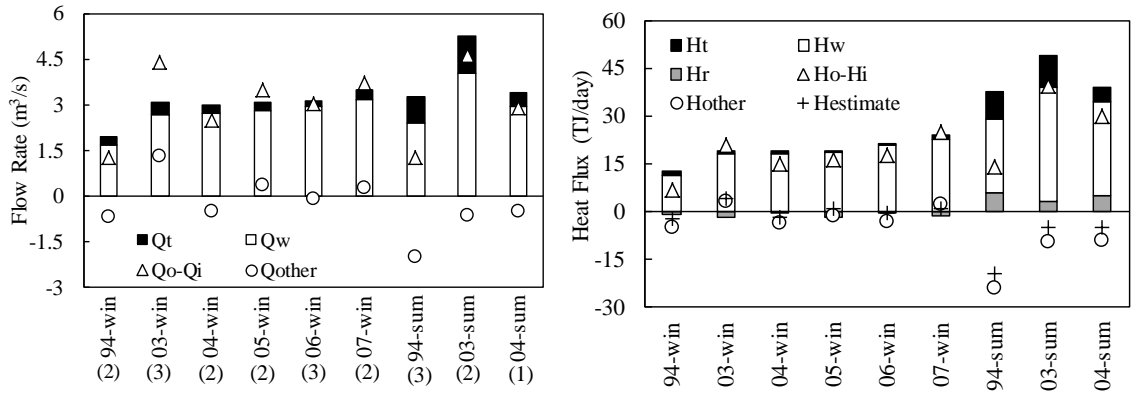


図 2.10 S3-4 における冬期と夏期の水・熱収支 (各項の算出方法は本文及び図 2.9 に同じ)

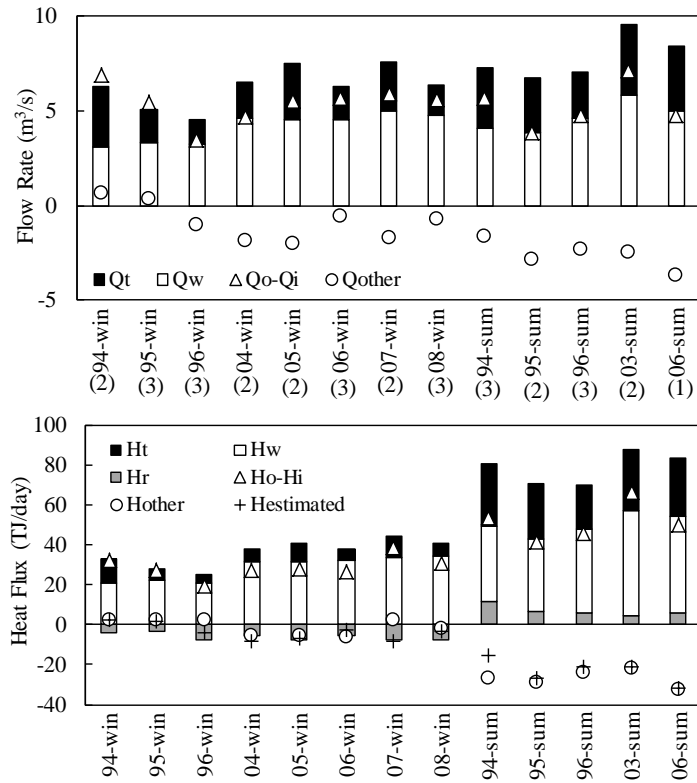


図 2.11 S4-6 における冬期と夏期の水・熱収支 (各項の算出方法は本文及び図 2.9 に同じ)

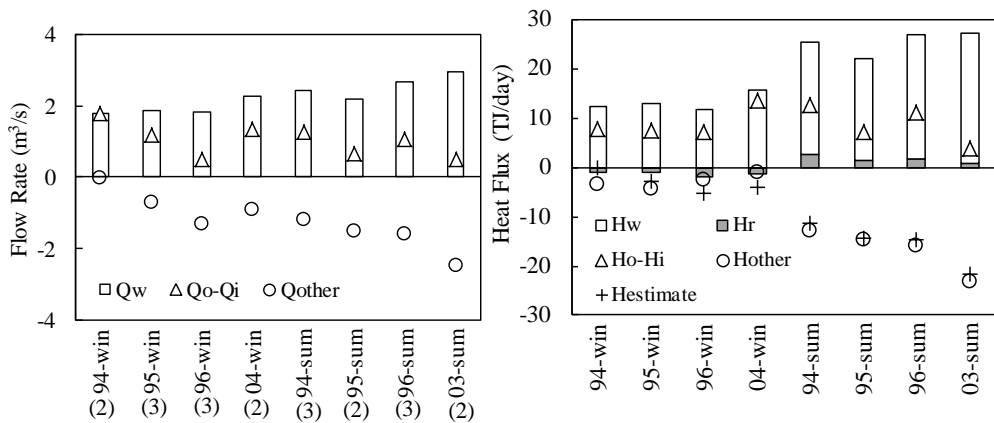


図 2.12 S5-6 における冬期と夏期の水・熱収支 (各項の算出方法は本文及び図 2.9 に同じ)

区間 S5~6 では取水堰がないことから、図 2.12 の水・熱収支の結果からは、地下水涵養量とそれに伴う熱流出量が推定される。この区間の Q_{other} はいずれの期間も負の値で、下水処理水流入によって増加した水量が、地下水涵養によって減少していることを明らかにしている。このことは、 $H_{estimate}$ と H_{other} が近い値を示していることから裏付けられる。特に夏期で大きな負の値となっており、この区間において、地下水涵養が水・エネルギーの主要な吸収源（流出経路）となっていると言える。

2. 3. 4 処理水の影響が無い場合の水温推定

処理水が河川水温に及ぼす影響について、実測値と式(16)による結果の比較に基づき定量化した(図 2.13)。W1~W3 あるいは W4~W7 の処理水からの放流が無いとした場合、冬期、河川水温は S4 地点で 3.6~9.3°C (W1~W3 の放流が無い場合)、S6 地点で 2.2~5.4°C (W4~W7 の放流が無い場合) 低くなる結果であった。対照的に、夏期はいずれの地点でも処理水の有無による違いはほとんどなかった。したがって、下水処理水は冬期に河川水温上昇に大きく寄与する一方、夏期にはほとんど影響がないと言える。夏期に影響があまりないのは、自流量が多いこと(図 2.4) や放流水温が河川水温に近いこと(図 2.5a、図 2.6)によるものと考えられるが、ここでの分析が日平均のスケールで行われていることにも起因する。実際には、1日の中での変動があり、気象条件の影響を受けて水温は日中上昇することから、比較的温度の安定した下水処理水によって、河川水温の上昇が抑制されていることが考えられる。これについては3章で示す。

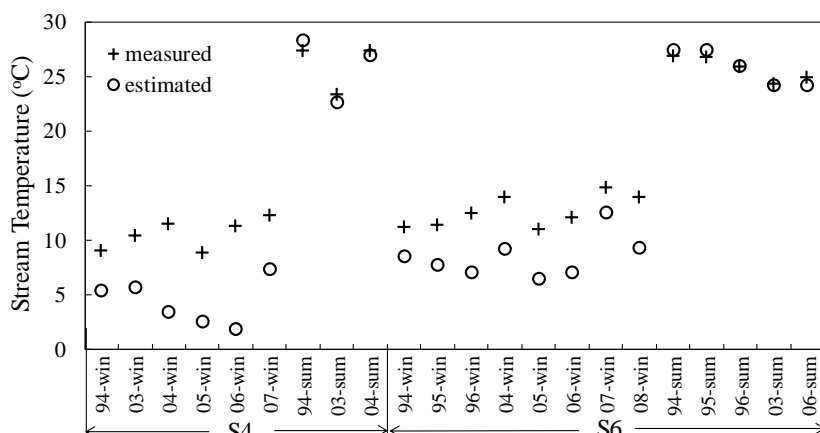


図 2.13 S4 と S6 における実測水温 (+) および下水放流水が無いと仮定した時の河川水温 (O)

3. 多摩川の水温と水・熱

収支の実態観測

3. 1 通年モニタリングの概要と結果

3. 1. 1 水温と河道内気象のモニタリング

年間を通した河川水温の実態を理解するため、多摩川本川の 4 地点（小作取水堰地点、日野橋地点、多摩川原橋地点、二子橋地点）に水温センサー（Hobo ウォーターテンププロ V2）を設置し、2011 年 4 月から 2013 年 4 月までのおよそ 2 年間にわたって 10 分間隔でのモニタリングを行った。ただし、機器の流失や水中から露出したことによって一定期間、欠測が生じた地点が複数ある。また、上流の小河内貯水池の放流水温データを 2011 年 4 月からの 1 年間分、東京都水道局

より入手した。

下水処理水の放流水温については、多摩川沿川に位置する 8 か所の施設（図 2.1、表 2.1）のうち、相対的に放流量の少ない錦町下水処理場と今回の研究対象域よりも下流に位置する等々力水処理センターを除いた東京都所管 6 施設（多摩川上流水再生センター、北多摩二号水再生センター、南多摩水再生センター、北多摩一号水再生センター、八王子水再生センター、浅川水再生センター）において水温データを取得した。このうち、多摩川上流水再生センター、北多摩二号水再生センター、南多摩水再生センター、北多摩一号水再生センターについては、処理水の放流渠内に河川で使用したものと同一センサーを設置し、2011 年 7 月～2013 年 4 月までの間、10 分間隔の自動計測を行った。八王子水再生センターと浅川水再生センターについては、東京都下水道局が管理用に計測している 1 時間間隔の水温データを入手し利用した。

また、多摩川の河道内における気象条件を把握するため、国土交通省石原水位流量観測地点（調布市下石原）の高水敷上 5.1m の高さに温湿度計（Onset 社、S-THB-M002、遮光装置付き）、5.5m の高さに風速計（Onset 社、S-WSA-M003）、日射計（Onset 社、S-LIB-M003）を設置し、2012 年 3 月から 2013 年 4 月までモニタリングを実施した。

3. 1. 2 モニタリング結果

4 地点の河川水温と水再生センターにおける放流水温（6 ヶ所の単純平均値）ならびに河道内の気象計測結果を図 3.1～3.3 に示す。出水時と思われる一部の期間を除いて、小作取水堰地点から日野橋地点の間では水温が大きく上昇しており、図 2.5 で示した特徴と一致している。2 章で示したように、夏期における水温増大は上流における取水に伴う流量減少の影響が大きい一方、冬期の増大には下水放流水の影響が大きいと考えられる。日野橋地点、多摩川原橋（石原）地点、二子橋地点を比べると、縦断的な水温変化は夏期に小さく、冬期には石原地点でやや高めとなることが確認される。夏期（7～9 月）、冬期（12～2 月）の日野橋地点、多摩川原橋（石原）地点、二子橋地点における水温平均値は、それぞれ、2012 年夏期で 25.3℃、25.8℃、26.0℃、2012 年冬期で 12.3℃、13.0℃、11.4℃となっており、図 2.5 に示した 2006～2010 年の平均値とあまり変わらない値であった。このことから、近年において多摩川の熱環境が急に変わったというような現象がないことが確認された。

時間変動データによると、日野橋等の下流 3 地点では夏期に 30℃を超える場合も認められるが、放流水温はそれよりも低いため、下水処理水の放流が河川水の高温化抑制と水温変動の平滑化に寄与していると見られる（図 3.4）。日野橋と石原地点の水温の日最大値はあまり変わらず、日最小値のみ石原地点で高いのはその現れである。また、石原地点から二子橋地点の間では処理水の放流がないことから、日最大値、日最小値ともに若干上昇していることがわかる。

時間変動の特徴を捉えるため、無降雨で一定の水温変化が継続していた期間を対象に、各地点における水温計測値（時間平均値）が、ある閾値を超える確率（超過確率）を表したものが図 3.5、3.6 である（横軸が閾値を表している）。夏期、冬期ともに小作取水堰地点と他 3 地点の分布範囲が異なっており、小作取水堰を含む上流域と日野橋を含む下流域では水温領域が大きく違うことがわかる。また、夏期は下流に行くにしたがい曲線が直立に近づき、水温の変動範囲が狭くなっていることがわかる。夏期は、水温 30℃を超える超過確率が日野橋地点、石原地点でそれぞれ 4.7%、

3.6%であったのに対して、二子橋では10%を越えていることから、下水処理水が水温の高温化を抑制している状況が確認できる。このように、下水処理水の放流は、夏期、多摩川の高温化抑制と日変動の平滑化をもたらしていることが明らかとなった。一方、冬期はいずれの地点も曲線が直立に近く、夏期に比べて水温の変動幅が小さいことから、日射等の気象要因よりも放流水の影響をより強く受けた変動となっていることが示された。また、二子橋地点は、石原地点よりも全体的に水温が低く、日野橋地点の状況に近いことがわかる。石原—二子橋間では処理水の放流が無い場合、水面・河床からの熱の放出により温度低下が生じており、図 2.5 の結果とも整合している。

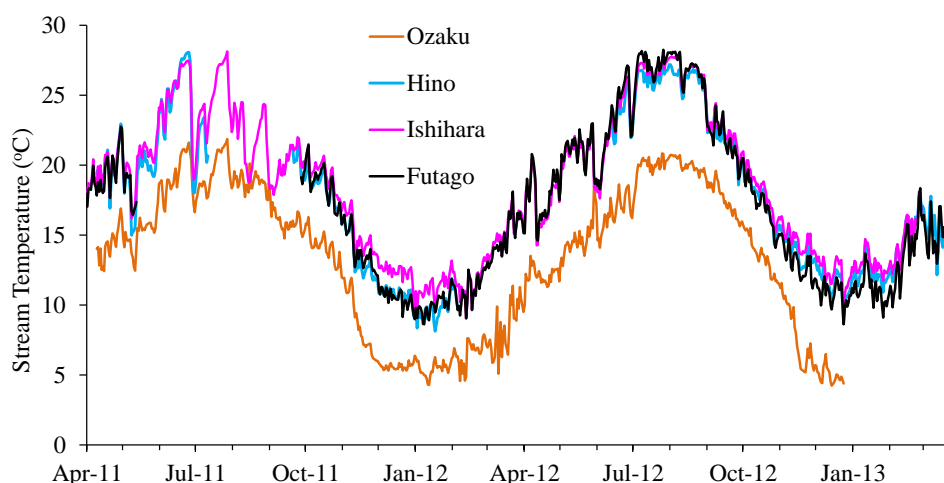


図 3.1 河川水温の測定結果（日平均値、2011年4月～2013年3月）

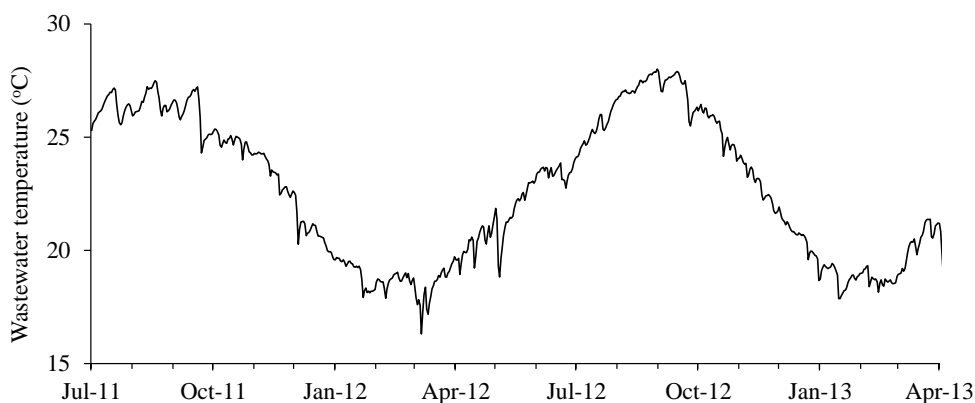


図 3.2 下水処理水の放流水温測定結果（日平均値、2011年7月～2013年3月）

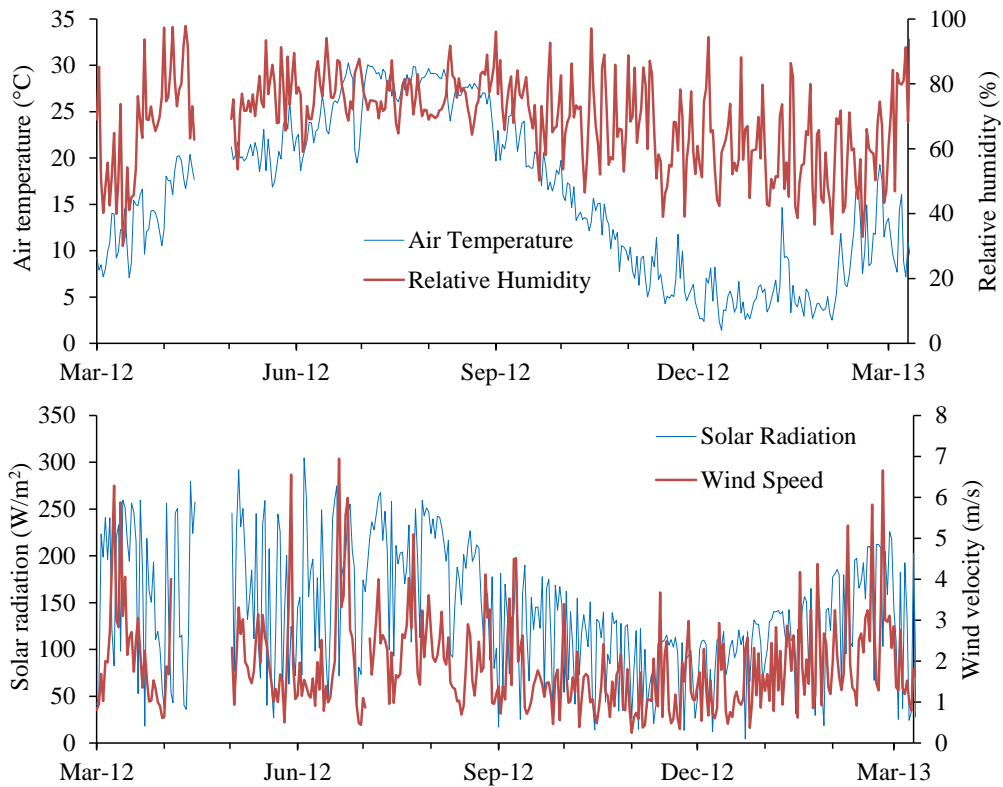


図 3.3 河道内における気象計測結果（日平均値、2012年3月～2013年3月）

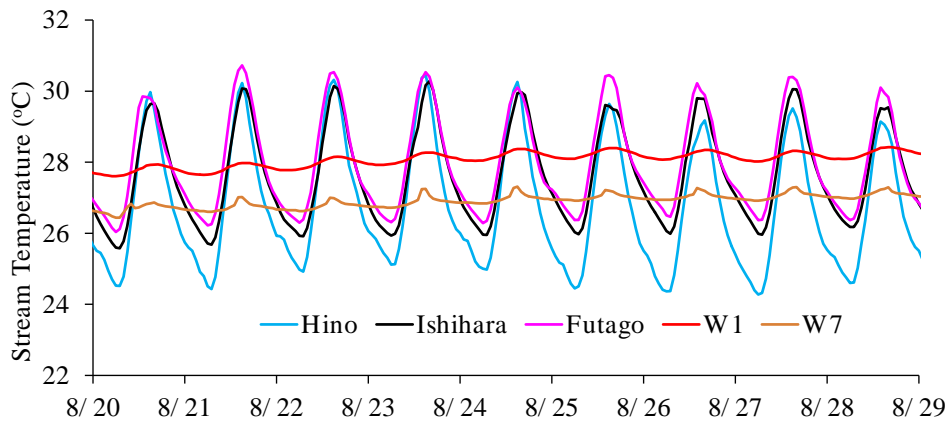


図 3.4 河川水温と下水処理水の放流水温の測定結果（時間平均値、2012年8月）

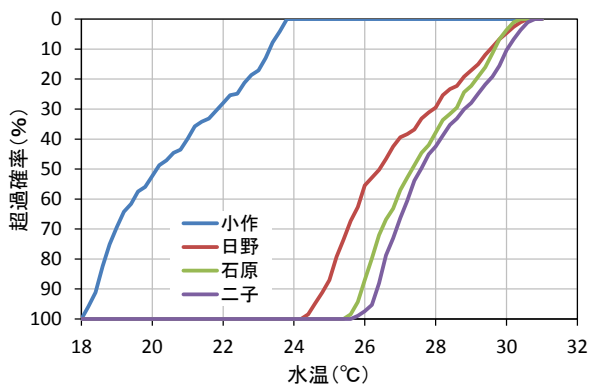


図 3.5 各地点の水温超過確率（2012/8/19～8/26）

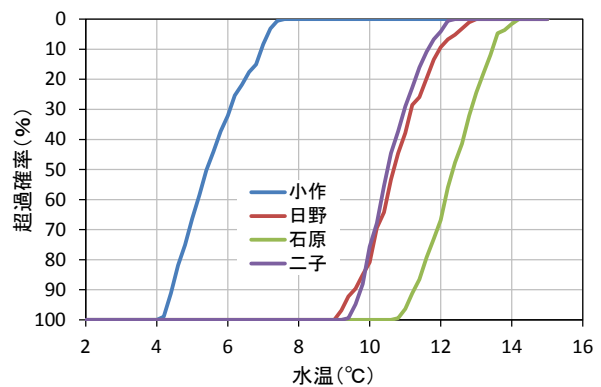


図 3.6 各地点の水温超過確率（2012/1/2～1/9）

3. 2 集中観測の概要と分析結果

3. 2. 1 集中観測の概要

多摩川本川における水・熱収支の実態を把握するため、2012年8月および2013年2月に河川の流量と水温、気象条件の集中観測を行った。あわせて、我々が計測している放流水温データを利用するとともに、下水放流量データを東京都より入手して分析に利用した。計測期間と計測項目を表3.1に示す。

夏期は、図3.7に示す調布橋地点(Chofu)、永田橋地点(Nagata)、拝島橋地点(Haijima)、日野橋地点(Hino)、京王線架橋地点(Keio)、関戸橋上流の気象観測地点(Met.)の本川6地点と大栗川1地点(Tri.)で流量と水温の計測を行った。流量は、水深と6割水深における流速の測定結果から算定した。水温は、期間中、10分間隔で温度センサーにより自動計測した。また、3.1で説明した小作取水堰地点(Ozaku)、石原水位流量観測所地点(Ish.)、二子橋地点(Futago)での水温モニタリングデータを利用した。

冬期は、対象地点を絞り、拝島橋地点、日野橋地点、京王線架橋地点、是政橋地点(図示していないが、北多摩第一水再生センターの直上流右岸の稲城北緑地近辺に位置する)の4地点において、同様の方法で流量を計測した。水温は拝島橋地点、京王線架橋地点、気象観測地点で計測し、長期モニタリングデータとあわせて分析に使用した。一方、河川水面上の気象状態(項目は表3.1のとおり)を関戸橋上流の気象観測地点において、1分間隔で計測した。なお、冬期計測では、2月8日早朝以降、機器のトラブルにより、河道内での気象計測が行えなかった。

表 3.1 気象観測の概要

観測期間	観測地点	気象観測地点での計測項目
2012年8月2日10:00~8月3日16:00(水温は8月2日0:00~8月7日0:00)	河川流量、河川水温(本川6地点、支川1地点)、気象計測(本川1地点)	気温、相対湿度、風速、風向、全天日射量、下向き長波放射量、水面からの反射日射量、水面からの上向き長波放射量、河床への透過日射量、河床温度(夏期:深度25cm、冬期:深度27cm)、河床伝導熱量、河床内及び河川水の電気伝導度(冬期のみ)
2013年2月7日12:00~2月9日12:00(流量は2月8日)	河川流量、河川水温(本川4地点)、気象計測(本川1地点)	

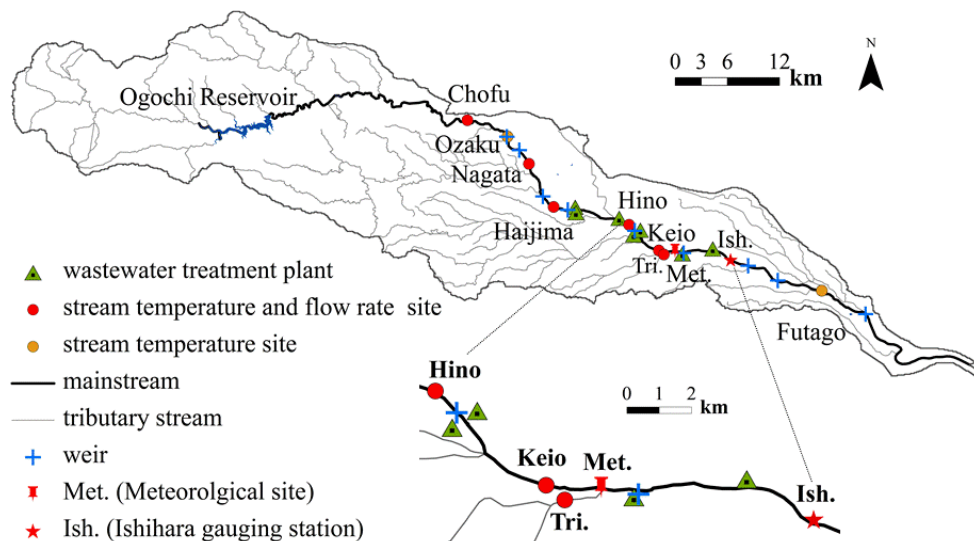


図 3.7 集中観測の対象地点

3. 2. 2 夏期 (2012 年 8 月) の観測結果

夏期の集中観測における流量と水温の測定結果を図 3.8 に示す。調布橋地点と永田橋地点の間では、羽村取水堰及び小作取水堰による取水の影響により流量が大きく減少する。それより下流に行くにしたがい、支川の流入及び下水処理水の放流によって、流量は回復していく。流下に伴う流量変化の傾向ばかりでなく、流量規模そのものも過去のデータと類似していた。また、測定期間中の日平均水温の変化を見ると、調布橋地点から拝島橋地点までは水温が大きく上昇しており、この傾向は過去のデータと類似している一方、特に、調布橋地点から小作取水堰地点までに比べ、小作取水堰地点から拝島橋地点までの変化が急激であることが新たにわかった。また、拝島橋地点から日野橋地点に至る変化は、過去のデータでは平均的には上昇傾向であったものが、今回の結果では減少傾向を示していた。この原因については、後述する。

観測期間中の河川水面上での熱収支を図 3.9 に示す。図中の記号のうち、 R_{is} は下向き日射量、 R_{us} は上向き日射量、 R_{ld} は下向き長波放射量、 R_{lu} は上向き長波放射量、 J_{bed} は河床の伝導熱量 (河床下向きを正)、 J_s と J_l は顕熱と潜熱で、前出の式(10)と(11)による計算値である。

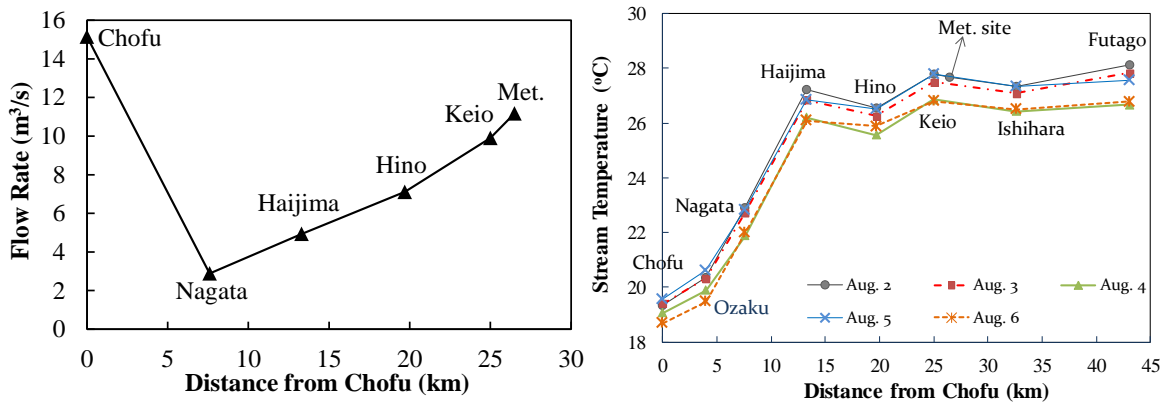


図 3.8 夏期集中観測時の測定結果

左：流量、右：日平均河川水温、ただし気象観測地点のみ 8 月 2 日 10:00～3 日 10:00 の平均。

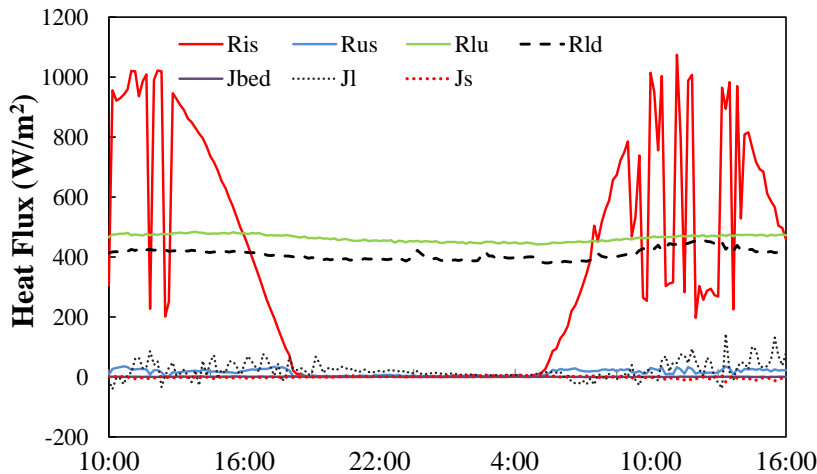


図 3.9 観測期間中の河川水面上の熱収支

2012年8月2日12:00から2012年8月3日12:00までの1日で見ると、全天日射量の平均が 283.9W/m^2 、長波放射収支($R_{ld}-R_{lu}$)は -56W/m^2 、潜熱により水面から大気へ輸送された熱量は 18.5W/m^2 、顕熱により大気から水面に輸送された熱量は 0.62W/m^2 、河床への伝導熱量は 0.89W/m^2 とわずかであった。

計測データに基づき計算される2012年8月2日12:00から2012年8月3日12:00までの間の水・熱収支を本川3区間(永田橋地点-拝島橋地点、拝島橋地点-日野橋地点、日野橋地点-京王線架橋)について図3.10に示す。なお、図中の記号の意味は2章で説明したとおりである。また、熱収支は1日の積算値で示している。 $H_{estimate}$ の計算では、 Q_{other} の正負によって、 $H_{estimate} = C_p \rho \times Q_{other} \times T_s$ (Q_{other} が負、すなわち涵養)あるいは、 $H_{estimate} = C_p \rho \times Q_{other} \times T_{hp}$ (Q_{other} が正、すなわち流出)としている。 T_s は上下流の水温の平均、 T_{hp} には河床温度を用いた。

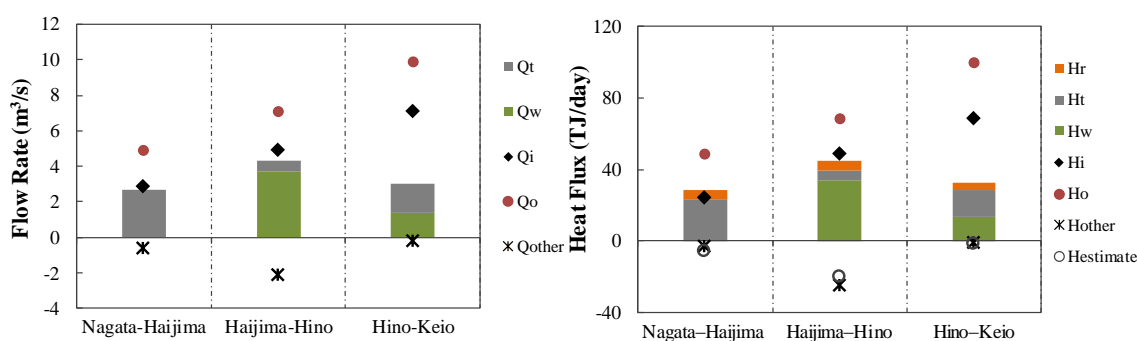


図 3.10 夏期における各区間の水収支と熱収支

永田橋-拝島橋間では、支川からの流入が水収支・熱収支のいずれにおいても支配的であるが、拝島橋-日野橋間では、下水処理水が最も大きな成分となっている。日野橋地点-京王線架橋間では、支川と下水処理水がほぼ同等に流入しており、熱量についてもあてはまる。いずれの区間でも Q_{other} が負の値となっているが、これらは取水及び地下水涵養の双方(あるいは片方)の影響を表している。

河川水温形成に及ぼす各種の水文気象要素の影響を、前章で用いたのと同様の手法で推定する。影響評価を行いたい要素の流量・熱量に対する影響を Q_f, H_f とすると、この影響がないと仮定した場合に各区間下流端から流出する水量と熱量をそれぞれ($Q_o - Q_f$)と($H_o - H_f$)によって求める。よって、この時の下流端水温 T'_o は前述の式(16)と同様に次式で表される。

$$H_o - H_f = C_p \rho (Q_o - Q_f) T'_o \quad (17)$$

Q_f, H_f の値には、図3.10で示した8月2日から8月3日までの24時間の測定結果を用い、支川流入(Q_t, H_t)、地下水涵養(gw)と取水(ww) (Q_{other}, H_{other})、下水処理水放流(Q_w, H_w)、水面及び河床を通じた熱流入(H_r)の影響を推定した(図3.11)。なお、 H_r は次式で定義される。

$$H_r = (R_{is} - R_{us} + R_{ld} - R_{lu} - J_s - J_l - J_{bed}) \times A \quad (18)$$

ここで、 A は水表面積である。これによると、水面と河床からの熱流入は、永田橋—拝島橋間、拝島橋—日野橋間、日野橋地点—京王線架橋間で、それぞれ、 3.0 、 2.0 、 1.5°C の水温上昇をもたらしていた。永田橋—拝島橋間の支川流入がなければ、下流側（拝島橋）での水温は実際よりも 4°C 以上高くなっていたはずである。また、下水処理水の放流は拝島橋—日野橋間で水温を 1.3°C 抑制する方向に働いていることがわかる。拝島橋—日野橋間で地下水涵養と取水による流量の減少が無いと仮定した場合には、下水処理水による温度低減効果が弱まるため、実測よりも約 1.4°C の温度上昇となることがわかる（真ん中の図の*）。過去の計測記録でも、拝島橋—日野橋間で実測の水温が低下する場合があったが、図 3.11 の結果は下水放流量と取水量・地下水涵養量の相対的な大小関係がこの現象に関与していることを示唆する。日野橋地点—京王線架橋間では、水面と河床からの熱流入以外の各要素の影響は上流の 2 区間に比べて小さく、水温は水面と河床からの熱流入に左右されることがわかる。以上示したように、簡易な評価ではあるものの、それぞれの水文気象要素が河川水温にどの程度、影響を及ぼしているのかを明らかにすることができた。

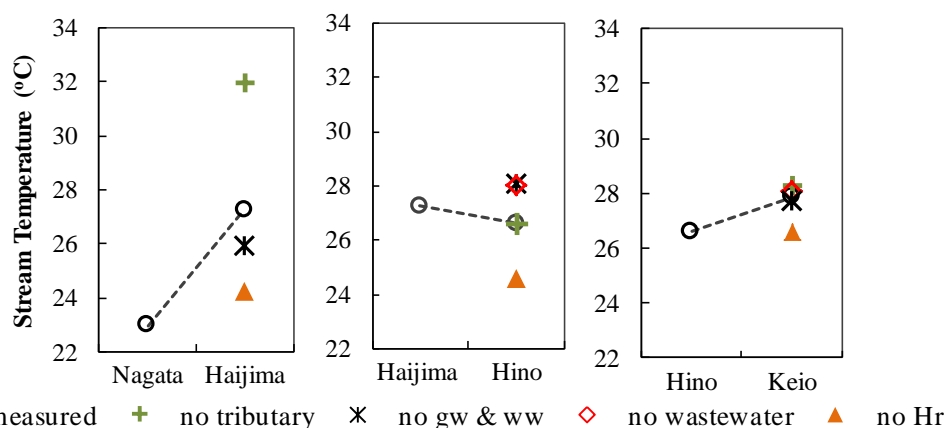


図 3.11 各区間における水温変化と各水文気象要素による影響の推定結果（2012 年 8 月）

(+ : 支川流入なし、* : 地下水涵養・取水なし、
◇ : 処理水放流なし、△ : 水面・河床の熱交換なし)

3. 2. 3 冬期（2013 年 2 月）の観測結果

冬期の集中観測における流量と水温の測定結果を図 3.12 に示す。夏期同様、拝島橋地点から下流に行くに従い、支川の流入及び下水処理水の放流によって、流量は増大する。日平均水温を見ると、拝島橋地点から日野橋地点にかけて大きく上昇しており、この傾向は過去のデータと類似している（図 2.5）。これは、この区間で流入する下水処理水によるものである。一方、日野橋地点から二子橋地点にかけては一旦低下した後、石原地点で極大化し、再び二子橋地点にかけて低下しており、この点でも過去のデータ（図 2.5）と類似している。石原地点から二子橋地点までの区間では処理水の流入がないことが低下の要因になっていると思われるが、詳しくは後述する。

冬期観測における河川水面上での熱収支を図 3.13 に示す。なお、図中の記号は図 3.9 と同様である。夏期に比べると、短波放射、長波放射の絶対量が小さい一方、水面からの顕熱輸

送量、潜熱輸送量が夏期よりも大きく推定されているのが特徴的である。なお、2/8の早朝以降、水面上の気象データが欠測しており、代わりに石原地点の計測データを J_s 、 J_l の推定に用いており、これが誤差要因となることが考えられるものの、感度分析によるとこれが大きな誤差にはならないことが確認された。

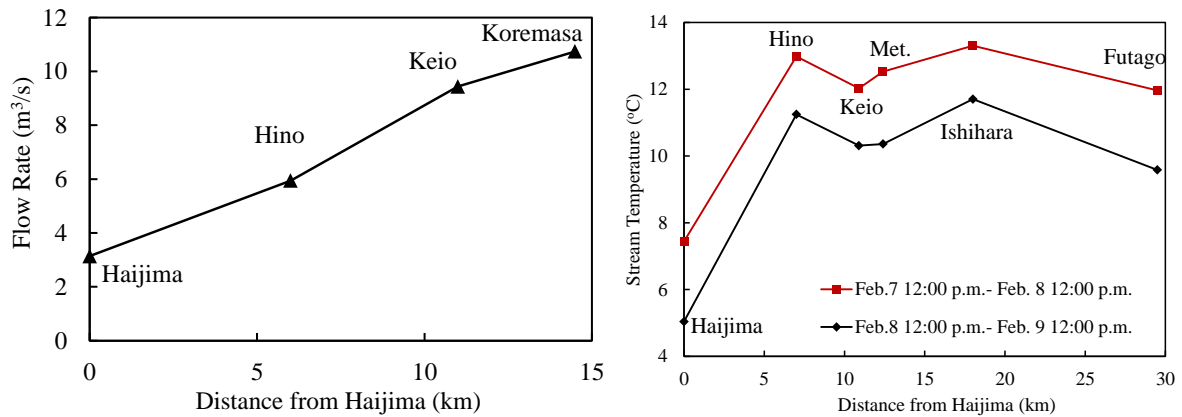


図 3.12 冬期集中観測時の測定結果（左：流量、右：河川水温の日平均値）

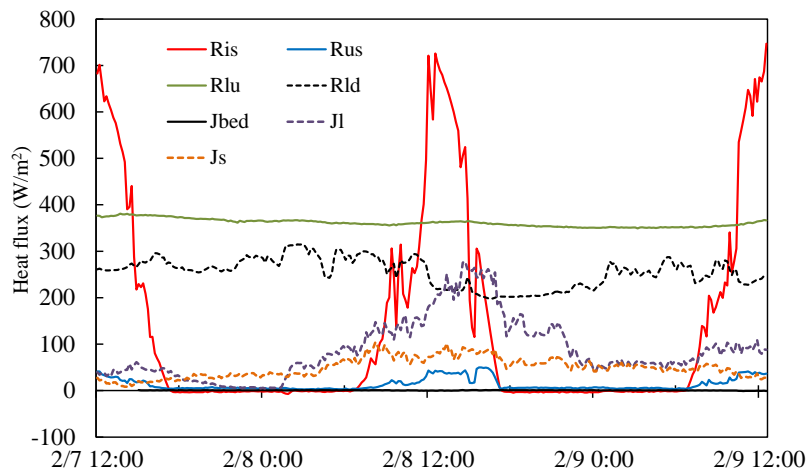


図 3.13 計測期間中の河川水面上の熱収支

計測データに基づき計算される 2013 年 2 月 7 日 18:00 から 2013 年 2 月 8 日 18:00 までの間の水・熱収支を本川 2 区間（拝島橋地点—日野橋地点、日野橋地点—京王線架橋地点）について図 3.14 に示す。なお、図中の記号の意味は、図 3.10 と同様で、熱収支は 1 日の積算値で示している。拝島橋—日野橋間での水量、熱量の増大のほとんどは下水処理水の流入によるものである。また、日野橋—京王線架橋間では、下水処理水流入に加えて、支川（浅川）の流入と地下水の河川への流出が増大要因となっていると推定される。また、大気・河床と水体との熱交換 H_r は負の値となっており、放熱により水温を低下させる方向に作用している。

夏期と同様に、式(17)に基づいて、各水文気象要素が河川水温に及ぼす影響を評価した(図 3.15)。水面・河床を介した熱流入 H_r が無い場合 (Δ) は現状 ($H_r < 0$ 、すなわち放熱状態) よりも水温が増大する。支川の流入が無い場合 (+) にも同様に水温が増大しており、支川流入により本川

水温は現状、低下していることを示す。一方、下水処理水の流入が無い場合（◇）は当然ながら水温が低下するが、拝島橋—日野橋間が4℃以上低下するのに比べ、日野橋—京王線架橋間は1℃弱の低下にとどまる。図3.12において日野橋—京王線架橋間で水温が低下傾向にあるのは、支川の流入量が処理水と同等程度存在する（図3.14）ことによると言える。また、図3.12の石原地点—二子橋地点間で水温が低下傾向にあるのは、処理水の流入が無い一方、支川の流入や水面・河床からの熱の放出が起こっている（ H_r が負の値、図3.14参照）からであると考えられる。

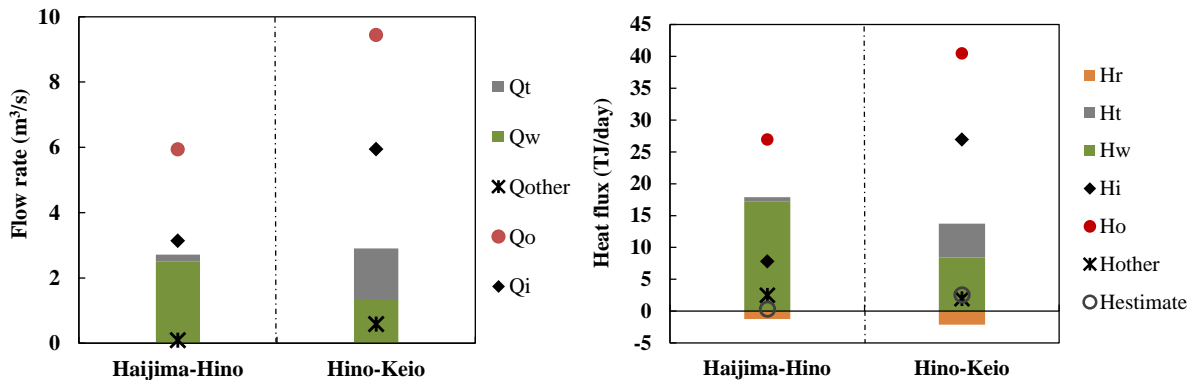


図 3.14 冬期における各区間の水収支と熱収支

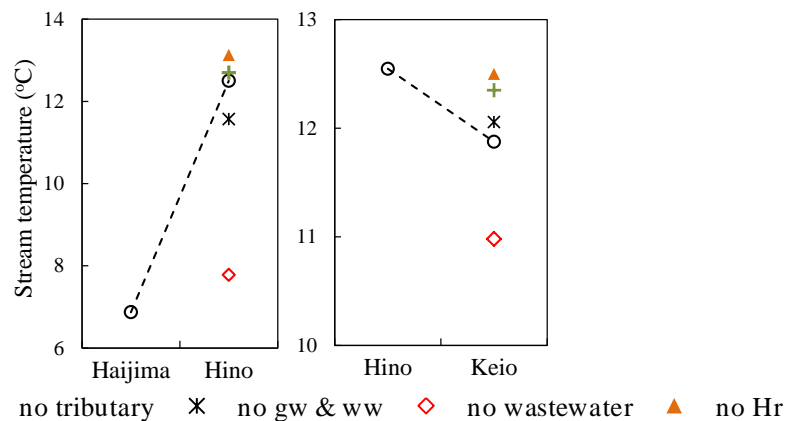


図 3.15 各区間における水温変化と各水文気象要素による影響の推定結果（2013年2月）

(+：支川流入なし、*：地下水涵養・取水なし、
◇：処理水放流なし、△：水面・河床の熱交換なし)

4. 結論

本研究では、多摩川の健全な水環境と生態系の保全に資するため、河川の基本的な水質指標であるとともに、都市化や人間活動の影響を受けやすい水温に着目し、その実態と形成要因について検討を行った。

第2章では、1990年から2010年までの過去20年間にわたる多摩川の水温の変化を調べるとともに、本川の水・熱収支を定量化し、取排水や水文気象要素が水温に及ぼす影響を分析した。その結果、多摩川では、長期的に、また、縦断的に河川水温が変化していることが同定され、ダム放流、河川水の取水、下水処理水の放流等の影響が示唆された。

多摩川中下流部の冬期の水温は、過去 20 年にわたって上昇しており、河川沿いからの下水処理水の放流による影響とみられた。夏期は、上流域において河川水温の縦断的に急激な上昇が見られ、取水による流量減少に起因すると見られた。気温と水温の関係から、上流の河川水温はダム放流により影響されていることが示され、下流の河川水温は気温とのかい離が大きいことから、下水処理水の放流の影響が強いとみられた。

水・熱収支分析の結果によると、拝島橋から石原地点に至る各区間において、河川の水量・熱量の主たる増加要因は下水放流水であり、地下水涵養や河川水の取水は熱量を減じる方向に働き、特に、夏期に顕著であった。支川からの流入は、ダム放流の熱的影響を軽減する方向に働き、水面と大気の熱交換は、冬期、夏期ともに、熱収支への影響はそれほど大きくなかった。

第 3 章では、連続モニタリングと集中観測の結果に基づきながら、現在の多摩川の水温実態について分析・考察した。現在の状況は、過去 20 年間の分析結果から得られた近年の状況と類似している特徴を示した。夏期においては、小作取水堰から拝島橋地点までの温度変化が急激であることが示された。一方、拝島橋地点から下流において、下水処理水は夏期の河川水の高温化を抑制すると同時に、水温の変動を平滑化する方向に作用していた。冬期においては、拝島橋一日野橋間で水温が大きく上昇することが確認され、その要因の大半が下水処理水の放流によることが示された。一方、支川流入が人為的影響を最小限に止められる可能性も示唆された。

謝辞

本研究の実施にあたっては、東京都下水道局流域下水道本部及び下水道局小河内ダム管理所より既存計測データを提供して頂きました。また、河川水温の連続計測・集中観測と河道内の気象計測にあたっては、国土交通省京浜河川事務所にご協力を頂きました。多摩川流域下水道内の水再生センター4ヶ所での放流水温連続計測では流域下水道並びに各水再生センターの方々の多大なるご協力を頂きました。データ解析や集中観測にあたっては研究室学生の仲谷知之君ほか学生諸氏に協力して頂きました。今回の計測・調査にご協力下さった多くの関係各位に、この場を借りて厚く感謝申し上げます。

最後に、本研究に多大なるご支援を下さるとともに貴重なご意見を下さったとうきゅう環境財団の審査委員の方々ならびに関係各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- Billman, E.J., Wagner, E.J., Arndt, R.E., 2006. Effects of temperature on the survival and growth of age-0 least chub (*Iotichthys phlegethontis*). *West. N. Am. Nat.* 66, 434-440.
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389-1406.
- Caissie, D., Satish, M.G., El-Jabi, N., 2007. Predicting water temperatures using a deterministic model: application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *J. Hydrol.* 336, 303-315.
- Eaton, J.G., McCormick, J.H., Goodno, B.E., O'Brien, D.G., Stefany, H.G., Hondzo, M., Scheller, R.M., 1995. A field Information-Based System for estimating fish temperature tolerances. *Fish.* 20, 10-18.

- Gulliver, J.S., Stefan, H.G., 1986. Wind function for a sheltered stream. *J. Environ. Eng.* 112, 387-398.
- Hebert, C., Caissie, D., Satish, M.G., El-Jabi, N., 2011. Study of stream temperature dynamics and corresponding heat fluxes within Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrol. Process.* 25, 2439-2455.
- Hockey, J.B., Owens, I.F., Tapper, N.J., 1982. Empirical and theoretical models to isolate the effect of discharge on summer water temperatures in the Hurunui River. *J. Hydrol. (N.Z.)* 21, 1-12.
- Kinouchi, T., 2007. Impact of long-term water and energy consumption in Tokyo on wastewater effluent: implications for the thermal degradation of urban streams. *Hydrol. Process.* 21, 1207-1216.
- Kinouchi, T., Yagi, H., Miyamoto, M., 2007. Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater. *J. Hydrol.* 335, 78-88.
- Kondo, J., 1994. *Meteorology of the water environment*. Asakura, Tokyo (in Japanese).
- Kuwagata, T., Kondo, J., 1990. Estimation of aerodynamic roughness at the regional meteorological stations (AMeDAS) in the central part of Japan. *Tenki.* 37, 55-59 (in Japanese).
- Macdonald, R.W., Griffiths, R.F., Hall, D.J., 1998. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.* 32, 1857-1864.
- Magnuson, J.J., Meisner, J.D., Hill, D.K., 1990. Potential changes in the thermal habitat of great lakes fish after global climate warming. *Trans. Am. Fish. Soc.* 119, 254-264.
- Mohseni, O., Erickson, T.R., Stefan, H.G., 1999. Sensitivity of stream temperature in the United States to air temperatures projected under a global warming scenario. *Water Resour. Res.* 35, 3723-3733.
- Mohseni, O., Stefan, H.G., Eaton, J.G., 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Clim. Chang.* 59, 389-409.
- Prats, J., Val, R., Dolz, J., Armengol, J., 2012. Water temperature modeling in the Lower Ebro River (Spain): Heat fluxes, equilibrium temperature, and magnitude of alteration caused by reservoirs and thermal effluent. *Water Resour. Res.* 48, W05523. doi: 10.1029/2011WR010379.
- Rahel, F.G., Keleher, C.J., Anderson, J.L., 1996. Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River Drainage of the Rocky Mountains: response to climate warming. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1116-1123.
- Sinokrot, B.A., Stefan, H.G., 1993. Stream temperature dynamics: measurements and modeling. *Water Resour. Res.* 29, 2299-2312.
- Sinokrot, B.A., Stefan, H.G., 1994. Stream water-temperature sensitivity to weather and bed parameters. *J. Hydraul. Eng.* 120, 722-736.
- Stefan, H.G., Hondzo, M., Eaton, J.G., McCormick, J.H., 1995. Predicted effects of climate change on fishes in Minnesota Lakes. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 121, 57-72.
- Webb, B.W., Clack, P.D., Walling, D.E., 2003. Water-air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. *Hydrol. Process.* 17, 3069-3084.
- Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrol. Process.* 22, 902-918.
- Webb, B.W., Zhang, Y., 1997. Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget.

Hydrol. Process. 11, 79-101.

川崎市上下水道局、環境計画年次報告書、平成 23 年度決算版.

立川市錦町下水処理場年報、平成 6 年度～平成 21 年度版.

東京都下水道局、事業概要平成 24 年版、2012.

東京都水道局、小河内貯水池管理年報、平成元年度～平成 24 年度.

多摩川の水温変化の実態と形成要因に関する研究

(研究助成・学術研究VOL. 42—NO. 305)

著者 木内 豪

発行日 2013年12月1日

発行者 公益財団法人とうきゅう環境財団

〒150-0002

東京都渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03) 3400-9142

FAX (03) 3400-9141

<http://www.tokyuenv.or.jp/>