

# 河川水温の形成過程に関する観測研究

## Observational Study on Formation Process of Stream Water Temperature

小葉竹重機\* 早坂文香\*\* 塩田挙久\*\*\* 堀井晃男\*\*\*

By Shigeki KOBATAKE, Fumika HAYASAKA, Takahisa SHIOTA and Akio HORII

In the alluvial channel, water temperature may be analyzed as a quasi-uniform longitudinal profile. In the upper stream, water temperature must be analyzed taking into account of both time and longitudinal variation. This paper describes the formation process of stream water temperature along channel course in a upstream using the observational results. Simultaneously, water temperature at a point in lower reach is analyzed. For the both cases, solar radiation and heat exchange between the stream bed and atream water play important roles. The difference between maximum and minimum temperature reaches 6 °C at lower reach in summer.

Keywords : Water temperature, longitudinal profile, Field observation

### 1. まえがき

われわれはこれまでに河川が周辺大気環境に及ぼす影響について、観測的・実験的研究<sup>1)・2)</sup>を続けてきた。その結果、河川の縦断方向に沿って風が吹く方が、河川の横断方向に風が吹くときよりも空気は冷却され、したがって、周辺への冷却効果も大きいことを見いだした。このことは、水温が周辺大気の冷却効果に大きな影響をもっているということであり、冷却効果を正しく算定するためには、河川水温を正確に把握する必要があることになる。

ところで、河川水温に関する研究は古くより数多く行われてきた。しかし、佐渡<sup>3)</sup>によれば、わが国における河川水温の研究は、稲作と水温の関係を中心として農学の分野で発展してきており、河川工学の分野ではほとんど取り扱われてこなかった。こうした状況の中で佐渡は、河川水温の予測と寒冷地河川における結氷日・解氷日の予測を最終目標として、河川水温の形成に関わる全ての要素を取り込んだ熱収支式を導くとともに、実河川における観測も平行して行い、熱収支の時間変化や各要素の割合について先駆的な研究を行っている。<sup>3)・4)・5)</sup> また、中村・高木等は<sup>6)</sup>、貯水池における水流動を正しくシミュレートするためには、入力としての河川水温の的確な把握が必要であるとの観点から、出水時における河川水温の変動について興味ある考察を行っている。彼らは降雨量、気温、溪流の流量と水温、雨水水温、トンネル横坑湧水量と水温の観測を行い、出水時における河川水温の形成には雨水水温の変動が主役を果たしている可能性があること

\* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科

(〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

\*\* 学生員 群馬大学大学院博士前期課程 (同上)

\*\*\* 群馬大学工学部学生 (同上)

を示した。一方国外でも、この間の事情はほぼ似た状況であり、ダム建造による水温低下の生態系への影響、森林伐採が水温に及ぼす影響などが、1960年代から1970年代にかけて盛んに取り扱われた。しかし、最近になって再び地球規模での気候変動が水温にどのように影響し、したがって、生態系にどのような影響を与えるか、という新たな観点から研究が行われている。Sinokrot等<sup>7)、8)</sup>は佐渡等と同様に河床伝熱量を取り込んだ熱輸送式を導き、観測結果も用いて各要素の大きさ、感度分析などを行っている。

本研究は、こうした従来の研究成果を利用し、また、実河川における観測も行って、河川水温の形成過程を明らかにしようとするものであるが、とくに、河川流下方向での水温形成について力点を置いたものである。すなわち、比較的大きな沖積河川となると日射が直接水面に到達するようになってからの流水の流下時間が長く、日射との関係で準一様流と考えた取扱い法が許され、独立変数としては時間のみを考えればよくなるが、溪流あるいは扇状地に出てからあまり流下距離のない小河川では、地形あるいは周囲の植生の影響でこのような取扱いは許されない。

本研究はこうした観点から、渡良瀬川本川での水温観測結果と、その支川である桐生川での観測結果を比較しながら、河川流下方向での水温形成過程について検討した結果である。

## 2. 実河川における観測

図-1は河川情報センターが提供している水質の観測所の位置図である。図中の番号は観測所番号であるが、このうちNo.1が渡良瀬川足利観測所であり、河川情報センターの端末で得られるここでの観測値を渡良瀬川の観測値とした。他の観測所の情報も以下の検討で用いている。

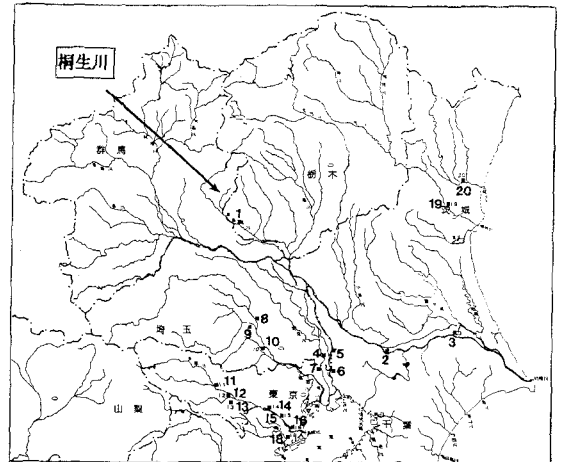


図-1 観測全体位置図

さて、この足利観測所から約8 km上流で合流する桐生川で、流下方向に沿って水温の観測を行った。図-2は観測点の位置関係を示したものである。桐生川ダム（貯水容量1,000万 $m^3$ ）の直下流を観測始点として、大きな支流の合流点を目安として図のように支流上2カ所、桐生川本川上に8カ所の観測点を設定した。各観測点において水温と流量を計測した。水温は精密型水銀温度計を使用し、流量は簡単な断面計測とプロペラ型流速計によって観測した。観測は一人が順次上流から下流に下って観測した。また、大学近くの中里橋観測点では二人常駐して水温、風速、気温、放射収支の計測を経時的に行った。放射収支は英弘精機（株）製放射収支計を使用した。

観測は平成6年7月29日、8月9日の2回行った。なお、8月9日の観測では前回と流量はほぼ同じ状況であると判断されたので流量計測は行っていない。

## 3. 観測結果

### 3. 1 流量観測結果

流量は水温の異なる流水が混合することによる水温変化を求めるために必要であり、支流が本川に合流する点の本川上・下流および支流上の3カ所で行う必要がある。しかし、対象とした合流点のうち上流の忍山川との合流点は谷が深く、合流点に

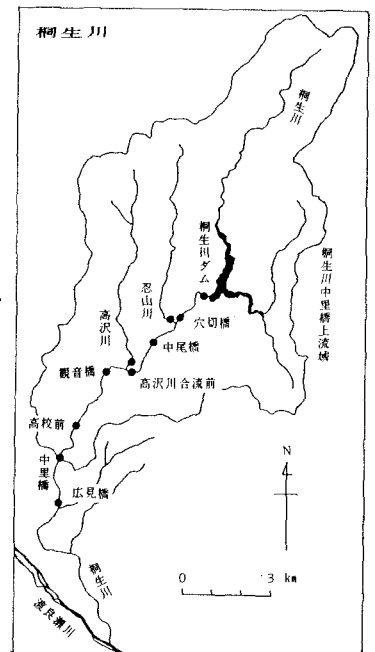


図-2 桐生川観測点位置図

近づくことができず、また下流の高沢川合流点では合流後の水深が深く断面計測を行うことができなかった。したがって、その代償として合流点から少し離れた箇所を観測点とせざるを得なかった。こうした意味で穴切橋は忍山川合流前、中尾橋は合流後、観音橋は高沢川合流後の代わりである。

さて、流量は前記のようにプロペラ流速計による流速計測と簡単な断面計測で行ったが、支流の2カ所では堰上で水深計測を行い、限界水深であると仮定して流量を求めた。表-1は各観測点の計測流量と流域面積およびダム直下流からの距離（本川上観測点のみ）の一覧である。また、これを図に示したものが図-3である。ただし、図-3では横軸に流域面積をとり、本川上観測点の結果のみを示した。なお、中里橋より下流は左右岸とも有堤区間であり、広見橋の流域面積は定義できないので面積の計測はしていない。また、中里橋は2筋ある流水部のうち水温計測したメインの方のみ流量を計測したので図-3には示していない。図-3から、流域面積と流量とはほぼ線形関係にあり、以後の混合水温の検討で、残流域からの流量推定にはこの比例関係を用いた。

### 3. 2 水温の観測結果

表-2は7月29日と8月9日の移動観測の結果を示したものである。7月29日は2サイクル、8月9日は3サイクルの観測を行った。支流の水温は低いことが分かる。ダムからの距離を横軸にとって、桐生川本川上の水温変化を図化したものが図-4～図-8である。図中の地点名のあとの括弧内の数字は観測した時刻である。流量測定を行った7月29日の第1回目の巡回を除いて、おおむね1サイクルには2時間程度を要する。

表-2 観測水温一覧表

| 観測点     | 7月29日      |             | 8月9日       |             |             |
|---------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
|         | 9:45～14:40 | 15:20～17:00 | 8:20～10:10 | 12:40～14:30 | 14:55～16:40 |
| ダム直下    | 22.50      | 23.00       | 23.80      | 24.00       | 24.00       |
| 穴切橋     | 22.70      | 22.70       | 23.50      | 24.50       | 24.30       |
| (支) 忍山川 | 20.10      | 20.50       | 20.80      | 22.10       | 22.50       |
| 中尾橋     | 22.60      | 22.50       | 23.10      | 24.80       | 24.60       |
| 高沢川合流前  | 22.55      | 22.70       | 23.10      | 25.00       | 25.00       |
| (支) 高沢川 | 19.90      | 20.10       | 20.90      | 21.85       | 21.80       |
| 観音橋     | 22.20      | 22.50       | 22.95      | 24.50       | 24.40       |
| 高校前     | 23.40      | 23.10       | 23.80      | 26.00       | 25.20       |
| 中里橋     | 24.60      | 23.80       | 24.20      | 27.60       | 26.70       |
| 広見橋     | 25.00      | 24.95       | 25.50      | 28.70       | 27.80       |

表-1 観測点諸元

| 位置     | 流量<br>(m³/s) | 距離<br>(km) | 面積<br>(km²) |
|--------|--------------|------------|-------------|
| ダム直下   | 1.33         | 0          | 42.33       |
| 穴切橋    | 1.47         | 1.43       | 44.08       |
| 忍山川    | 0.123        | —          | 8.85        |
| 中尾橋    | 1.65         | 2.48       | 57.14       |
| 高沢川合流前 | 1.91         | 3.81       | 62.70       |
| 高沢川    | 0.166        | —          | 13.13       |
| 観音橋    | 2.29         | 4.54       | 78.50       |
| 高校前    | 2.37         | 6.57       | 84.16       |
| 中里橋    | 1.71         | 7.97       | 87.04       |
| 広見橋    | 2.16         | 9.57       | —           |

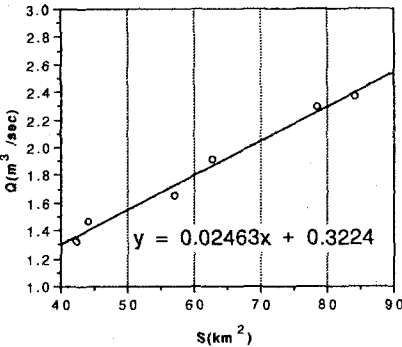


図-3 流域面積と流量の関係

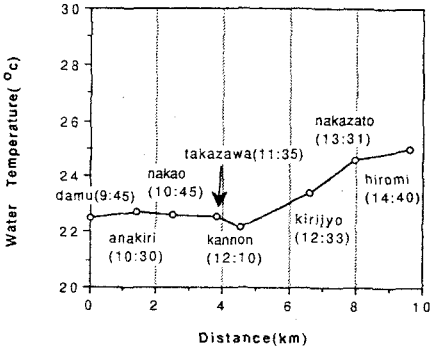


図-4 7月29日1回目観測結果

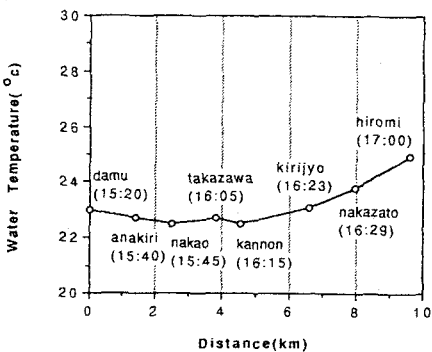


図-5 7月29日2回目観測結果

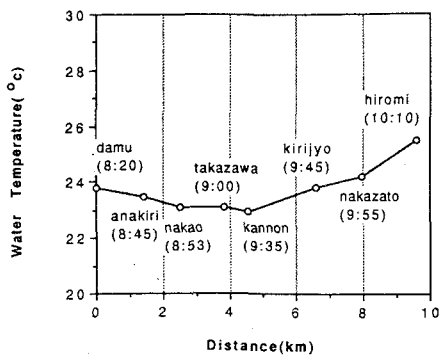


図-6 8月9日1回目観測結果

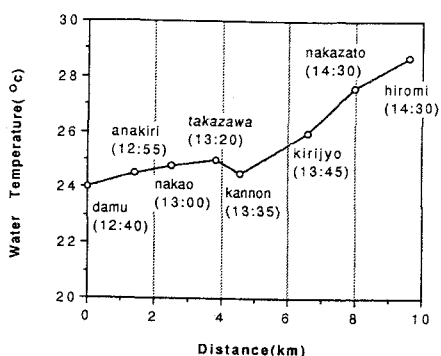


図-7 8月9日2回目観測結果

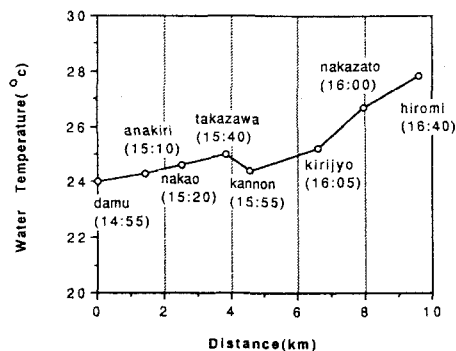


図-8 8月9日3回目観測結果

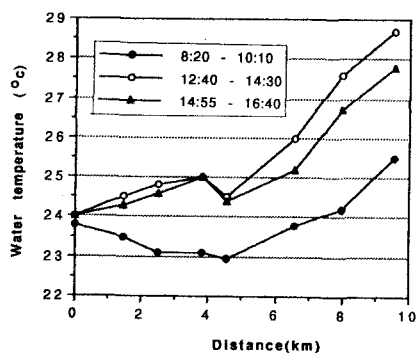


図-9 8月9日観測結果の同時表示

日射の強かった8月9日の3サイクルの図を重ねて示したものが図-9である。東側に山があり谷も深い観音橋までは、午前中は流下に従って水温が低下し、水面に日射があるようになってからは、高沢川合流の影響を受ける観音橋を除いて、全川にわたって水温が上昇することがわかる。また、ダム直下流では水温の経時変化が小さいことが分かる。

図-10、図-11はそれぞれ7月29日と8月9日の中里橋における経時的な水温、正味放射量、渡良瀬川足利観測所水温を示したものである。7月29日は曇天で、午後3時から4時にかけて一時小雨があった。したがって正味放射量も小さく、午後3時～4時にかけて正味放射はマイナスの値をとっている。桐生川での水温上昇は3℃程度、渡良瀬川では2℃程度である。水温のピーク時刻は桐生川が午後2時であるのに対して、渡良瀬川では午後3時～4時となっており、1時間から2時間の時差がある。

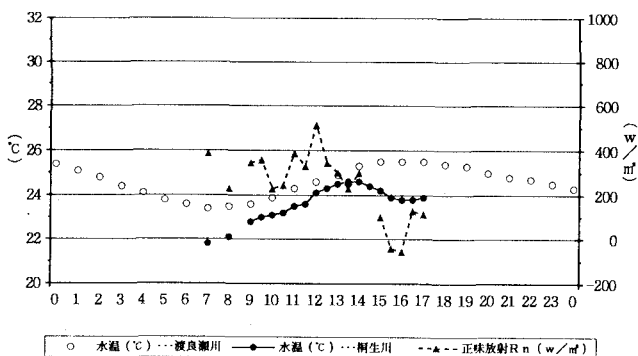


図-10 7月29日中里橋における経時的観測結果

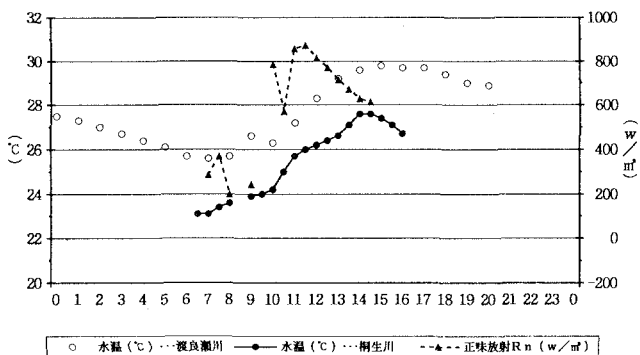


図-11 8月9日中里橋における経時的観測結果

8月9日は日射も強く正味放射量はピークの11時30分には $900\text{W/m}^2$ に達している。桐生川での水温上昇は $4.5^\circ\text{C}$ 、渡良瀬川でも $4.2^\circ\text{C}$ となっている。水温のピークは桐生川で午後2時、渡良瀬川で午後3時となっ

ている。

以上の観測結果に基づき、流水の流下に伴う水温形成について考察を行う。

表-3 関東地方河川水温（7/29, PM1:00）

4. 流下に伴う水温形成

表-3は図-1に示した水質観測所における7月29日午後1時の水温である。河川情報センターの端末から得られるもので、空欄は欠測である。この表から観測所位置と水温との関係を見ると、河川上流ほど水温は低く、下流では28.5℃前後（北に位置する那珂川、久慈川および潮汐の影響を受ける区間を除く）でほぼ同じ値となっていることが読み取れる。このことから前述のように下流では準一様流とした取扱いが許され、上流では流下に伴う変化を考慮する必要があることが分かる。

さて、図-4～図-8および正味放射も示している図-10、図-11から、水温の低い支流の合流による水温低下と、日射による水温上昇との組合わさった効果を見てみる。まず、7月29日は前記のように曇天であり、正味放射は午前中は200～400w/m<sup>2</sup>程度であり、午後はさらに小さくなり、小雨のあった15時～16時にかけてはマイナスの値となっている。中でも図-4中に示す比較的日射のあった10時～12時に行ったダム直下から高沢川合流前までの観測結果では、支流の合流による水温低下の効果と日射による水温上昇の効果がほぼ相殺して、この区間ではほぼ一定の水温となっている。ただし、これは同一時刻における水温分布がほぼ一様という意味ではなく、ある水塊に着目したときの流下に伴う変化が少ない、という意味である。（観測点距離と観測時間差から求めた観測スピード約60cm/sは、ほぼこの間の流水の平均流速に等しい）日射の弱くなった午後および8月9日の1回目の観測（図-6）では、支流の合流による水温低下が顕著である。8月9日の1回目の観測では、前述のようにこの時間帯では南北に流れる溪谷では日射がないことによる。

ここで、簡単に支流の合流による水温低下について検討しておく。表-4は日射の影響の少ないと考えられる8月9日第1回目の観測結果を用いて、支流あるいは残流域からの流入による水温低下を計算した結果である。ここで、残流域からの流入水の水温は支流で観測した水温に等しいとし、流量は流況の変化はないものとして7月29日の観測流量を用いている。観測値と計算値はよく一致しているが、中尾橋以後が少し観測値が高いのは気温上昇等の気象条件に起因する上昇と考えられる。

表-4 支流合流による水温低下の検討

| 区間         | 上流側観測値 |       | 支流観測値 |       | 残流域条件 |       | 下流側観測値 |       | 計算水温  |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|            | 流量     | 水温    | 流量    | 水温    | 流量    | 水温    | 流量     | 水温    |       |
| ダム直下～穴切橋   | 1.330  | 23.80 |       |       | 0.140 | 20.80 | 1.470  | 23.50 | 23.51 |
| 穴切橋～中尾橋    | 1.470  | 23.50 | 0.123 | 20.80 | 0.057 | 20.80 | 1.650  | 23.10 | 23.20 |
| 中尾橋～高沢川合流前 | 1.650  | 23.10 |       |       | 0.260 | 20.80 | 1.910  | 23.10 | 22.79 |
| 高沢川合流前～観音橋 | 1.910  | 23.10 | 0.166 | 20.9  | 0.214 | 20.90 | 2.290  | 22.95 | 22.73 |

単位 流量 (m<sup>3</sup>/s) 水温 (℃)

さて、つぎに日射の影響も含めた熱収支について検討を行う。まず、一次元の基礎方程式は次式で与えられる。<sup>3), 7)</sup>

$$A \partial T / \partial t + \partial (Q \cdot T) / \partial x = \partial (A \cdot D \cdot \partial T / \partial x) / \partial x + B \cdot S / \rho C_p \tag{1}$$

ただし、 $S = S_a + S_s$ ,  $S_a = H_s - H_L - H_e - H_c$

ここに、A：河積、T：水温、Q：流量、D：拡散係数、B：河幅、S：全熱収支量、 $\rho$ ：水の密度、 $C_p$ ：定圧比熱、 $S_s$ ：河床を通じての熱輸送量、 $H_s$ ：太陽からの短波放射量、 $H_L$ ：天空からと地上からの長波放射の収支量、 $H_e$ ：潜熱、 $H_c$ ：顕熱、である。

単位幅当たりで表し、平均流速 $U$ の変化は小さく、 $D$ も一定とすると、(1)式は次式のように簡略化される。

$$\partial T / \partial t + U \cdot \partial T / \partial x = D \cdot \partial^2 T / \partial x^2 + S / (\rho C_p h) \quad (2)$$

(2)式に基づいて、図-7のケースについて各項のオーダーの検討を行ってみる。

図-9は同一時刻の観測値を結んだものではないので断定的には言えないが、4.6kmの観音橋から最下流の広見橋の間では $\partial T / \partial x$ はほぼ直線となり、各時間帯で勾配そのものは若干変わるものの、 $\partial (\partial T / \partial x) / \partial x = 0$ と仮定できそうである。そのときの $\partial T / \partial x$ の値は、図-9より観音橋での午後1時35分の観測値24.5℃と中里橋の経時的観測における同時刻の値27.0℃から $\Delta T / \Delta x$ として求めると、 $2.5^\circ\text{C} / 3.43\text{km} = 0.729^\circ\text{C} / \text{km}$ となる。また、 $\partial T / \partial t$ についても同様に、観音橋ではこの時間帯では変化なし、図-11より中里橋で $0.5^\circ\text{C} / 30\text{min}$ として、その平均を用いると $1.389 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$ となる。平均流速 $U$ としてこの間の平均値 $0.7\text{m} / \text{s}$ を用いると、結局(2)式の左辺は $6.492 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$ となり、これが右辺の全熱収支量の項と等しくなる。右辺の $S$ 中の各項については、短波と長波を合わせた収支は観測放射収支から $660\text{W} / \text{m}^2$ 、顕熱はバルク式より約 $20\text{W} / \text{m}^2$ （符号は+で大気から水への熱の移動）、潜熱は約 $100\text{W} / \text{m}^2$ （符号は-で水から大気への移動）となり、水深 $h$ を $0.3\text{m}$ とすれば、結局、河床から約 $230\text{W} / \text{m}^2$ の熱を受けていることになり、この時間帯の収支としては明らかにおかしい結果となる。さらに詳細な検討を加える必要があるが、興味ある検討課題である。

## 5. あとがき

観測結果に基づき空間的に一様流とみなせない河川での水温形成過程を検討した。得られた結果を要約すると以下のようなものである。

- 1) 大きな河川の下流側では水温はほぼ一様となり、時間のみを独立変数とした準一様流的取扱いが許されるようである。
- 2) 山地河川あるいは沖積地に出て間のない河川では空間的にも水温は変化する。もし、本川の水温が高い場合には支流の合流によって水温は低下するが、その見積りは単純な完全混合の計算で十分である。
- 3) 前記のような小河川では、水温形成に日射と河床伝熱量が主要な役割を果たす。正確な河川水温を推定するには河床伝熱量の算定が重要である。

最後に、端末を貸与して頂いている河川情報センターに深甚なる謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 小葉竹他：河川周辺の気環境に関する観測研究、水工学論文集、第37巻、平成5年
- 2) 小葉竹他：風洞を用いた河川周辺の気環境に関する実験的研究、水工学論文集、第38巻、平成6年
- 3) 佐渡公明：河川水の熱収支に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第330号、1983年3月
- 4) 佐渡公明：河川水の全熱収支量とその近似値に関する研究、水理講演会論文集、第27巻、1983年2月
- 5) 佐渡・中尾：河川水温に対する河床伝熱量の影響について、水理講演会論文集、第27巻、1983年2月
- 6) 宮本・小林・中村・高木：出水時における河川水温の変動、水理講演会論文集、第27巻、1983年2月
- 7) B. A. Sinokrot and H. G. Stefan : Stream Temperature Dynamics -Measurements and Modeling-, Water Resources Research, Vol. 29, No. 7, July, 1993
- 8) B. A. Sinokrot and H. G. Stefan : Stream Water-Temperature Sensitivity to Weather and Bed Parameters, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 6, June, 1994