

# 都市内河川周辺の夏期の熱環境

Summer heat environment in surrounding region of urban rivers

武若 聡\* ・ 平山孝浩\*\* ・ 池田駿介\*\*\*

島谷幸宏\*\*\*\* ・ 萱場祐一\*\*\*\*\* ・ 財津知亨\*\*\*\*\*

By Satoshi TAKEWAKA, Takahiro HIRAYAMA, Syunsuke IKEDA,  
Yukihiro SHIMATANI, Yuichi KAYABA and Tomoyuki ZAITSU

Meteorological field observations were conducted at Ara-river in summer to evaluate the effect of urban rivers on microclimate of the adjacent city region. The observation in the river course consists of measurements on velocity, temperature and humidity profiles by using captive balloons and measurements on momentum, heat and vapor fluxes performed on flood plain and water body. The development of internal boundary layers on vegetated flood plain and water surface associated with cooling of the atmosphere were observed. The role of flood plain and water body in heat exchanging process are discussed based on the results of the flux measurements.

Keywords : heat environment, microclimate, urban river, field observation

## 1. 緒言

都市内の気温はヒートアイランド現象により高温に保たれている。夏期には、電力需要の逼迫、熱帯夜の増加といった弊害が顕著となっている。これに対して、都市内に存在する水面・緑地を利用して気象環境を改善する提案が古くからなされている。しかしながら、個々の改善の詳細なプロセスと効果についての議論は定性的なものが多い。

本研究では都市内河川に着目し、河川が周辺市街地の気象、特に熱環境に及ぼす影響を、観測データ解析を通じて明らかにする。これまでも都市内河川周辺の気象観測<sup>1), 2), 3)</sup>は行われているが、得られた結果は気温、湿度分布等の観測結果の提示に留まっている場合が多い。ここでは、定点観測データを用いて、夏の河川周辺のマクロな気温特性、すなわち、河川周辺市街地の気温が河川の影響を受けて低下していることを示す。また、河道内の詳細気象観測により、大気が河川上で冷却されるプロセスを明らかにし、河川を構成する高水敷と水面の気象学的な役割を定量的に評価する。以上の解析を通じて、河川の気象学的な影響が周辺市街地の熱環境に及ぼす影響の全体像を明らかにする。

---

|       |      |    |                |          |                        |
|-------|------|----|----------------|----------|------------------------|
| *     | 正会員  | 工博 | 東京工業大学助手       | 工学部土木工学科 | (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1) |
| **    | 学生会員 |    | 東京工業大学大学院生     | 土木工学専攻   |                        |
| ***   | 正会員  | 工博 | 東京工業大学教授       | 工学部土木工学科 |                        |
| ****  | 正会員  | 工修 | 土木研究所都市河川研究室室長 |          | (〒305 茨城県つくば市大字旭1 番地)  |
| ***** | 正会員  | 工修 | 土木研究所都市河川研究室   |          |                        |
| ***** |      |    | 東京工業大学学部生      | 工学部土木工学科 |                        |

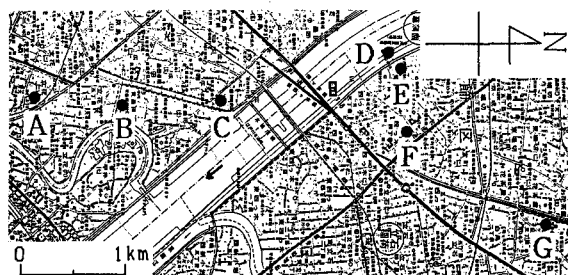


図-1 定点観測地点

## 2. 河川周辺の気温特性

本章では土木研究所都市河川研究室が1年間(1986年4月-1987年3月)にわたり、東京都荒川周辺(四つ木大橋付近、葛飾区及び墨田区)にて収集した定点観測気象データを用いて、都市内河川周辺の気温特性について論じる。定点観測が行われた地点を図-1に示す。各観測地点(A~G)には百葉箱を設置し、気温、湿度、風向、風速を30分毎に測定した。観測方法の詳細については文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

著者らによるこれまでの研究<sup>4)</sup>で、夏期・日中の河道内の気温上昇量が周辺市街地の平均的な気温上昇量に対して低く抑えられていること、さらに、風の吹送によりこの影響が、河川の風下側に位置する市街地に及ぶことが明らかにされている。ここでは、新たに河道内の気象条件と風下側市街地に及ぶ気温低下の関連を示す。

解析には8月の日中・晴天時に得られたC(右岸), D(河道内), E(左岸)地点の気温( $T_D, T_C, T_E$ ), D地点の風向・風速( $U$ ), 岩淵水門(観測地から約11km上流)で計測された河川水温( $T_w$ )を用いる。風が河川を横断的に吹いた時の吹送方向の気温変化量 $\Delta T_{CE}(=T_C-T_E$  or  $T_E-T_C$ , 吹送方向に低下した時に正に定義)とD地点の風速 $U$ と河道内の気温・水温差 $\Delta T_D(=T_D-T_w)$ の積 $U \cdot \Delta T_D$ の関係を図-2に示す。気温変化量 $\Delta T_{CE}$ と $U \cdot \Delta T_D$ の間には比例関係が認められる。 $U \cdot \Delta T_D$ は河道内に生じていた鉛直方向熱フラックスをバルク法的に代表した量であり、正值の時には大気から水面へ熱が移動していたと考えられる。図-3には8月13日の $\Delta T_{CE}$ と $U \cdot \Delta T_D$ の日変化を示す。風向が河道にはほぼ平行になった時間帯には $\Delta T_{CE}$ が定義できないためにデータが欠落している。気温低下量と $U \cdot \Delta T_D$ の日変化には対応関係が認められ、日中に大きな値を示す。このことは他の晴天日においても同様であった。

以上の解析から、河川の風下側に位置する市街地の気温が低下していること、この低下量は日中に最大となり、河道内の気象条件(気温、水温、風速)と強い関連があることが明らかにされた。

## 3. 河道内の気象観測

本章では河道内で実施した詳細気象観測結果から、大気が河川上で冷却されるプロセスを明らかにする。係留気球の観測により、大気下層が冷却される様子をマクロ的な視野から捉え、高水敷、水面上で行った観測より、これらの面が大気冷却に果たす役割を定量的に評価する。

### 3. 1 観測の概要

観測は東京都足立区荒川(西新井橋~千住新橋, 13.25km地点)に於て、1992年7月29日(5時~20時30分)に実施した。当日の関東地方は太平洋高気圧に覆われ、海陸風の入替わりが明確に認められた典型的な梅雨明後の晴天夏日

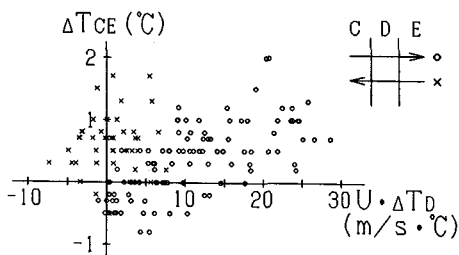


図-2 気温変化量と河道内の風速・気温・水温の関係

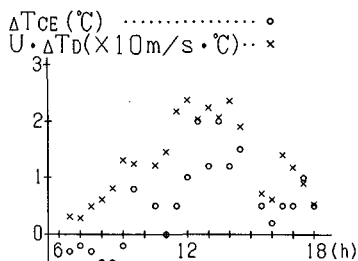


図-3 気温変化量と河道内の風速・気温・水温の日変化

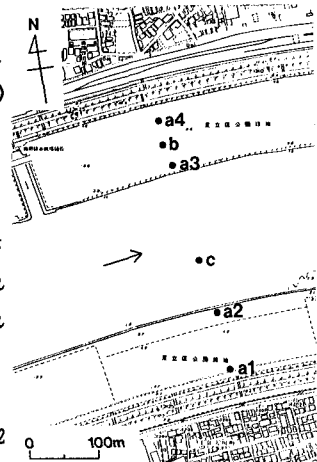


図-4 観測機器の配置

であった。観測項目・

方法、データの整理方法を表-1に、河道内の観測機器の配置位置を図-4に示す。観測地での河道の向きは東西方向であり、陸風(北風)、海風(南風)が河川をほぼ直角に横断して吹送する状況が午前と午後

に捉えられた。高水敷上で観測された気温、水蒸気量、風向および風速の日変化を図-5に示す。風向に着目すると、観測を実施

表-1 観測項目・方法

| 観測地点                         | 観測項目         | 測定高さ、深さ(m)                  | 観測機器                 | 観測間隔 | データ処理         |
|------------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------|------|---------------|
| a 1, a 2, a 3, a 4<br>(係留気球) | 風速           | 1, 2, 5, 10, 15             | 三杯式風速計               | 1 時間 | 各高さ 1 分平均     |
|                              | 気温・湿度        | 20, 30, 40, 50, 60          | 白金温度計・<br>高分子誘電率式湿度計 | 1 時間 | 各高さ 1 分平均     |
| b<br>(高水敷上)                  | 風向・風速        | 2.08                        | プロベラ式風向風速計           | 30分  | 30分平均         |
|                              | 風速           | 0.19, 0.40, 0.79            | 熱線風速計                | 30分  | 30分平均         |
|                              | 気温・湿度        | 1.63, 2.80, 5.00            |                      |      |               |
|                              | 気温・湿度        | 0.18, 0.60, 1.20            | 白金温度計・<br>高分子誘電率式湿度計 | 30分  | 30分平均         |
|                              | 風速3成分・<br>気温 | 0.85                        | 超音波風速温度計             | 1 時間 | 30分平均<br>(乱れ) |
|                              | 放射収支         | 1.75                        | 放射収支計                | 30分  | 30分平均         |
|                              | 下向き放射量       | 1.75                        | 放射収支計                | 30分  | 30分平均         |
|                              | 日射量          | 1.83                        | 日射計                  | 30分  | 30分平均         |
|                              | アルベド         | 1.60, 1.50                  | 日射計×2                | 30分  | 30分平均         |
|                              | 地表面温度        |                             | 放射温度計                | 15分  | 直読平均値         |
| c<br>(水上)                    | 地中伝導熱        | 4, 12, 21(cm)               | 熱流計                  | 30分  | 30分平均         |
|                              | 地中温度         | 1, 3, 5, 10, 15, 25, 40(cm) | サーミスタ温度計             | 15分  | 直読平均値         |
|                              | 風速           | 1.25, 2.25                  | 熱線風速計                | 30分  | 30分平均         |
|                              | 気温・湿度        | 1.25, 2.25                  | 白金温度計・<br>高分子誘電率式湿度計 | 30分  | 30分平均         |
|                              | 水表面温度        |                             | 放射温度計                | 15分  | 直読平均値         |
|                              | 水温           | 0.5, 1.0, 2.0, 3.0          | サーミスタ温度計             | 15分  | 直読平均値         |

した間は(A)北風(陸風)が卓越する5時から9時30分、(B)風向が一定とならず、かつ風速が弱い10時から12時、(C)南風(海風)が卓越する12時30分から20時30分の時間帯に分けられる。気温は正午頃に最大となる日変化を示したのに対して、水蒸気量には明確な日変化が見られなかった。

### 3. 2 河道内の風速、気温、水蒸気量の鉛直分布

ここでは、係留気球の観測結果の解析から、大気が河道上で冷却される状況をマクロな視野から捉える。図-6(a), (b), (c)に時間帯(A), (B), (C)に得られ

た代表的な風速(U)、気温(T)、水蒸気量(q)分布を示す。時間帯(A)および(C)では河道内に発達する内部境界層が明確に捉えられている。以下に各時間帯の観測結果の特徴について記す。

・時間帯(A)(北風、陸風時)：風速は全般に小さい(<4m/s)。市街地から流入した大気の下層は風上から風下側に吹送するにつれて加速する。これは市街地と河道内の粗度の差により生じたものと考えられる。気温分布には大気下層が左岸高水敷、水面上を吹送する間に冷却され、右岸高水敷上で加熱される様子が捉えられている。大気は高度30m程度まで冷却されている。水蒸気量は地表近くで多くなるが、明確な鉛直分布は認められない。

・時間帯(B)(風向は一定しない)：風速は非常に小さく、かつ鉛直分布は一様化している。気温分布の下層は水面に近い測定点で低くなっているが、上空の分布に特徴はない。水蒸気量の分布は一様化している。風況、気温分布から判断してこの時間帯の場は自然対流状態にあったと考えられる。

・時間帯(C)(南風、海風時)：時間帯(A)と同様に、大気の下層は河道内を吹送する間に加速する。観測結果には、右岸の高水敷上、水面上で加速し、左岸高水敷上で減速する様子が捉えられている。気温の鉛直分布にも午前中と同様、大気下層が冷却される様子が捉えられており、時間帯によっては中立～安定な成層が形成される。大気下層には、水面上を吹送する間に水蒸気が供給されるのに対して、高水敷上の分布形の変化は小さい。この時間帯では常に顕著に観察された次のような現象があった。上空(30m)の気温鉛直分布に着目すると、a2地点で高い測定値が得られている。これは、河道に流入してきた大気の気温分布が、内部境界層の発達により変形するといったことでは説明不可能であり、何らかの熱の移流により生じた結果と考えざる

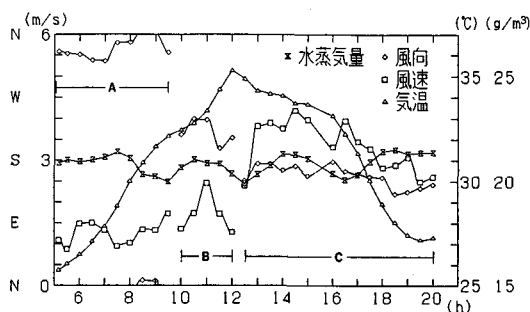


図-5 高水敷上で観測された風向、風速、気温、水蒸気量の日変化

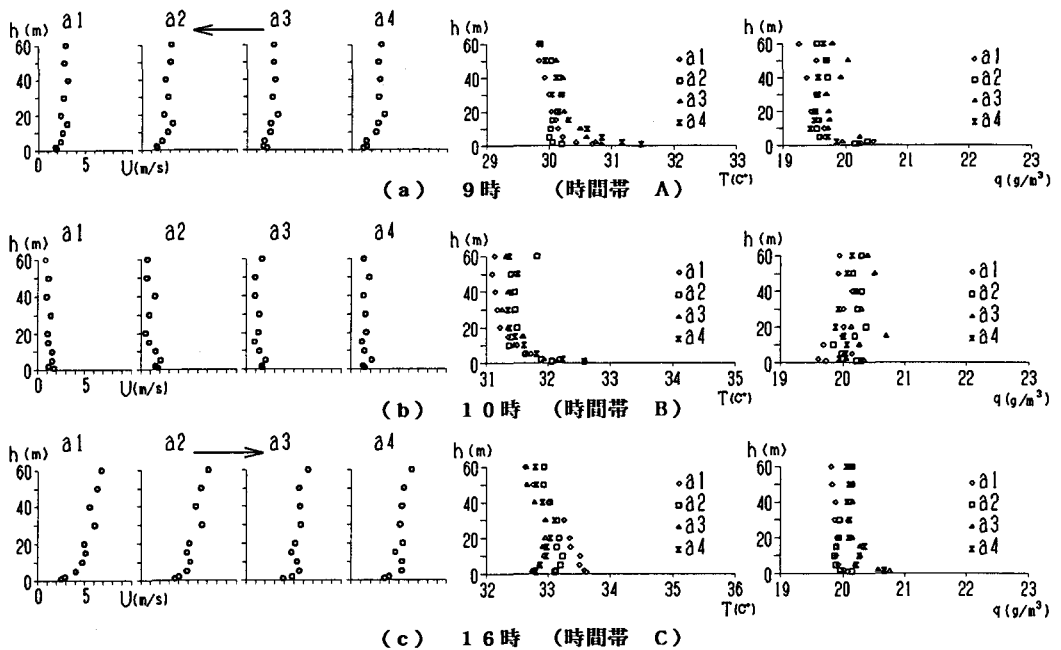


図-6 気球観測による風速，気温，水蒸気量鉛直分布

得ない。ただし，現時点では移流の形態，規模等については不明である。

河川周辺市街地の気温は，河道内で冷却された大気下層の気塊が侵入することにより，低下していると考えられる。気温の鉛直分布から判断して，内部境界層の発達高さは約30m程度であり，この層の市街地での挙動が，河川により暑熱環境が改善される規模を決定していると考えられる。

### 3. 3 大気が河川上で交換する熱量

前節では，大気が河川上を横断する形で吹送すると吹送方向に気温が低下することを明らかにした。ここでは，この気温低下量をトラバース法により見積り，河川の大気冷却量について議論する。河道流下方向に一樣な現象が生じていたとすると，単位時間・面積当りの熱フラックスに換算した，大気が河川上で失った熱量  $F$  を，河道内の両端(a1, a4地点)の気温  $T$ ，風速  $U$  の測定結果から，以下の式で計算できる。

$$F = \rho C_p / L_F \int_0^\delta (U_d T_d - U_u T_u) dz \quad (1)$$

ここに  $\rho$ ， $C_p$  は空気密度と比熱， $L_F$  は a1-a4 地点間吹送距離， $\delta$  は積分上限高さ， $z$  は鉛直上向きの座標であり，添字  $u, d$  はそれぞれ，風上，風下側に位置する気球の測定値を示す。大気が冷却された時に  $F$  は負となる。ここで，この方法により見積られる  $F$  の意味について，図-7に示すような状況を例に考える。市街地から風速，気温分布が平衡状態に達した大気が流入し，河道内に内部境界層が発達する状況を考える。市街地上では地表面と上空での熱フラックス  $f_c$  が等しく，平衡な気温分布が形成されている。河道内表面(水面+高水敷)の平均的な熱フラックス(顕熱)を  $f_r$ ，また，上空は風上側境界層の性質が支配的であるとして，ここでの熱フラックスを  $f_c$  とすると，検査面に流入出する熱量の収支から

$$F = f_r - f_c \quad (2)$$

の関係が得られる。これより，トラバース法により見積られる  $F$  は，河道内外の表面熱フラックスの差に相当する量であることがわかる。

図-8に時間帯(A)と(C)の  $F$  を示す。ここで積分の上限  $\delta$  は30mに設定した。この値は，気温分布から判断した内部境界層発達高さが概ね30m以下であったこと，また，河道上空で何らかの移流による熱輸送が生じていたことを考慮して定めた。  $F$  の絶対値は， $\delta$  を30mから60mまで変化させたと，2割程度大きくなったが，日変化の傾向は同じであった。  $F$  の値は正午過ぎに最大(絶対値)となっている。午前中の時間帯では吹送方

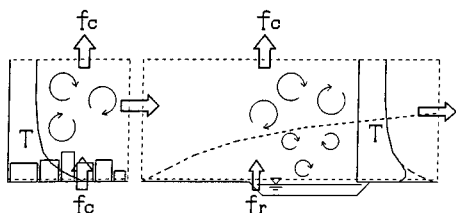


図-7 概念図

向に明確な気温低下が見られたにもかかわらず、大気が交換した熱量は午後からの時間帯に比較して小さかった。これより、河道外に及ぶ冷却効果は午後に大きくなることが予想される。これは、観測地は異なるものの、前章の定点観測で得られた結果を支持するものである。

### 3. 4 高水数および水面上の顕熱量

都市上を吹送してきた大気が河川(高水数+水面)上で失う熱量は、市街地と高水数/水面の顕熱量の差によって定まることが前節で示唆されている。ここでは高水数および水面上の顕熱量を求め、各表面の熱的特性を熱収支解析を通じて評価し、これらの表面が大気冷却に果たす役割を議論する。熱収支解析では対象とする表面に流入出する熱量、即ち正味放射量( $R_{net}$ )、顕熱量( $H$ )、潜熱量( $1E$ 、 $1$ は水の気化熱、 $E$ は蒸発量)および地中/水中熱伝導量( $G$ )のバランス

$$R_{net} = H + 1E + G \quad (3)$$

を考える。左辺の正味放射量は表面が獲得する放射エネルギーであり、以下の式で表される。

$$R_{net} = (1-\alpha)S + L - \sigma T_s^4 \quad (4)$$

ここに、 $S$ は日射量、 $L$ は大気からの長波放射量、 $\alpha$ は表面のアルベド、 $T_s$ は表面温度、 $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数である。

(a)高水数上の顕熱量と熱収支：高水数上では、 $R_{net}$ は直接測定により、 $H$ 、 $1E$ は風速、気温および水蒸気量の鉛直分布から傾度法<sup>5)</sup>を用いて、 $G$ は地中温度と熱流板の測定値を用いて、それぞれ求めた。図-9には傾度法を適用した際の代表的な風速、気温および水蒸気量の鉛直分布を示す。図中の曲線は普遍関数を大気安定度を考慮して最小自乗法によりあてはめたものである。

高水数上の熱収支の日変化を示したものが図-10である。日中、顕熱量は $100W/m^2$ 以下に抑えられ、正味放射量の大部分は潜熱に転換されている。これは、高水数上で植生(車前草)と地表面からの蒸発散が活発に生じていたことを示唆している。

(b)水面上の顕熱量と熱収支：水面上での顕熱量の推定および熱収支解析は高水数上で行った解析に比較して精度が劣る。これは以下に記す理由による。1)風速、気温および水蒸気量を計測する位置が水面から離れすぎていた。2)放射収支計を船に登載できなかった。3)水温の鉛直分布の測定結果のみから、水中熱伝導量 $G$ を見積れない。以上の各問題は観測当初から予想されていたが、計器設置の都合上、回避することは困難であった。ここでは、 $H$ 、 $1E$ をバルク法<sup>6)</sup>により、 $R_{net}$ を水面のアルベド値を仮定して算出し、これらの残差として水中熱伝導量 $G$ の大きさを推定する。

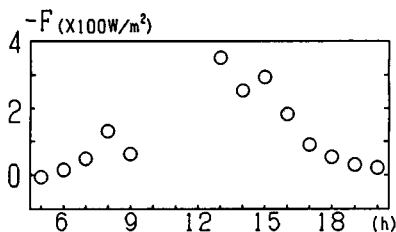


図-8 大気が河川上で失った熱量

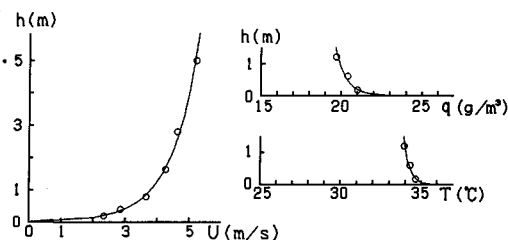


図-9 高水数上で観測された風速、気温、水蒸気量の鉛直分布(13時)、実線は普遍関数をあてはめたもの。

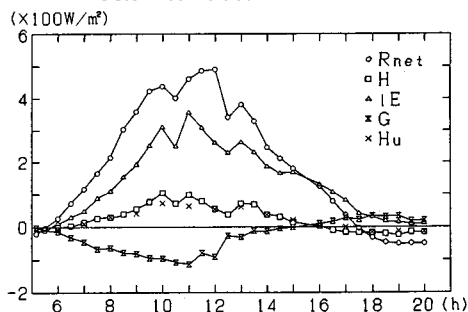


図-10 高水数上の熱収支の日変化。

$R_{net}$ は地表面に入る場合を正、 $H$ と $1E$ は地表面から出る場合を正、 $G$ は地下に入る場合を負とする。 $Hu$ は超音波風速温度計により求めた顕熱量で、地表面から出る場合を正とする。

HおよびLEは、大気不安定度を考慮したバルク法による推定した。図-11に船上で測定した水表面温度、気温、水蒸気量の日変化を示す。早朝と夜間の時間帯を除いて、水表面温度は常に大気温度よりも低く、水面上には安定な成層が形成されていた。船の係留位置では水面上の大気の内部境界層は発達段階にあったと考えられ、H、LEは低めに見積られている可能性があることに注意しなければならない。 $R_{net}$ は、水面のアルベドを0.07と仮定し、SおよびLに高水数上での測定値を用いて求めた。

以上のようにして求めたH、LE、 $R_{net}$ とその残差から求まるGの日変化を示したのが図-12である。顕熱量は日中を通じて非常に小さく、また、潜熱量も高水数上の値に比較して小さい。これより、河川水面上では正味放射量の多くが水中に伝導する熱として転換されていたと考えられる。これは河川水塊の貯熱量が非常に大きいことを示唆するものである。

(c)高水数、水面の熱的特性：今回の観測では市街地での顕熱量を計測していない。しかしながら、藤野・浅枝ら<sup>7)</sup>が推定した夏期のコンクリート面上、アスファルト面上での顕熱量の日最大値が各々、 $160, 350 \text{ W/m}^2$ にも及ぶことを考えると、日中の高水数、水面上の顕熱量が市街地での顕熱量に比較して非常に小さいことが予想される。高水数上では正味放射量の約5割(日中平均)が潜熱に転換され、顕熱量が低く抑えられている。水面上では正味放射量の約8割(日中平均)が水中熱伝導性に転換され、顕熱量は日中を通じて非常に小さく、潜熱量も高水数に比較して小さい。日中の暑熱環境が改善されるということを単純に‘気温・湿度が下がる’という尺度で捉えるならば、今回観測を行った気象条件下では河川水面が高水数よりも機能的に優れている。

#### 4. 結語

本研究では、夏日の河川周辺での気温特性及び河道内に生じる気象現象を観測結果の解析により明らかにした。今後は、市街地での大気の挙動を把握し、河川が周辺地を冷却する範囲と強度を定量的に評価することが目標となる。

1992年に実施した気象観測に際しては、土木研究所都市河川研究室、建設省荒川下流工事事務所、東京工業大学水工研の諸氏から多大なる協力を得た。また、本研究は文部省科学研究費、安藤記念奨学財団の援助のもとに行われた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 村川三郎ら：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，Vol. 393，pp. 25-34，1990。
- 2) 村川三郎ら：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究(続報)，日本建築学会計画系論文報告集，Vol. 415，pp. 9-19，1990。
- 3) 片山忠久ら：海岸都市における河川の暑熱緩和効果に関する調査研究，日本建築学会計画系論文報告集，Vol. 418，pp. 1-9，1990。
- 4) 武若 聡，平山孝浩，池田駿介，島谷幸宏：都市河川が周辺市街地の気象環境に及ぼす影響，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 44，pp. 41-62，1991。
- 5) Brutsaert, W. : Evaporation into the atmosphere, Kluwer Academic Publishers, 299p., 1982。
- 6) 近藤純正：水面のバルク輸送係数，水文・水資源学会誌，Vol. 5，No. 3，pp. 50-55，1992。
- 7) 藤野 毅，浅枝 隆，前垣内正記：舗装面熱収支の定量評価について，土木学会第47回年次学術講演会概要集第2部，pp. 384-385，1992。

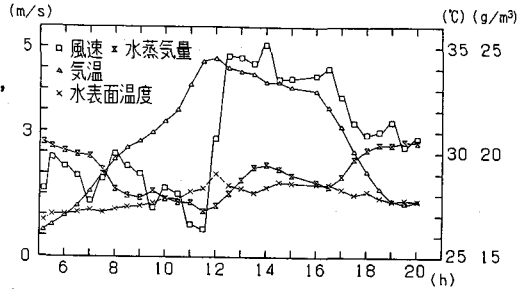


図-11 河川水面上で観測された水表面温度、気温、水蒸気量の日変化(測定高さ1.25m)

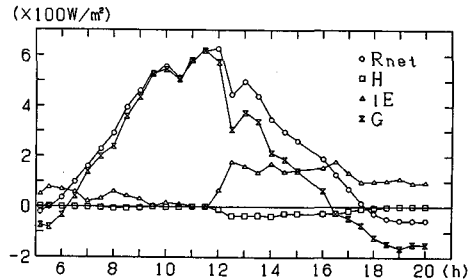


図-12 河川水面上の熱収支の日変化。  
 $R_{net}$ は水表面に入る場合を正，  
HとLEは水表面から出る場合を正，  
Gは水中に入る場合を正とする。