

都市域における河川水面と陸面の熱収支比較と 暑熱環境の緩和効果

COMPARISON OF HEAT BALANCE OF RIVER-WATER SURFACE WITH LAND
SURFACE IN URBAN AREA AND MITIGATION EFFECTS OF HEAT ISLAND

原田守博¹・高木智之²・鈴木宏佳²・手嶋健浩³

Morihiro HARADA, Tomoyuki TAKAGI, Hiroyoshi SUZUKI and Takehiro TEJIMA

¹正会員 工博 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

²学生会員 名城大学大学院生 理工学研究科建設システム工学専攻 (〒468-8502 同上)

³正会員 修(工) 愛知県建設部河川課 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3-1-2)

In recent years, the heat island phenomena in an urban area have become serious by increase of artificial heat exhaust and change of land use due to urbanization. The water area such as river and canal are expected to be preserved for mitigation of the heat island. However, air cooling effect and mechanism in the water area have not been verified precisely. In this research, micro-meteorological observations are carried out on a land surface and a water surface (the Nakagawa Canal) to compare the radiation balance and the heat balance. In addition, distributions of water temperature in the canal are measured in order to evaluate thermal storage capacity of the water body. According to the field observation results, it is shown that lateral heat flux on the water surface is larger than the land surface, whereas the sensible heat flux on the water surface is almost below zero. These facts mean that the water area cools the air on water surface. Through this paper, it is also pointed out that the water surface has larger thermal storage effect than the land surface, and that an urban river plays certain roles to mitigate the heat island.

Key Words : heat island, urban river, latent heat flux, sensible heat flux, thermal storage effect

1. はじめに

近年, 都市域の気温が郊外に比べて高くなるヒートアイランド現象が深刻化している¹⁾. その原因としては, (1) エアコンや自動車等からの人工排熱の増加, (2) 宅地化や道路舗装といった人工被覆面による放射・顕熱の増加, (3) 緑地や水面域の喪失に伴う潜熱の減少, (4) ビルの乱立などによる弱風域の形成等が挙げられる.

こうした都市の暑熱化の緩和対策として, 緑地や水面域の保全・回復が提案されている. とくに都市河川などの水面域には 水塊としての貯熱効果, 水温と気温との差による顕熱の効果, 水面からの蒸発に伴う潜熱の効果, 冷涼な海風による“風の道”の効果などの大気冷却効果をもつと期待されている.

これらの河川の暑熱環境緩和効果を実証するために, 実際の河川を対象に様々な観測が報告されてきている. たとえば, 村川ら²⁾は広島の太田川周辺において, 橋本ら³⁾は名古屋の堀川・新堀川にて, 加藤ら⁴⁾は東京・荒

川の周辺地域を対象に気温・湿度と風向風速の観測を行った. 筆者ら⁵⁾も堀川に面した大規模公園において微気象観測を行い, 河川が存在が周辺地域に及ぼす影響を検討した. こうした微気象観測に加え, 実河川で放射収支や熱収支も検討した研究として, 武若ら⁶⁾, 池田ら⁷⁾は荒川とその河川敷で, 成田ら⁸⁾は東京隅田川にて熱収支観測を実施し, 河川の大気冷却効果の範囲を検討した.

河川と並んで冷源として期待される緑地についても多くの研究がある. たとえば, 森脇ら⁹⁾は明治神宮で, 成田ら¹⁰⁾は新宿御苑にて大規模緑地の熱収支を明らかにした. また, 浅枝・藤野¹¹⁾はアスファルトおよびコンクリート舗装面と土壌面の蓄熱特性を明らかにしている.

このように河川水面または陸面の熱的特性に関して数多くの調査研究がなされてきたが, 水面と陸面の差異について同時に比較検討したものは少なく, わずかに武若ら⁶⁾があるのみである. しかし, 武若らの観測は半日余りと短期間である. そこで本研究では, 約1ヶ月間にわたり, 近接した河川水面と陸面を同時にかつ同一方法で観測することにより, 両者の熱的特性の差異を検討した.



図-1 観測対象地域

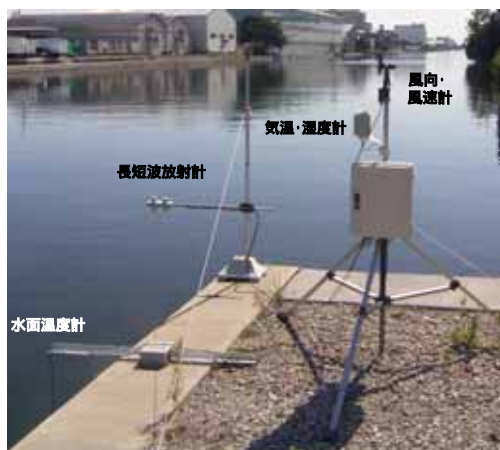


写真-1 水面での観測状況



写真-2 陸面での観測状況

具体的には、水面として名古屋市を流れる中川運河を、陸面として付近のアスファルト舗装面を対象に、微気象観測および水温分布の測定を実施した。本研究と同様に水面上の熱収支観測に加えて水温観測も行った研究として池田ら⁷⁾のものがあるが、観測期間が短い上、感潮河川を対象としたため移流の効果が大きい結果となっている。これに対して、本研究では防潮水門で閉じられた湛水域を対象とすることによって、水塊自体の貯熱量を長期間にわたって評価した。それらの観測結果に基づき、異なる地被状態での放射収支と熱収支特性を比較するとともに、水塊の貯熱効果を評価することによって、水面域のもつ暑熱環境の緩和効果について考察した。

2. 水面および陸面における微気象観測

観測対象とする中川運河は、名古屋市の中心部を南北に直線的に流れる人工河川であり、全長約8.4km、水面幅60～80mである。河口部に潮止め堰があり、自然河川のような水塊の流動や海水の遡上は見られず、水位はほぼ一定に保たれている。

(1) 観測方法

本研究では、図-1に示すように、水面の代表として中川運河中流域の側岸部(写真-1)、陸面の代表として運河から内陸に約100mに入ったアスファルト舗装面(写真-2)において現地観測を実施した。観測は水面と陸面で同一機器を用い、同一方法で行った。使用した測定機器は、図-2に示すように、自然通風型気温・湿度計(Delta OHM社製)、セパレート型風向・風速計(Young社製)、水面および陸面の温度計(FieldPro社製 Pt100温度センサー)、長短波放射計(Kipp & Zonen社製 CNR1)である。水面の長短波放射計は護岸から運河へアームを用いて60cm突き出している。放射計の設置高さは水面・陸面ともに面上1.5mとした。なお、使用した長短波放射計の視野角は

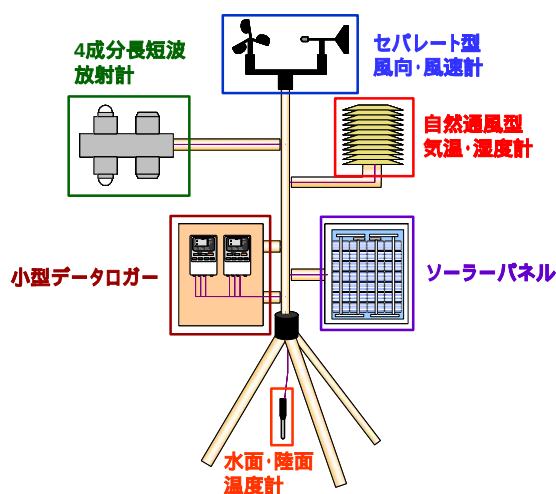


図-2 観測機器の模式図

150°であるため、水面での下方からの放射量測定値には護岸の影響が約28%の含まれていることに注意が必要である。その他の機器の設置高さは、風向・風速計2.0m、気温・湿度計1.8mである。すべての観測項目は1分間隔で測定し、10分間毎の平均値を収録した。

(2) 観測結果

観測期間は2009年8月3日～8月31日である。観測結果の一例として、8月17日0時～24時に測定された放射フラックスとアルベドを図-3に示す。この図によると、日射量の変化は水面・陸面とも連続的に記録されており、この日が雲による日射の遮断の無い快晴日であったことが分かる。観測期間にはこうした快晴日が4日間あり、本研究ではこれらの日を検討対象とする。

この日における気温、水面と陸面の表面温度を図-4に示す。図において、水面温度が比較的安定しているのに対して、陸面温度は日中に60℃近くに達しており、変化幅が大きいといえる。また、気温を見ると、水面の方が陸面よりも最大で2℃程度低くなっている。

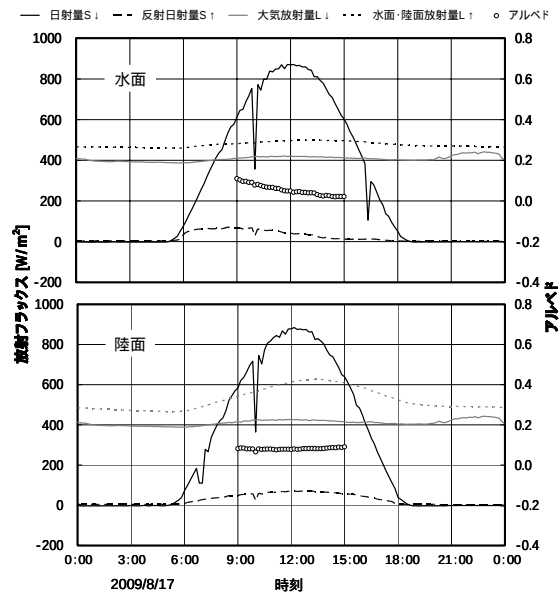


図-3 放射フラックスとアルベドの測定結果

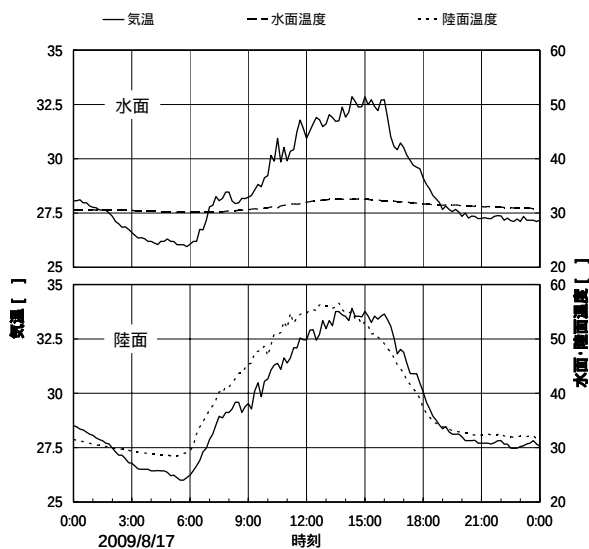


図-4 気温と水面・陸面温度の測定結果

同日の風向・風速の測定結果を示したものが図-5である。図を見ると、風は日中に強く、夜間に弱いことが分かる。風速は全般的に水面の方が陸面より大きく、風向はとりわけ水面において南風が卓越しており、運河に沿った風が吹いていることが分かる。

3. 水面と陸面における放射収支と熱収支

前章で一例を示した観測結果に基づき熱輸送量を求め、水面と陸面における放射収支と熱収支の相違を検討する。

(1) 長短波放射データに基づく放射収支の評価

まず、放射収支を把握するために、次式の各項に測定

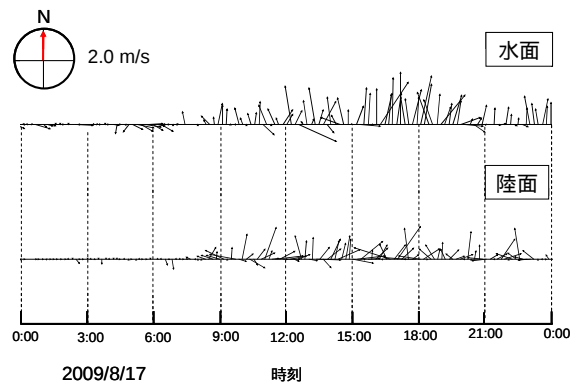


図-5 風向・風速の測定結果

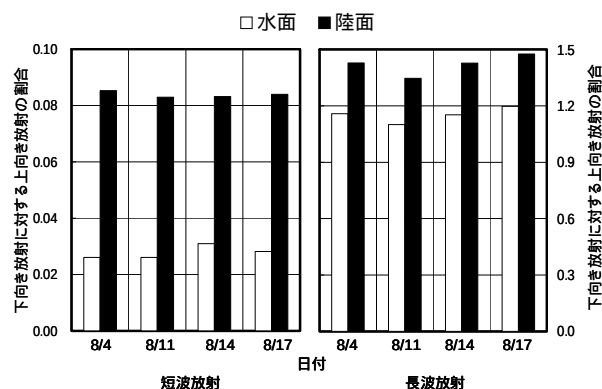


図-6 下向き放射に対する上向き放射の割合（13～15時）

値を代入して正味放射量 R_n を求めた。

$$R_n = S^{\downarrow} - S^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad (1)$$

ここに、 R_n ：正味放射量、 $S^{\downarrow}$ ：日射量、 $S^{\uparrow}$ ：反射日射量、 $L^{\downarrow}$ ：大気放射量、 $L^{\uparrow}$ ：地表放射量、単位は $[W/m^2]$ である。図-6は、短波放射 S と長波放射 L について下向き放射量に対する上向き放射量の割合を、日中の13～15時について示したものである。短波放射の割合(アルベド)を見ると、水面の方が陸面よりも値が小さくなっており、水面では陸面の約1/3である。一方、長波放射の割合を見ると水面では陸面の約4/5となっており、表面温度が高い陸面の方が多くの熱を放出していることが分かる。なお、水面でのアルベドは、13～15時について図-6では3%弱で、池田ら⁷⁾の約5%、成田ら⁸⁾の約6%に比べて小さな値となっている。しかし、日中全体では一例を図-3に示したように2～11%であり、今回の数値は近藤¹²⁾の示した範囲2～10%ともよく符合している。

(2) 気温・湿度・風速データに基づく熱収支の評価

水面および陸面付近の領域における熱収支式は、側方の流入・流出熱量を無視すると次式となる。

$$\frac{\Delta S_a}{\Delta t} = R_n - H - LE - G \quad (2)$$

ここに、 S_a ：領域内の空気塊の熱貯留量、 H ：顕熱輸送

量, IE : 潜熱輸送量, G : 地中または水中への伝導熱である. S_d の変化を無視すると, 上式は次のようになる.

$$Rn = H + IE + G \quad (3)$$

熱収支を求めるにあたり, 顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE はそれぞれ次に示すバルク式(4)(5)によって算出した.

$$H = c_p \rho C_H U_{10} (T_s - T) \quad (4)$$

$$IE = \rho \beta C_H U_{10} (q_s - q) l \quad (5)$$

ここに, H : 顕熱輸送量 [W/m^2], IE : 潜熱輸送量 [W/m^2], c_p : 定圧比熱 [$J/(kg \cdot K)$], ρ : 空気密度 [kg/m^3], C_H : バルク輸送係数, U_{10} : 測定した平均風速の高さ10mへの換算値 [m/s], T_s : 水域および陸域の表面温度 [K], T : 気温 [K], β : 蒸発効率(水面では1.0, 陸面では0), q_s : 飽和比湿 [-], q : 比湿 [-], l : 水の気化熱 [J/kg] である. 風速については, 図-5の観測データをもとに, 対数分布則によって U_{10} を算出した. 空気密度 ρ と飽和比湿 q_s については近藤¹²⁾に基づいて求めた. また, バルク輸送係数の値は, 水面については近藤¹²⁾による実用値を参考に $C_H = 1.2 \times 10^{-3}$, 陸面については浅枝・藤野¹¹⁾に拠って $C_H = 4.0 \times 10^{-3}$ と設定した. 伝導熱 G [W/m^2]については, 式(3)から次式によって逆算した.

$$G = Rn - H - IE \quad (6)$$

放射量の測定から求まる正味放射量 Rn と, 式(4)による顕熱輸送量 H , 式(5)による潜熱輸送量 IE , 式(6)による伝導熱 G の算定結果を図-7に併せて示す. 水面と陸面で比較すると, 顕熱輸送量・潜熱輸送量・下向き伝導熱ともに両者で大きな相違が見られる. こうした水面と陸面の熱収支の違いを他の快晴日についても検討してみる.

図-8は, 式(3)の右辺について, 正味放射量に対する各熱輸送量の割合を水面と陸面で比較したものである. 図では, 気温が最高となる13~15時を対象に, 観測期間の快晴日4日間について示した. この図より, 4日間の快晴日では同様な熱収支状況となっていることが分かる. 4つの熱輸送量をこれら4日間について平均したものを図-9に模式的に示す. この図から, 顕熱輸送量 H は水面において -6 W/m^2 と負の値を示すのに対し, 陸面では 240 W/m^2 になっている. すなわち, 水面は大気を冷やす傾向にあるのに対して, 陸面は顕熱によって大気を暖めている. また, 潜熱輸送量 IE は水面で 97 W/m^2 であるのに対して, 陸面では蒸発が無いためゼロとなっている. さらに, 下向き伝導熱 G は水面で 564 W/m^2 と, 陸面に比べて2倍近く大きくなっていることがわかる. これは, 水域の方が陸域に比べて熱容量が大きく, 貯熱効果が高いことに起因すると考えられる.

図-9に示した水面と陸面の単位面積当たりの熱収支結果に基づき, 中川運河そのものの熱的な存在価値について試算を試みる. 図-10は, 現在の中川運河が消失し陸

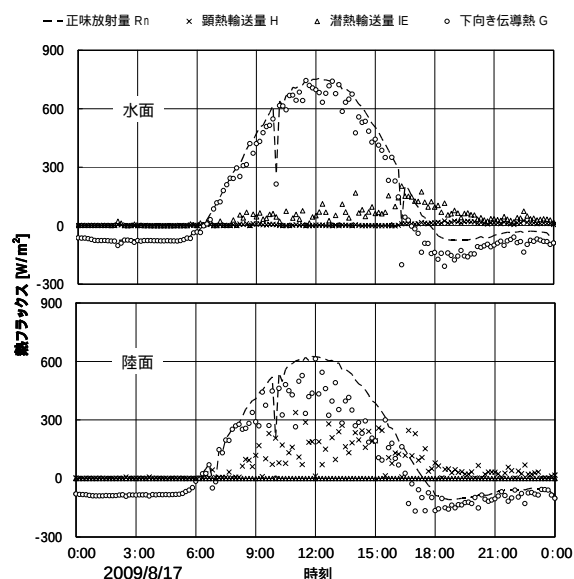


図-7 熱輸送量の時間変化

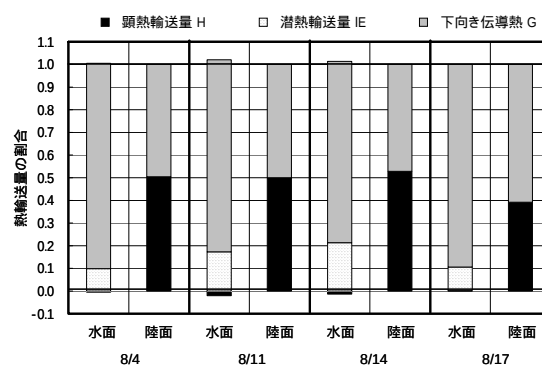


図-8 熱収支式(3)における各項の割合(13~15時)

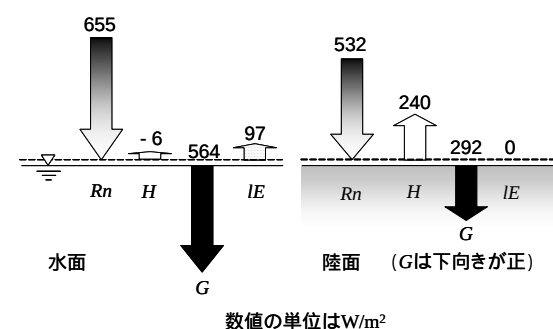


図-9 水面と陸面における各熱輸送量

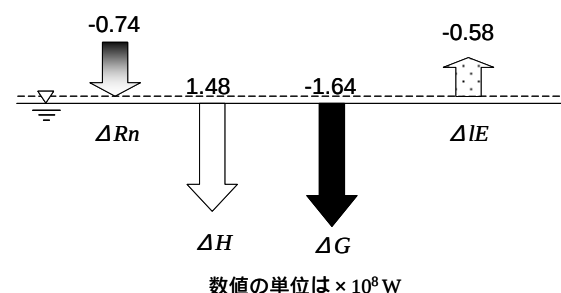


図-10 中川運河を陸面と仮定した場合の各熱輸送量の変化

面になったと仮定した場合の各熱輸送量の変化分を、運河の全体面積を用いて見積ったものである。これによると、各熱輸送量の変化分の合計は 4.44×10^8 Wの熱量増加となる。この値は名古屋市全体の夏季の人工排熱量¹³⁾ 6.92×10^9 Wの 6.4%に相当し、中川運河の存在が暑熱環境の緩和に一定の役割を果たしていることが窺える。

4. 水塊のもつ貯熱効果の評価

熱収支の検討から、水面での伝導熱は陸面よりも大きい結果となった。この水域の高い貯熱効果を実測によって検討するために、運河における水温分布を測定し、水塊のもつ貯熱量とその変動を評価する。

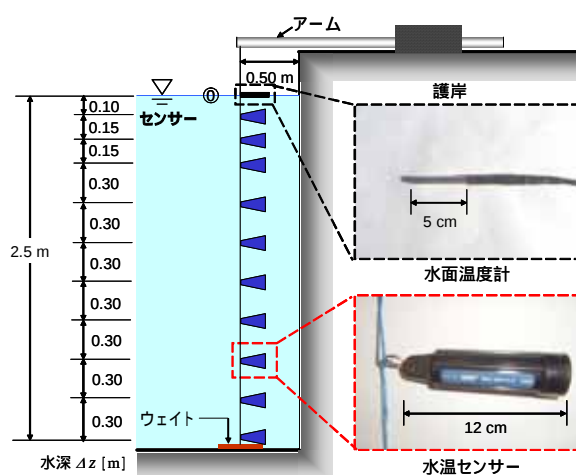


図-11 水温センサーの設置状況

(1) 中川運河における水温の鉛直分布の測定

水温の鉛直分布の測定は前述した水面の微気象観測地点(図-1)において実施した。使用した機器は、前述した水面温度計に加えて、水中部分ではロガー内蔵式水温センサー(Onset社製 HOBOWATER-TEMP-PRO)である。観測地点の水深は2.5mであり、図-11に示すように10台の水温センサーを鉛直方向に設置した。水温測定の時間間隔は、微気象観測と同様に1分毎に行い、10分間平均値を求めた。

図-12は2009年8月17日における水温分布の測定結果を示している。この図は、各時刻における水深方向の水温について、0時～24時の間の時間的変化を描いたものである。図を詳しく見ると、日中とくに12～16時では、水面に近い地点ほど日射によって水温が高く、深くなるにつれて水温は低くなっている。日没後は水温が鉛直方向に平準化され、水深2.0m付近までは一様な分布に変化している様子が読み取れる。また、水深2.0m以深では、水温は一日を通じて安定していることが分かる。

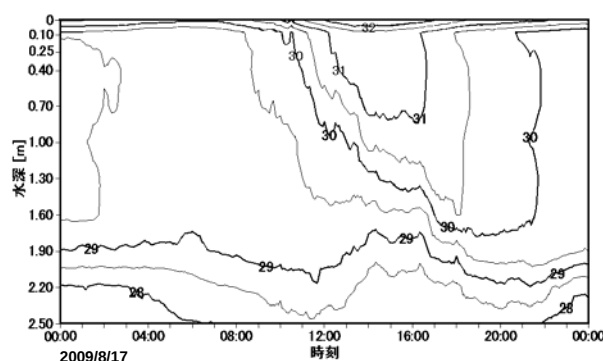


図-12 水温分布の時間変化

(2) 水温分布に基づく水中貯熱量の算出

水温分布の観測結果(図-12)をもとに、水中貯熱量 S_w を求めた。水温センサーは水面を含めて11深度に設置されているので、水塊を鉛直方向に10層に分け、各水深の水温 T から次式を用いて S_w を算出した。

$$S_w = c\rho \sum_{i=1}^{10} \Delta z_i \bar{T}_i, \quad \bar{T}_i = \frac{T_i + T_{i+1}}{2} \quad (7)$$

ここに、 S_w : 水中貯熱量[J/m²]、 $c\rho$: 水の熱容量(= 4.18×10^6)[J/(m³K)]、 Δz : 各層の層厚[m]、 $\bar{T}$: 平均水温[K]、 T : 水温[K]である。図-12の水温データによる水中貯熱量 S_w の算定結果と全天日射量の積算値を図-13に示す。この図のように、水中貯熱量は日出直後の6時より上昇を始め、強い日射を受けて17時前後にピークを迎え、その後は低下している。6～17時の変化量は最大で 1.2×10^7 J/m²に達しており、これは17時までの全天日射量の51%に相当する熱量である。

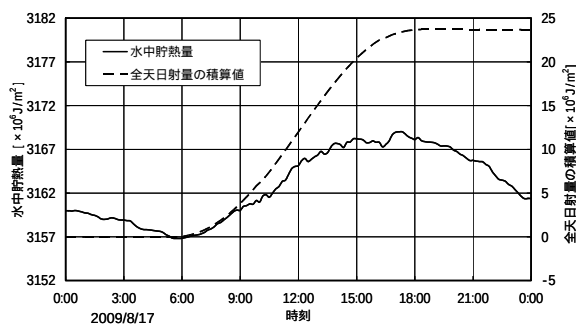


図-13 水中貯熱量の時間変化

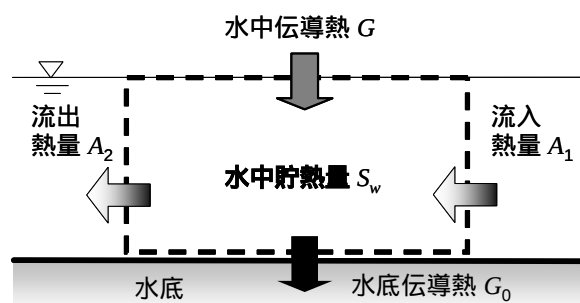


図-14 河川水中の熱収支

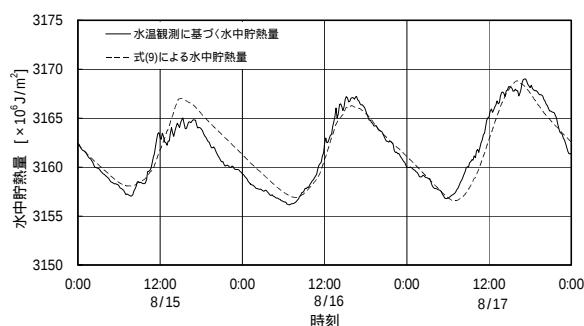


図-15 水温観測と式(9)に基づく水中貯熱量の比較

(3) 水中における熱収支の評価

算出された水中貯熱量 S_w に基づいて、熱収支式(6)から得られた水中伝導熱 G の検証を行う。

図-14に示すように、河川の水面から水底までの領域について熱収支を考えると、以下の式が成り立つ。

$$\frac{\Delta S_w}{\Delta t} = A_1 - A_2 + G - G_0 \quad (8)$$

ここに、 S_w ：水中貯熱量 $[\text{J}/\text{m}^2]$ 、 A_1 ：流入熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 A_2 ：流出熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 G ：水面から水中への伝導熱 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 G_0 ：水底から地中への伝導熱 $[\text{W}/\text{m}^2]$ である。

中川運河では、潮止め堰により水塊の流動はほとんどないので、 $A_1 - A_2$ は微小である。式(8)を期間 $t_1 \sim t_2$ について積分することにより、次式が得られる。

$$S_w(t_2) = S_w(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} (G(t) - G_0(t)) dt \quad (9)$$

水温分布を描いた図-12を見ると、水底付近の水温は鉛直方向に一定となっており、水底への伝導熱 G_0 が存在することが窺われるが、その値の評価は容易でない。ここでは G_0 の値を仮定することによって、上記の熱収支式の妥当性を検討することを試みた。

図-15は8月15日～17日の3日間について、水温観測に基づく水中貯熱量 S_w と、図-7に示した水中伝導熱 G を用いて式(9)から求めた S_w の算定値とを比較したものである。 G_0 の値は試行的に一定値 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ と仮定した。図によると、式(9)による水中貯熱量は水温観測に基づく値とよく対応している。このことは、水面上での熱収支から求めた水中伝導熱が水中での熱収支式を満足していることを示している。今後、仮定した G_0 の数値について検討を加え、熱収支の評価精度を高める必要がある。

5. まとめ

本研究では、河川水面とアスファルト舗装面を対象として微気象観測を実施し、異なる地被状態での熱収支特性の差異を評価した。得られた知見は以下の通りである。

(1) 潜熱輸送量は、アスファルトの陸面ではゼロであるのに対し、水面では一定の大きさを持ち、水面蒸発によって大気が冷やされることが示された。

(2) 顕熱輸送量は、陸面では大きな正の値であるのに対し、水面では小さな負の値を示し、僅かながら水面が顕熱によって大気を冷やす効果が示された。

(3) 熱収支式の残余から求まる水中伝導熱は、水面の方が陸面よりも大きい値であった。これは、水塊の熱容量が大きいことに起因すると考えられる。

(4) 水温分布の観測から水中貯熱量の変化を評価したところ、水面上の熱収支から求めた水中伝導熱は水中での熱収支を満足することが示された。

以上より、名古屋市内に広大な水面をもつ中川運河は暑熱環境の緩和に一定の役割を果たしていると推察される。

参考文献

- 環境省：平成12年度ヒートアイランド現象の実体解析と対策のあり方についての報告書，pp.23-39，2001。
- 村川三郎，関根毅，成田健一，西名大作：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.25-34，1988。
- 橋本剛，舩橋恭子，堀越哲美：海風の運河遡上による都市暑熱環境の緩和効果 - 名古屋市の堀川及び新堀川における事例 - ，日本建築学会計画系論文集，Vol.545，pp.65-70，2001。
- 加藤拓磨，土屋修一，渡邊暁人，蛸原雅之，前村良雄，森久保司，山田正：河川の大気冷却作用による熱環境緩和効果，水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp.38-39，2007。
- 原田守博，高木智之，手嶋健浩，鈴木宏佳：都市河川による暑熱環境の緩和効果に関する微気象観測，水工学論文集，第vol.53，pp.301-306，2009。
- 武若聡，池田駿介，平山孝浩，萱場祐一，財津知亨：都市内河川による大気冷却効果 - 都市内河川内外の夏期の熱環境および気象観測 - ，土木学会論文集，No.479/II-25，pp.11-20，1993。
- 池田駿介，財津知亨，館健一郎：感潮河川の熱特性に関する研究 - 荒川における測定 - ，土木学会論文集，Vol.503/II-29，pp.207-213，1994。
- 成田健一，植村明子，三坂育正：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究 - 隅田川における熱収支と周辺影響の検討 - ，日本建築学会計画系論文集，Vol.545，pp.71-78，2001。
- 森脇亮，神田学，横山仁，高柳百合子，浜田崇：「神宮の森」の蒸散活動と熱収支 1996年夏期集中観測，水工学論文集，Vol.41，pp.43-48，1997。
- 成田健一，三上岳彦，菅原広史，本條毅：新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測，環境情報科学論文集，Vol.18，pp.253-258，2004。
- 浅枝隆，藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について，水文・水資源学会誌，Vol.5，No.4，pp.3-7，1992。
- 近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 - ，朝倉書店，pp.10-11，pp.26-28，pp.168-172，1994。
- アジア航測(株)：名古屋市環境局・ヒートアイランドに関する基礎的調査業務報告書，105p，1995。

(2009.9.30受付)