

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

MICROMETEOROLOGICAL OBSERVATION ON THE EFFECT OF AN URBAN RIVER ON HEAT ISLAND MITIGATION

原田 守博¹・高木 智之²・手嶋 健浩²・鈴木 宏佳³

Morihiro HARADA, Tomoyuki TAKAGI, Takehiro TEJIMA and Hiroyoshi SUZUKI

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学生会員 名城大学学生 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 同上)

The heat island phenomena in an urban area are caused by increasing of the artificial heat exhaust and change of the land use due to urbanization. Especially the water area such as rivers and water channels serve important cooling functions because the river front can be open space as through pass of cooler breeze from sea and their water surfaces have cooling effect by the latent heat in evaporation. On these cooling functions of urban rivers, though a few field-observations have been tried in a last decade, it has not been evaluated quantitatively because of insufficiency in the observation. In this research, micrometeorological observations in a surround area of a river and measurements of evaporation rate from the water surface were carried out in the Hori River in Nagoya, Japan. The observed results show that the wind velocity is stronger and the air temperature is lower in the river-front area than in the inland area, and that the latent heat flux by evaporation amount to half of the solar heat flux.

Key Words : heat island, urban river, meteorological observation, evaporation, latent heat flux

1. はじめに

近年, 地球の温暖化に加え, 都市化の進展や生活様式の近代化に伴って, 暑熱環境の拡大すなわち「ヒートアイランド現象」が深刻化している. 都市の暑熱化の原因には, (1) エアコンや自動車等からの人工排熱の増加, (2) 道路舗装や宅地化といった地盤の人工被覆化, (3) 緑被地や水域の喪失に伴う潜熱の減少, (4) 建物の増加による弱風域の形成等が指摘されている¹⁾. ヒートアイランド現象は単に夏季の生活が過ごしにくいだけでなく, 熱中症など健康への悪影響や, 冷房の強化による二酸化炭素排出量のさらなる増加をも引き起こすことから, その緩和に向けて一層の努力が求められている.

都市の暑熱環境を解消する施策として, 環境省や各自治体では林地や農地などの緑被地や河川や池沼などの水域の保全・再生を提案している. 確かに都市内に存在する河川には, ① 水塊としての貯熱効果, ② 水温と気温の差による顕熱の効果, ③ 水面からの蒸発に伴う潜熱の効果, ④ 冷涼な海風の通過経路としての“風の道”

の効果など, さまざまな大気冷却効果があると考えられる. とくに, 韓国・ソウル市における清溪川の復元による気温上昇の抑制効果はよく知られている²⁾.

近年, こうした河川のもつ暑熱環境の緩和効果の評価に向けて精力的な研究が行われてきている. たとえば, 村川ら³⁾は広島・太田川において先駆的な微気象観測を行い, それに引き続いて菅ら⁴⁾は東京の多摩川と芝浦運河において気象観測を, 成田ら⁵⁾は隅田川で熱収支観測を実施している. さらに武若ら⁶⁾は荒川河川敷を主な対象として, 詳細な微気象観測と熱収支観測を行っている. 一方, 福田ら⁷⁾は異なったスケールでの海風の進入について観測値に基づき評価を試みている. 同様に橋本ら⁸⁾は名古屋市内の河川に沿って気温と風の観測を, 水垣ら⁹⁾と伊藤ら¹⁰⁾, 加藤ら¹¹⁾は東京・荒川の周辺地域を対象に詳細な観測と数値解析を行っている. これら河川に面した地域での調査に加え, 久田ら¹²⁾は海風の侵入によるヒートアイランド緩和効果について福岡平野での広域観測と数値シミュレーションを試みている.

このように河川を取り巻く温熱環境について数多くの検討が行われているが, 現象が複雑さと変動性を併せも

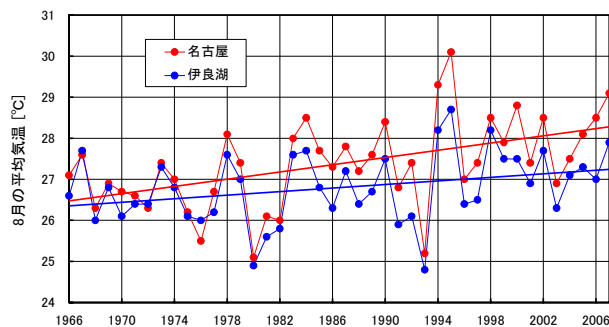


図-1 名古屋と伊良湖における8月平均気温の経年変化

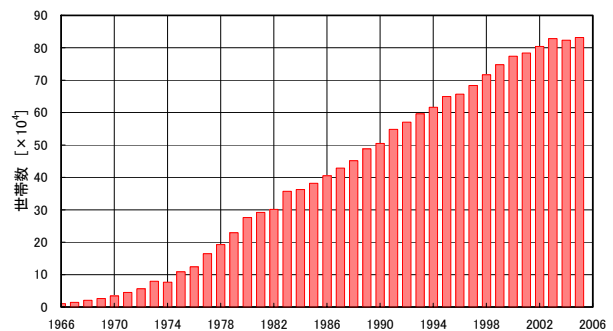
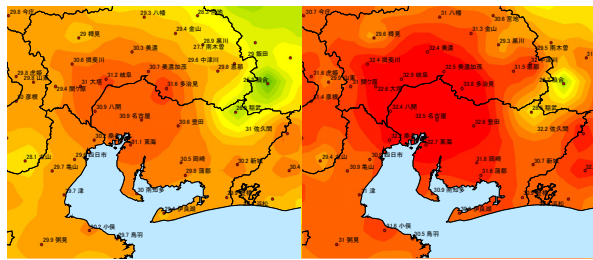


図-3 名古屋市のエアコンを所持する世帯数の推移

(名古屋総務局資料および環境省統計集により作成)



(a) 1980~1984年 (b) 2000~2004年

図-2 名古屋周辺での8月最高気温の5ヶ年平均値の分布¹⁾

つものに対し、観測資料が必ずしも十分でないため、個別の事象についての定性的な表現に留まっているのが実情といえる。包括的な観測がきわめて困難な対象ではあるが、今後の調査ではデータに含まれる不確定性をできるだけ取り除く工夫が必要であろう。たとえば、広域の調査には移動観測を多用しがちであるが、瞬時に変化する風を捉えるには定点での連続観測が望ましい。また、気温は地被状態に強く影響されることから、地表の測定条件をできるだけ固定して観測を行うことが求められる。

こうした観点から、本研究では名古屋市を流れる堀川を例にとり、河川による大気冷却効果のうち“風の道”の効果と潜熱の効果に着目し、測定条件を統一した高密度の観測を実施する。具体的には、堀川に面した大規模公園を対象に、多地点での定点連続観測を実施し、河川周辺域での風向風速の実態と気温との係わりを明らかにする。さらに、堀川からの水面蒸発量について水収支法による直接測定を行い、潜熱フラックスを評価する。潜熱は従来から簡易的なバルク式によって算定される事例が多いが、本研究では蒸発量の実測を通じてバルク法の有効性をも検証するものである。

2. 名古屋地域におけるヒートアイランド現象

本研究の対象地域を説明するに先立ち、名古屋地域におけるヒートアイランド現象の進行状況をまとめておく。図-1は、名古屋と渥美半島先端の伊良湖における8月の平均気温を1966~2007年の42年間のアメダスデータから描いたものである。図において両者を比較すると、1975年頃まではほぼ同一の値を示していたのに対し、近年は

徐々に差が開き始め、最近では名古屋の方が伊良湖よりも1℃以上高くなってきていることが分かる。

また、図-2は同じくアメダスデータに基づき、名古屋周辺における8月の最高気温について、1980~1984年と2000~2004年の5ヶ年平均値を比較したものである¹⁾。1980~1984年には岐阜や多治見といった盆地で高温の地点が見られる程度であったのに対し、2000~2004年には濃尾平野全域で高温化していることが分かる。とくに名古屋では、30.9℃から32.5℃に上昇しており、夏期の暑熱化が顕著になってきている。

都市の暑熱化の原因としては、前述のように土地利用の変化と人工排熱量の増大が挙げられる。戦後、市内の広い範囲に分布していた緑地や農地はこの半世紀の間に急減し、一部を除いてほぼ全域が市街地化してきた。水域については、多くの市内河川が暗渠化される一方で、ため池も相当数が埋め立てられ、その数は1965年に360あったものが、現在では116にまで減少している。一方、人工的な排熱量については、道路網の整備に伴う自動車交通の増加のほか、エアコンを備えた住宅が図-3のように急増し、この間に市民の生活様式が大きく変化したことが伺われる。

これらの要因によって引き起こされる都市の暑熱化に対応するため、名古屋市では緑地や水域の保全や新たな整備を検討している¹³⁾。そうした施策を検討するには、その効果を定量的に評価することが必要となるが、観測資料が十分でなく、検討の障害となっている。以下では、名古屋市内を流れる堀川を対象として、河川による周辺地域への気候緩和効果についての観測結果を報告する。

3. 堀川近傍および周辺地域における微気象観測

堀川は江戸時代に開削された水路を起源とし、図-4のように名古屋市の都心部を南北に貫いて名古屋港に注ぐ流路長16.2 kmの都市河川である。川幅は上流では20m程度であるが、下流域では100m近くに広がり、水辺の乏しい名古屋において貴重な水域となっている。本研究では、堀川の中流域(写真-1参照)を対象として、河川

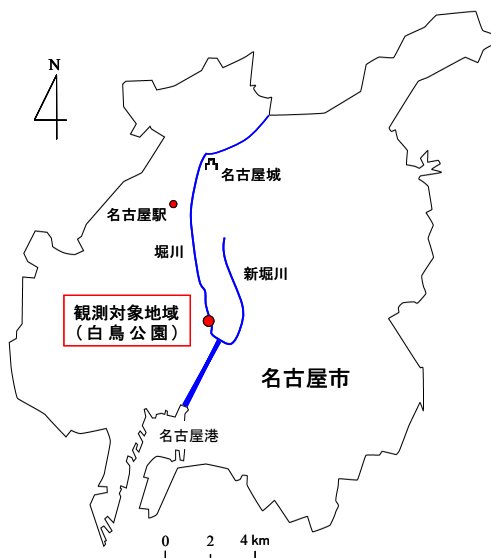


図-4 名古屋市を流れる堀川と観測区域

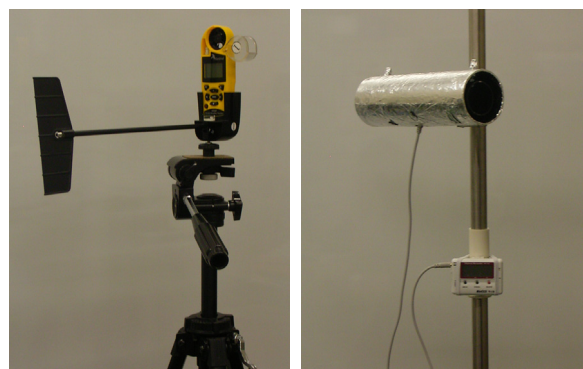


写真-1 堀川中流域の風景（御陵橋から上流を望む）

が周辺地域の微気象に及ぼす影響と、水面蒸発に伴う潜熱フラックスについて現地観測を行った。

(1) 観測項目と計測方法

気温や湿度は観測地点の路面状況や植生等に左右されるため、測定値を互いに比較するにはできるだけ様な空間が望ましい。そこで堀川右岸に広がる白鳥公園（河口から約4.5km）を観測区域に選定した。また、多くの地点で観測する必要から、図-5に示す12地点で定点観測を行った。これらの地点には、風向・風速・気温・湿度・気圧が測定できる可搬型気象観測計（Nielsen-Kellerman社製 Kestrel4500）6台と、気温・湿度センサー（T&D社製 TR-71U, TR-72U）を組み込んだ自然通風式シュルター¹⁴⁾ 6台を設置した（写真-2参照）。これらのセンサーは地上 1.5 mの高さに設置し、測定間隔は30 secとした。観測は晴天であった 2007年8月11日・21日と2008年7月12日に実施した。使用した2種類 各6台の測定機器について、気温に関する器差を予備実験によって調べたところ、可搬型気象観測計が $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$ 、気温・湿度



(a) 可搬型気象観測計 (b) 気温・湿度センサー

写真-2 微気象観測に使用した計測機器

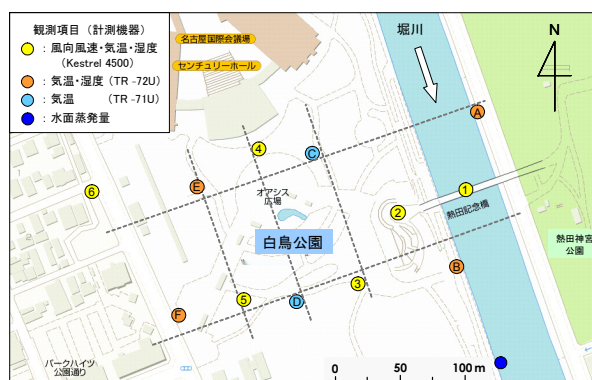


図-5 堀川における水面蒸発量および微気象観測地点

センサーが $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ であり、それぞれ十分な精度をもつことを確認した。

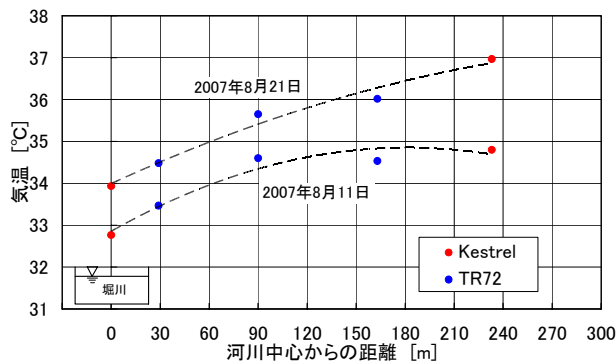
(2) 気温・風速の観測結果

a) 河川の横断方向における気温分布

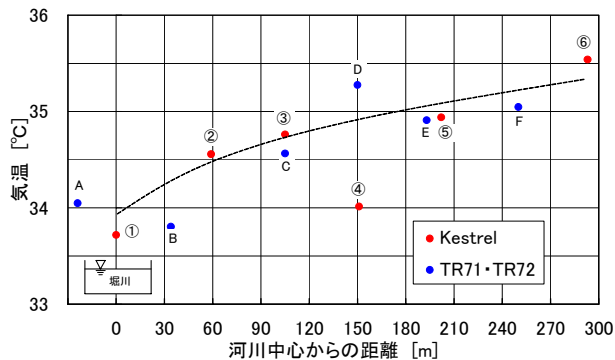
図-6は、河川の横断方向における14時の時間平均気温の分布を示したものである。図(a)2007年8月の観測時の方が図(b)2008年7月の観測時よりも全体的に高い値となっているが、空間的な分布形状は類似している。すなわち、気温は河川に近いほど低く、河川から内陸に向かって上昇する様子が両者に共通して認められる。

b) 風向・風速の時間変動と空間分布

図-7(a)は、河川に最も近い地点と最も離れた地点の風速の時間変動を示したものである。河川上の風速は常に公園西端よりも大きいことが分かる。図-7(b)は、14時における風向・風速の時間平均値を、河川の横断方向について示したものである。図から明らかなように、風向は測定地点によって様々であるが、風速は河川沿いの地点よりも内陸の地点の方が大幅に小さくなっている。とりわけ河川の橋梁上では風が強く、河川が風の吹きやすい開放空間であることが示される。なお、図-7(b)中の150 m付近（地点④）では風速が周囲よりも大きくなっているが、この地点は樹木等がまったく無い開けた場所であるため風が強く吹いたものと考えられる。



(a) 2007年8月11日および8月21日のデータ



(b) 2008年7月12日のデータ

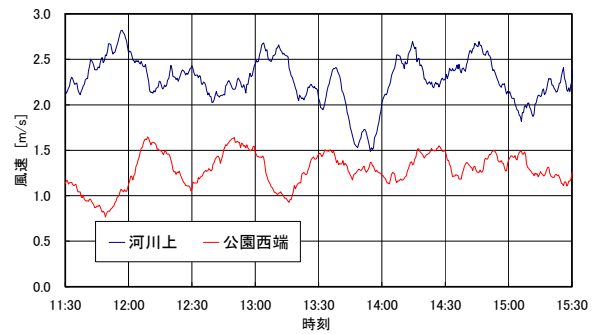
図-6 河川横断方向における気温分布

c) 気温と風速の係わり

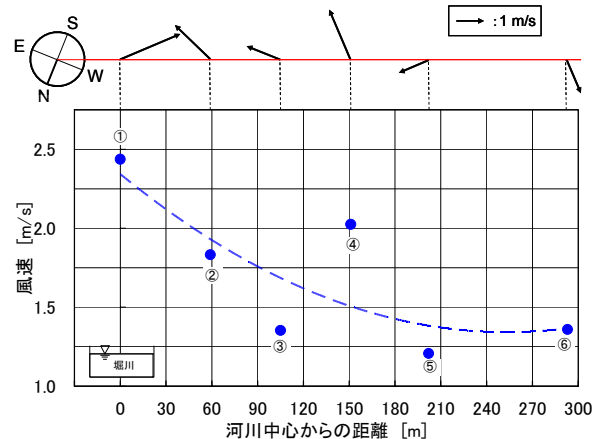
図-8は、2008年7月12日14時の各観測地点における平均気温と平均風速の関係を示したものである。この図から、風速が大きい地点ほど気温は低い傾向にあることが明らかである。すなわち、その地点の気温と風速には密接な係わりがあり、風の有無による空気塊の流動・停滞は、市街地での気温分布を考える上で重要であるといえよう。建築物が林立する都市域にあって、開放空間である河川周辺域は、空気塊の流動の場として気温を低下させる効果をもつものと考えられる。

4. 水面蒸発量の直接測定に基づく潜熱の評価

河川や池沼などの水域は、“風の道”としての効果に加え、顕熱や水面蒸発に伴う潜熱や水塊中の貯熱によって都市の暑熱化を緩和する効果をもつといわれている。吉田・和久¹⁵⁾は、堀川のヒートアイランド低減効果を熱収支の観点から電力消費量として貨幣価値に換算することによって、都市河川の公共財としての資産価値を評価する先駆的な研究を行った。その試算結果を検証して今後の施策に活かすには、実際に堀川で測定した各種の熱収支データが不可欠である。そこで筆者らは、河川の水面蒸発量を直接測定する新たな測定方法を開発し、その結果をもとに潜熱フラックスを求めることにした。



(a) 河川橋梁上と公園西端の風速データ



(b) 風向・風速の河川の横断方向分布 (14時)

図-7 風向・風速の時間変動と空間分布 (2008年7月12日)

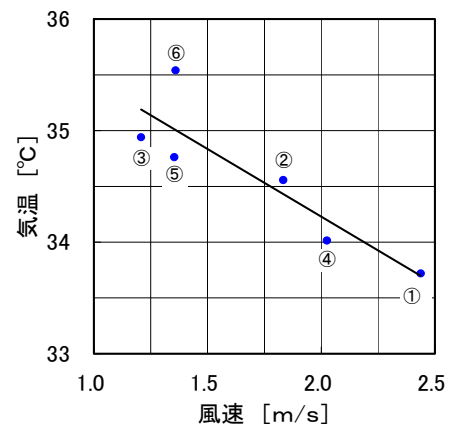


図-8 観測地点における気温と風速の関係

(1) 堀川における水面蒸発量の計測

a) 水面蒸発量の計測方法

蒸発量の観測は、図-5に示した微気象観測区域の下流100 m地点で実施した。現地での水面蒸発量の測定方法を図-9に、使用した測定器具を写真-3に示す。堀川は感潮河川であり、潮汐により最大約2 mの水位変動が生じている。そこで、河川水を入れた浮体容器を護岸から水面に浮かべ、一定時間ごとに吊上げて、蒸発に伴う容器内の水量変化を電子天秤(Sartorius社製 141R)によって測定することとした。容器内の水温は河川水温と一致

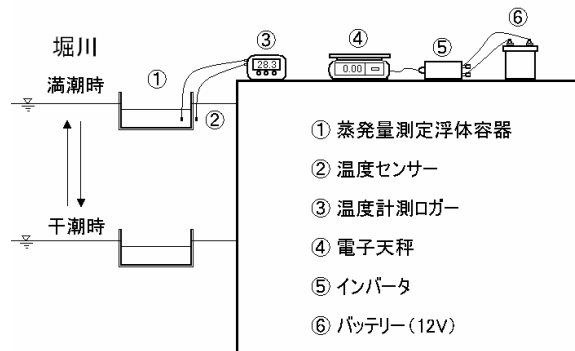


図-9 水面蒸発量の測定手法

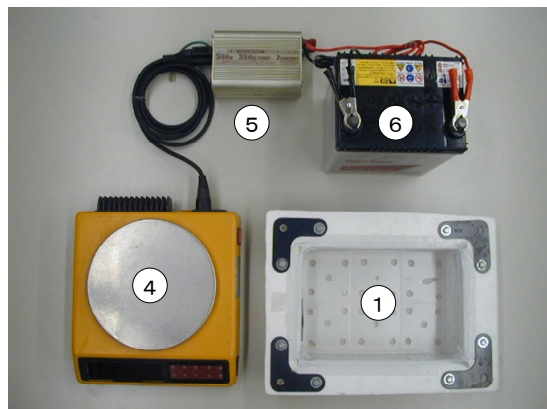


写真-3 測定に使用した器具

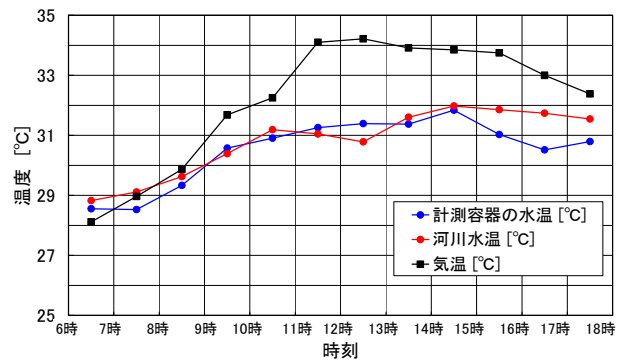
している必要があるため、大学構内で予備実験を繰り返して容器の製作と改良を行った。なお、水温測定には温度計測センサー（T&D社製 TR-71U）を使用し、水深2 cm 付近に設置した。

b) 水収支法による水面蒸発量の観測結果

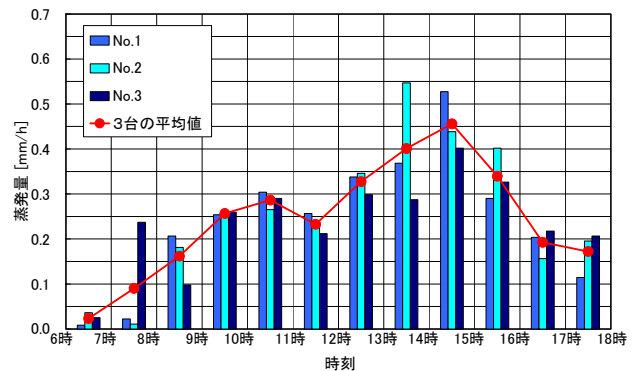
2007年8月21日における実測結果を図-10に示す。この日の天候は晴天であったが、正午前後に雲が広がった。図-10(a)は堀川の表層水温と容器内水温を比較したものである。15時以降に差異が認められるものの、他の時間帯で両者は概ね一致しており、河川水温と容器内水温の同等性がほぼ確認された。

水面蒸発量の測定精度を上げるために、浮体容器は3台（No.1～3）を設置した。図-10(b)は、その測定結果を示したもので、若干のばらつきが生じているが、各時間で3台の値を平均すると、蒸発量は容器内水温に対応して変化していることが分かる。

図-10(b)に示した6時～18時まで時間平均蒸発量を合計すると 2.94 mmとなるが、日没後も蒸発が継続する可能性を考えると、日蒸発量としては 4 mm程度の値となると推察される。近藤・桑形¹⁶⁾は、浅い水面（水温の季節変動による位相遅れを無視できる水域）からの蒸発量についての試算結果として、名古屋地域の8月の月蒸発量を 107 mmと推定している。この値を日平均値に直すと 3.45 mmとなり、晴天であった今回の測定値が妥当な数値であることが裏付けられる。



(a) 河川水温と容器内水温の時間平均値の比較



(b) 水面蒸発量の時間平均値の変化

図-10 堀川における水面蒸発量の実測結果（2007年8月21日）

(2) 水収支法とバルク法による潜熱フラックスの評価

蒸発に伴う潜熱フラックスを求める方法として、渦相関法・傾度法・熱収支法・ボーエン比法・バルク法などがある。ここでは1高度での風速・気温・水蒸気量の観測から簡易的に求まるバルク法を用いて潜熱フラックスを算出し、前述の蒸発量の測定結果から求まる潜熱フラックスと比較・検討する。バルク法と水収支法による潜熱フラックス IE [W/m²] はそれぞれ次式で得られる。

$$IE = l\rho\beta C_H(q_s - q)U \quad (1)$$

$$IE = l\rho_w E' \quad (2)$$

ここに、 l : 水の気化熱 [J/kg]、 E : 蒸発フラックス [kg/m²/s]、 ρ : 空気密度 [kg/m³]、 β : 水面の蒸発効率 (=1.0)、 C_H : バルク輸送係数、 q_s : 飽和比湿、 q : 比湿、 U : 水面上の平均風速 [m/s]、 ρ_w : 水の密度 [kg/m³]、 E' : 水面からの蒸発量 [m/s] である。

これらのうち、空気密度、飽和比湿、比湿、平均風速は、付近の橋梁上（水面から高さ 6 m）に設置した可搬型気象観測計による気温・相対湿度・大気圧・風速の連続観測データをもとに算出した。バルク輸送係数については、風速の測定値（約 1～4 m/s）を対数分布則より高さ10mの値に換算し、近藤¹⁷⁾による実用値を参考に $C_H=1.5\times 10^{-3}$ と仮定した。なお、橋梁上での風向は、午前10時頃までは川上からの陸風、それ以降は川下からの

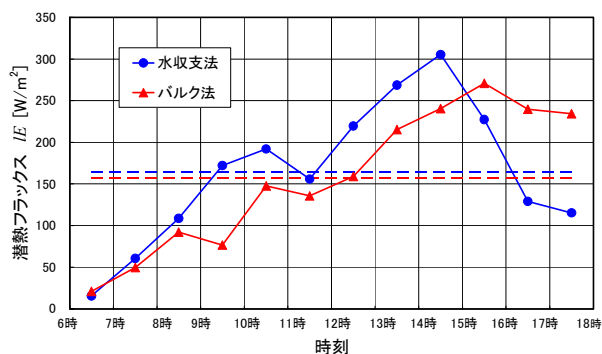


図-11 潜熱フラックスの時間的変化の算定結果

海風で、いずれも主として河川軸に沿った風であった。

バルク式(1)による潜熱フラックスの計算値と、図-10に示した蒸発量の観測値から式(2)によって算出した潜熱フラックスの時間平均値を図-11に合わせて示す。これによると、両者に多少の差異は認められるものの、その変動は類似しており、両者の相関係数は $R=0.677$ と良好であった。さらに図-11において、日中(6時～18時)の平均値は図中に破線で描いたように約 $155 \sim 165 \text{ W/m}^2$ とほぼ合致している。このことはバルク法による潜熱の評価が妥当であることを示すものである。また、この潜熱フラックスの日中平均値は、観測が行なわれた当日の日射量の日中平均値の約4割にも相当する。このことから、河川水面の存在が周辺地域の暑熱環境の緩和に一定の役割を果たしていることが認識されよう。

5. おわりに

本研究では、名古屋市を流れる堀川を対象として、都市河川のもつ大気冷却効果に関する現地観測結果を報告した。まず、河川に面した大規模公園の微気象の連続観測を行ったところ、開放空間である河川近傍ほど風が強く気温が低いものの、内陸部の地点ほど風が弱く気温が高い様子が明らかとなった。

つぎに、水面からの蒸発量を水収支法によって直接実測して潜熱フラックスを求めたところ、バルク式によって評価された値と概ね合致し、バルク法の有効性を裏付ける結果となった。この水面蒸発に伴う潜熱フラックスは日中平均で日射量の約4割に達し、河川水面の存在による大気冷却効果の大きいことが示された。

今後の取り組みとして、河川近傍において微気象と熱収支観測を継続し、本研究では扱えなかった顕熱や貯熱の効果を含めた河川の大気冷却効果を検討するとともに、より広域での気象条件と河川周辺の微気象状況との係わりをも明らかにしたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、名古屋市環境部より調査資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：平成17年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書，pp. 34-35, 2006.
- 2) 白 迎玖・三上岳彦・一ノ瀬俊明・巖 香姫：ソウル・清溪川復元事業による都市の暑熱緩和の観測（第2報），日本地理学会春季学術大会発表要旨集，2005.
- 3) 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.
- 4) 菅 和利・河原能久：都市河川，運河が周辺市街地の熱環境に及ぼす効果，水工学論文集，第37巻，pp.195-200, 1993.
- 5) 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報告集，Vol.545, pp.71-77, 2001.
- 6) 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.
- 7) 福田忠弘・鹿島正彦・鈴木譲・神田学：海風前線マップの作成による都市河川の風道効果の検証，水工学論文集，Vol.42, pp.49-54, 1998.
- 8) 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－，日本建築学会論文集，Vol.545, pp.65-70, 2001.
- 9) 水垣 浩・田中長光・笥 雅行：河川が有する熱環境改善効果について，リバーフロント研究所報告，Vol.15, pp.172-179, 2004.
- 10) 伊藤将文・前村良雄・田村英記：沿川市街地の温暖化対策調査，リバーフロント研究所報告，Vol.18, pp.215-222, 2007.
- 11) 加藤拓磨・土屋修一・渡邊暁人・蛭原雅之・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.
- 12) 久田由紀子・松永信博・安東聡：海風侵入が福岡都市圏の大気熱環境に及ぼす影響，水工学論文集，Vol.50, pp.487-492, 2006.
- 13) 名古屋市環境局：なごや水の環(わ)復活プラン－豊かな水の環がささえる「環境首都なごや」をめざして－，2007.
- 14) 牛山素行(編)：身近な気象・気候調査の基礎，古今書院，pp.7-14, 2000.
- 15) 吉田 尚・和久昭正：都市河川の公共財としての価値評価に関する考察－堀川のヒートアイランド低減効果について－，土木学会第62回年講，CS11-011, 2007.
- 16) 近藤純正・桑形恒男：日本の水文気象(1)：放射量と水面蒸発，水文・水資源学会誌，Vol.5, No.2, pp.13-27, 1992.
- 17) 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.168-172, 1994.

(2008. 9. 30受付)