

都市河川周辺大気の流れ・温度場に関するモデル実験

Model Experiment of Flow and Temperature Field around Urban Rivers

武若 聡*・池田駿介**・山本泰浩***

By Satoshi TAKEWAKA, Shunsuke IKEDA and Yasuhiro YAMAMOTO

The cooling effect of rivers was studied in terms of model experiments in which convective heat transfer and fluid velocity were measured for water flow in an open channel. The governing equations indicate that such a phenomenon depends on the Rayleigh number. It is observed that for small Rayleigh number, the flow consists of several longitudinal cells with a dimension of flow depth and weak large scale convective circulations with a scale of channel width. For large Rayleigh number, however, the latter circulation becomes predominant and the velocity on the non-heated area is remarkably large. It was observed that the cooling effect of non-heated area on heated area is limited to a narrow region, which agrees qualitatively with field observations.

Keywords : urban rivers, model experiment, heat convection

1. はじめに

近年になり親水性を重視した河川環境整備が進められてきており、視覚・心理的な観点から数多くの検討が加えられてきた。ところが河川が環境要素の一つである微気象に与える影響について調べられた例は少ない。夏期に都市内を流れる河川に近づくとき涼しさを感じるように、河川は周辺地域の微気象に影響を及ぼしている。

実際に著者らが夏期の隅田川周辺（東京都台東区、墨田区）で簡単な気象観測（気温、相対湿度）を行ったところ図-1に示すような結果が得られた。この時、風は川を斜めに横断する形で吹いており、風下で気温の低下、相対湿度の上昇といった河川水面の影響が見

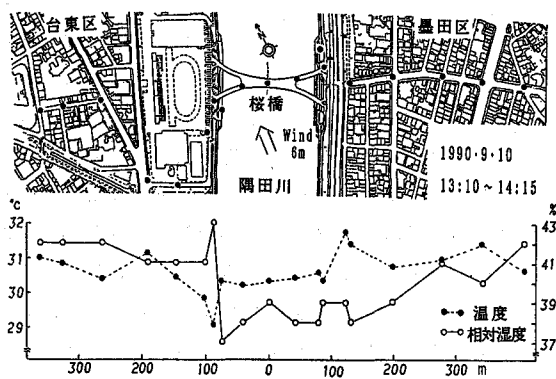


図-1 隅田川周辺の温湿度分布

* 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)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 東京工業大学技官 工学部土木工学科 (同上)

られる。また、村川ら^{1), 2)}が夏期に広島市内の河川周辺微気象を詳細に観測した例でも同様の影響が認められ、他にもこれを支持する観測例が存在する^{3), 4)}。

本研究ではこの河川が微気象に与える影響、特に河川が都市内に存在し、地表面温度の差から生じる熱輸送について流体力学的な側面から評価することを試みる。現地で生じている実際の現象は乱れた一般風場の存在、熱および水蒸気の輸送等といった複雑な気象プロセスから成るが、ここでは理想化された状況を想定した熱輸送のモデル実験を行う。実験では作業流体に水を用い、開水路の底面に設けた加熱・非加熱部により流れに乗る対流を発生させ、温度、流速分布を測定し、熱の輸送を調べる。これに先立ち相似則についての検討を行い、モデル実験と現地の現象の関係について議論する。

2. 相似則の検討

現実の大気の運動、地表面の状況は複雑であるが、ここでは以下のように単純化された状況を考える。被覆された地表面は強く熱せられ、その中を冷たい水表面を持つ河川が線上に存在する。熱せられた領域では等温的な混合層内で、河川近傍では冷気と暖気存在による対流が生じ、熱い領域への冷却効果が現れる。

表-1 相似則の検討

	高さスケール d [m]	温度差 θ [°C]	粘性係数 ν [m ² /s]	$Pr(\nu/\kappa)$	$Ra(\alpha g d^3 \theta \nu^{-2} \cdot Pr)$
現地(空気)	100~500(混合層厚)	1~2	10 (渦粘性 ⁵⁾)	0.8	$300 \sim 7 \cdot 10^4$
実験室(水)	20×10^{-3} (水深)	0.2~2	$1.5 \cdot 10^{-5}$ (分子粘性)	7.1	$2 \cdot 10^4 \sim 10^5$

Pr : プラントル数 Ra : レイリー数 κ : 温度伝導率 [m²/s] α : 体膨張係数 [°C⁻¹] g : 重力加速度 [ms⁻²]

本研究では対流による熱輸送に主眼を置きモデル実験を行うので、現象をレイリー数を用いて検討する。表-1に示すような諸条件を考えれば、水を用いたモデル実験でも現地の現象を再現していると考えられる。水面部のスケールで考えた現象のアスペクト比については相似的にならないが、加熱域ではこの値が十分に大きいベナール・レイリー型の対流が生じていることになる。ここでの議論は気象学的には厳密さを欠くものであるが、現象の概略は説明できるであろう。

3. モデル実験

現地の現象は複雑な気象プロセスから成るが、本研究では理想化された状況での熱輸送のモデル実験を行う。実験では作業流体に水を用い、空気の流れを模擬する。水は開水路の上流から一定温度、層流状態で流される。水路途中の底面の流下方向に同幅の加熱部、非加熱部を設け、高温な都市部、低温な水面部とする。これらの加熱・非加熱領域の存在により流れに乗る対流が発生し、温度、流速分布に変化が現れる。

このような実験では以下のように理想化した状況を想定していることになる。1) 半無限に広い都市部・水面部の接触部近傍、あるいは都市部・水面部が周期的に並ぶ場合の流れ。2) 風は都市内河川の流れ方向に平行に吹く。3) 都市部・水面部の粗度の差は無視する。4) 実験で生じる対流は必ず水面まで届くので、水深が日中に形成された混合層厚さに相当する。5) 実際の風場は乱流であるが、ここでは流れの乱れと対流による乱れを分離するために基本流は層流とする。従って対流による熱輸送が支配的である。

3. 1 実験装置および測定方法

実験は幅40cm、有効長さ約6mの開水路の中央部に長さ2.3m、高さ4cmの加熱・非加熱領域(各々幅20cm)を表面に持つ台を設置して行った。加熱には単位面積当りに一定の熱フラックスを発生するラバーヒータを用いた。これは1.5mm厚のアルミ板の下に敷かれ、断熱を目的として木製枠により支持されている。今回の実験は基本流が層流域(水深19mm, 平均流速18mm/s, レイノルズ数330)の範囲で行っているため、台の始端で発生する渦は減衰することが流れの可視化により確認されている。

温度 T および水平流速 U はサーマル式微流速計(KENEK, VS201)を用いて測定した。本機器は温度および流

速を検出する2本のプローブから成り、今回の実験のように温度分布が存在する場の測定ではこれらを干渉の生じない範囲で可能な限り近づけなければならない。温度、流速値は5HzでAD変換されたデータの1分間平均とした。さらに温度は台上流での値を差し引くことにより、加熱された結果としての温度として整理した。

3. 2 測定結果

測定は台始端から1.9m地点の断面内で行った。この位置では現象が流下方向に一様になっていることを流れの可視化により確かめた。実験は表-2に示すような条件のもとで行われた。Ra数は上流の水温と加熱領域の底面近傍の温度差から決定した。ここではRun-1, Run-3について詳しく述べる。

表-2 実験条件		
	温度差[℃]	Ra
Run-1	0.4	$2.9 \cdot 10^4$
Run-2	0.6	$5.8 \cdot 10^4$
Run-3	2.4	$2.3 \cdot 10^5$

i) Run-1: 写真-1は Run-1の流況をフローレッシンを用いて可視化したものである。加熱域では流体が加熱され、筋状に上昇流が発生しており、また、この筋の水面近傍では波状に下降流が発生している。これらはロール状セルと呼ばれるものである⁶⁾。中央の境から最初に見られる筋が非加熱領域から侵入してきた冷たい流体が熱せられ上昇している箇所である。非加熱領域では流れが層流状態にあることが伺われる。上昇流が発生する位置は時間的には変動するが、これらの間隔は平均的に約4cmであり、これは水深のほぼ2倍にあたる。これより対流により形成されるロール状セルのスケールはほぼ水深の大きさであることがわかる。

図-2(1)は底面からの高さz=5mmと13mmでの横断方向流速分布を示したものである。加熱領域では対流により低速な流体が上方へ持ち上げられ、流れが遅くなる。また、この効果により中央の境界近傍の非加熱領域側の流速が速くなる。 図-2(2)は各点での鉛直方向流速分布を示したものである。図中に示した非加熱時の放物型の基本流と比較すると、加熱領域で流速分布が一様化し、遅くなっていることがわかる。加熱平板上に発達する層流境界層の流速分布を計算したMori⁷⁾の研究でも同様の傾向が見られる。 図-2(3)は断面内の

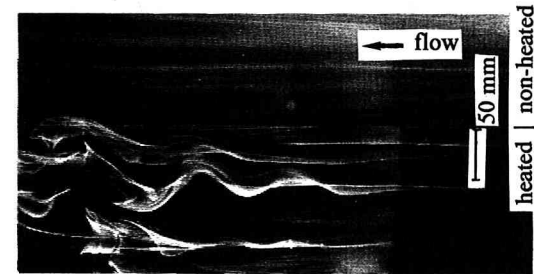


写真-1 Run-1の流況

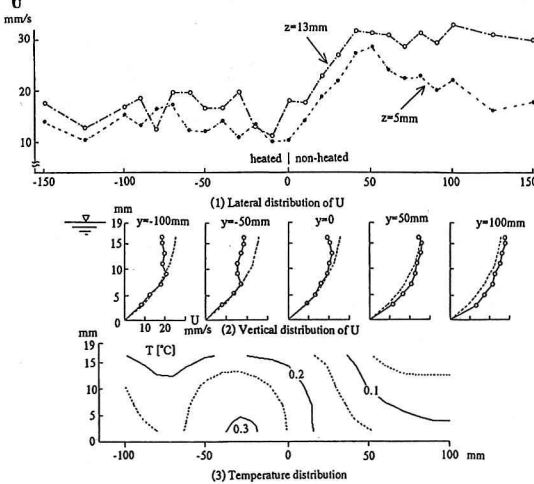


図-2 Run-1の流速・温度場

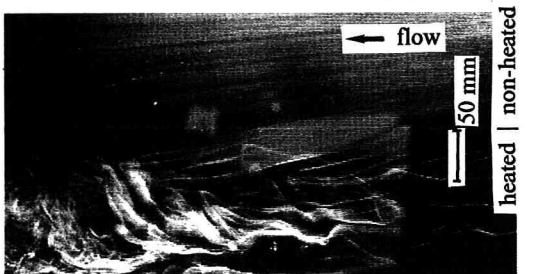


写真-2 Run-3の流況

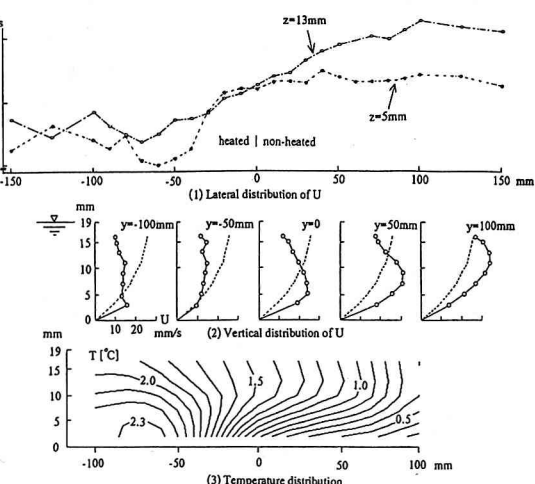


図-3 Run-3の流速場・温度場

等温線図である。非加熱域から侵入してきた冷たい流体が加熱されて上昇する位置に対応して、高い温度の分布が見られるが、他の上昇流が存在する位置では測定に現れなかった。

可視化、また、測定結果から考えると、ここで生じている現象は局所的な対流セルと弱い大規模な対流セルが共存する場となっている。しかしながら、加熱域の影響は遠方までは及んでいない。

ii) Run-3: 写真-2は Run-3の流況を可視化したものである。Run-1では加熱域の影響は局所的であったのに対して、ここではその影響が非加熱領域の遠方にまで及ぶ。加熱域で生じている対流は乱れており、上昇流の筋の発生位置は不明瞭になっている。上昇した流体は水表面近くを伝って非加熱領域へ運ばれて行く。中央の境界(写真中央)では流線が斜めになっており、非加熱領域から侵入してくる冷たい流体が大きな横断方向流速成分を持っていることがわかる。これより、Run-3では局所的な対流セルは不明瞭となり、大規模な対流セルが支配する流れの場になっているものと考えられる。

図-3(1)は底面からの高さ $z=5\text{mm}$ と 13mm での横断方向流速分布を示したものである。Run-1と同様に加熱領域では対流により運動量が奪われ、流れが遅くなっている。また、非加熱領域の遠方では加熱領域上方から来る流れの影響を受け、流れが速くなっている。 $y=-60\text{mm}$ では $z=5\text{mm}$ の流速値が落ち込んでおり、これは非加熱領域から侵入してきた流れが加熱され上昇している箇所に相当する。図-3(2)は各点での鉛直方向流速分布を示したものである。いずれの位置でも流速の最大値が水面下に出現し、可視化の結果と併せて考えると、加熱・非加熱領域に広がる大規模な2次流の存在が伺われる。また加熱領域ではRun-1と同様に流速分布が一様化し、遅くなる傾向が認められる。図-3(3)の等温度線図では前と同様、非加熱域から侵入してきた冷たい流体が加熱されて主に上昇する位置に対応して、高い温度の分布が見られる。 $y<-50\text{mm}$ の加熱領域では鉛直方向に不安定な温度分布となっており、逆に $y>0$ の非加熱領域では安定な温度分布となっている。これは加熱域で一様化した遅い流れ、非加熱域で速い流れが生じているという流速測定の結果に合致するものである。一般に河川に沿っては粗度高さの違いから都市部よりも風が吹きやすい状況となっているが、今回の実験で発生した大規模な対流によっても、このことが促進される可能性がある。

3. 3 冷却効果の到達範囲

先に実験条件を整理する際に用いた温度差の半値となる $z=2\text{mm}$ での y 方向位置を冷却域の影響範囲と定義した。Run-1では $y=16\text{mm}$ 、Run-3では $y=-12\text{mm}$ という値が得られ、主流が加熱域に平行である場合には影響の及ぶ範囲は比較的狭いことがわかる。これは現地観測の報告^{1)・2)・4)}からも指摘されていることである。

4. 結語

都市河川周辺の流れ・温度場を対流による熱輸送が支配的であると考え、簡単なモデル実験により再現した。本実験のような条件では、冷却効果の及ぶ範囲は比較的狭く、また、大規模な対流発生時には冷却域の流れが速くなることがわかった。冷却効果の範囲が狭い原因、風向きが河川と平行でない場合の冷却の範囲、あるいはこれをどのように促進できるかを実験的、数値的に調べることは興味深く、今後の課題である。

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, Trans. AIJ, vol. 393, pp. 25-34, 1988.
- 2) 村川三郎ら: 同上(続報), Trans. AIJ, vol. 415, pp. 9-19, 1990.
- 3) 福岡義隆ら: 都市気候に及ぼす河川水の影響, 水温の研究, vol. 24, pp. 2-9, 1980.
- 4) 北川明ら: 河川周辺の気候の快適性, 土木技術資料, vol. 31, pp. 506-511, 1989.
- 5) 木村竜治: 地球流体力学入門, 東京堂出版, 247p., 1983.
- 6) 小倉義光: 一般気象学, 東京大学出版会, 314p., 1984.
- 7) Mori, Y.: Bouyancy effects in forced laminar convection flow over a horizontal flat plate, J. Heat Transfer, vol. 83, pp. 479-482, 1961.