

〈一般研究課題〉 都市河川によるヒートアイランド緩和効果
に関する実証的研究 —河川の“風の道”
効果および水面の熱収支特性に着目して—

助成研究者 名城大学 原田 守博



都市河川による
ヒートアイランド緩和効果に関する実証的研究
—河川の“風の道”効果および水面の熱収支特性に着目して—
原田 守博
(名城大学)

Field Investigations and Simulation on Reduction Effects
of Heat-Island Phenomena by Urban Rivers and Ponds
— Ventilation Path and Heat Balance Effects of Water Area —
Morihiro Harada
(Meijo University)

Abstract :

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 pond are expected to be preserved for mitigation of the heat island. However, the air cooling effect and mechanism in the water area have not been verified precisely. In this research, micro-meteorological observations are carried out on water areas in the city of Nagoya, such as the Nakagawa Canal, the Hori River and the Hayato Pond, to evaluate the radiation and heat balance and thermal storage capacity of the water body. In addition, the wind velocity and direction are observed at many points along the canal to investigate the ventilation path of the sea breeze. According to the field observation results, it is shown that the Nakagawa canal has the cooling effects of air temperature to some extent.

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。とくに名古屋市は、1961～2000年の気温上昇が $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ と全国平均の $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ を大きく上回っており、大都市の中で最も暑熱化が進行している地域である。ヒートアイランド現象の要因としては、まず市街地の拡大に伴う土地利用の変化と、工場等の事業所やエアコン、自動車からの人工排熱の増大が挙げられる。このほかコンクリート建築物や道路のアスファルト舗装による貯熱量の増大、高層ビルや高架道路等の建設に伴う弱風域の形成も一因である。こうした都市の暑熱化の緩和対策として、壁面緑化やドライミスト、保水性舗装、高反射塗料、遮熱フィルムなどの最新の環境技術やアイデアが検討されてきている。しかし、そうした局所的な対策だけでは都市全体の暑熱化を抑えるには十分でなく、主たる要因となっている土地利用変化に対応して、緑化の推進や水面域の確保が求められる。名古屋市の場合、小規模な公園は数多く点在しているが、連続した緑地帯として緑の回廊を整備することが重要である。

一方、河川や溜め池などの水面域は、大気を冷却する効果として、① 水面のもつ熱的特性による効果、② 冷涼な海風による“風の道”の効果の二つが期待されている。前者は、水温と気温との差による顕熱、水面からの蒸発に伴う潜熱、熱容量の大きい水塊としての貯熱の効果から成る。後者は、河川が風の道として機能しているかどうか、そして、冷涼な海風や川風をどのように街に取り入れるかが問題となる。

河川に沿った気温や風に関する微気象観測はこれまでに全国各地で行われており、広島の大田川、東京の荒川や目黒川等の報告がある。さらに放射収支や熱収支も含めた詳細な検討には、隅田川や荒川での報告がある。名古屋市の市街地を流れる河川としては、堀川・新堀川・山崎川・中川運河等が挙げられ、名工大・堀越教授による海風遡上の調査例がある^{1),2)}。また、市内の溜め池については、都市化とともに消滅してきたものの、現在でも小規模なものを入れると116の池が残存する。こうした水面域における暑熱環境緩和効果を評価することは、今後の街づくりにおいて重要な基本情報となると考えられ、詳細な観測に基づく定量的な評価が必要である。

著者らは、まず上記①の熱的效果に関して、既往の研究を踏まえ、市内の水面域を対象に気温湿度や風向風速等をはじめ、放射量や水温の測定を含む微気象観測を行ってきた^{3),4),5)}、堀川・中川運河(2008～2009年)、昭和区の隼人池(2010年)で観測を行い、水面域と陸域の熱収支特性を比較するとともに、2011年には水面上と水中の熱収支を詳細に解析した(土木学会論文集, 2012)。また、②の風の道効果については、中川運河において2009年より行ってきた観測に加え、2011年には(1)夏期における中川運河に沿った海陸風の連続観測、(2)中川運河と堀川等との風況比較、(3)中川運河を含む広域での風況シミュレーションを実施した。ここでは紙面の関係により、②に関わる観測結果の概要を報告する。

2. 中川運河における海陸風の実態

中川運河は、Fig. 1に示すように、名古屋港から名古屋駅南部にかけて市街地を南北に貫く全長約8.4kmの水域である。水面幅が60～80mと広く、運河周辺の建物が低層であるため、風が通り抜けやすい地理的特徴となっている。また、海陸風とは陸面と海面の熱容量の違いに基づく局地風であり、日射等によって陸面が暖められた際、陸面での上昇気流を補うように海風が吹くことが知ら



Fig. 1 対象地域および観測地点



Photo 2 火の見櫓および水管橋での観測風景



(a) 可搬型気象計



(b) 複合気象観測計

Photo 3 観測に使用した機器

れている。一方、夜間等に陸面の温度が下がった際には陸から海に向けて陸風が吹くとされている。ここでは、こうした海陸風が中川運河に沿ってどのように生じているか、その実態について、鉛直方向の風の分布および運河に沿った方向の風の詳細な観測を行った。

風の鉛直分布の観測は、Fig. 1に示す中流域の昭和橋右岸に位置する鉄塔(火の見櫓、高さ18m)に、風向・風速・気温・湿度・気圧等が測定できる可搬型気象観測計(Nielsen- Kellerman社製 Kestrel4500, Photo 3 (a))を8台設置して同時観測を行った。観測風景をPhoto 2に示す。観測期間は2010年6月16日～17日、6月30日～7月1日、2011年8月10日～17日、記録間隔は1分である。運河に沿った風の観測では、Fig. 1の6地点に可搬型気象観測計を設置し、長期間にわたる同時観測を行った。機器の設置地点については、運河の側岸部の場合、周囲の建物や樹木の影響を受けることが考えられるので、水管橋などを活用して運河中央で観測することに努めた。水管橋での設置状況をPhoto 2に示す。観測期間は2010年8月18日～23日であり、記録間隔を5分とした。なお、現在は、今回の研究費で整備された複合気象観測計(Vaisala社製WXT-520, Photo 3 (b))を鉄塔頂部に設置して、太陽電池パネルと大容量データロガーを用い長期連続観測を行っている。その観測結果は別稿にて取りまとめる予定である。

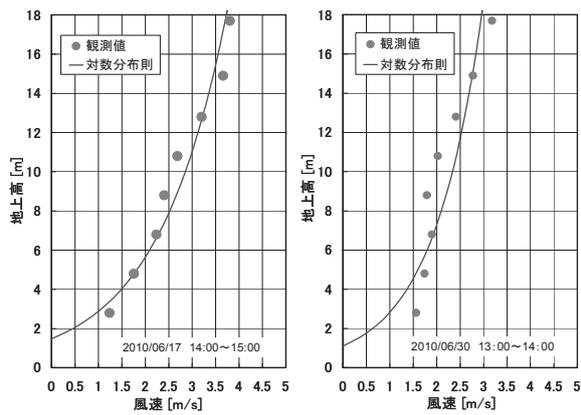


Fig. 2 風速の鉛直分布の一例

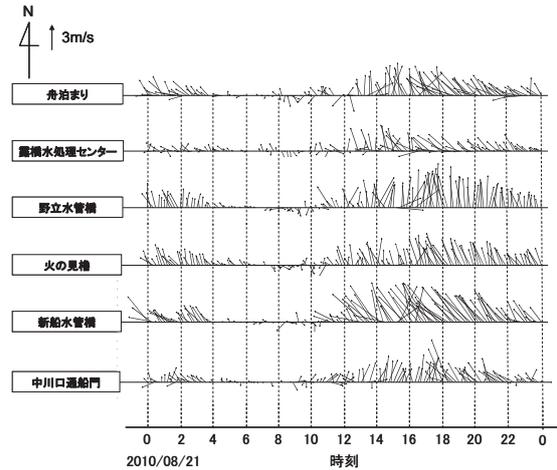


Fig. 3 各地点における風向風速ベクトル

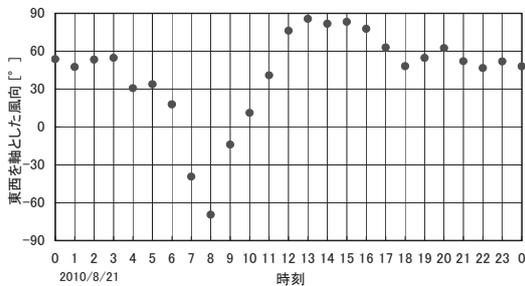


Fig. 4 6地点の平均風向

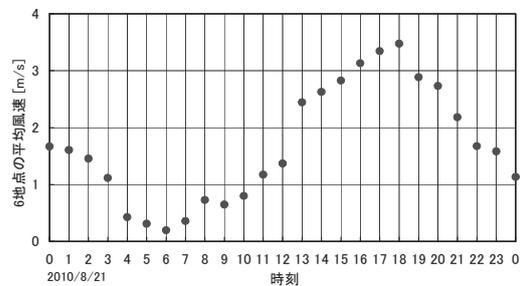


Fig. 5 6地点の平均風速

2.1 風の鉛直方向の分布

風速の鉛直分布に関する観測結果の一例をFig. 2に示す。この図は、各高度で測定された水平風速を1時間平均したものである。風速は地上で弱く、高度が上がるにつれて次第に強くなっていくことがわかる。一般に風速の鉛直分布は、対数関数式(1) (または分数関数式)で表現されることが多い。

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここに、 U : 時間平均風速[m/s], z : 地上からの高さ[m], u_* : 摩擦風速[m/s], κ : カルマン係数(=0.4), z_0 : 粗度高度[m]である。観測値に上式を当てはめた結果をFig. 2に併記した。図からわかるように、分布曲線は観測値とよく適合しており、風速の対数分布則の有効性が確認された。この結果は、中川運河周辺の3次元的な風の流れを考える上で有益な情報となる。

2.2 運河沿った風向・風速

中川運河に沿った6地点において観測された風向風速をFig. 3に示す。図中のベクトルは、長さで風速を、傾きで風下の方向を示している。図から分かるように、全地点において日中の風向は南寄りであり、夜間に北寄りの風が吹いているが、上流向き・下流向きといった運河に沿った方向の風は認められない。測定値には地点ごとにばらつきが認められるので、以下では全地点についての平均を取って議論を進める。

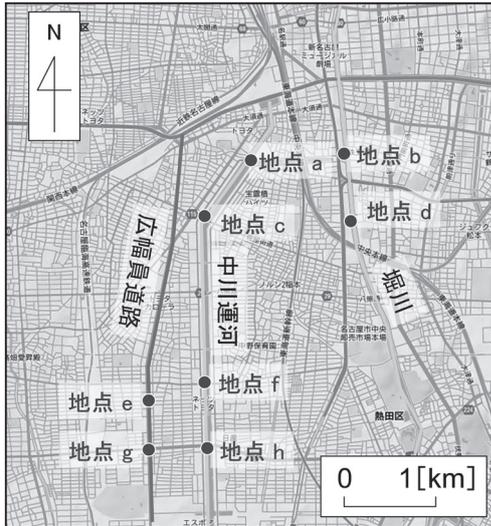


Fig. 6 風況の比較観測地点

Table 1 観測地点の詳細

	河口からの距離 [km]	幅 [m]	観測点の高さ [m]
a 小栗橋	7.3	76	6.3
b 松重橋	7.6	24	-
c 長良橋	6.5	89	7.5
d 古渡橋	6.8	21	-
e 太平通第2歩道橋	4.4	31	6.8
f 中野橋	4.6	62	6.4
g 昭和通歩道橋	3.9	45	6.9
h 昭和橋	4.0	62	6.7

Table 2 観測日時(2011年)

	1回目	2回目
地点a-b	8/14 14:22~15:22	8/26 15:55~16:55
地点c-d	8/18 14:40~15:40	8/26 14:32~14:32
地点e-f	8/9 13:40~14:40	8/13 13:51~14:51
地点g-h	8/13 16:00~17:00	9/15 16:45~17:45

Fig. 4は、各地点での風向について1時間ごとに平均値を求め、それらを6地点で平均して、東西を軸とした角度で表したものである。角度の平均についてはベクトル合算法を用いている。図において、 $+90^\circ$ は南風、 -90° は北風を表す。中川運河は名古屋港から南北に伸びていることから、南風は運河に沿った海風、北風は運河上流からの陸風であることを意味する。図を見ると、風向は午前10時から午後・夜間を通じて明け方5時頃までは南寄りの風、早朝においては北寄りの風が吹いており、それぞれ海風と陸風が発生していることが確認できる。

Fig. 5は、各地点での時間平均風速を6地点で平均した値を表したものである。風速は明け方6時から増加し始め、日中18時に最大となったのち夜間にかけて減少している。明け方の陸風の風速は、日中の海風に比べてはるかに小さい。以上、今回実施した運河中央における風の多地点観測により、中川運河では、よく晴れた夏の日において、午後と比較的強い海風が、未明から早朝にかけて弱い陸風が発生しており、明らかな海陸風の存在が確認された。

3. 中川運河と堀川と広幅員道路における風況の比較

暑熱環境の緩和策として“風の道”が機能するためには、連続した開放空間が必要である。特に名古屋市内への海風を考える場合、南北方向に直線的に伸びる河川や広幅員道路が想定される。ここでは幅の異なる河川や道路の間で風況にどのような違いがあるのか明らかにすることを目的に、川幅の広い中川運河と狭い堀川、中川運河と隣接した広幅員道路を対象として、それぞれ風況の同時観測を行った。

観測には前述の可搬型気象観測計Kestrel4500を2台用いた。観測地点は海からの風の遡上を考慮して河口からの距離が同じになるように選定した。また、風速は地表の凹凸が摩擦となって鉛直方向に変化することから、道路上の観測高さが河川や運河の水面上の観測高さと同様になるよう歩道橋の上で測定を行った。選定した観測地点をFig. 6に示す。観測は、中川運河と堀川の比較を地点a-b、地点c-dで行い、運河と道路の比較を地点e-f、地点g-hで行った。Table 1は、これらの観測地点の河口からの距離、道路や河川の幅、運河と道路の観測地点の鉛直高さを示したものである。

観測に当たっては、周辺から受ける風への影響を避けるために、河川の橋梁や道路の歩道橋の中

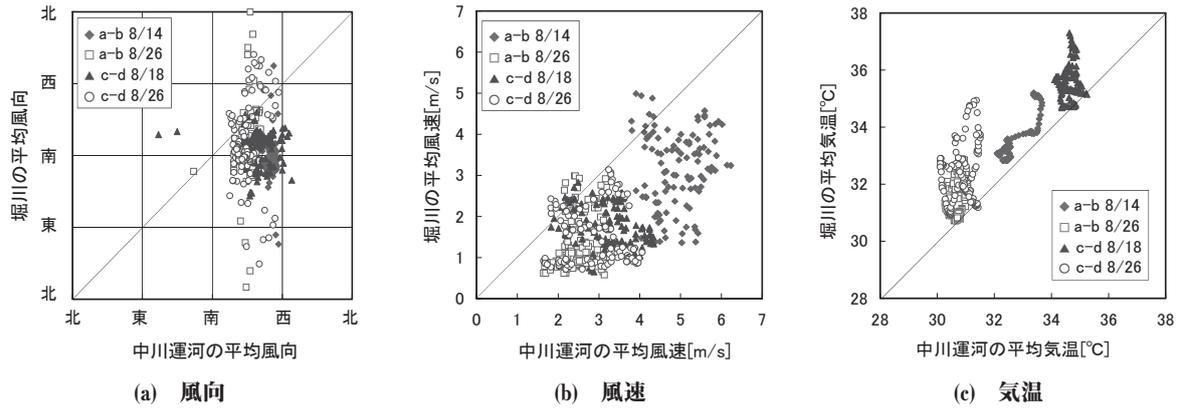


Fig. 7 中川運河と堀川の風況と気温の相関

央で測定を行った。観測対象日は、海風の風況を比較するため、2011年8月から9月の気圧が安定した晴天日を対象とした。観測時間は、これまでの中川運河における海風の観測で得られたデータから、12時から18時に南からの遡上が見られたため、この時間内の1時間とした。観測を行った日時をTable 2に示すに。これらの観測時における名古屋港海上交通センターで観測された風向と風速を調べたところ、いずれの観測を行った時刻には南から都市部に向けて風が遡上していることが確認できた。

3.1 中川運河と堀川における風況の比較

Fig. 7は、運河と堀川の観測された風向・風速・気温を3分間で移動平均し、2地点の相関関係を示したものである。これらの図の横軸は中川運河、縦軸は堀川での観測値を示しており、プロットが斜線に沿うように分布するほど2地点の相関性が高いことを意味する。

まず、図(a) 風向を見ると、2地点の値は中央部を中心に縦に広がって分布している。すなわち、中川運河では風向は主に南南西であるのに対して、堀川では南が多いもののバラつきが見られる。南からの方向は両河川が上流へ伸びる方向に一致しており、海風が遡上していることが分かる。堀川での風向が安定していないのは、川幅の狭さや周辺建物の影響が出ているものと思われる。

次に図(b) 風速を見ると、斜線よりも中川運河の軸に近い位置で分布しており、運河では堀川に比べて風速が速いことが確認できる。また、中川運河での風速はどの日時の分布でも1.5 m/sを越えている。それに対して、堀川での風速は1.0 m/s前後に留まっていることが分かる。最後に図(c) 気温を見ると、運河沿いの気温は堀川に比べて1~2 °C程低い値となっていることが確認できる。それぞれの河川でみると、1時間当たりの気温の変動幅は、運河で1.5~2 °C程変動するのに対し、堀川の気温は3~4 °C程の変動がみられる。

以上の結果から、川幅や開放性の異なる中川運河と堀川の間では、川幅の広い運河の方が上流に向けて風の通しのよい開放空間であることが明らかになった。また、堀川は、水上を風が通るにもかかわらず、気温の上下の変動が大きいことがわかる。

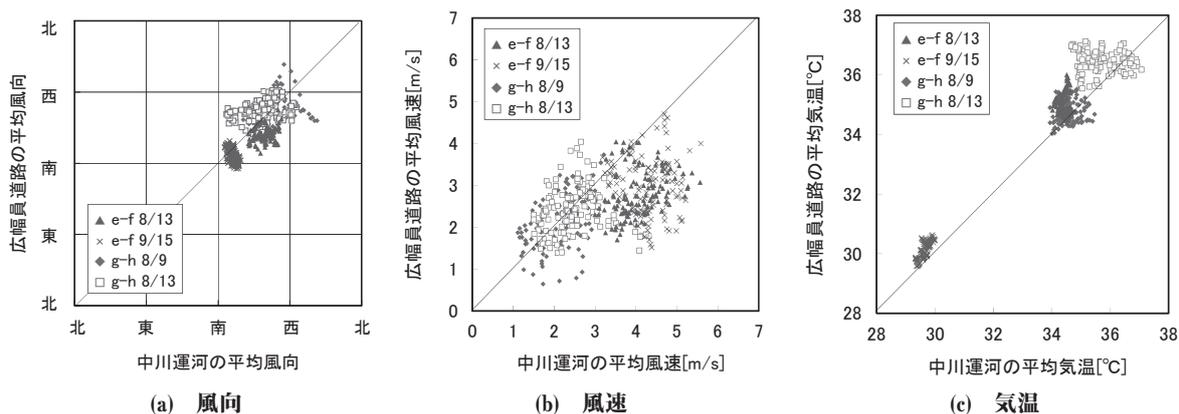


Fig. 8 中川運河と広幅員道路の風況と気温の相関

3.2 中川運河と広幅員道路における風況の比較

Fig. 8は、地点e-f、g-hの観測により得られた風向・風速・気温を3分間で移動平均し、2地点の相関関係を示したものである。これらの図は、横軸に中川運河、縦軸に広幅員道路の値を表している。まず、図(a)風向を見ると、グラフの斜線に沿うように分布していることから、相関性の高い風向であることが確認できる。また、運河と道路が南北方向に開放空間をもつことに対し、風向は主に南西を示している。これは、道路や運河に交わる東西方向の道路に沿う風の流入が原因であると考えられる。

次に図(b)風速を見ると、地点g-hでは、斜線に沿って分布していることから相関性が高いが、地点e-fでは、運河の方が道路よりも強い風が吹いている。また、プロットの分布にばらつきは見られず、斜めに分布している。このことから風速の変動が似ていることがわかる。

最後に図(c)気温を見ると、中川運河の気温は広幅員道路に比べて若干低いことが確認できる。また、それぞれの気温の変動は小さく、ほとんど一定の気温を示している。以上の結果から、運河と道路の間で比較した場合、風向と風速に大きな差が見られないが、気温は道路の方が高く、その要因として人工排熱等による影響が挙げられる。しかし、広幅員道路は風通しが良く、気温の変動も小さいことから“風の道”としての機能を持つことが考えられる。

3.3 開放空間における天空率と風況への影響

中川運河と堀川の風況の比較から風速に差がみられたが、運河と道路からは同じような風速が確認できた。この結果より風の強さには、開放空間に沿う風には河川や道路の幅だけでなく、周辺の建物等の存在も含めた開放性が関係していると考えられる。そこで、各地点での空間の開放性を天空率で数値化し、天空率と風速との係りについて検討する。

(1) 天空率の算出方法

天空率とは、「全天空に対する日射を遮断する障害物を除いた水平投影面積の比率」と定義される。天空率が大きくなるほど、その場所にある建物が少ないことを意味する。天空率と風速の関係を明らかにすることで、周辺の建物による開放性と空間に沿う風の強さの関係を定量的に評価することができる。天空率は、デジタルカメラに魚眼レンズを使用して上空の写真を撮影し、解析ソフトCanopOn2によって数値化した。撮影に当たっては、水準器を用いてカメラを水平にし、Fig. 9

のように河川の橋梁や道路の歩道橋の中央に設置した。なお、晴天日で撮影した写真は、レンズが太陽光に反射して正しく解析できないため、撮影は雲が広がった日を対象とした。

対象とする撮影地点は、中川運河と堀川および広幅員道路に沿った河口から10 kmまで範囲の橋梁と歩道橋である。その中で、撮影地点の上空に高架橋やトラスなどが存在すると開放性の検討に影響が出るため、これらの場所は除外した。この条件をもとに天空率の評価地点をFig. 10のように選定した。各評価地点までの河口からの距離をTable 3に示す。

(2) 天空率と風速の係わり

上記の条件で2011年11月に現地撮影を行い、各地点の天空率を解析した結果をFig. 11に示す。図は横軸に天空率、縦軸にTable 3に示した河口からの距離をとり、凡例の色で河川や道路の区別を表す。図を見ると、中川運河の天空率は全区間を通じて95%以上であることが確認できる。また、広幅員道路は地点により異なるが、概ね80%以上を示した。堀川は下流部で90%以上を示すが、河口から5.5km付近で急激に低くなり、桜橋では59%という最低値を示した。これらの結果から、運河と道路では似たような開放性を持つが、運河と堀川では開放性に極端な差がみられた。

次に、解析で得られた各地点の天空率と、その地点で観測された風速との関係をFig. 12に示す。

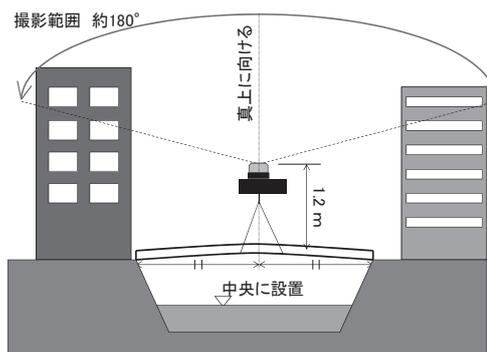


Fig. 9 上空写真の撮影状況

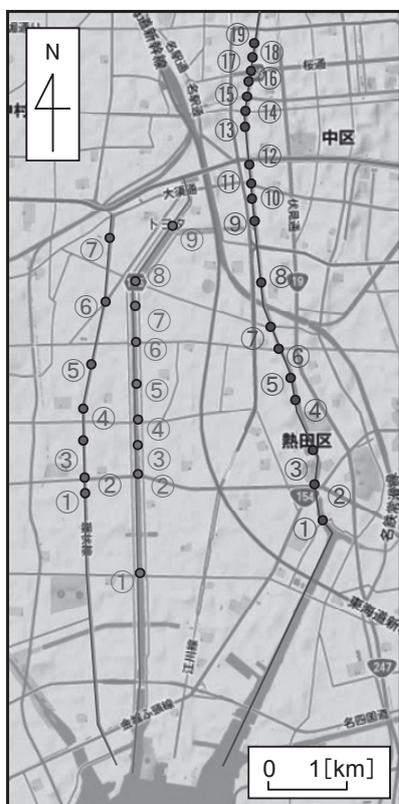


Fig. 10 天空率の評価地点

Table 3 天空率評価地点の河口からの距離

中川運河		河口からの距離[km]	堀川		河口からの距離[km]	
①	東海橋	2.6	①	大瀬子橋	3.2	
②	昭和橋	4.0	②	白鳥橋	3.7	
③	蜷橋	4.4	③	御陵橋	4.1	
④	中野橋	4.6	④	旗屋橋	4.9	
⑤	野立橋	5.0	⑤	瓶屋橋	5.2	
⑥	篠原橋	5.7	⑥	住吉橋	5.6	
⑦	八熊橋	6.0	⑦	尾頭橋	5.9	
⑧	長良橋	6.5	⑧	古渡橋	6.5	
⑨	小栗橋	7.3	⑨	松重橋	7.2	
歩道橋		河口からの距離[km]	⑩	日置橋	7.5	
①	小碓通	3.7	⑪	岩井橋	7.8	
②	昭和通	3.9	⑫	洲崎橋	8.0	
③	太平通第2	4.5	⑬	天王崎橋	8.5	
④	太平通	4.9	⑭	納屋橋	8.7	
⑤	太平通第3	5.3	⑮	錦橋	8.9	
⑥	市女子町	6.3	⑯	傳馬橋	9.2	
⑦	五月南通	7.0	⑰	桜橋	9.2	
			⑱	中橋	9.4	
				⑲	五条橋	9.6

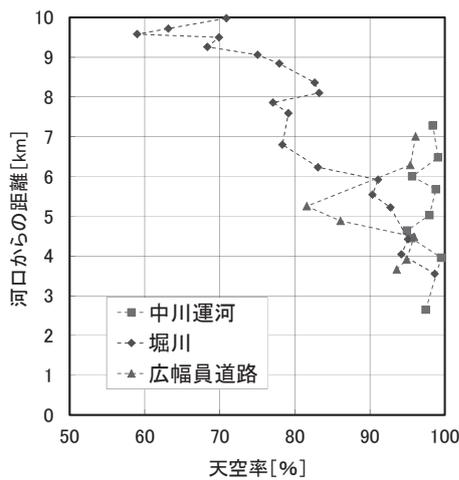


Fig. 11 河口からの距離による天空率の変化

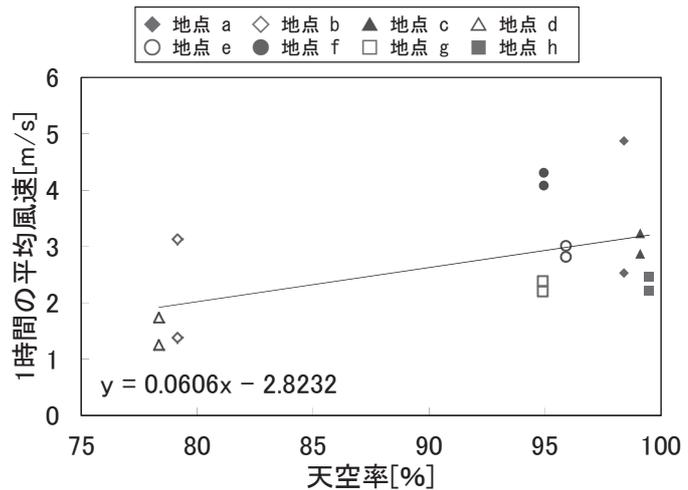


Fig. 12 天空率と風速の相関

図では、横軸に天空率、縦軸に風速の値を表している。この図から、天空率が低くければ風速が小さく、天空率が大きくなるにつれて、風速も大きくなるように分布していることが分かる。この結果より、各地点の空間開放性と風速は一定の相関をもつことが明らかである。

4. おわりに

本研究では、都市内の水域のもつ暑熱環境の緩和効果を定量的に評価するため、名古屋市内の各所で現地観測ならびに解析を実施した。このうち、本報告で述べた内容について、結論を以下にまとめる。

- (1) 中川運河周辺における風の実態を明らかにするため、鉛直方向と運河に沿った方向について、風向・風速の多地点観測を実施した。中流域の鉄塔を用いた鉛直方向の観測により、風速の鉛直分布は対数則に従っていることが確認された。上空では冷涼な風が強く吹いていることが明らかとなった。
- (2) 運河流下方向の風の観測により、夏季の快晴日には運河に沿って海陸風が発生しており、冷涼な海風が吹き抜けていることが明らかとなった。このことから、運河が“風の道”として機能していること、また海風を活用することにより、市街地の暑熱環境をさらに緩和できる可能性が示唆された。なお、夜間に見られる陸風は非常に弱く、明け方の短時間に限られることが分かった。
- (3) 中川運河と堀川および広幅員道路における風況を比較する目的で、河口から等距離の各2地点で風向風速と気温の同時観測を実施した。中川運河と堀川の比較により、運河の方が堀川よりも、上流に向けて強い風が吹くこと、また、運河では堀川に比べて気温が1~2℃程低い値となっていることが確認できた。このことから、運河は堀川よりも風の道として有効的であることが明らかになった。中川運河と広幅員道路における風速や風向には差が見られなかったが、気温は道路の方が運河に比べて若干高いことが分かった。この要因として、自動車による排熱が考えられる。
- (4) 河川や道路の空間的開放性による風への影響を明らかにするため、橋梁や歩道橋において

上空の写真を撮影し、天空率を算出した。その結果、天空率と風速には一定の相関が見られ、川幅や周辺建築物による空間の開放性の変化が風況に大きく影響していることが明らかになった。

なお、本報告では記述を割愛したが、以下の内容についても一定の成果を得ている。

- (5) 三次元大気シミュレーションモデルHOTMAC(High Order Turbulent Model for Atmospheric Circulation)を用いて、名古屋市中西部の風況の数値シミュレーションを実施した。現在のところ解析は試算の段階であるが、中川運河だけでなく堀川沿いにおいても海風の流れ込みが見られている。今後、河川の“風の道”効果について、より定量的に評価できるよう解析を進める予定である。
- (6) 中川運河や隼人池等の水面と舗装された陸面において放射収支・熱収支観測を実施し、顕熱・潜熱・地中(水中)伝達熱について検討したところ、水面では、顕熱は負の値、潜熱は一定の値、伝達熱は陸面と比較して2倍近く大きい値であった。このことから、水域は陸域に比べ大気を冷やす大きな効果があることが確認された。
- (7) 水域の水塊としての貯熱効果を検討するため、水温観測を実施した。その結果、水塊の貯熱量は日射量の約半分の熱量に相当することが判明した。このことは、広大な水面と深い水深をもつ中川運河や溜め池は、水塊として多くの熱を貯め込むことを示している。
- (8) このほか、運河の存在が周辺市街地の気温へ及ぼす影響について検討するため、運河横断方向における気温の移動観測を行った。その結果、夏季の日中では運河からある一定の範囲で気温の低下が認められ、その距離は運河から約150mという結果が得られた。このことから、運河の水面による冷気が市街地へしみ出ていることが示唆された。

以上より、名古屋市内に広大な水面をもつ中川運河は、水塊としての熱的效果や風の道による大気冷却効果が期待され、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。今後もこうした水域を保全するとともに、沿岸域からの海風を取り込むように都市計画を進めていくことが重要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、現地観測に於いて名古屋市住宅都市局・上下水道局・消防局ならびに名古屋港管理組合に多大なる協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本剛・船橋恭子・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.
- 2) 向井愛・堀越哲美：名古屋市中川運河における海風遡上が体感気候に及ぼす影響，日本建築学会計画系論文集，Vol.553，pp.37-41，2002.
- 3) 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, 土木学会水工学論文集, vol.53, pp.301-306, 2009.

- 4) 原田守博・高木智之・鈴木宏佳・手嶋健治：都市河川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, 土木学会水工学論文集, vol.54, pp.319-324, 2010.
- 5) 原田守博・鈴木佳宏：都市域における溜め池の熱収支特性の評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I_1741-I_1746, 2012.

