

都市微気象の創生型水施設の開発

(実測による環境創生型水施設の提案と風洞モデル実験)

DEVELOPMENT OF NOVEL WATER FACILITIES
FOR CREATION OF COMFORTABLE URBAN MICROMETEOROLOGY
(Present of Novel Water Facilities Based on Field Measurements and Wind Tunnel Tests)

野 邑 奉 弘^{*1} 西 村 伸 也^{*1} 伊 與 田 浩 志^{*1} 木 本 進 弥^{*2}
Tomohiro NOMURA Nobuya NISHIMURA Hiroyuki IYOTA Shinya KIMOTO

Abstract

Cooling effects of artificial water facilities - fountain, water fall as well as canal which are equipped in urban area - have not been paid a great attention. In order to improve local weather conditions in urban area, especially during the midsummer, we proposed novel artificial water facilities with an atmospheric temperature-reducing effects from a viewpoint of pedestrian comfort. For this purpose, we carried out both field measurements and wind tunnel tests. At first, we made meteorological observations on wind velocity, temperature and humidity of air near the water facilities in Tennoji Park at Osaka city. From the results, a drop in air temperature near the water facilities induced by evaporation of water droplets were confirmed. Also we made a wind channel with one-four-hundredth scale model. The variations of the structure of wind over different surfaces - which correspond to urban, suburban and rural terrains - were measured by means of X-type hot wire anemometer. Furthermore, the temperature distributions of air before and behind of water facilities were measured by using 60 pieces of T-type thermocouple. The magnitude of power indices and turbulence intensities were calculated as functions of surface roughness and were compared to earlier studies. From those results, we confirmed that the atmospheric turbulence conditions were reproduced in the wind tunnel. Finally, the cooling effects by the utilization of artificial water facilities were demonstrated both by the field measurements and by the wind tunnel tests.

Keywords : Artificial Water Facilities, Urban Micrometeorology, Heat Island, Local Climate Control, Field Measurement, Wind Tunnel

1. まえがき

現代の都市空間は気温が郊外よりも高くなる、いわゆる”ヒートアイランド現象”に象徴されるように、高温化が大きな問題となっている。さらに加えて、人工構造物で囲まれた中での真夏の照りつける暑さと構造物からの反射による放射熱により、この都市空間での温熱環境はきわめて不快になっている。このような環境を少しでも緩和する効果を持つものとして、樹木や芝生さらには水などの役割が重要視されている。このうち、樹木や芝生については、それらが環境に与える冷却効果についてすでに多くの研究報告^{1), 2)}とともに数多く都市内に配置されている。

一方、都市空間での水施設は、従来、噴水、噴霧やカナルなどに代表されるように、主に景観形成や親水性を目的として採用されてきた。そのために、水の冷却効果を定量的に把握し、積極的にその効果を生かそうとする試み、ないしは考え方は、これまでほとんど

水施設に対して採られていないかった。

そこで、本研究では、まず第一段階として、水施設を積極的に都市内の歩道際や建物間のような比較的狭い空間に配置し、これまでの親水性や景観形成などの機能に加えて、水の持っている温湿度調節機能、特に冷却効果を効率よく最大限に生かして、その生活空間の微気象温熱環境を調節することが可能な新しい水施設を提示しようとした。

そのために、人工の水施設が都市の比較的狭い領域に、どの程度の冷却効果を及ぼすかについて実地調査³⁾を行った。その結果を踏まえて、水施設をフィールドに配置して、所定の範囲の温熱環境を創生するための機能を備えた新しい環境創生型水施設の概念を提示した。

さらに、この環境創生型水施設を実際に開発するには、水施設の有する冷却性能や最適な制御系について検討することが不可欠となる。そのため、本研究では、モデルを作成し風洞実験により定量的に評価する手法を採用し、その手法について検討を加えた。まず水施設が設置される接地近傍の実大気に相似な気流特性を有する風洞を開発し、その風洞に水施設モデルを実装

* 原稿受付 平成8年4月30日

*1 会員 大阪市立大学工学部
(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*2 学生員 大阪市立大学大学院工学研究科

して、実大気相似下で水施設の冷却性能を測定可能な微気象形成型実験風洞を製作した。そして、その風洞内に水施設の基本型となる噴水モデルを設置して冷却効果の範囲を調べる実験を行った。これらの結果について報告する。

2. 都市水施設の実地測定と提案

上述したように、微気象温熱環境を改善する試みを提案するにあたり、まず、実際の水施設を用いて温湿度の調節の可能性とフィールドに設置するための必要条件について調べた。

既存の水施設として、都市区域に位置する公園（大阪市内の天王寺公園）に設けられた人工の水施設を対象とした。そして、本公園の四つの特徴ある水施設の中で、図1に示すように、石柱側面を落ちる滝と噴霧状の噴水が組合わざって設置された池（ステージ石柱池と称し、深さ約0.2m）に焦点を絞って、その周辺の東西60m、南北40mの部分に測定点を設けた。この水施設と測定点の関係を図2に示す。これらの測定点で、20秒ごとの気温（地上1.5m）、地表温度、水温を素線径0.3mmのT型熱電対を用いて測定した。なお、これらの熱電対には、太陽および地表面からの放射の影響を

極力避けるためにアルミ箔製の外筒を付けた。各測定点の温度は、温度計（江藤電気、サーモダックE）から20秒ごとにパーソナルコンピュータに取り込み記録した。また、各測定点の湿度と風速は、ハンディタイプの風速・温湿度計（日本カノマックス、クリモマスター・モデル6511）により1時間毎に測定した。風向、風速は風車型の自動風向風速計（こうしん、クリーンページMV-110）で測定した。

測定は平均的な夏期条件となっていた1992年7月30日から7月31日にかけて行った。両日とも快晴で2.5m/s程度の西北西の海風であった。なお、ステージ石柱池では、図1のように、平均高さ2.0mで横、幅共に0.5mの石柱が25本立ち並び、これら石柱上面から水を落とす滝運転と、水面付近から噴霧状の噴水を約4m噴き上げる噴水運転が繰り返されている。なお、噴水は120本の噴水ノズルより構成されており、各ノズルからの噴水量は20 l/minである。これらの滝、噴水運転は、
(1) 滝運転 20分ごとに10分間
(2) 噴水運転 滝運転停止時に3分間
のパターンで間欠的に9時から21時まで行われている。

2.1 実測結果および考察

(1) 水施設周辺の温度変化

図3に1日のステージ石柱池周辺の代表的な測定点での気温、地表温、水温の変化の一例を示す。敷石上の日中の最大地表温は50°C以上まで上がるが、ステージ石柱池水温は30°C程度、噴水運転により表面が濡れた敷石の最大地表温は39°C程度であった。さらに、敷石上の夜間の地表温は蓄熱効果により気温よりかなり高くなっていた。一方、ステージ濡れ部敷石地表温は、濡れ水の蒸発冷却作用により夕方には気温と同程度まで下がることが分かる。このことより、噴水の飛散領域を制御することで、気温、地表温の低下領域を操作できることが予測できる。

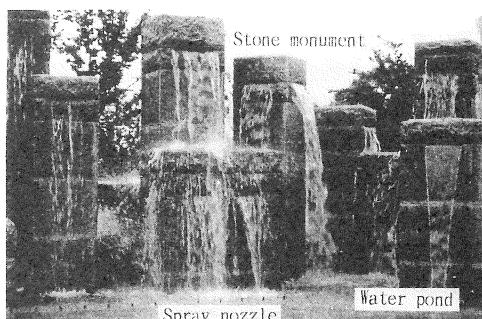


図1 天王寺公園ステージ石柱池

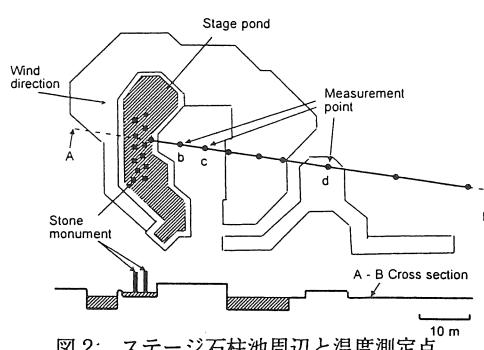


図2 ステージ石柱池周辺と温度測定点

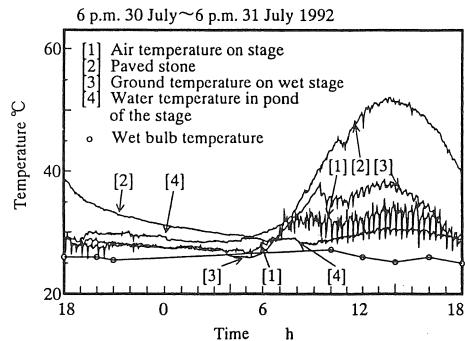


図3 水施設周辺の温度変化

(2) 風下側の気温変化

図4(b), (c), (d)にステージ石柱池の風下側の代表的な測定点b, c, dにおける7月31日12時から15時までの気温変化と噴霧運転時の冷却効果の測定結果例を示す。なお図4(a)において、上に凸の線は噴霧運転時を示している。ステージ石柱に近いほど、噴霧による大幅な気温低下の効果が見られる。これらの気温低下量、変動は、主に風向、風速、風の乱れなどの因子により影響を受けていると考えられる。

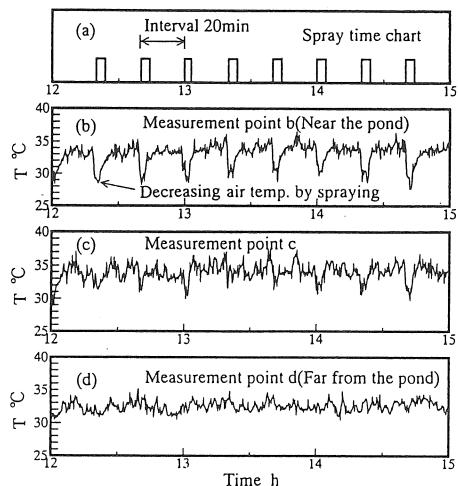


図4 風下側の気温変化

(3) 風下側の平均気温・湿度分布

図5に風下側の14時から15時までの平均気温と平均湿度の各分布を示す。ステージ石柱池に近い測定点ほど図4と同様に噴水運転時の気温が低くなっている。なお、測定点bには滝運転時に水のしぶきがかかっており、この点を考慮する必要がある。湿度は、温度変

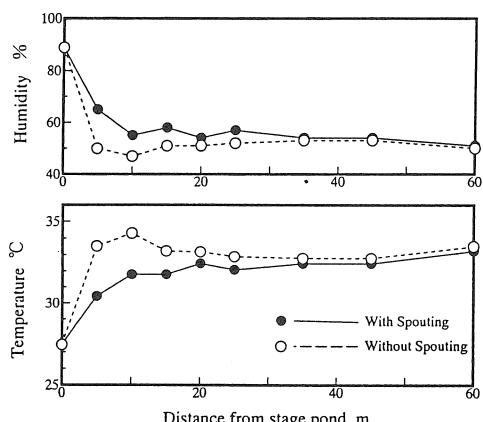


図5 A-B測定線上の気流の平均温度・湿度分布

化とは逆に運転時に高くなっている。以上の結果より、ステージ石柱池の噴霧と滝運転による水の蒸発作用による気温低下領域が、ステージ石柱池より風下側約35mの付近まで拡がっていることがわかる。また、非噴水運転時にも、本公園での平均気温約35°Cよりも1°Cから2°C程度温度が低くなっている。以上のことより、噴霧や滝運転により風下側に気温低下領域が存在すること、またその気温の低下の程度は、その水施設の種類により異なり、特に冷却には噴霧の水施設が有効であることが確認された。

2.2 環境創生型水施設のあり方と提案

これまで述べたように、実際の水施設について実測した結果、温熱環境調節への有用性が示された。加えて風速、風の乱れ量、風向、温度や湿度などの周囲環境条件が冷却範囲を左右することもわかった。これらの結果から判断して、今後水施設をフィールドに配置して所定の空間の冷却をより効果的に行うには、大気気流性状を水施設から見て大気外乱としてとらえ、この外乱に左右されないで、所定の範囲の温熱環境を創生するような水施設の開発が必要不可欠になるものといえる。そのためには、大気外乱を抑制する制御系の導入が必須条件となってくる。これらの機能を備えた新しい水施設、すなわち環境創生型水施設システムの概念を図6に提案する。本システムは4要素から構成される。景観や親水性に加えて水施設の冷却効果を演出する要素、この効果を左右する大気外乱要素、効果を測定判別する要素、さらにこの判定結果により、外乱を調整する制御系要素である。

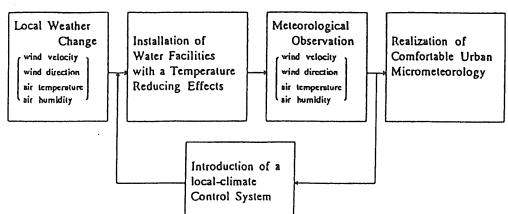


図6 新しい形の環境創生型水施設の概念

このようなシステムの実用化にとって不可欠な水施設の冷却性能の把握と最適な制御系について検討するための風洞の開発とモデル実験についてつぎに述べる。

3. 都市域における実大気性状再現用モデル風洞

都市水施設の気温低減効果を実験的に調べるには、

風洞内に、都市域の実大気と同じ性状の気流状態を再現する必要がある。そこで、熱的条件も考慮して断熱風洞を製作した。そして、風洞の基本性能を確認した後、風洞内における実大気性状の再現性について検討を加えた。

3.1 モデル風洞の概要

図7に風洞の概略を示す。風洞は全長6.4m、測定部の高さ0.4m、幅0.4mの吸い込み型風洞である。風洞は、縮流部、助走部分、テストセクションと、送風機部分より構成されている。なお、風洞の座標系は、図7に示すように、xyz方向を定めた。

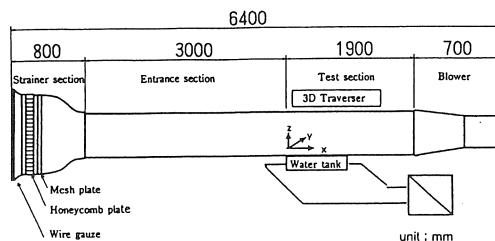


図7 風洞側面図

テストセクションには、水面の冷却効果を調べるとともに、水施設模型も設置できるように水槽部分を設けている。水槽の大きさは、x方向長さ0.3m、y方向長さ0.4m、z方向深さ0.3mである。風洞壁は、風洞内への熱侵入を減らすため、ウレタン性の断熱材を用いて

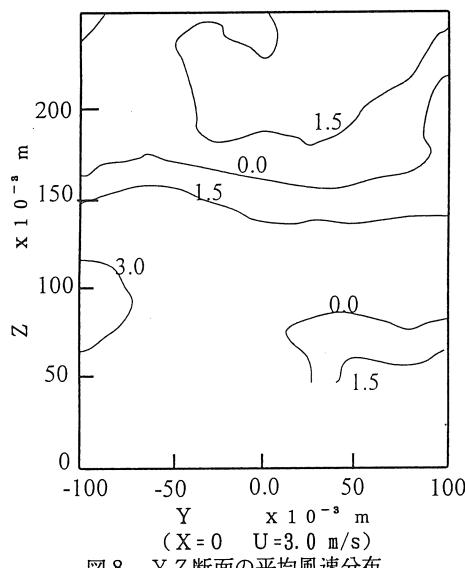


図8 Y Z断面の平均風速分布

製作した。なお、使用した断熱材は、表面にアルミ箔が貼ってあり、滑らかな表面を有している。

風洞の基本性能を把握するために、気流に直交したyz断面の風速分布の測定を行った。測定結果の一例を図8に示す。一様流中にあると考えられるz=50mm以上の測定点において、平均風速分布の偏りが±3%以内、x方向の乱れ強さが0.5%以内に収まっており、風洞としての基本性能を満足しているものと考えられる。

なお、本研究においては、流速測定はX型タンクステンプローブを用いて行った。そして、熱線流速計からの電圧信号をA/D変換器を介してパソコンコンピュータに取り込み、種々の乱流特性量の計算を行った。

測定は、サンプリング間隔1/250秒、取り込みデータ数5000個、観測時間20秒の各条件のもとで行った。

3.2 風洞内における実大気気流の模擬の検討

実大気性状を風洞内に再現する方法としては、一般的に、立方体形状のラフネス・ブロックや三角錐形状のスパイアなどの乱流促進物を風洞助走部分の床面上に適宜設置して、乱流境界層の発達を促す方法が用いられている。本研究でも、ラフネス・ブロックやスパイアを用いることにした。ラフネス・ブロックは、一個の大きさが縦30mm、横30mm、高さが5mm、15mmの木製のブロックを組み合わせて製作した。また、スパイアは、高さが200mmのものを使用した。本風洞では、それらラフネス・ブロックやスパイアの大きさ・位置を変化させることで、気流の性状を変えることが可能となっている。

まず、スパイアやラフネス・ブロックの配置状態や大きさを様々に変化させ、これらの乱流促進物の変化により、どの程度の縮尺の気流が風洞内に再現可能かについて検討を加えた。実大気の性状の検討は、最も重要な平均風速分布により行うこととした。

接地境界層内の平均風速の鉛直分布を近似するものとして対数則、および指数則（それぞれ式(1)、(2)に示す。）が挙げられる。これらの近似式を用いて、主に実大気性状との比較、検討を行うことにした。

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

$$U = U_h \left(\frac{z}{z_h} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中のべき指数 α と粗度長 z_0 は地表面の粗さを表す重要な量である。Jensenは、粗度長の縮小率と代表長さの縮小率を一致させることで気流の相似は成立としている⁴⁾。よって、中立状態で風速の鉛直分布

が対数則（(1)式）で表されるとき、乱流レイノルズ数の相似則は、式(3)で表される。

$$\left(\frac{z}{z_0}\right)_m = \left(\frac{z}{z_0}\right)_p \quad (3)$$

この式(3)の相似則に基づいて検討を加えるために、実大気と風洞でのこの二つの量の関係の比較を行った。図9に風洞内に再現されている気流の縮尺が、1/800, 1/400, 1/200のスケールと考えた場合の粗度長 z_0 と α 指数の関係を示す。風洞におけるこれらの関係は、この縮尺範囲において、Davenportの実測結果と⁵⁾ Counihanが提案した式(4)に示される関係⁶⁾とほぼ同程度となっていることが分かる。よって、ラフネス・ブロックとスパイアの組み合わせにより1/200～1/800のスケールで風洞内に様々な勾配を持つ実大気の再現が可能であると考えられる。

$$\alpha = 0.96 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (4)$$

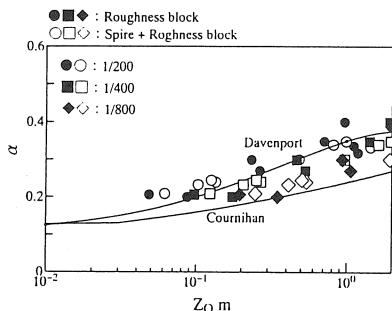


図9 粗度長 z_0 と α 指数の関係

3.3 風洞内における実大気模擬気流の乱流諸特性

前節において、ラフネス・ブロックやスパイアによりどの程度の縮尺の気流が風洞内に再現可能かについて平均風速分布により、検討を行った。しかしながら、レイノルズ数が実大気と大きく異なることから、実測結果との単純な比較のみでは、風洞内の気流の再現性について、これ以上の議論の展開を行うことはできない。そこで、ここでは、前節の結果から、都市域を代

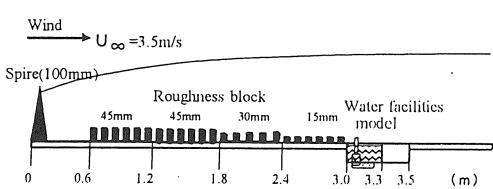


図10 亂流促進物の配置状態

表する α 指指数値0.35の場合の気流を風洞内に再現し、この粗度状態のもとで、気流の種々の乱流特性量について検討した結果について述べる。図10に、このときの助走部分におけるラフネス・ブロックおよびスパイアの配置状態を示す。

(1) 平均風速分布および乱れ強度分布について

図11に、平均風速の鉛直分布および x , z 方向の乱れ強度の鉛直分布を示す。 α 指指数は0.35で都市域を表している。また、 x 方向の乱れ強さは高さ0.10mまでは40%～20%で実測結果⁶⁾とほぼ同程度である。

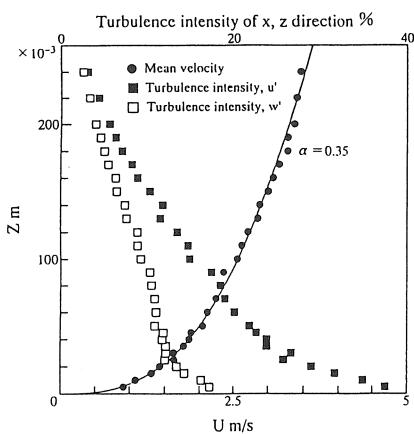


図11 平均風速および乱れ強度分布

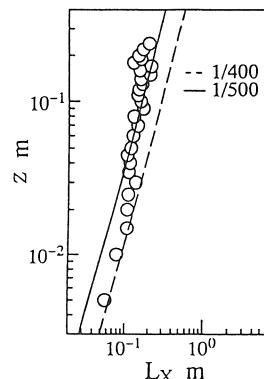


図12 乱れのスケールの鉛直分布

(2) 乱れのスケールの鉛直分布について

図12に、乱れのスケールの鉛直分布を示す。図中の実線と破線は、日本建築学会が提案した式(5)⁷⁾を示している。これにより、実大気の1/400から1/500程度の乱れのスケールが風洞内に再現されていると考え

られる。

$$L_x = 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5} \quad (5)$$

(3) パワースペクトル分布について

図13にパワースペクトルの分布形状を示す。図中の実線は、Von Karmanにより提案された式（式（6）⁷⁾）を示している。この図より、提案式と風洞測定値の分布形状がよく一致していることが分かる。そこで、無次元周波数のピーク周波数に対する相似則を適用し検討したところ、1/400の縮尺で風洞内に実大気が再現されていることが確認できた。

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma u^2} = \frac{4 f^*}{(1+70.8 f^*)} \quad \left(f^* = \frac{f L_x}{U} \right) \quad (6)$$

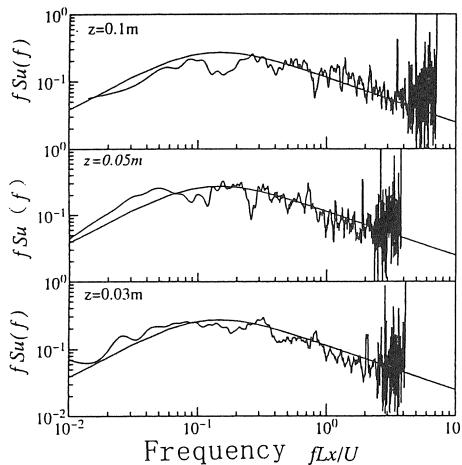


図13 パワースペクトルの分布形状

(4) レイノルズ数について

レイノルズ数の相似則は、風洞実験では一般に満たすことが困難とされている。そこで、実大気模擬の風洞実験の場合には、ある大きさ以上のレイノルズ数になると、乱れの構造がレイノルズ数に関係なく相似になるという概念がとられている⁸⁾。このレイノルズ数は、 4×10^5 程度といわれている。本実験では、境界層厚さを代表長さにとると、レイノルズ数は 7×10^5 となり、上述の条件を満足できる気流条件であると考えられる。

以上、(1)～(4)の検討の結果、風洞内に都市域を代表できる実大気性状の模擬気流が形成されていることが確認でき、またその縮尺率は1/400程度であることがわかった。

4. 水施設模型による冷却効果の検証実験

上述のような気流特性をもつ風洞を組み込んだ実験風洞を用い、水施設の冷却効果の検証実験を行った。

4.1 水施設の微気象形成実験風洞システム

微気象形成実験風洞システムの概略を図14に示す。季節的な気候の変化を考慮して、温度制御部を設けて水の温度を任意に設定可能とした。また、水施設模型（二次元噴水模型；4.2に後述）への最大流量は、第二次冷却タンク⑥と噴水模型③のヘッド差により決定し、噴水ノズルからの吐出流量は流量計⑨により制御した。

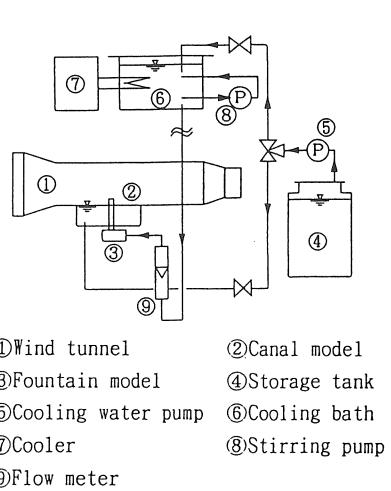


図14 微気象形成実験風洞システム

水施設の温度低減効果を定量的に調べるには、その低減効果の空間的な広がりを、なるべく短時間で測定することが必要不可欠となる。このようなことを考慮して気流に直交するyz断面内の温度分布を同時測定可能な多点型温度測定装置を作製した。温度測定装置は、素線径0.1mmのT型熱電対を用い、これを図15に示すように60本組み合わせて作成した。個々の熱電対は気流と平行となるよう、同図に示すように直径0.5mmのピアノ線に取り付けた。

なお、熱線流速計により、この測定装置を風洞内に設置したときの風速分布への影響を調べたが、大きな影響は見られなかった。そこで、この測定装置を測定領域の最も風下の位置から風上の方向に移動させながら温度測定を繰り返し行った。なお、熱電対からの測定データは、データロガーを介してパーソナルコンピュータに取り込み、xz, yz, xy各断面内の温度分布を

求めた。測定間隔は1/10秒で、観測時間は20秒とした。

また、上記の風洞を用いた水施設の冷却性能の測定に当たっては、水施設の装置形状の大きさならびに物質伝達の両面からの相似の検討が必要となる。

このうち、物質伝達に関しては、水施設からの水の蒸発量は風洞内の流れ場に影響を与えないほど小さいと考えられるので、気流の温度分布測定から、熱と物質伝達のアナロジにより検討可能と思われる。しかしながら、装置形状の相似の面からは、気流分布と同じスケールで縮小すると、装置形状が小さくなりすぎるので、水の粘性のために、水の供給や気流中への噴出などの操作が出来なくなるなどの実際面から問題が生じることが予想される。

そこで、冷却効果については定性的にその評価を行うこととした。

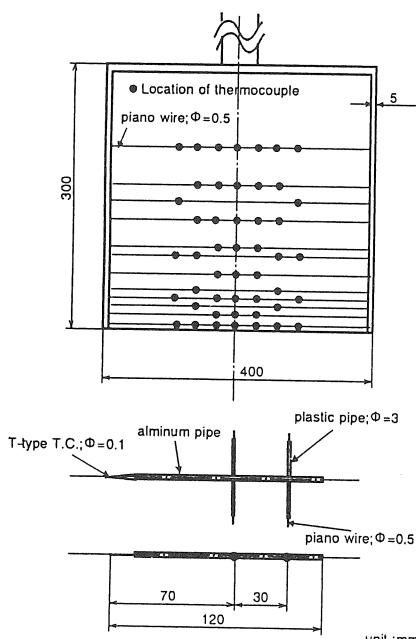


図15 多点型温度測定装置

4.2 水施設模型の概要

水施設の微気象形成に関する実験においては、最も一般的で簡単な形状のシャープノズル型噴水を用いて、

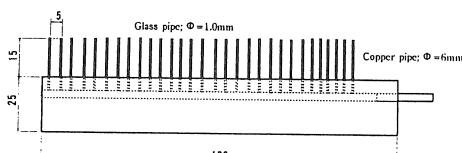


図16 噴水模型ノズル

その気温低下領域についての測定を行うことにした。そして、その第一段階として、水施設の周囲へおよぼす影響を調べることが容易な二次元型噴水模型を作成した。図16に作成した噴水模型の概略を示す。噴水ノズルには、直径1mmのガラスパイプを用いた。このガラスパイプ製の噴水ノズルを5mm間隔で30本並べ噴水模型を製作した。

4.3 水施設の微気象形成領域に関する実験

前節で説明した二次元型噴水模型を、 $x = 0.1\text{m}$, $y = 0.0\text{m}$ の位置に設置した。以後、噴水の設置位置からの流れの方向の距離を記号 xf で表すこととする。

水施設に関する実験は、都市域を想定して前章で述べた実験条件、すなわち $\alpha = 0.35$ の気流を流入気流として行うこととした。なお、気流の流速は 3.5m/s で、気温 20°C 、相対湿度 65% 、水温 15°C で実験を行った。

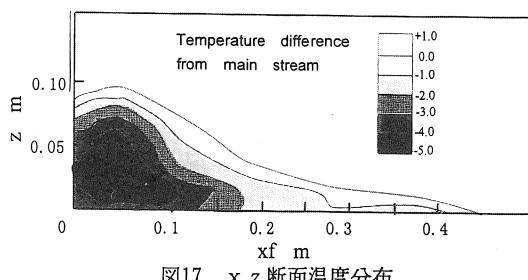


図17 xz断面温度分布
(Sharpe nozzle model: inner diameter=1.0mm)

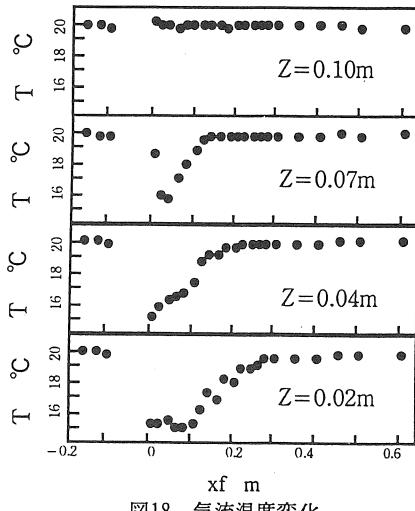


図18 気流温度変化

図17にxz断面の温度分布を、図18にダクト床面から

各高さの流れ方向の気流温度変化を示す。これより、風下側に気温低下領域が存在し、その領域は、噴水噴き上げ高さの10倍程度下流まで及んでいることが分かる。なお、 $x_f = 0.2\text{m}$ 程度までは噴水の飛散領域であることを、アルゴンレーザシートを用いた可視化実験により確認している。また、図18より $z=0.07\text{m}$ までの高さにおいては、気流温度が2章に述べた実測結果と同様な温度低下傾向を示すことが確認できる。

5. 結 言

都市の比較的狭い領域に水施設を積極的に配置して、親水性や景観形成を生かしつつ、水の持つ温湿度調整機能によって、その領域の温熱環境を改善しようとする環境創生型水施設の開発に関する研究により、つぎのような結論を得た。

1. 都市域に位置する実際の滝や噴霧型の水施設の気温低減効果について実測した結果、風下側で気温の低下領域（約35m下流）の存在が確認され、水施設の温熱環境調整への有用性が示された。
2. 実地調査を通じて、所定の空間の冷却を効果的に行うには、大気外乱に左右されない水施設の開発が不可欠で、そのためには大気外乱を抑制する制御系の導入が必須条件となることを見い出した。
3. そして、外乱を抑制する制御系要素を含む、新しい環境創生型水施設を提示した。
4. この環境創生型水施設を実際に開発するための基本となる冷却性能や最適な制御系を、1/400スケールの実大気相似下で測定可能な微気象形成型実験風洞を開発した。
5. 風洞により基本的な噴水モデルの冷却実験を行った結果、定性的に冷却効果の範囲が測定できた。
6. 以上のことより、今後、所定領域の冷却を効果的に行う環境創生型水施設の開発を容易に実施することが可能になったと言える。

使用記号

f	: 周波数	[1/s]
f^*	: 無次元周波数	[—]

L_x	: x 方向の乱れの積分長スケール	[m]
S_{uf}	: x 方向のパワースペクトル	[m ² /s]
U	: x 方向の風速	[m/s]
U_h	: 基準高さでの x 方向の風速	[m/s]
u_*	: 摩擦速度	[m/s]
z	: 地表面からの高さ	[m]
z_0	: 粗度長	[m]
z_h	: 基準高さ	[m]
α	: べき指数	[—]
κ	: カルマン定数 (=0.4)	[—]
σ_u	: x 方向乱れの標準偏差	[m/s]
添字		
m	: 模型実験測定値	[—]
p	: 実現象測定値	[—]

参考文献

- (1) 新田ほか3名, 環境緑化における微気象の設計, (1981), 40, 鹿島出版会.
- (2) 梅干野 晃, 防暑と植栽手法, 熱と環境, (1988), 12, ダウ化工(株).
- (3) 野邑ほか5名, 機講論, 930-39(1993), 372.
- (4) Jensen.M., The model law for phenomena in the natural wind, International Edition, 2-4(1958), 121.
- (5) Davenport,A.F., The relationship of wind structure to wind loading, Proc. Conf. on Wind Effects on Buildings & Structures, HMSO,(1965), 54.
- (6) Counihan.J., Adiabatic atmospheric boundary layers, a review and analysis of data from the period 1881-1972, Atmospheric Environment, 9(1975), 871.
- (7) 日本建築学会編, 建築物荷重指針・同解説, 1993.
- (8) Townsend,A.A., The structure of Turbulent Shear Flow 2nd Ed., (1976), 10, Cambridge Univ. Press.

謝 辞

実験装置の開発に協力いただいた大阪市立大学技術職員の三宅和行氏、ならびに、実験に協力いただいた学部生の中田隆行君、岩永良君に感謝いたします。さらに、本研究にご協力いただいた大阪大学教授山口克人氏、大阪ガス(㈱)吉田明生氏、(㈱)クボタ深堀賢久氏ならびに(㈱)クボタ宮内直氏の各位に感謝いたします。