

都市内河川の微気象的影響範囲に及ぼす周辺建物配列の影響 に関する風洞実験

EFFECTS OF A RIVER ON URBAN THERMAL ENVIRONMENT DEPENDENT ON THE TYPES OF ON-SHORE BUILDING DISTRIBUTION

成田 健一*

Ken-ichi NARITA

A river has a good effect on the micro-climate of surrounding areas when natural cooling winds are needed in the hot summer season in Japan. In order to clarify the effective arrangement of buildings around the river, wind tunnel experiments were conducted.

The water channel in the wind tunnel is 2 000 mm long and 200 mm wide in full scale. The effects of the body of water were detected through analysis of the humidity distribution around it. The results suggest that the location and direction to wind of buildings are important, as well as the building density around the water surface.

Keywords: urban climate, waterfront, air flow around buildings, wind tunnel test, natural draft, humidity

都市気候, ウォーターフロント, 周辺気流, 風洞実験, 自然通風, 湿度

1. はじめに

都市における水辺空間は、近年いわゆる“親水空間”としての整備が進められ、エコロジカルな都市造りの拠点として大きな注目を集めている。このようなウォーターフロントの再評価の流れに呼応して、最近景観や心理的作用など水辺空間に関する様々な側面からの研究が盛んになっている^{1),2)}。夏季の暑熱緩和効果を中心とする水体の微気象的效果についても、近年いくつかの実測調査からデータが蓄積されつつある^{3),4)}。

特に臨海都市においては、海岸線に直交する多くの河川が海風の効果的な誘導路の役割を果たしており、夏季の冷源として大きなポテンシャルを持っているといえる。筆者らも、これまで広島市を対象に多角的な微気象観測を実施し、都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果について検討してきた^{5),6)}。その結果、河川効果が及ぶ範囲は、風向などの気象要素のほか、河川周辺の建物密度や街路幅などにも影響されていることが示唆された。

以上のような実測調査は、実現象の把握という意味で重要ではあるが、測定条件もおおのずと制約されるため、直接的には具体的な計画案に結びつかない。そこで、都

市計画・建築計画という観点から研究をさらに進めるため、任意の建物配列が設定しうる風洞実験による検討をあらたに試みた。今回は、これまでの観測結果を念頭に風向は河川方向とし、いかなる建物配置が河道内の海風を市街地内へ導くために効果的であるかを検討した。

なお、同様の水面効果に関する風洞実験として、最近水路模型周辺の温度分布から水面の熱的效果を把握しようという試みが一部なされている⁷⁾。しかしながら、このような温度分布を指標とした熱的な模型実験では、表面温度や接近流の温度制御など実験方法が複雑となり、また乱流レイノルズ数とフルード数という2つの相似条件を満たすこともなかなか容易ではない。

そこで本研究では、河川の熱的效果を直接温度分布からとらえるのではなく、河川周辺の湿度分布から河川影響の範囲の把握を試みた。言いかえると、本実験は水蒸気をトレーサーガスとした一種の拡散実験であり、本研究で言う“河川効果”とは、単純に河川上の気塊がその地点にどの程度及ぶかを意味している。

2. 実験方法

風洞の概要を図-1に示す。吹出口寸法、高さ 900・

本研究の一部は、昭和62年度竹中育英会建築研究助成金による。

* 広島大学工学部第四類建築計画 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

幅 1 800 mm の回流式で、吹出口から吸入口までは開放されている。測定部の概要を図-2 に示す。幅 200 mm ・長さ 2 000 mm の水路を気流と平行に設置し、その両側に各種建物模型を配列した。なお、水際から模型までの距離については、その影響を検討した一部のケースを除いて 10 mm に統一した。使用した模型を図-3 に示す。測定には、容量型湿度計 (Vaisala Humicap) および C-C 熱電対 (0.1 mmφ) 2 組を用い、一方は水路風上側の基準点に固定し、他方はトラバース装置に取り付け模型間の測定に使用した。測定高さは一部を除いて 10 mm 一定とし、水路先端より 1 750 mm 付近において、水路直交方向の分布を測定した。基準点・測定点および水温のサンプリングは同時に行っており、各点について 30 秒間周波数 10 Hz で集録した。アプローチフローについては、吹出口より高さ 30, 20, 10, 3 mm の 2 次元ラフネスを配置し、基準点において平均風速のベキ指数約 1/4, 高層建物模型上端 (高さ 90 mm) の乱れの強さを

を約 0.2 とした。境界層厚さは約 300 mm で、上空風速は一部を除いて約 3 m/s 一定とした。なお、水位についても一部を除いて岸から 5 mm に統一して実験を行った。

本実験では気温・湿度に関しては特にコントロールしていない。ただし、実験条件として湿度差 (水面の飽和圧と基準点の絶対湿度との差) をある程度以上保たないと建物配列による湿度分布の差異を精度良くとらえられないため、水温については気温より数 °C 高くなるよう調節した。しかしながら、これによる浮力の効果は本研究では一応無視している。本実験の主眼である河川上空気の広がり、河川周辺の建物群による気流の変化に左右されている。したがって、ここでは中立を仮定し、相似条件としていわゆる“建物周辺気流”の実験と同様、レイノルズ数を一定以上にすることのみを考慮している*1)。

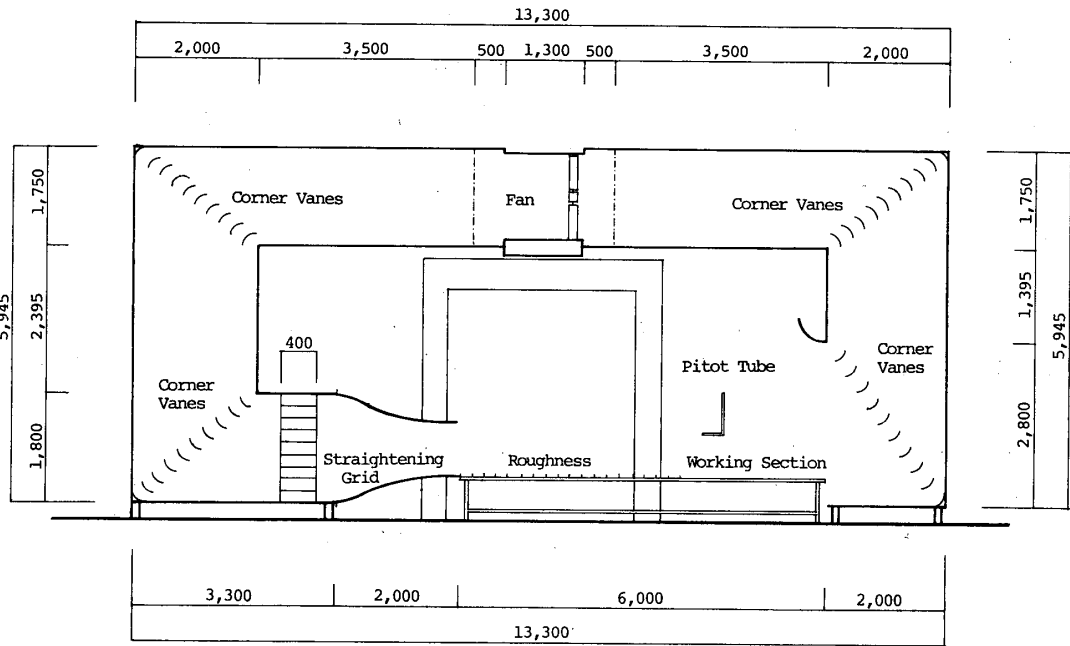


図-1 風洞の概要

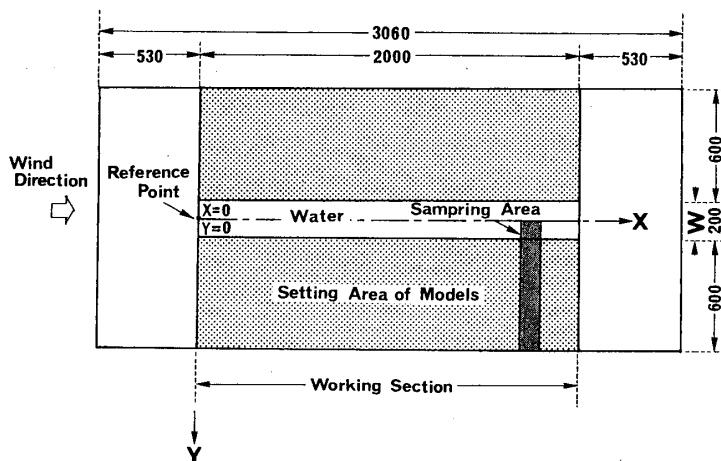


図-2 測定部の概要

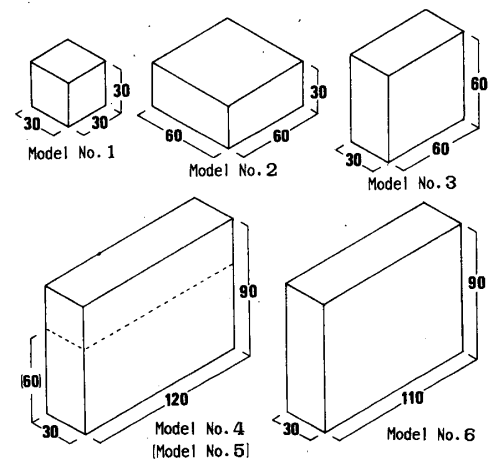


図-3 建物配列に使用した模型

3. 実験条件の検討 (模型なしでの湿度分布)

建物模型配列による比較実験に先立ち、ここでは実験条件の検討として、水路周辺の模型なしでの湿度分布について考察する。

(1) 河川効果を表す指標

先に述べたように、本実験は河川周辺の湿度分布から河川効果の範囲を把握する点に特徴がある。以下の考察では、次式で表される“湿度比 (VP)”を指標として用いる。

$$VP = (e - e_0) / (e_s - e_0)$$

ここで、 e : 測定点の蒸気圧

e_0 : 基準点の蒸気圧

e_s : 水温に対する飽和蒸気圧

を表す。

この湿度比に加え、本研究ではもう一つの指標を考える。図-4は、容量型湿度計からの相対湿度出力の一例を示している。aは水面上における変動の様子で、水際から遠ざかるにつれ、b→fのように変化する。河川から離れたd, eでは、河川上の湿った空気が及んだ瞬間に間欠的な湿度の増加がみられる。一方河川から十分遠ざかったfではそのような変動は見られない。

このような相対湿度変動は当然温度の影響も受けるため、VPに比べるとその物理的意味はややあいまいではあるが、間接的に河川効果を表していると考えられる。そこで相対湿度の R. M. S. を (RH')で表し、以下の考察では補足的に用いることとする。

(2) 水面先端からの距離による変化

まず、実験条件の検討のため、模型なしでの湿度分布

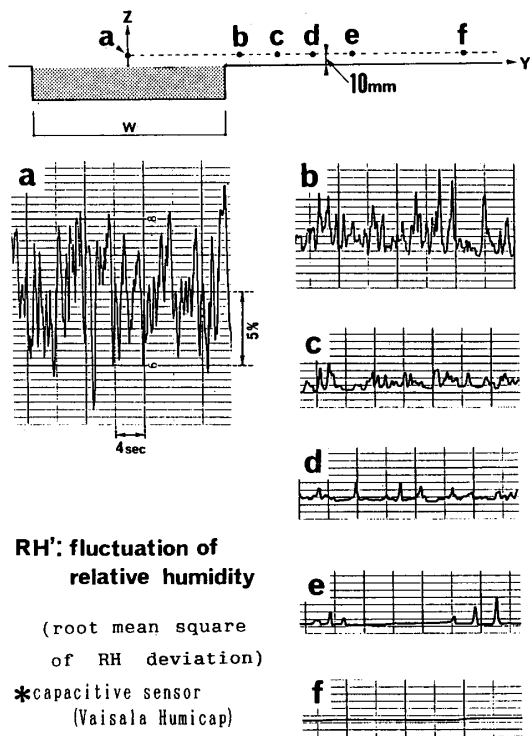


図-4 相対湿度出力の一例

を水面先端からの距離 (X) の異なるいくつかの測線について測定した。図-5は、水際からの VP と RH' の変化を示したもので、横軸は水路幅 (W) で無次元化した水路中央からの距離を表している。 VP については $X=1275\text{mm}$ 以降で一様な分布となっており、 RH' ではやや増加傾向がみられるが、模型配列における測定域 ($X=1750\text{mm}$ 付近) では実験条件はほぼ安定しているといえる。

(3) 実験内での相似性の検討

次に、実験内における現象の相似性を検討するため、

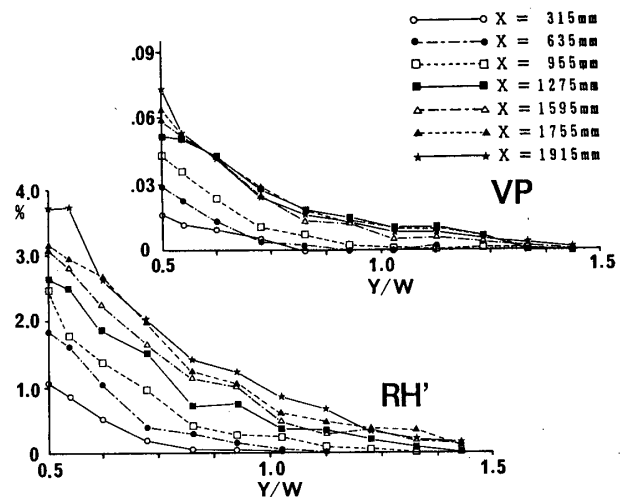


図-5 水面先端からの距離による変化

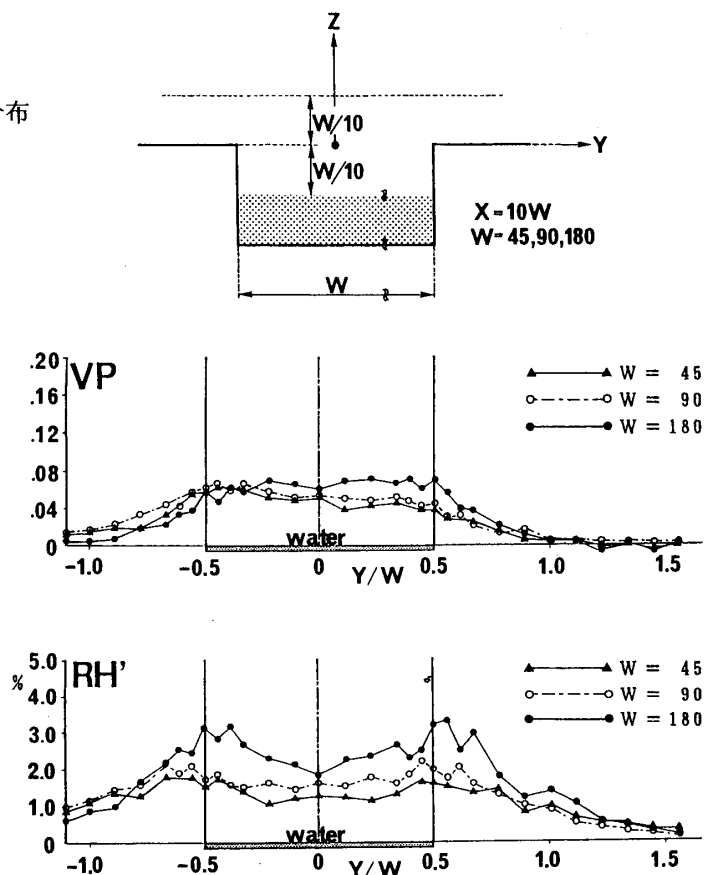


図-6 実験内での相似性の検討

図-6に示すごとく水路幅(W)を基準に、測定位置(X)を $10W$ 、測定高さと岸から水面までの落差を $W/10$ とした3種類の相似形模型($W=45, 90, 180\text{ mm}$)について比較を行った。 RH' については、模型のスケールが大きくなるほど水際付近を中心に増大する傾向があるが、 VP については同様の変化を示しており、風洞実験内においては現象の相似性がほぼ成立しているといえる^{*2)}。

4. 河川周辺の建物配列による影響

(1) 建物密度および街路幅による変化

筆者らが行った広島市における野外実測では、河川周辺の建物密度が低いほど、また河川と直交する街路の幅が広いほど、河川の影響範囲が拡大するという結果が得られている⁶⁾。そこでまず、これら2つの要因について検討した。

図-7は、建物密度についての検討結果である。図中のパースは測定域付近の模型配列状況を示しており、ここでは低層模型において3種類の配列を比較している。建物密度は S_1, S_2, S_3 の順に小さくなっており、各々の建蔽率は約56%, 36%, 25%となっている。影響範囲については、 $VP \cdot RH'$ とも建物密度の低下とともに明らかなに拡大している。一方、水際の変化に注目すると、建物密度が高くなるほど VP が鋭いピークを示す傾向が認められる。これは密度が高くなるほど遮蔽度が増し、水際付近に高温空気が滞留するためと考えられる。図-8は、水際から建物までの距離を変化させた場合の一例で、河川沿いの建物をセットバックさせた S_2 (sb)

では、 VP に水際のピークが現れていない。このように、水際から建物までの距離は湿度分布に影響する一つの要因ではあるが、図-8によれば、陸側での影響は水際付近に限られている。以上の結果から、本実験ではこの距離を、前述のように 10 mm に統一して行うこととした。

次に、街路幅についての検討結果を示す。図-9は、配列 S_1 において順次街路幅を拡大した場合の比較で、測線は各々街路の中心としている。街路の幅は $S1A$ では S_1 の5倍、 $S2A$ では同じく9倍となっている。対象街路以外は同配列であることから、密度変化の場合とは異なり、分布形状はすべて類似しているが、やはり街路幅が広がるほど影響範囲の拡大が認められる。

以上のように、建物密度および街路幅については実測調査で得られた傾向が風洞実験においても確認された。すなわち、平面的な配列については、建物間の街路幅を確保し、風通しを良くすることが有効であるといえる。

(2) 高層建物の位置と角度による変化

実際の街路上の気象要素は、交差点や個々の建築物との位置関係などにより局所的にかなり大きな変化を示す。とりわけ高層建築物はいわゆる周辺気流との関連で

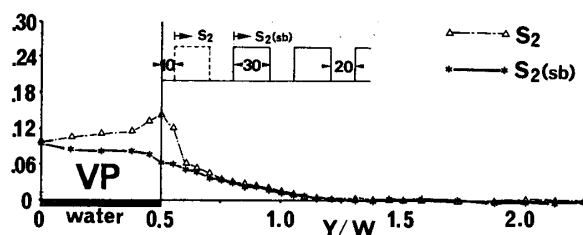


図-8 水際から建物までの距離による変化 (配列 S_2)

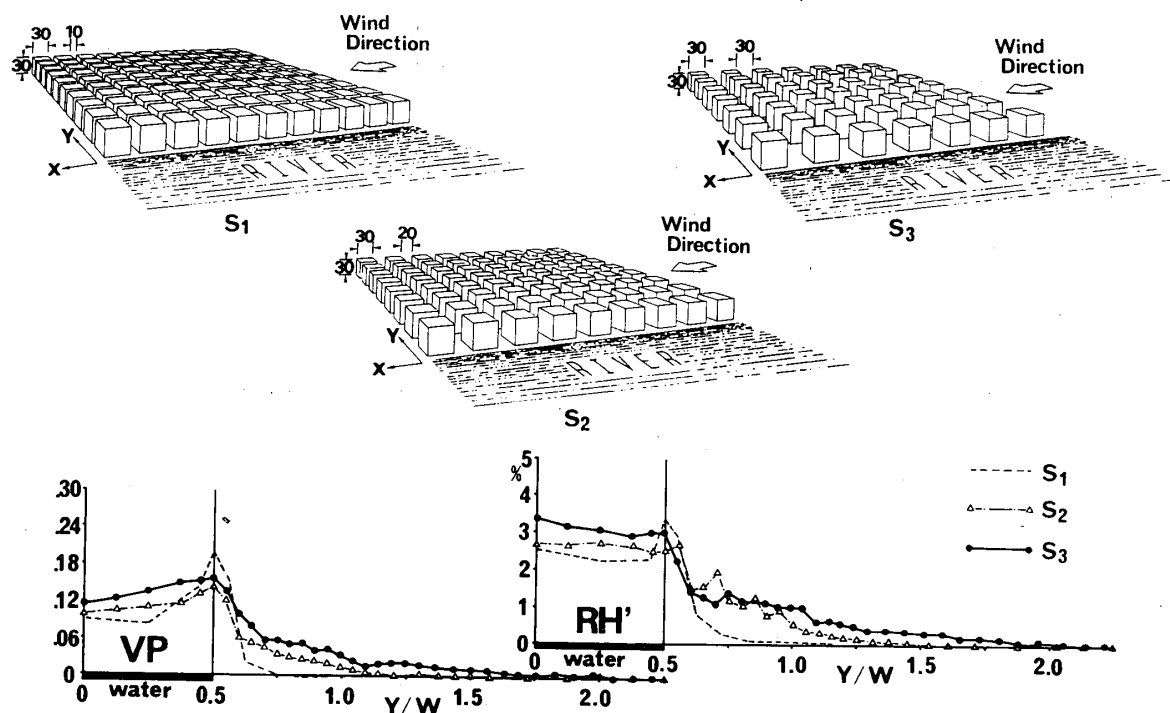


図-7 建物密度による影響 (使用模型: Model No.1)

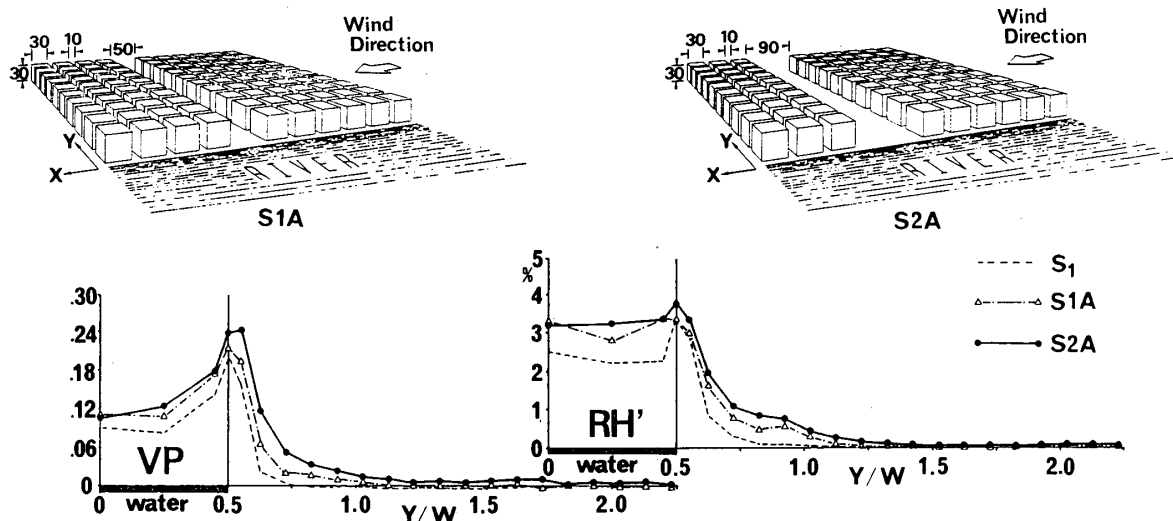


図-9 街路幅による影響 (使用模型: Model No. 1)

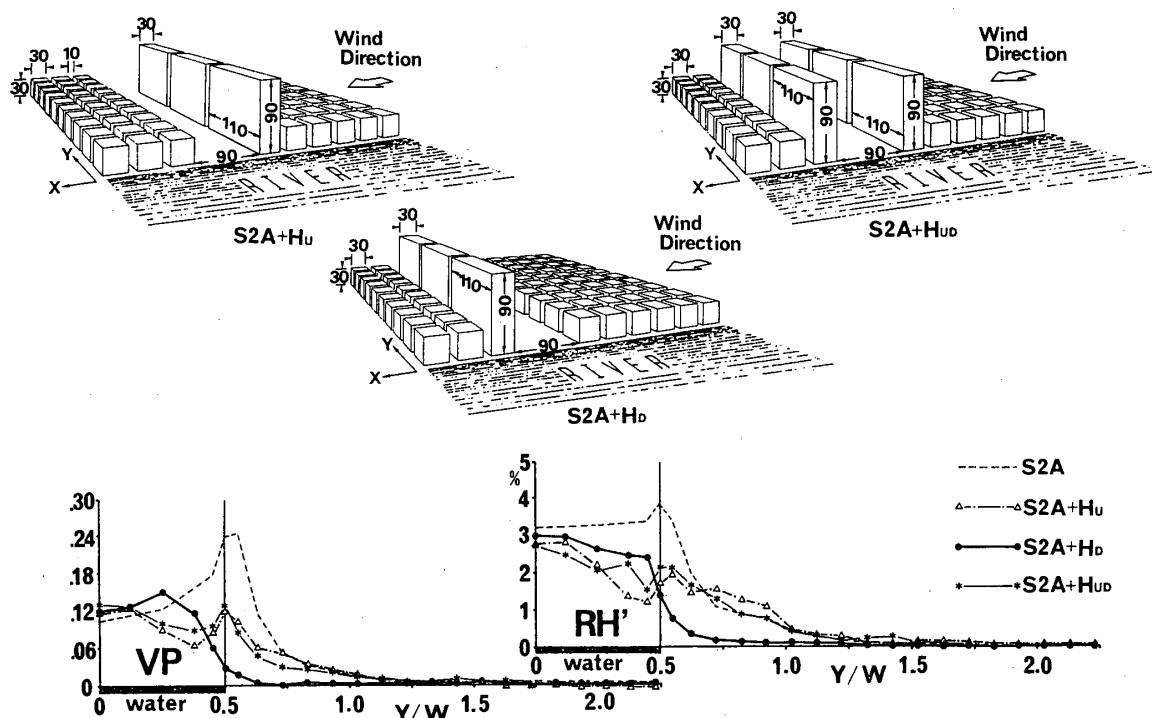


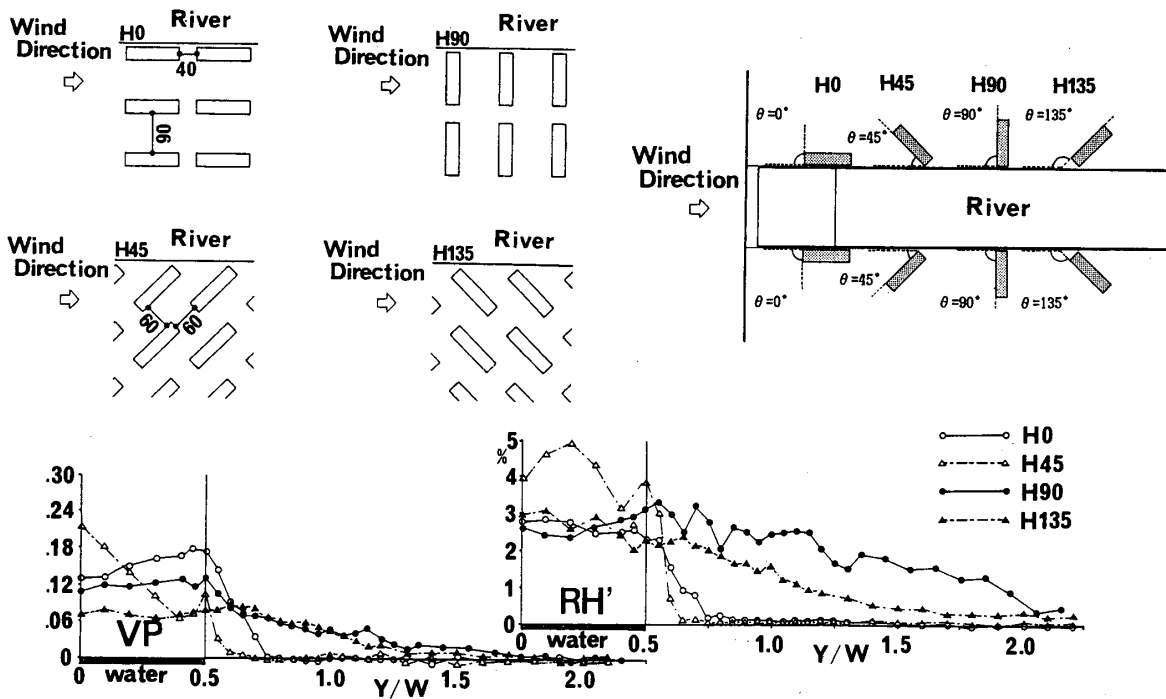
図-10 街路沿の高層建物の影響 (使用模型: Model No. 1 & No. 6)

微気候への影響は大きい。そこで、ここでは高層建築物の位置や河川に対する角度が、河川上空気の拡散にどのように影響するかについて検討した。

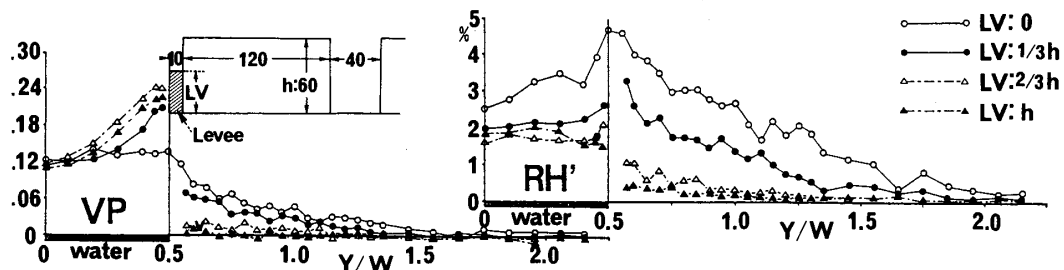
図-10は、図-9の配列S2Aにおいて街路沿いを高層化した場合の変化を示している。なお高層模型の高さは周囲の低層模型の3倍としており、風上側のみ(S2A+Hu)、風下側のみ(S2A+Hb)、そして両側(S2A+Hud)を高層化した場合について比較している。街路の風下側のみを高層化した場合、高層建物の風上側壁面に沿う吹き降ろし気流が、街路への川風の進入を大きく妨げる結果となる。一方、街路の風上側のみを高層化した場合には、影響範囲はほぼ変わらないかむしろやや増大する。これは、街路部分が高層建物のwakeすなわち低圧部となり、河川上空気を吸い込むためと考えられる。両側を

高層化した場合は風上側のみの場合とほぼ同様の分布となっている。

次に、河川に対する角度による変化についての結果を示す。図-11は、高層模型のみの配列において河川に対する角度を4種類に変化させた場合の比較で、ここでは図中に示すごとく、兩岸の建物模型を河川に対して対称形に配列している。影響範囲の広がり、 $H45 < H0 < H135 < H90$ の順となる。H45では、河道部分の分布からもわかるように、気流が河川中央に収束させられており、周辺市街地への拡散は最も強く妨げられる。H0では遮蔽度が最も高いため、水際でのVPは最も大きくなっているが、周辺への拡散はやはり妨げられている。これら2つの配列に対し、H135とH90では周辺市街地への川風の誘導が非常に効果的になされている。H90



図一11 高層建物の河川に対する角度による変化 (使用模型: Model No. 4)



図一12 堤防の存在による影響 (配列 H90, 使用模型: Model No. 5, LV; 堤防高, h; 模型高)

の配列では、図一10と同様建物間がwakeとなることが理由と考えられる。一方H135では、H45とは逆に河道内の空気が流路を強制的に曲げられる形で周辺市街地へ流れ込むものと思われ、水際を挟んでの分布が最も均一化している。

以上のように、高層建物の存在は河川効果の広がり大きな影響を及ぼすといえる。しかしながらその作用は単純ではなく、いわゆる“建物周辺気流”との関連で、対象地点との位置関係や方位などにより複雑に影響を及ぼしている。

(3) 堤防の有無および高さによる変化

臨海都市においては、治水的な観点から河川兩岸に連続した堤防が設けられているのが一般的である。先の筆者らの観測では、このような堤防の存在が河川効果の広がりを妨げているという結果が得られている⁶⁾。

図一12は、堤防の影響を検討した結果の一例で、ここでは最も河川効果の広がりが顕著であった図一11の配列H90を対象に、堤防高さとの関係について検討している。ただし、模型高さ(h)は60mmとし、堤防の高さ(LV)をその1/3, 2/3, 1倍とした場合につい

て比較した。なお堤防の幅は10mmで、水路先端より兩岸に連続的に設置している。堤防が高くなるに従い、遮蔽効果が顕著となる傾向が明らかで、LV=hではほぼ完全に遮断されている。またすでに図一7で考察したように、堤防が高くなり、遮蔽度が高くなるほど堤防河道側のVPが大きくなる。これは周辺への拡散が抑制され、河道内に湿潤空気が押し込められる結果と考えられる。

このように堤防による遮蔽効果は大きいといえるが、図一12の結果では、堤防高さが周辺建物の1/3以下であればある程度の拡散は確保されるといえる。堤防を低くするという事は現実には難しいことから、逆に周辺建物を積極的に高くするという対策も考えられる。

(4) 具体的な応用例の検討

以上実測結果の検証を念頭に、基本的な要因について検討したが、次にこれらの結果をふまえていくつかの具体的な建物配列について考察する。

a) 容積率一定条件での比較

図一13は、図一7の配列S₁を基準に、容積率一定の条件で川風を効果的に導く建物配列を検討した例であ

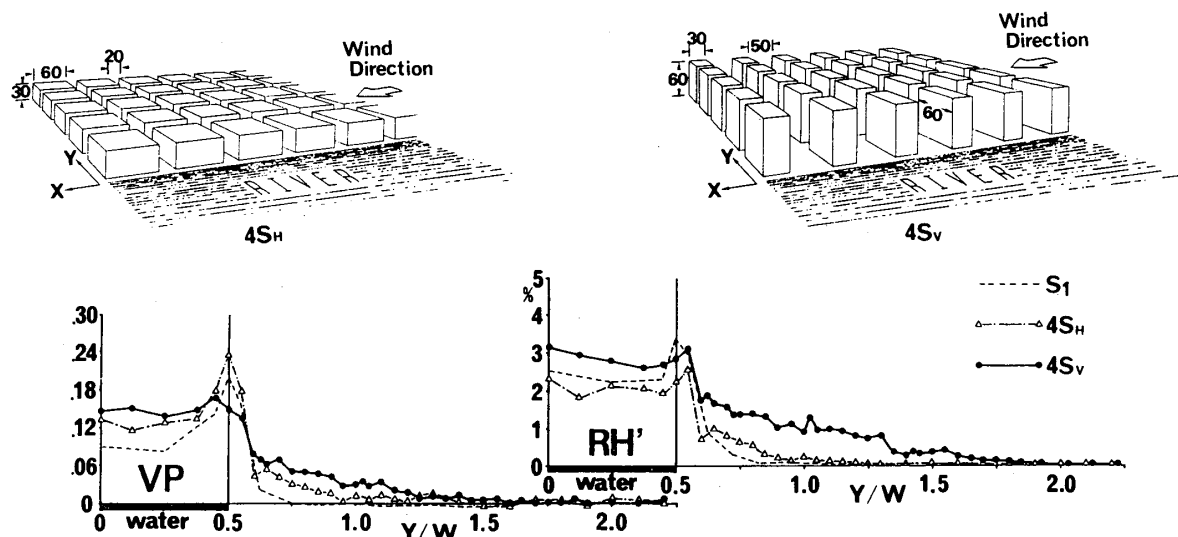


図-13 容積率一定条件での比較 (使用模型: Model No.1 & No.2 & No.3)

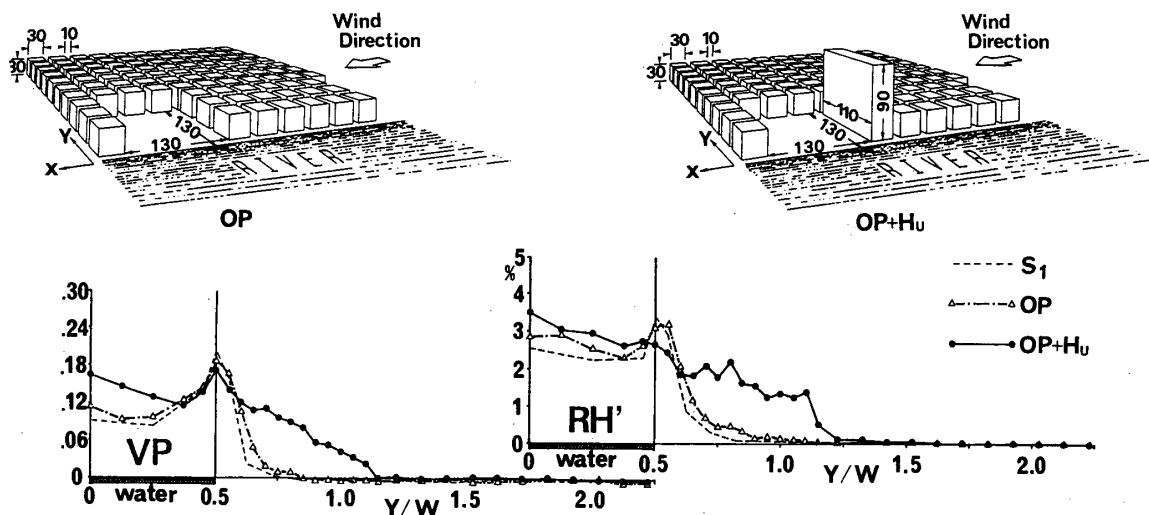


図-14 オープンスペースの効果 (使用模型: Model No.1 & No.6)

る。4S_Hは平面的に、4S_Vは立体的にS₁の各4戸を集合化したもので、4S_Vについては図-11の結果を考慮し長軸を河川に直交させている。河川の影響範囲は、S₁<4S_H<4S_Vの順で明らかに拡大している。すなわち、集合化そして立体化を図り、より地表面を開放することが川風の誘導に有効であるといえる。

b) オープンスペースの効果

図-14は、図-7の配列S₁において河岸にオープンスペースを設けた場合の効果を示している。なお測線は空地部分の中央としている。建物の除去によりVP・RH'ともに一応増大が認められるが、その効果はあまり大きくはない(配列OP)。そこで図-10の結果を応用し、オープンスペースの風上側を高層化したものが配列(OP+H_u)である。オープン化のみの場合に比べ、非常に効果的に川風が空地内へ誘導されている。

5. 実測調査との現象比較

筆者らが行った河川周辺における気温分布観測では、

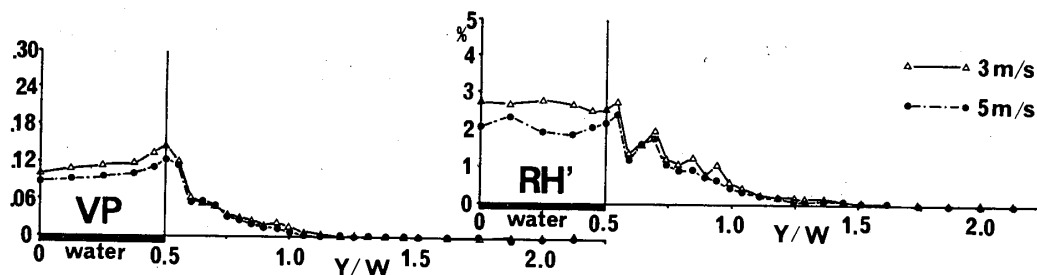
前項で述べてきた建物配列以外にも、いくつかの要因が河川効果の及ぶ範囲に影響していた。そこで、ここではこのような要因のうち“風速”と“河川幅”について検討を行い、実測結果と今回の風洞実験との比較を試みる。

(1) 風速の変化による影響

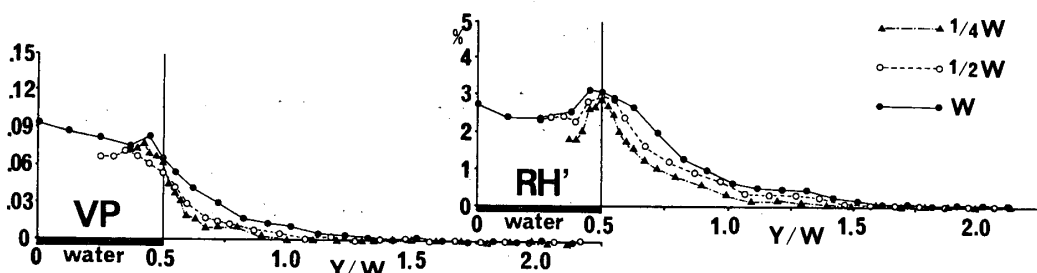
実測調査によれば、市街地内の気温は風速により変化しており、気温を指標とした場合、風速が強くなるほど河川効果がより強く、またより市街地奥深くまで及ぶ傾向が認められた⁶⁾。

図-15は、一例として図-7の配列S₂において風速を変化させた場合の結果である。ここでは3m/sと5m/sの結果を比較しているが、両者の結果は非常に良く一致しており、風速による変化はみられない。このような結果は、ほかのいくつかの配列についても同様であった。

すでに既報⁶⁾にも述べたように、河川周辺の市街地内の気温は、河川からの冷風の侵入と市街地内部の昇温が複合したものと考えられる。しかも後者、すなわち高温



図—15 風速の変化による影響 (配列 S₂, 使用模型: Model No. 5)



図—16 河川幅の変化による影響 (模型配列なし)

化した地表面に起因する温度境界層の厚さは風速により変化し、結果として気温の変動を招く。このような効果は、単純な拡散を扱っている本実験では当然再現されておらず、この点が以上のような結果の差異の原因と考えられる。

(2) 河川幅の変化による影響

筆者らの実測調査では、河川幅の違いによっても河川効果の大きさに変化がみられた⁶⁾。そこで、水路幅をフルスケール (200 mm) の 1/2 と 1/4 に変化させ、模型配列なしの状態分布を比較検討した。なお図—6とは異なり、ここでは水路幅のみを変化させ、岸から水面までの落差などほかの条件はすべて一定としている。

図—16は、それらの結果を河岸を基準に重ね合わせて表現したものである。RH'では、水路幅の増大に従い影響範囲の拡大が認められるが、VPでの変化はわずかである。また、実測結果では河川中央での気温低下量そのものが河川幅で大きく変化しており、これは周辺市街地からの暖気の流入が原因していると推測された。これに対し図—16の結果では河川上の値に大きな差異はなく、この点が基本的に異なっている。

以上のように、これらの要因については本実験の結果は必ずしも実測結果と一致しない。これは基本的に対象としている現象に違いがあることに起因するといえる。その意味では本実験法の限界ともいえ、これらについては改めて別の実験系により検証を考える必要がある。

6. まとめ

夏季の暑熱緩和効果の把握を目的に筆者らがこれまで行ってきた都市内河川周辺における微気象観測結果の検討を念頭に、人工的な水路による風洞実験を実施した。

今回は河川が海風の効果的な誘導路となっている点に注目し、風向は河川方向とし、河道内の海風を市街地内に導くために効果的な建物配置について検討した。なお、建物配列による河川影響範囲の比較は、水路周辺の湿度分布より考察しており、この点に本研究の特徴がある。得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 河川周辺の建物密度が低いほど、また河川と直交する街路の街路幅が広いほど、河川の影響範囲は広がる。この点は実測結果と一致する。
- (2) 河川周辺の高層建物の存在は、河川上空気の拡散に大きく影響しており、その効果は対象地点との位置関係や河川に対する角度で変化する。
- (3) 堤防による遮蔽効果は大きく、堤防高さが周辺建物高さの 1/3 以上となると、河川上空気は周辺市街地へはほとんど及ばなくなる。
- (4) 効果的な河川風の導入を図るためには、まずできるだけ地表面を開放し、また高層建物を適切に配置し、建物周辺気流をうまく利用することがポイントである。
- (5) 本研究は、あくまでも河川上空気がどの程度及ぶかという単純な拡散実験の観点から“河川効果”を評価したものであり、風速による変化などについては、気温分布を指標とした実測結果とは必ずしも一致しない。

以上、本報では河川の微気象的影響範囲に及ぼす周辺建物配列の影響を、湿度分布を指標とする独自の風洞実験により明らかにした。ここで示された有効な建物配列は、あくまでも一側面からの評価であり、実際の計画案としてそのまま利用しうるものではない。しかしながら、この種のデータはこれまで皆無であり、今後ますます盛んになるウォータフロントの開発などを考える上で、微気象的観点からの基礎的設計資料として有用であると思

われる。

謝 辞

本実験の実施に際し、畝川陽子・平田 修・野々村善民の各氏に多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。なお、広島大学の故関根 毅先生からは生前数多くのご助言と励ましをいただきました。ここに深く感謝するとともに、先生のご冥福をお祈りいたします。

注

本報は、以下において一部発表したものである。

- 1) 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1097~1098, 1989.10
- 2) 日本建築学会中国・九州支部研究報告, pp.37~40, 1990.3
- 3) 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1249~1250, 1990.10
- 4) IFHP Symposium on "Planning Applications of Urban and Building Climatology", Berlin, 1991.10
- *1) 模型周辺の流れを相似にするための最小レイノルズ数(模型高さを代表長さとする)としては、境界層流れに関して2100という値が示されている⁸⁾。本実験での最小模型に対するレイノルズ数は約6000である。
- *2) 可能な条件については相似としているが、たとえば湿度センサーの大きさ(4×6mm)は変化していないため、それによる遮蔽や気流の乱れは相対的に変化している。また水面の波高も必ずしも相似にはなっていない。これらの諸要因も、ここでは分布のバラツキの原因となっていると思われる。

参考文献

- 1) 村川三郎・西名大作：現地実験，スライド実験および住民意識調査による河川環境評価の比較分析—河川環境評価手法に関する研究 その2，日本建築学会計画系論文報告集，第384号，pp.1~11，1988.2
- 2) 村川三郎・西名大作・村田浩之：河川景観画像の呈示方法による被験者評価結果の比較—コンピュータ画像処理による河川環境評価に関する研究 その1，日本建築学会計画系論文報告集，第426号，pp.45~55，1991.8
- 3) 片山忠久ほか5名：水面を有する市街地の熱環境に関する調査研究，日本建築学会計画系論文報告集，第372号，pp.21~29，1987.2
- 4) 片山忠久ほか8名：海岸都市における河川の暑熱緩和効果に関する調査研究，日本建築学会計画系論文報告集，第418号，pp.1~9，1990.12
- 5) 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，第393号，pp.25~34，1988.11
- 6) 村川三郎・関根 毅，成田健一，西名大作，千田勝也：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(続報)—水平および鉛直の影響範囲の検討，日本建築学会計画系論文報告集，第415号，pp.9~19，1990.9
- 7) 山本誠司，中村安弘，水野 稔，内藤和夫：都市微気象に及ぼす水系の影響に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1081~1084，1988.9
- 8) 大場正昭：建物近傍の汚染ガス拡散に及ぼす建物隅角部での流れの剝離現象に関する実験的研究—接近流の気流条件の影響について，日本建築学会計画系論文報告集，第406号，pp.21~30，1989.12

(1992年4月10日原稿受理，1992年8月26日採用決定)