

風洞模型実験による都市と大気との対流熱輸送の把握

鈴木 直人*

Wind tunnel experiment on the convective heat transfer between air and urban surface

Naoto SUZUKI

1. 研究目的 都市域の建築外部空間に形成される熱環境を把握するには、キャノピー層（建物高さ以下の層）内における熱輸送メカニズムの解明が不可欠である。

本研究では、都市を構成する建物や街路の表面と大気との間における対流による熱輸送を把握するため、濾紙面水分蒸発による測定を風洞模型実験にて行い、物質輸送から間接的に熱輸送を導き出す。本手法は、物質輸送を利用することで、放射や伝導による影響を多分に受ける熱現象を直接測定するよりも、比較的容易にかつ高精度に測定を行えるのが特徴である。

既往研究¹⁾²⁾³⁾では、2次元および3次元配列に関して、基本的な形状における対流熱輸送の把握が行われている。しかしながら、実際の都市では、高さ形状の異なる建物が不規則に乱立している。本研究では、キャノピー層内に大きな影響を与えるとされるモデルの高さ変化について着目し、2次元配列内に2種類の高さのモデルによって連続した変化を加え、熱輸送の把握を行った。

また、3次元配列の既往研究では、密度変化を加えた際の街路面の測定が行われてこなかった。これは、密度変化による街路寸法の差異によって試料寸法が統一できず、データの単純な比較ができないためであった。そこで本研究では、密度変化に合わせた街路面測定用試料と、街路面用試料と同サイズに測定面を分割した試料を作製し、密度別に全構成面（屋根面、壁面、街路面）の測定を行い、その上で、変化が比較的小さい屋根面の値との比によって熱輸送の把握を行った。さらに、以上で行った整形配列とは異なった流れ場が形成されるという研究⁴⁾が報告されている『千鳥配列』についても、同様の密度変化を加え測定を行い、その影響を把握した。

2. 実験方法 本研究では、飛鳥建設株式会社技術研究所所有の密閉型境界層風洞を使用した (Fig. 1)。測定洞には、スパイヤーおよび3種類の大きさのラフネスを配置し、乱流境界層を発達させ、ベキ指数 $\alpha = 0.2$ 、乱れ強さは床上 50 mm までの平均で約 10% とした (Fig. 2)。風洞内の基準となる風速は、床上 1.4 m のピトー管の値で 3 m/s とし、ターンテーブル中心から風上 3 m・高さ 40 mm の位置で温湿度を測定した。

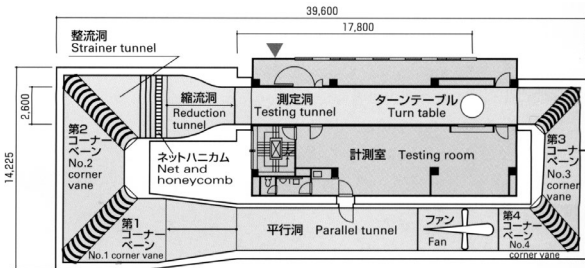


Fig.1 風洞平面図

アクリル製の板に厚さ 1 mm の濾紙を貼り付け、濾紙の側面を防水処理して測定面とした。これに十分水を含ませた後 30 分間風洞内に置き、その間の蒸発量を電子天秤 (表示精度 0.1 mg) で測定した。試料の運搬および秤量中は、試料を密閉容器に入れ、その間の蒸発を防いでいる。また、測定開始直後の蒸発面温度変化をできるだけ小さくするため、濡らした状態で秤量前に 3 分間風洞内に置き、予め測定条件に試料を馴染ませた。濾紙面の温度は、濾紙面の表面直下にサーミスタ温度計 (1/100°C 精度) を挿入し測定した。これらと風洞内の温湿度から物質輸送速度を算出した。算出式を Table 1 に示す。なお、本風洞は温湿度制御ができないため、ターンテーブル中心から風上側 1.7 m に基準として 50 mm 角の立方体モデルを置き、輸送速度を全ケースについて同時に測定した。以下の解析では、測定点の輸送速度 (k) と基準点の輸送速度 (k_s) との比 (k/k_s) を用いることにより、異なる温湿度環境下にて得たデータの比較を行っている。

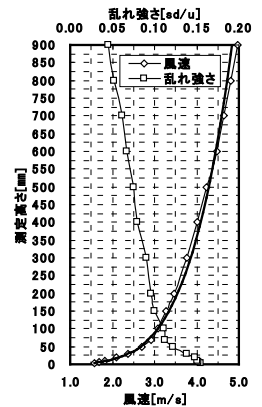


Fig.2 プロファイルと乱れ強さ

物質輸送速度と熱輸送速度を比較する際には、両輸送速度を風速で除し無次元化した交換係数という値を用い

Table 1 物質輸送速度 算出式

蒸発速度 [g/m ² ·s]	$E = \frac{\Delta w}{A \cdot h}$	Δw : 水分蒸発量 [g]	A : ろ紙表面積 [m ²]	h : 測定時間 [s]
物質輸送速度 [m/s]	$k = \frac{E}{\rho_s - \rho_a}$	ρ_s : 蒸発面飽和絶対湿度 [g/m ³]	ρ_a : 空気絶対湿度 [g/m ³]	

※建築学専攻

る。以下本文中にて輸送速度および交換係数とは、物質輸送によるものである。

3. 高さ変化を有する2次元街路空間における交換係数の把握 50mm角の木製模型を50mm間隔で18列並べ測定域を作製した。測定点は、最前列で剥離した気流が竪列に再付着する位置を避け、12列目と13列目とした。測定は、1列におき高さ変化を加え、変化なしから+50mmまでを10mm毎に増やした6ケースについて、10mm刻みに分割測定を行った。測定面の詳細をFig.3に、測定に使用した試料をFig.4に示す。

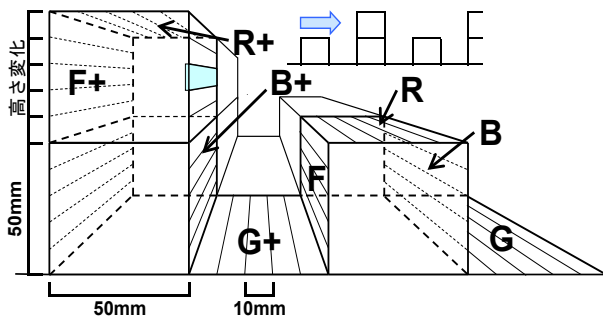


Fig.3 測定面詳細

まず、高さ変化が輸送速度比の分布にどのような影響を及ぼすか把握する。Fig.5にケース別輸送速度比分布を示す。+0mmつまり高さ変化のないケースは、R面において風上側の輸送速度比が最大となり、風下側になるにつれて減衰し最小となった。また、B面では中央やや下方で、G面では中央やや風下側で最大となった。F面では上方で最大となり、下方になるにつれ減衰し最小となった。これは、屋根面を気流が無でるように流れるスキミング流が起き、キャニオン（建物と建物の間の空間）内で主風向と逆向きに循環流が吹いているときの典型的な分布で、既往研究とほぼ同じ一致している。

高さ変化を加えたケースについて見ていくと、+10mmの屋根面(R,R+)において、風上側が大きく風下側で小さくなるという分布がなくなり、ほぼ様な分布となった。+20mm以上のケースにおいてもこのような傾向が続くことから、高さ変化を有する場合には、スキミング流が崩れ、複雑な気流型となることが考えられる。

次にB面では、高さ変化が大きくなるにつれ上方の輸送速度比が大きくなり、+40mm以上のケースでは、上端から下方に向かって減少する分布となっている。しかし、G面には分布形状に大きな変化はない。F+面では、上端の輸送速度比にはあまり変化がないが、上から2番目の測定点での減少が大きくなっていることがわかる。

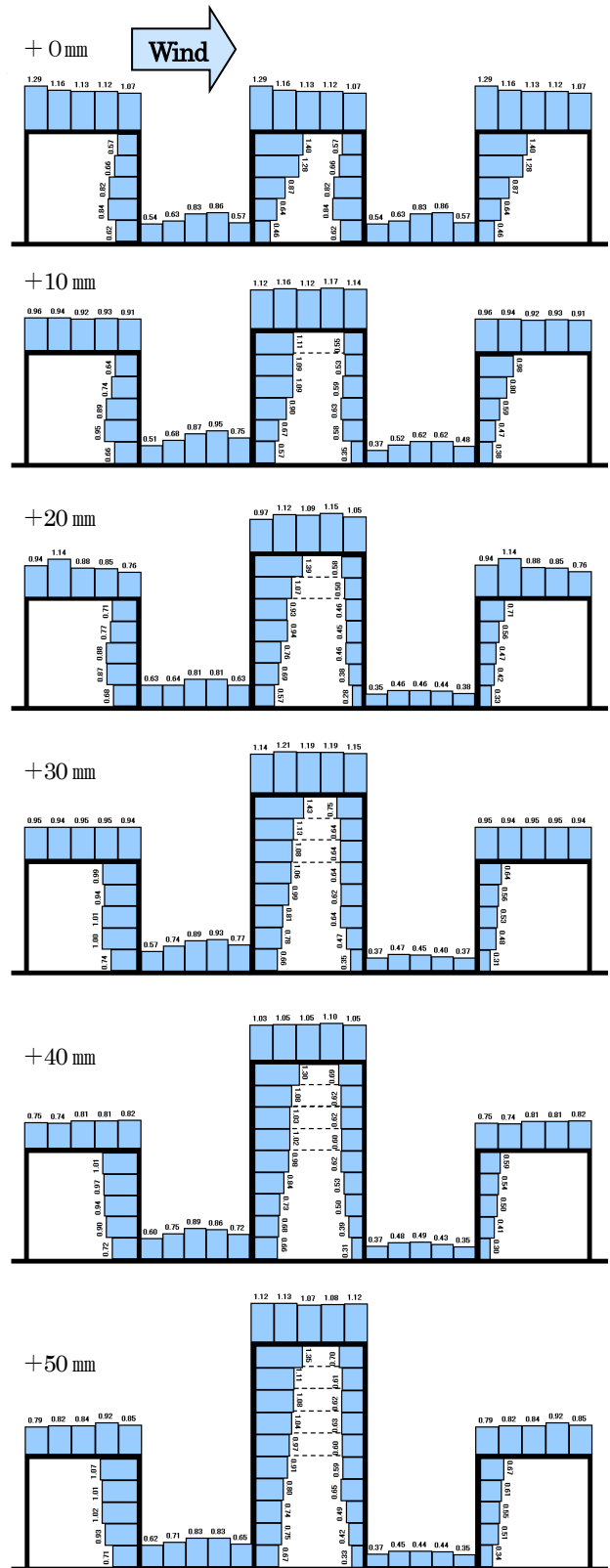


Fig.5 ケース別輸送速度比分布

B+面、G+面およびF面では、+10mmのケースで循環流による分布が若干見られるが、+20mm以上のケースでは分布のメリハリが極端に減少する。これは高さ変化を加えた模型によって、その後面域が弱風になるからである。

さらに、高さ変化による影響を詳細に捉えるため、各

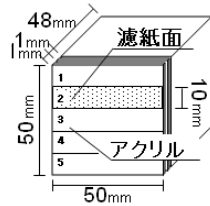


Fig.4 鉛直分布測定用試料

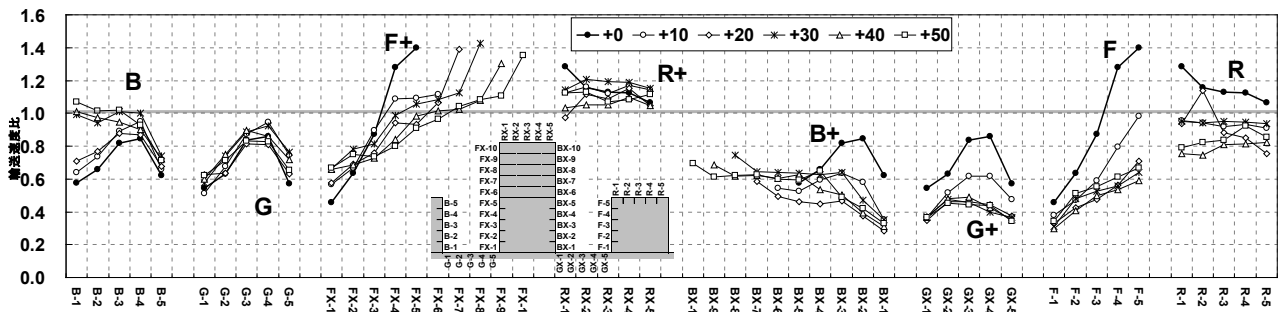


Fig.6 各測定点のケース別輸送速度比の比較

測定点での輸送速度比の差によって比較を行う (Fig.6)。B 面、G 面および F+面からなるキャニオンでは、分布図で確認したB面上方における輸送速度比の増加の他に、街路面とその近傍となる隅角部で増加が確認できる。このことから、このキャニオンでは高さ変化によって気流の流入が起きているといえる。

B+面、G+面およびF面からなるキャニオンでは、分布図で確認した分布形状のメリハリがなくなるにつれ、高さ変化なしに比べ輸送速度比が2割から最大5割程度と大きく減少している。また、R面においても輸送速度比の減少が確認でき、弱風域に入っているといえる。このことから再度B面上方での増加に注目すると、高さ変化がない場合に、キャニオン内の循環流が上空に抜けるのをR面付近で相殺する気流が、弱風化することによってなくなり、B面上方の増加に繋がったといえる。

4. 3次元街区空間における交換係数の把握 2次元配列同様 50 mm角の模型を配列し、グロス建蔽率 44.4% (街路幅 25 mm)、25% (50 mm) および 11.1% (100 mm) の3種類の配列密度について、各構成面の測定を行った。なお、整形配列においては、密度変化の他に 0 度から 45 度の風向変化を加え測定を行っている (整形配列のグロス建蔽率 25%および 11.1%の壁面は既往研究の測定結果を用いる)。配列および街路面測定点を Fig.7、Fig.8 に示す。試料についてはすでに述べた通り、密度変化に対応し、全面測定用試料とグロス建蔽率 44.4%用として、測定面を分割した試料を作製した (Fig.9)。また、街路面の測定では直方体模型を取外し、板状の試料を床にはめ込んで行った。

整形配列の輸送速度比を Fig.10 に示す。この各測定点輸送速度比と屋根面輸送速度比との比 (Roof 比) で表したのが Fig.11 である。壁面のグロス建蔽率 44.4%の測定では、既往研究で全面測定試料を用いた測定が行われているため、これを用いて分割測定および Roof 比を用いた比較の妥当性を検討する。

分割測定によるグロス建蔽率 44.4%の屋根面輸送速度比は、約 1.0 となり他の密度よりもかなり大きい値で

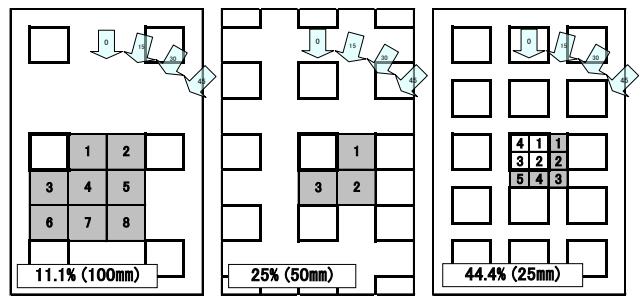


Fig.7 整形配列の床面測定点



Fig.8 千鳥配列の床面測定点

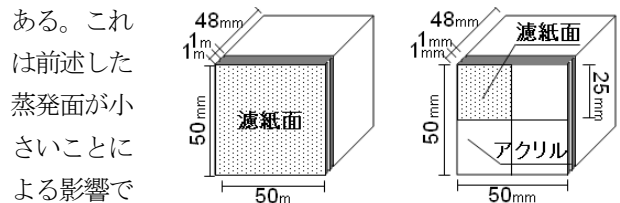


Fig.9 全面・分割測定用試料

ある。これは前述した蒸発面が小さいことによる影響である。これに比べ、全面測定による結果は、約 0.7 となり他の密度と比較すると、グロス建蔽率が大きくなるにつれ輸送速度比が小さくなるという関係が見られる。また、壁面輸送速度比も同様に比較すると、屋根面と同じ傾向にあることがわかる。次に、これらの結果を Roof 比によって比較すると、分割測定の結果が全面とほぼ同等の値となっている。しかし、細部を比較すると屋根面と壁面の各輸送速度比の増減により、Roof 比への影響が大きくなる箇所もある。このことから、Roof 比による比較を行う際は、輸送速度比の増減に注意が必要といえる。壁面の Roof 比については、風向が 180 度に近づくにつれ、また同風向下では高密度になるにつれ減少している。これは既往研究とほぼ一致した結果である。

街路面はその性質上、建物間と交差点の 2 つに分け比

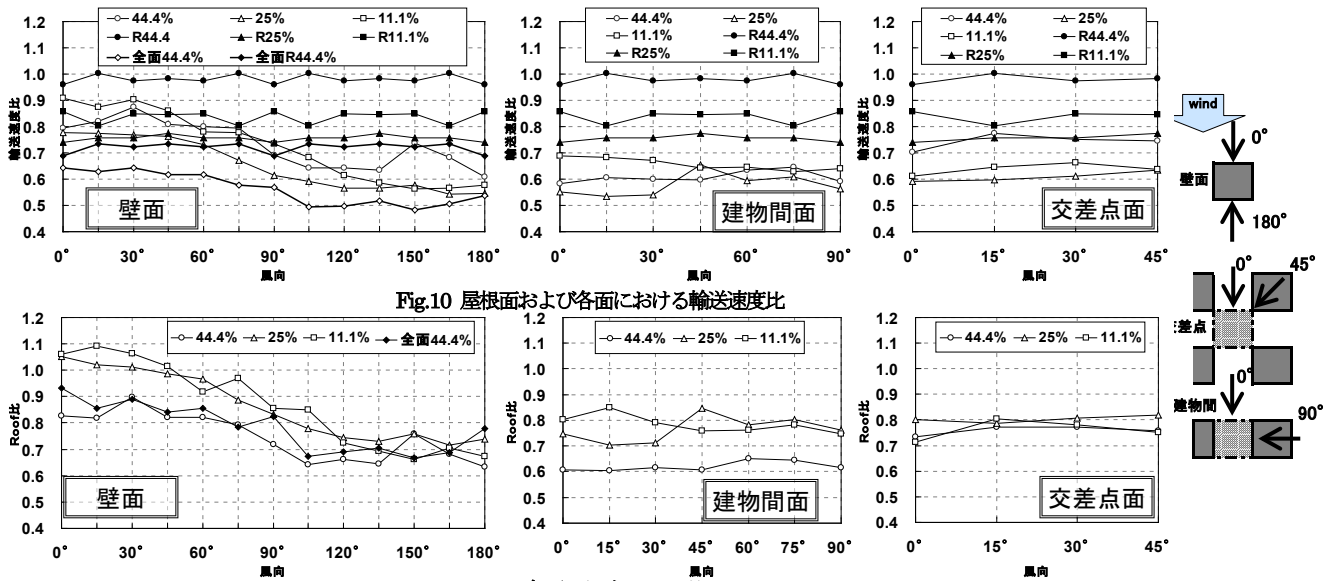


Fig.10 屋根面および各面における輸送速度比

Fig.11 各面におけるRoof比

較を行う。風向変化については、全風向を把握するために、交差点では0度から45度まで、建物間は90度までとし、15度刻みで測定を行った。

建物間のRoof比では、本実験で得たグロス建蔽率44.4%と11.1%でどちらも変化が少なかった。輸送速度比と比較すると、特に低密度である11.1%で変化が小さい。また、44.4%は低い値となっているが、25%と11.1%では差がない。これらは、低密度になると建物が街路に与える影響が小さくなるためである。交差点のRoof比では、密度変化による差がほぼなく、様な値となった。グロス建蔽率44.4%の交差点輸送速度比が、建物間に比べ大きいことがわかる。

Fig.12に千鳥配列の壁面Roof比と整形配列風向0度時の壁面Roof比を示す。壁面を風上面(F面)、側面(S面)および風下面(B面)の面毎に整形配列との比較を行う。F面においては、千鳥配列側が整形配列よりも1割程度大きい。これは、F面の前列の街路が主風向と平行に通っているために、整形配列に比べ、気流が当たり易くなっているためである。逆に、グロス建蔽率44.4%のS面では、街路面が前列の模型に塞がれる配列となり、B面と同程度まで減少している。

Fig.13に千鳥配列の街路面Roof比と整形配列の各風向の街路面Roof比を示す。主に密度が低くなるにつれRoof比が増加する傾向にあるが、整形配列のグロス建蔽率25%風向45度と千鳥配列の25%でRoof比が大きいことがわかる。グロス建蔽率25%の配列は、模型高さと同程度で、整形配列の45度と千鳥配列を比較すると、主風向に対して同じような配列となるため、Roof比が同じようなパターンになったと考えられる。

5. 結論 2次元街路空間においては、高さ変化を加えた

際の交換係数の分布を把握し、その高さ変化の前後で交換係数に異なった傾向があることがわかった。3次元街区空間では、街路面を中心とした全構成面の交換係数を把握し、さらに千鳥配列における交換係数の特徴を捉えた。

[参考文献]

- 1) 成田健一・小笠頭・野々村善民: 都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験(続報) - 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その3)、日本建築学会計画系論文集、第594号、69-76、2005
- 2) 森岡 勲・成田健一: 傾斜屋根を有する2次元配列における交換係数の分布 - 都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp843-844、2004
- 3) 鈴木直人・森岡 勲 他: 3次元立方体配列における交換係数の分布 - 都市域における各構成面別の交換係数に関する風洞実験(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp845-846、2004
- 4) 森竹千景、片山忠久、谷本潤、萩島理 他: 複雑な形状を有する街区の気流分布に関する風洞模型実験 第一報 高さの異なる直方体模型の場合、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、663-664、2000

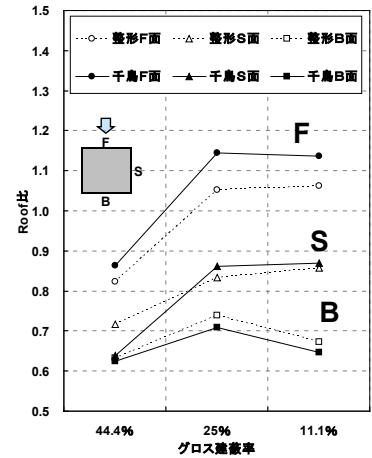


Fig.12 千鳥配列の壁面Roof比

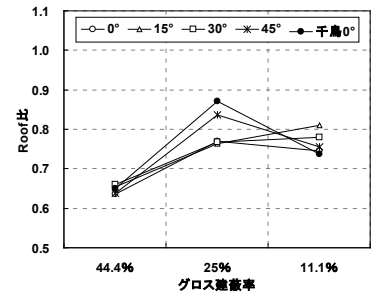


Fig.13 千鳥配列の街路面Roof比

審査員(主査) 教授 成田 健一
 審査員(副査) 教授 伊藤 庸一
 審査員(副査) 教授 川村 清志