

【カテゴリーII】

日本建築学会計画系論文集 第527号, 69-76, 2000年1月
J. Archit. Plann. Environ. Eng., AJJ, No. 527, 69-76, Jan., 2000.

都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験

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2）

WIND TUNNEL TEST ON CONVECTIVE MASS TRANSFER COEFFICIENT
ON URBAN SURFACEStudy on convective heat transfer coefficient on outside building wall
in an urban area Part 2

成田 健一*, 野々村 善民**, 小笠 顯***

Ken-ichi NARITA, Yoshitami NONOMURA and Akira OGASA

In this paper, by the measuring of evaporation rate from the filter paper pasted on building model surfaces, the convective mass transfer coefficients (k) on outside surface were examined by wind tunnel experiments. The merit of this technique is that it is easy to restrict the flux within an arbitrary surface in question.

Firstly, the effects of wind direction on surface-averaged k in a cubic model were revealed by measurements in every 7.5 degrees direction from windward to leeward. The value (k) of leeward surface is about 2/3 of windward one. As for the roof surface, its variation is small less than about 6%. Secondly, in order to clarify the change of k in urban street canyons due to its aspect ratio, the k on three kinds of surfaces (windward, leeward, and roof) were compared in various kinds of 2-dimensional urban street canyon models. In the range between $L/H=1$ and 2.5, the value (k) of windward is decreased while that of leeward is increased. These values of windward and leeward decrease rapidly in the range of $L/H<1$, then converge same value in the end. On the contrary, the value (k) of roof surface is almost constant within the limit of this experiment.

Keywords: wind tunnel test, urban climate, air flow around buildings, evaporation, urban canyon

風洞実験、都市気候、建物周辺気流、蒸発、街路空間

1. 序

筆者らは、前報^①において濾紙面蒸発を用いた物質伝達率測定法の検討を行い、自然風下における窓面での実測結果について報告した。一連の研究において、直接測定しているのは水分蒸発による物質伝達率であるが、本研究の最終目的は都市表面における対流熱伝達率の把握にある。熱画像による詳細な建物表面温度の測定が可能となりつつある現在、顕熱流量の推定において、建物外表面の対流熱伝達率に関するより詳細なデータが求められている^②。

近年、屋外空間を対象とした温熱環境の数値シミュレーションが急速な発展を遂げている^③が、表面の対流熱伝達率は、潜熱フラックスを左右する蒸発比とともに、その振る舞いが未解明なパラメータの一つである。シミュレーションにおける気流そのものの再現精度は大きく向上しているものの、境界のモデル化の仕方で大きく結果が左右されてしまう表面の熱伝達現象は、数値計算のみからのアプローチでは今のところ限界があり、実験などによる現象解明の余地が残されている。

熱伝達率の値は、試料寸法や気流の乱れ性状などに左右されるため、前報でも述べたように、基本的には自然風下で測定すべきであるというのが本研究の認識ではあるが、対流熱伝達率に関与するすべての要素を実測で検討することは不可能であるため、影響要因

を系統的に変化させうる風洞実験を補足的に行うこととした。本報は、以上のような主旨で行った風洞実験のうち、単体建物模型ならびに二次元街路模型についての結果を報告するものである。

熱伝達率に関する風洞実験としては、前田ほか^④、小林・宮野^⑤等の研究があるが、建物外表面を対象に、建物形状や風向との関係を扱ったものは大塚らの研究^⑥など数少なく、さらに街路空間を対象に系統的な検討を行ったものはほとんど見あたらぬ。筆者らも、塩分濃度変化を利用した風洞実験により市街地表面の物質伝達率を報告した^⑦が、実験方法の制約から地表面の検討に限られており、建物表面は扱っていなかった。

2. 実験方法

実験方法は、基本的に前報の自然風下における測定を踏襲したものである。アクリル製の建物模型に厚さ 1mm の濾紙 (ADVANTEC No.324) 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 分間風洞中に置き、その間の蒸発量を電子天秤 (表示精度 0.1mg) で測定した。秤量中は試料を密閉できるポリ袋に入れ、その間の蒸発を防いでいる。蒸発面の温度は、濾紙の表面直下にサーミスタ温度計 (1mm φ) を挿入して測定した (図 1)。これらとアプローチフローの温湿度の

* 日本工業大学工学部建築学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

** 横浜市技術研究所 工修

Technical Research Institute, Fujita Co., Ltd., M. Eng.

*** 日本気象協会 工修

Japan Weather Association, M. Eng.

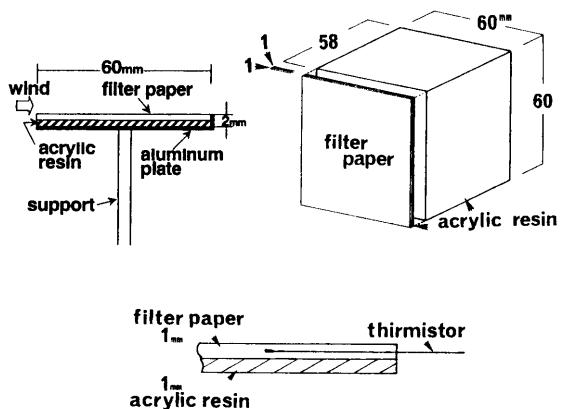


図1. 測定試料の概要(左:風上基準・右:模型)

測定から物質伝達率(k)を求めた。

$$k = E / (e_s - e_a) \quad \dots \dots \dots \quad ①$$

ここで、 k は蒸気圧基準の物質伝達率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]、 E は蒸発のフラックス [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、 e_s と e_a は各々蒸発面の飽和蒸気圧 [Pa]とアプローチフローの蒸気圧 [Pa]を表す。なお、本報で用いる基本建物模型は透明アクリル1mm厚製の一辺60mmの立方体で、濾紙を含めた模型全体を秤量している。総重量は約35gである。

図2に、風洞内における模型および測定装置の配置を示す。風洞は、広島大学工学部のゲッチングン型風洞で、吹出口から吸込口までは開放となっている。吹出口より約3mの助走区間に3種類のLアンダル製のラフネスを配置し、乱流境界層を作成している。模型設置位置における平均風速と乱れの強さの鉛直分布を図3に示す。ベキ指数1/4・境界層厚さ300mm・模型高さでの乱れの強さは約20% (図中Roughと表示)である。なお、比較のためラフネスを全て取り外した状態 (同じくSmoothと表示)での測定も一部行っている。本風洞では温湿度の制御ができないため、吹出口直後(150mm)の中央高さ付近にて、模型と同寸法の平板試料による伝達率測定を同時に繰り返し行なっている (以下、風上基準と呼ぶ)。また、前報同様、測定開始直後の蒸発面温度変化ができるだけ小さくするため、濡らした状態で秤量前に3分間風洞中に置き、予め測定条件に試料を馴染ませた。蒸発面温度と空気側の温湿度は、サーミスタ温度計 (1/100°C精度)と容量型湿度計を用いて測定しており、10Hzサンプリングの30分平均値を使用している。

前報で示したように、本実験で測定している濾紙面からの蒸発速度は、秤量間隔が少なくとも1時間程度までは実験時間に依存せず一定であることを確認している。すなわち、いわゆる恒常蒸発過程であり、濾紙の含水率に従って時間的に減衰しているわけではない。また本実験で測定している物質伝達率は、模型寸法を代表長さとするシャーウッド数で表現すると40~120程度となる。シャーウッド数は物質伝達率を分子拡散に対する比で表現したものとも解せるので、本実験で取り扱っている現象は分子拡散よりも乱流拡散が支配的であると解釈できる。従って、ここでは伝達現象を主に左右しているのは模型周囲の流れ場であるとみなし、相似則については、ビル風の風洞実験で一般に行われているのと同様に、一定以上のレイノルズ数条件下では、特に鋭角的な形状の模型周りの気流分布はレイノルズ数に依存しなくなるという点のみを根拠とした。

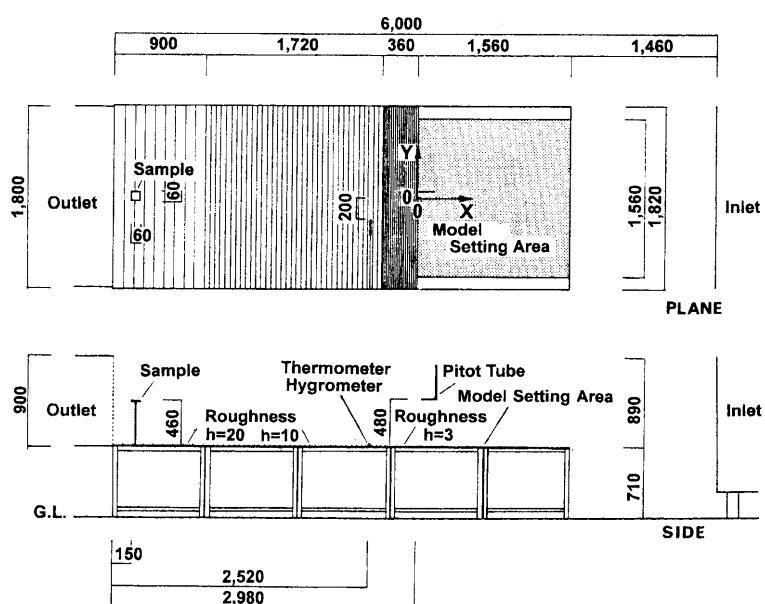


図2. 風洞および測定装置の配置状況

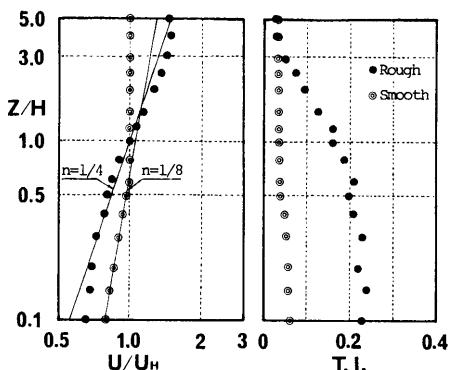


図3. アプローチフローのプロファイル

3. 風上基準の平板試料の物質伝達率について

本研究では、本報に記述した以外の実験ケースも含めると、合計1500ケース以上の測定を行っている。ここでは、そのうち最もケース数が多い風速4m/sでの測定726ケースについて、風上基準として測定した平板試料の伝達率の結果を解析した。試料は、風下側のみに試料厚さと同じ2mmの折り込みを施した60mm角のアルミ板上に水平に置かれており、アルミ板は裏面中央部に溶接された1本の金属棒 ($\phi=5\text{mm}$)で支持されている (図1・2参照)。測定は夏季から冬季まで年間にわたって行われており、測定条件は気温で5.5~29.9°Cの範囲に及んでいる。

図4は、風上基準の物質伝達率と、それぞれ気温、相対湿度、蒸発面と空気層との温度差および蒸気圧差との関係をプロットしたものである。物質伝達率の値 (図中◆印)は各要素に対してトレンドをもっており、一定値とはなっていない。測定条件が高温乾燥状態で蒸気圧差が大きく、従って蒸発が盛んで蒸発冷却により温度差が大きくなるほど、物質伝達率は小さくなる傾向が認められる。この一因は、①式で定義される k が無次元数ではなく空気の比重を含む係数となっているためである。そこで、アプローチフローの比重量 γ (kg/m^3)で除した k/γ ($\text{m}/\text{s} \cdot \text{Pa}$)に直して再プロットした (図中○印)。トレンドは概ね解消されているが、わずかに

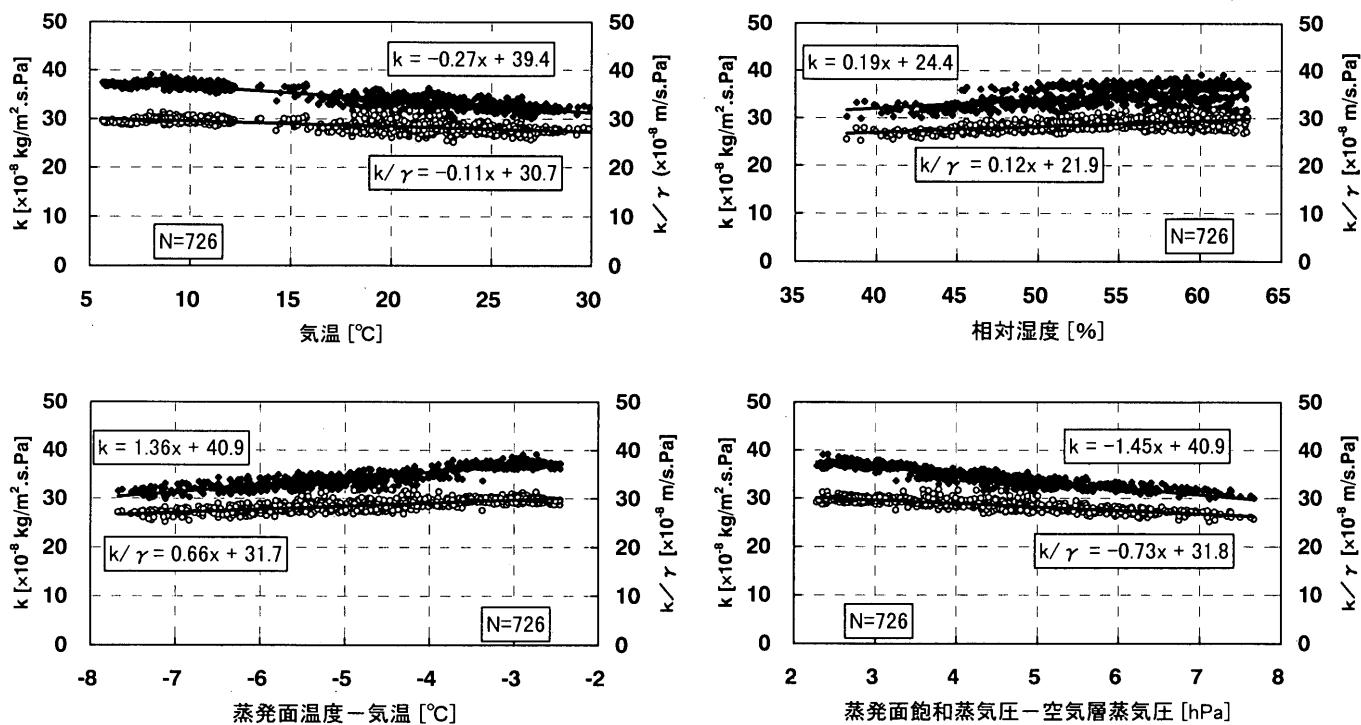


図4. 風上基準(平板試料)の物質伝達率と測定条件の関係

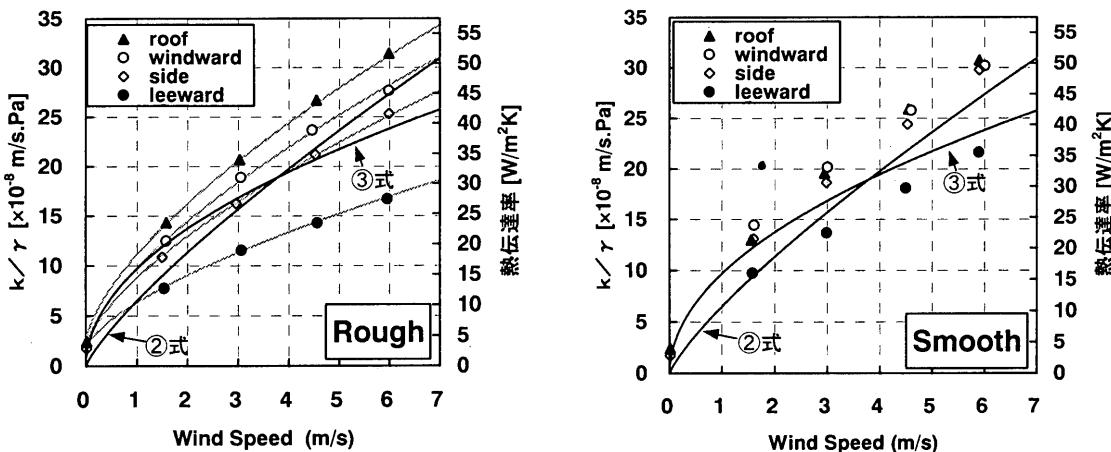


図5. 立方体模型の面平均物質伝達率と上空風速の関係

残る結果となった。この部分の解釈は今のところ不明である。全ケースの k/γ の値は 28.59 ± 1.14 [標準偏差] ($\times 10^8 \text{ m/s.Pa}$) で土 3.99% のばらつきをもつ。なお、相対湿度との関係をみると、特に高湿条件での誤差が大きくなっていることが明らかで、前報における本実験の誤差推定の結果を裏付けている。

以上の結果より、前報では k で表現していた物質伝達率を、本報では k/γ で以下表現することとした。

4. 単体建物模型の面平均物質伝達率

(1) アプローチフローによる物質伝達率の変化

まず、風洞実験における基礎的確認事項として、立方体模型を対象に図3に示した2種類のアプローチフローにおける物質伝達率を比較した(図5)。これは、測定対象面のみに濾紙を貼り、その向きを順次変えながら測定したもので、対象面のみが湿潤で他の

面は乾燥状態となっている。風上面・風下面・屋上面・側面の4種類について、風速(風洞中央高さ付近: 高さ 480mm の値)約 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 m/s の4段階で測定した。なお、屋上面と側面については無風状態でも測定を行った。図中には比較のため、アナロジーを仮定した場合の熱伝達率の目盛りを併記した¹⁾。

乱流境界層(Rough)では、面による差異が明確で、屋上面>風上面>側面>風下面の順となっている。図中の線は風速の $2/3$ 乗の曲線で、いずれの面の変化も実験範囲においては風速の $2/3$ 乗でほぼ近似できる。これは、既存の角柱に関する熱伝達率実験の結果⁹⁾とほぼ一致している。前報の実測では、乱流における平板の強制対流局所ヌッセルト数の実験式を参考に風速の $4/5$ 乗式を採用したが、今回はそれよりやや小さい指数となった。参考として平板に対する面平均ヌッセルト数に関する以下の一般式を図中に併示した²⁾。

$$(乱流) : Nu = 0.037 \times Pr^{1/3} \times Re^{4/5} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

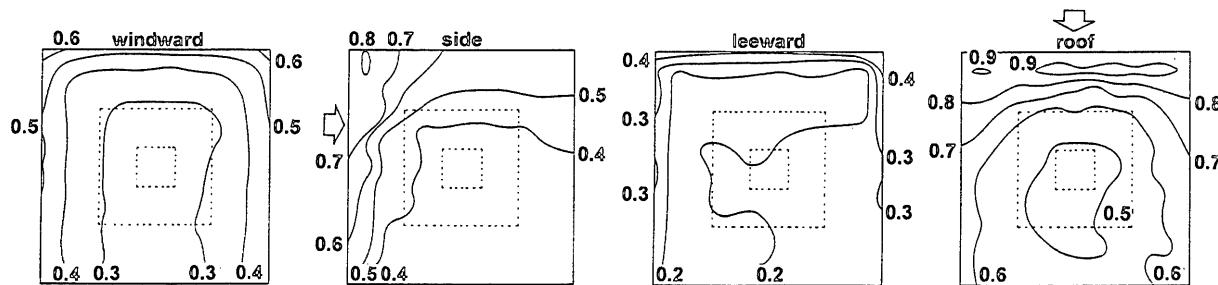


図6. 立方体模型における壁面近傍の風速分布

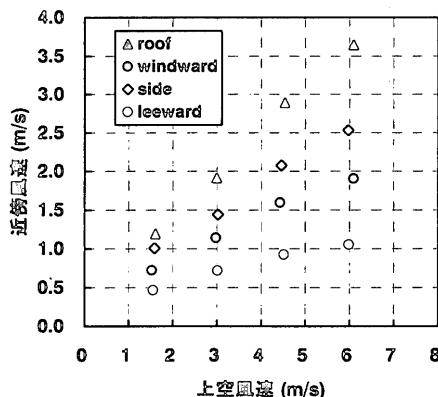


図7. 近傍風速と上空風速の関係ならびに物質伝達率と近傍風速の関係

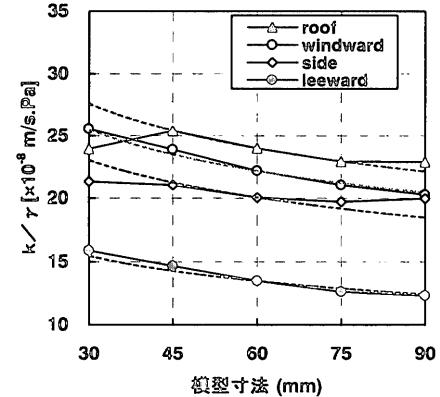
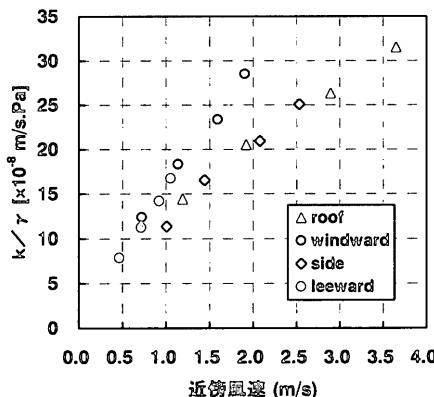


図8. 模型寸法による物質伝達率の変化

$$(層流) : Nu = 0.664 \times Pr^{1/3} \times Re^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad ③$$

なお、風上面に対する風下面の割合に注目すると、1.5~6.0m/s の範囲で 63.5%~60.1% となっている。

一方、乱れの強さが 3% 程度の気流(Smooth)では、屋上面以外の各面の値が増大し、結果として面ごとの差異が小さくなっている。特に風下面の伝達率の増大が激しい。一様流中での角柱の熱伝達率を測定した五十嵐¹⁰の報告では、風上面よりも風下面で伝達率が大きくなっている。Smooth での結果はこの傾向に近づいたものとなっている⁹⁾。

前報で報告したように、自然風下における実測では風上面 > 風下面となっており、機械分野における一様流中における熱伝達率の実験式は、建物に関しては全く適用できないことがわかる。なお、前報の実測における風上面と風下面の割合は、風向が安定する上空風速 4 m/s 以上で 65~60% となっており、今回の Rough の結果とよく一致している。

(2) 物質伝達率と近傍風速との関係

面ごとの物質伝達率の差異は、建物周囲に発生する複雑な周辺気流に依存していると考えられる。そこで、物質伝達率を測定した 4 面について、模型表面から 5mm の近傍風速分布を無指向性サミスタ風速計により 5mm メッシュで測定した。

図 6 は、各面の近傍風速分布を示したもので、図中の数字は上空風速に対する風速比を表している。風上面では、よどみ点となる中央部で弱く縁辺部で強くなる分布が明瞭で、一方風下面ではほぼ一様に風速が弱い。屋上面や側面では風上面からの剥離流が通過する風上端部で強風となるが、それより風下側では風速が弱い。

各面における近傍風速の面平均値と上空風速との関係を 4 段階の風速についてまとめ、さらに物質伝達率とその面平均の近傍風速

との関係をプロットしたのが図 7 である。上空風速に対しては 4 面別々の関係であったが、近傍風速に対しては風洞気流に平行な面（屋上面・側面）と垂直な面（風上面・風下面）の二つに分離する傾向が認められる。このような関係は、近傍風速を測定する面の模型からの距離によって異なるが、少なくともこの程度の距離では、物質伝達率が近傍風速で一義的に決まらないといえる¹¹⁾。この結果は、数値計算において、表面の対流熱伝達率を近傍風速の関数として定義する場合にも注意を要することを意味している。

(3) 模型寸法による物質伝達率の変化

次に、風洞実験の範囲内においてスケールに関する相似則が成り立っているかを検討するため、大きさの異なる 5 種類の立方体模型（辺長が 30, 45, 60, 75, 90mm）で（1）と同様の測定を行い、その結果を比較した。まず、各々の模型寸法の結果に対して図 5 のように各面の値について 2/3 乗の近似式をあてはめた。そして、一例として近似式における風速 4 m/s に相当する物質伝達率の値を模型寸法に対してプロットしたのが図 8 である。

全体として、模型寸法が小さくなるほど物質伝達率の値は大きくなる傾向にある。図中の破線は、参考までに模型寸法 60mm における値を基準に、模型寸法の -1/5 乗の変化を示したものである。風上面と風下面是、おおむね -1/5 乗に近い変化といえる。一方、側面は模型寸法による変化はわずかで、他の面とは変化がやや異なる。屋上面に関しては模型寸法 30mm で大きく外れる結果となつたが、これはアプローチフローのプロファイルが下層部分で 1/4 乗から外れてくることが原因ではないかと思われる。

面平均の熱伝達率が模型寸法の -1/5 乗に比例するという関係は、ヌッセルト数がレイノルズ数の 4/5 乗に比例するという関係から導かれるもので、その意味では、図 5 の風速との関係とはやや矛盾す

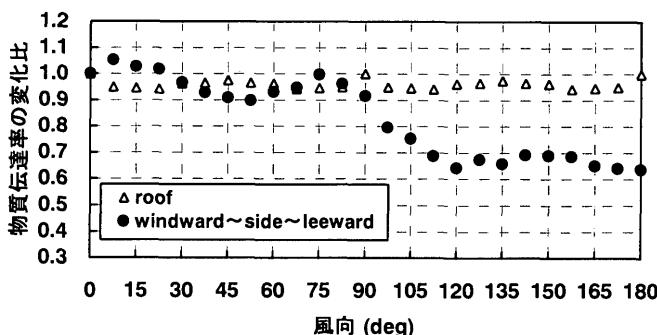


図9. 風向による物質伝達率の変化

る結果となった。

今回の風洞実験における風上面と風下面の物質伝達率の値を前報の建物窓面での実測結果と比較してみると、同じ上空風速に対して、風洞実験の値はどちらも実測値の約2.5倍となっている。これは、スケールの-1/5乗を仮定すると、約1/100のスケールに相当することになる。

(4) 風向による伝達率の変化

図5では風上面・側面・風下面の比較を示したが、前報の実測では上空風向を16方位に分けて考察した。従って、実測との対応関係を検討するためには、風向変化に対してより細かい連続的な変化を確認しておく必要がある。ここでは、図5との比較を考慮して上空風速は3m/sとし、模型を7.5°毎に回転させ、側面と屋上面について測定した(図9)。縦軸は、風向0°に対する変化比を表している。なお、屋上面については左右対称を仮定して0~45°の範囲で測定している。

側面の変化はやや複雑で、風向0°よりも10~15°付近で最大となる。その後いったんは減少するが、90°の少し手前の80°付近で再びピークを示す。そこから120°付近までは急激に減少し、それ以降180°まではほぼ一定値を示している。

一方、屋上面の変化は比較的わずかで、最大でも6%程度の変化である。

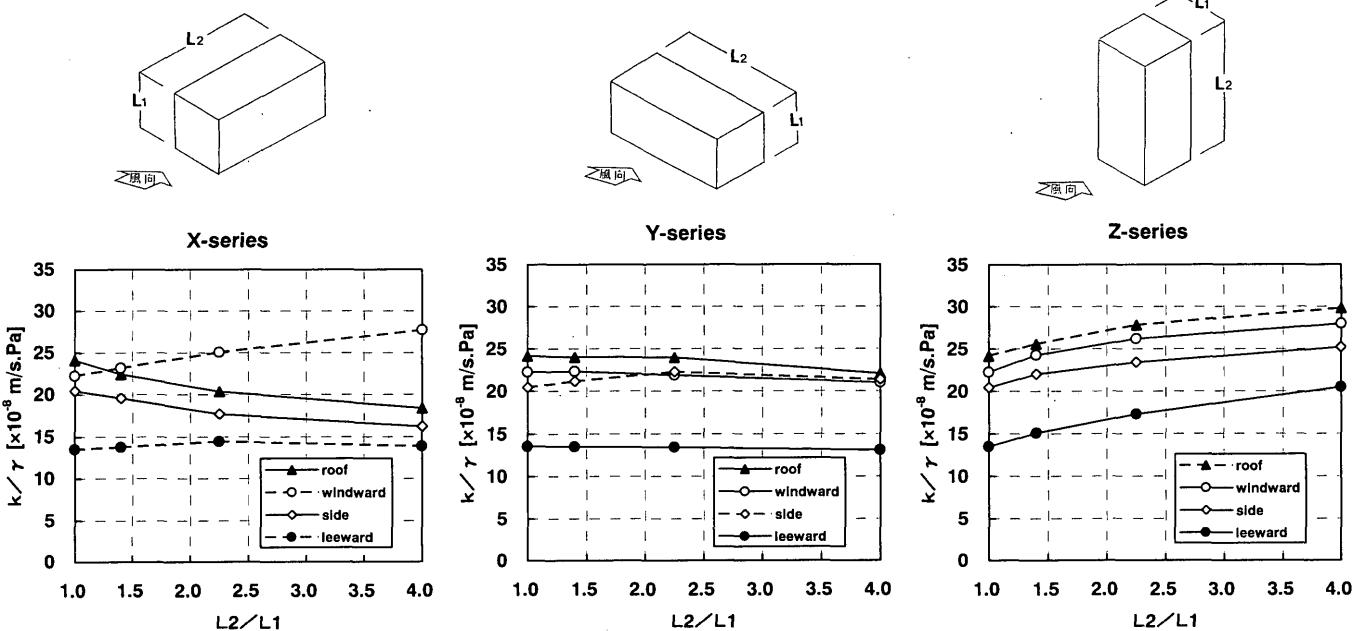


図10. 建物形状による物質伝達率の変化

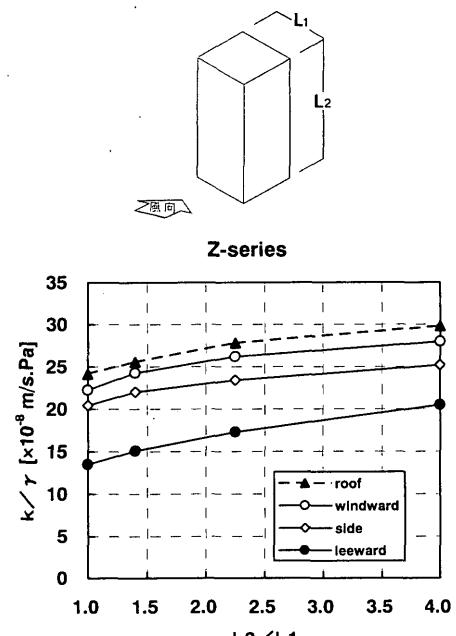
(5) 建物形状による伝達率の変化

ここまで全て立方体模型を対象に行ってきたが、前報の実測対象建物を含め、より現実的な建物形状との対応を考える基礎として、次に単体建物模型における形状変化の影響を検討した。

これまでの60mm角の立方体をベースに、縦横比が異なる3種類の直方体模型を作成した。模型はいずれも2辺の長さが等しい形状で、長辺(L2)と短辺(L1)が各々(70, 50mm), (90, 40mm), (120, 30mm)である。これらは、測定面の面積が基準とする立方体模型とほぼ等しくなるように考慮して決めたものである。ただし、短辺で囲まれた面については面積が変化している。なお、直方体模型の場合、模型の長軸と風向との関係で3種類の向きを考えられるため、ここでは、長軸が風洞気流と平行な場合をX-series、気流と直交方向に長軸がある場合をY-series、鉛直方向に長軸がある場合をZ-seriesと呼ぶ。

図10に結果を示す。これは、各模型について図5と同様の測定を行い、図8の場合と同じ処理を行って、上空風速4m/sにおける物質伝達率の結果をまとめたものである。なお、図では面積がほぼ一定している面は実線で、面積が大きく変化している面については破線で示している。X-seriesでは、模型の奥行きが長くなるほど風上面の物質伝達率が増大し、逆に屋上面と側面は減少して風下面の値に近づく。風下面の値はほぼ一定である。屋上面と側面の減少は、奥行きが長くなるほど気流方向の試料寸法が長くなるため、結果としてスケール効果がはたらいているとも考えられる。風上面の増大には当然スケール効果も含まれると思われるが、同様に面積が変化している風下面での変化は乏しい。

Y-seriesでは、全体に変化は乏しいが、横幅が広くなるほど屋上面・風上面・側面の差異がなくなる。風下面の値は一定している。Z-seriesでは、高さが高くなるほど全ての面がほぼ同様に増大する。これは、高さが高くなるほど風速が増大することと関連していると考えられる。屋上面は面積が変化しているが、他の面に比べ特に際だった増大は見られない。



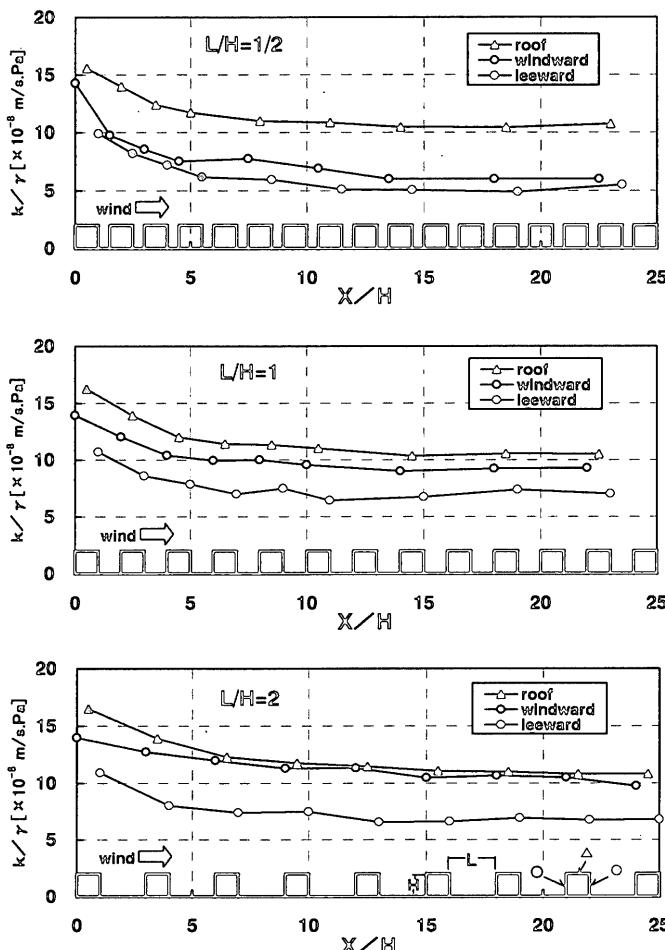


図 11. 二次元街路模型における物質伝達率の風向方向変化

5. 二次元街路空間の面平均伝達率

二次元街路は、都市空間を構成する基本構造の一つである。また、前報において実測対象とした測定点は、対向面に同形状の別棟が存在し、いわゆるキャビティ空間を形成していた。このような連棟条件での伝達率の振る舞いを検討する意味も含め、次に二次元街路模型を対象とした実験を行った。

幅 1500mm・断面 60mm 角の建物模型を等間隔に約 1500mm 配列し、測定列の中央部 60mm に図 1 の立方体試料を挟み、風上面・屋上面・風下面について測定した。風向は街路に直交する方向とし、模型間隔(L)は 5mm~450mm の 13 種類、模型高さ(H)に対する比で $H/12 \sim 7.5H$ とした。

まず、模型の配列数による差異を検討するため、 $L/H = 1/2, 1, 2$ の 3 種類の配列について、模型最前列から風下方向への物質伝達率の変化を測定した。図 11 は上空風速 3m/s の結果で、いずれの面についても、最も風上側の第 1 列において最大値を示し、風向方向の距離に従って順次減少する。減少の度合いは模型間隔が狭いほど大であるが、変化が大きいのはいずれの模型間隔においても風上から 3 列目程度まで、 $X/H > 15$ ではほぼ安定した値を示している。なお、 $X/H = 8$ 付近に共通してわずかに増加傾向が見られるが、これは最前列模型による剥離流がこの付近で再付着することによる。

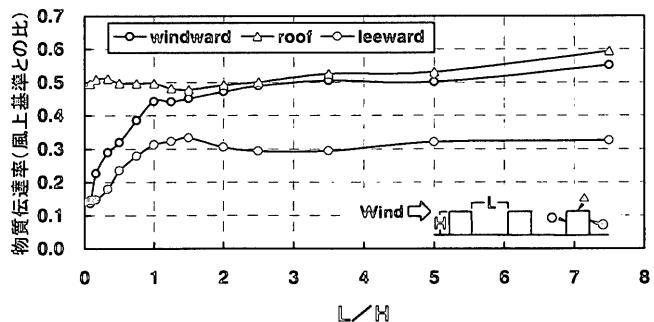


図 12. 街路幅の変化による物質伝達率の変化

次に、街路の幾何学形状による物質伝達率の変化について考察する。なお、以下の測定における測定対象街路は、上記の結果をふまえ、模型の先頭列から 18H 附近とした。測定は、上空風速 2, 4, 6m/s の 3 段階で行ったが、街路間隔に伴う変化に風速による差異はほとんど見られなかった。そこで、各風速での結果を風上基準の物質伝達率で基準化し、3 段階の風速の平均値を求めた。結果を図 12 に示す。風上面(○)は $L/H = 1$ ではほぼ安定しているが、それより街路幅が狭まるとき激に減少し、最終的には風下面の値と一致している。風下面(○)の変化もほぼ同様であるが、 $1 < L/H < 2$ でわずかながら増加している点が特徴的である。これは、この街路幅で循環流が発達すること¹¹⁾¹²⁾に対応している。一方、屋上面(△)は L/H が小さくなるほどやや減少するが、その変化はわずかである。変化が顕著な風上・風下の両鉛直面について平均し、十分広い街路の値として $L/H = 2 \sim 5$ の値を基準として考えると、街路空間の鉛直面の物質伝達率は $L/H = 1/2$ で 70%, $L/H = 1/3$ で 59%, $L/H = 1/6$ で 47%, $L/H = 1/12$ で 35% にそれぞれ減少している。

6. 二次元街路空間内の伝達率分布

これまでの実験では模型の測定対象面の全面に濾紙を貼り付け測定を行ってきたが、一方実測で検討できる伝達率は、あくまで建物壁面の一部の局所的な伝達率である。そこで、濾紙の貼り付け面積をこれまでの面平均測定の 1/6 とし、二次元街路空間内の同一面内における位置による物質伝達率変化の把握を試みた。

図 13 に示すように、これまでと同じ辺長 60mm の立方体模型に、幅 10mm の濾紙を貼り付け測定試料とした。測定面内の濾紙面以外の部分には、濾紙と同じ厚さの透明アクリル板を貼り付け、測定面全体が平板となるようにしている。濾紙の貼り付け位置が異なる 3 種類の試料を、二次元街路模型の中央部に順次位置を変えて設置し、街路内の分布を把握した(図 14)。街路面については、同寸法の濾紙を貼り付けた平板試料を、同じく周囲のアクリル板と段差のないように埋設して測定した。風向は街路と直交する向きとし、5 種類の街路幅、 $L/H = 1/6, 1/2, 1, 3/2, 2$ について、面平均との比較を考慮し上空風速 4m/s で測定した。測定位置は、面平均測定と同じ模型の先頭列から 18H 附近である。なお、 $L/H = 1$ については、風向が街路と平行な場合についても測定を行っている。

図 15 に、風向を街路と平行とした場合の結果を示す。以下の図では、図 11 と同様、各 1cm 幅部分の物質伝達率を風上基準の物質伝達率で基準化して表現している。分布は中心に対してほぼ対称な

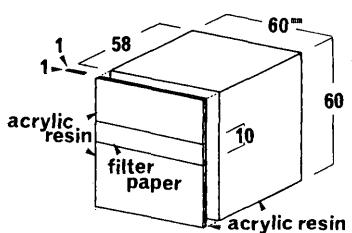


図 13. 分割測定試料の概要

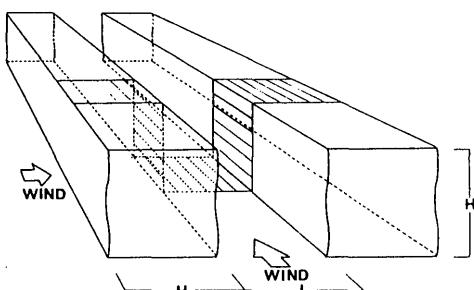


図 14. 分割測定の測定対象面

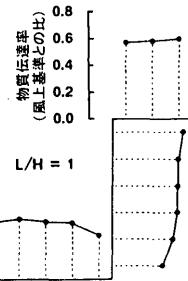


図 15. 風向と平行する街路の伝達率分布

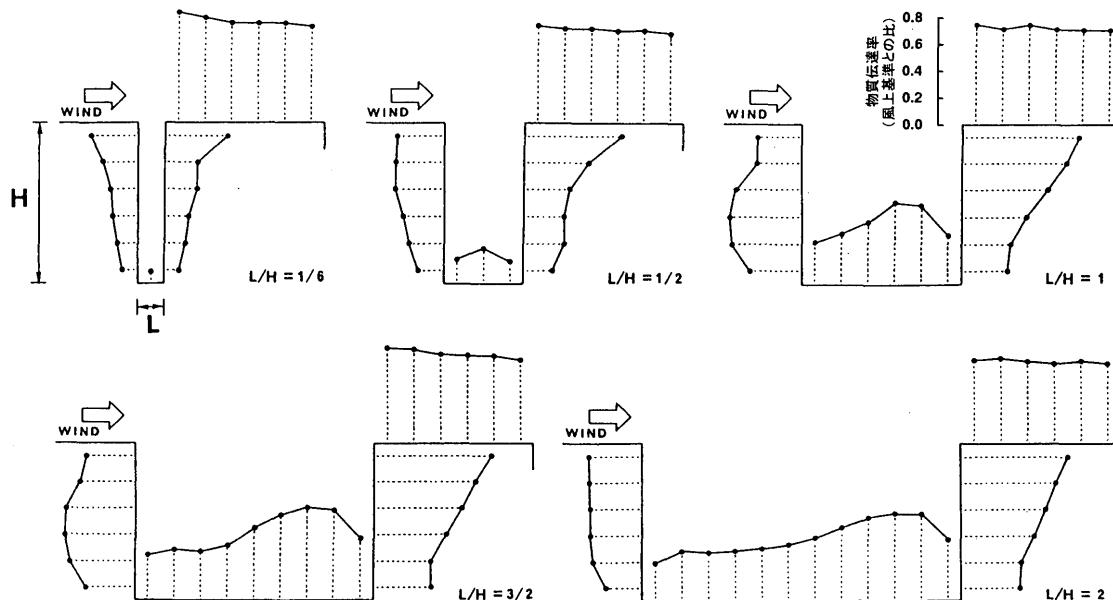


図 16. 風向と直交する街路における物質伝達率の分布

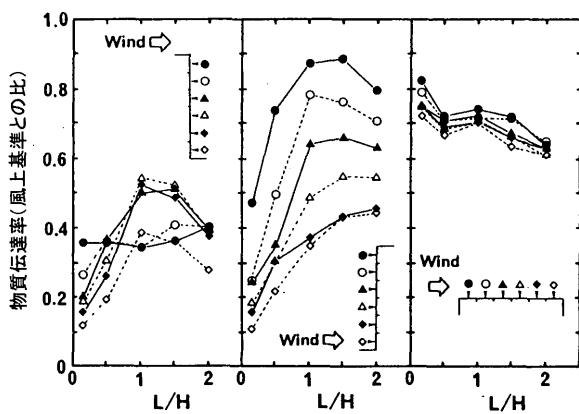


図 17. 各位置における物質伝達率と街路形状の関係

形となっており、側面は上端から下方に向かってやや減少する傾向、街路面は中央部でやや大きくなる傾向を示し、街路下部の両端部分で物質伝達率が小さくなっている。屋上面は、街路の側面上端部分よりわずかに大きい値で一定している。

図 16 に、風向を街路と直交方向とした場合の結果を示す。屋上面の分布はいずれの街路幅においても比較的均一で、風下ほどわず

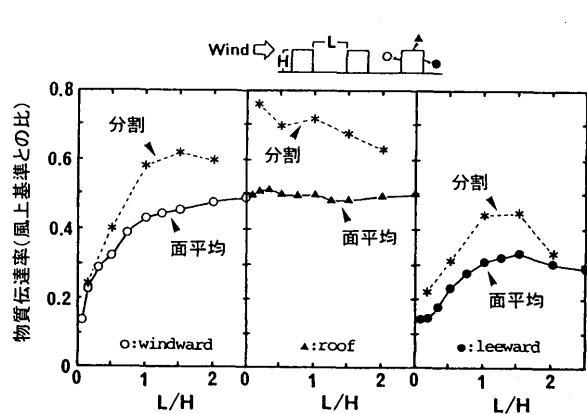


図 18. 分割測定と面平均測定による物質伝達率の比較

かに小さくなる分布を示す。ただし、物質伝達率の値は街路幅が狭くなるほど大きくなっている。これは、街路幅が狭くなると気流が屋上面を撫でるように流れ(skimming flow¹³⁾), 屋上面近傍の風速が強くなることと対応している。図 17 は、各ポイントの物質伝達率の変化を L/H に対してプロットしたものであるが、屋上面については $L/H = 1/6$ と $1/2$ の間で変化が顕著であり、この範囲で流れ

のパターンに変化があるものと思われる。

風上面の分布は、いずれも上部ほど大きく最下部で最小値を示す。原則として街路幅が広がり気流の流入が盛んになるにつれて大きくなる傾向にあるが、面の上部では $L/H > 1$ で逆に減少している。その結果、上下方向の差異は $L/H = 1$ 程度で最も大きく、それより街路が広がると分布は均一化していく。

風下面については、街路幅によって上下方向の分布パターンが大きく異なっている。 $L/H = 1/6$ では、風上面と同様、上部ほど大きく、風上面と風下面の分布はほぼ対称形となっている。街路が広がると、最上部の値はほとんど変化しないのに対し、中央高さ付近の値が顕著に増大する。この傾向は $L/H = 1 \sim 3/2$ 程度で最も明確に現れる。これは、既に述べたように、この範囲の街路形状において循環流が最も発達することに起因している。

街路面では、 $L/H = 1$ 以上の街路で街路中心より風下側にピークが現れる。これは、街路面近傍では上空風とは逆向きの気流が卓越し、風上面近くでは上空の乾燥した空気が吹き降ろすことに対応している。 $L/H = 1/2$ 以下ではそのような分布は認められず、街路近傍に明確な流れが存在しないことを示唆している。

以上の分割測定の結果を、同一面内の 6 部分について平均し、図 12 に示した面平均測定の結果と比較したものが図 18 である。物質伝達率の値は、前報で考察したように、いわゆるエッジ効果により気流に沿った試料面寸法が小さくなるほど一般に大きくなる。今回の結果では、このようなエッジ効果の現われ方が、面の向きや街路の幾何学形状によって各々異なっている。屋上面では、分割測定の平均値(図中 *印)は L/H が大きくなるにつれて面平均測定の値に近づいており、 L/H が大きくなるほどエッジ効果が小さくなる。これは、skimming flow の状態から街路幅が広がるにつれて、屋上面近傍気流の乱れが大きくなることに起因していると考えられる。風上面については、 $L/H = 1/6$ ではほとんどエッジ効果は認められず、閉塞率が高い街路では風上面に沿った明確な流れが存在しないことを示唆している。逆に、明確な循環流が発達する街路形状($L/H = 1 \sim 3/2$)では、両者の差が大きくなっている。このような傾向は、風下面についても同様に表れている。 $-1/5$ 乗則を仮定すると、10mm 幅の局所測定結果は 60mm 幅の面平均測定の $(1/6)^{1/5} \approx 1.43$ 倍となる。屋上面および、 $L/H = 1 \sim 3/2$ の両鉛直面の増加率は、この倍率にはほぼ一致している。

7. 結語

本報では、物質伝達と熱伝達のアナロジーを前提に、建物外表面の対流熱伝達率を、濾紙面蒸発による物質伝達率の測定から考察した。ビル風害の評価に一般に用いられる市街地風の条件に準じた乱流境界層を風洞内に発達させることで、風上面と風下面の関係など、対流伝達率の実測結果に見合う妥当な結果を得ることができた。

今回の結果を無次元数を用いて表現すれば、物質伝達率を意味するシャーワッド数がレイノルズ数の $2/3 \sim 4/5$ 乗に比例するとなり、伝熱工学における既存の熱伝達に関する実験式と良く一致した結果となった。これは、建物模型のような、摩擦抵抗のみならず形状抵抗が作用する表面の伝達現象についても、物質伝達と熱伝達のアナロジーがおおむね成り立つことを意味している。ただし、このような風洞実験で求められた無次元数表示の実験式が、実大建物の

壁面にそのまま適用できるかどうかは検討の余地が残されている。

エッジ効果と深く関連する実測における近傍気流性状、ならびに実測対象建物模型の風洞実験等については、次報で報告する。

<謝辞>

本研究の一部は、第 29 回(平成 2 年度)竹中育英会建築研究助成金、文部省科学研究費補助金(平成 4 年度、奨励研究 A : 課題番号 04750568 ならびに平成 5 年度、奨励研究 A : 課題番号 05750559)によるものである。なお、実験に際しては、平田 修・中本博幸・林田修久・村上正人・横田和男・松下嘉宏の各氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

註

*1) 物質伝達と熱伝達のアナロジーとしては、前報同様、 $\alpha_c/C = 0.83 k_x$ の関係¹⁰⁾を用いた。ここで、 α_c : 熱伝達率[W/m²K], C : 濡り空気の比熱 [J/(kg·K)], k_x : 物質伝達率[kg/(m²·s·(kg/kg))] を表す。

*2) $Pr = 0.71$, Re に代表長さ 0.06m を代入し、動粘性係数 ν の温度依存性を無視し、*1)の関係を仮定すると、②式③式は、各々以下の値となる。

$$\text{②式: } k/\gamma = 6.53 \times U^{1/5} \quad [\times 10^8 \text{ m/s.Pa}]$$

$$\text{③式: } k/\gamma = 9.73 \times U^{1/2} \quad [\times 10^8 \text{ m/s.Pa}]$$

*3) 五十嵐の報告は全面等温条件の実験であり、厳密には対象面のみをウエットとした本実験とは条件が異なる。しかしながら、全面ウエットで実験した場合の変化(実験方法の制約から事実上難しい)は、風下面では伝達率が減少するが風上面ではほとんど変わらないと予想される。従って、風上面>風下面の関係はより一層明確になると思われる。

*4) この点に関しては乱れの寄与についての考察が必要であると思われるが、ここでは平均風速測定におけるセンサの指向性影響を重視してサーミスタ風速計を用いたため、応答性の限界から明確な傾向が把握できなかった。これについては、あらためて検討する予定である。

参考文献

- 1) 成田健一・野々村善民・小笠 顯: 自然風下における窓面対流物質伝達率の実測ー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 1), 日本建築学会計画系論文集, 第 491 号, 49-56, 1997.1
- 2) 梅干野晃・浅野耕一・金丸剛久: 熱画像を用いた建物外表面からの顯熱流量の解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 500 号, 43-50, 1997.10
- 3) たとえば、吉田伸治・村上周三・持田 灯・富永禎秀・大岡龍三・足永靖信: 対流・放射シミュレーションによる都市の温熱環境評価に関する研究, 空気調和衛生工学会学術講演会梗概集 1265-1268, 1997.8
- 4) 前田敏男・寺井俊夫・渥美勝利・坪田保雄: 建物外表面の熱伝達率に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 231-232, 1970.9
- 5) 小林定教・宮野秋彦: 热伝達率の研究ー突起物を有する外壁面の熱伝達特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 258 号, 53-62, 1977.8
- 6) 大塚順基・中村泰人・梅宮典子・吉田篤正: 風洞実験による建物群模型の屋根面の熱伝達率, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 831-832, 1997.9
- 7) 成田健一・関根 純・徳岡利一: 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 361 号, 10-20, 1986.3
- 8) 成田健一・関根 純・徳岡利一: 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究(続報), 日本建築学会計画系論文報告集, 第 366 号, 1-11, 1986.8
- 9) 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 日本機械学会, 1986
- 10) 五十嵐 保: 正方形柱まわりの流動と熱伝達, 日本機械学会論文集 B, 50 卷 452 号, 1173-1181, 1984.4
- 11) 上原 清・村上周三・及川 進・若松伸司: 温度成層中のストリートキャニオン内の流れに関する L DV を用いた風洞実験ー市街地における汚染物質の拡散に関する実験的研究 その 2, 日本建築学会計画系論文集, 第 492 号, 39-46, 1997.2
- 12) 清田誠良・成田健一・吉原俊朗・戸田訓弘・中山昌尚・野々村善民: 市街地における街路空間の気流性状に関する研究ー広島市の東西街路における実験, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 512 号, 61-66, 1998.10
- 13) T. R. Oke: Street Design and Urban Canopy Layer Climate. *Energy and Buildings*, 11, 103-113, 1988
- 14) 尾崎明仁, ほか 6 名: 建物外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究ー風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達についてー, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 407 号, 11-25, 1990.1

(1999年 2月 9日原稿受理, 1999年 8月 16日採用決定)