自然風下における窓面対流物質伝達率の実測(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4)

SEQUEL TO THE REAL SCALE MEASUREMENT

ON CONVECTIVE MASS TRANSFER COEFFICIENT AT WINDOW IN NATURAL WIND

Study on convective heat transfer coefficient at outside building wall

in an urban area Part 4

成田健一*,小笠 顕**,野々村善民*** Ken-ichi NARITA, Akira OGASA and Yoshitami NONOMURA

In built-up area, a convective heat transfer coefficient at outside building wall is closely related to the turbulent wind affected by surrounding roughness elements. In this paper, the newly-contrived estimation method for the convective mass transfer velocity by the evaporation from the filter paper was adopted to the real scale observation at tall building windows. And the fine structures of airflow in the vicinity of windows were also measured with 3-dimensional ultrasonic anemometer (5cm span). This time, the effects on the convective transfer velocity of a protruding post near the window, the existence of balcony, and the difference of location within the building wall were especially examined.

The linear regression equations between mass transfer velocity and the wind speed at the one and half of the building height were derived for the windward condition and leeward condition, respectively. These equations were slightly changed dew to the location and surrounding conditions, but its variation range was restricted within 25%. As for the wind speed at the distance of 30cm from the surface, its only one regression curve to the mass transfer velocity was possible to determine for all observation points.

Keywords: urban climate, air flow around buildings, evaporation, sensible heat flux, forced convection 都市気候,建物周辺気流,蒸発,顕熱流束,強制対流

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.また,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 験も併せて行ってきた²¹³⁾.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.

これまで、数多くの研究者が建物表面での実測結果から風速と対 流熱伝達率の実験式を提示してきたが 4⁰11),建物周囲の気流性状や 表面凹凸など対象建物の固有の条件による影響が大きく,統一的な 実験式を得るには至っていない¹²⁾.一方,風洞実験を中心としたス ケールモデルによる検討も伝熱工学分野等で数多く行なわれ,無次 元数を用いた実験式が提示されているが ¹³⁰¹⁴⁾,複雑形状の都市表面 では代表風速や代表長さを定義するのが困難なため,これらの成果 を容易には適用できない.メソスケールモデルなど都市スケールの 気象シミュレーションへの応用を念頭に置くと、多くの伝熱工学の 成果が示す「ヌッセルト数のレイノルズ数依存性」がない,換言す ると「熱伝達率が風速の一次式で示される」のが好都合である.風 洞実験のスケールでは,風速の 2/3~4/5 乗に比例するという結果が 一般的であるが,一次式が成り立つという報告もある ¹⁵⁾.いづれに 本報では,前報¹⁾で報告した窓面を対象とした濾紙面水分蒸発法 による実測を,同一建物の異なる測定点で継続し,壁面の凹凸,壁 面内のエッジからの距離,バルコニーの有無などの影響に関して検 討した.なお,近傍の気流性状に関しては,前報¹⁾では一部しか行 っていなかった超音波風速計による計測を全ケースについて行い, 伝達率と近傍気流性状との関係を考察した.また,前報³⁾で報告し た実測建物を対象とした風洞実験結果との比較検討も行なった.

2. 実測概要

観測対象建物は、広島大学西条キャンパスの工学部 A2 棟(高さ 31.3m)で、同規模の建物が約 42m間隔で南北に 4 棟並んでいるう ちの北から 2 番目にあたる(図 1).測定点は、図 2 に示す 7 階北 側の窓面で、上空の風向風速は屋上面より 15mに設置した超音波風 速計(20cm スパン)で測定している.今回測定対象とした場所は、 前報 ¹⁾で報告した建物中央部(測定点 A)に加え、そのすぐ西側の 柱近傍(測定点 B)、建物東端部(測定点 C)、それに建物中央部で バルコニーがない壁面(測定点 D)の 4 箇所である.各測定点の周 辺状況を図 3、測定点 A~C のバルコニーの断面を図 4 に示す.

***東京工芸大学大学院 工修

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nippon Institute of Technology, Dr. Eng. Japan Weather Association, M. Eng. Tokyo Polytechnic University, M. Eng.

しても、これらスケールモデルで得られた関係が実大の建物スケー ルでも成立するのかどうかは不明であり、自然風下での実スケール のデータの蓄積がなお必要と思われる.

^{*}日本工業大学工学部建築学科教授・工博 **日本気象協会 工修



図3. 測定点 A~D 付近の周囲状況と測器の配置(平面図)



実験方法は、基本的に前報 ¹⁾と同様である. 試料は、710mm× 710mm 厚さ 5mm のアクリル板に厚さ 1mm の濾紙(ADVANTEC No.324)を貼り付け、サッシュガラス面に取り付けたものである. 蒸発量測定は中央部の 60mm 四方を対象とし、これに十分水を含ま せた後 30 分間測定点にセットし、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. なお、測定中は edge 効果を防ぐ ため測定部の周囲の濾紙も湿潤面としている. 測定部の重量は約 30g である. 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. これらと試料面から 30cm 位置で 測定した温湿度の値から物質伝達率を求めた. なお,本報では,絶 対湿度の単位系および季節による温湿度条件の変化の影響を受けな いよう,物質伝達率を前報 ³⁾と同様に以下の輸送速度で表す.

ここで Wtは物質輸送速度[m/s], Eは蒸発のフラックス $[kg/m^2s]$, ρ_s と ρ_a は各々蒸発面の飽和絶対湿度 $[kg/m^3]$ と外気の絶対湿度 $[kg/m^3]$ を表す.輸送速度を基準風速 Uで割った無次元数 C_E はバル ク係数と呼ばれる.

物質伝達と熱伝達のアナロジーは、無次元表示式から導かれる以下の関係において、(*Le*)¹n=0.86 とした場合に相当する.

ここで、 α_c は対流熱伝達率(W/m²K)、 C_p は空気の定圧比熱(J/kgK)、 ρ は空気の密度(kg/m³)、Leはルイス数 (=Sc/Pr, Sc: シュミッ

ト数, Pr: プラントル数) である¹²⁾.

近傍の気流性状は、試料面から 30cm の位置に 5cm スパンの超音 波風速計を取り付け、上空風とともに 10Hz でサンプリングを行な った. なお、試料面から 30・60・200cm の位置(測定点 D では 30cm のみ)で、無指向性サーミスタ風速計による近傍風速の測定も行な っている、測定点 D に関しては、写真 1 に示すように、アクリル板 をサッシュ枠にはめ込み、周囲壁面と同一平面となるよう試料を設 置している.

3. 建物中央部(基準点)での輸送速度と近傍気流性状

図 6・7 に、前報¹⁾で報告した(測定点 A)の結果を比較のため 再掲する.なお、以下の解析で用いている超音波風速計による平均 風速は、特に断らない限り、瞬時合成風速の時間平均 $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ を意味する.上空(建物の約1.5倍高さ)の風向分類は,前報 □同 様図5の凡例に従っている.風向の判定は,瞬時風速0.5m/s以上 の風速値を16方位別に積算し,その風速積算値が最大となる方位 としている.図の右端には,熱伝達率の目盛りを併記した.図6の 実線(式①・式②)は各々風上風・風下風に対する上空風速の一次 回帰式,図7の実線(式③)は,近傍風速の2/3乗の回帰式を表し ている.30cmという距離の近傍風に対しては,上空風向に関わり なく一つの関係式で表すことができる.図には,本研究と比較的近 い距離で風速を測定している既往研究の結果(萩島他。)[壁面から 13cm 破線(H)],吉田。)[壁面から50cm 破線(Y)]を併示した.今回 の半分以下の距離で風速を測定している萩島他の式は,同じ風速に 対して熱伝達率の値が1.7倍程度となっている.一方,本実験より もやや離れた位置の風速を基準としている吉田の式とは,ほぼ重な





る結果となっている.壁面近傍の気流分布が明らかでないため単純 な比較はできないが,表面に近づくほど風速の減衰が大きいことを 考慮すると,両式との差異は概ね妥当なものと考えられる.

図8には、超音波風速計の3成分の乱れ(変動速度)、図9には 乱流エネルギーの値を示した. 窓に直交する法線方向成分である南 北成分は比較的小さく,最も大きいのは窓面に平行な水平成分であ る東西成分, 鉛直成分がその中間の大きさとなっている. 図 10 は, 東西成分と鉛直成分の平均値を用いて、窓面を正面(北側)から見 て、近傍ではどちらの方向から風が吹いているかを表したものであ る.風上面となる場合は上空風向により明確に西風と東風に分かれ ている.風下面となる南風時には、風向に関わりなく弱い東風とな っている.鉛直成分に関しては、風上面となる場合は上昇流・風下 面となる場合は下降流と明確に分離している.図11は、k-eモデル を念頭に、各成分風速の平均値を合成したスカラー値 $\sqrt{\frac{-2}{\mu}} + \frac{-2}{\nu} + \frac{-2}{\mu}$ と輸送速度の関係を参考に示した.この乱れを考慮しないスカラー 風速は、風向が反転している場合、瞬時風速の時間平均に比べ風速 を過小評価することになる. そのため, 図7の瞬時風速の時間平均 に対する③式に比べ、全体に左側へシフトする結果となっている. また、図7に比べ、プロット全体のばらつきも大きくなっており、 乱れを考慮しない風速では、乱れが強い屋外表面での対流伝達現象 を十分説明できないことがわかる.

無次元輸送速度を表すバルク係数と上空風速および近傍 30cm 風 速との関係を図 12・13 に示す.(1)式の基準風は,各々横軸に使用 している風速を用いてバルク係数を算出している.図6では回帰直 線が切片を持つため,また図7では風速の一次式ではなく2/3乗で 回帰されることに対応し,バルク係数は一定値とはならず,いずれ も弱風域で増大する変化となる.

図 6 の上空風と輸送係数の関係では、16 方位の E 風と W 風は WNW~N~ENE の風上面となる風向と同様の変化を示し、明確に 風下面の傾向を示すのは SE~S~SW の範囲の風, WSW と ESE が 両者の遷移域となっている(図 5 の風向分類を参照). そこで、自 然風がどの程度の風向変動を有しているかを検討した. 図 14 は、 上空風に関して平均風速が 3m/s 以上のケースを抽出し、その風向 変動を風向幅 10 度毎の出現頻度で表したものである. 図では 30 以 上の標本が得られた 8 風向について示しているが、風向による分布 の差異は大きくない. 全風向平均の累積頻度では、±5 度の範囲に



図 13. 近傍 30cm 風速とバルク係数の関係 (測定点 A)



26%, ±15 度に 62%, ±25 度に 80%, ±35 度に 89%, ±45 度 に 94%が含まれるという結果となる.

遷移域となる WSW と ESE 風は, 平均的には 22.5 度以上の振れ で風上風となる.上述の頻度分布の結果から,片側に 22.5 度以上振 れる頻度は 10%程度と推測される.従って,WSW と ESE 風は,9 割は風下風の条件で吹き,わずか1割が風上風になっていることに なる.にもかかわらず,これら二つの風向の輸送速度が風下風の値 よりも明確に増加していることから,わずか1割程度の頻度の風上 風が,建物表面の輸送速度には大きく影響しているといえる.

4. 柱近傍の輸送速度と気流性状

柱近傍の測定点 B(柱から約 40cm 位置)における結果を,図15 ~20に示す.各図の内容は測定点 Aに関する図6~11と対応して いる.ここでは、測定点の西側に高さ46cmの柱凸部が存在するた め、近傍風が西風となる場合に測定点は柱凸部の wake となる.

上空風と輸送速度の関係(図 15)をみると、このことを反映し、 上空風が北西側の場合のプロット(◇)が風上風であるにもかかわ らず、風下風の場合(②式)と同じ傾向を示している.上空風 3m/s 以下の条件では、その他の風向においても全体に輸送速度が減少し ている傾向が認められる.一方、近傍 30cmの風速との関係(図 16) では、図 7 の③式に比べ僅かに大きくなる傾向があるが、その変化 は大きくない.乱れ成分(図 17)を比較すると、図 8 に比べ特に鉛 直成分の変動風速が増大しているが、乱流エネルギー(図 18)の増 加は、図9に比べそれほど顕著ではない.近傍風の窓面に沿った風向に注目すると(図19),上空が北東風のとき(△)に明確な吹き 上げ気流となっている.近傍風が柱凸部にぶつかる東風となるため、 柱に沿って上昇する気流が生じていると思われる.当然のことなが ら,北西風の場合(◇)には柱凸部の wake となるため、西風は現 れていない.図20の平均流のスカラー値と輸送速度の関係では、 図11以上に相関が悪くなり(相関係数:図11は0.926,図20は 0.859),特に弱風域で③式から大きく外れる結果となっている.こ れは、柱凸部による乱れの増大を反映していると解釈できる.

以上,柱凸部の影響を総括すると,凸部からの影響範囲は明確で はないが,少なくとも凸部の高さと同程度離れた位置においては, 近傍風向が凸部の風下側となる場合に明確な輸送速度の減少が生じ る.また,このような隅角部は弱風時に淀み域となり易いため,風 向に関係なく上空風速に対する輸送速度が減少する傾向が認められ る.近傍風に関しては、柱凸部により乱れが増大するが、応答の速 い測器で乱れを考慮した風速を評価すれば、近傍風の平均風速と輸 送速度の関係に大きな差異は生じない.

5. 建物端部の輸送速度と気流性状

次に,建物端部(測定点 C)の結果について述べる.図 21~26 に,前項同様,図 6~11に相当する内容の各図を示した.

上空風速と輸送速度の関係(図 21)では,風上風・風下風の両 方で建物中央部の結果(①式・②式)を下回っている.減少率は風 下風時の方が大きく約 25%減,風上風時は 10~15%の減少となっ ている.これまでの熱伝達率に関するいくつかの実測では,面内の 吹走距離(フェッチ)に従って温度境界層が発達するため,輸送速



図 18. 近傍 30cm 乱流エネルギー (測定点 B)図 19. 近傍 30cm の平均流 (測定点 B)

図 20. 近傍 30cm の成分別時平均風速の スカラー値と輸送速度の関係 (測定点 B)

度が減少するという報告がなされている ⁵⁾⁹⁾.本研究の物質伝達によ る方法では、測定対象スカラー(ここでは水蒸気)のソースが試料 面近傍の湿面に限られるため、そのようなスカラー量に関する境界 層の発達はなく、気流性状の差異による輸送速度の分布のみを反映 する結果となる.風上面の北東風(△)ではフェッチが最短、北西 風(◇)ではフェッチが最長となるが、両者に明確な差異は現れて いない.

前報 ³⁰の実測建物群を対象とした風洞模型実験では,風下風時に 建物端部の輸送速度が建物中央部より減少するという結果がでてお り,この点は実測と一致している.また,今回の配置に近い1:4: 1 の建物群を対象とした実験では,風上面においても明確な棟間循 環流が形成される建物中央部の方が端部よりも輸送速度が大きくな るという結果になっており,実測結果と一致している.近傍の変動 風速(図 23)では、特に東西成分の変動が建物中央部よりも顕著に 増大している.近傍風の平均流(図 25)では、建物中央部に比べ鉛 直成分が小さくなっている.これは、棟間の循環流が建物端部では 不明確となることと対応している.

以上のように、建物端部では、建物中央部よりも特に風下風時に 輸送係数が減少する.これは、建物端部が剥離域となるのが主因で あるが、今回の場合は連棟条件であるため、建物中央部で棟間の循 環流が顕著になるという影響も含まれている.なお、以上の端部で の結果は、柱近傍ほどではないにしても、かなり局所性の強い現象 であると考えられることから、図 21 では回帰式を求めて一般化す ることは差し控えた.上空風に対しては、このように建物中央部と 明確な差異があるのに対し、近傍風と輸送速度との関係(図 22)は ③式とほぼ完全に一致していることは注目すべき点である.



図 24. 近傍 30cm 乱流エネルギー (測定点 C)図 25. 近傍 30cm の平均流 (測定点 C)

図 26. 近傍 30cm の成分別時平均風速の スカラー値と輸送速度の関係(測定点 C)

6. バルコニーがない壁面における輸送係数と気流性状

次に、バルコニーがない建物中央部の壁面(測定点D)の結果に ついて述べる.これまでと同様の各図を、図 27~32 に示す.

まず,上空風と輸送速度の関係(図27)では,バルコニーありの 結果(①式・②式)よりも,やや大きくなる結果となっている.こ こでは,バルコニーなしでの一次回帰式(④式・⑤式)を求め,図 中に併記した.特に風上面となる場合に増加が顕著で,約15%増と なっている.近傍風の変動速度(図29)では,バルコニーがないた め鉛直成分が著しく増加しており,それに伴って乱流エネルギー(図 30)も顕著に増大している.しかしながら,近傍風と輸送速度の関 係(図28)は,ばらつきはやや大きいものの,バルコニーありの場 合(③式)とほぼ一致している.興味深いのは近傍風の風向(図31) で,バルコニーなしの場合と鉛直成分が逆転している.すなわち, 風上面の場合に下降流,風下面の場合に上昇流となる.これは,風 上風時の吹き降ろし気流,風下風時の棟間循環流の向きと各々一致 する.従って,バルコニーがある場合は,このような大きな流れ場 がバルコニー内に逆回りの局所的な再循環流を誘発していたと推測 される.

なお、測定点 D の実測では、バルコニーの有無による近傍気流の 変化を検討するため、サーミスタ風速計による近傍 30cm 風速の同 時測定をバルコニーがある測定点 A で実施した. 図 33 はその結果 を示したもので、強風時には、バルコニーによって近傍風速が半分 程度まで減少していることがわかる.ただし、減少の比率は一定で はなく、風下面となる場合など、弱風時にはバルコニーによる風速 減衰はほとんど見られないことがわかる.



図 30.近傍 30cm 乱流エネルギー(測定点 D)図 31.近傍 30cm の平均流(測定点 D)

図 32. 近傍 30cm の成分別時平均風速の スカラー値と輸送速度の関係(測定点 D)



[m/s]

ž

図 33. バルコニーの有無による近傍 30cm 風速の変化

7. 湿面の試料寸法による輸送係数の変化

最後に,前報¹⁾でも報告した湿面寸法の違いによる輸送係数の変 化について述べる.本研究では,edge 効果に関する事前の検討を踏 まえ,重量測定を行っている 60mm 四方の試料の周囲 710mm (窓 ガラス幅)四方を湿面として計測している.自然風下における edge 効果を確認するため,測定点Aにおいて,試料面のみを湿面とし周 囲の濾紙面は乾燥状態とした測定を約 70 ケース試みた.結果を図 34 に示す.ややばらつきは大きいが,輸送速度は顕著に増大してお り,周囲湿面あり(①式・②式)に比べ,1.4~2.0 倍の値となって いる.前報¹⁾の室内実験(図 35)では,窓面にあてる気流の向きに よって 1.2~1.9 倍になる(風速 1.5~6m/s の平均)という結果にな っており,自然風下でもほぼ同様の倍率となることが確認された.

8. 結語

本報では、前報 ¹⁾に引き続き、濾紙面蒸発法による実大建物鉛直 面における物質伝達率の実測結果について報告した.連棟条件での 測定であるため、棟間循環流の影響など、単棟の場合とは異なる部 分も一部認められたが、柱凸部の影響、バルコニーの有無による変 化、建物中央部と端部の差異の3点について、近傍気流性状と関連 付けながら輸送速度の変化を明らかにすることができた.ただし、 建物スケールでのスカラー境界層の発達の影響は、本研究の方法で は考慮されない.その点の限定付きではあるが、近傍風速と輸送速 度の関係は、上記3点の条件の違いにかかわらず、同一の関係式(熱 伝達率表示でαc=8.4U²³)で表されることがわかった.

謝辞

実測に際しては、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.

参考文献

- 成田健一・野々村善民・小笠 顕:自然風下における窓面対流物質伝達率の実測-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) 成田健一・野々村善民・小笠 顕:都市表面における対流物質伝達率に関 する風洞実験一同題(その2),日本建築学会計画系論文集,第 527 号, 69-76,2000.1
- 3)成田健一・小笠顕・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)一同題(その3),日本建築学会環境系論文集,第 594号,69-76,2005.8



図 34. 試料寸法による輸送速度の変化 (測定点 A)



図 35. 周囲湿面寸法による輸送速度の変化(室内実験)

- 4) Ito, N., Kimura, K. and Oka, J. : A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on exterior surface of a building, *ASHRAE Trans*, 78, 184-191,1972
- 5) Sharples, S.: Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces, *Building Environment*, 19, 31-39,1984
- Loveday, D.L. and Taki, A.H.: Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building façade, *Int. J. Heat Mass. Transfer*, 39, .1729-1742,1996
- Taki, A.H. and Loveday, D.L. : Surface convective coefficients for building facades with vertical mullion-type protrusions, *Proc. Instin Mech Engrs*, 210, 165-176,1996
- 8) 吉田篤正:都市キャニオンにおける伝熱特性に関する研究,第26回日本 伝熱シンポジウム講演論文集,103-104,1989
- 9) 萩島 理・月松孝司・谷本 潤・片山忠久:屋外熱環境予測を目的とした k - ε モデルの壁面境界条件としての建物外表面の対流熱伝達率推定式の 提案-第1報 水平屋上スラブ及び試験家屋鉛直壁面における実測,日本 建築学会計画系論文集,第550号,23-29,2001.12
- 10)小林定教・黒谷靖雄:建築物各部位における外表面対流熱伝達率の測定法 に関する実験的研究,日本建築学会:計画系論文集,第 551 号,29-35, 2002.1
- 11)Hagishima, A. and Tanimoto, J.: Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Building* and Environment, 38, 873-881,2003
- 12)萩島 理・谷本 潤・成田健一:都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー,水文・水資源学会誌,17-5,536-554,2004.9
- 13)日本機械学会: 伝熱工学資料(改定第4版), 丸善, 1986
- 14)大塚順基・中村泰人:風洞実験による建物群模型の対流熱伝達率の特性把 握,日本建築学会計画系論文報告集,第520号,83-90,1999.6
- 15)Barlow, J.F. and S. E. Belcher: A Wind Tunnel Model for Quantifying Fluxes in the Urban Boundary Layer, *Boundary-Layer Meteorol.* 104, 131-150,2002