

# 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）

### SEQUEL TO THE WIND TUNNEL TEST ON CONVECTIVE MASS TRANSFER COEFFICIENT AT URBAN SURFACE Study on convective heat transfer coefficient at outside building wall in an urban area Part 3

成田 健一\*, 小笠 顕\*\*, 野々村 善民\*\*\*

*Ken-ichi NARITA, Akira OGASA and Yoshitami NONOMURA*

A major problem in urban climate modeling is determining how the heat fluxes from various canyon surfaces are affected by canyon flow. To address this problem, we developed a water evaporation method involving filter paper to study the distribution of the convective transfer velocity in urban street canyons.

For 3D cubic arrays, the relation to canyon aspect ratio was largely different from that of 2D canyon. And, as a case study, the variation of wind direction was investigated for some city-like setting. The area-averaged transfer velocity was insensitive to wind direction but its local deviation was significant. In addition, we measured the transfer velocity for a clustered block array surrounded by relatively wide streets. The effect of spatial heterogeneity on the transfer velocity was significant. Moreover, for a fixed total building volume, the transfer velocity was considerably larger when the building height varied, than when it was uniform. Therefore, the water evaporation method with filter paper is expected to be useful for studying the transfer velocity and ventilation rates in urban areas with various canyon shapes.

**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<sup>1)</sup>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。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、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る風洞実験を補足的に行っている。前報<sup>2)</sup>では、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2次元街路模型についての結果を報告した。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。

近年、「都市キャノピーモデル」と総称される、新しいメソスケールの地表面スキームの開発が行われてきている。都市キャノピーモデルは、建物群の凹凸を考慮した放射伝熱モデル、建物群による気流低減を表現した drag force モデル、建物屋根、壁、道路の表面温度の違いを考慮した対流・伝導モデルなど、多数のサブモデル群から成る統合モデルである<sup>3)4)5)</sup>。都市形状や建物壁面・道路の日射反射率などの都市計画、建築設計上の制御因子が説明変数として組み込まれているため、ヒートアイランド緩和策の比較検証を目的と

した研究において盛んに用いられている。

このような都市キャノピーモデルの中で、現在大きな不確定要素として残されているのは、都市キャノピー表面とキャノピー大気間の顕熱フラックスの輸送効率を定義するキャノピー表面熱伝達率のモデリングである。このような背景から、最近、都市キャニオンの熱伝達率のモデル化を目的とした風洞実験結果<sup>6)7)8)</sup>が報告されており、前報<sup>2)</sup>の結果も、そのような観点から再評価されつつある<sup>9)</sup>。しかしながら、これまでの検討はいずれも2次元キャニオンにとどまっており、3次元的な建物配列に対して系統的な検討を行った報告は数少ない<sup>10)</sup>。最近の数値シミュレーションの結果によれば、立方体の3次元配列群において、いわゆる「組織乱流」の存在が示されており<sup>11)</sup>、2次元キャニオンとは本質的に異なる流れ場が形成されていると考えられる。

本報では、前報<sup>2)</sup>の2次元配列における風洞実験結果を踏まえ、まず立方体3次元配列を対象とした基礎的考察を行い、次に直方体建物群での風向変化について検討した。また、より現実的な形状の不均一街区のケーススタディを行い、密集街区におけるオープンスペースの設置や、局所的な高層化の影響について考察した。さらに、前報<sup>1)</sup>の実測を行った実在建物を対象とした模型実験もを行い、自然風下における観測結果と比較検討を行った。

\*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

\*\*\* 東京工芸大学大学院 (株)フジタ技術センター) 工修

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

Graduate School of Engineering, Tokyo Polytechnic University (Technology Development Division, FUJITA CORPORATION), M. Eng.

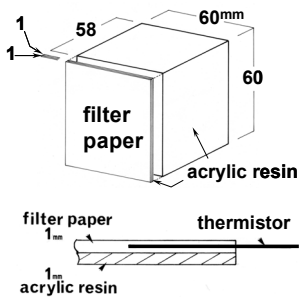


図1 測定試料の概要

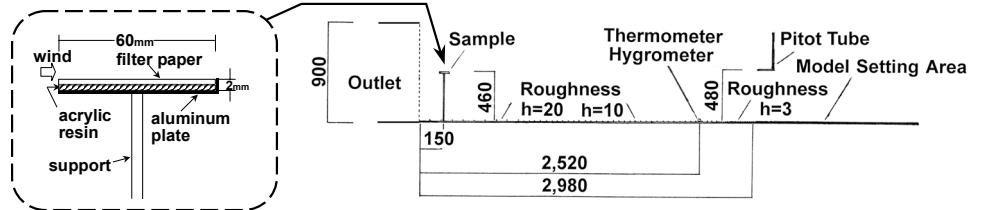


図2. 風洞および測定装置の配置状況

## 2. 実験方法

実験方法は、基本的に前報<sup>2)</sup>の風洞実験と同様である。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(1mmφ)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測定から物質伝達率を求めた。なお、本報では、類似のナフタレン昇華法<sup>6)7)</sup>等による研究結果との比較を考慮し、物質伝達率を以下の輸送速度で表す。

$$Wt = E / (\rho_s - \rho_a) \quad \dots\dots ①$$

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<sup>2</sup>·s)]、 $\rho_s$ と $\rho_a$ は各々蒸発面の飽和絶対湿度[kg/m<sup>3</sup>]とアプローチフローの絶対湿度[kg/m<sup>3</sup>]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。風洞はゲッチングン型で、吹出口から吸入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アング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の鉛直分布はベキ指数1/4・境界層厚さ300mm(模型高さの5倍)、模型高さでの乱れの強さは約20%である。本風洞では温湿度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物質伝達率測定を同時に繰り返し行っている。以下、風上基準( $Wt_0$ )と呼ぶ。また、前報同様、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。実験風速は、一部を除き、原則4m/sとした。

## 3. 立方体規則配列における物質伝達率

3次元配列の基礎として、まず立方体の整形配列について実験を行った。幅1500mm、風向方向1500mmの範囲に一辺60mmの立方体模型を均等に配列した。模型間隔( $W$ )は10mm~450mmの12種類、模型高さ( $H$ )に対する比で $H/6 \sim 7.5H$ とした。

まず、模型風上端からの配列数による変化を検討するため、 $W/H = 1/2, 1, 2$ 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3は上空風速3m/sの結果で、

縦軸は風上基準に対する比で表現している。屋上面・風上面・風下面・側面のいずれについても、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列目程度までで、 $X/H > 10$ ではほぼ安定した値を示している。前報<sup>2)</sup>の2次元街路の場合と比較すると、安定するまでの距離が大幅に短くなっている点が注目される。

次に、配列密度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模型は、上記の結果をふまえ、模型の先頭列から18H付近とした。結果を図4に示す。併示した前報<sup>2)</sup>の2次元街路の場合には、屋上面(▲)は $W/H$ が小さくなるほどやや減少するが、その変化はわずかでほぼ一定とみなせた。しかしなが

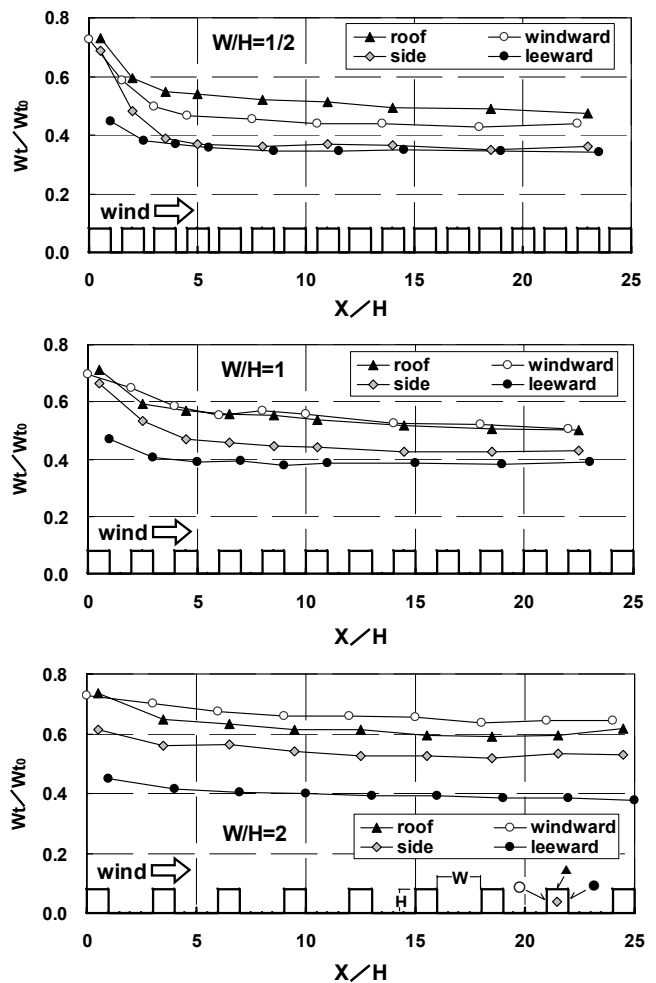


図3. 立方体規則配列における物質伝達率の風向方向変化

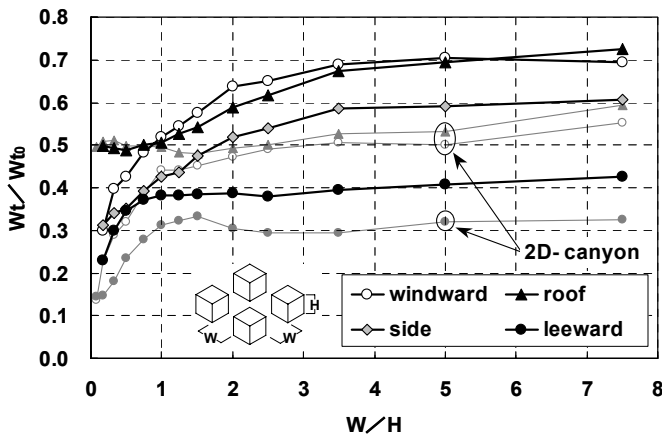


図4. 立方体規則配列における配列密度による物質伝達率変化

ら、今回の3次元配列では  $W/H < 5$  で明確に減少する傾向を示している。風上面(○)についても、2次元街路では  $W/H > 1$  ではほぼ安定し  $W/H < 1$  で急減していたが、3次元配列では屋上面同様  $W/H < 5$  の領域で漸減している。風下面(●)の変化では、2次元街路の場合に見られた循環流の発達に伴う  $1 < W/H < 2$  での増加傾向が3次元配列では認められず、 $W/H > 1$  ではほぼ一定とみなせる変化となっている。側面(◇)に関しては、値は相対的に小さいが、風上面に近い変化パターンとなっている。

十分に疎な配列の値として  $W/H=5\sim 7.5$  に注目すると、屋上面と風上面はほぼ等しく、側面はその約85%、風下面は60%程度の値である。しかしながら、 $W/H < 5$  の領域では面による変化パターンに差異があるため、構成面間の物質伝達率の比率は、配列密度により複雑に変化する結果となっている。

#### 4. 直方体街区模型における風向変化

図5に、今回測定した街区模型の配列を示す。図1と同じ60mm角の立方体を4個つなげ、1:4:1の直方体建物模型を作成した。ここでは、街路面も建物表面と同様に測定対象とし、街区全表面の評価を行うことを意図した。前報<sup>1)</sup>に示したように、本測定法では試料寸法により物質伝達率の値が変化する。そのため、建物間隔をいずれも建物模型の短辺と一致させ、すべての面を60mm角の正方形試料で測定できるように配慮し

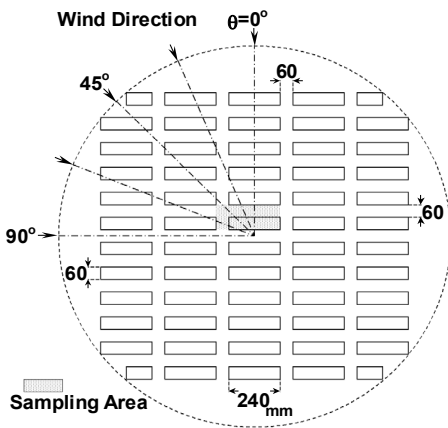


図5. 直方体街区模型の配列状況と測定領域

た。模型配列の範囲は、風向変化をするため直径180cmのターンテーブル内とし、短辺方向に12列、長辺方向には5列を配列した。そのほぼ中央部分を測定対象域とした。風向は22.5度毎に5風向について測定している。なお、本配列のグロス建蔽率( $\lambda p$ )は40%となる。60mm四方の測定区画は、風向0度における風下面(B:4面)・風上面(F:4面)・屋上面(R:4面)・側面(S:2面)および街路面(棟間G:4面・風向方向G':2面)の計20面である(図6参照)。建物面については図1の立方体模型を順次移動させ、また街路面に関しては平板試料を床面に埋め込み、いずれも濾紙面が周囲表面と一致するようにしている。

図6に、各風向における物質伝達率の測定結果を示す。図中の数字は、全100ケース(20面×5風向)の平均値に対する比を表している。これは、ある街区形状に対し、風向に関係なく全表面に一律の物質伝達率を与えた場合の相対誤差を意味している。風向0度では、風下面B・風上面F・屋上面Rの各面ともほぼ左右対称となっているが、中央部と端部の大小関係に差異が見られる。風上面と屋上面は中央部よりも端部で大きくなっているのに対し、風下面では端部よりも中央部で大きくなっている。これは、風下面の端部が風向方向街路を流れる気流の剥離域となるのに対し、中央部は棟間に形成される循環流の影響で風速が増大することに起因していると考えられる。このような循環流の存在は、棟間中央部の街路面の値が交差点部分よりも大きくなっていることから裏付けられる。一方、風上面の端部はこの風向の最大値となっているが、風向方向街路からの流入風がぶつかることによって大きな値となっていると考えられる。

以上のような分布は、風向22.5度では大きく変化し、いずれの面に関しても風上側が最大となり風下側に向かって漸減する分布となっている。また街路面に関しては、棟間よりも交差点の方が大

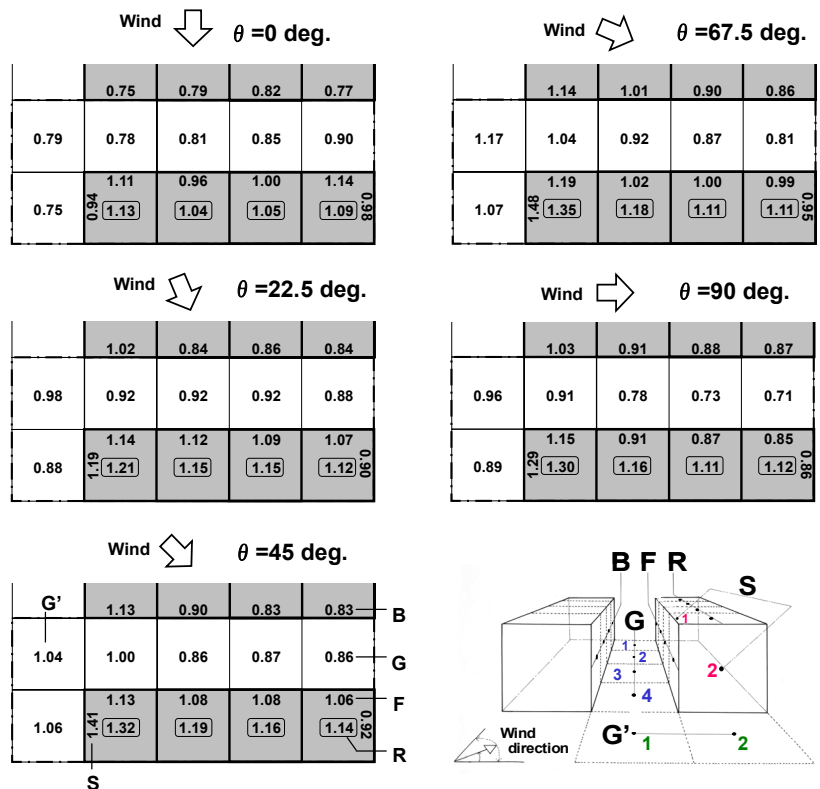


図6. 直方体街区配列における物質伝達率の風向変化(全ケース平均に対する比)

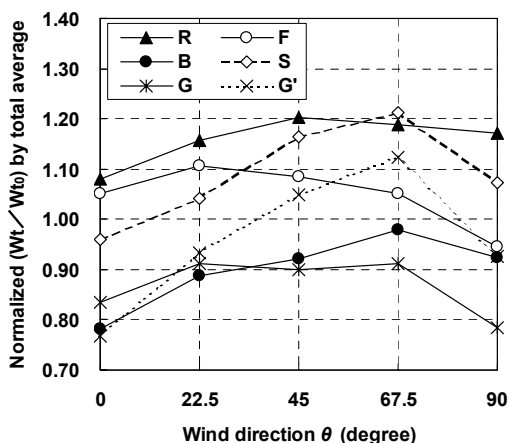


図7. 各測定面の面平均物質伝達率の風向変化 (全ケース平均に対する比)

きな値となっている。このような分布パターンは、風向 45 度・67.5 度・90 度でもほぼ同様にみられるが、風上側と風下側の差異は 67.5 度で最大となっている。なお、全ケースを通しての最大値は、風向 67.5 度の風上側 S 面に現れており、局所的に全ケースの平均値よりも 48%大きくなっている。

図7は、以上の結果を面の種類ごとに平均し、面全体での物質伝達率の風向変化を示したものである。最も風向による変化が大きいのは G' 面、建物に関しては S 面となっている。表1は、以上のような全ケース平均に対する比を、さらに屋上面・壁面・街路面の3グループに集約し、その値をまとめたものである。局所的なバラツキの大きさを検討するため、平均値に加え、各グループでの最大値と最小値も併せて表示した。☆印は、先に述べた全ケース中の最大値、★印は最小値を表しており、今回の配列では、最大で0.71~1.48の局所分布があったことを意味している。しかしながら、グループ毎の平均値で見ると、風向による変化はあまり大きくはない。最下段の街区(20面)平均では、風向による変化は0.92~1.06で、わずかに8%以内の変化に収まっている。

3グループ間の物質伝達率の差異に注目すると、いずれの風向に関しても屋上面では平均より大きく(1.08~1.20)、街路面では平均より小さな値(0.81~0.98)となっている。表1では、風向による街区平均の変化が含まれているので、それをキャンセルしたグループ間の差異を検討するため、風向毎の街区平均に対する比をまとめた(表2)。これによれば、屋上面は平均で16%増(1.12~1.22)、街路面は平均で10%減(0.86~0.93)、壁面は街区平均にほぼ等しい(0.99~1.00)という結果となった。グループ間の比は風向に関係なく比較的安定した値となっていることから、任意の街区形状に対して、構成面グループ間の比を与えるというモデル化が比較的有効であることを示唆している。なお表の下2段は、風向毎の街区平均に対する局所的な変動幅を示したもので、風向毎の平均に対しても、最大で0.74~1.40の局所分布が存在している。

キャノピーモデルでは、以上のような複雑な伝達率分布を何らかの形でモデル化する必要がある。そこで、今回の立方体街区の結果を立方体規則配列の結果と比較するため、風上基準との物質伝達率比( $Wt/Wt_0$ )で表現し、グロス建蔽率( $\lambda p$ )との関係をプロットした

表1. 屋上面・壁面・街路面の伝達率風向変化 (全ケース平均に対する比)

Type of surface	Area (lot=100)	Normalized ( $Wt/Wt_0$ ) by the total average					
		Wind direc.	0	22.5	45	67.5	90
Roof (R)	40	max.	1.13	1.21	1.32	1.35	1.30
		ave.	1.08	1.16	1.20	1.19	1.17
		min.	1.04	1.12	1.14	1.11	1.11
Wall (B+F+S)	100	max.	1.14	1.19	1.41	1.48 ☆	1.29
		ave.	0.93	1.01	1.04	1.05	0.96
		min.	0.75	0.84	0.83	0.86	0.85
Street (G+G')	60	max.	0.90	0.98	1.06	1.17	0.96
		ave.	0.81	0.92	0.95	0.98	0.83
		min.	0.75	0.88	0.86	0.81	0.71 ★
(Total)	200	Ave.	0.92	1.01	1.04	1.06	0.96

表2. 屋上面・壁面・街路面の伝達率風向変化 (風向毎平均に対する比)

Type of surface	Normalized ( $Wt/Wt_0$ ) by the average for each wind direc.						
	Wind direc.	0	22.5	45	67.5	90	ave.
Roof	ave.	1.17	1.15	1.15	1.12	1.22	1.16
Wall	ave.	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00
Street	ave.	0.88	0.91	0.91	0.93	0.86	0.90
Range of variation	max./Ave.	1.24	1.20	1.35	1.40 ☆	1.34	1.31
	min./Ave.	0.81	0.83	0.80	0.76	0.74 ★	0.79

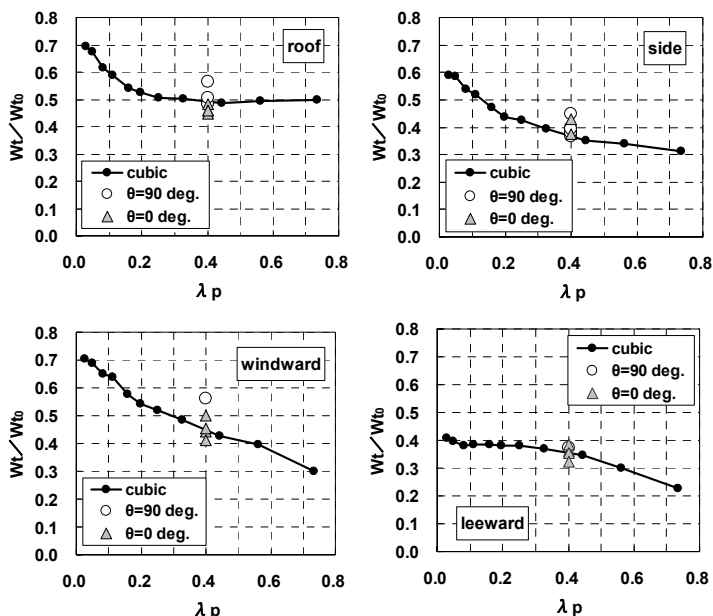


図8. 物質伝達率とグロス建蔽率の関係—立方体規則配列との比較

(図8)。実線は、図4のデータを $\lambda p$ に対する関係として再示したものである。直方体街区に関しては、街路に平行する風向0度と90度についてのみプロットしたが、概ね立方体規則配列と値が一致している。一方、物質伝達率を $\lambda p$ ではなく $W/H$ で説明とした場合、直方体街区の $W/H$ は1であるため、立方体規則配列の $\lambda p=0.25$ の値を参照することになる。この領域の $\lambda p$ による物質伝達率の変化は大きくないため、今回の結果のみから物質伝達率の説明変数として $\lambda p$ と $W/H$ のどちらが適しているかを判断するのは難しい。

### 5. 不均一街区における物質伝達率分布のケーススタディ

いわゆるキャノピーモデルでは、複雑な地表面形状をそのままの形で扱えないため、形状に関するモデル化が行われる。最も一般的なモデル化は、グロス建蔽率と平均建物高さが対象街区と一致する仮想均等街区への変換である。しかしながら、このような均等街

区への置き換えが、キャンピー表面熱伝達率の観点で妥当であるかどうかに関しては、これまでほとんど検討されていない。筆者らが塩分濃度測定法で行った実験<sup>12)</sup>では、建物高さの不均一が街区平均の街路面伝達率に大きな影響を及ぼすことがすでに示されている。実在街区の複雑さを想起すると、わずかなケーススタディから不均一街区の一般性を導くことは到底不可能であるが、ここでは広幅員街路に囲まれた密集街区を想定し、そこでの物質伝達率分布を把握するとともに、密集街区内にオープンスペースを設けた場合と、容積率を保ったまま一部を高層化するという場合の変化について検討した。

測定対象とした模型配列を図9に示す。 $W/H=1$ の街路で囲まれた $5 \times 5$ 列の立方体均等街区 (**type-A**) を想定した。街区内の細街路は $W/H=1/6$ の密集条件とした。この密集街区を $3 \times 3$ ブロック配列し、その中央ブロックを測定対象とした。建物模型は、これまでと同様、一辺60mmの立方体を使用している。周囲街路を含めた配列全体のグロス建蔽率は56.25%となっている。また、**type-B**は密集街区の中央模型を取り除きオープンスペースを設けたケース、**type-C**は同じく中央の模型を高さ2倍・床面積1/2の模型と入れ替え、容積率一定の条件下で高層化したケースである。

**type-A**における物質伝達率分布( $Wt/Wt_0$ )を、気流方向ならびに気流直交方向について、各々図10に示した。屋上面(▲)の値はほぼ一定しており、図4の立方体配列における相当する配列密度の値と一致している。街区内部の細街路の壁面については、屋上面のほぼ半分程度の値で、風上面(○)・側面(◇)よりも風下面(●)の方がわずかに小さい。これらの値も、図4の相当する配列密度の値と一致している。周囲の広幅員街路に面した壁面では、街区内部の1.5倍程度の値となっており、とりわけブロックの風上側となる壁面では、屋上面とほぼ等しい値となっている。この値も、図4の周囲街路に相当する $W/H=1$ の値に一致している。なお、外周の風上側壁面の中でも端部の交差点付近が特に大きく、全地点を通しての最大値となっている。街区内部の細街路も、周囲街路に近いほどわずかに大きく

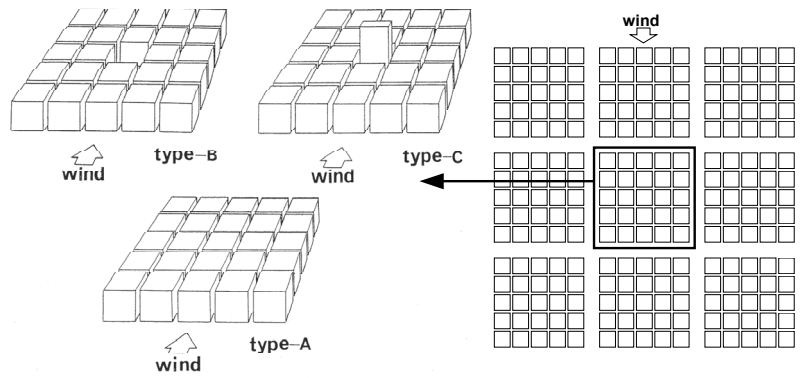


図9. 不均一街区の模型配列と測定対象密集街区における検討事例 (type-B: オープンスペースの設置, type-C: 容積率一定での高層化)

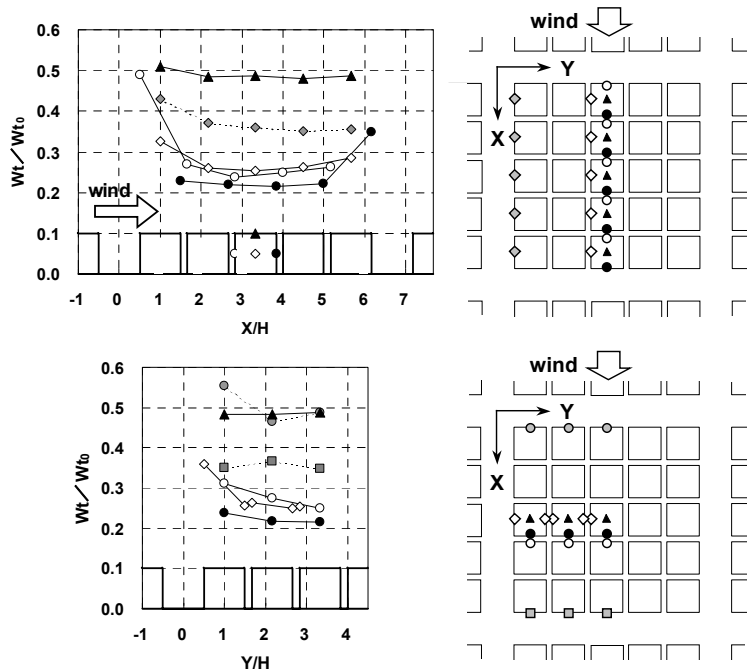


図10. type-Aにおける物質伝達率分布 (上: 気流方向, 下: 気流直交方向)

なる傾向が認められるが、かなり高密度な街区を設定したため、周囲街路からの流入の影響は狭い範囲に限定されており、街区の中心部には及んでいないと考えられる。

次に、オープンスペースの設置 (**type-B**) と高層化 (**type-C**) の影響について考察する。図11は、**type-A**に対する物質伝達率の変化比をまとめたもので、丸で囲んだ数値は屋上面の値を表している。**type-B**で大きな変化が見られるのは、空地に面した周囲の各壁面で、空地風下側の風上面では1.9倍、空地風上側の風下面では1.4倍、空地側面では1.3倍にそれぞれ物質伝達率が増大している。しかしながら、屋上面では5%以内の変化しか認められず、影響範囲はそれほど広がっていない。一方、高層化を行った**type-C**では、高層建物に面した各面で大幅な物質伝達率の増加が生じており、風下側の風上面では2.5倍、風上側の風下面では2.3倍、側面では2.4倍となっている。また、気流直交方向に一つ隔てた細街路でも5割以上の増加が認められるなど、影響範囲も**type-B**に比べ大きく拡大している。なお図には示していないが、高層建物自体の物質伝達率も、風上面では上半分で**type-A**の3.2倍、下半分では2.5倍、一

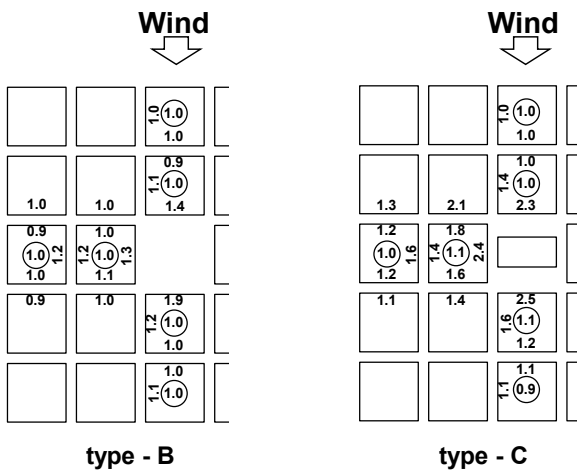


図11. type-Aに対する物質伝達率の変化比の分布

方風下面では上下とも2.6倍となっている。

以上のように、今回設定した変化は、配列全体からみれば比較的小さな形状変化であるが、街区の物質伝達率に及ぼす影響は顕著であり、特に建物高さに不均一が生じた場合の変化は非常に大きい。

なお、このような物質伝達率の変化は、街路空間の換気効率の変化を表しているとみなせることから、濾紙面蒸発を用いた物質伝達率の評価は、市街地の「風通し」の指標として非常に有効であると考えられる。街路空間内の風速分布は非常に局所性が強いので、街路空間の風通しを風速測定で行おうとする場合には非常に多点での計測を余儀なくされ、また細街路では風速計プローブによる流れ場の攪乱も無視できない。気流を乱すことなく面的な評価が可能な物質伝達率による評価法は、これらの点でも有利であると考えられる。

### 6. 実測対象建物の模型実験 (実測と風洞模型実験の比較)

最後に、前報<sup>1)</sup>で報告した実測を行った建物を対象とした模型実験結果について述べる。実測建物は、東西方向に長辺を持つ8階建ての建物で、ほぼ同形の建物が南北に4棟等間隔に並んでおり、その北から2棟目の7階北面で実測を行っている。建物間隔は42mで、棟間空間のアスペクト比は $W/H \approx 1.24$ である。今回は、建物詳細を省略した図13に示す1/500の直方体スケール模型を作成し実験を行った。物質伝達率の測定には2種類の模型を使用している。一つは、建物壁面における長辺方向の分布の把握を目的に縦長の短冊型に濾紙を貼り付ける「縦分割」模型、もう一つは高さ方向の分布の把握を目的に中央部と両端に矩形に濾紙を貼り付ける「区画分割」模型である。濾紙の貼り付けは測定対象面のみとし、それ以外の部分は濾紙と同厚の亚克力板を貼り付け同一面を形成するように工夫した。濾紙の貼り付け位置を順次移動させることで、対象面内の物質伝達率の分布を求めている。実験は北風～東風～南風に相当す

る180度の範囲について22.5度毎に行った。以下、風向については北風を0度とし、時計回りに角度表示する。アプローチフローについては、これまでと同じものを使用し、実験風速も同じ4m/sとした。なお、測定対象の濾紙試料寸法はこれまでの60mm正方形とは異なっているが、これまでと同じ60mm四方の風上基準試料を用い、各点の結果はその値との物質伝達率比( $Wt/Wt_0$ )で表現している。

図14に、「縦分割」模型による風向変化の測定結果を示す。風向による変化パターンは、風上側となる東側(①②)とそれ以外(③～⑦)に二分している。①②の物質伝達率は、風向0度よりも22.5度～90度で大きく、風下面となる90度以降で急激に減少する。ただし、風向157.5度においては風下面であるにもかかわらず大きな値となっている。一方、③～⑦では風向による変化は乏しく、風向180度

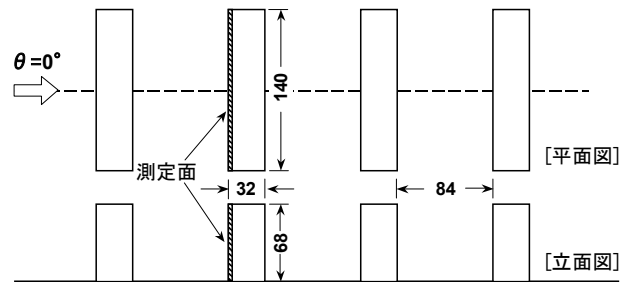


図12. 実測対象建物の模型寸法と配置

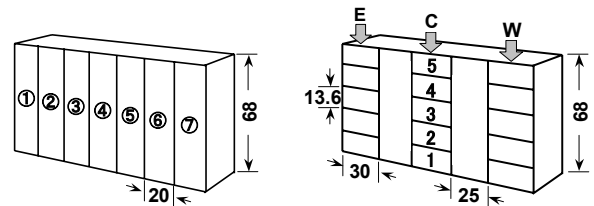


図13. 実測対象建物模型の測定面 (左: 縦分割, 右: 区画分割)

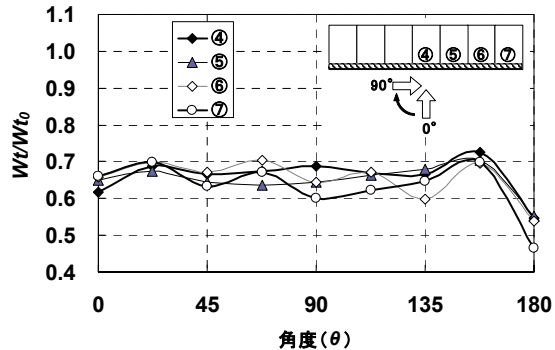
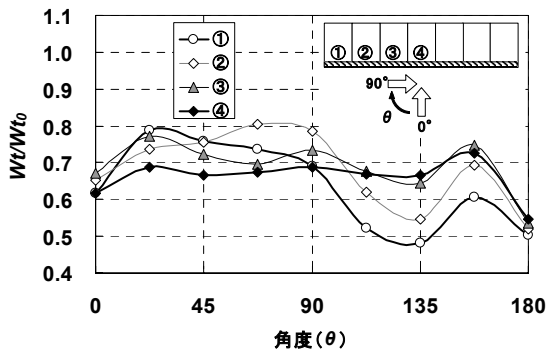


図14. 実測対象建物の物質伝達率の風向変化 (縦分割模型)

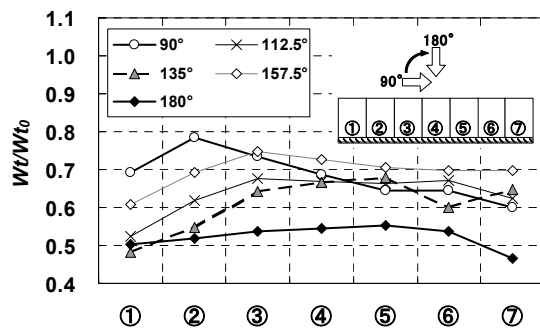
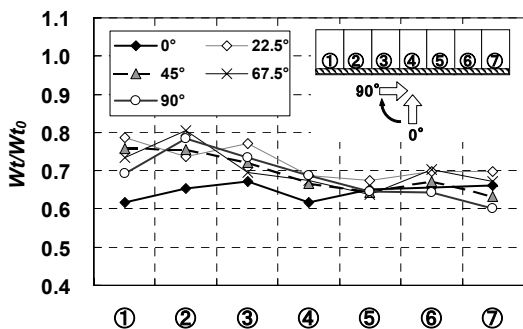


図15. 実測対象建物における面内物質伝達率分布の風向変化 (縦分割模型)

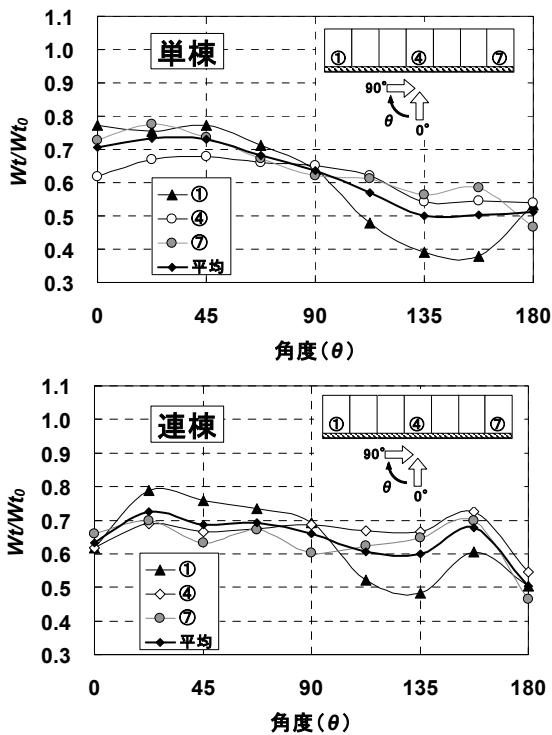


図 16. 実測対象建物における物質伝達率風向変化  
単棟の場合と連棟の場合の比較 (縦分割模型)

のみ小さい値となる。風向 157.5 度における増加傾向は、これらの面においても認められる。

図 15 は、同じデータを風向毎に結び、各風向における面内分布を示したものである。風向 22.5 度～90 度では風上側となる東側で大きく風下側に向かって漸減する分布であるが、風下面となる 112.5 度～157.5 度では逆に風上(東)側で小さく風下(西)側で大となる。これは、東側は剥離による wake 領域となるのに対し、西側は対向建物との間で形成される循環流の影響を受けるためと考えられる。

このような連棟による効果を確認するため、測定対象建物のみを配置した単棟での測定を行った。風上端・中央・風下端の 3 面についての結果を図 16 に示す。単棟の場合、位置による多少の差異はあるものの、風上面となる 0～90 度で大きく、風下面となる 90～180 度で小さくなるという共通の傾向が認められる。なお、風向 135 度付近では、剥離域となる風上側(①)で顕著に減少する傾向はやはり現れている。比較のため併示した連棟の場合、風向 0 度で小さくなる点、風上面と風下面での差異が曖昧である点、風向 157.5 度付近で明確な極大が現れる点が異なっており、これら諸点が連棟による影響であることがわかる。

図 17 は、「区画分割」模型による測定結果である。ここでは、例えば風向 45 度と 135 度の結果を組み合わせ、棟間空間の両側の分布が同時にわかるように表現している(連棟における測定建物の風上側からの棟数が異なるため厳密には同じ条件での測定ではないが、ここではその差を無視している)。なお、風向 90 度に関しては左右対称を仮定している。

風向 0 度の風上面では、上端で物質伝達率が大きく下方に向かって漸減する分布であるのに対し、風下面では中間高さにピークを持

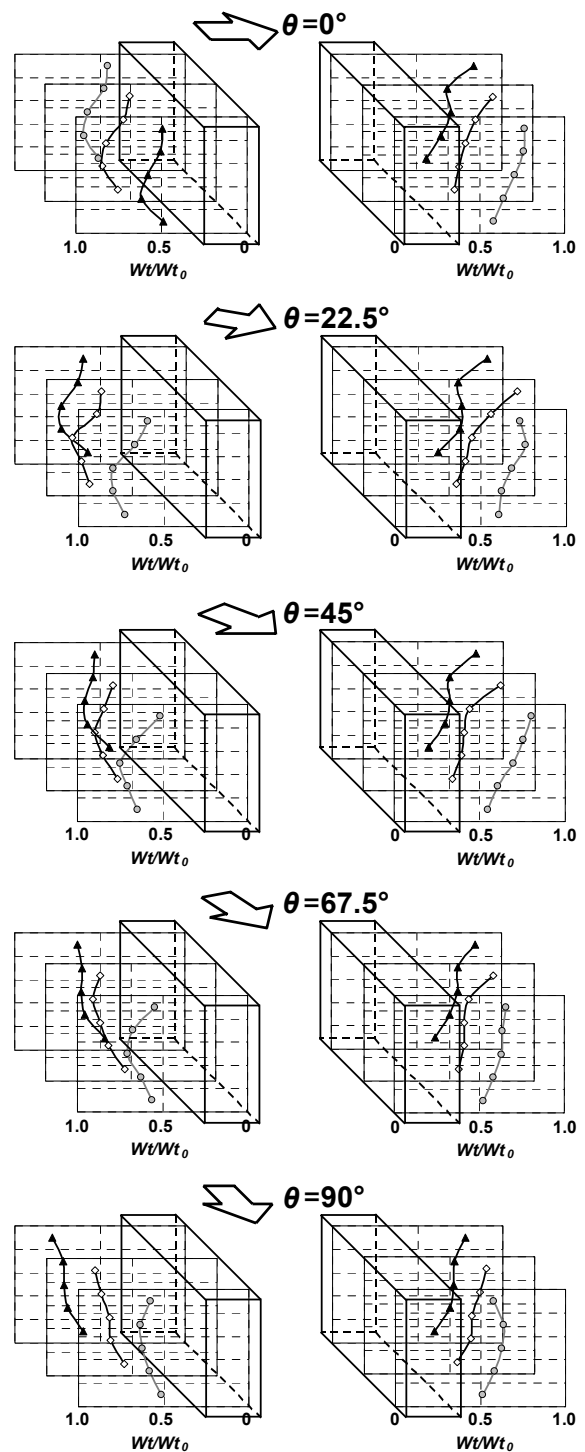


図 17. 実測対象建物における物質伝達率風向変化 (区画分割模型)

つ分布となっている。このような中間部に極大を持つ物質伝達率鉛直分布は、循環流が発達している場合の風下面に見られる特徴である。このような極大を持つ分布は、風向 0 度のほか、22.5 度、45 度の風下面にも見られる。この図では、風向 22.5 度の風下面が、「縦分割」模型で極大が現れた風向 157.5 度に相当する。なお、風向 67.5 度では、風下面のうち最も下流側となる端部でのみ極大値が現れており、棟間での螺旋状気流の存在を示唆している点が興味深い。

図 18 は、以上の「区画分割」データを高さ別に風向変化の形でまとめたものである。物質伝達率の風向変化パターンは、壁面内の

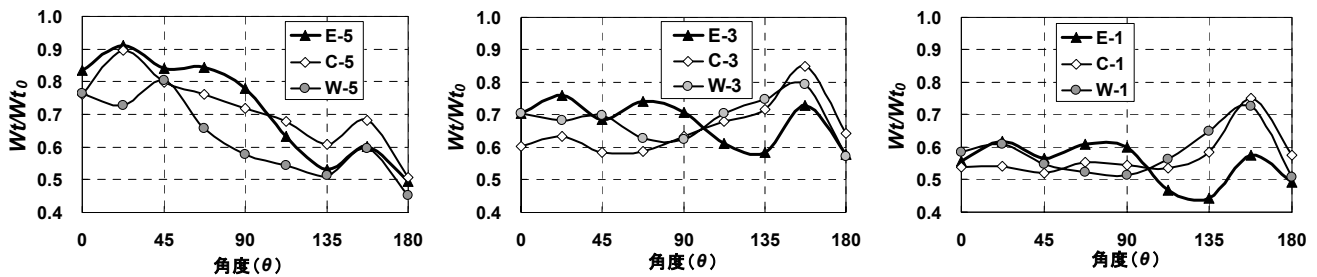


図 18. 実測対象建物における高さ別の物質伝達率風向変化 (区画分割模型) 一左: 上端部, 中: 中央高さ, 右: 下端部

高さにより大きく異なっている。上端部に関しては、連棟条件でありながら、図 16 の単棟の結果に類似する傾向となっている。中間高さ以下では、風向による変化が乏しくなり、風向 157.5 度の極大傾向が顕著に現れる分布となっている。

風向 157.5 度における風向方向の棟間アスペクト比は  $WH=1.34$  となる。前報<sup>2)</sup>の 2 次元街路の結果では、 $WH=1.0\sim 1.5$  で最も循環流が発達することが示されている。風向 180 度では棟間全体が風上側建物の wake 領域となり、一方風向 135 度では  $WH$  が 1.5 を超え、また建物の横幅が不足し循環流の形成に不利となる。以上のような理由で、その間の風向 157.5 度に極大値が現れたものと考えられる。

一方、実際に観測された物質伝達率の風向依存性は、風上面の場合と風下面の場合に二分する傾向となっており、図 16 の単棟の結果にほぼ近い。また図 18 では、測定位置は C-5 に最も近い位置であり、実測結果と概ね類似した傾向にあるといえるが、同一壁面内においても風向依存性に大きなバラツキがあるため、今回の風洞実験が実測結果を再現しているかは明確な結論を出すのが難しい。少なくとも、実測では風洞実験で見られたような風向 157.5 度での極大傾向は認められない。この理由としては、自然風の持つ風向変動が風洞実験では再現されていない点が大きいと考えられる。

## 7. 結語

本報では、前報に引き続き、濾紙面蒸発法による物質伝達率の風洞実験結果について報告した。

今回考察した 3 次元模型配列の結果は、前報で報告した 2 次元街路の結果とはいくつかの点で大きく異なることが明らかとなった。最も基本的な立方体規則配列の結果は、グロス建蔽率で整理すると、立方体以外の規則配列にも概ね適用可能であった。一方、街路幅が部分的に変化している不均一街区においても、局所的な物質伝達率分布は、立方体規則配列における同じ街路アスペクト比の値でほぼ説明できた。このように、街路に平行する風向に関しては、立方体規則配列の実験結果は、ある程度の汎用性をもつものと考えられる。

ケーススタディとして行った直方体均等街区の風向変化に関しては、街区全表面の平均物質伝達率の変化は 8%以内と小さかったが、局所的には全風向平均の物質伝達率に対して最大で 5 割程度の差異が存在していた。また、屋上面・壁面・街路面の物質伝達率の比率は、風向が変化しても大きくは変わらなかった。一方、密集街区において、オープンスペースの設置や一部の建物を高層化するなど、建物配列を不均一化することは、物質伝達率の局所分布に非常に大きな影響を与えていた。

実測対象建物の模型実験では、実測結果と概ね類似した風向依存

性が得られたが、同一壁面内の局所分布が非常に大きく、風洞実験と実測結果の対応関係を明確に評価するには至らなかった。風向依存性に関しては、自然風とは異なり風向変動を含まないことが風洞実験の評価において問題となることが指摘された。スケールモデル実験の妥当性については、自然風下での比較実験が望まれる。

## <謝辞>

本研究の一部は、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業の「都市生態圏—大気圏—水圏における水・エネルギー交換過程の解明」(代表者東京工業大学 神田 学)、文部省科学研究費補助金・基盤研究(C)(平成 15・16 年度、課題番号 15560516)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。また、九州大学・萩島理、防衛大学・菅原広史の両氏からは、論文内容に関して貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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对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—都市域における建物外表面对流熱伝達率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 527 号, 69-76, 2000.1
- 3) Ashie, Y., Ca, V. T. and Asaeda, T: Building canopy model for the analysis of urban climate, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **81**, pp.237-248, 1999
- 4) Masson, V: A Physically-based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models, *Boundary-Layer Meteorol.* **94**, 357-397, 2000
- 5) Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura: A Simple Single-layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-layer and Slab Models, *Boundary-Layer Meteorol.* **101**, 329-358, 2001
- 6) 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
- 7) Barlow, J.F., I. N. Harman, and S. E. Belcher: Scalar Fluxes from Urban Street Canyon. Part I: Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorol.* **113**, 369-385, 2004
- 8) Harman, I.N., J. F. Barlow, and S. E. Belcher: Scalar Fluxes from Urban Street Canyon. Part II: Model, *Boundary-Layer Meteorol.* **113**, 387-410, 2004
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) Kanda, M., T. Moriwaki, and F. Kasamatsu: Large Eddy Simulation of Turbulent Organized Structure within and above Explicitly Resolved Cube Arrays, *Boundary-Layer Meteorol.* **112**, 343-368, 2004
- 12) 成田健一・関根 毅・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