
都市域における各構成面別の交換係数の把握と 街区のモデル化に関する風洞実験

(課題番号：15560516)

平成15・16年度科学研究費補助金

基盤研究(C)(2)

研究成果報告書

平成17年6月

研究代表者 成田 健一

(日本工業大学工学部・教授)

研究目的と背景

①現在、ヒートアイランド対策を含めた環境共生都市の計画策定において、街区の幾何学形状や土地被覆分布を考慮した熱環境の解析が緊急の課題となっている。しかしながら、現在行われている都市気候に関する数値シミュレーションは、いわゆるメソスケールモデルと呼ばれるものがほとんどで、そこでは地表面の凹凸は地表面粗度と呼ばれるパラメータで表現され具体的な建物形状は再現されていない。一方、一般に「ビル風」とよばれる建物周辺の気流分布は、 $k-\epsilon$ モデルやLESなどの乱流モデルを用いて具体的な建物形状を考慮した詳細な解析がすでに可能となっている。しかし、このような建物スケールの詳細な検討を街区や都市スケールへ拡張するのは計算容量的に困難であり、現実には計画が策定される街区など中間スケールの解析には、建物に囲まれた**都市キャノピー層**と上空の都市境界層を連続させる何らかのモデル化が必要となっている。このような観点のモデル化として現在最も注目されているのは、Masson による **T E B** であるが、このモデルでは都市表面を構成する各面（床・壁・屋根）の交換係数の寄与率がパラメータとして必要となる。本研究では、この**構成面別の交換係数の寄与率**と建蔽率など街区の**幾何パラメータ**との関連を詳細に検討する。

また、現在、都市気候モデリングの分野では、複雑な市街地形状を建蔽率・容積率の**等価な立方体均等街区**に置き換えた検討が数多く行なわれている。しかしこのような置き換えが妥当かどうかの検証はまったくなされていない。本研究では、(1)**平面的な不均一性の効果**—密集街区と広幅員街路が混在した場合と等間隔配列の比較、(2)**高さの不均一性の効果**—高さの異なる建物が混在する場合と高さが均一な街区との比較、について検討する。

②これまで都市キャノピーのモデル化は、その多くが植物キャノピー層のモデルを流用する形で提案されてきた。しかしながら、可塑性を持たない建物による粗度は、本質的に植物体とは異なる。日射により構成面ごとに明確な表面温度の差異が生じるという温度分布の方向性を念頭に置くと、**方向性**を無視した鉛直一次元的な取り扱いには妥当性を欠くと言える。現在、このような**構成面別の交換係数**の検証手段としては、申請者らが独自に考案した**”ろ紙”面蒸発**を用いた方法が唯一のものと言っても過言ではなく、モデルに利用できるデータとしては、業績9) によるものしか存在しない。

③**T E B**に使用しうる**パラメータの同定**は、現在世界的に注目されているテーマである。一つのアプローチとして、実スケールでの検証を目的に、昨年からスイスのバーゼルにおいて実測プロジェクト(BUBBLE)が進行中である。しかしながら、非一様性・不確実性の強い現地での観測では限界がある。系統的な実験的研究としては、つい最近reading大学(UK)のJanetらが、ナフタリン昇華法を応用した風洞実験の結果を発表しているが、面ごとの交換係数の線形性を仮定しているなど算出方法に問題が多い内容となっている。本研究の手法は、これら既存の成果に比較してはるかに精度のよいものであり、都市気候のモデリングに大きく寄与するものと思われる。

研究組織

研究代表者：成田健一（日本工業大学工学部教授）

研究協力者：森岡 勲（日本工業大学大学院生）

鈴木直人（日本工業大学大学院生）

研究経費

平成 12 年度 2,500 千円

平成 13 年度 1,100 千円

合 計 3,600 千円

研究発表

（１）学会誌等

- 1) 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、vol.17, No.5、pp.536-554、2004.9
- 2) 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）—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）、日本建築学会環境系論文集、第 594 号、（印刷中）、2005.8
- 3) Aya Hagishima, Jun Tanimoto and Ken-ichi Narita : Intercomparisons of experimental research on convective heat transfer coefficients and mass transfer coefficients of urban surfaces. *Boundary Layer Meteorology* （印刷中）

（２）口頭発表

- 1) Ken-ichi NARITA : Wind Tunnel Experiment on Convective Transfer Coefficient in Urban Street Canyon.ICUC-5 (5th International Conference on Urban Climate) (Lodz, Poland) 2003.9
- 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、pp.843-844、2004.8
- 3) 鈴木直人・成田健一・森岡 勲：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、pp.845-846、2004.8
- 4) Ken-ichi NARITA : Effects of Building-height Heterogeneity on Area-averaged Transfer Velocity in the Street Surface- Wind Tunnel Experiments Using Salinity Change Technique. Fifth Symposium on the Urban Environment (Vancouver, BC, Canada)、2004.8
- 5) Aya Hagishima, Jun Tanimoto and Ken-ichi Narita : Comparisons of Various Experimental Results on the Convective Heat Transfer Coefficient of Urban Surfaces. Fifth Symposium on the Urban Environment (Vancouver, BC, Canada)、2004.8

第1章 序論

1.1 研究背景

ヒートアイランドのモデル化にあたっては、都市域における熱収支の全ての項を明らかにする必要がある、その熱の移動には放射・伝導・対流と3つの形態が存在する。これらのうち、放射と伝導に関する熱移動の物理モデルはほぼ確立されているのに対し、対流による熱の移動については未だ解明には至っていないのが現状である。

対流によって固体と液体との間における熱の移動のことを対流熱伝達、または単に熱伝達といい、対流による熱の移動のしやすさを表したものを熱伝達率という。この熱伝達率に関する研究は建築だけでなく機械の分野などでも研究が行われている。建築で熱伝達が問題になるのは主に建物から外気への熱移動である。特に夏季日中に強烈な日射によって暖められた躯体が空気中へ放つ熱量は相当な量になる。これが、熱帯夜の要因にもなっている。

この熱伝達率は対象となる固体表面近傍の風速と密接な関係があることがわかっている。伝達率には自然対流と強制対流の2通りのメカニズムがある。前者の自然対流による伝達とは、無風状態であっても高温の固体表面によってその周囲の空気が暖められ、浮力による上昇気流に伴って熱伝達が発生することである。高層化が進むほど夏季日中かつ弱風時における上昇気流の規模は大きくなり、大気加熱量としての影響は決して無視できる規模ではなくなる。一方、後者の強制対流による伝達とは、自然対流を除いた一般的な気流によって固体から流体への伝達のことを指している。この強制対流による伝達は自然対流による伝達とは大きく異なり、建物外表面の気流性状を詳細に解明するとともにそれらの熱伝達への影響を検討することが必要である。

1.2 従来の研究と本研究の位置づけ

ヒートアイランドの直接的要因であり、大気を加熱している顕熱の算定式は非常にシンプルである。端的に言えば外気温と建物の表面温度の差に対流熱伝達率を乗じることにより求めることができる。

近年のリモートセンシング(遠隔探査)技術では、従来の直下観測に加え、サイドスキャン航空機を用いることにより建物の鉛直壁面の温度分布を把握することも可能である。このことにより、水平面はもちろん、鉛直面も含めた広域的な都市の表面温度分布の把握が可能になった。この技術を用いて、気温と建物表面温度の差によって表現した熱的ポテンシャルの指数(ヒートアイランドポテンシャル)と、容積率や建物構造種別などの都市構造との関連も研究されている。つまり、大気加熱量である顕熱を求めるにあたり、広域的な都市の気温、鉛直壁面も含めた表面温度の測定に関しては、リモートセンシングなど現行の技術を用いることにより可能になっている。ここで課題となっているのは対流熱伝達率である。

強制対流時の熱伝達率に関しては一般にユルゲスの式がある。これは一辺 50cm の銅版を垂直におき、50℃に暖めた表面に 20℃の空気を板面に平行に流した時の熱伝達率をまとめたものである。しかしながら、建物外表面近傍付近はその上空を吹く一般風とは異なり、建物形状、周辺状況、壁面状態(風向との関係、表面の凹凸、外表面上の部位)などによって支配され、きわめて複雑な形状となる。したがって、単純に風洞内の平板に沿った気流によって導き出した式によって関連づけられるものではなく建物外表面の気流性状を詳細に解明するとともにそれらの熱伝達への影響を検討することが必要となってくる。

熱伝達率の算出式は、伝導や放射の式に比べると非常に単純ではあるが、いわば、建物形状、周辺状況、壁面状態など未だ解明されていない様々な要素による影響を、伝達率という係数に全て詰め込んでいる係数とも言える。

建物の周辺気流を容易に把握するツールの一つとして、コンピュータを用いた数値計算による流体解析が挙げられる。近年のシミュレーション技術の発達に伴い、マクロな流れ場としてはある程度の精度の解析が行えるようになったが、壁面最近傍や床面最近傍などミクロな部分における精度は未だ改良の余地があるといえる。建物と周辺気流との関係についてはある程度の予測ができるようになったが、シミュレーションによって建物表面における熱伝達のふるまいを解明するまでには至っていない。よって、伝達率を定量的に把握するためには実験による検討が不可欠である。

熱を直接測定する熱伝達率の算定では、対象とする建物と周囲の流体との間に十分な温度差を設けることが、実験の精度を上げるには必要である。しかし、温度制御の応答性という面だけをみても容易ではない。また、測定対象としている「伝達」以外にも、「伝導・放射」の全ての熱流束を把握、計測しなくてはならず、各項における誤差の集積により精度よい実測を行うことは非常に難しい。さらに、熱を扱った実験では、スケール効果による影響も無視できないので、実大スケールによる測定と異なり、測定ケースが限られてしまう。

熱を扱った実験では、以上のような多くの問題が存在する。そこで、近年、熱伝達と物質伝達のアナロジー（類似）を利用した、風洞実験が試みられている。本来であれば実現象の把握という観点からは実測が望ましいが、先に述べたように、熱移動の全ての把握は難しい上に、測定ケースに限りがある。よって、測定ケースを系統的に変えて測定が行える風洞実験がよく用いられている。

風洞を使用した縮尺模型実験の一つとして、ナフタレンの昇華法を用いた研究が行われており、伝達率の逆数である抵抗係数として表現し、その抵抗の合算で都市キャノピー層と上空との抵抗係数を表す試みがなされている。この研究では、同一面内からの伝達率は一律という仮定のもとに報告がなされている。しかし、次に示す水分蒸発量測定法によって、都市キャニオン内においても伝達率の分布が発生することが明らかにされている。また、ナフタレンは防虫剤にも使用される有毒性の物質であるため、扱いと管理が非常に難しいのが難点とされている。

ナフタレン昇華法以外には、水分蒸発量の差異から対流伝達率を求め、熱伝達率とのアナロジーを利用したものがある。この手法は、単に蒸発した物理量である水分を測定するだけである。熱の放射・伝導・対流といったように、移動形態が複数存在せず、重量が減った分に関しては全て、対流によって表面からの蒸発した水分量となる。本論文ではこの水分蒸発量秤量法により対流伝達率を求めている。なお、この伝達率は風速との密接な関係が認められていることから、伝達率の大小を風通しの良し悪しとして評価を行っている。

この水分蒸発量秤量法を用いた対流伝達率の測定は、2次元配列に関しては街路空間の縦横比を変え、構成面別の面平均と面を分割した面内分布の把握がすでに行われている。その結果、建物キャニオン内の同一壁面においても伝達率の分布が現れることが明らかとなっている。3次元配置に関しては、構成面別の全面測定の結果が報告されている。しかし、面別の面内分割による詳細な伝達率分布は未解明のままとなっている。

前述の通り、建物形状は、建物配置と同様に周辺気流を決定付ける上で非常に重要である。しかしながら、今日まで行われてきた市街地模型における測定において、建物を構成する形状については、直方体もしくは立方体のみでの検討が常であった。実際の街並みは縦横のラインで成り立つ直方体の集団ではなく、屋根を有する複雑な形状となっている。壁面近傍の気流性状により大きく影響を受ける伝達率は、斜面という要素が入ることにより、そのふるまいを大きくかえることが予想される。そこで、本研究では系統的な把握をおこなうため2次元配列における屋根勾配の差異による面内伝達率分布の測定を行った。

一方、以上のような均等配列による結果が現実の複雑な市街地の状況をどれほど再現しているかは不明である。そこで、1/750に縮小した精巧な実在市街地模型を用いて街路を対象に測定を行った。

参考文献

- 1) 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，日本建築学会計画系論文報告集，第361号，pp.10-20，1986.3
- 2) 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，pp.1-11，1986.8
- 3) 成田健一・野々村善民・小笠 顕：自然風下における窓面对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報告集，第491号，49-56，1997.1
- 4) 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報告集，第527号，69-76，2000.1
- 5) Barlow, J.F. and S. E. Belcher: 2002, 'A Wind Tunnel Model for Quantifying Fluxes in the Urban Boundary Layer', *Boundary-Layer Meteorol.* **104**, 131-150
- 6) Barlow, J.F., I. N. Harman, and S. E. Belcher: 2004, 'Scalar Fluxes from Urban Street Canyon. Part I: Laboratory simulation', *Boundary-Layer Meteorol.* **113**, 369-385
- 7) Goldstein, R. J. and H. H. Cho: 1995, 'A Review of Mass transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation' *Exp. Therm. Fluid Sci.* **10**, 416-434.
- 8) Harman, I.N., J. F. Barlow, and S. E. Belcher: 2004, 'Scalar Fluxes from Urban Street Canyon. Part II: Model', *Boundary-Layer Meteorol.* **113**, 387-410.
- 9) Kanda, M.: 2004, 'Progress in the Scale Modeling of Urban Climate: Review', *Theor. Appl. Climatol.* (in press)
- 10) Kanda, M., T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita, and A. Hagishima: 'Simple Energy Balance Model for Regular Building Arrays', *Boundary-Layer Meteorol.* (accepted)
- 11) Masson, V.: 2000, 'A Physically-based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models', *Boundary-Layer Meteorol.* **94**, 357-397.

第2章 実験内容

2.1 実験用風洞

本研究は株式会社飛島建設技術研究所所属の大型風洞を使用した。この風洞は密閉回流型境界層風洞である（図 2.1）。風洞の仕様を表 2.1、風洞ファンの写真を写真 2.1 に示す。風路の全長はおよそ 90m あり、測定洞の風上から 17.8m の位置には直径 2m のターンテーブルを備えている。このターンテーブルは電動式でトラバース操作により対象物の角度の微調整が容易に可能である。風洞内の基準となる風速は、ターンテーブル中央位置から風上へ 2100mm、床 上 1400mm の位置に固定設置されたピトー管（写真 2.2）による風速の値をモニタリングできるようになっており、全実験共通で風速は 3m/s に固定した。

詳細な実験内容に関しては各章ごとの冒頭に述べるが、以降の実験はすべて共通の風洞施設を使用している。

表 2.1 風洞の仕様

風洞仕様	
風路全長	90m
測定部風洞断面	2.6m × 2.0m
測定部風洞長さ	17.8m
ターンテーブル直径	2m
送風機	直径3m、出力110kw
最大風速	30m/s

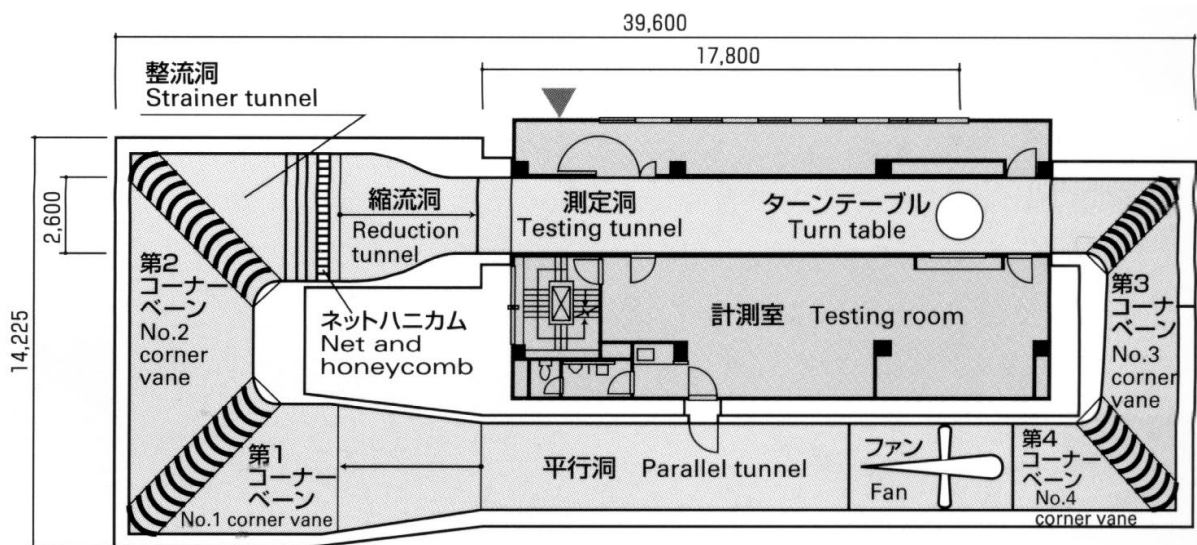


図 2.1 風洞平面図



写真 2.1 風洞ファン

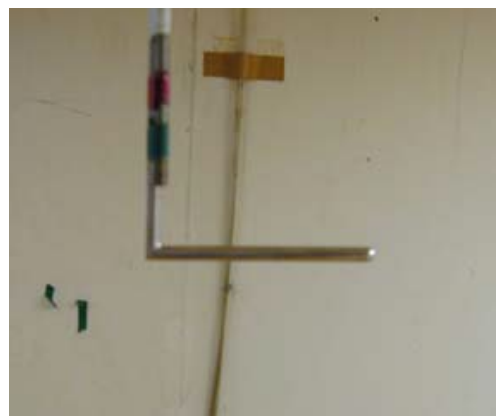


写真 2.2 ピトー管

2.2 測定条件

2.2.1 ラフネス配置

測定洞の風上端に、スパイヤーを等間隔に4本設置し、測定洞内には大きさの違う3種類の木製ラフネスを配置して乱流境界層を発達させた。配置間隔は100mmのラフネスを800mm間隔で6.5m、50mmのラフネスを300mm間隔で4.2m、25mmのラフネスを200mm間隔で2.2m配置し、それぞれを千鳥配置とした(写真2.3)。

2.2.2 プロファイル測定

プロファイル(鉛直速度成分)を測定する測定点を決定する際、ラフネス配置が3次元配置であるため図2.2のようにa、b、cの3点を測定し、その平均値をとっている。

風速の測定には定温度型熱線風速計(写真

2.4 DANTEC DYNAMICS 社製 $5\mu\text{m}$ のタングステンワイヤー製)

を使用した。サンプリング周波数は100Hzで収録した。なお、熱線風速計に必要なキャリブレーション用の基準風速は風洞内に固定設置されているピトー管の値とした。



写真2.3 ラフネス配置状況

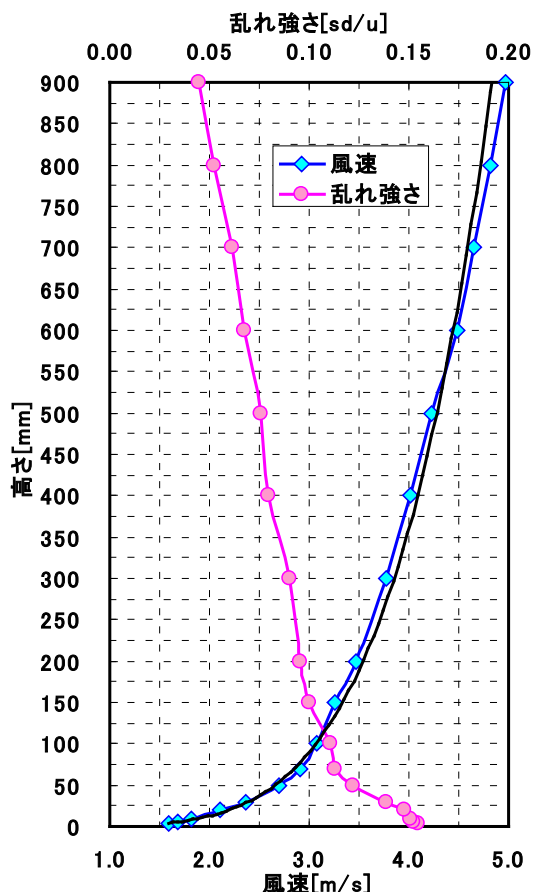


図2.3 鉛直プロファイルと乱れ強さ

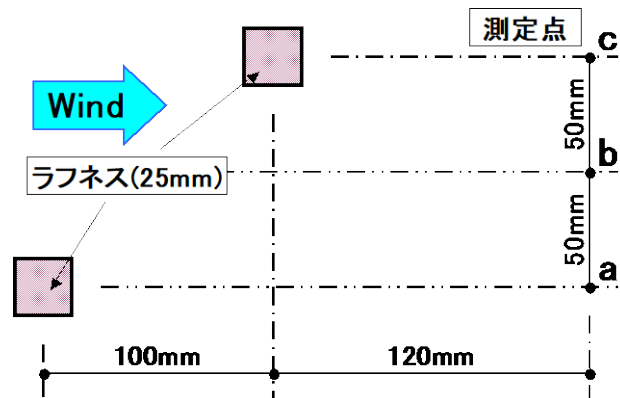


図2.2 プロファイル測定点

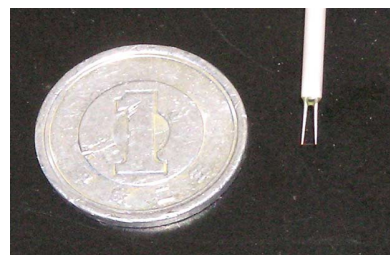


写真2.4 熱線風速計センサ

図 2.3 に鉛直風速プロファイル分布とその乱れ強さを測定高さとの関係で表した。ベキ指数 $\alpha=0.22$ となり、これまで数多くの自然風の観測結果からまとめられた資料を参考にすると高層建築物の少ない市街地、もしくは住宅地に相当するプロファイルとなった（図 2.4、表 2.2）。乱れ強さは測定面最上端高さとなる床上 50mm までの高さ平均でおよそ 15%であった。

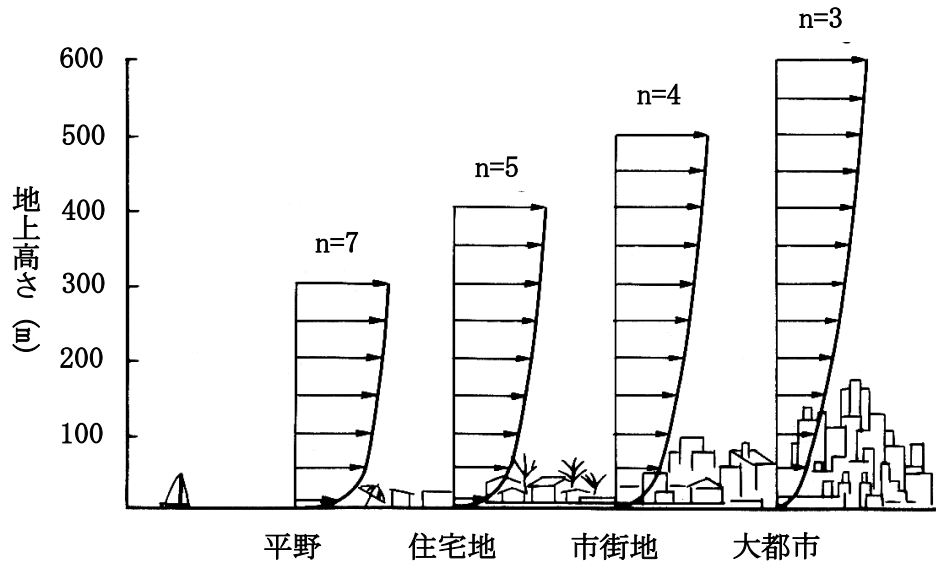


図 2.4 風の高さと地上の様子

表 2.2 地表面の状態とベキ指数 α (n)

地表面の状態	平野、草原	森林、高い建物のない市街地、住宅地	大都市の郊外周辺、市街地	大都市の中心付近
n	7	5	4	3
α	0.143	0.200	0.250	0.333

2.3 対流伝達率の算出方法

2.3.1 対流伝達率について

1 章にて述べたように、伝達率の求め方には幾通りかの測定方法がある。その中で本論文では濾紙表面からの水分蒸発量を直接測定する濾紙面水分蒸発量秤量法を用いることとした。この「秤量法」の特徴としては熱フラックスの測定のように、伝導・放射・対流といった把握すべき項目が少なく、蒸発フラックスを直接測ることができるので容易に高精度の測定が可能であるということである。ただし、本実験の方法では対流伝達率に誤差が生じるいくつかの要因が考えられる。まず、秤量法に限ったことではないが、風洞を使うことによる影響である。そもそも自然風というのは上空数百メートルの規模で上下での空気の入れ替えがあるのと同時に、風向も常時大きく変動しており、自

然の風と風洞によって作られた風とは根本的に気流の乱れの規模が違う。一定の風向で固定された風洞実験では、場合によっては自然風に比べて伝達率が大きく出る可能性がある。また、濡れた試料を風洞内に置くことによって、いわば砂漠のオアシスのような環境をつくることとなり、これによっても対流伝達率が大きく出ることがわかっている。本来であれば、測定対象となる面よりも風上側は可能な限り湿れた面を増やし、測定対象面に流入する風はある程度の湿気を含んでおくことが望ましい。しかし、実際には測定洞となる床面を全て濡らすことは現場の状況からみても現実的に難しい。そこで、今回は、伝達率の考察を絶対量ではなく、風上に固定設置した風上基準に対する相対値として比較することとした。この基準化操作により、これらの誤差要因はおおむねキャンセルされると考えられる。風上規準についての詳細は後に述べる。ただし、第3章の実験においては、対象となる測定面の対面となる面を濡らし、湿潤面積を増やした場合の測定についても一部検討を行っている。

2.3.2 対流伝達率の算出

測定の基本原理は、水を含ませた濾紙の暴露前後の重量差を測定するという、いたって単純な測定である。対流伝達率の算出式は、単位時間・面積当たりの水分蒸発量から蒸発速度を求め、蒸発面表面の飽和蒸気圧と空気の蒸気圧との差で除することにより求めることができる。

$$E = \frac{\Delta w}{A \cdot H} \quad (2.1)$$

ただし、
 E : 蒸発速度 $[\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}]$ Δw : 水分蒸発量 $[\text{g}]$
 A : ろ紙表面積 $[\text{m}^2]$ H : 測定時間 $[\text{h}]$

$$k = \frac{E}{e_s - e_a} \quad (2.2)$$

ただし、
 k : 物質伝達率 $[\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hPa}]$
 e_s : 蒸発面の飽和蒸気圧 $[\text{hPa}]$ e_a : 空気蒸気圧 $[\text{hPa}]$

2.3.3 試料の作成

試料の作成には1mm厚の亚克力板に1mm厚の濾紙を張り合わせて作成した。試料は各実験に必要な大きさや形状に亚克力板及び濾紙をカットし貼り合わせている。ろ紙の表面積は対流伝達率を算出する上でも非常に重要な値となるので、細心の注意を払って裁断を行った。作成した試料には表面温度の測定用に濾紙の表面直下に直径1mmのサーミスタ温度計を挿入した。尚、暴露する試料の蒸発面は表面からのみとなるよう、側面部分はシーリング剤でコーティングを施し、側面からの水分蒸発を断った。例えば50mm×50mmの試料で測定する場合、側面を処理していないとろ紙の厚みが1mmなので表面と合わせて27 cm²となり、およそ一割にも及ぶ誤差要因となってしまうためである。

2.3.4 風上基準

今回使用した風洞は温度制御が不可能である。本研究では、同じ風速で実験を行ったとしても異なる温湿度環境下で得られたデータ同士の比較には何の意味も持たない。そこで、どのような環境においても移動しない基準を一点設け、風上基準と測定点の比として比較検討を行う。以降この風上基準の伝達率を k_s 、測定点の伝達率を k 、測定点・風上基準点の伝達率比を k/k_s とする。本論文中、実際に比較・考察に用いるのはこの k/k_s の値である。この風上基準はターンテーブル中心から風上へ 1700mm の位置に毎回セットしている。試料の寸法は 50mm×50mm×50mm のアクリル製の立方体で試料面はそのうちの屋根面である (写真 2.5)。図 2.5 に風上基準設置および風洞内測定装置の配置の様子を断面図にて示す。

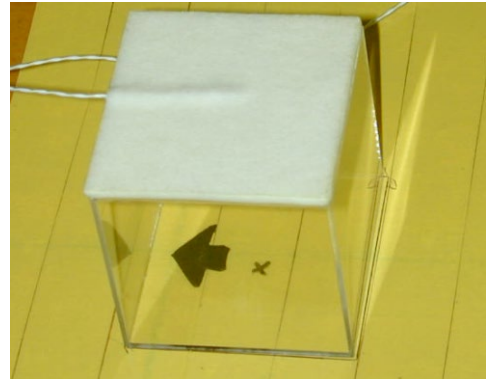


写真 2.5 風上基準

なお、本論文中では、熱伝達率を扱っておらず、基本的には伝達率とは対流による物質伝達率のことを指す。よって、本論文中に使用している伝達率とは、特に補足がない限り、風上基準によって除された対流物質伝達率比のことを指している。

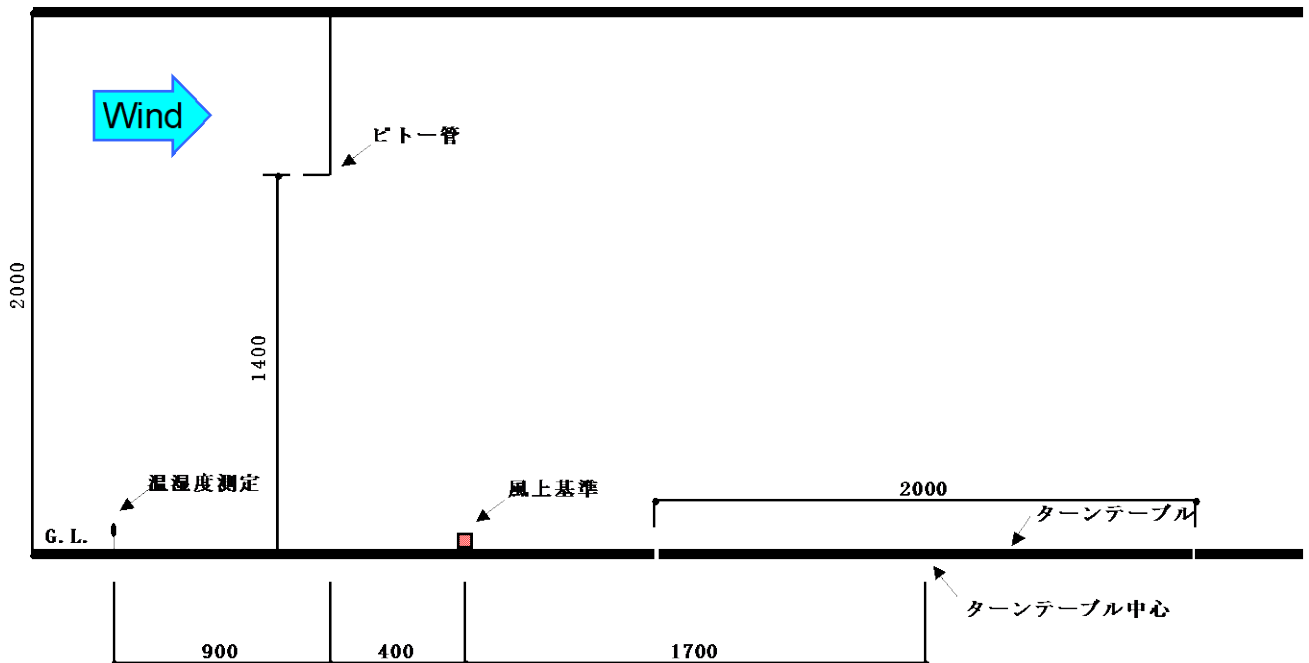


図 2.5 風上基準・風洞内各種センサ設置概要

2.3.5 測定スケジュール

測定のスケジュールを表2.3に示す。具体的な測定としては、風洞内の気温と近い状態に保管してある水を用いて試料を湿らせる。次に、試料面が濡れすぎて水滴が垂れない程度に水分を軽く拭き、側面及び裏面に付いた水滴も注意深く拭く。これは、測定面とした表面以外からの水分は全て測定誤差となるからである。湿らした試料を風洞内にて3分間の養生を行い、その後密閉容器に入れ暴露前の試料重量を秤量する。秤量中の水分の蒸発を防ぐためである。秤量後は、濾紙面に触れないよう注意を払い、試料を所定の位置に設置し、空になった容器を再度秤量した。これは、濾紙表面の水滴が秤量中や運搬中に密閉容器内に付着してしまった場合、その分も測定して誤差を少なくするためである。そして、測定開始から30分後に回収をし、再び秤量を行って暴露前の試料の重さとの差から蒸発量を求めた。風上基準と測定点に関してはおよそ4分のタイムラグがある。秤量は電子天秤(エーアンドディ製 0.1mg 精度)による測定を行い、温湿度は電子温湿度計(神栄製 温度：サーミスタ 湿度：高分子湿度センサ)をターンテーブル中央から風上3000mm、床上80mmの位置に固定して測定した。

ろ紙表面温度は直径1mmのサーミスタ温度センサを濾紙の表面直下に挿入し、表面温度とした。気温・湿度・表面温度のサンプリングは1secで収録した。風速は風洞内に設置されたピトー管の値で3m/sに設定し測定を行った。

表2.3 測定スケジュール

時間	風上基準	測定点
0分	養生開始	
1分		
2分		
3分	試料回収	
4分		養生開始
5分	秤量・測定開始	
6分		
7分		試料回収
8分		
9分		秤量・測定開始
...	30分	30分
...		
...		
35分	測定終了・秤量	
36分		
37分		
38分		
39分		測定終了・秤量

2.4 2次元配列と3次元配置

模型を横一列に並べ、模型高さと風向に平行側の距離を変化させた場合のパターンを2次元配列とし(図2.5)、2次元配列に加え、風向に並行に街路を設けた場合を3次元配置と表現している(図2.6)。

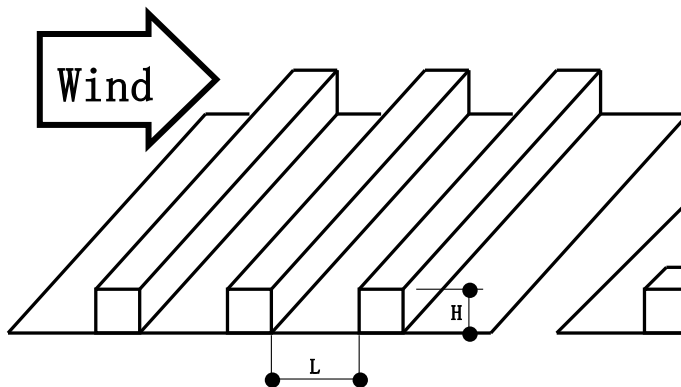


図2.5 2次元配列

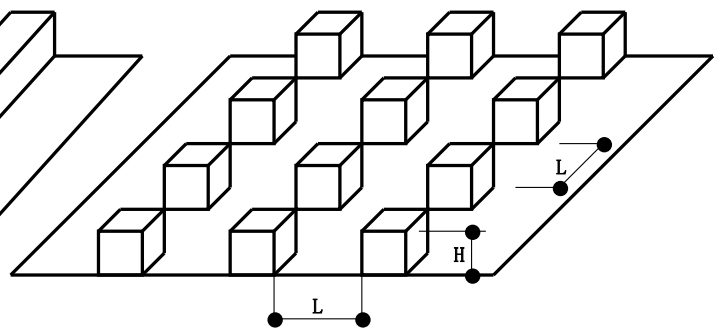


図2.6 3次元配置

第3章 立方体模型群における対流伝達率分布

3.1 実験目的

既報、成田ほか(2000)にて報告されている実験は、3次元配置によるキャニオン内の伝達率を求めた実験であるが、鉛直壁面を全面湿潤による面内平均値として評価したものであった。また、同報で示されている2次元配列による局所分割測定の結果からは、伝達率は同一壁面内においても風向や建物配置など壁面の近傍風速の性質によって同一面内に分布が生じることが確認されている。そこで、本章では面内分割による伝達率分布の測定を3次元配置にて行い、模型高さと同模型間隔の比 L/H を系統的に変化させた3次元配置による伝達率への影響を把握する。同時に風向の変化による伝達率への影響と、測定対象となる面の対面にあたる部分を湿らせた対面湿潤の場合の伝達率への影響の把握を試みた。

3.2 実験内容

3.2.1 実験内容

本実験に使用した風洞及び風速プロファイル・伝達率の算出方法など、本実験に必要な基本的な事項に関しては既に2章で述べている。ここでは本章のみに関係する実験内容のみについて述べることにする。

3.2.2 測定用模型

本実験にて配置した基本模型は50mm角の木製立方体模型を使用した。ターンテーブルの上に1mm厚の亚克力板を敷き、その上に模型を3次元配置した。測定対象となる模型は1mm厚の亚克力板にて作成している中空構造である。50mm×48mm×50mmの立方体に1mm厚の亚克力板と1mm厚のろ紙を接着した計2mm厚の試料を張り合わせて基本模型と同サイズの50mm角の立方体を作成している。全面測定用(図3.1)と分割測定用(図3.2)の2種類用意し、分割測定用試料に関しては測定高さごとに試料を用意し、ろ紙以外の面は亚克力板となっている。

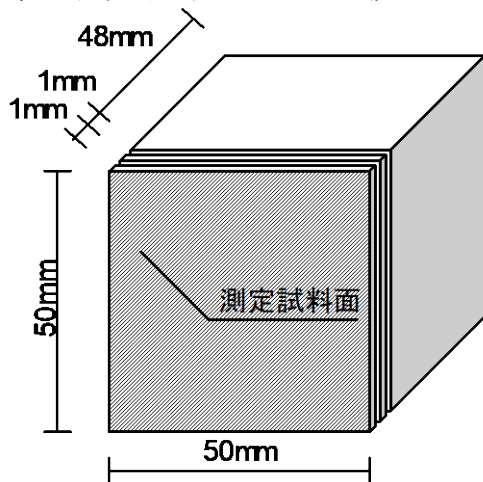


図 3.1 全面測定用試料

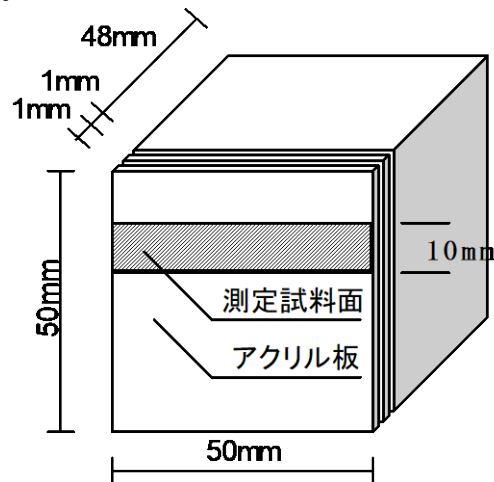


図 3.2 分割測定用試料

3.2.3 測定対象面

本実験の測定は風上面、風下面、側面の3面について行い、以降、それぞれの面をF面、B面、S面と呼ぶ(図3.3)。

さらに、全面測定を行った面をfwと添字を加え、Ffw、Bfw、Sfwと表現する。また、対象となる湿潤面の対面となる面を濡らした対面湿潤による測定も行った。対面湿潤にはwwの添字を加え、Fww、Bww、Swwと測定パターンとの区別を図っている。

分割測定においては、測定点の試料面積が $1\text{cm} \times 5\text{cm}$ となるよう、模型高さを5分割した。これらの測定点を区別するために各面の一番高い上端の点をNo. 1として、床面に近い下端をNo. 5と順番に名前を付けた(図3.4)。一例を挙げると、図3.4中の網目となっている部分は風下面(B面)の分割測定において上端から二番目であるので、B-2と呼ぶこととする。

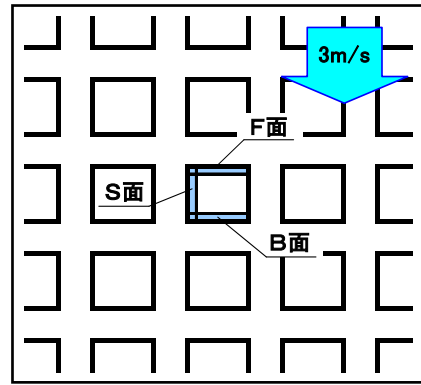


図3.3 測定面の呼称

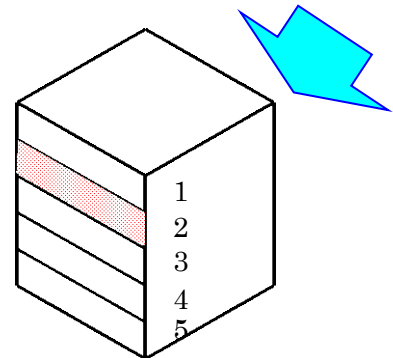


図3.4 分割測定点の呼称

3.2.4 測定点と模型配置間隔及び風向

街路空間縦横比 L/H を $1/5$ 、 $1/2$ 、 $7/10$ 、 1 、 $3/2$ 、 2 倍と6種類に変化させて測定を行った。測定点は、風上基準から風下側へ 1.7m の位置にあるターンテーブルの中央を測定点として固定した。風向変化の際にターンテーブルを回転させたとしても測定点の位置がズレたり、風上基準との距離が変化しないよう配慮した(図3.5)。模型の配置は床に敷いた $1820\text{mm} \times 1820\text{mm}$ の亚克力板からはみ出る手前まで測定点を基準に並べた。

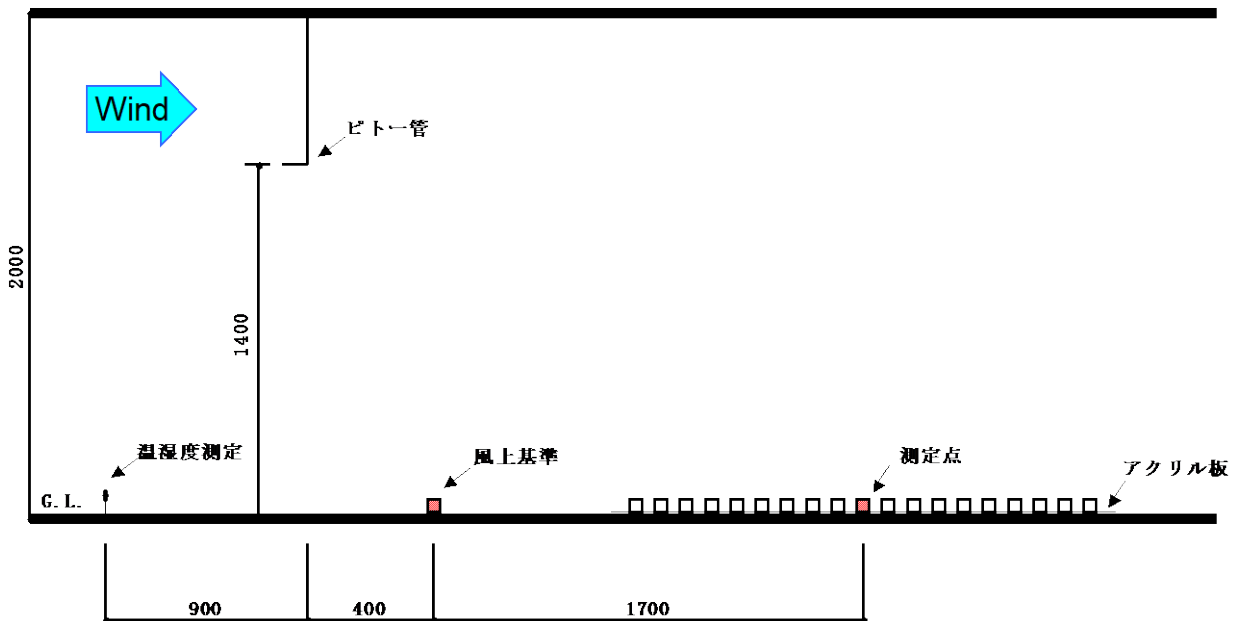


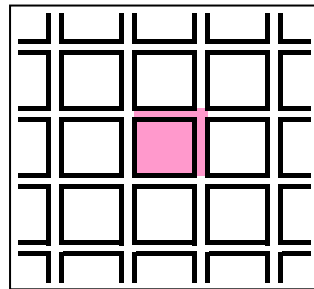
図3.5 測定の概要断面図

また、測定風向は0度を起点に15度、30度、45度、の4風向について測定を行った。
 詳細な測定ケースについては表3.1に、模型間隔ごとのグロス建ぺい率を平面図にて表
 したものを図3.6～図3.11にそれぞれ示す。また、写真3.1はL/H=7/10時の実際に
 模型配置をした時の様子である。写真内右上が風上となり、配置模型の中心にある空白
 部に測定用の試料が入ることになる。

伝達率分布の分割測定は風向0度の全ての模型間隔についてとL/H=1となる模型
 間隔50mm時の全風向について測定を行った。その他のケースについては、F面、B面、
 S面の全面測定とした。なお、45度のB面とS面はB面として共通として扱っている。

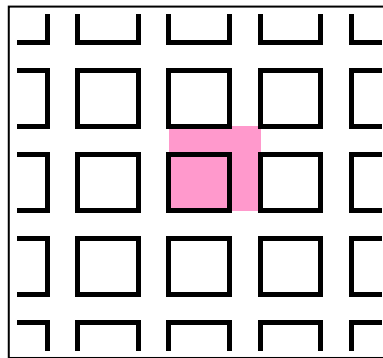
表3.1 測定ケース表

幅/高さ 1/5 模型間幅 10 mm 建蔽率 69.4 %	幅/高さ 1/2 模型間幅 25 mm 建蔽率 44.4 %	幅/高さ 7/10 模型間幅 35 mm 建蔽率 34.6 %
風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 29 ケース	風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 29 ケース	風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 29 ケース
幅/高さ 1 模型間幅 50 mm 建蔽率 25.0 %	幅/高さ 1.5 模型間幅 75 mm 建蔽率 16.0 %	幅/高さ 2 模型間幅 100 mm 建蔽率 11.1 %
風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB高度別 2面 × 5高度 = 10 ケース FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 69 ケース	風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 29 ケース	風向0度 FBS高度別 3面 × 5高度 = 15 ケース FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース FBS対面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向15度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向30度 FBS全面湿 3面 × 1面 = 3 ケース 風向45度 FB全面湿 2面 × 1面 = 2 ケース 小計 29 ケース
総計 214		



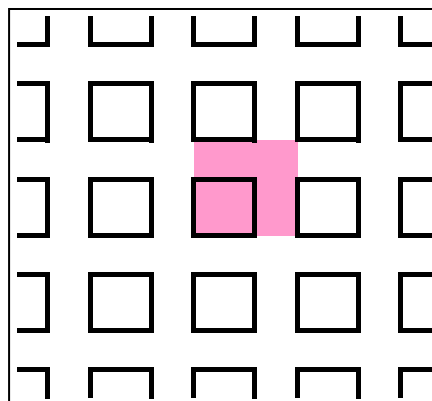
$L / H = 1 / 5$
模型間隔 = 10mm

図 3.6 グロス建ぺい率 69.4% 平面図



$L / H = 1 / 2$
模型間隔 = 25mm

図 3.7 グロス建ぺい率 44.4% 平面図



$L / H = 7 / 10$
模型間隔 = 35mm

図 3.8 グロス建ぺい率 34.6% 平面図

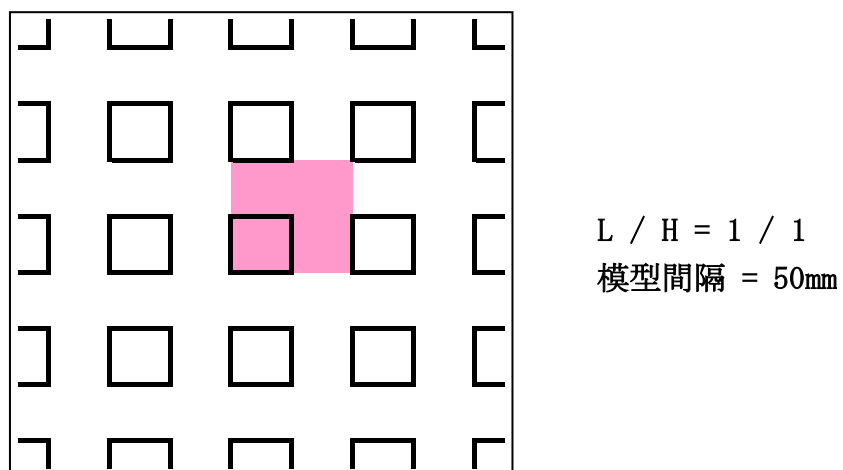


図 3.9 グロス建ぺい率 25.0% 平面図

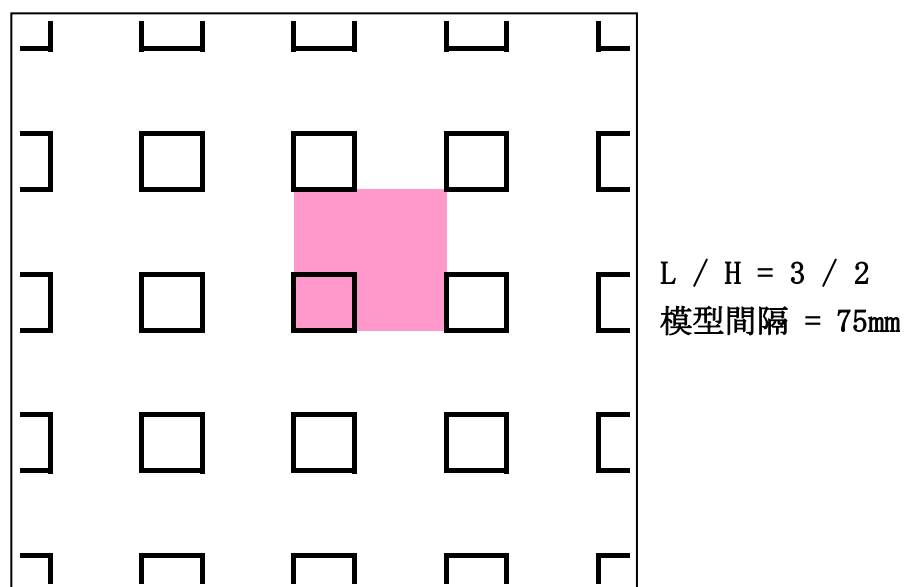


図 3.10 グロス建ぺい率 16.0% 平面図

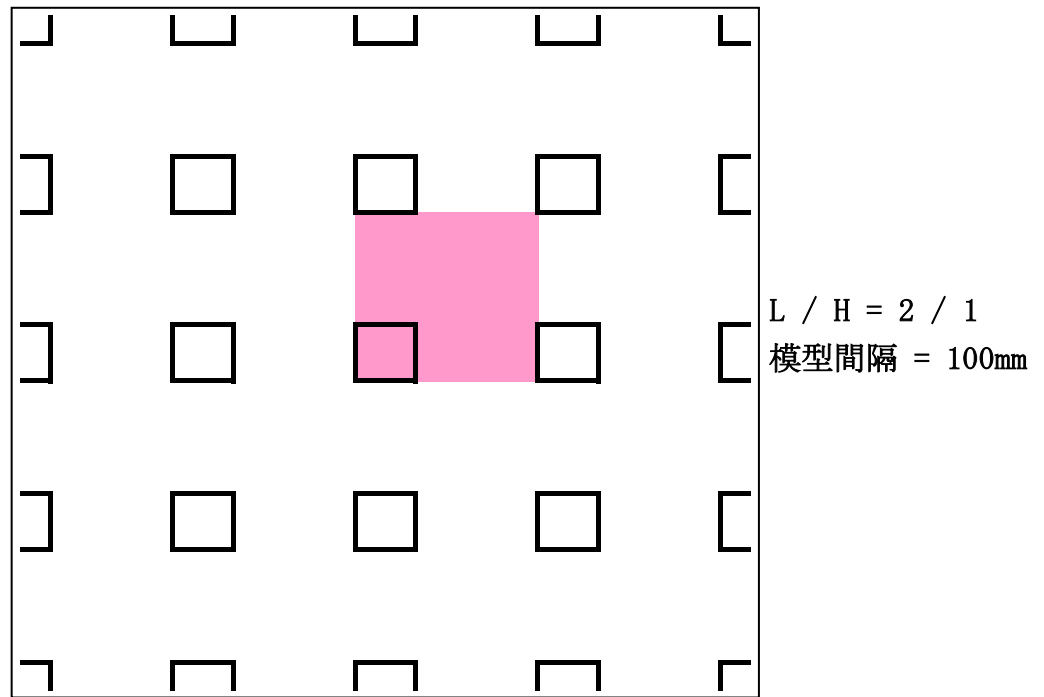


図 3.11 グロス建ぺい率 11.1% 平面図

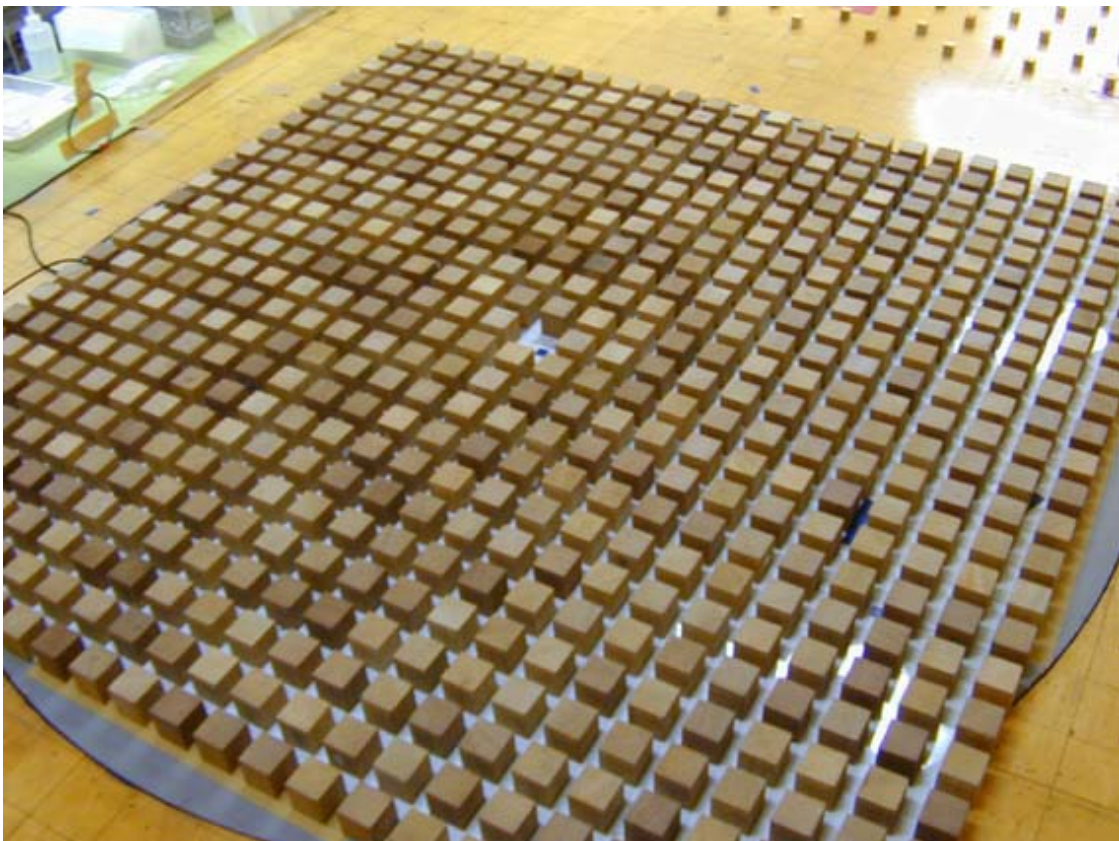


写真 3.1 $L/H=7/10$ の配置の様子

3.3 模型間隔の違いによる対流伝達率への影響

3.3.1 分割測定による面内分布の把握

図 3.12～3.17 に分割測定により求めた各面の伝達率分布を示す。街路縦横比 1/5 では風上面上端部となる F-1 の値が最も高くなっているが、全体的として伝達率は低くなっている。街路縦横比が 1/2 に広がると、伝達率は全点において増大しているのがわかる。また、B 面内の位置による差が若干小さくなっている。街路縦横比が 7/10 となると、B 面と S 面の面内分布がさらに均一化している。以降、街路縦横比が 1、1.5、2 と広げた場合については、あまり変化はみられない。

図 3.18～3.20 に分割測定により求めた伝達率分布を模型間隔順および構成面別に表す。F 面・B 面・S 面の全てにおいて、 $L=10\text{mm}$ （グロス建ぺい率 69.4%）から $L=35\text{mm}$ （グロス建ぺい率 34.6%）までは急激な増加傾向にあるのがわかる。F 面においては約 2 倍に増えており、特に F-1 にその傾向が表れている。B 面・S 面の $L=35\text{mm}$ までに関しては F 面までとはいかないながらも増加傾向にある。 $L=35\text{mm}$ を越え、 $L=50\text{mm}$ 以上になると、F 面・B 面については今回の測定幅の最大である $L=100\text{mm}$ まで均衡状態が続き、ほぼ変化していない。しかし、S 面においては $L=50\text{mm}$ 以降も増加していることがわかる。S 面において伝達率が常に大きくなる傾向にあったのは、F 面や B 面と違って、主風向と平行な面であるため、 L の増大が風通しの増大につながり、伝達率が大きくなったものと考えられる。

図 3.21、図 3.22、図 3.23 は $L/H=1$ を基準に伝達率比をとったものである。

この図からは、B 面の模型間隔比 2.0 ($L=100\text{mm}$) にて若干の上昇がみられるが、F 面および B 面ではおおむね $L/H=1$ を境に伝達率はほとんど増加しておらず、 $L=50\text{mm}$ 以降の伝達率の変化が少なくなっていることが改めてみてとれる。

一方、S 面においては F 面や B 面などと比べると模型間隔による伝達率への影響は相対的に少ない。 L の値が小さい時は、模型間隔が狭くなるため、風速の減少から伝達率の減少に繋がっているが、F 面や B 面と比べても S 面の変化量は少ない。また、 $L=50\text{mm}$ 以降も伝達率は増加しており F 面や B 面とは異なるふるまいをみせた。これは、風向に垂直となる面は比較的影響が出やすいことを示し、風向と平行に流れる側面を流れる気流に関しては模型の間隔による影響を受けにくいということを示していると考えられる。今回の測定は $L=100\text{mm}$ までを測定対象としていたため、 $L=100\text{mm}$ 以降についてはそのふるまいを捉えることはできなかった。

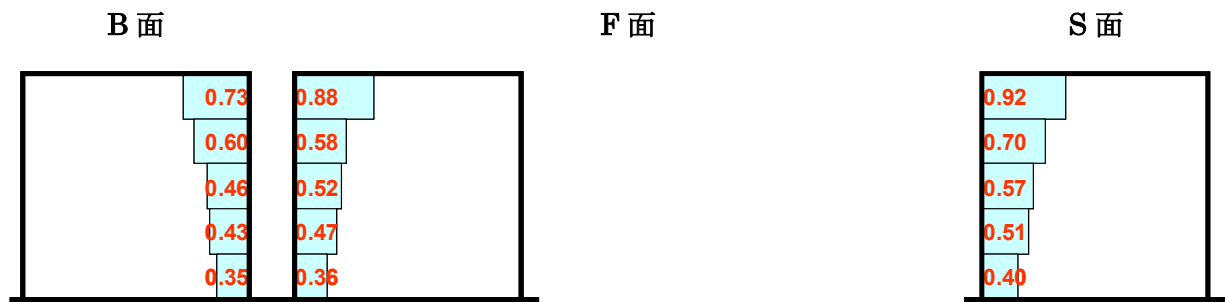


図 3.12 街路縦横比 1/5 壁面伝達率分布

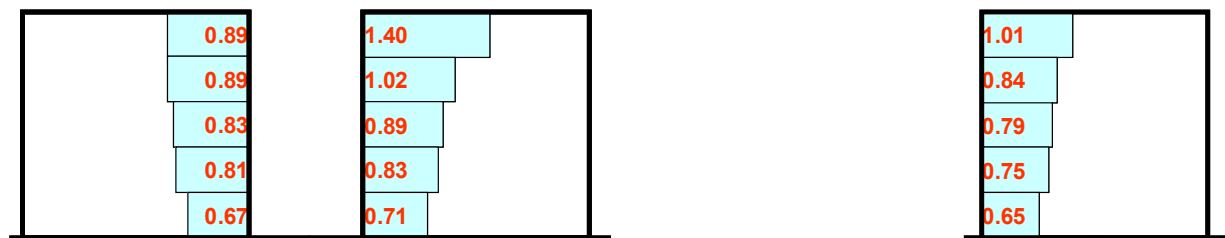


図 3.13 街路縦横比 1/2 壁面伝達率分布

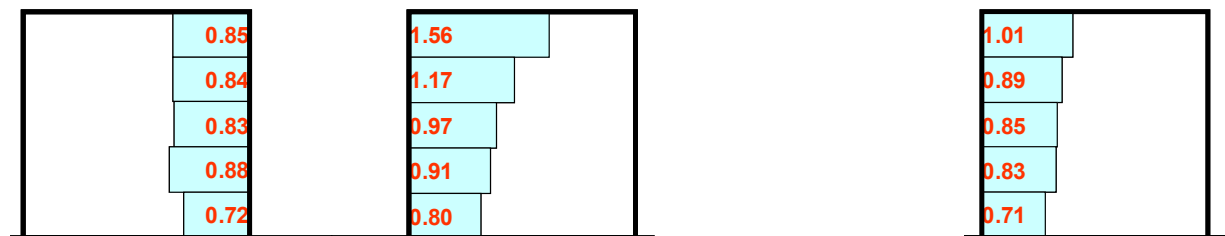


図 3.14 街路縦横比 7/10 壁面伝達率分布

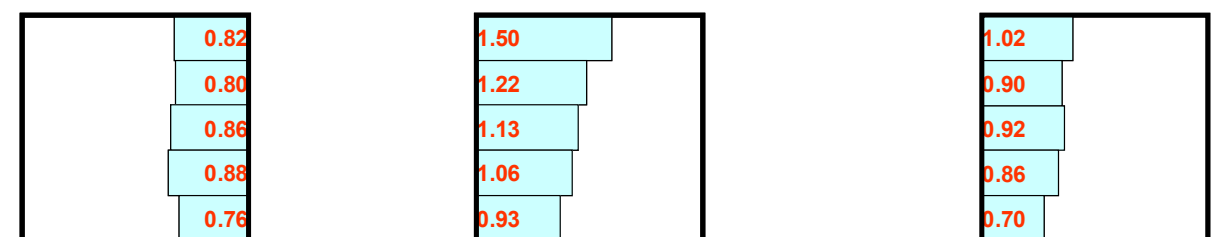


図 3.15 街路縦横比 1 壁面伝達率分布



図 3.16 街路縦横比 1.5 壁面伝達率分布

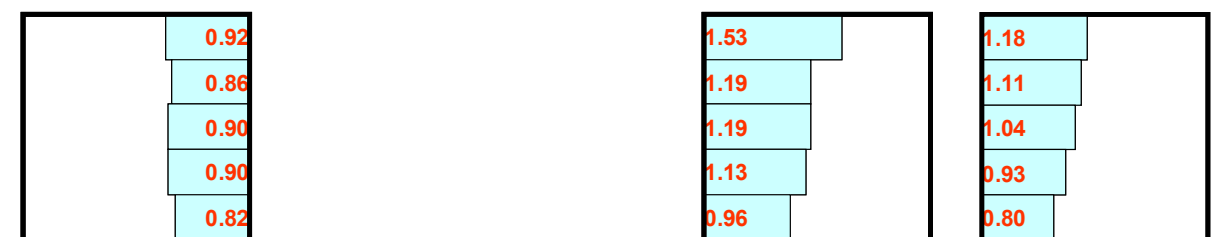


図 3.17 街路縦横比 2 壁面伝達率分布

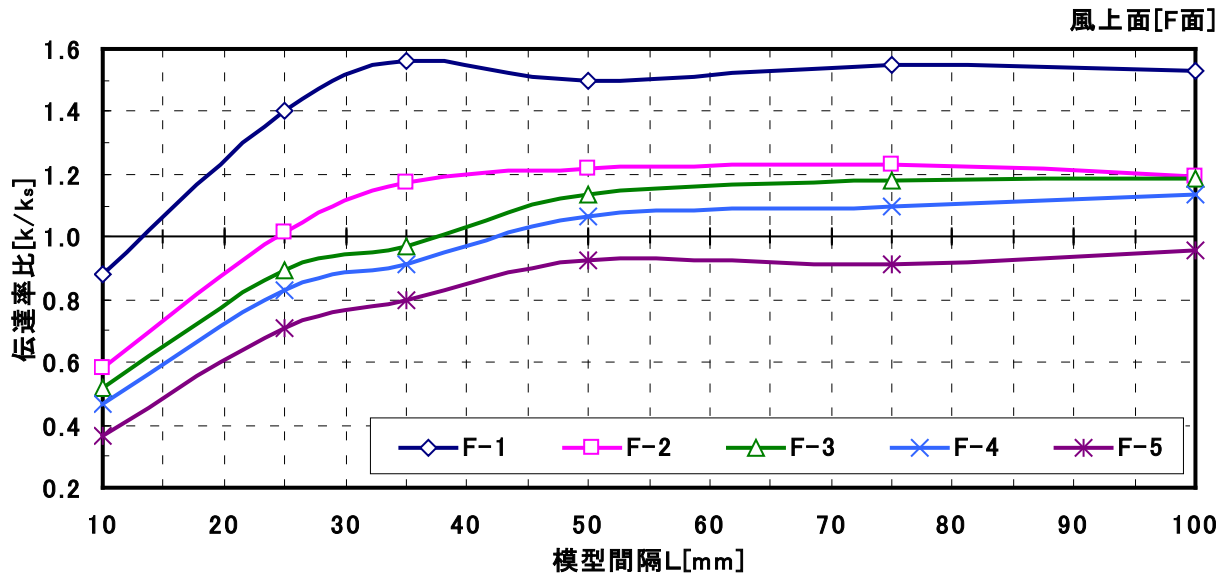


図 3.18 模型間隔順伝達率(風上面)

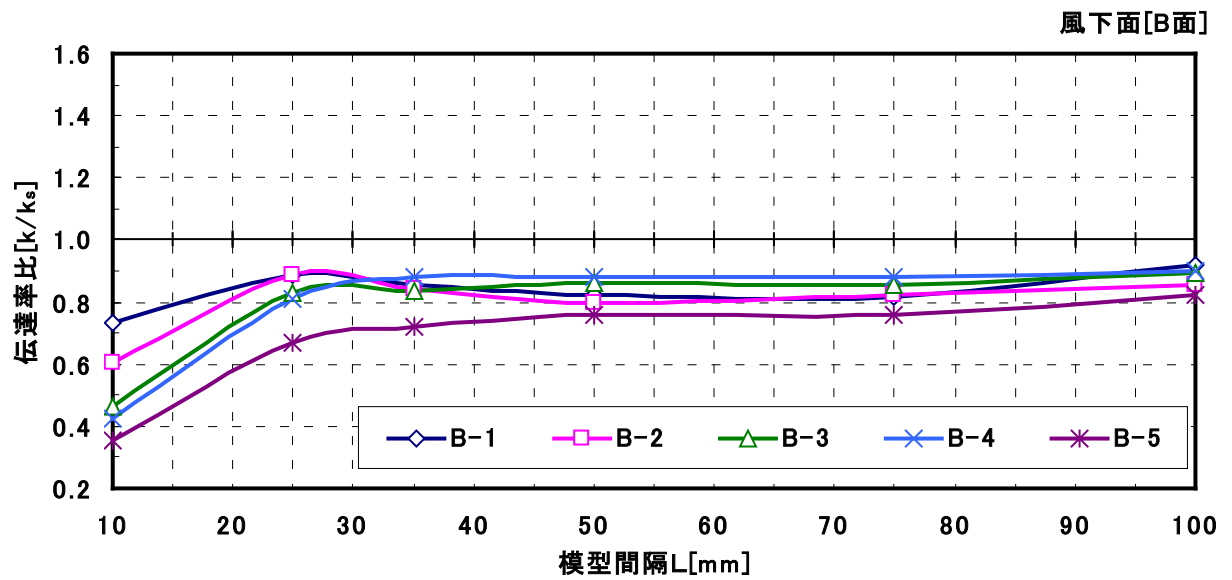


図 3.19 模型間隔順伝達率(風下面)

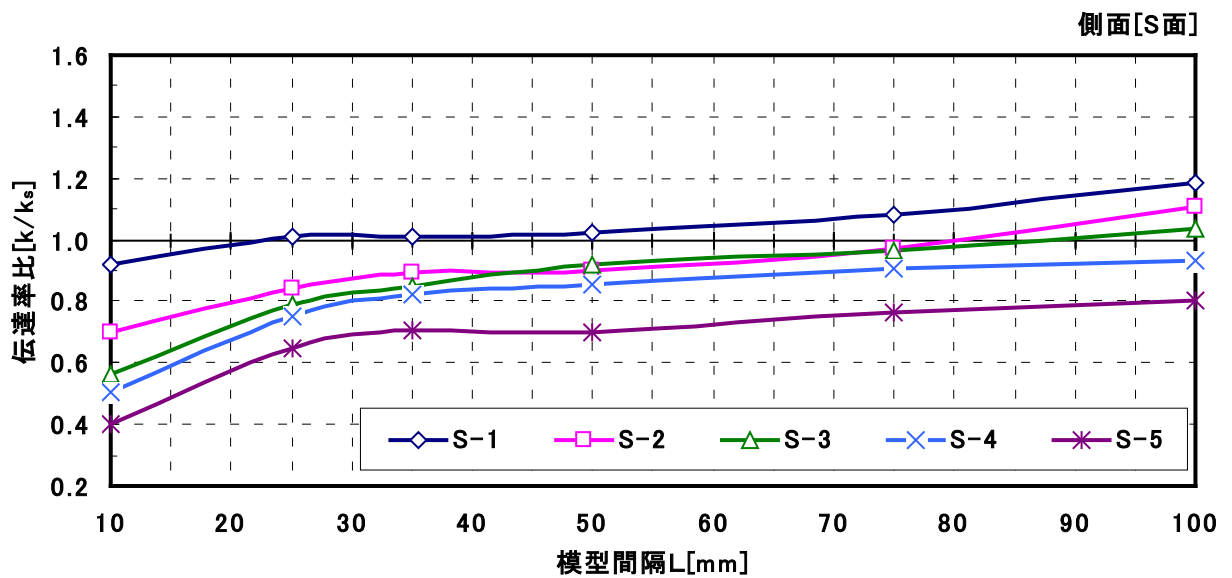


図 3.20 模型間隔順伝達率(側面)

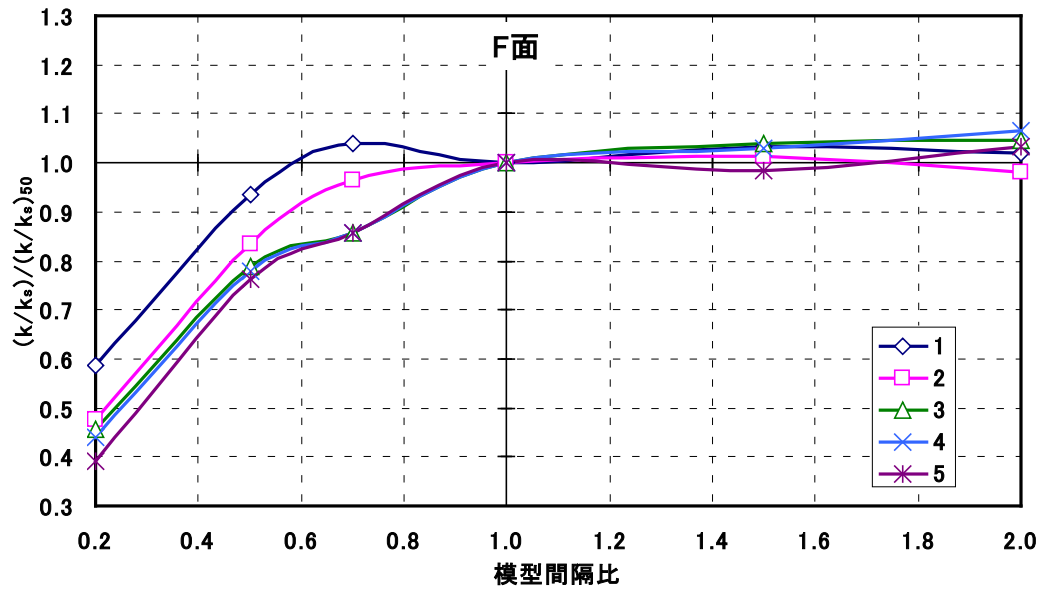


図 3.21 L/H=1 基準の k/k_s (F 面)

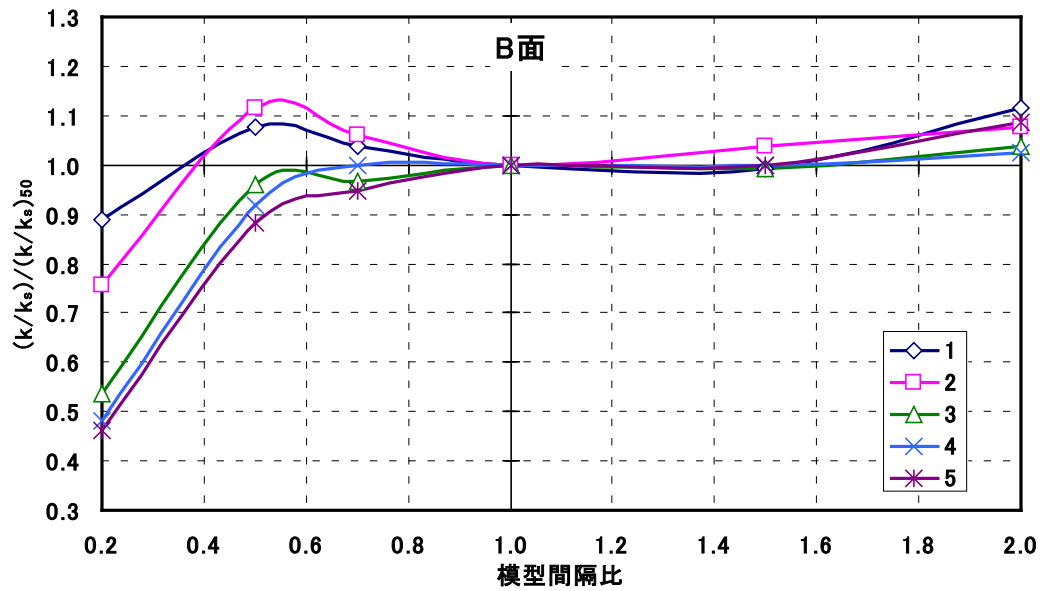


図 3.22 L/H=1 基準の k/k_s (B 面)

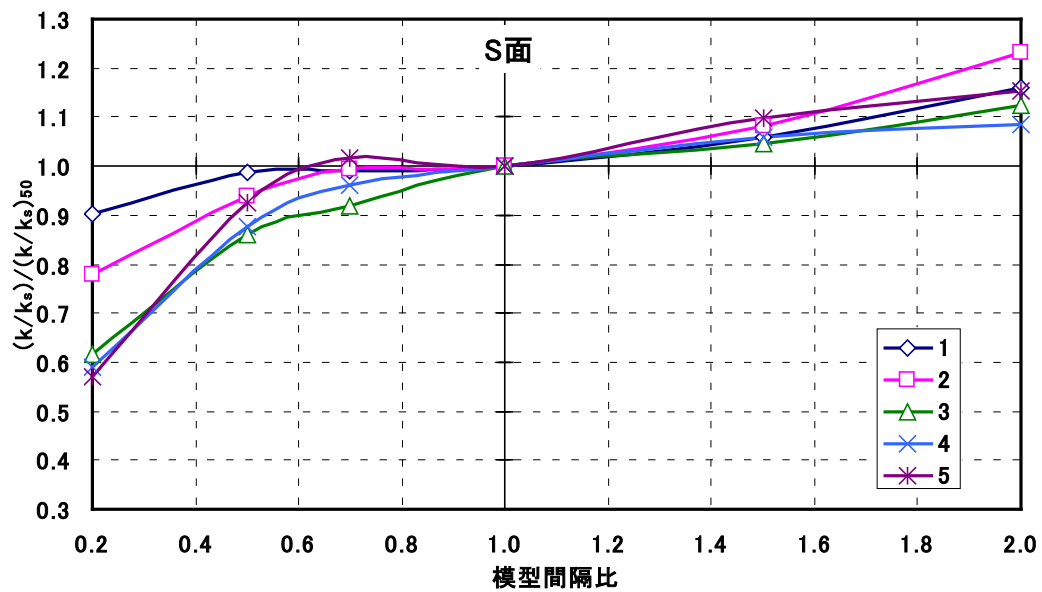


図 3.23 L/H=1 基準の k/k_s (S 面)

3.3.2 全面測定および対面湿潤による測定

図 3.24～3.26 は、分割測定の合計により算出した面平均の値と、全面湿潤により測定した面平均の値を比較したものである。全面測定により測定された面平均の値は、分割測定によって平均値を算出したものに比べ、全体的に小さい値を示していることがわかる。これは1章にて述べたように、湿潤した試料面積が増えることによって、試料表面近傍の湿度はその分だけ高くなるので、水分の蒸発がさまたげられ、湿潤面積が広い方が伝達率は小さく出ることがわかる。

これらのことは、実現象における熱を扱ったことにも言えることであり、熱せられて高温になっている建物は、今回の分割測定のような一部のみではなく、建物全体、もしくは都市全体が高温になっているのが通常である。

つまり、今回の実験に置き換えると、測定対象とした部分についてのみ局所的に濡れているのではなく都市全体が濡れているということになり、今回測定を行った分割測定は、分布が極端に現れている可能性が考えられる。

今回、全体的な分布や傾向を把握するために分割測定をおこなっているが、現実的には今回得られた分割測定における伝達率のデータよりも絶対値は小さくなっていることが考えられる。

図 3.27～3.29 は単面による全面湿潤時の伝達率と、対面を濡らした場合の全面湿潤による測定結果の比である。前述の考察で、分割測定による面平均よりも、全面測定による平均の方が湿潤面積が広いために伝達率が小さくなることを述べたが、このグラフからは、対面を湿潤状態にするとさらに伝達率が小さくなることがわかる。

このグラフからは隣接する建物の対面となる壁面が測定点にどの程度影響を及ぼしているのかを読み取ることができる。

図 3.27 の F 面においては、右肩あがりの傾向が確認できた。模型間隔が狭い $L=10\text{mm}$ の時は、湿潤面を増やした対面湿潤による影響が大きく、およそ 15% の減少となっている。その後、模型間隔が広がるごとに徐々に対面の影響は少なくなり、 $L=100\text{mm}$ 時において、対面湿潤による影響はほとんどなくなっている。

図 3.28 の B 面も F 面と同じように L が狭いケースに関しては 15% 程の減少がみられた。その後、 L が広がるごとに対面の影響は低くなっている。ただし、B 面に関しては、 $L/H=1$ の $L=50\text{mm}$ 時において、すでに対面湿潤による影響はなくなっている。 $L=100\text{mm}$ において伝達率比が 1.0 を少し超えているが、これは対面による影響がなくなったことを指している。

図 3.29 の S 面は、 $L=50\text{mm}$ にて、急激な上昇がみられる。この $L/H=1$ のケースにて S 面に局所的な回転渦などが発生していたのか、それとも、単純に秤量時の人的なミスによるものなのか、検証が必要であるが、今回は明らかにすることはできなかった。今後の検討の余地があると考えられる。S 面に関するその他のケースは、ほぼ横ばいで、対面湿潤による影響は多少あるものの、その影響が大きく変化することはみられなかった。

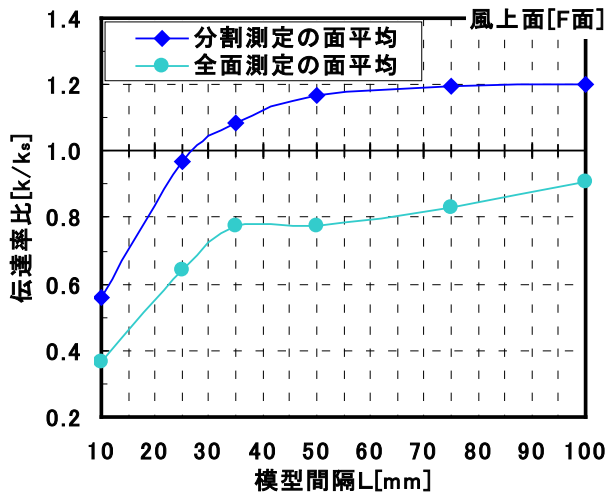


図 3.24 分割測定と全面測定による面平均(F面)

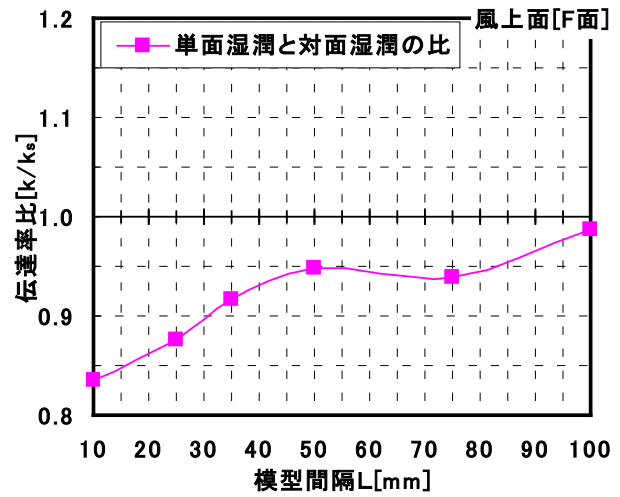


図 3.27 対面湿潤による影響(F面)

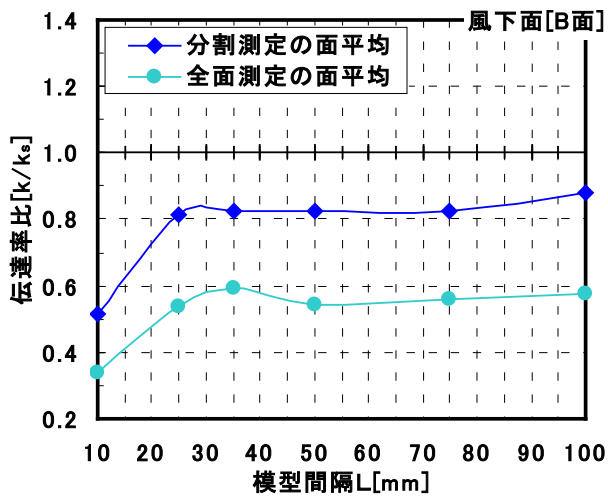


図 3.25 分割測定と全面測定による面平均(B面)

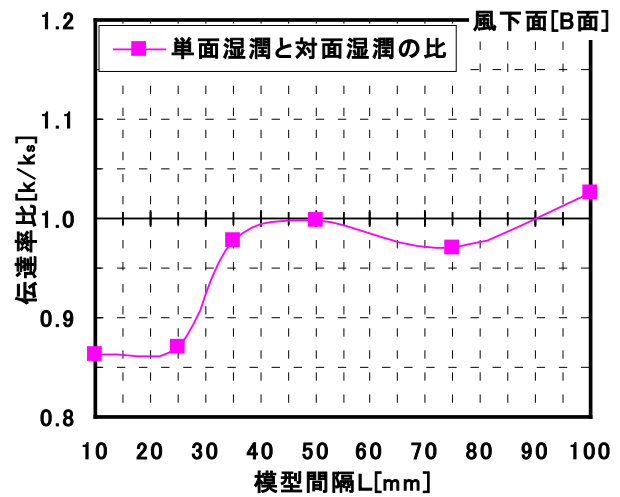


図 3.28 対面湿潤による影響(B面)

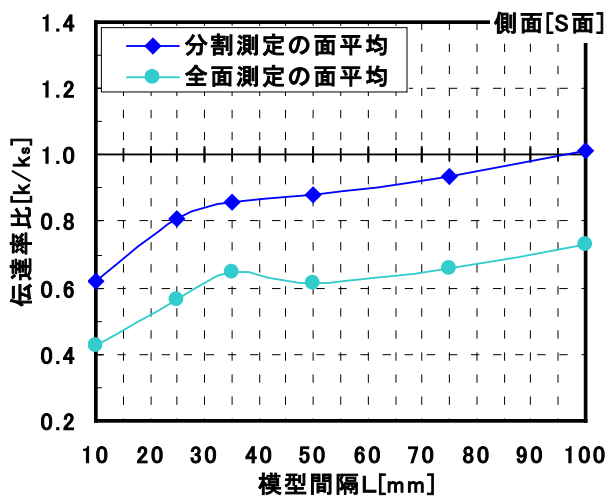


図 3.26 分割測定と全面測定による面平均(S面)

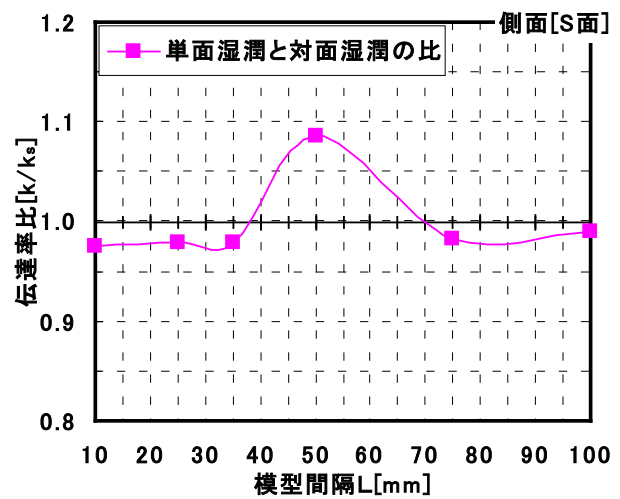


図 3.29 対面湿潤による影響(S面)

3.3.3 同一面内における相対誤差

図 3.30～図 3.32 は同一面内における相対誤差をまとめたものである。縦軸に建物高さ $H=50\text{mm}$ を基準とした場合の測定高さ比を示し、横軸に分割測定の合算から求めた面平均値との相対誤差を示している。 $H/H_{50\text{mm}}$ が 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 となっているのは、実際にセンサを挿入して表面温度を測定しているのは、幅 1cm の中間であるため、床上 5mm を起点に 1cm ピッチで測定しているためである。

F 面においては、模型間隔が狭くなるほど上端部と下端部との相対誤差が開いているのがわかる。模型間隔 L が最小となる 10mm においては同一面内であっても、局所的な伝達率の誤差は約 2 倍に開いていることが明らかになった。 $L=100\text{mm}$ においてもおよそ 50% の誤差が確認できる。B 面においては模型間隔の狭い $L=10\text{mm}$ 以外は得に面内分布が発生しているとは言えない。ただ、10mm に関しては上端と下端の最大相対誤差が 50% となっている。S 面でも模型間隔 10mm に関しては相対誤差が大きく出る結果となった。

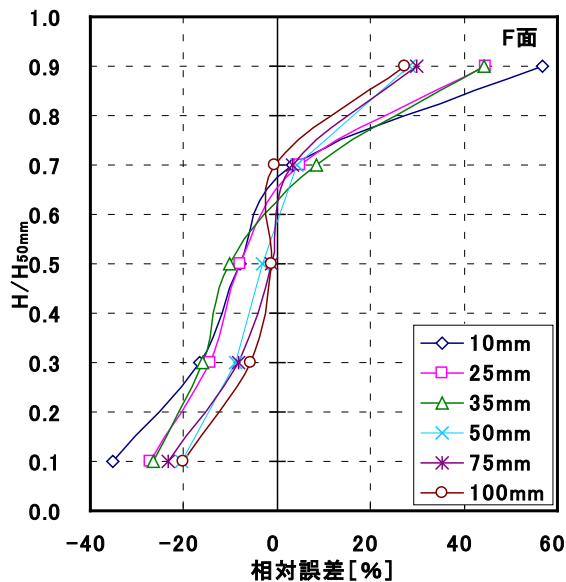


図 3.30 同一面内の測定点別相対誤差(F 面)

また、B 面とは一変して、 $L=10\text{mm}$ 以外の模型間隔についても最大でおよそ 40% の相対誤差が発生している。

これらのことから、同一面内での分布が顕著に現れていることが確認できた。同一面内における誤差の最大で 2 倍に及ぶこともあり、特に L が狭いケースにみられた。伝達率のふるまいを風向に対する壁面の向きだけでは説明がつかないことが明らかになった。但し、ウェイクとなる B 面の $L/H=1/5$ 以上に関していえば相対誤差はさほど現れていない。

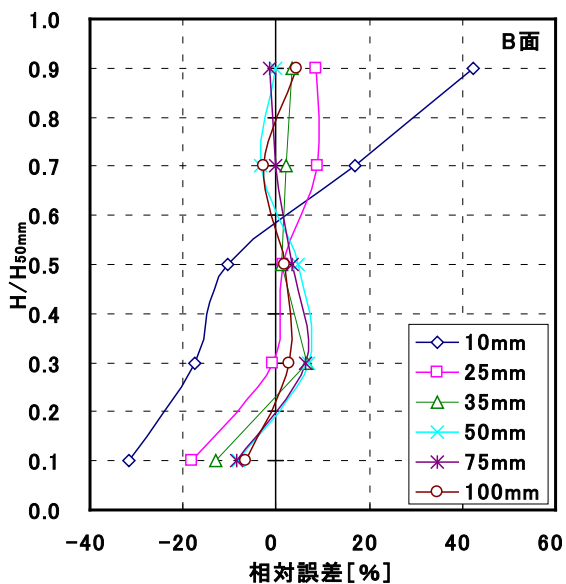


図 3.31 同一面内の測定点別相対誤差(B 面)

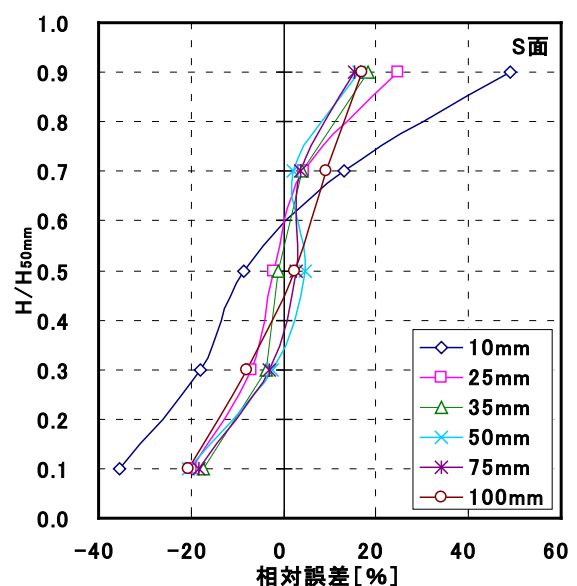


図 3.32 同一面内の測定点別相対誤差(S 面)

3.4 風向変化による影響

3.4.1 全面による測定

図 3.33 は風向変化による各模型間隔の伝達率をまとめたものである。実際の測定は 0 度から 180 度までであり、以降の値は 0 度から 180 度までの値の対として表現している。この測定では、風向変化による影響の把握をするため、分割測定ではなく、全面測定にて実験を行っている。

0 度から 180 度へ近づくにつれて伝達率が低くなっているのが全体的な傾向と言える。ただし、街路縦横比 1/5 に関しては例外で、間隔が狭いため全風向を通じて風向変化による影響が顕著に現れることはなかった。

同一風向における伝達率の大小関係については、街路縦横比の大きい順となっている。また、風向 180 度に近づくほど伝達率が低くなっているが、風下側 180 となった時に、 $L=10\text{mm}$ を除いて局所的に伝達率面上昇がみられ、ほぼ同じ値を示した。

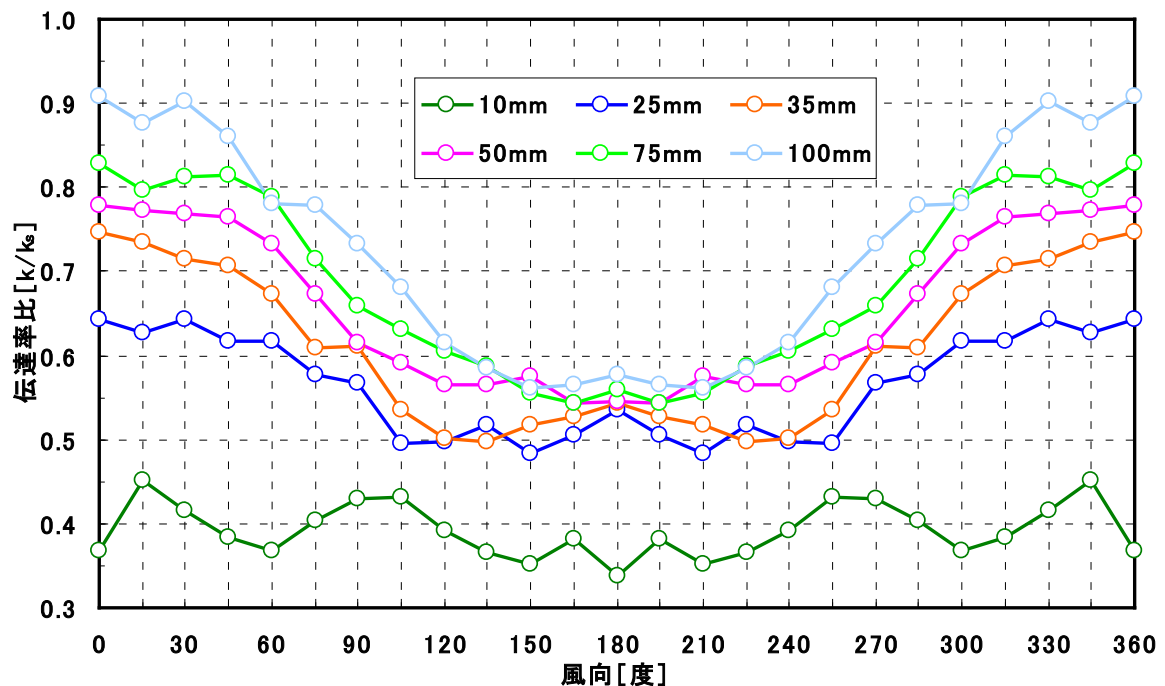


図 3.33 模型間隔別にみた風向変化

3.4.2 分割測定による風向変化測定

図 3.34 は $L/H=1$ ($L=50\text{mm}$) の時の分割測定における風向と伝達率の関係を鉛直伝達率分布として示している。各鉛直伝達率分布の上には、風向変化による図を参考に示している。また、赤く表示している面が主風向に対して実際に測定を行った面である。なお、風向 60 度、75 度は前述の通り、欠測である。

風向 0 度では面内に分布が発生し、上端の伝達率が高く、床近傍の点が低くなっているのがわかる。風向が 15 度、30 度と回転を続けるごとに分布のメリハリが徐々に弱くなっている。風下側となる風向 105 度を越えたあたりから、面内の分布はすでになくなっているのがわかる。

最終的に試料面が完全に風下の B 面に回ったとき、試料面には分布が形成されることがなく、上端から床近傍の点までウェイク領域に入っていたため分布が現れなかったと考えられる。

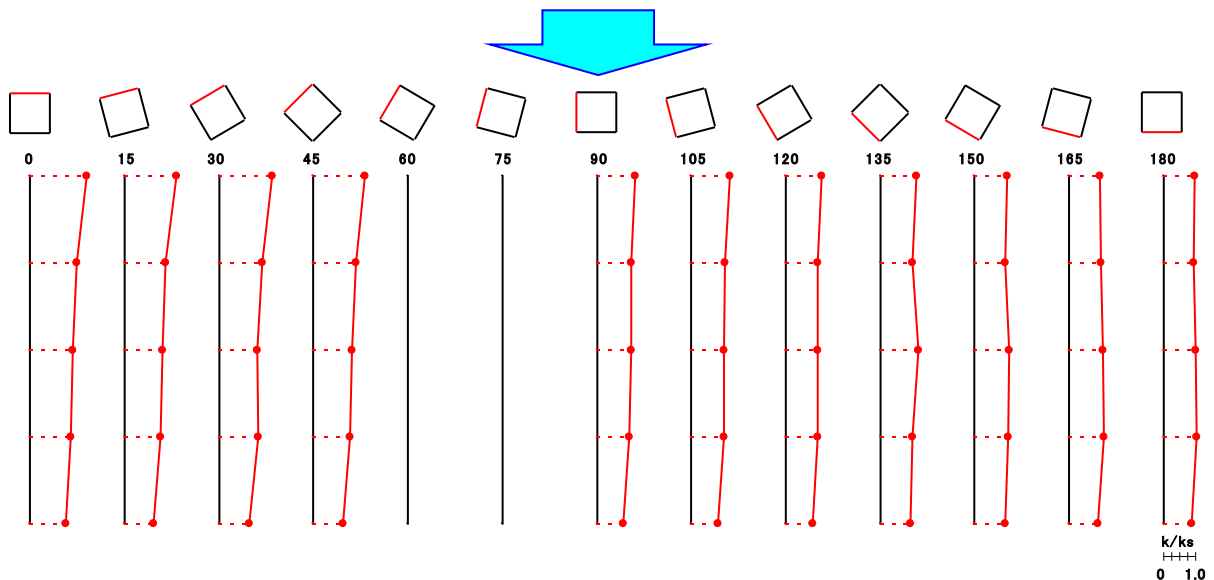


図 3.34 分割測定における風向と伝達率の関係 ($L/H=1$)

3.5 小結

本章は、立方体模型群における伝達率を模型間隔 L/H を系統的に変化させて測定を行った。

面内分割による高さ別分割測定においては、 L/H を変化させた場合の風上面、風下面、側面と、構成面ごとの伝達率分布を明らかにした。また、面内分割による測定高さごとの相対誤差を示し、伝達率は同一面内であっても最大で約 2 倍の差が出るという結果が示された。

全面測定による風向変化においては、風向が変化し測定面が風下側へ向かうほど伝達率が減少する傾向がみられた。完全な風下側となる 180 度において、局所的に伝達率が上昇し、伝達率がほぼ同じ値を示すという結果になった。

既往の研究成果として、2 次元配列における同一面内全面測定、局所別分割による伝達率分布の測定。3 次元配置においては、同一面内全面測定が行われてきた。そして本実験において、3 次元配置における伝達率のふるまいの基礎的データを得ることができた。

第4章 2次元街路における屋根形状の違いによる

対流伝達率の変化

4.1 実験目的

立方体模型を用いた風洞実験は過去にも数多く行われており、2次元街路における伝達率の研究は街路空間の縦横比を変えた構成面別の面平均の値と、面を分割した面内分布の把握が行われており、近傍風速と伝達率とが密接に関わっていることが確認されている。

建物の形状は建物配置と同様に周辺気流を決定付ける上で非常に重要であるが、屋根の有無およびその勾配と伝達率との関係を検討している研究例は非常に少ない。

スイスのハーゼルでは屋根形状による熱伝達率への影響を把握するため、市街地における実測が行われている。実測は実現象の把握という意味からは良いが、風向や屋根勾配の差異などによる系統的な把握には不向きである。

本章では、風洞実験という特性を生かし、2次元配列における、屋根勾配および街路空間の縦横比をそれぞれ系統的に変化させた場合の建物間キャニオンの詳細な伝達率分布測定を行った。屋根は切妻屋根とし、勾配の緩いものから急な屋根(写真4.1)にて測定を行った。



写真 4.1 勾配の急な欧州の屋根

4.2 実験内容

4.2.1 実験内容

本実験において使用した風洞施設の詳細及び伝達率の算出法など、基本的な実験の進め方については既に2章で述べている。ここでは、特に4章の実験に関する内容についてのみ述べることにする。

4.2.2 屋根形状の定義

屋根形状の定義は屋根面の分割測定を前提とし、蒸発面となる試料(ろ紙)の表面積が $1\text{cm} \times 5\text{cm}$ となるようにした。屋根面長さの変化を 1cm 単位として 3cm 、 4cm 、 5cm 、 6cm と4種類用意した。屋根の勾配としては屋根面長さの短い方から順に 33.6° 、 51.3° 、 60° 、 65.4° となる。写真4.2は実際に使用した各屋根形状を有する模型の断面写真で、左から順に 33.6° 、 51.3° 、 60° 、 65.4° である。



写真 4.2 建物模型断面図

表 4.1 屋根勾配ごとの模型間隔(L)

単位：mm				
勾配	L/H	基準とする位置		
		軒(N)	平均(A)	棟(M)
65.4度	1	50.00	77.25	104.50
	1/2	25.00	38.63	52.25
	3/2	75.00	115.88	156.75
60度	1	50.00	71.65	93.30
	1/2	25.00	35.83	46.65
	3/2	75.00	107.48	139.95
51.3度	1	50.00	65.60	81.20
	1/2	25.00	32.80	40.60
	3/2	75.00	98.40	121.80
33.6度	1	50.00	58.30	66.60
	1/2	25.00	29.15	33.30
	3/2	75.00	87.45	99.90
なし	1	50.00	X	
	1/2	25.00		
	3/2	75.00		

4.2.3 配置模型の作成

実験目的で述べたように、本実験では屋根を有する模型を用意した。模型の作成には前章で使用した 5cm 角の木製の立方体模型を使用しているため、軒高までは全て共通 50mm である。木製の模型を横一列に12個並べて 60cm の長方形を作った。そして、その長方形の上に底辺が 5cm となる二等辺三角形を持つ三角柱を作成し、作成した長方形の上に載せて配置模型を作成した。この長さ 60cm の屋根付き建物模型を3本一列に並べ、棟続きで長さが 1.8m になるものを模型間隔を変えながら測定を行った。

4.2.4 模型間隔の定義

模型間隔 L/H の定義に関してはまず基準となる模型の高さを決める必要がある。前章では陸屋根のみを扱っており、棟高=軒高であったので高さ $H=50\text{mm}$ と固定していたが、屋根を有する模型を用いる場合は建物高さをどの位置とするかという問題が発生する。

そこで、高さの基準については軒高(N)、棟高(M)をそれぞれ採用とし、さらに軒高と棟高の平均高さ(A)の値も加えて高さの基準は3種類とした。そして、その3種類の建物高さに対する模型間隔L/Hは1/2、1、3/2の3種類とした。全ての模型間隔一覧を表4.1にまとめた。これらのうち、分割測定を行ったのは、模型間隔Lが50mmとなる軒高基準のL/H=1のみである。その他のケースについては、風上面(F)と風下面(B)

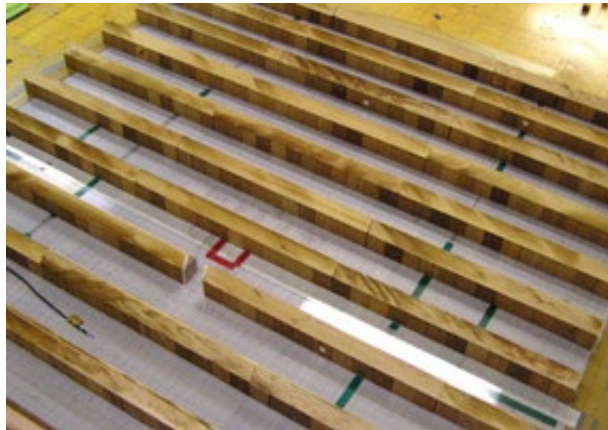


写真 4.3 模型の配置

の2面について全面測定を行っている。模型の配置は風上基準から風下側へ約1.98mの点を測定模型の設置点と固定をし、その点から風上側、風下側の両方向へ1820mm×1820mmの亚克力板から模型がはみ出す手前まで模型を並べた。測定点をターンテーブルの中心から風下側へ下げているのは、風上側の模型数を増やし、測定点までに届く間に気流の乱れを十分に発達させるためである。また、本実験は2次元配列のため、風向変化による測定を行わないので、ターンテーブルの中心である必要はない。模型の配置の様子を写真4.3に、風上基準及び各種測定器と測定点の関係を断面図にて示したものを図4.1に示す。

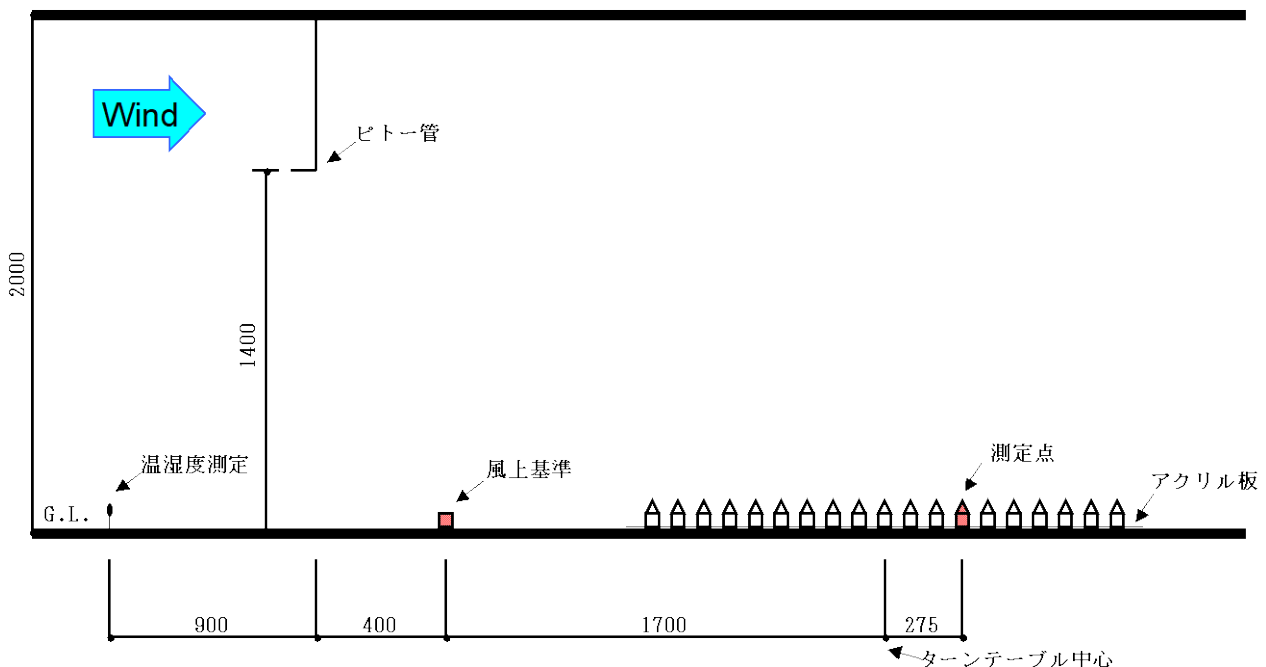


図 4.1 測定の概要断面図

4.2.5 測定対象模型概要

測定対象模型の設置状況を写真 4.4 に示す。測定点は前章と同じくアクリル板で作成している。試料となるアクリル模型と木製の屋根模型と接触しないよう、5mm 厚のアクリルで接触を絶った。これは吸水性のある木との接触を避けるためである。試料表面以外の側面となる面についてはこれまで同様にコーティングを施してあるが、水分の扱いに細心の注意を払うためにもこのアクリルを用意した。



写真 4.4 測定対象模型設置状況

1) 局所別分割測定

既に述べたように、分割測定は模型間隔 L が 50mm となる軒高基準の $L/H=1$ の場合についてのみ測定を行った。屋根なし時の分割測定の概要を図 4.2 に示す。屋根面を R 面、風上壁面を F 面、風下壁面を B 面、床面を G 面とする。また、鉛直面の F 面と B 面に関しては軒寄りの上端部を No. 1 とし、No. 5 までの連番によって測定点に名前を付けることとする。同様に G 面、R 面の水平面においては、それぞれ風上側を No. 1、風下側を No. 5 とした測定点を連番で名前をつけた。一例を挙げると、F 面の軒寄り上端部から 2 番目の測定点は F-2 と呼び、屋根面の風上側から 4 番目の測定点を R-4 とよぶ。屋根無し時の局所別分割測定では F 面 5 点、B 面 5 点、G 面 5 点、そして R 面 5 点の計 20 点について測定を行った。

図 4.3 は屋根を有する場合の分割測定の測定点図概要である。なお、図に示されているのは屋根面が 5 分割された屋根勾配 60 度の一例であり、例えば屋根勾配 65.4 度の屋根面分割数は 6 となる。以降、屋根の風上面を RF 面、同じく風下面を RB 面と呼ぶ。屋根なし時の時と同様に、屋根面に関しても測定点番号を指定した。RF 面、RB 面共に、最も棟寄りの測定点を No. 1 とし、屋根面の測定長さに応じた測定点の分割数だけ測定点数を指定した。測定は F 面、B 面、G 面の 5 点ずつの 15 点と、屋根部分の RF 面、RB 面を 1cm 単位で屋根勾配の長さ分だけ測定している。よって屋根勾配 65.4 度では 27(15+12)点、同 60 度は 25(15+10)点、同 51.3 度は 23(15+8)点、同 33.6 度は 21(15+6)点についてそれぞれ測定している。

2) 全面測定

図 4.4 に屋根あり時の全面測定の概要を示す。屋根なし時の全面測定の概要については掲載していないが、測定対象面としては局所別測定と同じ面を扱っており、F 面、B 面、G 面、R 面の 4 面を測定対象としている。屋根を有する場合の全面測定は F 面と B 面の 2 面を対象に測定を行い、 $L=50\text{mm}$ の時だけ G 面の全面測定も行った。

屋根面の全面測定に関しては、RF 面および RB 面の面積が屋根勾配によって変化するため測定を行っていない。

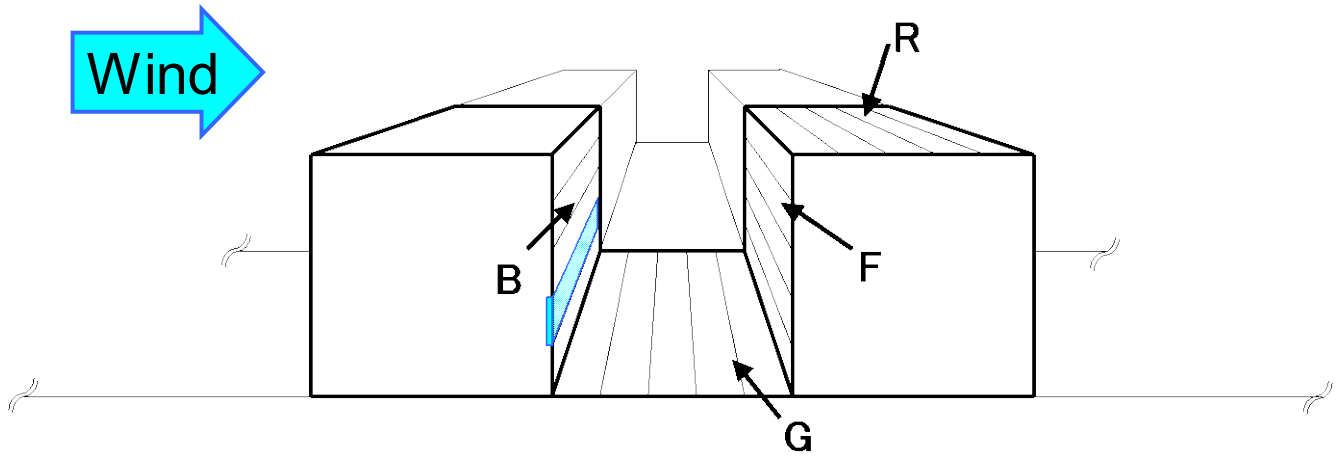


図 4.2 屋根なし時の分割測定概要

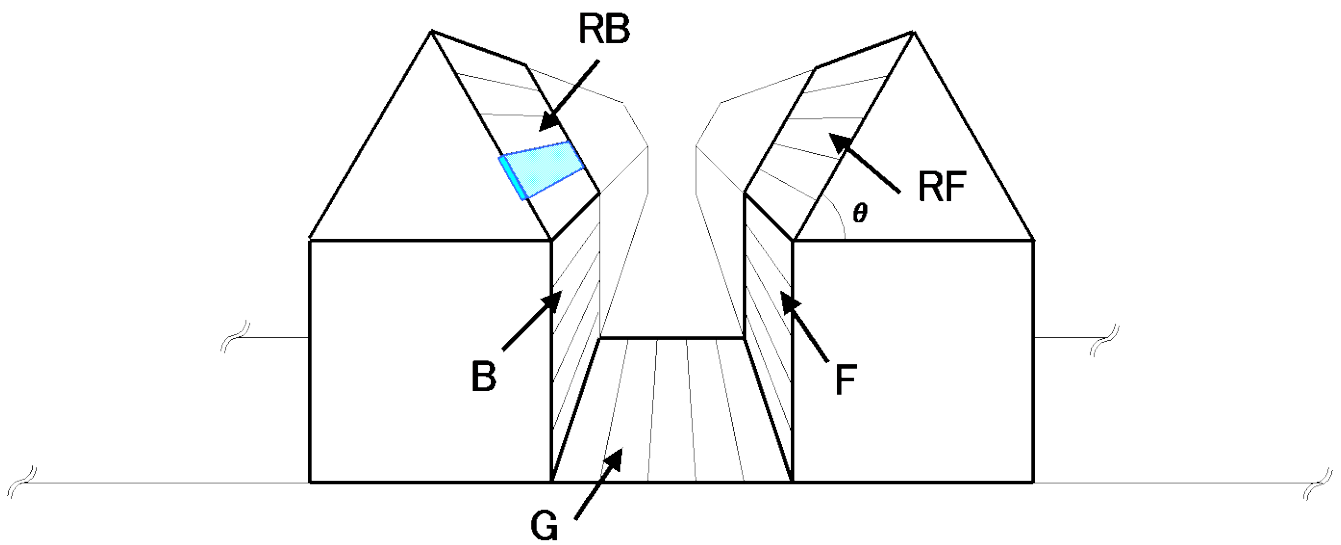


図 4.3 屋根を有する場合の分割測定概要

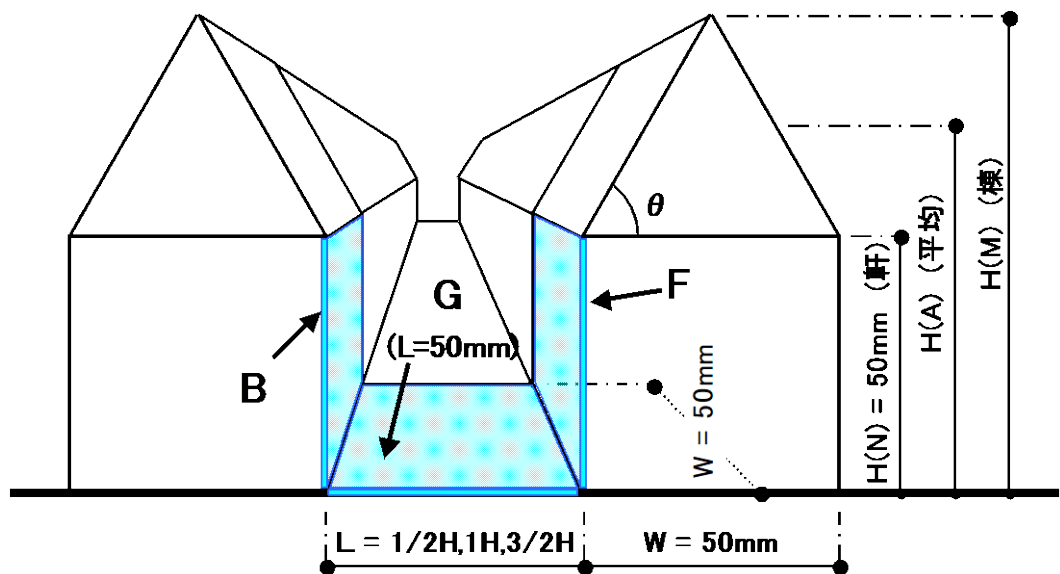


図 4.4 屋根有り壁面測定概要

4.3 屋根勾配の違いによる対流伝達率への影響

4.3.1 分割測定による同一面内対流伝達率分布の把握

図 4.5 に屋根なし時における分割測定による伝達率分布を示す。また、図 4.6～4.9 に各勾配の屋根を有するキャニオン内の伝達率分布を示す。図 4.6 は屋根勾配 33.6 度、図 4.7 は屋根勾配 51.3 度、図 4.8 は屋根勾配 60 度、図 4.9 は屋根勾配 65.4 度の伝達率分布を示したものである。

図 4.5 の屋根なし時の F 面における伝達率分布は F-1 が最も高い値を示してから G 面へ近づくほど伝達率が低くなり、F-5 においては屋根なし時における測定点中、最小の値を示した。同一面内の分布が最もよく現れている面であることがわかる。F 面、B 面、G 面に共通してキャニオン内部の隅角部では同様に低い値を示している。これは図 4.10 の模式図のように隅角部には気流が届きにくく、空気がよどんでいるためと考えられる。また、図 4.5 のキャニオン内において伝達率の高く出た点は図 4.10 の(c)の絵のように、気流が壁面に衝突して気流の進む方向が変わる位置と一致していることも確認できた。R 面においてはほぼ一様ではあるものの、若干ながら分布が表れ、比較的風上側が高く、風下が低いという結果になった。これらの結果を既往の研究結果と比較すると、模型のサイズや乱流境界層など測定条件の違いが多少はあるものの、都市キャニオン内の伝達率分布の全体的な傾向は酷似した結果となっている。

図 4.6 の屋根勾配 33.6 度の伝達率分布では屋根無し時の場合と比べて F 面の伝達率が全体的に減少している。F-5 に関しては変化がみられないものの、F1 の値が激しく減少する結果となっている。また B 面の伝達率のメリハリも弱くなり、屋根なし時に B-4 に現れていたピークも消滅している。B 面と同様に、G 面の分布のメリハリも屋根なし時と比べると弱くなっているのがわかる。RF 面、RB 面は、両面共に棟寄りの測定点ほど伝達率の値は高くなり、RB 面と RF 面の伝達率の大小としては RF 面の方が大きかった。

図 4.7 の屋根勾配 51.3 度の伝達率分布では、F 面、G 面の伝達率が屋根勾配 33.6 度の時以上に減少をし、全体としての分布も一層メリハリが弱くなっている。一方、風下側となる B 面において分布が発達し、屋根無し時の B 面と比較すると伝達率のピークが軒寄りの測定点に移動しており、分布の形状が上下逆転の傾向にあるのがわかる。RF 面に関しては勾配 33.6 度のような極端な分布は現れていない。RB 面においては屋根勾配 33.6 度の時と同様に最上端となる RB1 において突出した伝達率の値を示しているが、RB-2 になると急遽減少し、それ以降は RB-5 に近づくにつれて伝達率の上昇の傾向がみられる。これは屋根の上を流れる気流が RB 面を相対的に負圧にすることによって、主風向に沿って流れようとする気流と RB 面に沿って上昇しようとする気流との間で、特に RB-1 において局所的な渦が発生していることによる影響と考えられる。しかし、RB-2 以下の点に関しては、RB-1 のような複雑な気流とはならず全体的にウェイク領域に入るため、値としては低くなっていると考えられる。

図 4.8 の屋根勾配 60 度については、キャニオン内分布のメリハリや伝達率の値は変

わらず低い。ただし、局所的に見ると G-2 の値が大きくなっている点が注目される。屋根なし時において、G 面におけるピークとなる位置が G-4 であったものが、屋根の勾配が急になるにつれてそのメリハリは弱まり、屋根勾配をさらに急にすることによって、G 面内に再度分布が表れている。屋根勾配 60 度では G-2 へと屋根勾配の変化により風上側へと移動しているのがわかる。

図 4.9 の屋根勾配 65.4 度では、RF-1 と RB-6 の増加が注目される。全体の分布は先程の屋根勾配 60 度の時と同様の傾向にあり、RB-1 が RB-2 よりも高い値を示している。そして、RB-2 以降は除々に伝達率が高くなるという分布になった。RF 面に関しては、剥離によるウェイク領域に入ることがないので、RB のような分布は現れず、RF-1 が一番高く、RF-6 へと測定位置が低くなるにつれて伝達率も減少しているのがわかる。RF と RB に関しては上下が逆の関係になっている。この分布は屋根なし時の F 面、B 面の関係と似ており、RF 面と RB 面の間において屋根なし時のような循環流が発生しているものと考えられる。この循環流の動きはおそらく RF 面と RB 面の間のみを主としているため、F 面、G 面、B 面に囲まれたキャニオン空間内にまで大きく影響を及ぼす程の気流ではないと考えられる。

全体的な傾向としては各面ごとにおける伝達率のピークとなる位置が屋根勾配の変化により移動している点に注目できる。屋根無し時の場合においては F 面のピークが一番上端となる F-1 であったが、屋根の勾配が急になるにつれてその分布にメリハリが無くなっている。G 面に関しては屋根なし時においては F 面に近い位置で発生していた伝達率のピークが、屋根勾配が急になると同時に B 面に近い位置で発生していることがわかる。

キャニオン内の伝達率分布のメリハリは屋根無し時に比べて屋根を有する場合の方が弱くなっている。これは前述の考察で述べたように、屋根を有することによってキャニオン内に発生する気流が RF 面と RB 面を主としているため、F 面、G 面、B 面に囲まれたキャニオン空間内の空気がよどみ、通風効果としての風の流れが減少したためと考えられる。

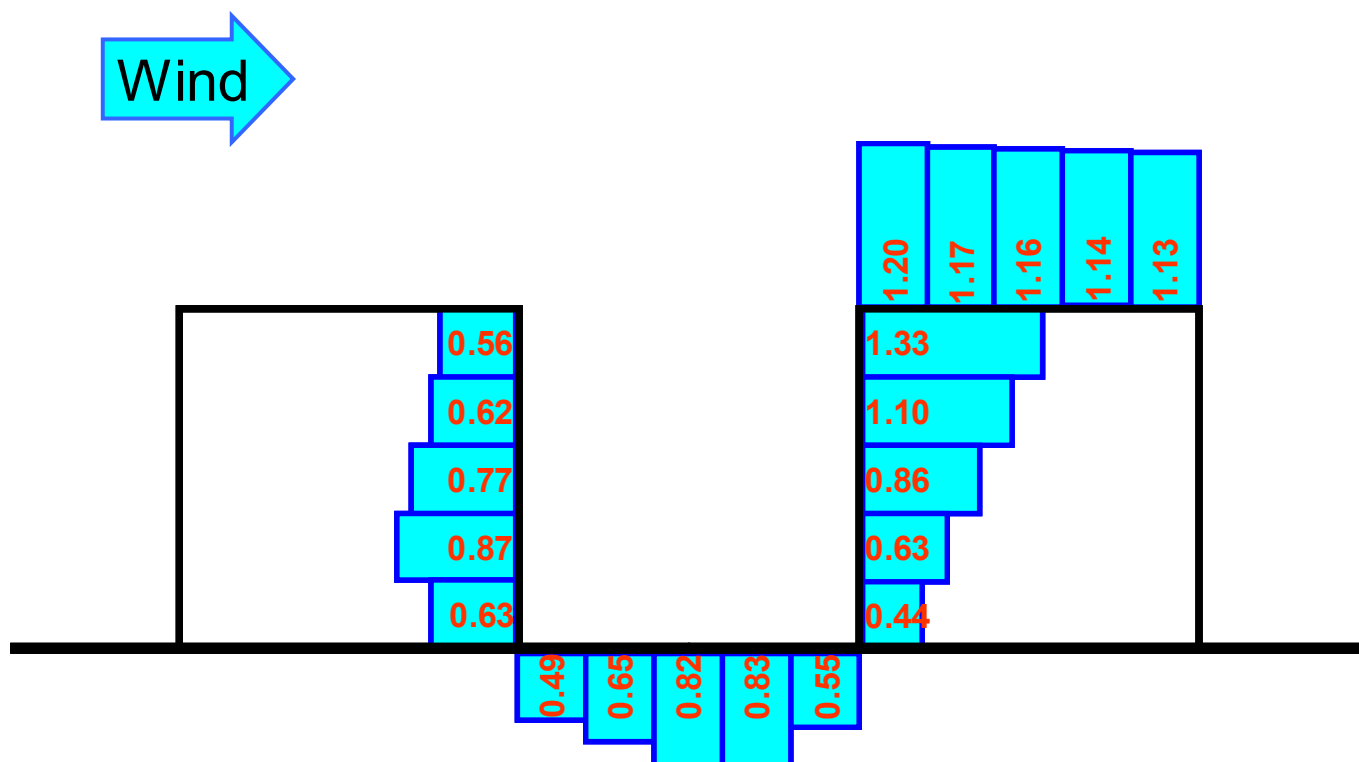


図 4.5 屋根なし分割測定による伝達率分布

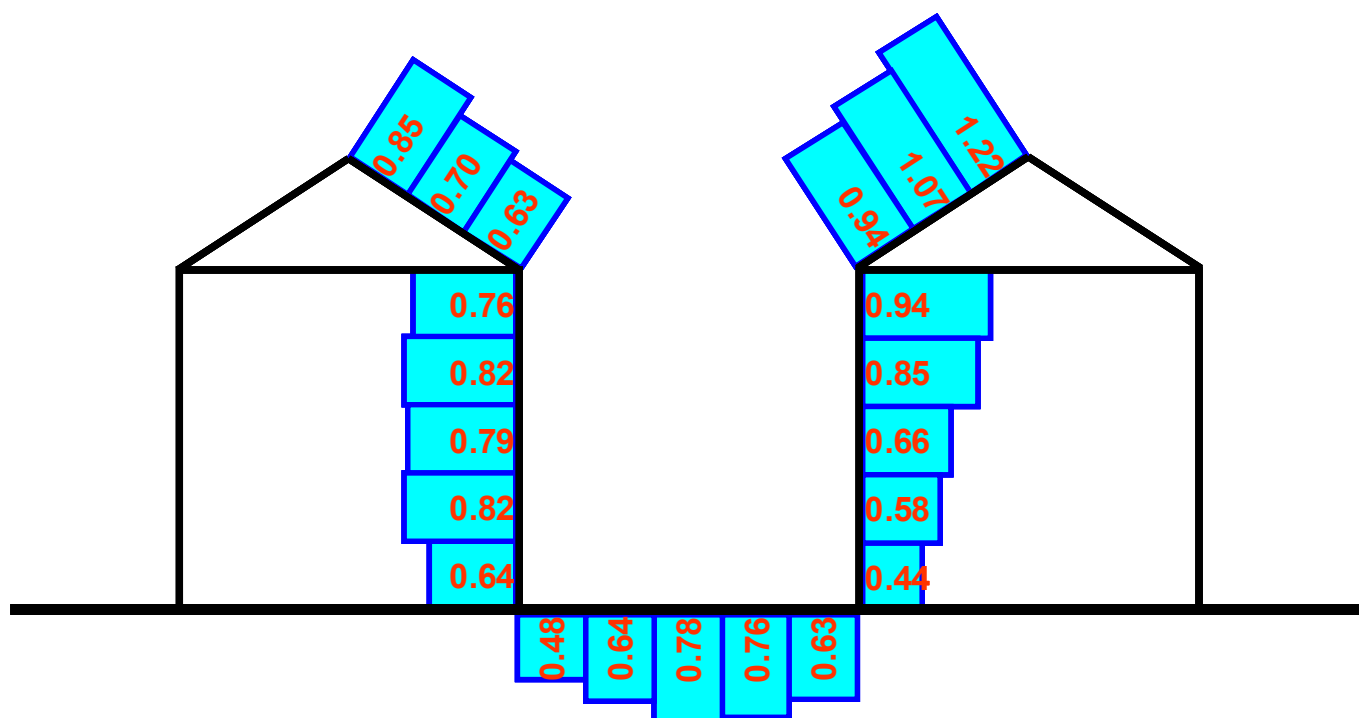


図 4.6 屋根勾配長 33.6 度の分割測定による伝達率分布

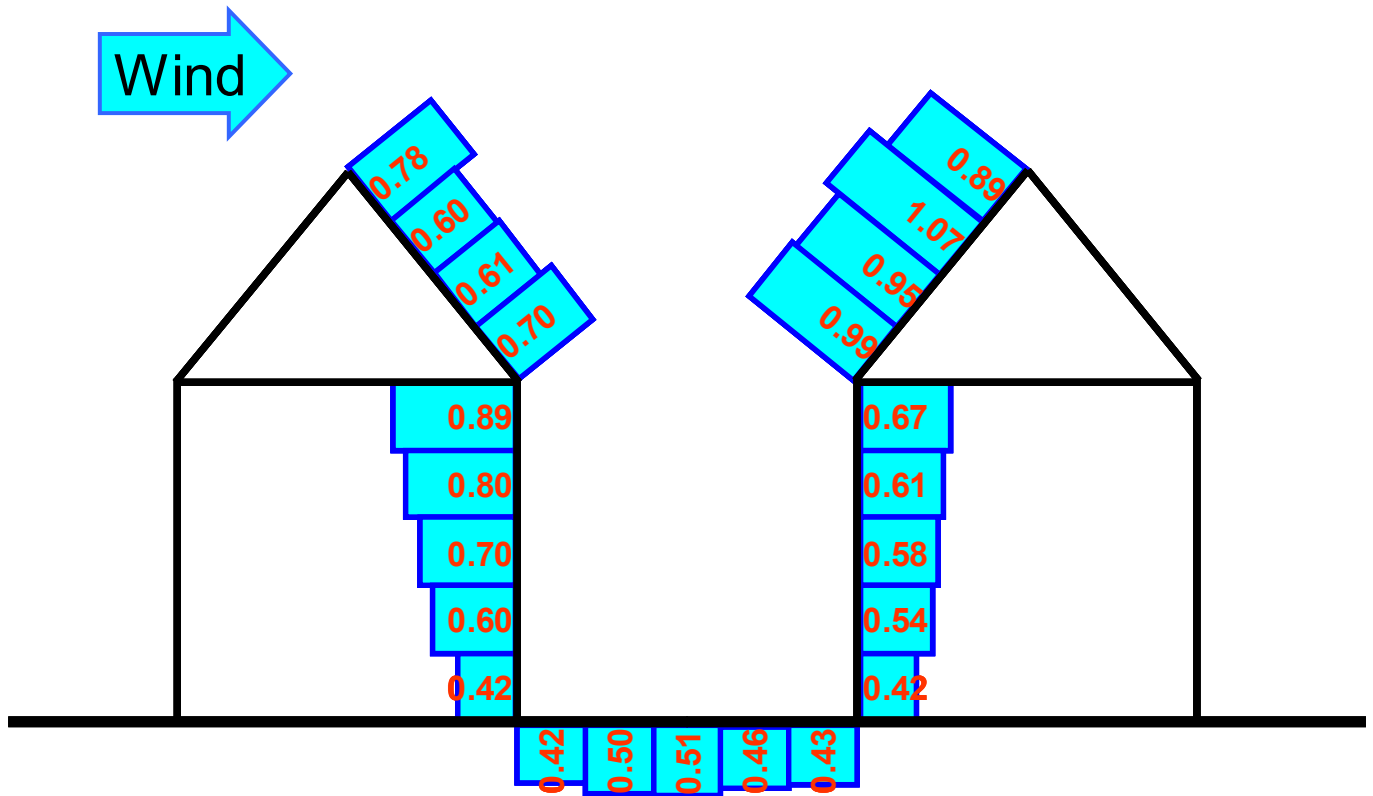


図 4.7 屋根勾配 51.3 度の分割測定による伝達率分布

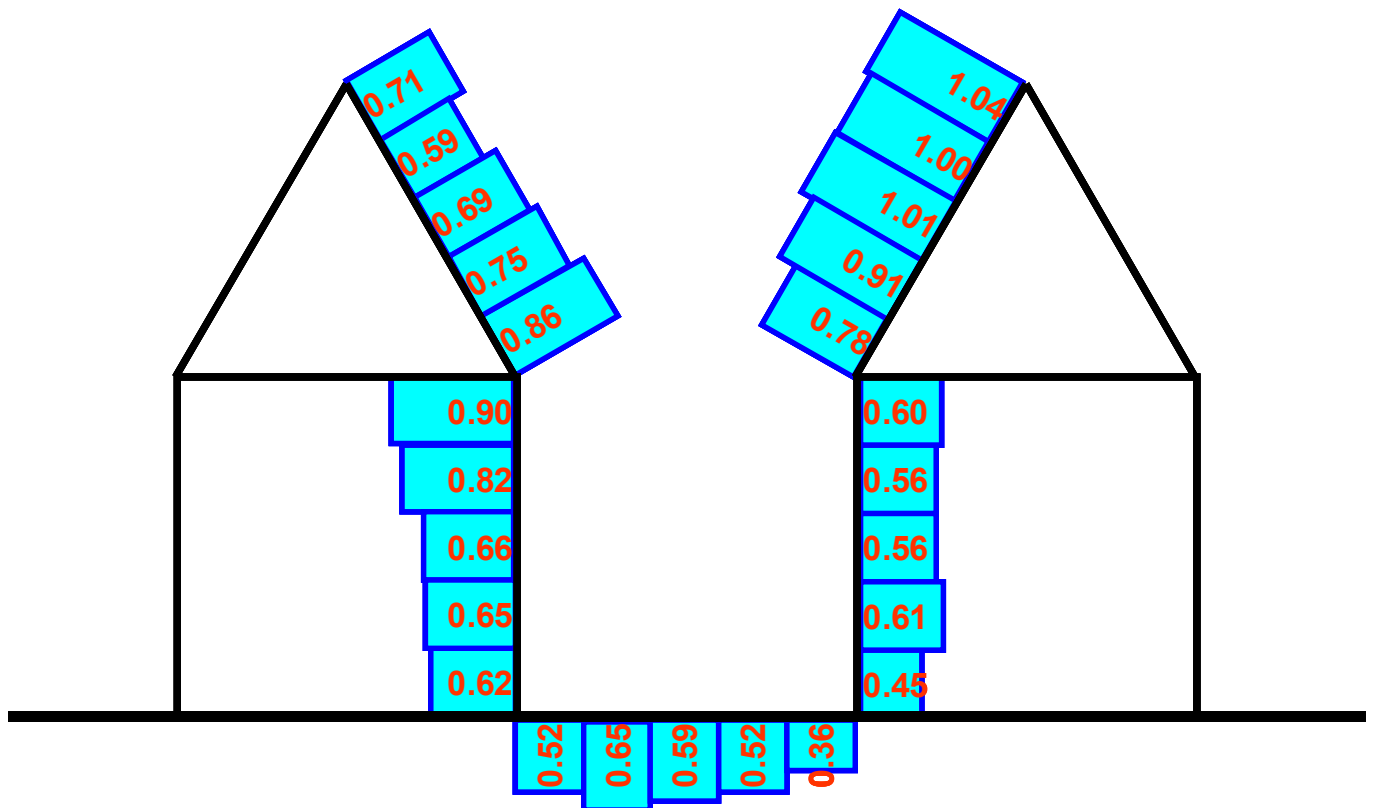


図 4.8 屋根勾配 60 度の分割測定による伝達率分布

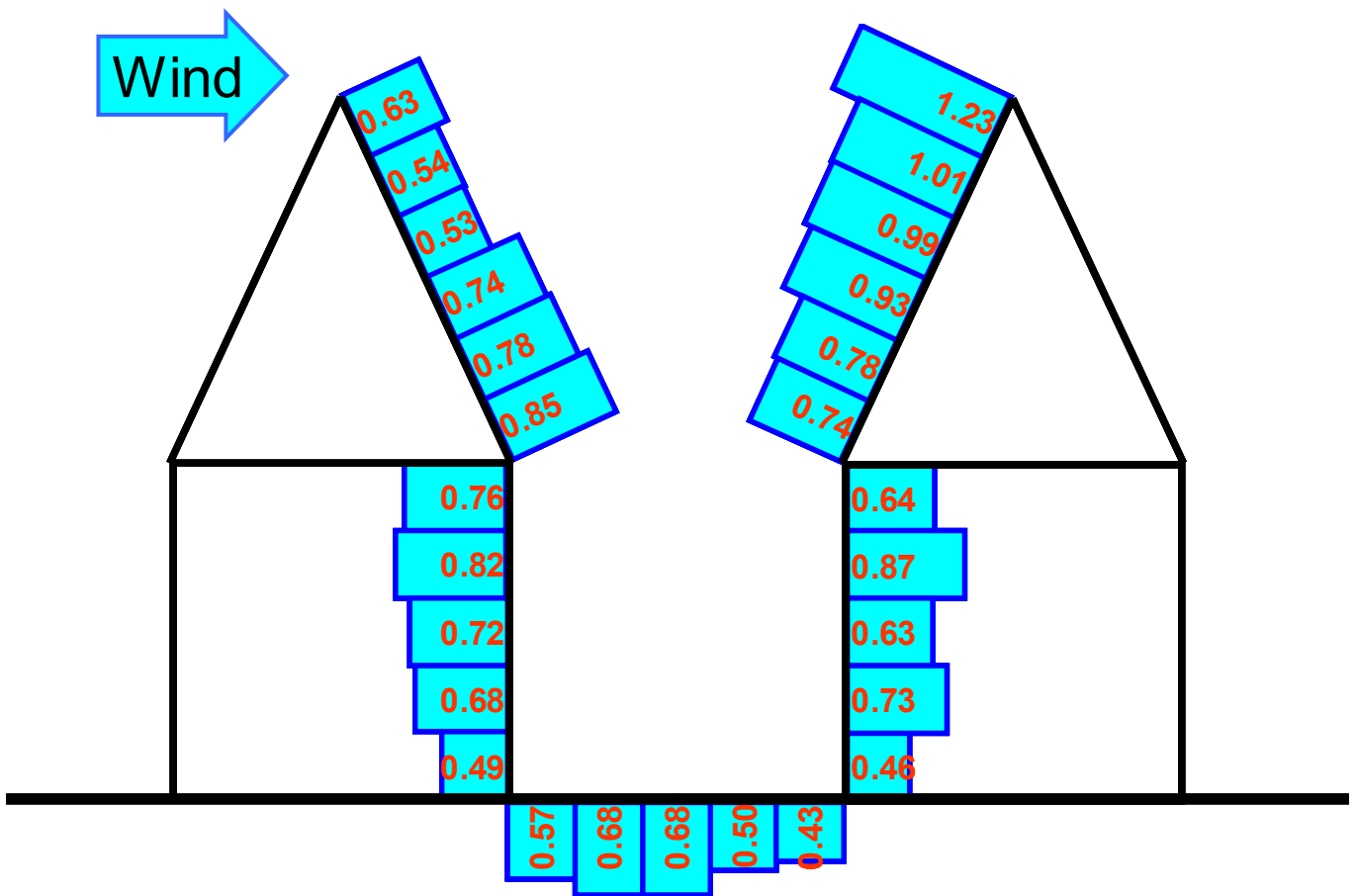


図 4.9 屋根勾配 65.4 度の分割測定による伝達率分布

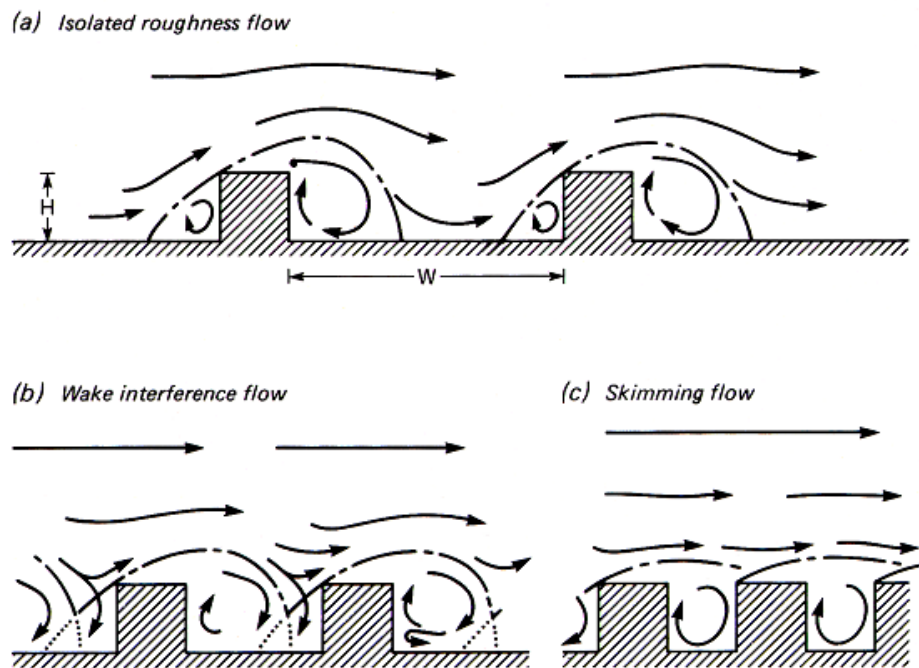


図 4.10 キャノピー層における気流

4.3.2 全面測定による対流伝達率の測定

図4.11～図4.15に軒高基準の $L/H=1$ (模型間隔 50mm)における全面測定による伝達率の値を示す。なお、参考として分割測定により求めた伝達率の平均値をカッコ内に示している。また、図4.16に各構成面別の屋根勾配による伝達率の変化を系統的に表したグラフを示す。図4.16内のRF面とRB面の値に関しては、全面測定を行っていないので、分割測定により求めた値を白ヌキのポイントで区別している。屋根なし時に全面測定を行ったR面は塗りつぶしのポイントにて示している。F面、B面、G面に関しては全面測定から測定した値を使用している。

F面、B面、G面の平均値であるキャニオン内平均伝達率の値は屋根勾配が急になるほどに低下している。つまり、先程の分割測定による考察と同じように、キャニオン内の風通しが屋根の有無、及び勾配の傾斜によって低下したことになる。そしてその結果は勾配が大きいほど数値は低くなっていることがわかる。図4.16からF面とG面にその影響が顕著に表れている。分割測定の結果からは屋根勾配が急になることによって一時的に値が増加する点もみられたが、全体的な面平均としてはF面、B面、G面に囲まれたキャニオン内へ流入する気流が減少し風通しが悪くなったためと考えられる。特にG面に関しては、屋根の勾配が大きくなり、棟高が高くなることによって、気流がG面まで到達する機会が減り、RF面とRB面に囲まれた空間内で完結してしまうような渦が発生したためG面の伝達率が減少したものと考えられる。

F面とB面の関係は、屋根なし時においてはB面よりもF面の方が大きな値となっているが、屋根勾配33.6度でほぼ同等となり、屋根勾配51.3度以上となるとB面にはほとんど変化は無く、屋根を有することによってF面の伝達率が減少しているのがわかる。その差は屋根なし時のF面とB面の比が1.2であったものが0.8になり、F面の量が2/3に減少している。

分割測定により求められたR面の伝達率は、1.16となる。このことから今回の実験においては屋根面の伝達率は勾配が緩い、もしくは屋根が無い方が高いことが明らかとなった。

以上のことから屋根の影響によりキャニオン内の風通しが悪くなったといえ、F面、B面、G面に囲まれたキャニオン内の伝達率の減少は屋根による影響であるといえる。

今回の実験においては、ある勾配の屋根を持つ建物が連続していた場合、分割測定による結果の考察により、RB面とRF面に囲まれた空間の中において循環流が発生すると考えられるため、F面、B面、G面に囲まれたキャニオン内へは風の流入が屋根なし時と比べて極端に減少することにより、特にG面の伝達率に大きな影響を与えたと考えられる。

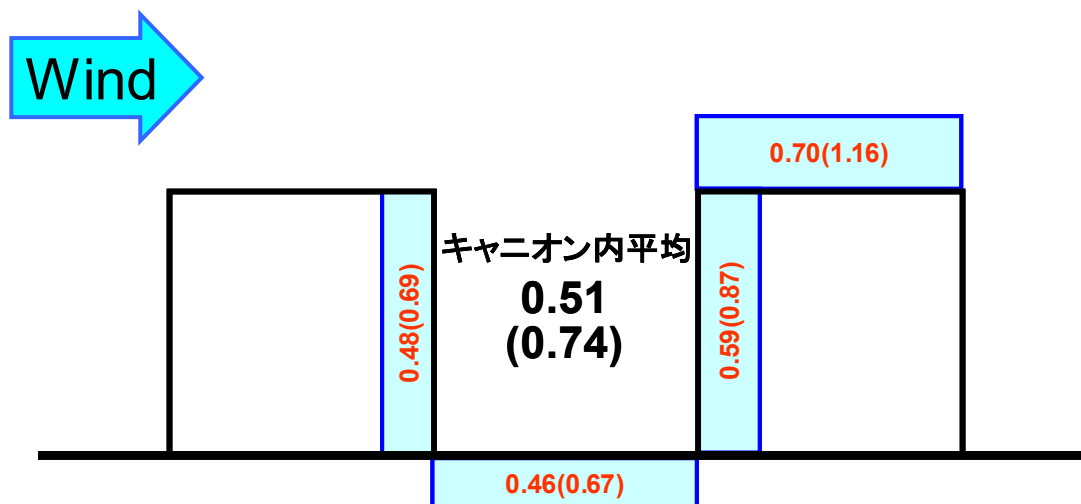


図 4.11 屋根なし 全面測定による構成面別伝達率

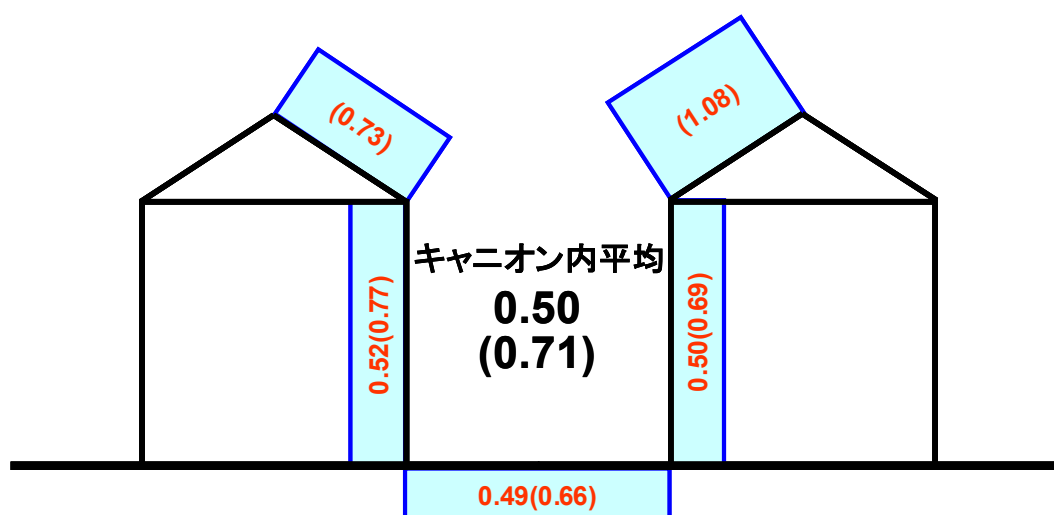


図 4.12 屋根勾配 33.6 度 全面測定による構成面別伝達率

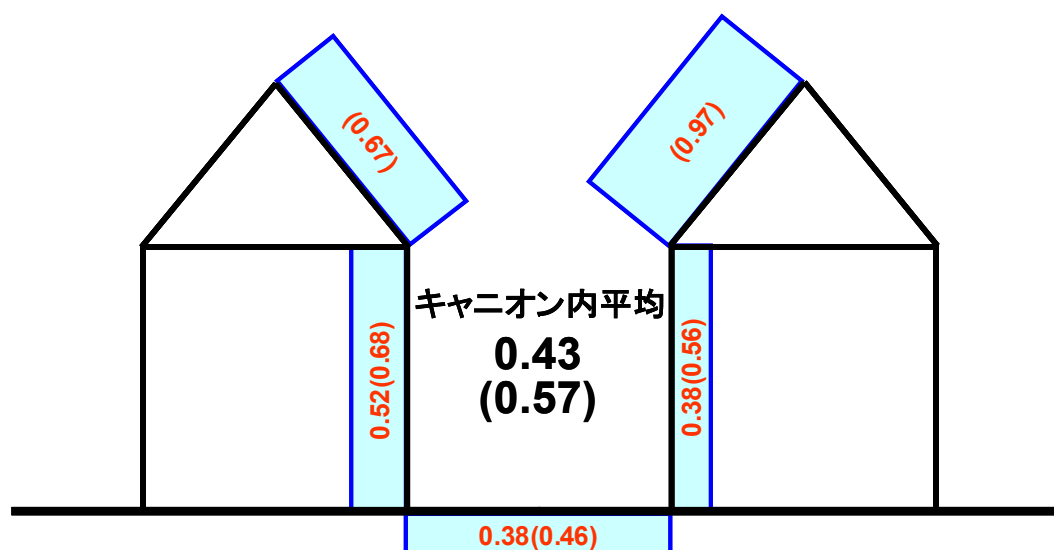


図 4.13 屋根勾配 51.3 度 全面測定による構成面別伝達率

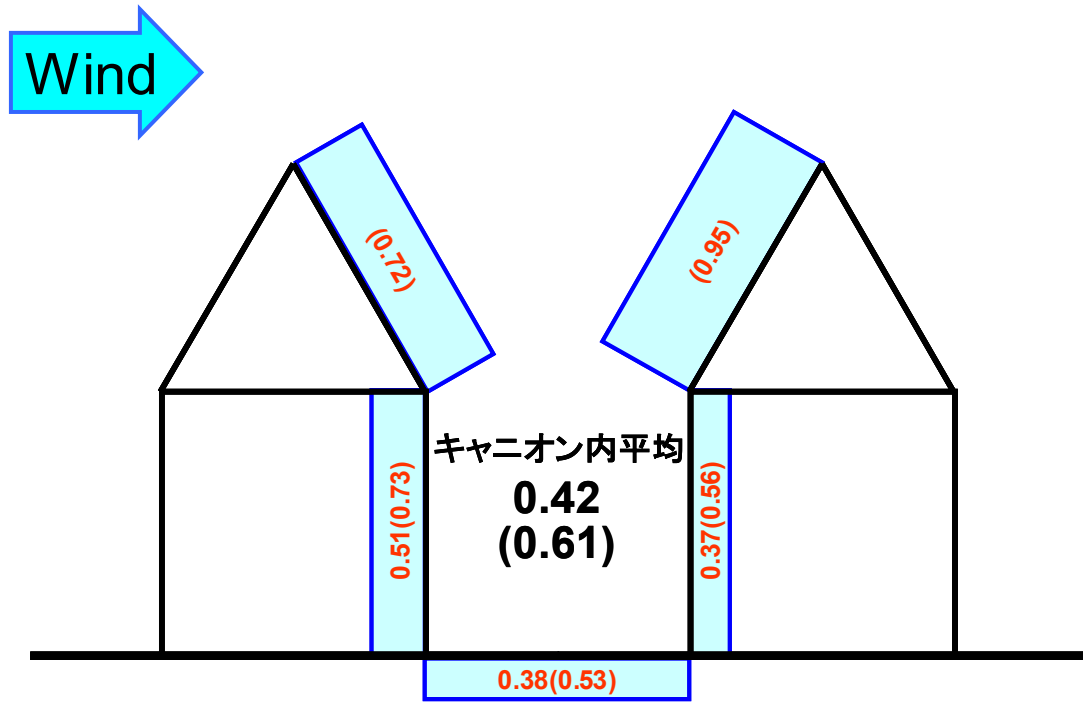


図 4.14 屋根勾配 60 度 全面測定による構成面別伝達率

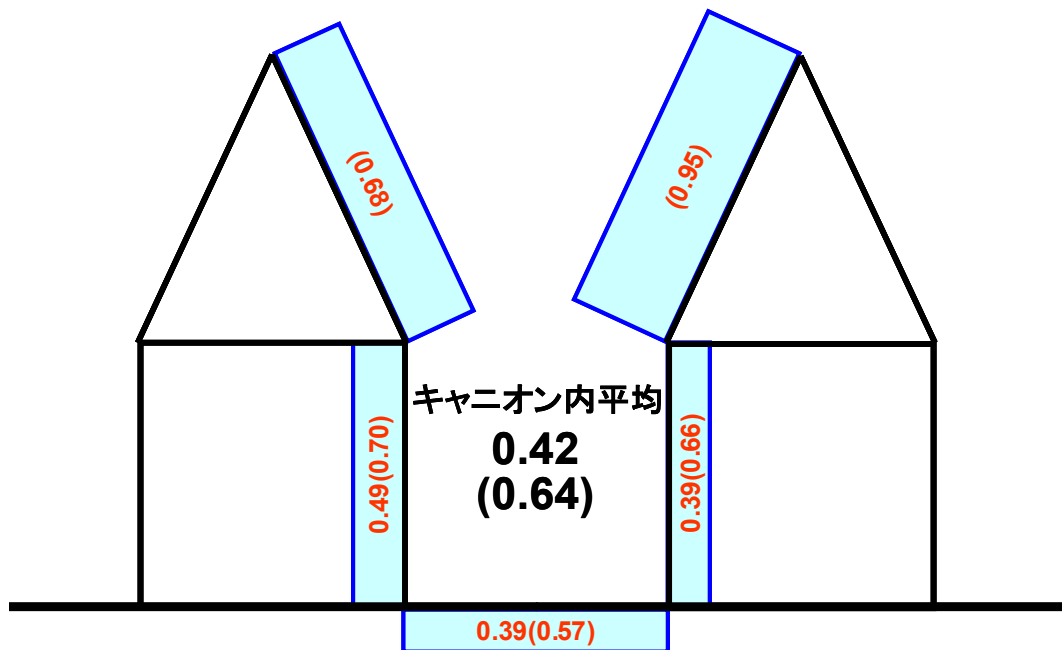


図 4.15 屋根勾配 65.4 度 全面測定による構成面別伝達率

全面測定の値
(分割測定から求めた面平均値)

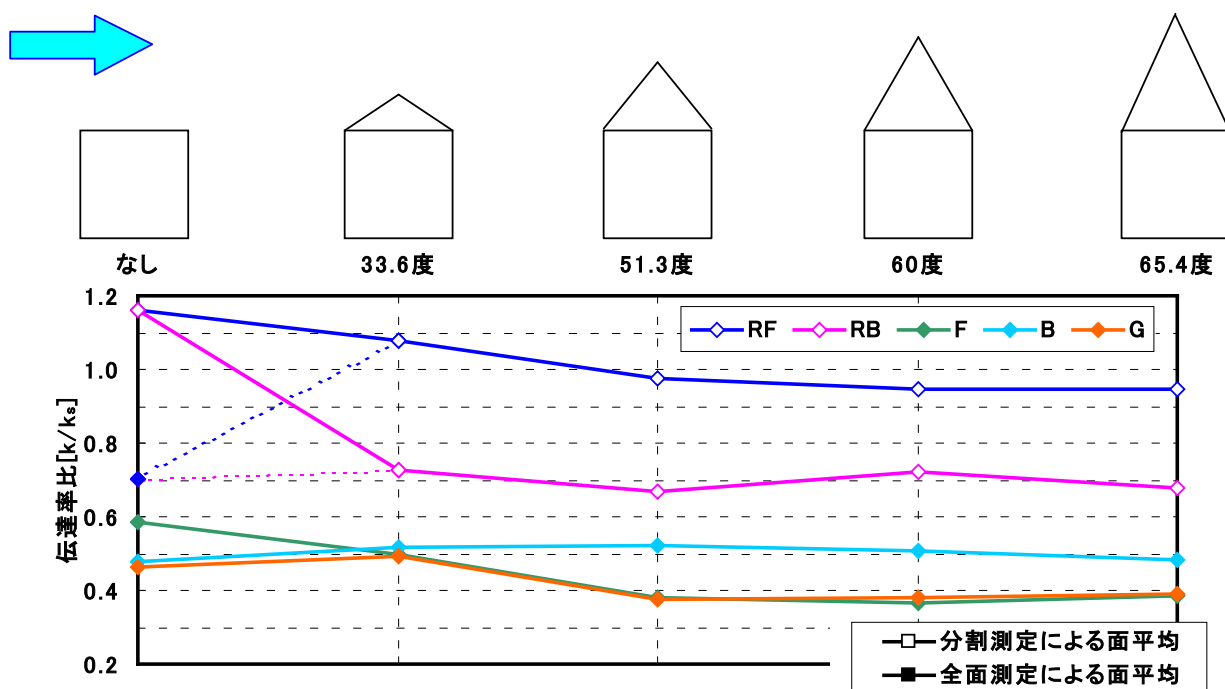


図 4.16 各構成面別における屋根勾配の差異による伝達率の変化

4.4 建物高さと建物間隔による変化

4.4.1 模型の基準高さと模型の間隔の比による検討

図4.17～19は各勾配屋根の基準高さに対する模型間隔 L/H と伝達率の関係を示したものである。これまで行われてきた立方体模型による実験では、基準高さを模型の軒高と定めて検討を重ねてきた。しかし、今回のように屋根を有する模型を使った実験は現在まで行われておらず、軒高を建物の代表高さとして用いてよいという検証は得られていない。そこで、模型の基準高さをいくつか用意し、その基準高さに対する街路空間の縦横比を固定した場合の測定を行い、屋根を有する建物模型を使用する場合は基準高さをどの点にするのが妥当であるかという意図の下、検証を行った。

基準となる高さは3点用意した。従来通りの軒高基準、そして、測定模型中最高点となる棟高基準、さらに、軒高と棟高の中間にあたる平均高さも用意し、基準高さとした(図4.4)。

F面に関しては図4.19の棟高を基準とした場合が比較的まとまりのある変化をしている。伝達率の大小も屋根勾配の大きさに準じているのがわかる。棟高基準による変化は十分な模型間隔で勾配の大小による伝達率の明確な差異と捉えることができた。一方で、図4.17の軒高基準の $L/H=1$ 以下に関しては伝達率の大小関係が屋根勾配の大小と関連を持っておらず、特に屋根勾配の大きい65.4度については、 L/H の変化による伝達率への影響が全くみられなかった。これは、屋根勾配65.4度の棟高に対して、軒高を基準に L/H の変化では、棟高に対する L の間隔が不十分であり、 L/H を変化させても、建物キャノピー内での気流変化が起こるほどに模型間隔を広げられなかったということが考えられ、これまでのように軒高を基準として検討を重ねると、特に屋根勾配が大きいケースに関しては十分な模型間隔をとることができず伝達率の変化を捉えることができない可能性があることが示唆される。

B面に関しては、どのケースについてもしっかりとしたまとまりのある変化をしており、おおむね良好であると考えられる。B面は模型間隔が広がるほど隣接する建物の影響を受けにくくなるので、 L が広いほど伝達率が高くなっている。しかし、 L の大小に関わらずB面は常にウェイクであるため、F面ほど伝達率への影響は少ないと考えられる。

以上のように、屋根を有する建物模型に関する研究においては、屋根の勾配を考慮した建物高さによる街路空間縦横比を変化させる必要があることが明らかとなった。今後も、屋根勾配を有する建物模型の基準高さについては検討を重ねる必要があるが、少なくとも従来通りの軒高を建物高さとして定めて L/H を変化させると、図4.17のように屋根勾配が大きいケースに関しても十分な L を確保できないため、好ましくないと考えられる。

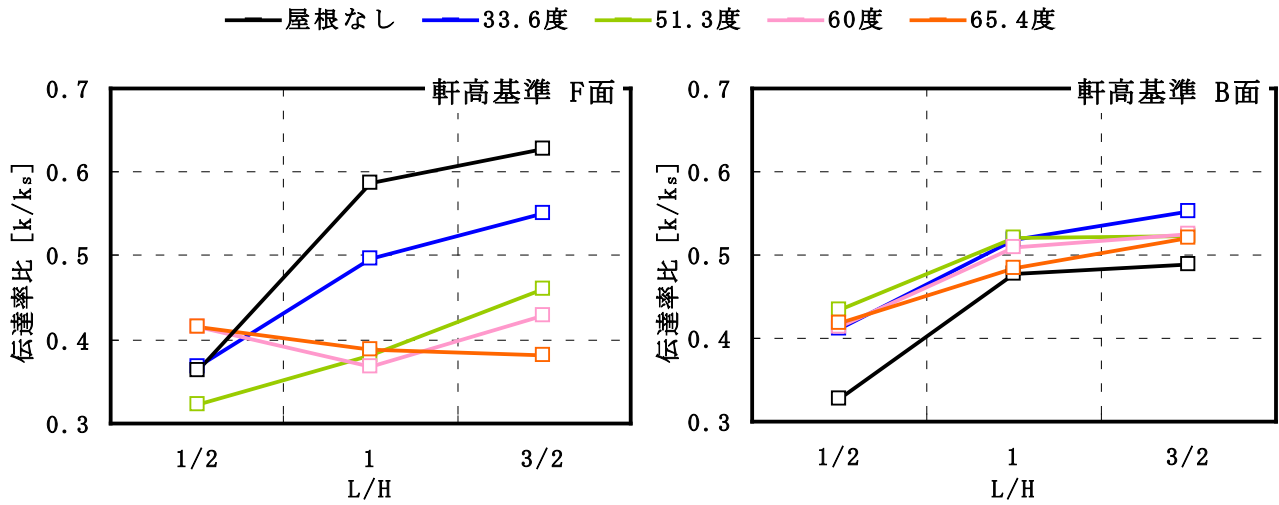


図 4.17 各屋根勾配における軒高を基準とした L/H と伝達率の関係

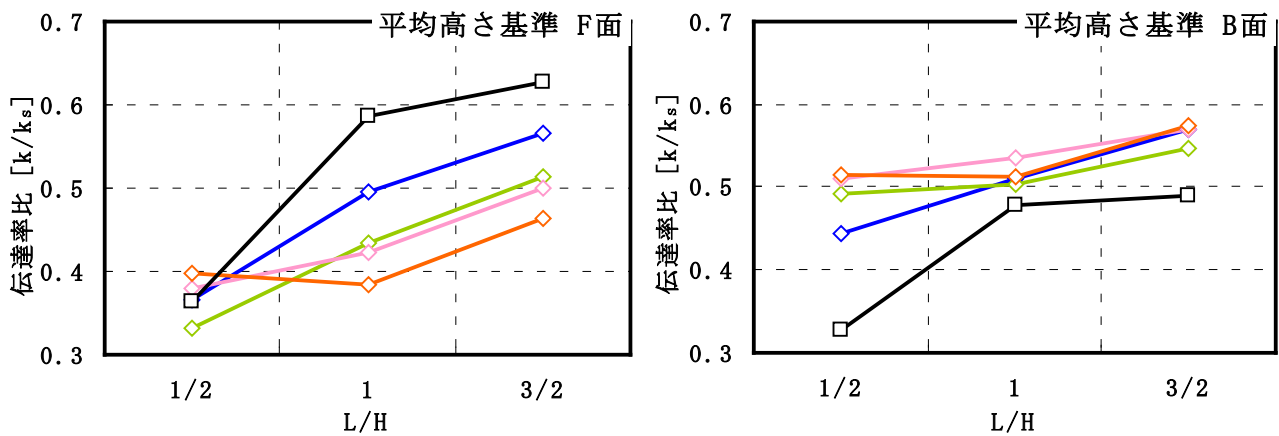


図 4.18 各屋根勾配における平均高さを基準とした L/H と伝達率の関係

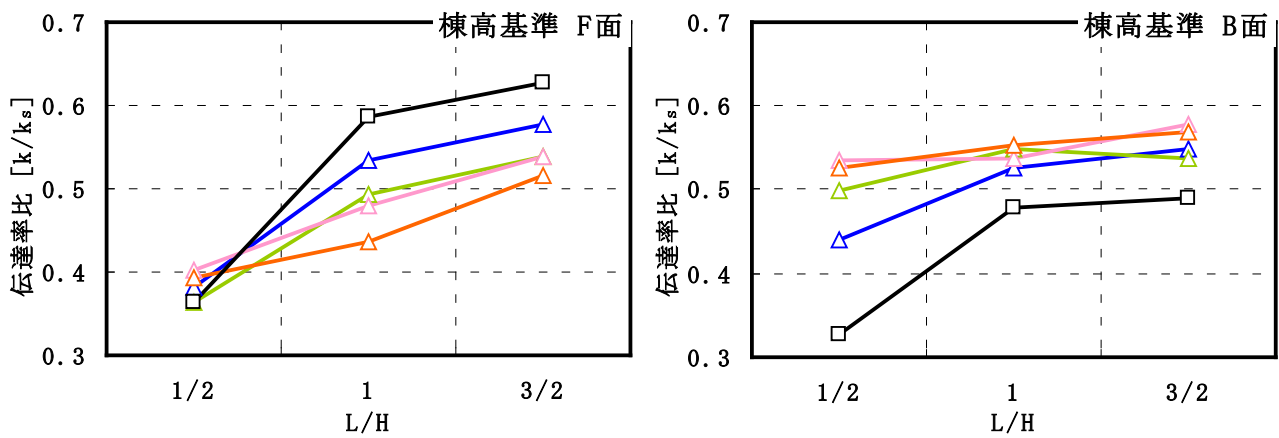


図 4.19 各屋根勾配における棟高を基準とした L/H と伝達率の関係

4.4.2 同一の屋根形状を有する場合の模型間隔順による比較

図 4.20 は同一の屋根勾配ごとの伝達率を模型間隔順に示したものである。また、図 4.21 は F 面と B 面の差を表したものである。

屋根無しのケースについては、軒高=棟高となるので、 L/H は $1/2$ 、 1 、 $3/2$ の 3 ケースのみとなる。 L が広がるにつれて伝達率が高くなる。また F 面と B 面の大小関係は F 面の方が大きくなっている。しかし、屋根勾配 33.6 度の L が狭い段階においては、屋根なし時とは F 面と B 面の関係が逆になるという結果になった。その後、 L が約 100mm となったところで F 面・B 両の関係が屋根無し時と同様になっている。

屋根勾配 51.3 度においても勾配 33.6 度と同じように L が狭い段階においては F 面よりも B 面の方が高いという結果になっても、 L が大きくなるごとにその差は縮まっている。

その後の 60 度、 65.4 度についても同じ傾向が現れ、 L が最大となった点において、屋根勾配 33.6 度のように F 面と B 面の関係が逆転することはなかったものの、徐々にその差を縮めているのが図 4.21 から読み取れる。

B 面は、屋根の有無に関わらず常にウェイク領域に入っている。しかし、F 面に関しては、ウェイクになるか、気流が直接当たるかは、その屋根勾配の大小と、隣接する模型との距離によると考えられる。例えば、建物間の間隔が狭かったとしても、屋根なし時において F 面の上端には常に気流が直接当たるために伝達率は B 面よりも相対的にみて高く出ている。しかし、屋根の存在によって、上方に吹き上げた気流は F 面に当たる機会はその勾配が大きくなるごとに少なくなってくる。よって、屋根勾配が大きいことによって F 面付近の気流のよどみが発生し、B 面近傍の環境と似通ってくるため、F 面と B 面の差異は小さくなり、伝達率もほとんど一緒に近い値になっている。

模型間隔を徐々に広げていくことによって、剥離した気流が再付着の影響によって、水平気流および若干の下降気流となり、さらに模型間隔を広げることによって、ある距離に達した時点で周囲の建物の影響を受けない点が出てくるものと考えられる。その点が、図 4.20 でいう勾配 33.6 度の F 面と B 面の関係が逆転している点であると言える。

今回の屋根を有する建物模型を使用したケースにおいては、F 面と B 面の関係が逆転して、隣接する建物の影響を受けない距離になるまでは測定を行っていないが、図 4.21 の F 面と B 面の差が縮まっている傾向をみると、さらに L を広げることによって建物模型が単独で立っているような条件に近くなることは十分考えられる。また、この逆転する点が、F 面がウェイク領域から外れ、気流が直接当たっている要素が上回っている点であると考えられる。

図 4.22 は図 4.20 をまとめ、F 面と B 面とに分けたものである。既に述べたように、B 面は常にウェイクとなっているので、一定の間隔以上となってしまうと伝達率の上昇はほとんどみられない。しかし、F 面は L が小さく勾配が大きいケースでは完全なウェイク領域に入っていると考えられるので伝達率は低くなっている。しかし、 L が徐々に広がっていくことによって、F 面に気流が直接当たる機会が増え、伝達率も屋根勾配が小さいものから順に伝達率の上昇がみられているものと推察される。

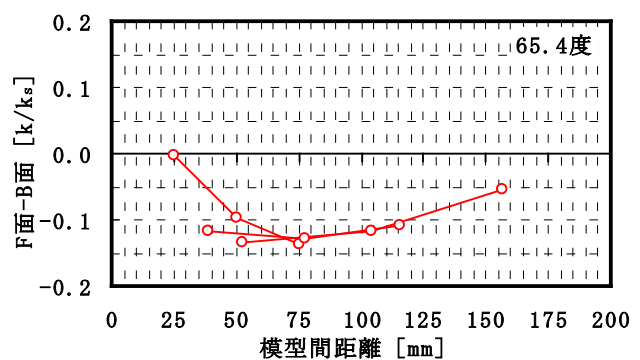
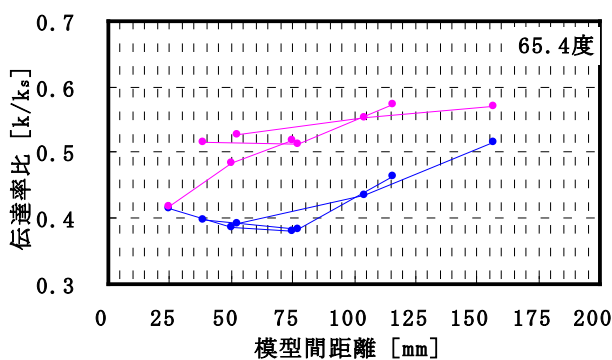
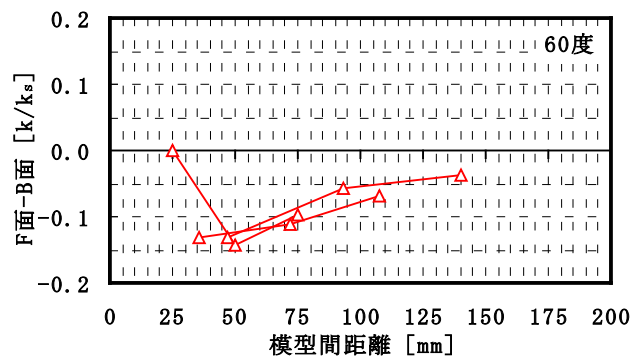
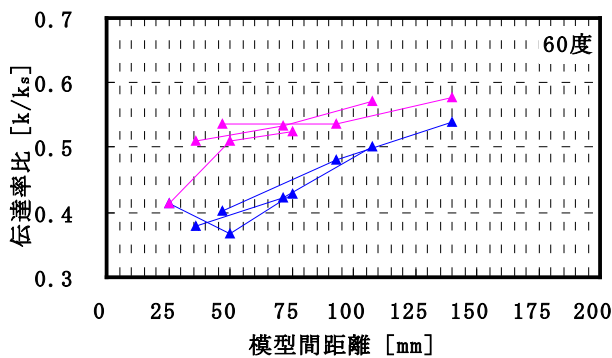
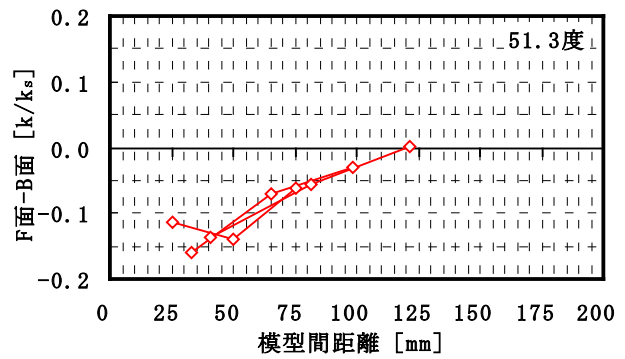
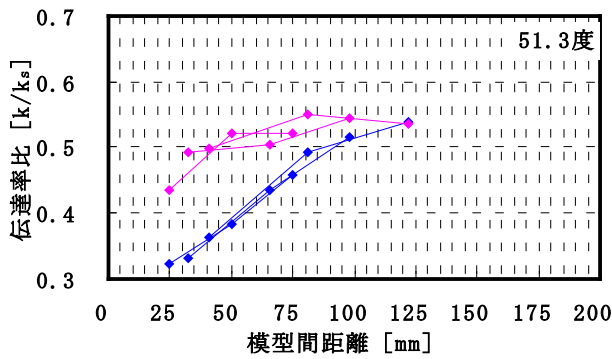
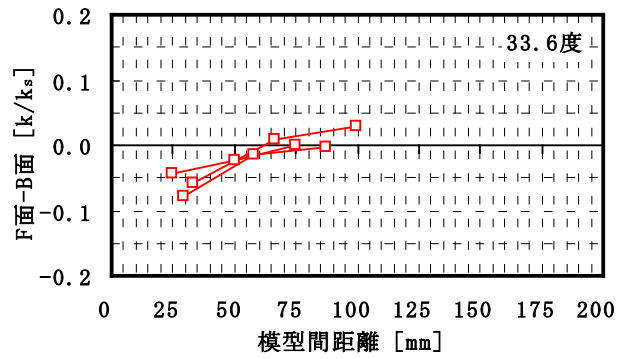
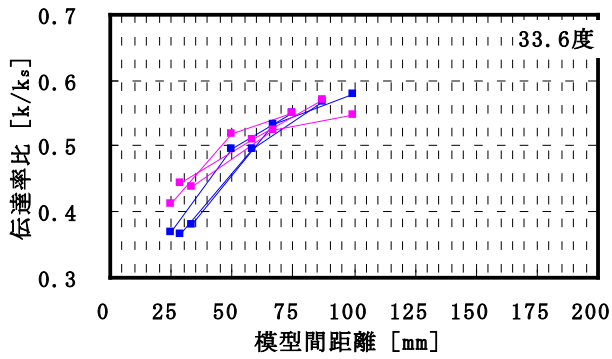
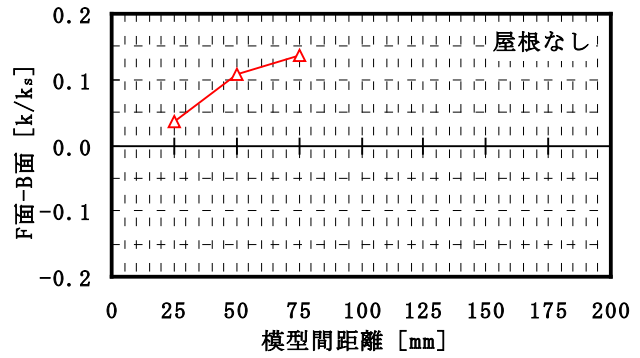
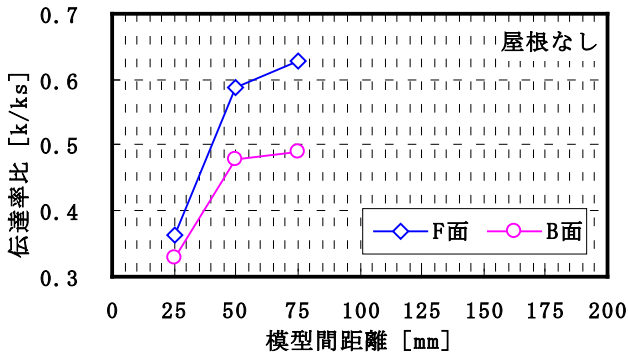


図 4.20 模型間隔と伝達率 (屋根勾配別)

図 4.21 模型間隔と F 面・B 面の差

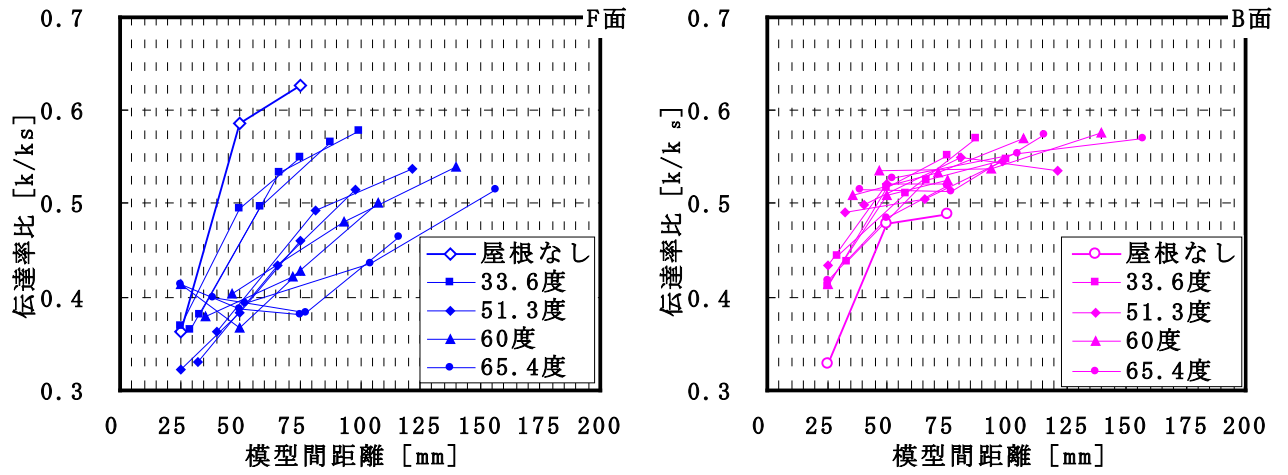


図 4.22 模型間隔と鉛直壁面の伝達率（壁面別）

4.5 小結

本章では、屋根形状および模型間隔を系統的に変化させた2次元街路における伝達率のふるまいを明らかにした。

L=50mm 時のキャニオン内の詳細な伝達率分布と、模型間隔を建物高さ基準で系統的広げた場合のF面とB面の2面における関係をそれぞれ考察した。

詳細な伝達率分布においては、屋根なし時において、既往の研究と同様の分布があることを確認した。また、屋根の勾配が急になるごとにキャニオン内の伝達率は減少することがわかり、今回の測定ケースに関して言えば屋根の存在によってキャニオン内の風通しが悪くなったと判断できる結果になった。構成面別にみると、屋根の勾配が大きくなるにつれてF面の値は小さくなる。一方、B面に関しては、分布の形態は大きく変化するが、面平均としてはF面ほどの伝達率の減少はみられないことがわかった。

模型間隔を変化させて行った全面測定による実験においては、F面とB面において関係が逆転する点を屋根勾配 33.6 度にて捉えることができた。他の屋根勾配に関しては今回の測定ケースでは捉えることができなかったが、一様にF面とB面の関係が逆転傾向に向かっていた。

第5章 実在市街地模型を用いた対流伝達率分布の検討

5.1 実験目的

これまで、幾何学的な配列に関する研究は2次元配列、3次元配列を合わせて多くのケースについて実験を行ってきた。しかし、実在の都市においてこれほどまでに建物形状が整い、連続性を持った街はほとんど見受けられず、これまでのような単純均等配列による実験結果が現実の複雑な市街地の状況をどれほどまでに再現しているのかは不明である。大抵の場合は建物高さ、屋根形状はもちろん、建物との間隔や建ぺい率、散在する公開緑地などとの関係によって都市の生活レベルへ流れ込んでいる気流はより複雑になっていると考えられる。よって伝達率のふるまいもこれまでの整形された均等配列と比べても格段に複雑となっていると考えられる。そこで本章ではより実在市街地に近い形状を持つ実在市街地縮小模型を用いて伝達率の測定を行うことを目的としている。

5.2 実験内容

本章では直径2mの円形テーブルに1/750スケールの実在する市街地が作成されている実在市街地模型を使用した。この市街地模型は木製となっており環境アセスメントの周辺気流への影響調査などでも用いられる精密な造りとなっている。実在市街地模型は風洞内のターンテーブル用に設けられた穴に入れ、電動モータでターンテーブルを回転させることによって風向の変化が容易に可能になっている。

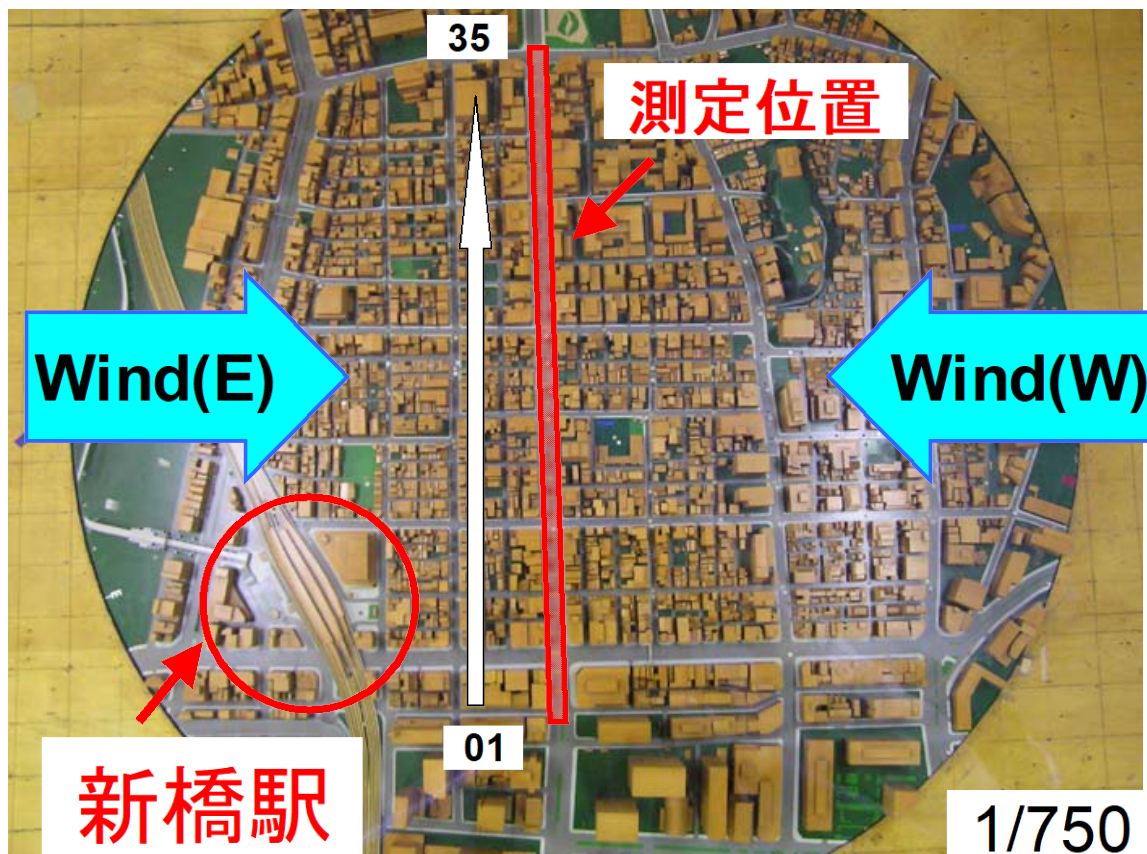


写真 5.1 実在市街地模型

対象となる測定区間は写真 5.1 内の赤の帯で示した日比谷通りの区間である。測定点は西新橋交差点新日本石油本社付近（測定点 No. 01）～御成門交差点ナショナルビル付近（測定点 No. 35）で、実距離にして約 1000m である。試料面積の決定は、市街地模型上の対象街路の幅員がおおよそ 37mm であったため、試料が正方形となるように 37mm×37mm とし、ターンテーブル内に収まるよう対象街路を 35 分割した。測定対象面は路面のみ行った。

測定における風向は測定対象街路を風路に対して直角になるよう設置して測定した後、ターンテーブルを 180 度回転させて測定を行い、同一街路における 2 風向の風による伝達率への影響を把握するための測定を行った。以降、実際の風向 110° を E とし、290° を W と表現する。測定点付近の地図を図 5.2 に、市街地模型の測定点を写真 5.2 に示す。



図 5.2 測定点付近地図



写真 5.2 測定点 No. 01

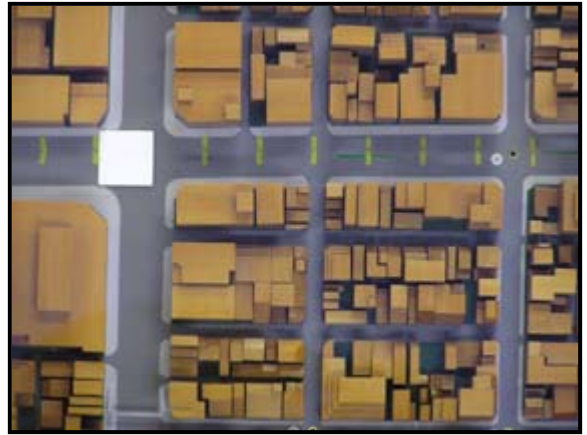


写真 5.2 測定点 No. 02

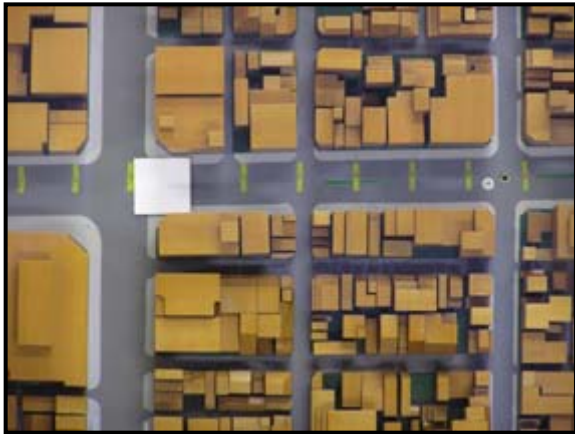


写真 5.2 測定点 No. 03

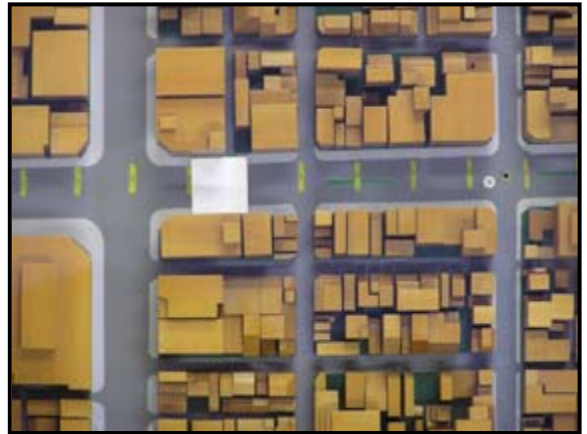


写真 5.2 測定点 No. 04



写真 5.2 測定点 No. 05

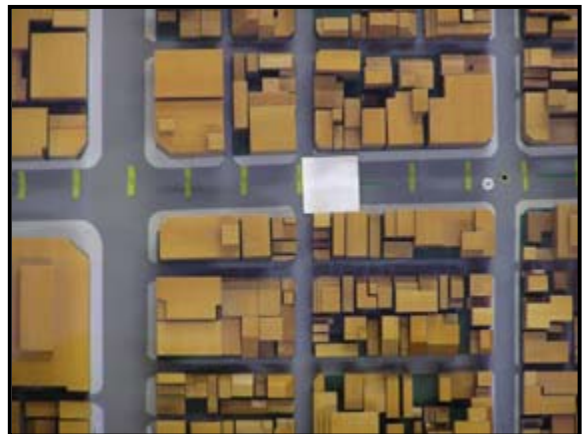


写真 5.2 測定点 No. 06



写真 5.2 測定点 No. 07



写真 5.2 測定点 No. 08



写真 5.2 測定点 No. 09

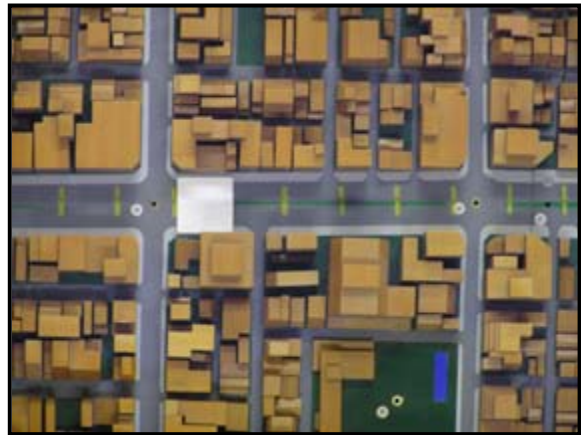


写真 5.2 測定点 No. 10



写真 5.2 測定点 No. 11



写真 5.2 測定点 No. 12

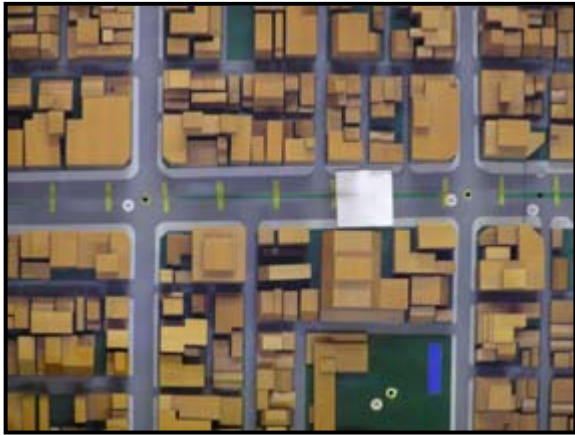


写真 5.2 測定点 No. 13

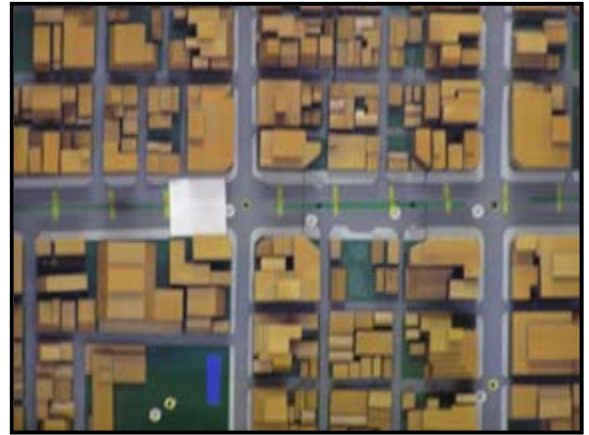


写真 5.2 測定点 No. 14

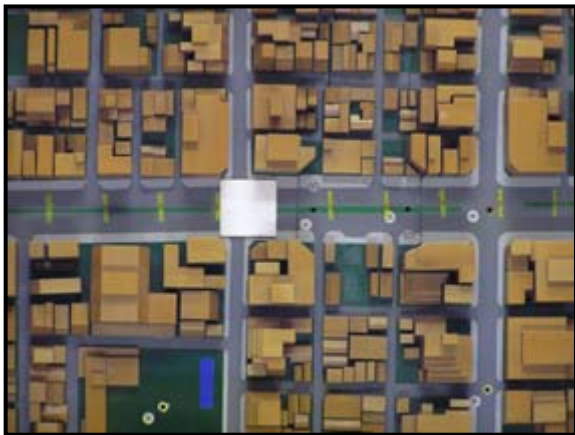


写真 5.2 測定点 No. 15

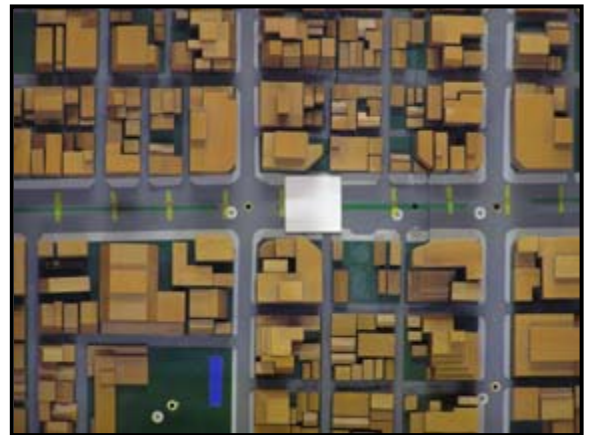


写真 5.2 測定点 No. 16



写真 5.2 測定点 No. 17



写真 5.2 測定点 No. 18

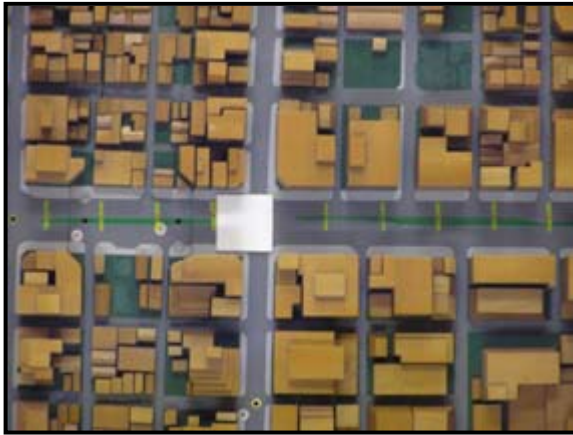


写真 5.2 測定点 No. 19



写真 5.2 測定点 No. 20

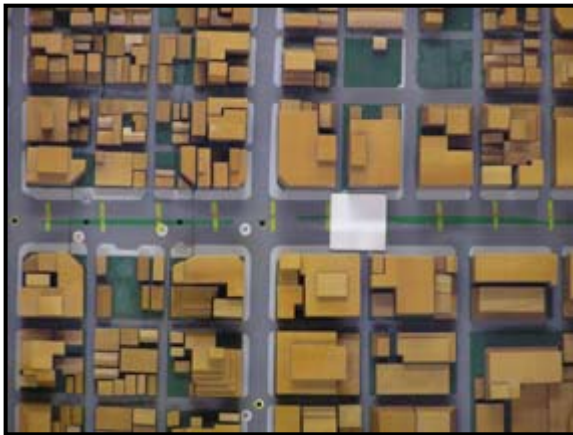


写真 5.2 測定点 No. 21



写真 5.2 測定点 No. 22



写真 5.2 測定点 No. 23



写真 5.2 測定点 No. 24



写真 5.2 測定点 No. 25



写真 5.2 測定点 No. 26



写真 5.2 測定点 No. 27



写真 5.2 測定点 No. 28



写真 5.2 測定点 No. 29



写真 5.2 測定点 No. 30

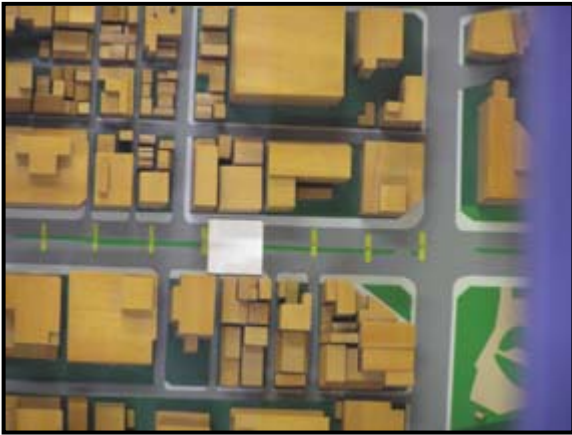


写真 5.2 測定点 No. 31



写真 5.2 測定点 No. 32



写真 5.2 測定点 No. 33



写真 5.2 測定点 No. 34



写真 5.2 測定点 No. 35

5.3 同一街路における伝達率分布の測定

5.3.1 街路全面の把握

図 5.3 は 35 分割された測定対象街路上の伝達率分布を示したものである。また、表 5.1 は各点の伝達率を数値で示している。測定点ごとのバラツキが大きくみられる。しかし、街路全面の伝達率の平均値としては E、W 共に 0.60 となり。今回測定対象となった街路では、街路に直行する風向においては風向変化による影響はみられないという結果になった。

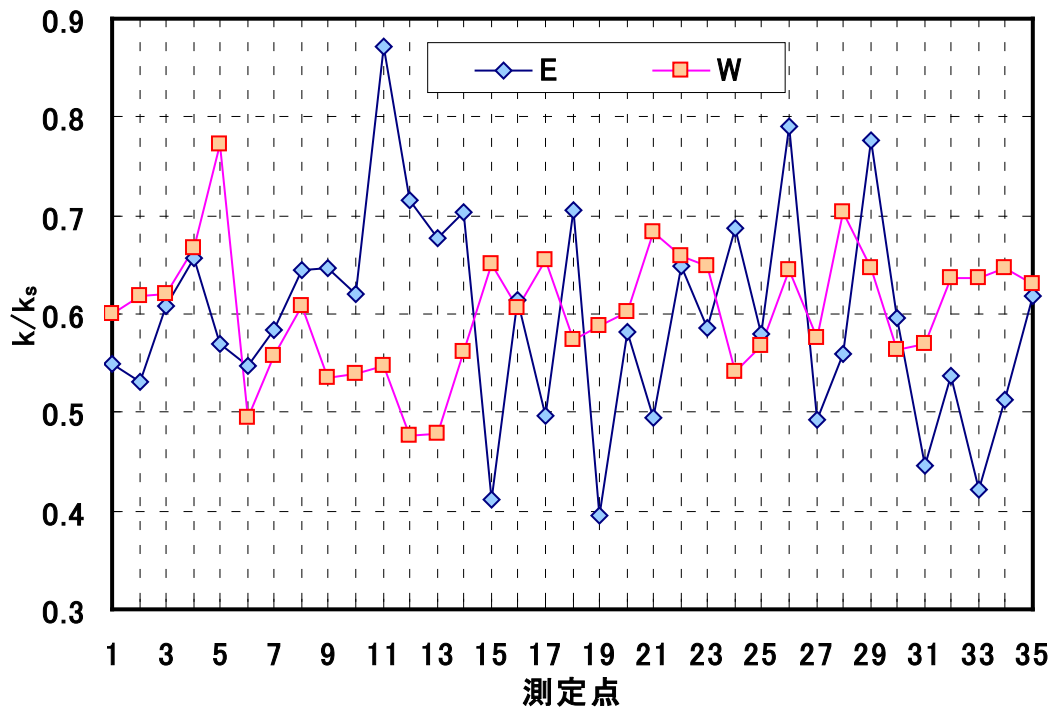


図 5.3 同一街路上の伝達率分布

表 5.1 各点ごとの E・W の伝達率比と E/W

point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E	0.57	0.57	0.63	0.69	0.59	0.58	0.63	0.67	0.68	0.65	0.94	0.74
W	0.64	0.65	0.65	0.70	0.81	0.55	0.61	0.65	0.58	0.58	0.59	0.51
E/W	0.90	0.87	0.97	0.99	0.73	1.06	1.03	1.03	1.18	1.12	1.60	1.44

point	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
E	0.73	0.72	0.44	0.64	0.54	0.73	0.42	0.61	0.53	0.68	0.63	0.72
W	0.51	0.60	0.69	0.64	0.69	0.64	0.65	0.66	0.73	0.71	0.71	0.59
E/W	1.42	1.21	0.64	1.00	0.79	1.15	0.66	0.93	0.72	0.95	0.89	1.21

point	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
E	0.62	0.84	0.52	0.60	0.82	0.64	0.47	0.58	0.44	0.55	0.65
W	0.62	0.70	0.63	0.77	0.70	0.72	0.72	0.77	0.78	0.78	0.74
E/W	1.00	1.20	0.83	0.78	1.18	0.89	0.65	0.74	0.57	0.70	0.88

図 5.4 は風向 W に対する風向 E の伝達率比を表したもので、1.0 より高い点は風向 E による影響を強く受け、1.0 よりも低い点は風向 W からの影響を受けていることを示している。測定点 No. 1 から No. 5 までは風向 W の影響が強くみられ、No. 06～No. 14 までは風向 E の影響が強くみられた。No. 15 以降はおおむね風向 W の影響が強いものの、E/W が 1.0 とほとんど変わらないという点も点在している。

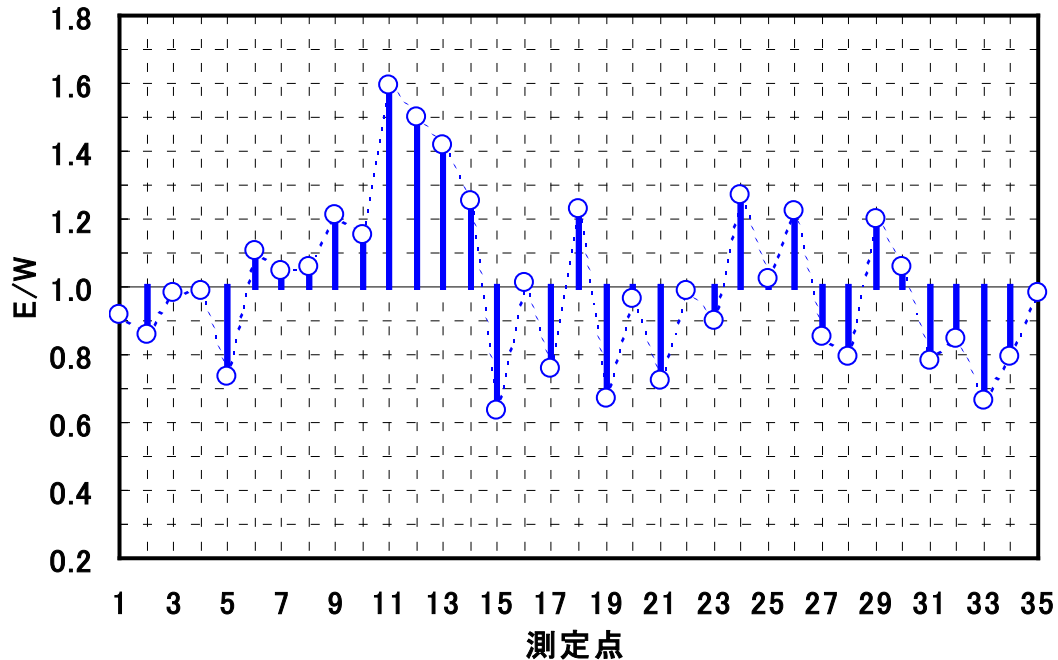


図 5.4 E と W の伝達率分布比

5.3.2 各測定点の特徴

図 5.5 は測定街路に接する建物の幅、高さを断面図で示したものである。図中に示した測定点の上段が街路の E 側に隣接している建物の断面、下段が W 側の建物断面を表している。測定点内の凡例は上段が測定点の番号で下段が伝達率を表している。伝達率は、左が風向 E によるもの、右が風向 W によるものである。また、図 5.6 は各測定点の値をグラフにて表現している。

測定点 No. 16～No. 18 の間において E、W 共に一部建物高さが低くなっている区間が存在している。これは将来の都市計画用に建築制限が掛けられている区間であり、将来計画では道路となる計画になっている。

街路内において他の測定点とは異なる交差点に注目をした。測定点でいうと No. 2、9、15、19、26、35 となる。なお、測定点 No. 2 は外堀通りである。図 5.6 を見る限り、交差点においても他の点と変わった特徴はみられない。むしろ、No. 35 のような隣接する建物が全く無い点においても伝達率は低く、平均値前後の値となった。

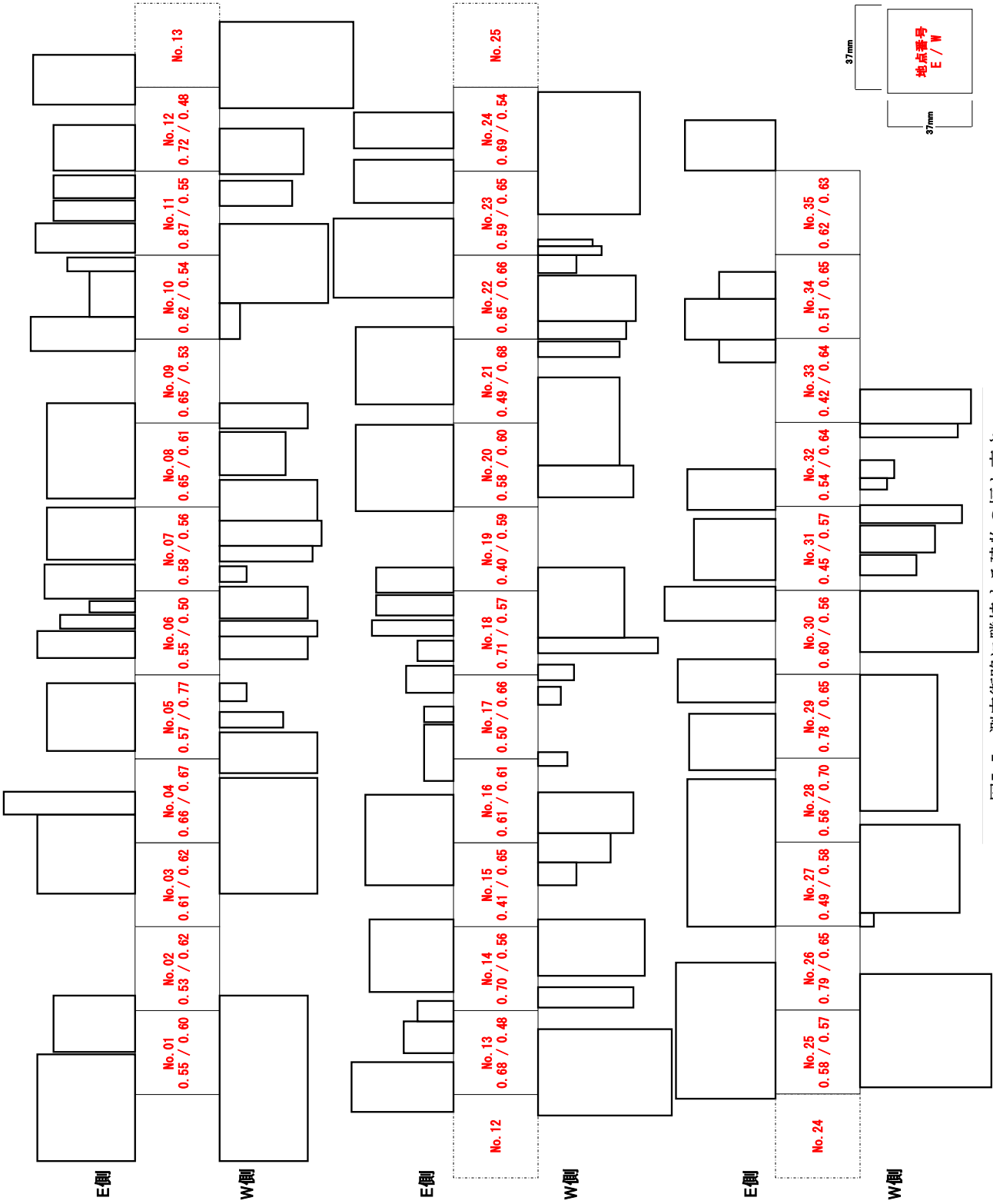


図5.5 測定街路に隣接する建物の幅と高さ

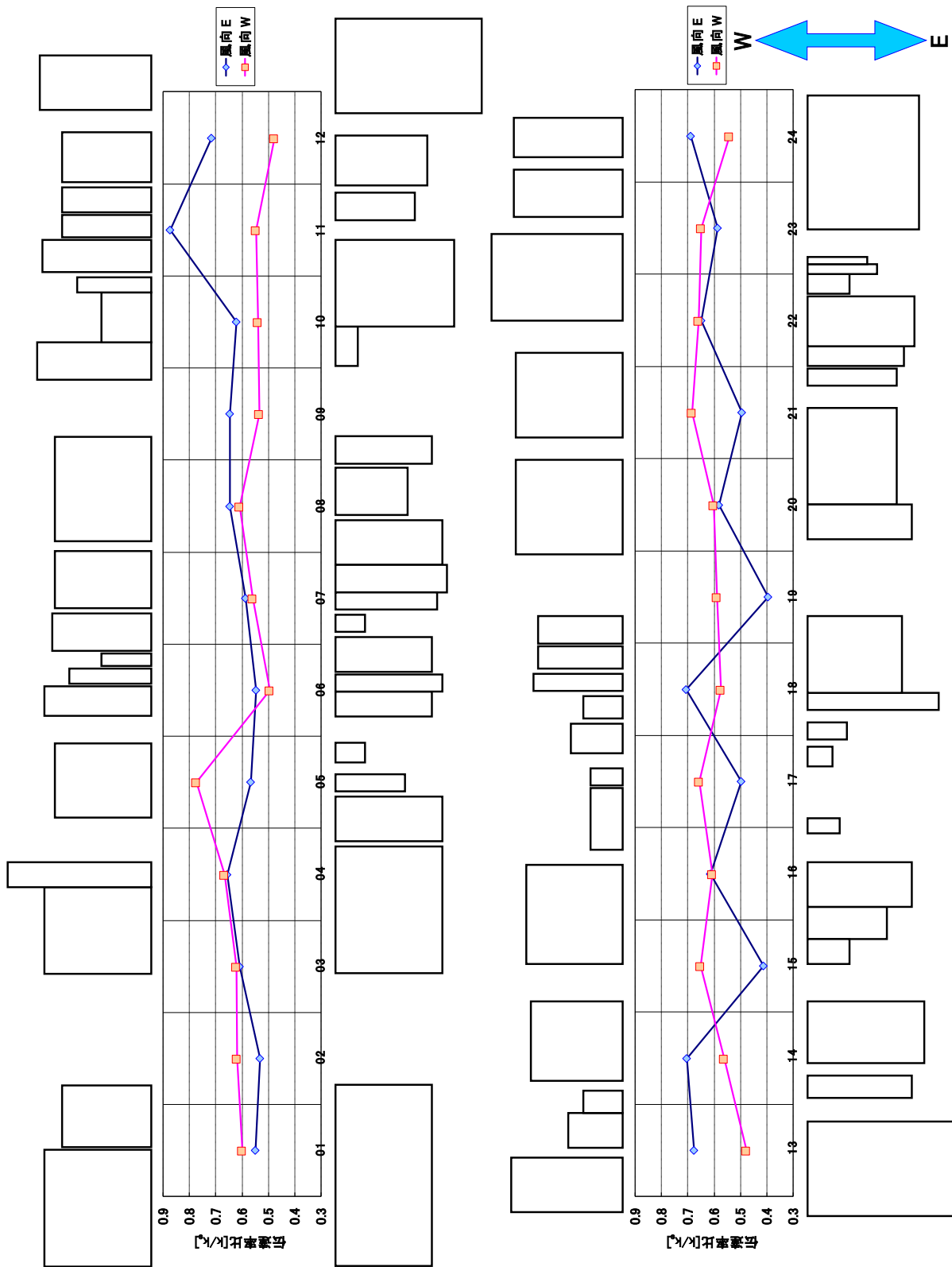


図5.6 街路に隣接する建物と2風向による伝達率の関係

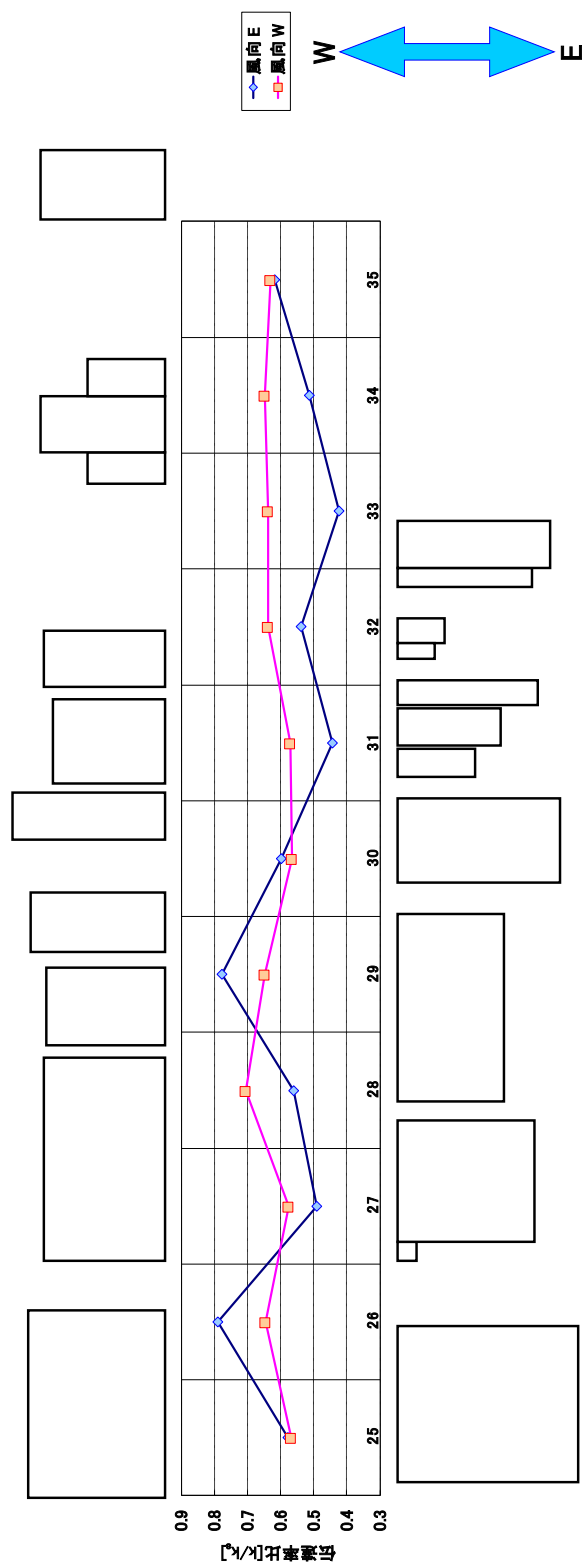


図5.6 つづき 街路に隣接する建物と2風向による伝達率の関係

5.4 隣接する建物による伝達率への影響

5.4.1 隣接する建物高さとの関係

将来道路が敷設される予定の No. 16～No. 18 は E 側と W 側の全建物の平均高さからおよそ 1/3 程低層の建物が建っている。一見、風の道となり得る環境にあると思われたが、今回対象とした路面表面による測定においては特に他のポイントと変わった様子はみうけられない。今回は可視化による実験を行っていないが、もし No. 16～No. 18 の低層建築により風の道が形成されていたとすると、今回測定を行っている街路表面を沿うような気流ではなく、低層建物の屋根上において発生していたと考えられる。

図 5.7 は各測定点における E 側、W 側の平均建物高さとの関係を表したものである。建物が隣接していなくても、高層建築が隣接していても伝達率には特に影響は表れておらず、横長の分布になっている。風向 W による伝達率の方が若干伝達率のばらつきは少ないようにみられるが、建物高さとの相関関係は確認できなかった。

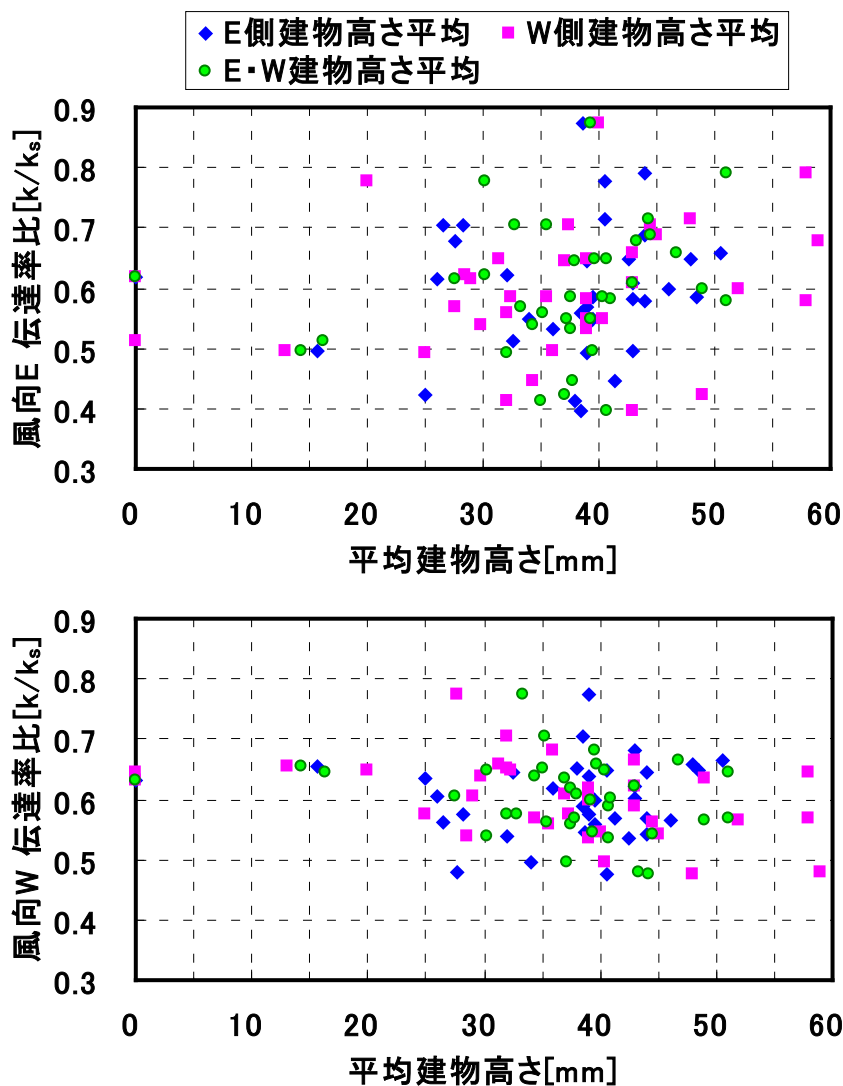


図 5.7 平均建物高さとの関係

写真 5.3 は高い建物と相対的に低い建物が並んでいた場合、気流の方向によって、建物間の気流の形成が全く異なることを示した参考写真である（風工学研究所編『新・ビル風の知識』）。左側の写真は風上側に低い建物を配置した場合、右の写真は風上側に高い建物を配置した場合の気流の様子である。風上側に高い建物がある場合は、建物間の流れ場は比較的静穏で、明確な循環流は形成されていないのに対し、風下側に高い建物がある場合には、明確な循環流が発生し、風速もきわめて速くなっているのがわかる。

このように、ある地点にて両端の建物高さの平均が同じであったとしても、建物の大小関係、および風向によって、そのキャノピー内に形成される流れ場は全く異なったものになる。

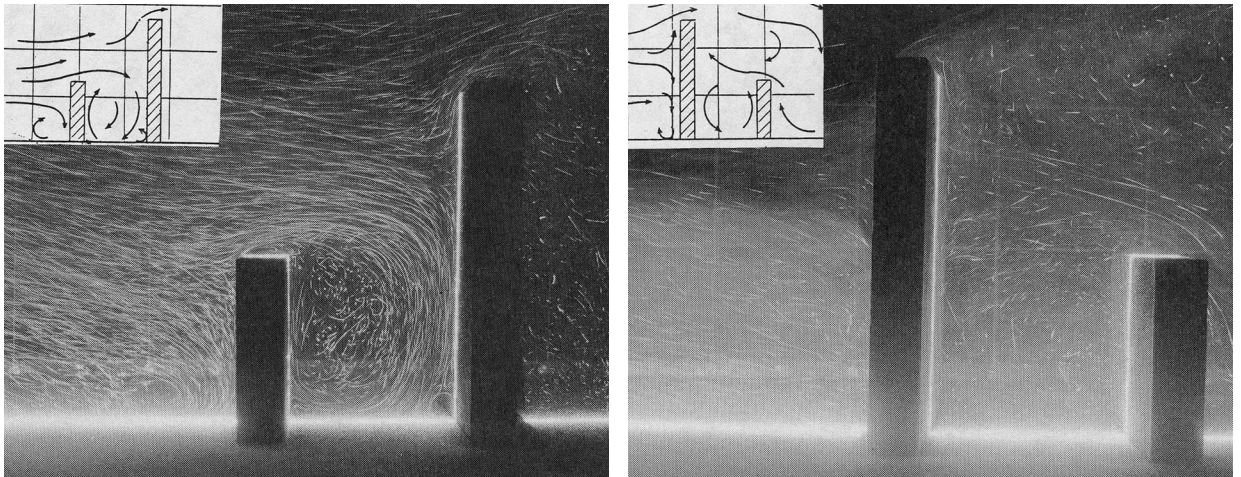


写真 5.3 建物配置の違いによるキャニオン内の気流の差異

以上のことから、測定点両側の建物高さの平均と伝達率の関係を、風向 E と W に対して風上側が高いか風下側が高いかで分類したものを図 5.8 に示す。

風上が高い場合よりも風下側の建物が高い場合の方が若干ではあるが、全体的に伝達率も高く出ているのがわかる。しかし、中には風下側の建物の方が高いにも関わらず伝達率が低く出た点もいくつかある。特にその差が大きい点は No. 9、19、29、33 で、街路と交わっている点に多くみられた。

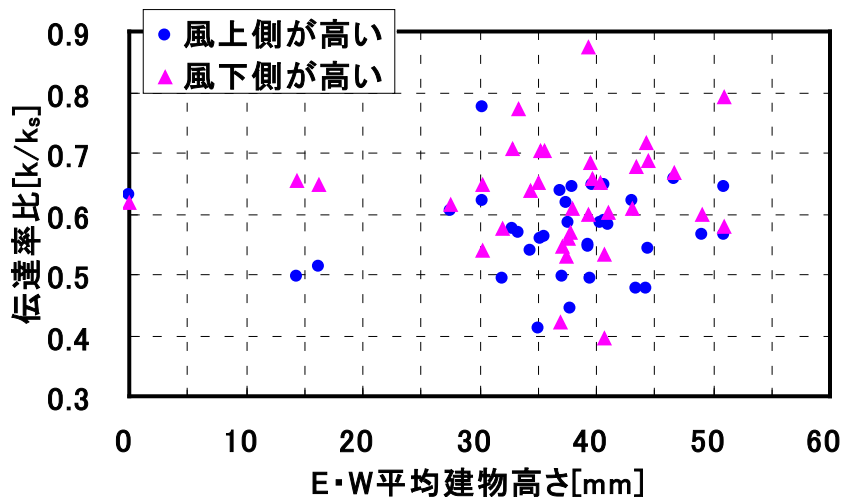


図 5.8 各測定点の両側建物高さの平均と伝達率の関係

5.4.2 隣接する建物幅との関係

前節においては、隣接する建物の高さと路面の伝達率にはあまり関係がみられないことがわかった。ここでは建物高さではなく建物の幅についての検討を行った。

図 5.9 は試料の一边の長さである 37mm を基準に建物が占めている割合を表したものである。

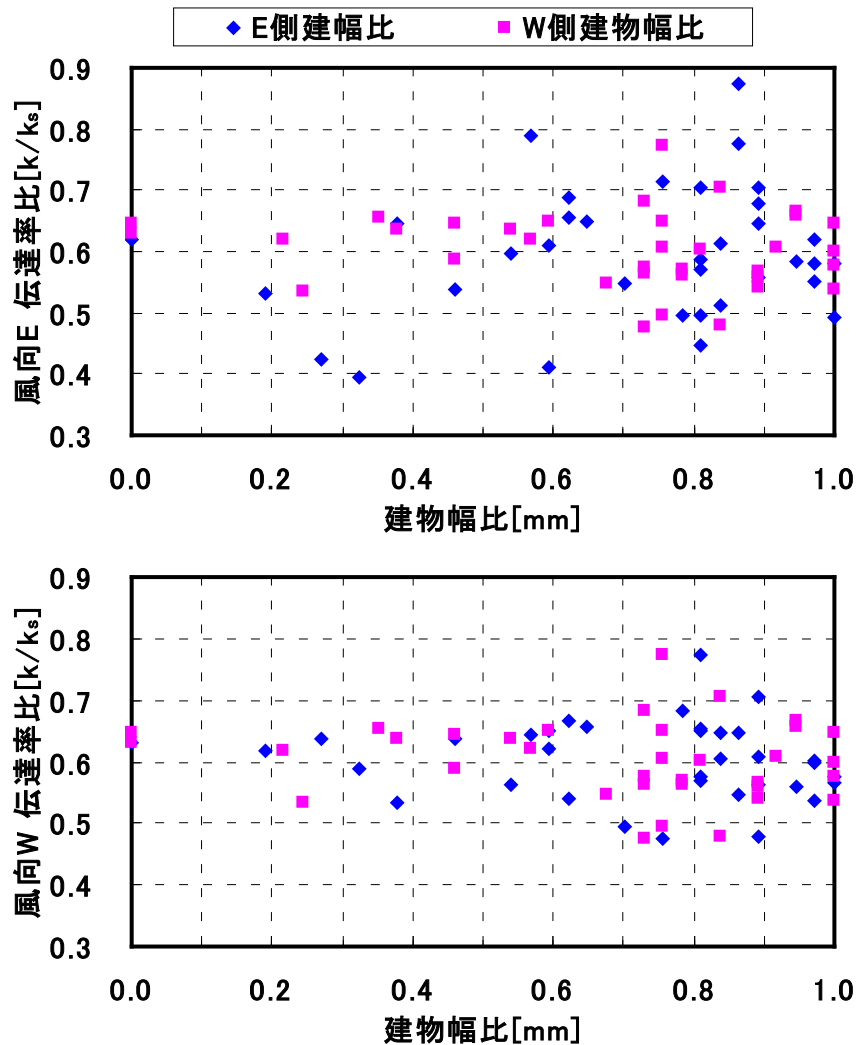


図 5.9 隣接する建物の幅の割合と伝達率

測定点に建物が全く隣接していない点もあれば、完全に建物が隣接している点もみられる。しかし、伝達率の値はおおむね横ばいである。また、建物幅比は 0.7~0.9 が多いが、その範囲内の伝達率は最大で 2 倍程度の開きがみられた。

5.5 小結

今回は、市街地の街路における伝達率のふるまいを明らかにするに当たり、同一街路内の測定を2方向からの風向により測定を行った。

同一街路内の伝達率は各点ごとに大きなばらつきを見せたが街路平均としての伝達率の値は2方向共に同じ値となった。同じ地域にて、同じルールの下、計画的に建築されているので、今回のように数多くの測定による平均値をとった場合、街路における伝達率の平均値は同じとなることが考えられる。

各測定点におけるばらつきの要因を探るため、測定点に隣接する建物の高さや測定点に対する建物幅の割合と伝達率との関係をみた。風下側に高い建物がきた場合、床面の伝達率が高くなる傾向が確認されたが、中にはそれらの傾向から外れる点も存在し、交差点を含んだ測定点に比較的存在していることが明らかとなった。街路に隣接する建物の情報と伝達率にはお互いの関係については明快な関係を明らかにすることができず、街路面における伝達率のふるまいは、隣接する建物のみの影響ではなく、さらに広域的な建物の配置や高さおよび近隣の公開地など、多岐に渡る情報によって決定づけられるものであることが考えられる。

よって実在の都市における伝達率のふるまいは、広域的な気流の把握と、詳細な近傍の気流、そして基礎的な伝達率のふるまいの解明が必要と考えられる。

参考資料

- 1) 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）－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）、日本建築学会環境系論文集、第 594 号、（印刷中）、2005.8
- 2) Ken-ichi NARITA : Wind Tunnel Experiment on Convective Transfer Coefficient in Urban Street Canyon. *ICUC-5 (5th International Conference on Urban Climate)* (Lodz, Poland) 2003.9
- 3) 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、pp.843-844、2004.8
- 4) 鈴木直人・成田健一・森岡 勲：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、pp.845-846、2004.8
- 5) Ken-ichi NARITA : Effects of Building-height Heterogeneity on Area-averaged Transfer Velocity in the Street Surface- Wind Tunnel Experiments Using Salinity Change Technique. *Fifth Symposium on the Urban Environment* (Vancouver, BC, Canada)、2004.8
- 6) Aya Hagishima, Jun Tanimoto and Ken-ichi Narita : Comparisons of Various Experimental Results on the Convective Heat Transfer Coefficient of Urban Surfaces. *Fifth Symposium on the Urban Environment* (Vancouver, BC, Canada)、2004.8

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对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。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²⁾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³⁾⁴⁾⁵⁾。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⁶⁾⁷⁾⁸⁾が報告されており、前報²⁾の結果も、そのような観点から再評価されつつある⁹⁾。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¹⁰⁾。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¹¹⁾、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²⁾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¹⁾の実測を行った実在建物を対象とした模型実験も行い、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.

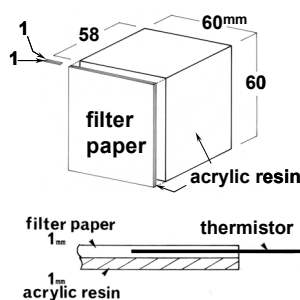


図1 測定試料の概要

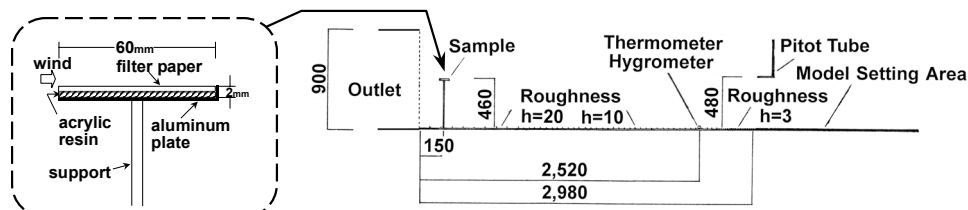


図2. 風洞および測定装置の配置状況

2. 実験方法

実験方法は、基本的に前報²⁾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⁶⁾⁷⁾⁸⁾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。

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

ここで Wt は物質輸送速度[m/s]、 E は蒸発のフラックス[kg/(m²・s)]、 ρ_s と ρ_a は各々蒸発面の飽和絶対湿度[kg/m³]とアプローチフローの絶対湿度[kg/m³]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厚製の一边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℃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の範囲に一边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²⁾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²⁾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

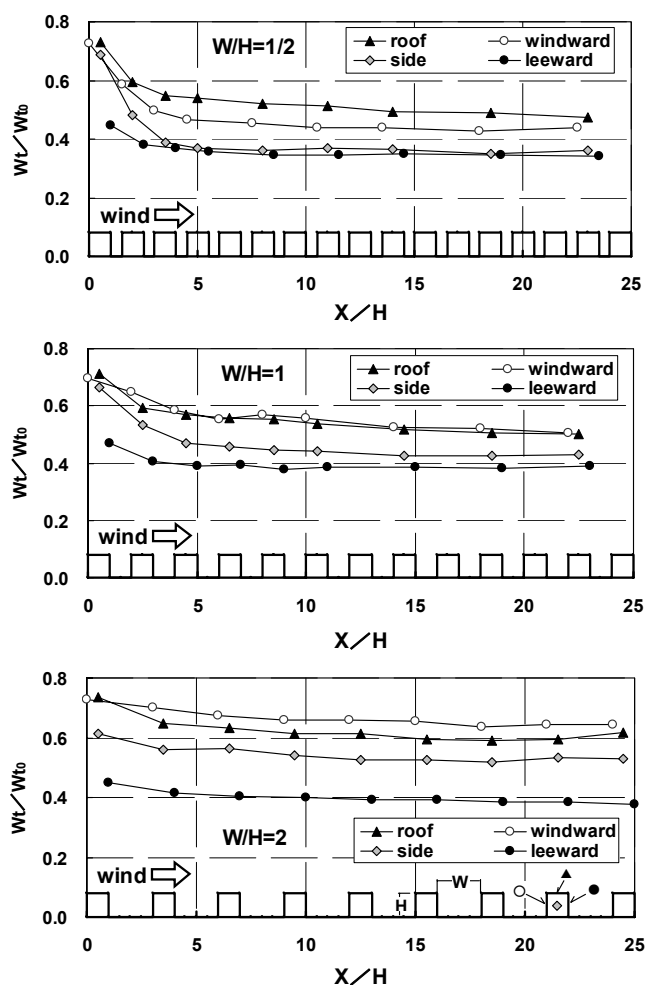


図3. 立方体規則配列における物質伝達率の風向方向変化

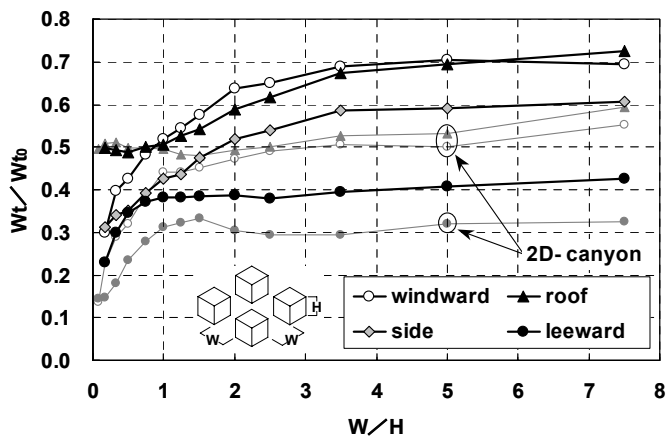


図4. 立方体規則配列における配列密度による物質伝達率変化

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¹⁾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

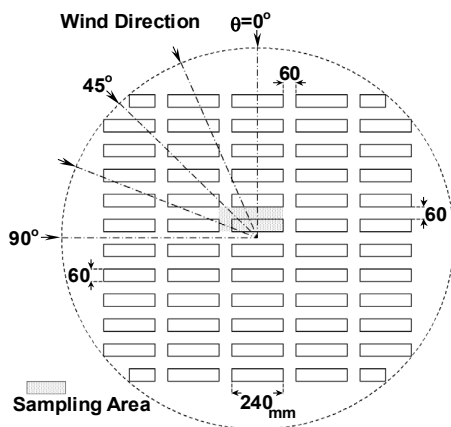


図5. 直方体街区模型の配列状況と測定領域

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(λ_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で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、棟間よりも交差点面の方が大

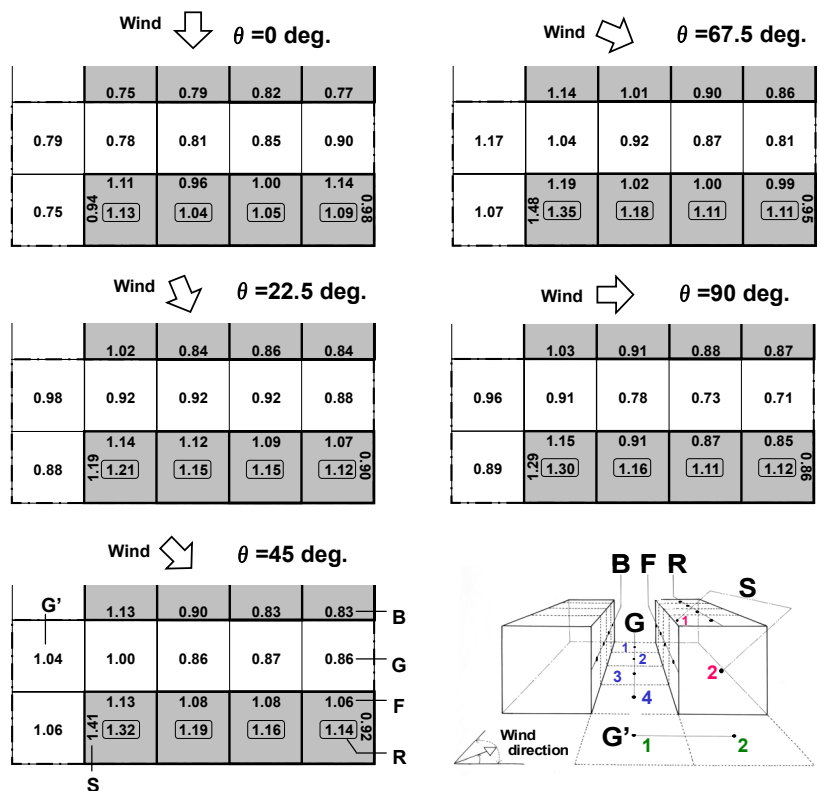


図6. 直方体街区配列における物質伝達率の風向変化(全ケース平均に対する比)

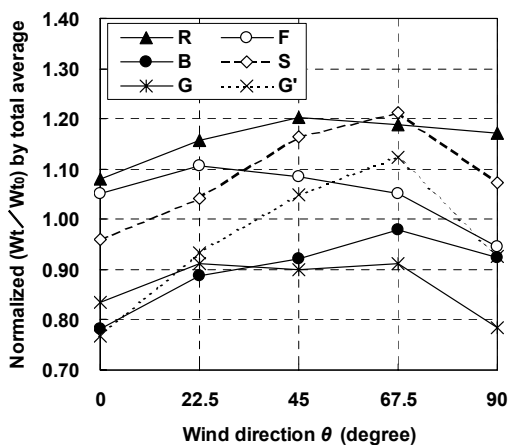


図7. 各測定面の面平均物質伝達率の風向変化
(全ケース平均に対する比)

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みると、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、今回の直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、風上基準での物質伝達率比 (Wt/Wt_0) で表現し、グロス建蔽率 (λp) との関係プロットした

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	Wind direc.	Normalized (Wt/Wt_0) by the average for each 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

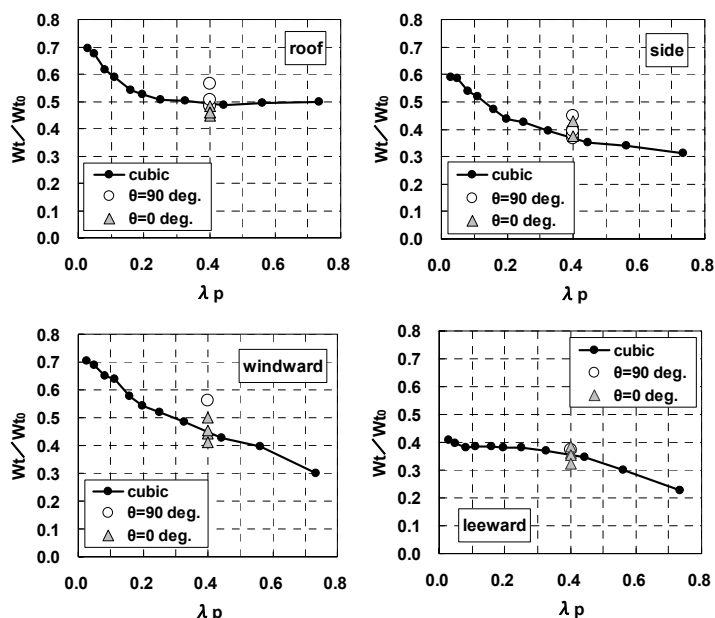


図8. 物質伝達率とグロス建蔽率の関係—立方体規則配列との比較

(図8)。実線は、図4のデータを λp 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 λp 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 λp 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 λp 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、キャノ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¹²⁾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。实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 5×5 列の立方体均等街区 (**type-A**) を想定した。街区内部の細街路は $W/H=1/6$ の密集条件とした。この密集街区を 3×3 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

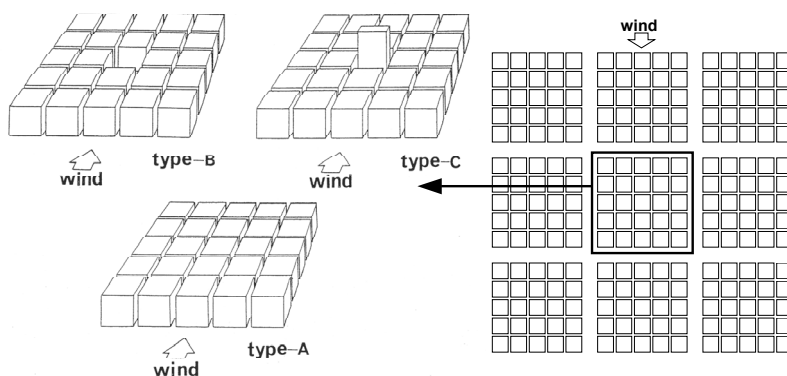


図9. 不均一街区の模型配列と測定対象密集街区における検討事例
(type-B: オープンスペースの設置, type-C: 容積率一定での高層化)

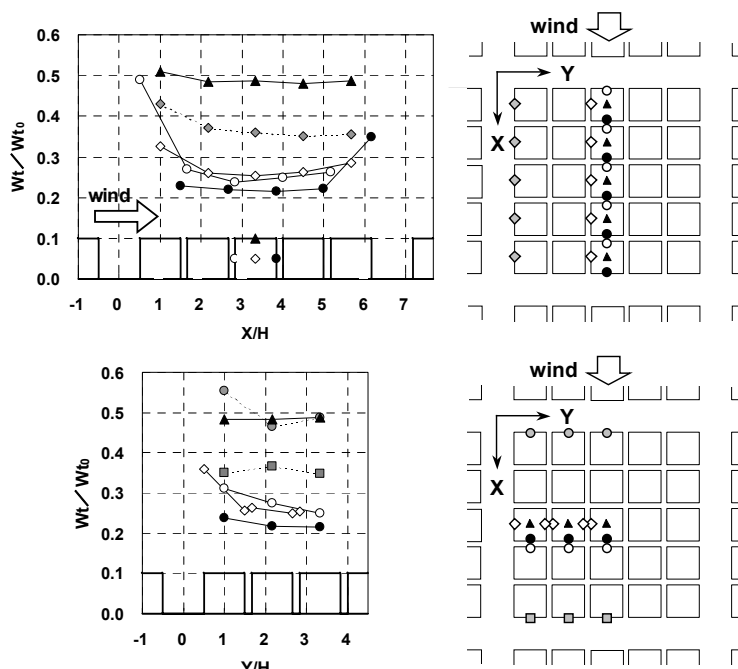


図10. type-Aにおける物質伝達率分布 (上: 気流方向, 下: 気流直交方向)

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

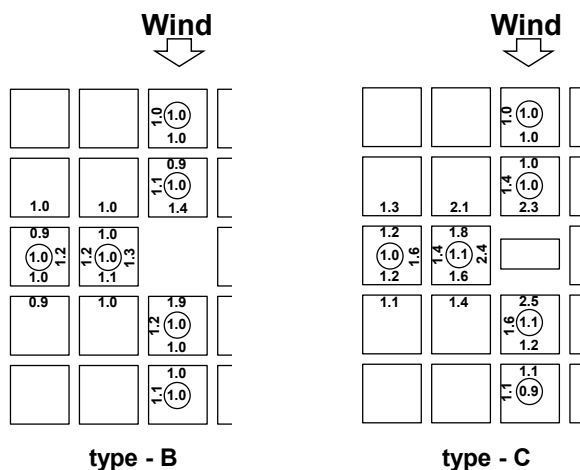


図11. type-Aに対する物質伝達率の変化比の分布

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¹⁾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

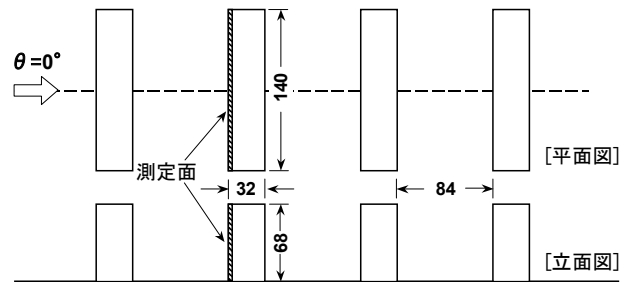


図12. 実測対象建物の模型寸法と配置

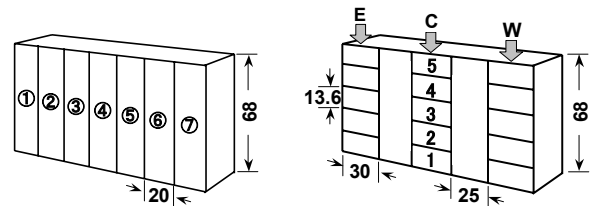


図13. 実測対象建物模型の測定面（左：縦分割、右：区画分割）

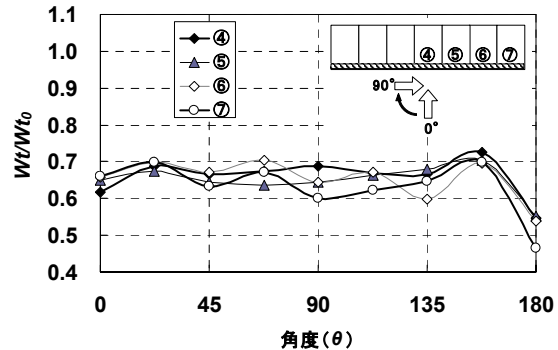
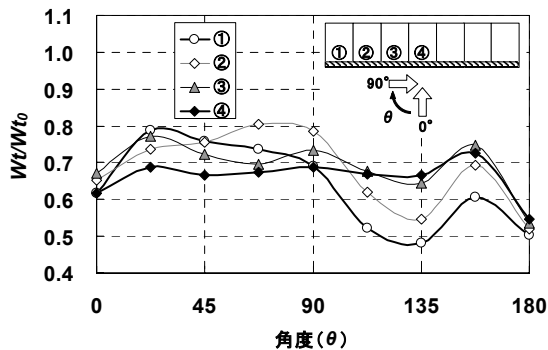


図14. 実測対象建物の物質伝達率の風向変化（縦分割模型）

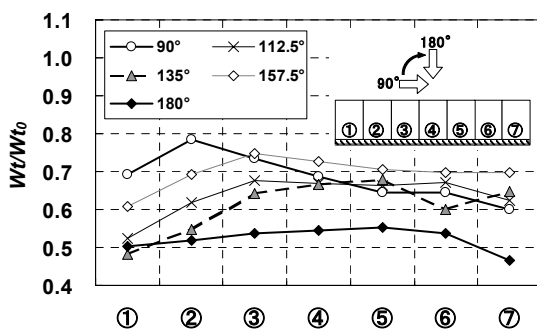
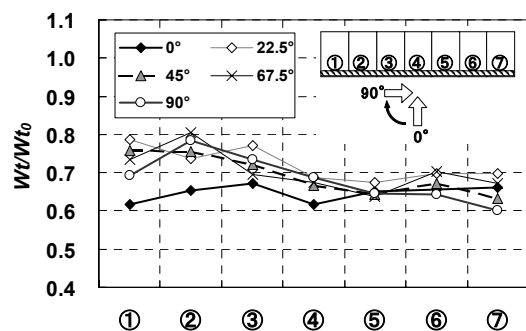


図15. 実測対象建物における面内物質伝達率分布の風向変化（縦分割模型）

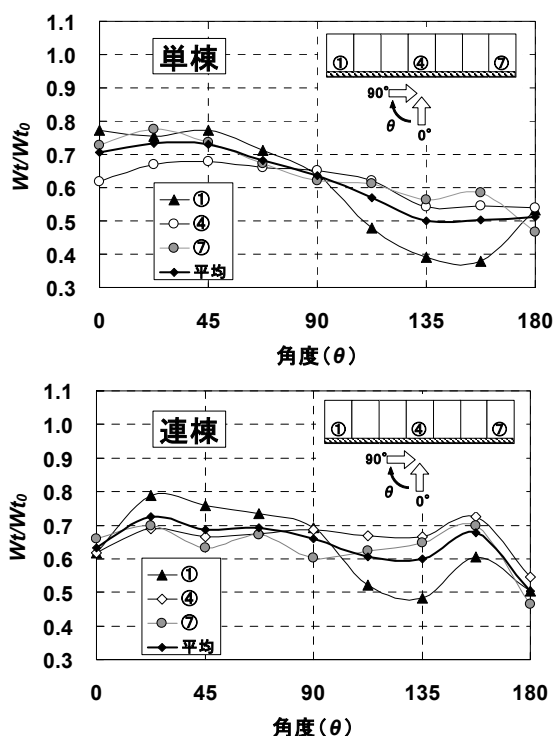


図 16. 実測対象建物における物質伝達率風向変化
単棟の場合と連棟の場合の比較 (縦分割模型)

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は、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

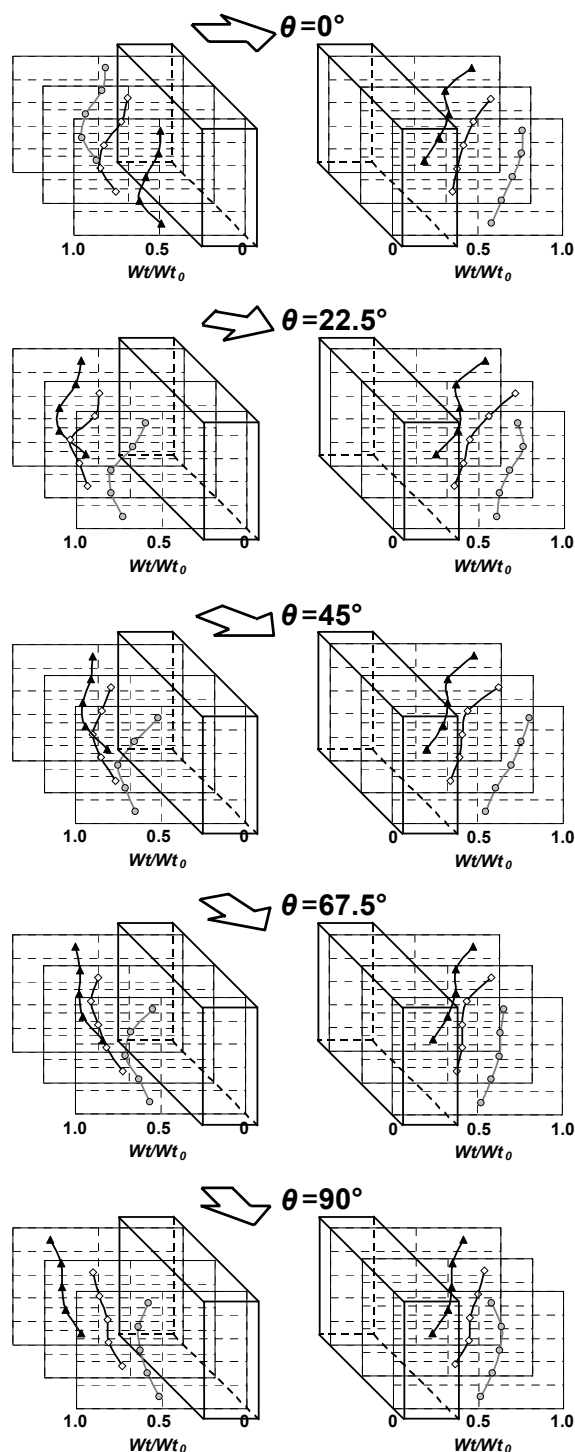


図 17. 実測対象建物における物質伝達率風向変化 (区画分割模型)

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

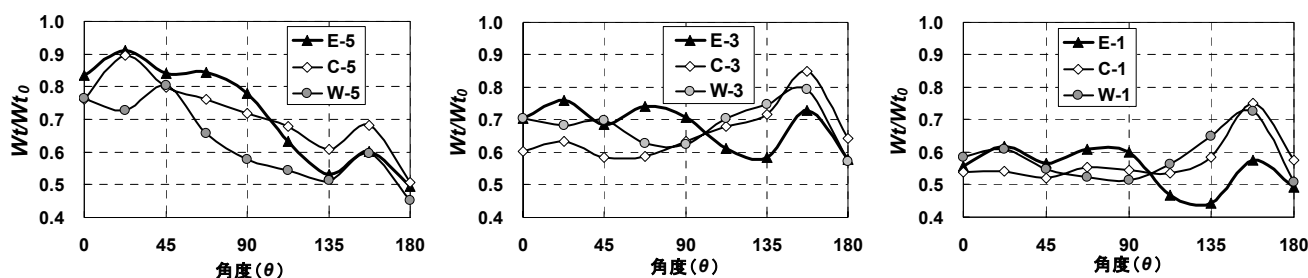


図 18. 実測対象建物における高さ別の物質伝達率風向変化 (区画分割模型) 一左：上端部，中：中央高さ，右：下端部

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 $W/H \approx 1.34$ となる。前報²⁾の 2 次元街路の結果では、 $W/H=1.0 \sim 1.5$ 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 W/H 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のと考えられる。

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對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. Moriawaki, 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

WIND TUNNEL EXPERIMENT ON CONVECTIVE TRANSFER COEFFICIENT IN URBAN STREET CANYON

Ken-ichi Narita*

*Nippon Institute of Technology, Saitama, Japan

Abstract

How heat fluxes from different surfaces within canyon are affected by canyon flow is one of the remaining problems in urban climate modeling. In this paper, water evaporation technique was developed to study the distribution of convective transfer coefficient in urban street canyon. Evaporation rate from the filter paper pasted on building model was measured by electric balance about 2D street canyon models and 3D model arrangements. In this technique, it is easy to restrict flux within an arbitrary surface in question. Then by dividing filter paper, detailed distributions within each surface were also clarified about all active surfaces of 2D street canyon models.

Key words: urban canopy layer, evaporation, spatial heterogeneity

1. INTRODUCTION

To simulate the heat balance of urban area, it is important to know turbulent transfer from all active surfaces. Recently urban canopy models, like well-known TEB model, are developed, in which turbulent transfer is expressed as a network of resistances between the surface and air. However, there are very few reports about the values of these resistances (or transfer coefficients) for urban geometry. In this paper, a newly contrived estimation method of convective transfer coefficient was applied for wind tunnel model experiments.

2. OUTLINE OF THE EXPERIMENTS - WATER EVAPORATION TECHNIQUE

By measuring evaporation rate from the filter paper pasted on building model surface, the convective mass transfer coefficient at outside surface was examined. The filter paper used in experiments is 1mm thick, and its side surfaces were treated with waterproofing agent. A very fine thermistor sensor was inserted from side surface just below the paper surface to measure evaporating surface temperature. The model was set in the wind tunnel for a half hour, and the weight loss during that period (about 200-400mg) was measured by electric balance (the accuracy was 0.1mg). Then, mass transfer coefficient (k) was calculated by following formula.

$$k = E / (e_s - e_a)$$

where E is the evaporation rate, e_s is the saturated vapor pressure of evaporating surface temperature, e_a is the vapor pressure of approach flow. The merit of this experiment is easiness to restrict the flux within an arbitrary surface in question. In the case of similar experiments about heat transfer, there are many kinds of inevitable heat flow except for the convective heat flux in objective surface. Evaporation process is supposed to be constant, which means evaporating surface is saturated through the experiments. If model surface is partially dry out, surface temperature will rise quickly. As experiments were conducted with monitoring the surface temperature, we can easily check whether filter paper dries or not. Within model arrangement, wetting part is always only objective surface of sampling building model.

Vertical profile of mean velocity at wind tunnel working section was fitting to power law of 1/4 and turbulence intensity at model roof level (60mm) was set to 20%. Air temperature and humidity of approach flow were not controlled unfortunately. Then, as a reference, evaporation rate from horizontal same size plate near the outlet was also measured simultaneously in every case. All results were analyzed as the ratio of (k) to this reference value (k_0).

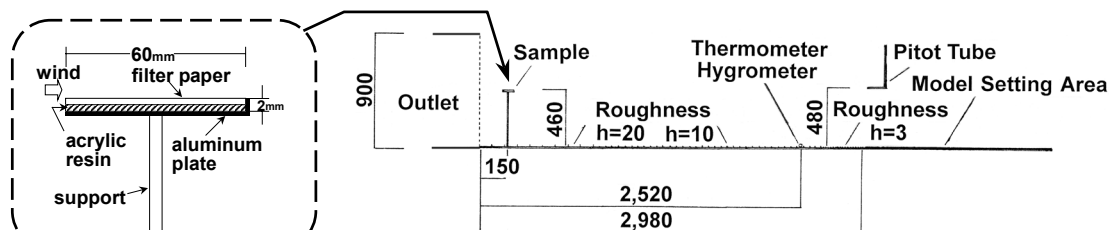


Figure 1: Side view of experimental arrangement and detail of setting for reference value near outlet.

* Corresponding author address: Ken-ichi Narita, Department of Architecture, Nippon Institute of Technology, Gakuendai 4-1, Miyashiro, Saitama, Japan; e-mail: narita@nit.ac.jp

3. RESULTS

3.1. Two-dimensional street canyon models

The relations between mass transfer coefficient (k) of two-dimensional street canyon and canyon geometry are shown in Figure 3 for the case of flow perpendicular to the street. The transfer coefficient of leeward wall is about $2/3$ of windward wall in the range aspect ratio L/H is sufficiently large, which is considered *isolated roughness flow*. These values of wall decrease rapidly in $L/H < 1$, then converge same value in the end (*skimming*). In the range of $1 < L/H < 2.5$, leeward is increased while windward is decreased, that means the development of vortex flow within street canyon. This range corresponds to flow regime of *wake interference*. On the contrary, the value of roof surface is almost constant within the limit of this experiment.

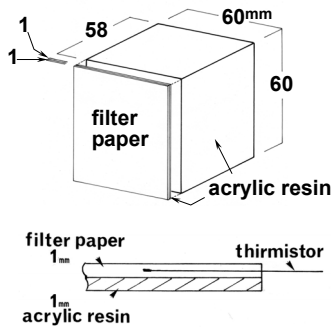


Figure 2: Building model for sampling.

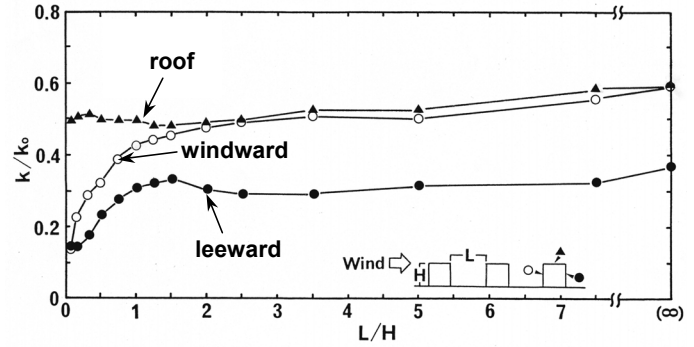


Figure 3: Relations between mass transfer coefficient (k) of two dimensional street canyon and canyon geometry.

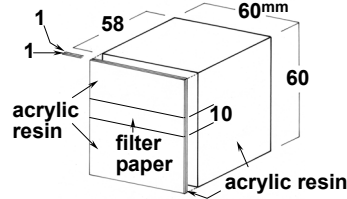


Figure 4: Building model for split measurement within surface.

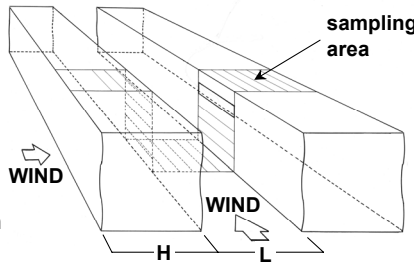


Figure 5: Sampling area of split measurement.

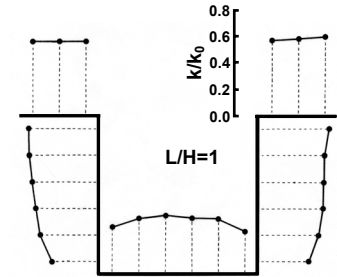


Figure 7: Distribution of (k) in parallel wind direction.

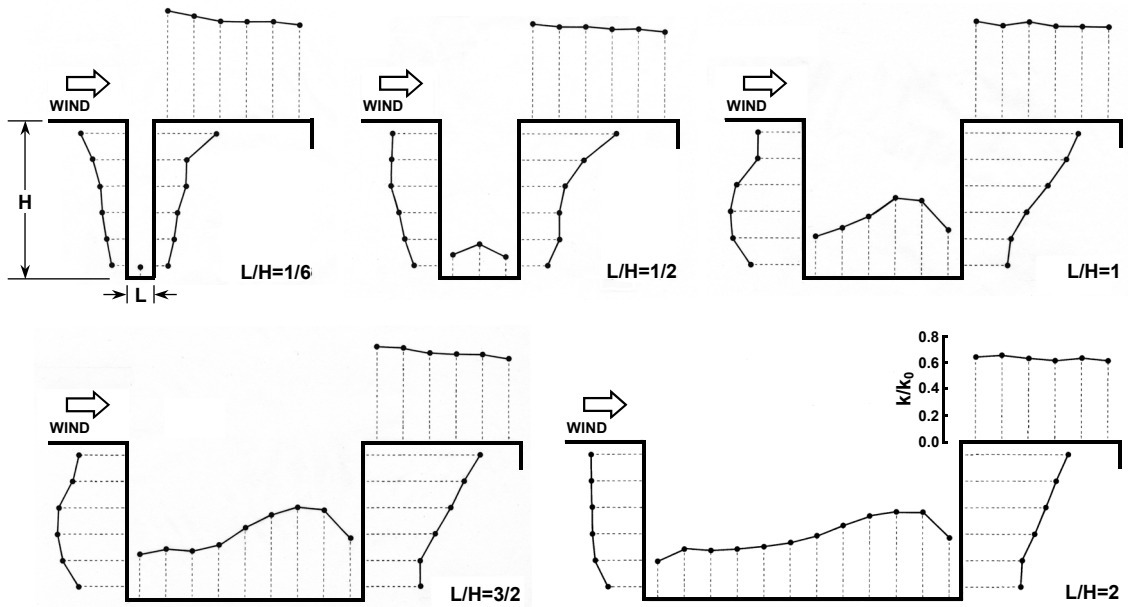


Figure 6: Distribution of (k) within each surface of 2-D street canyon in perpendicular wind direction.

In this technique, it is easy to restrict flux within an arbitrary surface in question. Then, by dividing filter paper, detailed distributions within each surface were also clarified about all active surfaces of two-dimensional street canyon models. Figure 4 shows the building model for such a split measurement, and sampling area is also shown in Figure 5. The results of different canyon geometry are shown in Figure 6 for the case of perpendicular wind direction. Within the windward wall, transfer coefficient always increases with height. In the case of $L/H=1$ and $3/2$, leeward wall and ground have a peak in the middle part of surface due to the vortex flow. In skimming flow regime ($L/H=1/6$), the distribution of leeward wall is similar to that of windward wall.

3.2. Three-dimensional array

At first, change of mass transfer coefficient due to building density was investigated for simple cubic arrays (Figure 8). In sufficiently sparse condition, the order of transfer coefficient of each surface is roof > windward wall > side wall > leeward wall. The roof top value decreases gradually as building density increases. In the range of $1 < L/H < 5$, windward wall has a highest value among surfaces. While the transfer coefficient begins to decrease around $L/H=5$ in other surfaces, that of leeward wall is almost constant up to comparatively dense condition. And there is no hilly increase by vortex flow between obstacles like two-dimensional street canyon.

Figure 9 shows wind speed dependency of transfer coefficient about single cubic model ($L/H \rightarrow \infty$). The variation of all kind of surfaces could be fitted by curves $2/3$ power of wind speed.

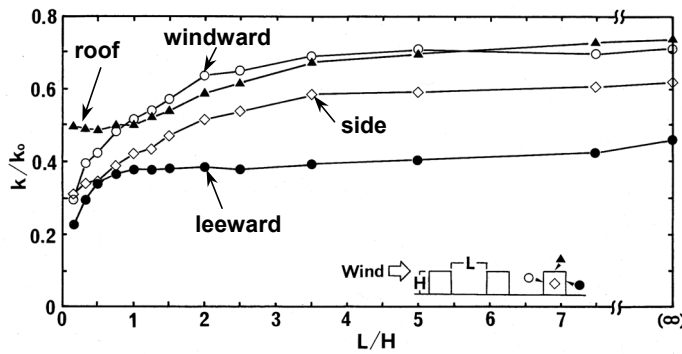


Figure 8: Relations between mass transfer coefficient (k) of simple cubic arrays and canyon geometry.

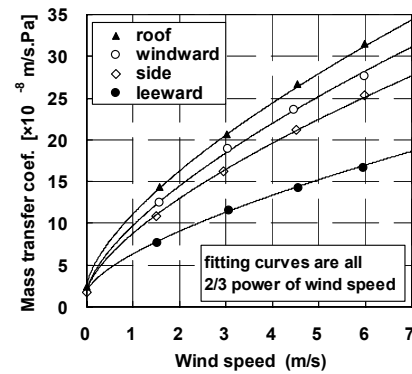


Figure 9: Change of mass transfer coefficient due to wind speed in single cubic model.

3.3. Change of transfer coefficient due to wind direction in three-dimensional array (case study)

In the experiments about simple cubic arrays, transfer coefficient of ground surface was not measured because the size of sampling area (part of wetting surface) changes with L/H concerning the ground. In this experimental technique, absolute value of transfer coefficient is affected by scale effect of sampling area. Then, we should compare the contribution of each surface under the condition of wetting area is equal to each other.

Figure 10 shows model arrangement for wind direction dependency of transfer coefficient. The model shape is 1:1:4, and interval between models is equal to model height. This makes building coverage ratio of 0.4. Here, sampling area is same square size and covered all surface including roof, wall and ground (Figure 11). The number of sampling location amounts to twenty. Transfer coefficient was measured for five wind directions at 22.5-degree intervals from right angle.

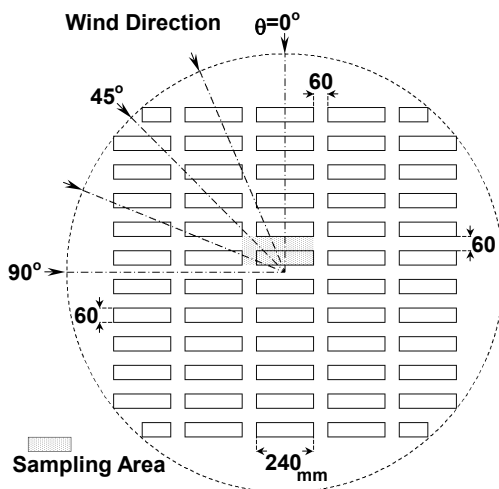


Figure 10: Model arrangement for wind direction dependency of transfer coefficient.

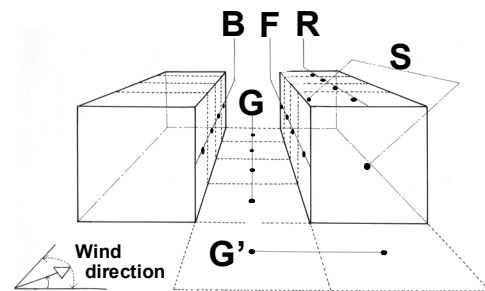


Figure 11: Location of square sampling surfaces and their symbols.

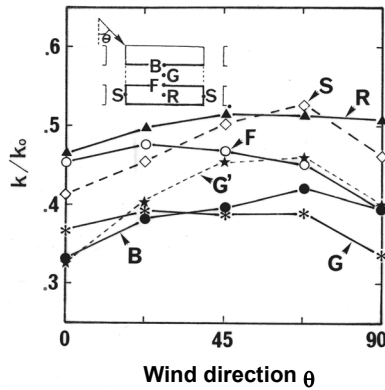


Figure 12: Change of (k) due to wind direction in each type of surface.

Table 1: Change of transfer coefficient due to wind direction and magnitude of deviation from spatial average .

Type of surface	Area (lot=100)	k/k ₀					
		Wind direc.	0	22.5	45	67.5	90
Roof [R]	40	max.	0.49	0.53	0.57	0.58	0.56
		ave.	0.47	0.50	0.52	0.51	0.51
		min.	0.46	0.48	0.49	0.47	0.48
Ground [G+G']	60	max.	0.39	0.42	0.45	0.49	0.42
		ave.	0.36	0.40	0.41	0.41	0.36
		min.	0.32	0.38	0.37	0.34	0.31
Wall [B+F+S]	100	max.	0.50	0.51	0.61	0.64	0.55
		ave.	0.40	0.43	0.45	0.45	0.41
		min.	0.32	0.36	0.36	0.37	0.36
(Total)	200	ave.	0.40	0.44	0.45	0.45	0.41
		(Total ave.=1)	0.94	1.01	1.04	1.05	0.96
		max./ave.	1.23	1.21	1.36	1.41	1.36
		min./ave.	0.79	0.82	0.79	0.75	0.74

Figure 12 shows variations of transfer coefficient in each type of surface with wind direction. In the case of right angle ($\theta=0$), the value of ground surface between models (G) is larger than that of street ground parallel to wind direction (G'). Spatial average and magnitude of deviation in each wind direction are summarized in Table 1. Concerning total average of all surfaces, its variation due to wind direction is small, less than 10%. As for this arrangement, the rank of transfer coefficient among surface types is constant, that is roof > wall > ground in all wind directions. The magnitude of locality, however, comes at most from -25% to +41% of spatial average.

3.4. Effect of spatial heterogeneity - representativeness of uniform cubic array (case study)

In many study, uniform cubic array has been used as a typical urban model. To check a representativeness of this simple array, its transfer coefficient was compared with that of a clustered block array surrounded by rather wide streets. Figure 13 shows distribution of transfer coefficient of wall surface about clustered block array and uniform cubic array as a reference. Both arrangements have a same building coverage ratio of 0.51. About clustered array, transfer coefficient of wall surface facing wide streets are larger than that of core area. Maximum value appeared in windward corner of cluster, its ratio to spatial average of uniform array (0.695) is 1.53. On the other hand, spatial average of clustered array is 0.627, which is smaller than that of uniform array approximately 10%. Though we need to know the change in horizontal surfaces, it suggested that the contribution of wall is different between uniform and clustered arrays.

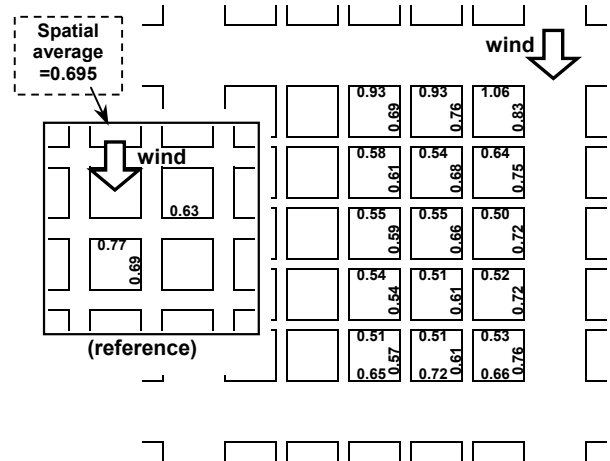


Figure 13: Distribution of (k) in clustered block array surrounded by rather wide streets – comparison with uniform cubic array with same building coverage ratio.

4. CONCLUDING REMARKS

Water evaporation technique using filter paper has been used to evaluate the transfer coefficient within a street canyon. Results suggest that concerning three-dimensional array, spatial average of transfer coefficient is not so sensitive to change of wind direction while its local deviation is considerably large and not negligible.

Acknowledgement

This research was financially supported by CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) of JST (Japan Science and Technology Cooperation) and by Grant-in Aid for Scientific Research from the Ministry of Education, Science and Culture of Japan.

References

- Barlow, J.K. and Belcher S. E., 2002, A wind tunnel model for quantifying fluxes in the urban boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **104**, 131-150.
- Masson, V., 2000, A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.

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）

正会員 〇森岡 勲*
同 成田健一**

ヒートアイランド 都市キャノピー 対流熱伝達率
市街地風 熱収支 風洞実験

1. 研究目的

ヒートアイランドのモデル化において、現在 TEB に代表されるキャノピーモデルの検証が焦眉の課題となっている。とりわけ、都市表面を構成する各構成面別の交換係数の把握が重要なテーマとして注目されている。本研究では熱移動と物質移動のアナロジーを利用した濾紙面水分蒸発による交換係数の把握を風洞模型実験で行っている。この手法は、放射や伝導によるフラックスが存在する熱現象とは異なり、対流フラックスのみを容易にかつ高精度に測定できるのが特徴である。アナロジーを利用した同様な実験方法として、ナフタレン昇華法が知られているが、試料作成の容易さや安全性の面で、濾紙法の方がはるかに取り扱いが簡便である。

これまで、基本的な形状については実験が行われてきたが、屋根の有無およびその勾配と交換係数については検討されていない。現在、欧州をはじめ世界各都市で継続されているモデル検証のための観測データからも、屋根形状の違いが都市の乱流構造に大きく影響していることが指摘されて始めている。そこで、本報では2次元配列における屋根勾配の差異による面内交換係数分布の測定を行った。屋根形状は切妻屋根とし、街路空間の縦横比と屋根勾配を系統的に変化させて測定を行い、各面における交換係数分布を把握した。

2. 実験方法

本研究では、飛島建設技術研究所所有の密閉回流型境界層風洞を使用した。測定洞にスパイヤーおよび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た (Fig.1)。べき指数 $\alpha=0.2$ 、乱れ強さは床上 50mm までの平均で約 15% である。風洞内の基準となる風速は、床上 1.4m のピトー管の値で 3m/s とした。また、ターンテーブル中心から風上 3m・高さ 40mm の位置で、アプローチフローの温湿度を測定した。

交換速度の算出式を Table1 に示す。測定に使用する試料は、アクリル板に 1mm 厚のろ紙を貼り付けたもので、試料の側面にはコーティングを施し表面以外からの蒸発を防い

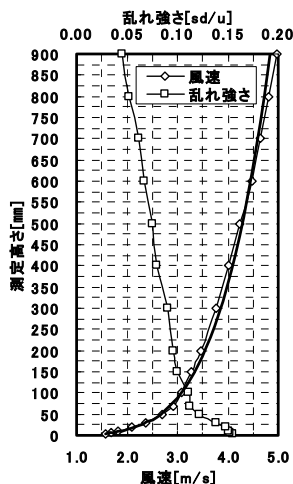


Fig.1 プロファイルと乱れ強さ

Table 1 交換速度 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]
物質交換速度 [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]	

だ。ろ紙を十分に湿らせた後、ろ紙の表面直下に表面温度測定用として $\phi=1\text{mm}$ のサーミスタ (1/100℃精度) を挿入し、風洞に 30 分設置し、その間の水分蒸発量を電子天秤 (0.1mg 精度) で秤量した。秤量中は、試料を密閉容器に入れた。本風洞は温湿度の制御ができないため、ターンテーブル中心から風上側 1.7m の位置に基準として 5cm の立方体模型を置き、その屋上面の交換速度 (以下 k_s と表示) 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 (k) と基準点との比 (k/k_s) を用いることにより、異なる温湿度環境下にて得られたデータの比較が行えるようにしている。

3. 測定条件

屋根勾配は4種類とし、屋根なしを合わせた計5ケースとした。ろ紙の表面積は 10mm×50mm とし、模型のその他の部分は乾燥面としている。濾紙の位置を順次移動させ、各面の分布を把握した (Fig.2)。屋根勾配は、この濾紙巾で面分割が可能のように、斜面長を 30mm、40mm、50mm、60mm とするよう設定した。勾配 θ に直すと 33.6 度、51.3 度、60 度、65.4 度である。なお、軒高は 50mm で一定である。測定面は風上面 (F)、風下面 (B)、路面 (G)、そして屋根面の風上面 (RF) と風下面 (RB) の計 5 面である。以上の分割測定とは別に街路縦横比を系統的に変化させた場合の鉛直壁面の交換係数変化を、50mm 四方の濾紙を貼った全面試料で比較した。なお、傾斜屋根を有する場合、基準高さ H をどう定義するかという問題が生じる。今回の実験では①屋根を除いた軒高、②棟高、そして③軒高と棟高の平均高さ、

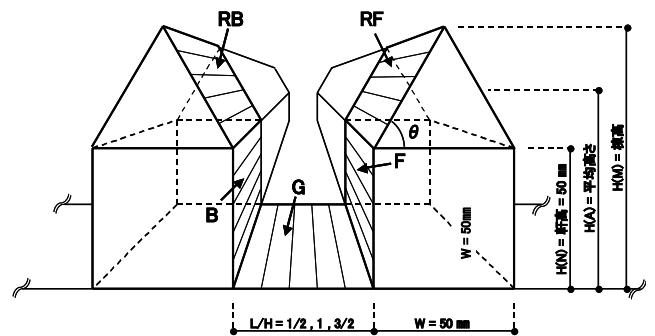


Fig.2 建物基準高さや模型間隔および測定対象面

の3種類で測定を行った。街路縦横比 L/H としては、以上の3種の H に対し、それぞれ 1/2、1、3/2 の3種類について行った。模型配列範囲は 1820mm 四方である。

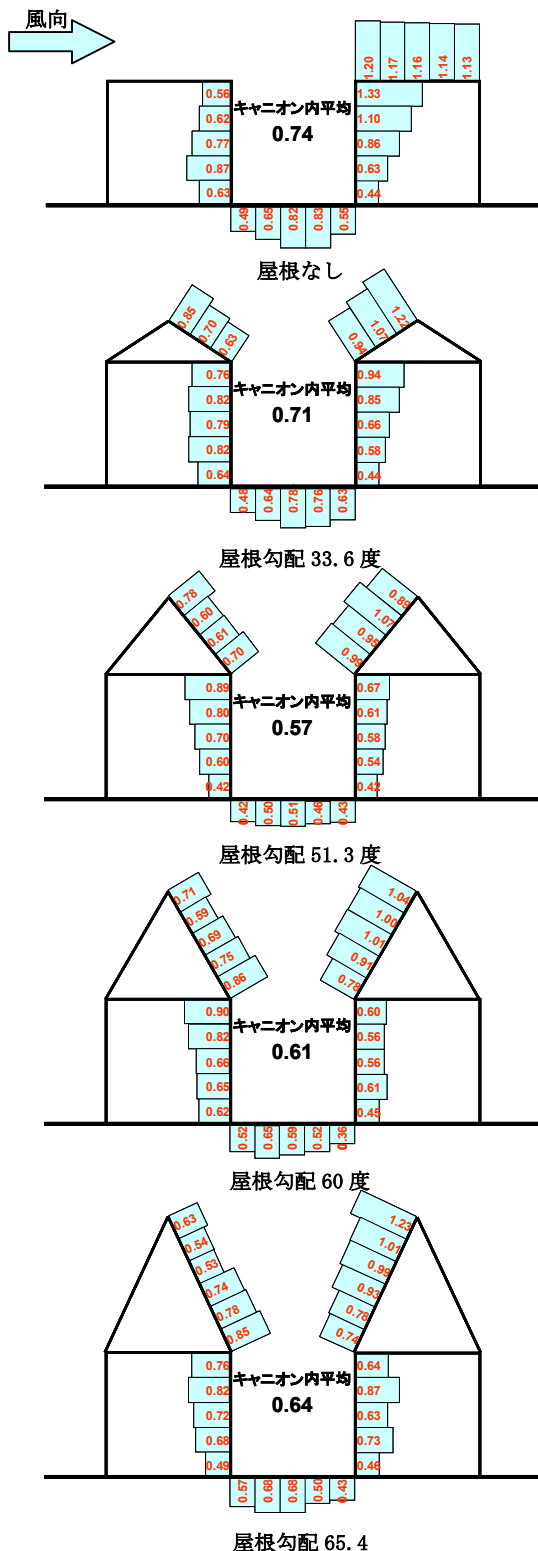


Fig. 3 傾斜屋根を有する2次元街路における交換係数分布

謝辞：本研究は、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究(CREST)、研究代表者：東工大・神田学、および文部科学省の科研費（基盤研究(C)，15560516）の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

* 株式会社 當木工事

**日本工業大学工学部建築学科・教授・工博

4. 測定結果

分割測定の結果を Fig.3 に示す。屋根なしと比較すると、屋根の付加によって、風上面では上部の交換係数が減少し、高さ方向の分布が一様化する。風下面では中央部にあったピークが消滅し、上部ほど交換係数が大きくなる分布に変化する。路面については、中央より風下側にあったピーク位置が、風上側に移動する変化が認められる。屋根を除いたキャニオン内の平均値は、単調な変化ではなく、屋根勾配 51.3 度で最小となった。以上の変化は、屋根面による剥離でキャニオン内の循環流が崩れ、閉鎖的環境になるが、さらに傾斜が大きくなると街路内への上層風の取り込みが促進され、再び混合が増大するという気流場の変化に対応しているものと思われる。

Fig.4 は、3種類の高さを基準高とした場合の、鉛直壁面の交換係数と街路縦横比(L/H)の関係を示したものである。プロットのまとまり具合から、風上面は棟高基準、風下面は軒高基準が、交換係数の変化をよく説明している。風上面の変化は建物トップの高さが支配要因となるが、風下面は屋根形状には鈍感で、キャニオン部分の縦横比で値が決まってくるという差異があるといえる。

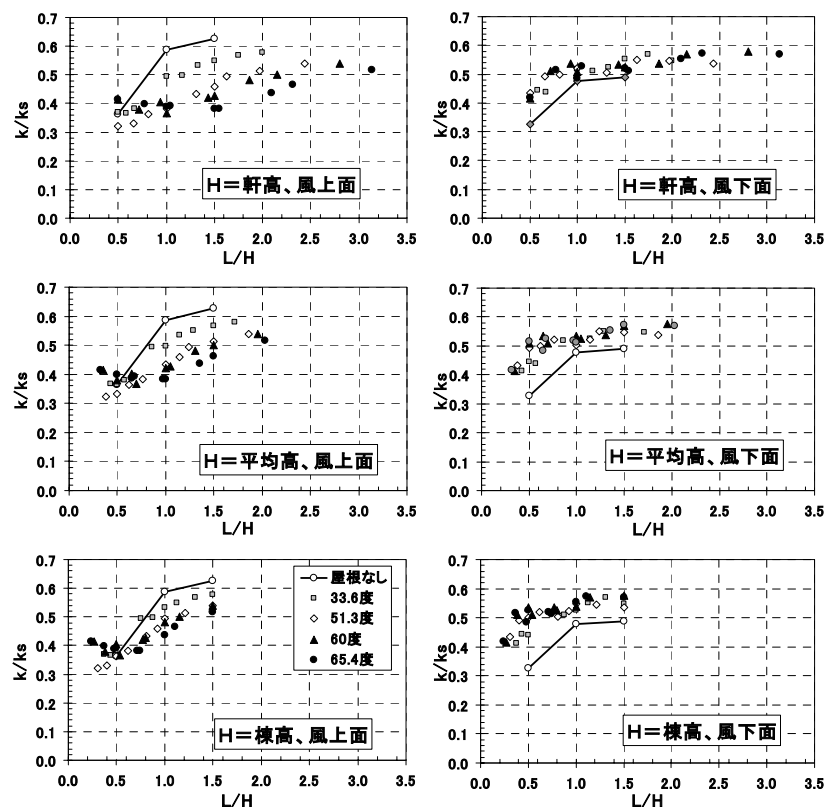


Fig. 4 基準高さの取り方の違いによる交換係数と街路縦横比との関係の変化

5. まとめ

傾斜屋根を有する建物列に関して各面の交換係数分布を把握し、また各面の変化の支配要因について考察した。

文献：成田健一・他：日本建築学会計画系論文集，527，69-76，2000.1

* ATSUKI-KOUJI, M. Eng.

**Nippon Institute of Technology, Prof., Dr. Eng.

3次元立方体配列における交換係数の分布

一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）

正会員 同 ○鈴木直人* 正会員 成田健一**
森岡 勲***

ヒートアイランド 都市キャノピー 対流熱伝達率
市街地風 熱収支 風洞実験

1. 研究目的

前報に引き続き、濾紙面蒸発を利用した交換係数に関する風洞実験結果について報告する。

都市キャノピーモデルの代表例とされる Masson¹⁾のTEBでは、壁面や路面、屋上面からの flux が抵抗ネットワークの形で表現されている。しかし、彼の論文ではこれらの抵抗が上空風から経験式で推定されたキャニオン内風速を用いた一次式で与えられており、風向依存性も考慮されていない。放射過程に比べ、このような乱流輸送にかかわるパラメータの不確かさが、現在モデルの精緻化のネックとなっている。このような都市表面を構成する表面毎の flux 寄与率が建物密度との関係でどのように変化するか、また風向依存性はどのようになるのか、さらには構成面内の分布を考慮せずに一律の値を用いることによる誤差はどの程度になるのか、などを明らかにする必要がある。Barlow ら²⁾は、ナフタレン昇華法を用いた風洞実験で抵抗ネットワークの検討を試みているが、2次元キャノピーに限られた内容となっている。本報では、立方体3次元正方配列に関して、面別の寄与率の把握、風向変化と密度変化の影響、さらに壁面における高さ方向分布について検討した。

2. 実験方法

使用した風洞、気流プロファイル、および交換速度の算出式に関しては、前報を参照。実験風速は 3m/s で一定であるため、風速で無次元化した交換係数の実験ケース毎の相対変化は交換速度の相対変化と等しい。使用した立方体試料を Fig.1, Fig.2 に示す。面平均の比較には全面測定用試料、分割測定用試料は高さ分布の検討に用いた。なお、解析では、前報同様、風上に設置した基準用模型の値(以下 k_s と表示)を用いて、基準化している。模型の配列範囲は 1820mm 四方で、中心位置の模型を測定対象とした。

3. 壁面交換係数の風向変化

Fig.3 は鉛直壁面の交換係数の風向変化を街路縦横比

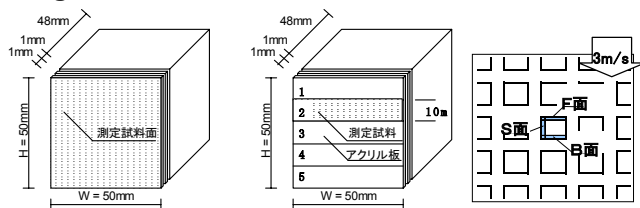


Fig.1 全面測定用と分割測定用試料

Fig.2 測定面の呼称

(L/H)別に示したものである。風向 0 度では街路が狭くなるほど交換係数が減少しているのに対し、風向 180 度では、 $L/H = 1/5$ 以外はほぼ同じ値を示している。Wake 領域となる風下面の気流性状は、 $L/H > 1/2$ では変化が小さい。風向に伴う変化も、これらのケースではほぼ類似しているが、街路幅が広いケースでは風向 90 度以降も減少するのに対し、狭い街路では 90 度以降の変化が乏しくなるという差異がみられる。一方非常に狭い $L/H = 1/5$ については、風向依存性がほとんど見られず、他のケースに比べ極端に小さい値となっている。この街路幅では、もはや上空からの流入がほとんど無くなることを意味している。

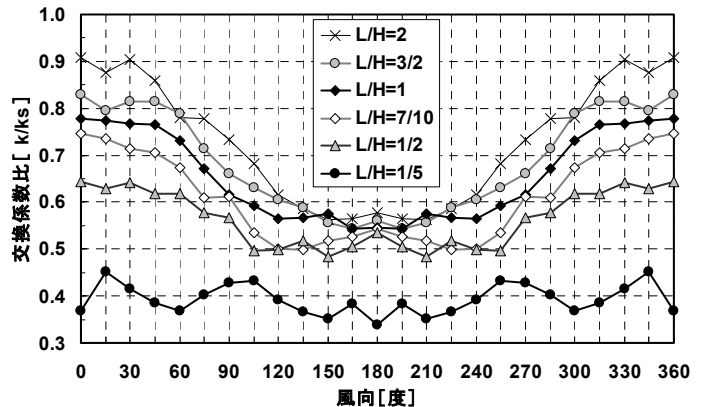


Fig.3 壁面交換係数の風向変化

4. 構成面別の交換係数の比率とその風向変化

$L/H = 1$ については、床面についても他の面と試料寸法をそろえた測定が可能なので、屋根面・床面（模型間の2箇所と交差点部分）について風向 15 度ごとに測定を行い、構成面別の交換係数の比率を算出した(Fig.4)。交換係

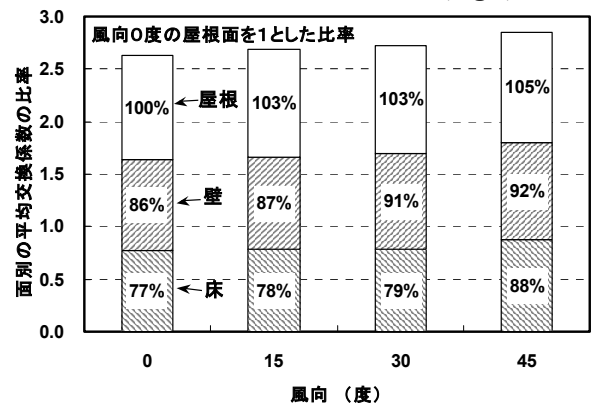


Fig.4 構成面別の平均交換係数の比率 ($L/H=1$)

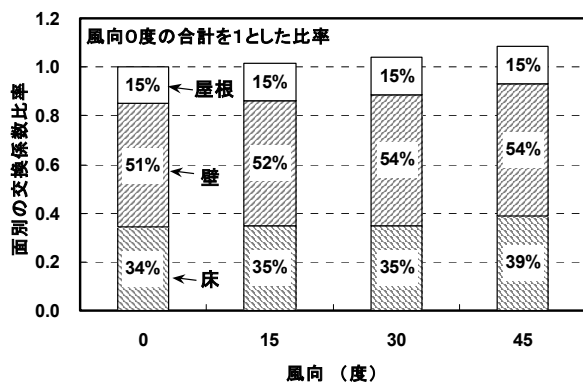


Fig.5 構成面別の合計交換係数の比率 (L/H=1)

数の値は、風向が0度からずれるに従って漸増し、45度で最大となるが、その変化は小さい。壁面の平均値は屋根面を基準とした比率で86%、床面は同77%（風向0度）で、この配列密度では屋根>壁>床の順となっている。この比率は、風向が変化してもほぼ一定で、壁面85~89%、床面76~84%であった。Fig.5は構成面の面積比率を掛けて全体の比率を求めた結果で、表面温度が等しいとしたときの顕熱フラックスの寄与率を表している。

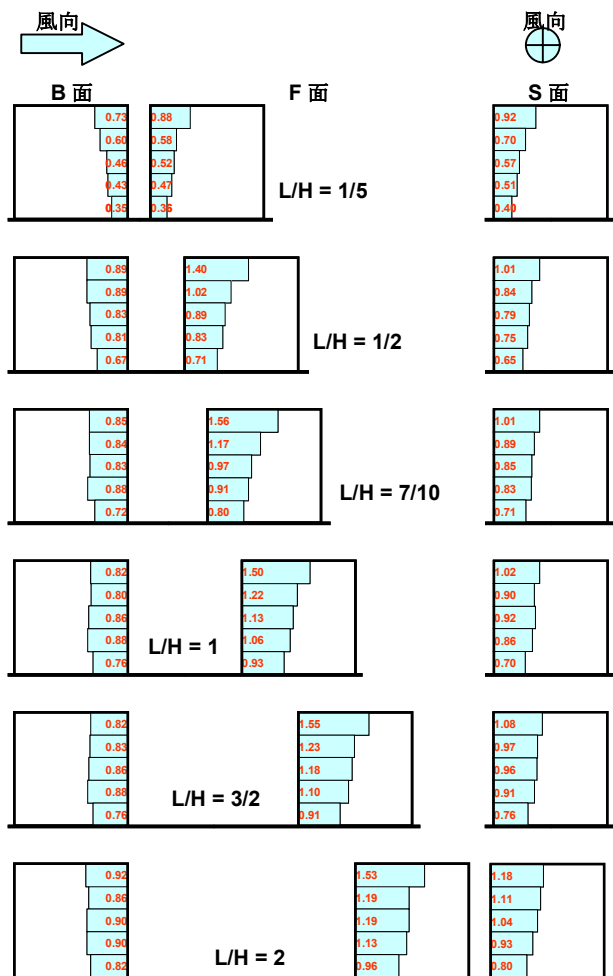


Fig.6 各面における面内交換係数分布 (風向0度)

5. 鉛直壁面内の交換係数の高さ方向分布

Fig.6は、分割測定による風向0度の場合の鉛直壁面内交換係数分布を、風上面(F面)風下面(B面)および側面(S面)について示したものである。風上面は常に上部ほど大きい分布であるのに対し、風下面はL/H=1/5を除いてほぼ様な分布である。側面については両者の中間的な変化となっている。3次元配列では、2次元キャビティ³⁾

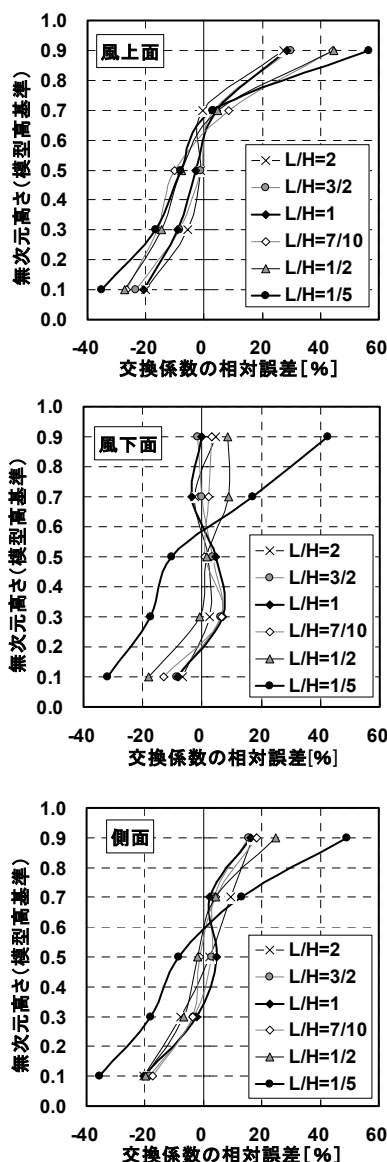


Fig.7 壁面全体を一定値とした場合の交換係数の相対誤差 (風向0度)

で見られた循環流による風下面における中間高さの交換係数のピークがほとんど認められない。

キャノピー内の交換係数のモデル化を考えた場合、風向を考慮して、面ごとに一定値を与えるというのが当面現実的な方針と考えられる。Fig.7は、面平均値を一律に与えた場合の交換係数の相対誤差を示したものである。風下面では小さいが、側面では20%程度、風上面では30~40%の誤差が上下端部で生じることが分かる。

6. まとめ

3次元の立方体正方配列の交換係数について、風洞実験にて系統的に検討を加えた。空間全体では風向による変化は比較的小さいが、局所的にはかなりの分布が存在することが明らかとなった。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究(CREST)、研究代表者：東工大・神田学、および文部科学省の科研費（基盤研究(C), 15560516）の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

- 文献：1) Masson, V., : *Boundary-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397. 2000.
 2) Barlow, J.K. and Belcher S. E., : *Boundary-Layer Meteorol.*, **104**, 131-150. 2002.
 3) 成田健一・他：日本建築学会計画系論文集, **527**, 69-76, 2000.1

* 日本工業大学大学院

** 日本工業大学工学部建築学科・教授・工博

***株式会社 富木工事

*Graduate student, Nippon Institute of Technology

**Nippon Institute of Technology, Prof., Dr. Eng.

*** ATSUKI-KOUJI, M. Eng

EFFECTS OF BUILDING-HEIGHT HETEROGENEITY ON AREA-AVERAGED TRANSFER VELOCITY IN THE STREET SURFACE -WIND TUNNEL EXPERIMENTS USING SALINITY CHANGE TECHNIQUE

Ken-ichi NARITA

Nippon Institute of Technology, Saitama, Japan

1. INTRODUCTION

As a parameterization of turbulent fluxes in urban canopy layer, the resistance network in the canyon has been studied with heat balance method (Kawai and Kanda 2003), with naphthalene sublimation technique (Barlow and Belcher 2002), and with our water evaporation technique using filter paper (Narita 2003). This filter paper method is useful to examine the effect of canyon geometry on transfer velocity in two-dimensional models and also to compare the local difference of transfer velocity between the kinds of surfaces in homogeneous cubic array. About heterogeneous building arrangements, however, it is difficult to investigate the spatial-averaged transfer velocity using this technique because of a problem of edge effects and spatial representativeness. In this study, an experimental method to estimate the area-averaged transfer velocity was newly devised and tried to clarify the effect of heterogeneity of building height in wind tunnel experiments.

2. SALINITY CHANGE TECHNIQUE

In this method (Narita *et al.* 1986), the water evaporation rate is measured not by weight loss but by salinity change of saltwater. A square vessel (600 × 600mm) with 50mm depth was buried in wind tunnel working section as the rim-top matched to surrounding surface. The building models are arranged within it, then fill the vessel with saltwater to bathe the foot of them (Figure 1). After half an hour, stop wind tunnel fan, and remove the building models from the vessel. Then, stir the saltwater in the vessel sufficiently, and take it into four sample bottles. The salinity of these samples were measured with inductively coupled salinometer (accuracy : 0.003‰) as well as samples of initially poured saltwater. From the salinity-change, evaporation rate was calculated as follows.

$$hS = (h - E)S'$$

$$\therefore E = h(S' - S)/S'$$

where E is evaporation depth (mm), h is initial salt water depth (mm), S is initial salinity (‰), and S' is final salinity (‰). Accuracy of evaporation measurement is estimated as follows.

$$\Delta S = S' - S$$

$$\delta E = \delta h \Delta S / S' + h \delta (\Delta S / S')$$

$$\cong \delta h \Delta S / S' + h \delta (\Delta S) / S'$$

Experimental condition is $S' = 35\text{‰}$, $h = 50\text{mm}$, and if measuring error is assumed $\delta h = 0.5\text{mm}$, and $\delta(\Delta S) = 0.0042\text{‰}$, then $\delta E/E$ becomes 2.5% when $E = 0.4\text{mm}$. In this technique, measuring term is not the weight loss but concentration change, so handling mistakes like spill-water doesn't bring about fatal error.

*Corresponding author address : Architecture, Nippon Institute of Technology, Gakuendai 4-1, Miyashiro, Saitama 345-8501 Japan . email: narita@nit.ac.jp

The transfer velocity Wt (ms^{-1}) is calculated by following equation:

$$Wt = E_r / (\rho_s - \rho_a)$$

where E_r is evaporation flux ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$), ρ_s is water vapor density (kgm^{-3}) at street level calculated from saturated vapor pressure of salt water surface, and ρ_a is the water vapor density (kgm^{-3}) in the free stream above. To determine ρ_s , surface temperature of salt water was measured by L-shaped fine thermocouple under conditions enveloped with thin water film by surface tension. In calculation of ρ_s , vapor pressure drop by salinity was taken into account. The wind tunnel used here has no control system about temperature and humidity. Then, as a reference, evaporation rate from small eight vessels upstream were also measured simultaneously in every case (Figure 2). All results were analyzed as a ratio of transfer velocity (Wt) to this reference value (Wt_0). Wind speed is 1.2ms^{-1} at the top of boundary layer and depth of the boundary layer is 350mm.

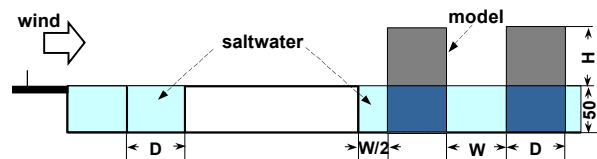


Fig.1 Detailed cross section of sampling area

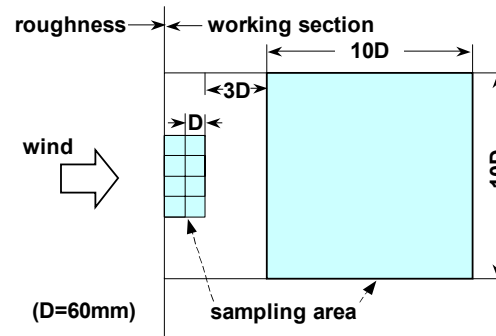


Fig.2 Plane view of working section

3. Results

3.1 Area-averaged Wt in constant building-height

Figure 3 shows model arrangements under building height constant. The basic model dimension is 60mm ($=D$) cubic. Series 1s-(array number) are building density variation (λ_p : plane area density of building). Case 1s-6, 2s-3, and 3s-2 are variation of model dimension under constant λ_p . The area-averaged Wt was measured in three kind of model height (H) ; 0.5D, D, and 1.5D for every arrangements.

The results were summarized in Figure 4, as a change due to the street canyon geometry (W/H). In the variation within same plane size arrangement, Wt has a slight peak in $W/H=1.0-1.5$. On the contrary, the effect of model assembling was not simple, and variation patterns were different for model height.

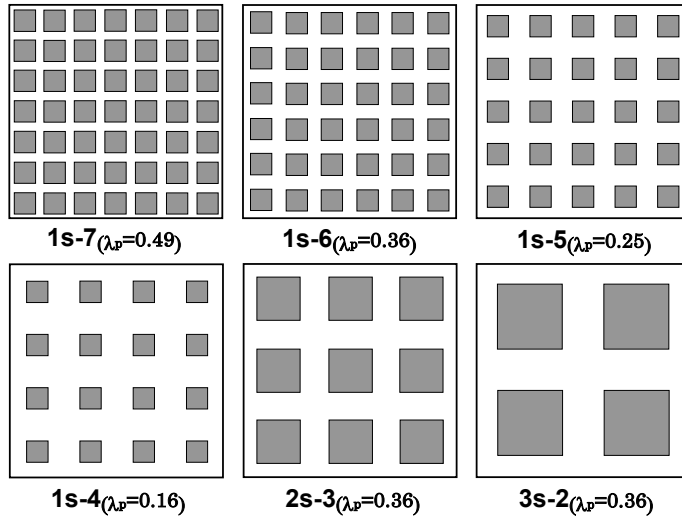


Fig.3 Model arrangements for building density variation and building dimension variation under model-height constant

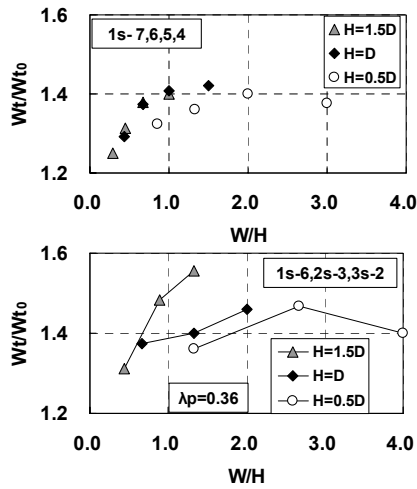


Fig.4 Change of Wt due to W/H – variation of model density (upper), variation of model dimension (lower)

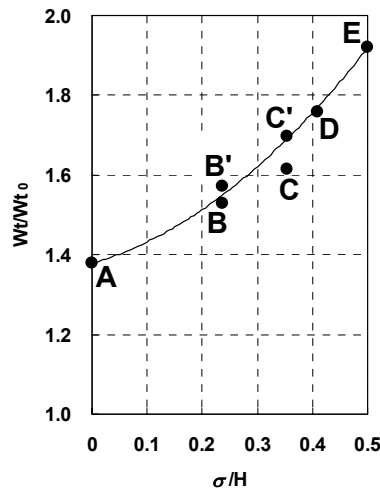


Fig.6 Relationship between Wt of street and normalized standard deviation (σ) of model height

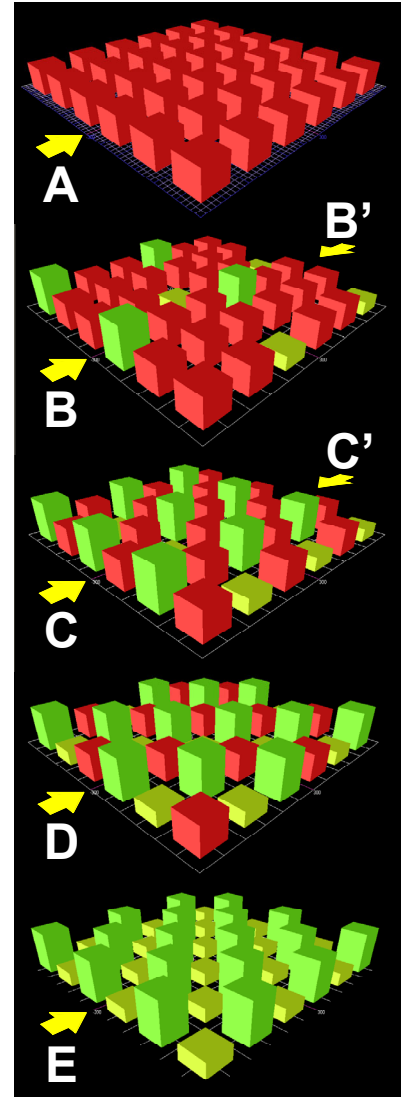


Fig.5 Perspective of model arrangements for building-height heterogeneity

3.2 Effects of building-height heterogeneity

To create building-height heterogeneity, concerning the regular cubic array, we make a replacement of several cubic models by half height or one and half height models (Figure 5). Here, all arrangements have same average height and same λ_p . Figure 6 shows the difference of the Wt of street due to the deviation of the model height is at most 40%. This means that morphological modeling of complicated city structure by regular cubic array to which has equivalent average height and λ_p is not appropriate for the estimation of area-averaged transfer velocity.

4. CONCLUDING REMARKS

Though salinity change technique is available for only about street surface not including wall and roof surfaces, it is excellent in area-averaged investigations especially for the heterogeneous morphology. Using this technique, it was confirmed that the vertical heterogeneity of buildings has much greater effects on area-averaged transfer velocity than that of horizontal variation under building-height constant.

Acknowledgements

This research was financially supported by CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) of JST (Japan Science and Technology Cooperation) and by Grant-in Aid for Scientific Research from the Ministry of Education, Science and Culture of Japan.

References

- Barlow, J.F. and Belcher, S.E. 2002: The resistance network for transfer from street canyons, *Proc. of 4th symposium on the urban environment*, AMS, 113-114.
- Kawai, T and Kanda, M. 2003: A simple 3D urban street canyon model for meso scale simulation, *Proc. of 5th Int. Conf. Urban Climate*, vol.1, 67-70
- Narita, K., Sekine, T., Tokuoka, T. 1986: An experimental study on the effects of air flow around buildings on evaporation in urban area Part 2, *J. Archit., Plan. Environ. Eng.*, **366**, 1-10. (in Japanese with English Summary)
- Narita, K., 2003, Wind tunnel experiment on convective transfer coefficient in urban street canyon. *Proc. of 5th Int. Conf. Urban Climate*, vol.1, 355-358

Aya Hagishima ^{*1}, Jun Tanimoto ¹ and Ken-ichi Narita ²¹ Kyushu University, Fukuoka, Japan, ² Nippon Institute of Technology, Saitama, Japan

1. INTRODUCTION

The turbulent heat exchange between the atmosphere and urban surfaces can be expressed by the convective heat transfer coefficient (CHTC) h as shown in equation (1).

$$Q_H = h \cdot (T_S - T_{air}), \quad (1),$$

Although the CHTC is the crucial parameters for estimation of the heat flux of urban areas in the Urban Canopy Models (UCMS), it is yet still poorly understood. In this paper, we compare the former experimental studies on the CHTC of building surfaces and surfaces with urban-like roughness.

2. Full-scale measurements on building surfaces

2.1 Horizontal roof

Figure 1 shows some of the full-scale measurements of CHTC for horizontal roofs of buildings. The curves of Urano and Watanabe (1983) and Hagishima and Tanimoto (2003) agree well in spite of the differences in roof size. The CHTC of Kobayashi (1994) has smaller values and smaller slopes than the curves in Urano and Watanabe (1983) and Hagishima and Tanimoto (2003). Except for Kobayashi and Morikawa (2000), the CHTC values are all in near agreement

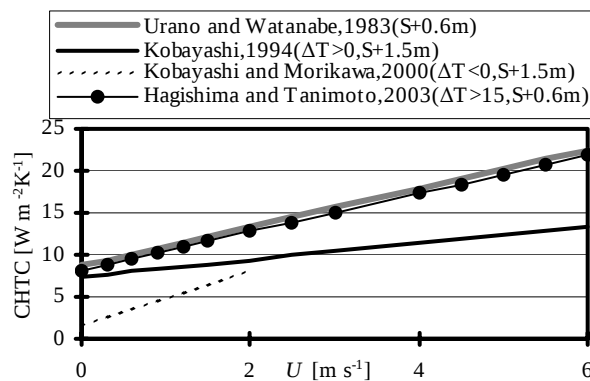


Fig.1 Relation between CHTC for horizontal building roofs and wind speeds. "S+1m" means that the wind speed was measured 1-m above the objective surface. $\Delta T = T_S - T_{air}$.

**Corresponding author address:* Aya Hagishima, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu-University, 6-1 Kasuga-shi, 816-8580 Japan; e-mail: aya@cm.kyushu-u.ac.jp

at wind speeds below 1 m s^{-1} . In contrast, the measurement of Kobayashi and Morikawa (2000) are significantly less than the other measurements at wind speeds below 2 m s^{-1} . The reason for this discrepancy is the thermal stability.

2.2 Vertical walls

Figure 2 indicate the experimentally derived equation of CHTC defined by the wind speed for building walls. First of all, it is recognized that the effect of the wind direction on CHTC is small. In contrast, the position in relation to the wall has a relatively large influence on CHTC. The particular choice of target building also significantly affects CHTC.

3. Scale model experiment

Figure 3 shows the results of two scale model experiments in the wind tunnel and one full-scale measurement. The curves (M) is based on the data by Meinders et al. (1997). In this study, eight cubes, 15 mm on a side, are scattered at regular intervals on a straight line in a wind tunnel. The curves (N) indicate the data of the roof of the isolated cube by Narita et al. (2000) based on the evaporation method with filter paper. The curves (K) indicate the data of horizontal roof of a 3-story building by Kobayashi (1994).

For a given wind speed, the CHTC of scale model based on the mass transfer method is much larger than those based on the thermal balance method. The relations between the

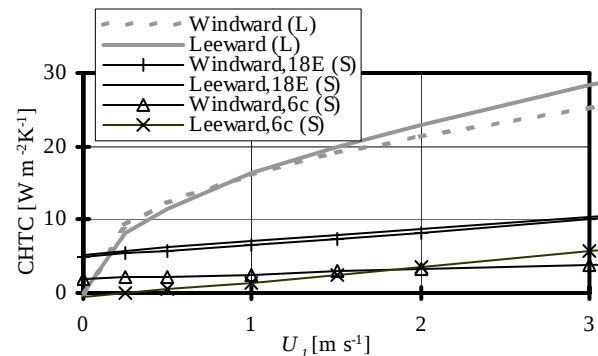


Fig.2 Relationship between CHTC of vertical wall of buildings and wind speeds at the height of 1-meter

"18E" indicates the data observed at the edge of the wall of 18th floor and "6c" indicates the data observed at the central wall of the 6th floor. (L) and (S) indicate the data of Loveday and Sharples, 1984, respectively.

Nusselt number and Reynolds number of them are also different. The CHTC from full-scale measurements are much smaller than those from smaller-scale measurements. The relation between the Nusselt number and Reynolds number of full-scale measurement is also much different from those of scale model experiments. Although these three results cannot be compared precisely because of the differences of both referential wind velocity and boundary condition, we would like to emphasize the disagreement of the relation $Nu(Re)$ between full-scale measurement and scale model experiments.

Figure 4 shows the relation between the mass transfer coefficient (MTC) of 2-D canopy and the ratio of model height to street width H/W , which are taken from Narita et al. (2000) and Barlow et al. (2004). Each values of roof increase with the increase of H/W at the ratio H/W below 0.6, where the flow regime is assumed to be isolated flow or wake interference. Conversely, that is constant at the ratio H/W above 0.6, where the flow regime is assumed to be skimming. The MTC of the vertical windward wall generally decreases with the increase of H/W . In addition, the MTC of the vertical windward wall by Narita et al. (2000) is almost constant in the

range of $H/W=0.8$ to 1. The MTC of the leeward wall decreases with an increase of H/W at the ratio H/W below 0.3 and above 0.7, which is classified as the isolated flow and skimming flow.

6. Conclusions

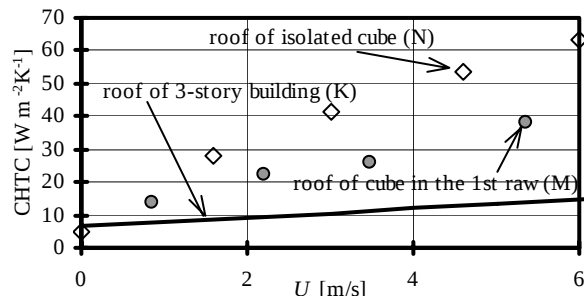
The several experimental researches on the CHTC of urban surfaces are compared. To improve a model of CHTC for UCMs, the further investigation under various thermal and geometric conditions are needed. In addition, comparison among several measurement results that are based on different scales and measurement methods is important.

Acknowledgments

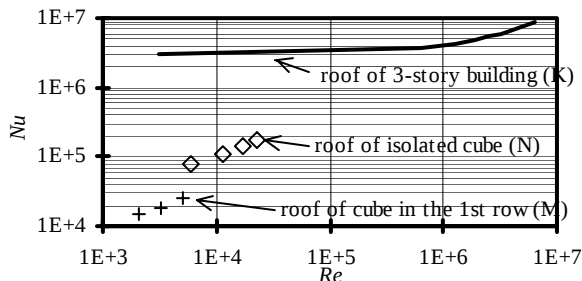
This research was partially supported by CREST (Core Research for Evolution Science and Technology) of JST (Japan Science and Technology Cooperation).

References

- Barlow, J. F., Harman, I. N. and Belcher, S. E. 2004: Scalar Fluxes from urban street canyons Part 1: Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorol.*, (submitted).
- Hagishima, A.; Tanimoto, J. 2003: Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Building and Environment*, 38, 873-881.
- Kobayashi, S. 1994: Convective heat transfer characteristics of rooftop surface in summer, *J. Archit, Plan Environ. Eng.*, 465, 11-17. (in Japanese)
- Kobayashi, S., Morikawa, K. 2000: Convective heat transfer coefficient of rooftop surface in downward heat flow, *J. Archit, Plan Environ. Eng.*, 536, 21-27. (in Japanese)
- Loveday, D. L. and Taki, A. H. 1996a: Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building façade, *Int. J. Heat Mass. Transfer*, 39, 1729-1742.
- Meinders, E. R., Van Der Meer, T. H., and Hanjalic, K. 1998: Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41, 335-346.
- Narita, K., Nonomura, Y., Ogasa, A. 2000: Wind tunnel test on convective mass transfer coefficient on urban surface, Study on convective heat transfer coefficient on outside building wall in an urban area Part 2, *J. Archit, Plan Environ. Eng.*, 527, 69-76 (in Japanese)
- Sharples, S. 1984: Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces, *Building Environment*, 19, 31-39.
- Urano, Y., Watanabe, T. 1983: Heat balance at a roof surface and time-varying effect of the film coefficient on its thermal response, *J. Archit, Plan Environ. Eng.*, 325, 93-103. (in Japanese)



(a) Relationship between wind speed and CHTC



(b) Nusselt number - Reynolds number

Fig.3 Comparison between CHTC of scale model and full-scale building

(M) indicates the data of roof of cube by Meinders et al, 1997. (K) indicates the data of building roof by Kobayashi, 1994. (N) indicates the data of roof of isolated cube by Narita et al., 2000. The height of the referential wind speed is $8 \cdot H$.

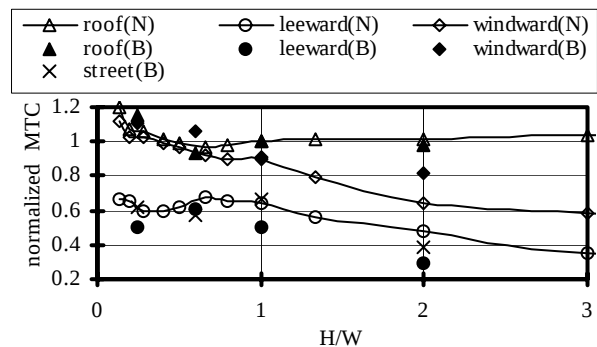


Fig.4 Measured MTC for various values of height to width ratios H/W .

(N) and (B) indicate the data from Narita et al, 2000 and Barlow et al., 2004, respectively. The transfer coefficients are normalized by the measured mass transfer coefficient for the roof with $H/W=1.0$.