

# 実大スケール都市キャノピーの 表面对流熱伝達率分布に関する観測

Field Measurement on distribution of convective heat transfer coefficient  
within a real-scale urban canopy

萩島 理\*, 成田 健一\*\*, 菅原広史\*\*\*, 谷本 潤\*\*\*\*

Aya Hagishima, Ken-ichi Narita, Hirofumi Sugawara, Jun Tanimoto

A field measurement on thermal balance and flow characteristics of a full-scale 2D canopy was done, and following phenomena were observed. 1) Air temperature distribution and sensible heat flux of canopy surfaces show the high irregularity due to the sunshade. 2) Linear relationships exist between wind speed U1m and convective heat transfer coefficient (CHTC) of most measurement points. The linear regressions of SAT meters fixed on a leeward wall show similar tendency, in contrast those on a windward wall vary with the position. This tendency is consistent with those of former wind tunnel experiments. 3) CHTCs of walls deduced from measurement result of surface thermal balance show different tendency of those of SAT meters. It may be caused by the effect of the unhomogeneous temperature distribution of canopy.

**Key words:** Convective heat transfer coefficient, Urban Canopy Model, Field Measurement

対流熱伝達率, 都市キャノピーモデル, 屋外実測

## 1. 緒言

ここ数年来、ヒートアイランド現象など都市域に特有の現象をより高精度に予測することを目的として、「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<sup>1)~5)</sup>。都市キャノピーモデルはいずれも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。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のインパクトが陽的に考慮されているため、ここ数年来ヒートアイランド緩和策の比較検証を目的とした工学的研究において盛んに用いられている。しかし、都市キャノピーモデルには、幾つかの大胆な仮定や検証が不十分なサブモデリングが含まれており、モデル全体の挙動や精度は検証の途上にあるといえる。都市キャノピーモデルの中でも特に大きな不確定要素となっているのは、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。都市の表面熱伝達率に関しては、都市気候分野のみならず建築工学、

伝熱工学分野において関連する研究が散見されるが、周辺気流、建物密度などを考慮した包括的なモデリングの手法は確立していないのが現状である<sup>6)</sup>。

例えば、直方体ブロック群や2次元リブなどによる urban-like な粗面における伝達率についての実験的研究として、伝熱工学分野では対流熱伝達率の無次元数であるヌッセルト数に関して、レイノルズ数、グラスホフ数等を用いた経験式が多数提案されている<sup>7)</sup>。しかし、複雑形状の都市表面では、参照風速や代表長さを定義することが困難なため、これらの無次元式を適用することは困難である。

建築工学分野では古くから対流熱伝達率を風速の一次関数または指数関数として定義した Jürges による実験式が用いられている<sup>8)</sup>。しかし、この式は風洞の一樣流中に垂直に設置された 0.5m 角加熱銅板の熱伝達率の実験式であるため、1)境界層の未発達な部分を含んだ小面積の平板の値を十~数十メートルのスケールを有する建物外表面に適用することには問題がある、2)「風速」はどの位置の風速を指すのか(上空風か壁面近傍なのか)が明確ではない、等の問題が以前から指摘されてきた。この問題点を解消すべく、これまで複数の研究者が建物表面での実測結果から風速と対流熱伝達率の新

\* :九州大学大学院総合理工学研究院 准授・博士(工学)

\*\* :日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

\*\*\* :防衛大学校 講師・博士(理学)

\*\*\*\* :九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

Associate Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

Professor, Department of Engineering, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., National defense Academy of Japan, Dr. Sci.

Professor, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

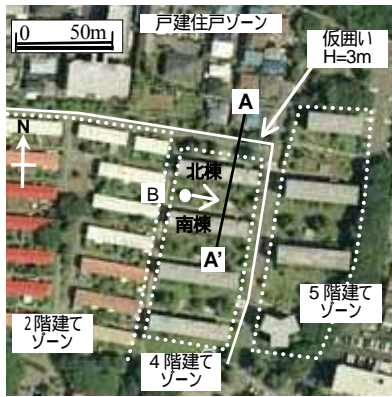


図1 測定対象地域の航空写真



図2 測定対象キャノピーの概観 (図1のB点より撮影)

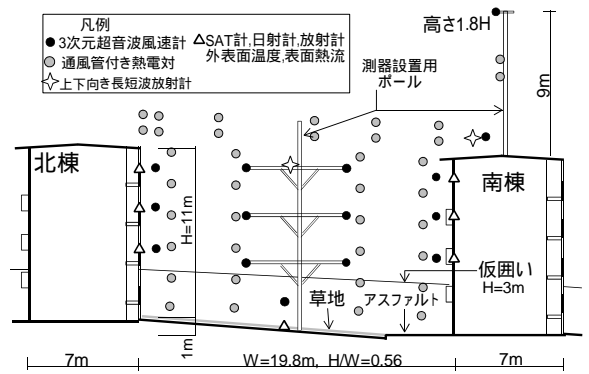


図3 測定対象キャノピーの断面図 (図1 A-A'断面)

表1 測定項目及び測定機器

測定項目	場所	測定機器
入射長短波放射量	壁(南北各々0.45H, 0.64H, 0.86H), 地面, 屋根計8箇所	赤外放射計(KIPP&ZONEN CG-3, PIR, EKO MS-202), 日射計(EKO MS-601)
伝導熱流	壁外表面(南北各々0.45H, 0.64H, 0.86H), 屋根表面, 地表面, 土壌深さ5cm, SAT計表面, 計16箇所	熱流センサー(EKO MF-190)
上向き・下向き長短波放射量	キャノピー中央・屋根面計2箇所	精密長短波放射計(EKO MR-40)
外表面温度	壁・SAT計(南北各々0.45H, 0.64H, 0.86H)計13箇所, ガラス窓(南北各々2~4階)6箇所	熱電対(T-CC, 0.1mm)
気温	キャノピー中央鉛直断面内 38点 室内(南棟, 北棟の2~4階)6点	屋外は通風ファン付き日射遮蔽筒内に熱電対(T-CC, 0.1mm)を固定 室内は放射遮蔽筒無しで熱電対(T-CC, 0.1mm)を露出
気流分布	キャノピー中央鉛直断面内 15点	三次元超音波風向風速計 5cm スパン(KAIJO WA(T)-395+DA-600), 10cm スパン(KAIJO SAT-540, SAT-530, Young CYG-81000, EKO USA-1)
水蒸気濃度	キャノピー上空 (高さ 1.8H) 1箇所	オープンパス H <sub>2</sub> O アナライザー (Li-Cor LI7500)
気象条件	屋上	転倒ます型雨量計(EKO), 天空日射量, 全天日射量(EKO MS801)

しい実験式を提示してきたが<sup>9)-13)</sup>、屋外観測の種々の制約により建物周辺の気流場と伝達率の同時測定が困難なため、建物周辺の気流性状、表面サイズ等、実測場所固有の条件が得られた結果に与える影響を系統的に検証した例は殆ど無い。

一方、都市気候分野では近年、粗度群の面内伝達率分布に関する風洞実験結果を基に建物の屋根、壁、路面の対流フラックスへの寄与を表現するスキームが提案されている<sup>14)15)</sup>。これらの手法で参照されているのは、風洞装置内に設置された2次元または3次元キャノピー模型を対象としたナフタレン昇華法<sup>16)</sup>や濾紙蒸発法<sup>17)</sup>による実験である。しかし、1) 模型サイズが小さくレイノルズ数依存性が残る条件での測定結果が都市スケールで適用できるのか不明、2) スカラーのソースとなるナフタレン塗布面や湿潤濾紙面の面積効果が結果に影響を及ぼす可能性がある、といった問題が指摘されている<sup>6)</sup>。

以上要するに、都市域の熱交換過程モデリングのためには、都市の実大スケールにおける気流場及び熱収支・対流熱伝達率の包括的な観測データの蓄積が不可欠である。このような状況に対し、筆者らは、建替予定の集合住宅団地を対象として、団地の居住者全員が退去した後の3ヶ月の間に集中的な微気象観測を行う機会を得た。この観測プロジェクトは、道路交通、建物居住者の安全やプライバシー等の制約が殆どないという絶好の条件に加え、団地群による立方体の2次元キャノピーが比較的単純な幾何形状なため風洞実験や数値モデルとの照合が容易、という利点を有している。本稿はこの

観測の中でも特にキャノピー表面の対流フラックスおよび表面対流熱伝達率(以下、CHTC)について報告する。

## 2. 測定概要

### 2.1 測定期間、観測対象場所

2004年9月22日から12月3日の約3ヶ月間、東京都武蔵野市桜堤(北緯 35.41°, 東経 139.45°)に位置する集合住宅の隣棟空間で観測を行った。集合住宅団地の航空写真を図1に、隣棟空間の写真を図2にそれぞれ示す。測定対象キャノピーは同じ形状の4階建ての横長な建物2棟に囲まれており、建物高さとしてキャノピー幅の比H/W=0.56、建物高さとして建物長辺方向幅の比H/L=1/4となっている。この地域の主風向は南または北で、建物の長辺方向にほぼ直交している。2棟に囲まれた地面は緩やかな南斜面となっている。北棟の壁面は底などの突起物は殆ど無くベランダによる凹みがあるのに対し、南棟の壁面は各階窓の庇、階段踊場、屋根などの凸部がある。観測の行われた季節が9月下旬から12月初旬で太陽高度が低かったため、測定対象としたキャノピーの南棟壁面及び中庭の南寄りの領域は全期間を通じて終日日影である。

### 2.2 測定項目

測定機器の設置状況を図3に、測定項目一覧を表1にそれぞれ示す。キャノピー中央の鉛直断面内において流速分布、気温分布、キャノピー各面への入射放射量及び表面温度の多点連続測定を行って



図4 測定機器の設置状況

いる。また、気象条件として南棟屋上にて、雨量、全天日射量、天空日射量、湿度、温度を測定している。加えて南棟と北棟の2~4階では、室温、ガラス表面温度、壁面温度、壁面熱流を測定している。また、キャノピー中央の地面において、短長波放射量、地面熱流を測定している。測定間隔は、気流については0.1秒、その他のデータについては2秒で、本稿の解析では10分平均値を用いる。また、気流速度については、瞬時風速のスカラー値の時間平均を用いる。

なお、壁面の測定点は「建物方位の略記号(NまたはS)-測定高さ」という形式で略記する(例:S-0.45Hは南棟の0.45Hにおける測定点を意味する)。また、北棟の南向き壁面を「北壁」、南棟の北向き壁面を「南壁」と略記する。当該キャノピーでは日中に「北壁」が日向、「南壁」が日影となるので注意されたい。

### 2.3 対流フラックスおよび対流熱伝達率の推定方法

南北の壁面3高度、屋根面では放射量及び伝導熱流の観測値から熱収支式の残差項として対流フラックスおよび対流熱伝達率の推定を行っている(以下、直接法)。なお、壁面については入射長波短波放射量、表面温度の実測値から日射反射率と放射率を仮定して得られた正味放射量を用いている。壁面の日射反射率は、キャノピー底部中央及び屋上で測定した水平面入射日射量と形態係数に基づき最適化した値である。屋根については表面温度の観測データが取得できなかったため、上向き長波放射量の測定値から得られる放射温度を表面温度として取り扱っている。なお、日射反射率の入射角依存性を考慮し、直射日射の当たる面については太陽入射角45度以下の条件を満たすデータのみを伝達率の解析対象としている。

直接法に加えて、厚さ5cmの断熱材(50cm角)に黒色艶消し塗装した銅板を貼付した試験体(以下、「SAT計」)を用いて、南棟と北棟の建物壁面3高度、地面中央の計7ヶ所で対流熱フラックス及び対流熱伝達率の測定を行っている(以下、SAT計法)。SAT計の設置状況を図4(a)及び(b)に示す。SAT計により測定対象面の速度境界層が乱れるのを防ぐため四周にスカート状の傾斜面を取り付けている。

SAT計による対流熱伝達率の推定方法は次の通りである。まず、SAT計表面の入射日射量、長波放射量、表面温度の測定値とSAT計の日射吸収率及び放射率を用いて正味放射量を推定する。次いで、得られた正味放射量と伝導熱流の測定値から熱収支残差として対流フラックスを求め、対流フラックスを表面温度とreference気温との温度差で除す事で対流熱伝達率を推定する。尚、3m四方の銅板黒

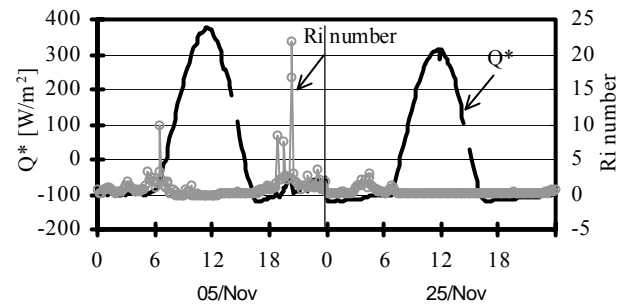


図5(a) 正味放射量  $Q^*$ の経時変化(キャノピー中央,高さ1H)

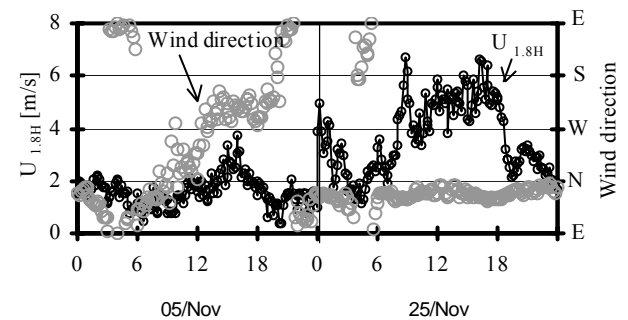


図5(b) 上空の風速および風向の経時変化(高さ1.8H)

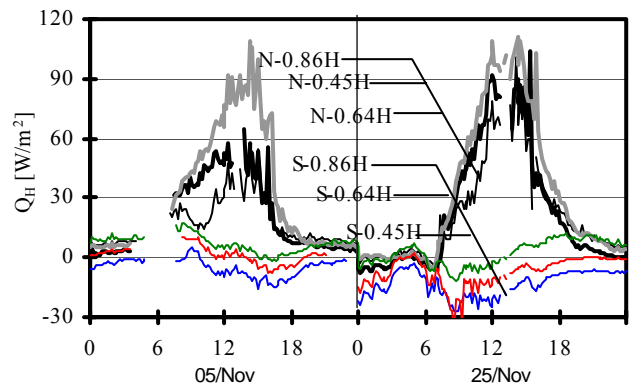


図5(c) 壁面の対流フラックス  $Q_H$ の経時変化

色艶消し塗装試験体を用いてSAT計の日射反射率と放射率の測定を予め行っている。対流熱伝達率の推定精度を確保するため大気と表面の温度差1.5以上とし、日向面での太陽入射角60度以下の条件を満たすデータのみを解析対象としている。

また、地面については濾紙蒸発法による測定を行っている。地面におけるSAT計及び濾紙試験体の設置状況を図4(c)に示す。濾紙試



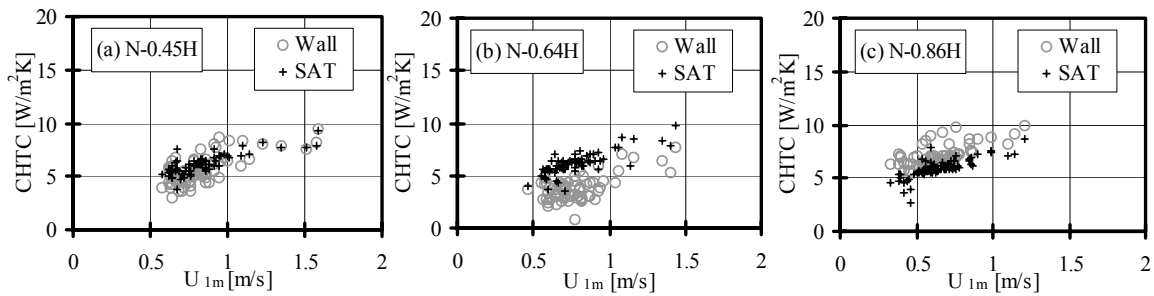
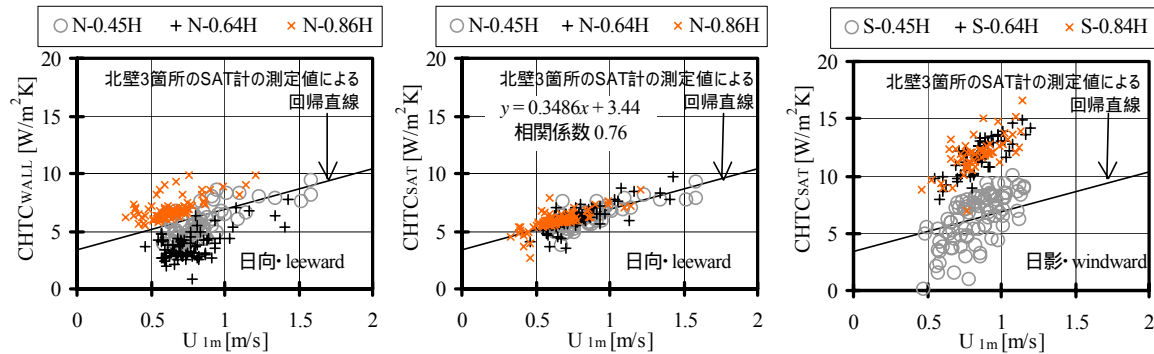


図7 対流熱伝達率CHTCと近傍風速  $U_{1m}$  の関係、ただし  $Ri < 0.01$ , 北風 leeward 条件,  $(T_s - T_{air}) > 1.5^\circ C$



(a) 北棟 直接法による壁の伝達率 (b) 北棟 SAT 計法による伝達率 (c) 南棟 SAT 計法による伝達率

図8 対流熱伝達率CHTCと近傍風速  $U_{1m}$  の関係、ただし  $Ri < 0.01$ , 北風  $(T_s - T_{air}) > 1.5^\circ C$

温地面を通過した冷気が流入する、という2つのメカニズムの重ねの結果、中間点が他に比べ小さくなったと推測されるが、今回得られた観測データではこの推察をしっかりと裏付けることは困難である。

日射の影響がなくなる夜間には両壁面の温度が低下しキャノピー全体に温度成層が出現し、上空風も弱いためバルクリチャードソン数が大きい。また、壁面に比べて地面の表面温度が特に低いため、キャノピーの底から3分の1の高さまでの領域では等温線の間隔が密になっている。

#### 4. 対流熱伝達率の観測結果

直接法および SAT 計法により得られた対流熱伝達率の特性を考察する。なお、プロットは晴天日で建物に直交する軸と上空風向のなす角度が  $\pm 11.25^\circ$  以内、バルクリチャードソン数が 0.01 以下の中立及び不安定条件である。また、SAT 計の対流熱伝達率については、SAT 計表面温度と近傍気温、周辺壁表面温度と気温の差が同じ符号のときのみを対象とする。

##### 4.1 壁面と SAT 計の対流熱伝達率の比較

日影の南壁は表面温度が日中も低いため、直接法による壁の対流熱伝達率については十分なサンプル数を得る事が出来なかった。そこで、日向の北棟の3地点について、 $(T_s - T_{air}) > 1.5$  で北風・leeward 条件における壁および SAT 計の対流熱伝達率と近傍風速の関係を図7に示す。なお、空気温度の reference は面からの距離 1m で定義している。

いずれのプロットも概ね線形関係に近い特性を示している。壁に比べ SAT 計のプロットのバラツキが小さいのは、日射のある条件下

で SAT 計表面と気温の差が大きいため伝達率の推定誤差が小さくなったためだと考えられる。また、SAT 計と壁の伝達率は N-0.45H と N-0.86H では概ね等しい値に見えるのに対し、N-0.64H では壁の伝達率が SAT 計に比べ若干低い値を示している。

当初筆者らは、日向の北壁の表面温度が近傍気温に比べ最大約 13 程度高くなるのに対して、SAT 計は最大で約 50 高い値を示していたため、SAT 計の近傍では局所的な温度境界層が形成され SAT 計の伝達率が壁の伝達率に比べ大きくなるのではないかと予測していたが、そのような明確な傾向は見られない。

##### 4.2 壁面の対流熱伝達率 - 近傍風速の関係

対流熱伝達率と近傍風速の関係が壁面内の場所によりどのような違いを有するか検討した結果を図8に示す。空気温度の reference は面からの距離 1m で定義している。

北壁に設置された SAT 計は3地点の間に殆ど差は無くプロットのまとまりも良く、3地点のデータ群の回帰直線の相関係数は 0.76 と高い値を示した。これに比べると、同じ北壁の直接法による伝達率は最高点の N-0.86H の値が若干他の2地点より大きな値を示しており、次いで最も地面に近い N-0.45H が大きくなっている。一方、日影の南壁に設置された SAT 計はばらつきがやや大きく、北壁の SAT 計に比べると傾きが大きい。また、上部2地点 (S-0.64H, S-0.86H) は他の地点に比べかなり大きな値を示している。

では、南壁の SAT 計の伝達率が北壁のそれに比べ大きくなるのは何故だろうか。伝達率の reference となる空気温度及び近傍風速は面からの距離 1m で定義しているため、SAT 計近傍 1m の範囲内での温度場・速度場が北壁と南壁で違っていた事になる。筆者らは、多くの既往研究で報告されている skimming flow における windward 壁上部付近の強い下降気流が、windward 壁近傍の速度境界層を leeward

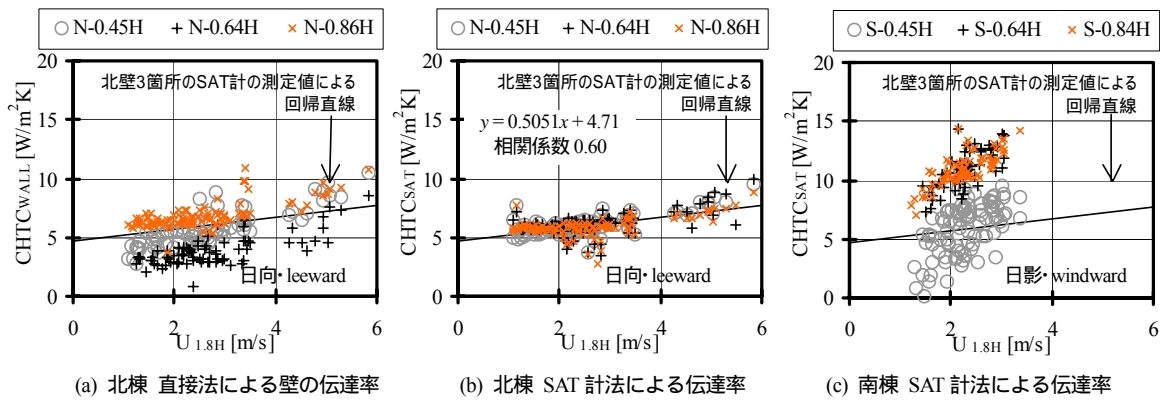


図9 壁面の対流熱伝達率 CHTC と上空風速  $U_{1.8H}$  の関係、ただし  $Ri < 0.01$ , 北風 ( $T_s - T_{air}$ )  $> 1.5^\circ\text{C}$

壁近傍のそれに比べかなり薄く、対流熱交換を促進している可能性を指摘したい。

一方、windward の南壁最下点の S-0.45H において近傍風速 0.5m/s 前後で伝達率がゼロに近い値となるのは、SAT 計表面と近傍 1m の空気の温度差があるにもかかわらず、SAT 計表面の対流フラックスがゼロに近い事を意味している。これは、終日日影となる地面の影響による地面付近の低温の空気塊 (図 6(b)を参照のこと) の存在と、対向壁面や屋根で暖められた空気がキャビティ渦の re-circulation により吹き込む事の 2 点により、SAT 計近傍の気温プロファイルが屈曲していたためと考えられる。

残念ながら今回は壁面近傍 1m 以内での温度場・速度場の計測を行っておらず、日向の北壁で windward 条件 (南風条件) のデータが得られなかったため、以上の推論に対する根拠は十分ではない。キャノピー内伝達率に及ぼすマクロおよびミクロな温度場・速度場の影響についての検証は今後の課題としたい。

#### 4.3 キャノピー各面の対流熱伝達率 - 上空風速の関係

直接法及び SAT 計法に基づく対流熱伝達率と上空風速との関係について図 9 に示す。なお、伝達率は上空 1.5H における気温を reference としている。leeward 条件の北壁に設置された SAT 計の伝達率の風速依存性は測定点高さによらずほぼ等しく、プロットのバラツキも小さい。一方、直接法による北壁 (leeward 条件) の伝達率は、N-0.86H が概ね大きな値を示し、次いで N-0.45H が大きく、中間地点の N-0.64H は小さい。北壁の測定点の中でも中間の高さに位置する N-0.64H で壁の伝達率が小さくなる現象は図 8(a)の近傍風速 - 伝達率の傾向と一致している。これに対して、また、日影の南壁 (windward 条件) に設置された SAT 計は周辺の壁に比べプロットの勾配が大きく、特に上 2 点 (S-0.64H, S-0.84H) は他に比べて伝達率が高い。この傾向も図 8(c)の近傍風速 - 伝達率の傾向と一致している。以上のような性質から、キャノピー内の伝達率分布は近傍風速の大小ではなく、壁面近傍の境界層の特性差の影響が大きい事が推察される。

次に、直接法による屋根の対流熱伝達率と上空風速の関係を図 10 に示す。プロットのばらつきは若干大きいのが概ね線形にまとまっており、パルクリチャードソン数の伝達率への影響は見られない。SAT 計法による壁面の対流熱伝達率が SAT 計サイズの影響を受けていると仮定した場合、屋根サイズが代表長さとなる直接法による屋根

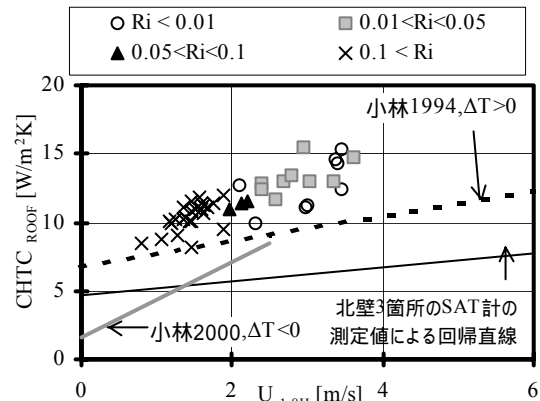


図10 南棟屋根の対流熱伝達率 CHTC と上空風速  $U_{1.8H}$  の関係、ただし、北風 ( $T_s - T_{air}$ )  $> 10^\circ\text{C}$

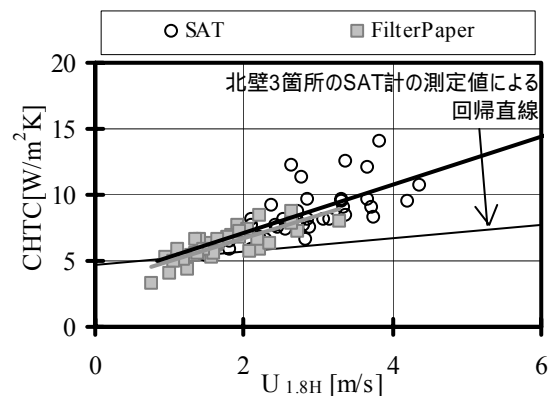


図11 地面の対流熱伝達率 CHTC と上空風速  $U_{1.8H}$  の関係、ただし、北風 ( $T_s - T_{air}$ )  $> 4^\circ\text{C}$

の伝達率の方が小さくなる事が予測されるが、得られた結果は逆となっている。また、本研究の屋根の伝達率は小林ら(1994)(2000)<sup>10)11)</sup>の観測結果に比べても大きな値を示している。この原因として、周辺に建物が少なく概ね単独建物とみなせる小林らに対し、本研究は傾斜面に位置する  $H/W=0.56$  の間隔での 2 棟に囲まれたキャノピーを対象としており、建物屋根の高さが異なっているため屋根周辺気流が乱れていた可能性が考えられるが、この仮説を立証するには更なる観測データが必要であろう。

地面中央付近における SAT 計法及び濾紙蒸発法による対流熱伝達率と上空風速の関係を図 11 に示す。尚、濾紙蒸発法ではレイス数を 1 と仮定して物質伝達率から熱伝達率への変換を行っている。ス

カラーフラックスを直接測定する濾紙蒸発法はプロットのばらつきが小さく、良好な推定精度を持っていた事がうかがえる。また、SAT計法と濾紙蒸発法の回帰直線は概ね一致している。また、両者はいずれも leeward の北壁 SAT 計に比べ大きな値を示している。この理由については、次節で考察する。

#### 4.4 風洞実験との比較

図 9, 10, 11 に示したキャノピー各表面の対流熱伝達率 - 上空流速の近似直線に流速 2.5 m/s を代入したときの伝達率から得られるキャノピー内の伝達率分布と既往の風洞実験の比較を行う。なお、比較対象としては、 $H/W=0.5$  の 2 次元キャノピー内に模型高さの 6 分の 1 サイズの濡らした濾紙を固定して一定気流下に設置し、重量変化を測定する事で物質伝達率を推定した成田ら(2000)<sup>17)</sup>、 $H/W=0.5$  の 2 次元キャビティーの内表面全部にナフタレンを塗布し、ナフタレン昇華量から物質伝達率分布を推定した Chyu and Goldstein (1986)<sup>19)</sup> を取り上げる。比較の結果を図 12 に示す。なお、いずれのデータも leeward 壁面の伝達率の平均値で基準化している。

この団地における SAT 計の伝達率分布は、1) leeward 壁では高さによらずほぼ一定、2) windward 壁では高い位置では大きな値となる、3) 地面では leeward 壁における値と windward 壁上部における値の間となる、という特徴を有し、この傾向は想定する流速を 2~4m/s の範囲で変化させても変わらない。またこの特徴は、濾紙蒸発法により物質伝達率を測定した成田ら(2000)の結果とほぼ類似している。この理由の一つとしては、スカラーソースの分布の類似性が違いが挙げられよう。即ち、成田ら(2000)では模型サイズの 6 分の 1 の濾紙以外の表面は全て完全 dry 面となるため、キャノピー内のマクロなスカラー濃度分布が測定値に及ぼす影響は小さく、キャノピー内の面近傍の速度境界層の発達の特徴が伝達率分布の支配的因子となる。本研究で得られた SAT 計の対流熱伝達率もまた、SAT 計試表面が周囲壁面に比べ 30°C 程度高く保たれていたため、成田ら(2000)と同様にキャノピー全体のスカラー分布の影響は小さかったと考えられる。

一方、直接法による leeward 壁の伝達率分布は、SAT 計法および成田ら(2000)とは異なり、高さ方向に屈曲している。図 9(a)のプロットのバラツキが SAT 計法に比べ若干大きい事から、この分布性状が当該キャノピーの典型的な伝達率分布であると断定するにはもう少し観測データの蓄積が必要ではあるが、以下に、leeward 壁の伝達率分布が高さ方向に屈曲する理由を考察してみよう。

まず図 9(a)と図 8(a)が類似の傾向を示していた事から、近傍 1m での平均流速の影響は無いと考えられる。また、SAT 計法による leeward 壁の伝達率は 3 点ともほぼ同じ値を示している事から、leeward 壁では壁近傍速度境界層の特性(速度プロファイルの形状)にも殆ど差はないと考えられる。以上より、直接法による leeward 壁の伝達率分布の原因としては、壁近傍 1m の温度境界層(温度プロファイルの形状)が高さにより異なっていた事が推測される。この推測に対する傍証として、Chyu and Goldstein (1986)の結果とのわずかな類似性を挙げる事ができる。Chyu and Goldstein (1986)ではキャノピー全面にナフタレンを塗布した条件であり、windward 壁上部から windward 下部~地面~leeward 壁に沿う cavity flow に従ってナフタレンの濃度境界層発達の影響を受け伝達率分布は非常に大きな

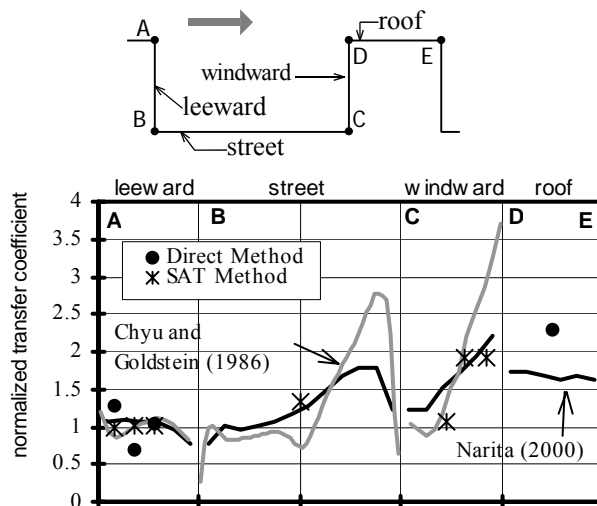


図 12 キャノピーの伝達率分布 (leeward 壁の平均値で無次元化)

変動を示している。leeward 壁の分布性状は windward 壁に比べれば面内の変動幅は小さいものの、床付近から徐々に伝達率が増加してキャノピー高さ中央付近で一度ピークを示した後再度現象し、再びキャノピー高さ付近で増加する、という明確な傾向が見られる。当該キャノピーの leeward 壁も全体に日射が当たり高温となっていたため壁全体がスカラーソースとなっていたという点は、Chyu and Goldstein (1986)の実験条件と類似している。

直接法による屋根の伝達率は、成田ら(2000)に比べかなり大きな値を示しているが、この理由は不明である。

#### 5. 結語

東京都武蔵野市の 4 階建ての集合住宅団地の隣棟空間を対象として 9 月から 11 月の間、気流場、温度場、熱収支の観測を行った。これにより東西方向 2 次元キャノピーの秋季の典型的な伝達率分布および温度場の特性を明らかにした。以下にその特徴を示す。

- 1) キャノピー壁面の対流フラックスの日変動は、日向の壁と日影の壁で対照的な挙動を示した。即ち、日向となる北壁の 3 地点は表面温度上昇に伴い日中プラスとなるのに対し、日陰となる南壁の 3 地点は日の出直後から概ね負値を示し、午後からは徐々にプラスに転じる。また、日影となる南壁と地面付近の空気温度は低温のピークを示した。
- 2) leeward 条件の日向壁に設置された SAT 計の伝達率は壁面内高さによらず、ほぼ同じ風速依存性を示した。一方、同じ日向 leeward 条件の壁における伝達率の風速依存性は、プロットのバラツキがやや大きく、高さ 0.64H で周辺より小さな値を示した。
- 3) windward 条件の日影壁の上部(0.64H, 0.84H)に設置された SAT 計の伝達率は、対向壁面のそれに比べかなり大きな値を示した。これは、skimming flow における windward 壁上部付近の強い下降気流の存在が、windward 壁近傍の速度境界層を leeward 壁近傍のそれに比べかなり薄くし、対流熱交換を促進している事が理由の一つと考えられる。この特性は、ナフタレン昇華法や濾紙蒸発法により得られた風洞内 2 次元キャノピーの伝達率分布と定性的には類似してい

る。

今回の観測で得られた伝達率のデータは風向や安定度などの気象条件のバリエーションに限界があったため、考察の論拠が十分でない部分も残されている。特に、中立条件の風洞実験において報告されている windward 壁面と leeward 壁面の伝達率の特性差<sup>17) 19)</sup>が、日向と日影(もしくは、加熱面と冷却面)という温度むらのある自然状況において一般性を有するのか否か、という疑問に対して十分な答が得られていない。

今後は、屋外観測、既往の風洞実験、数値解析など総合的なアプローチにより、キャノピー内伝達率分布に及ぼすマクロ(キャノピー全体)およびミクロ(測定点近傍、例えば SAT 計近傍)の温度場・速度場の影響について明らかにしたい。

#### 謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構科学技術振興事業団・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 神田 学)に拠る。ここに記して感謝の意を表す。

#### 注記

- 1) バルクリチャードソン数は、1.8H 高さの風速、1.5H 高さの気温を上空の reference とし、2m および 4m 高さにおける気温の平均値を外挿して地表面における reference の気温を定義している。また、バルク気温は 0.5H 高さの 4 点の気温の測定値の平均値を採用している。

#### 参考文献

- 1) Kusaka, H. Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F., A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models, *Boundary-Layer Meteorology*, 101, pp.329-358, 2001
- 2) Masson, V., A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models, *Boundary-Layer Meteorology*, 94, pp.357-397, 2000
- 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) 近藤裕昭, 劉發華, 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, *大気環境学会誌*, 33(3), pp.179-192, 1998
- 5) Tanimoto, J., Hagishima, A., Chimklai P., An approach for coupled simulation of building thermal effects and urban climatology, *Energy and Buildings*, vol 36, pp781-793, 2004.8
- 6) Hagishima, A., Tanimoto, J., Narita, K., Intercomparisons of experimental research on convective heat transfer coefficient of urban surfaces, *Boundary-Layer Meteorology* 117(3), 551-576, 2005
- 7) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第4版, pp.44-49, 68-70 丸善, 1986
- 8) McAdams, W.H., Heat Transmission 3rd Ed., pp.249, McGraw Hill, 1954
- 9) Ito, N., Kimura, K., Oka, J., A Field Experiment Study on the Convective Heat Transfer Coefficient on Exterior Surface of a Building, *ASHRAE Trans*, 78, 184-191. 1972
- 10) 小林定教, 黒谷靖雄, 夏期の屋上面対流熱伝達率に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 465, pp.11-17, 1994.11.

- 11) 小林定教, 森川和祥, 屋上面の下向き熱流における対流熱伝達率に関する実験的研究, *日本建築学会計画系論文集*, 536, pp.21-27, 2000.10.
- 12) Hagishima, A., Tanimoto, J., Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Building and Environment*, 38, 873-881, 2003
- 13) 成田健一, 小笠頭, 野々村善民, 自然風下における窓面対流物質伝達率の実測(続報): 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その4), *日本建築学会環境系論文集*, No.617 pp. 73-80, 2007.7.
- 14) Harman, I.N., Barlow, J.F., Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 2: Model, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.387-410, 2004
- 15) Kanda, M., Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita K.I., Hagishima, A., Simple energy balance model for regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 116(3), 423-443, 2005
- 16) Barlow, J.F., Harman, I.N. and Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 1: Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.369 - 385, 2004
- 17) 成田健一, 野々村善民, 小笠頭, 都市表面における対流物質物質伝達率に関する風洞実験 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その2), *日本建築学会計画系論文集*, 527, pp.69-76, 2000.1.
- 18) Oke, T.R., *Boundary Layer Climates* 2nd edition, pp.266-268, London; New York: Methuen, 1987
- 19) Chyu, M.K., Goldstein, R.J., Local mass transfer in rectangular cavities with separated turbulent flow, *8th Int. Heat Transfer Conf.* 3, 1065-1070, 1986