

スケールモデルによる都市キャノピーのエネルギー交換過程に関する野外実験

武藤 順*

Field experiments on energy exchange process in urban canopy layer using scale model

Jun MUTOU

1. 研究目的 市街地では建物による凹凸で気流性状が複雑に変化し、また太陽高度により日向・日陰の分布も時々刻々変化する。われわれの生活空間として重要な都市の建築外部空間に形成される温熱環境を把握するためには、このような複雑な場であるキャノピー層(屋根の頂点から下の気層)内での熱輸送メカニズムの解明が不可欠であり、都市全体の熱環境を考える上でも重要な課題である。

建物表面から大気への乱流熱輸送の評価手法としては、乱流熱 flux(H)を地表面熱収支の残差 $H=R_n - G$ として導く方法が一般的であるが、正味放射量(R_n)及び伝導 flux(G)の評価における誤差が集積する結果となるため、誤差が大きくなるという欠点がある。そこで、乱流 flux を精度よく測定する方法として熱伝達と物質伝達のアナロジーを利用するアプローチがあり、すでに風洞実験に適用されてきた。しかしながら、風洞実験では乱流スケールも自然風とは異なるし、風向変動を作り出すこともできないため、実現象への適用には限界がある。またアナロジーの妥当性についても、これまで単純な流れ場でしか検証されていない。

本研究では、本学キャンパスの拡張地に「戦略的創造研究推進事業(CREST)」として完成した観測サイト(Fig.1)のスケール 1/50 のモデル街区(実寸法 7.5m コンクリート構造建物街区と想定)を作製し、アナロジー利用の実験手法(濾紙面蒸発法)を用いて乱流 flux の野外実験を行い、自然風下での輸送速度のふるまいを構成面別に評価を行った。

2. 実験概要 街区の日射量等を測定するため、高さ 70cm に長短波放射計を設置して常時測定。都市キャノピー構成面である 4 方向の鉛直壁面、屋上面、床の建物間面、交差点面の計 8 面の伝導 flux(G)と表面温度(T_s)を測定するため、熱流板を各面に貼り付けた。風下側(季節により設置位置を変更)に熱電対を鉛直方向に設置(Fig.3)。また超音波風速温度計を高さ 30cm に設置した(設置高さの決定理由は後述する)。濾紙面蒸発法に用いる試料は、アクリル板に 1mm 厚の濾紙を貼り付けたものを使用した(Fig.4)。この試料は側面にコーティングを施し、表面以外からの蒸発を防いでいる。濾紙を十分湿らせた後、濾紙表面直下に表面温度を測定するためサーミスタ温度センサ(1/100°C精度)を挿入した。測定対象位置に試料を夏季 20 分間、秋季 30 分間、数

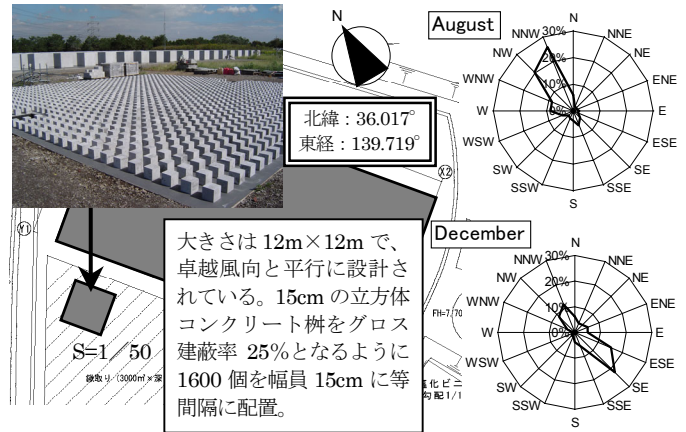


Fig.1 Observation site and wind rose.

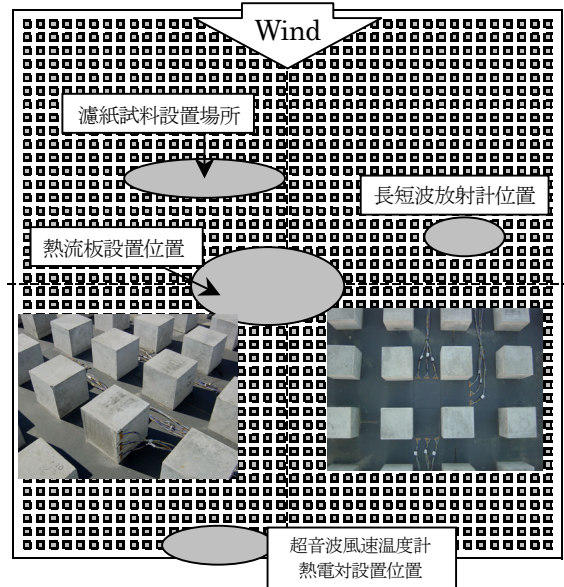


Fig.2 Model setting and the position of measuring instruments.

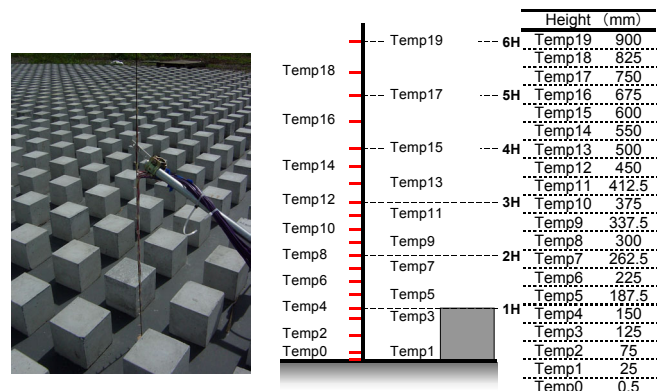


Fig.3 Thermo-couple installation for vertical profile.

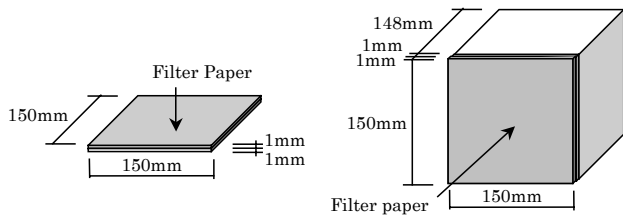


Fig. 4 Sample for water evaporation method.

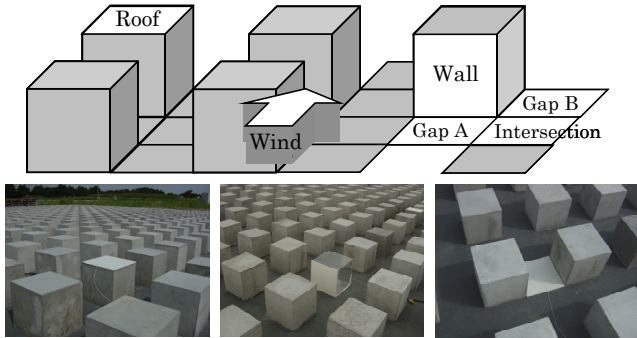


Fig. 5 Position of sampling surface.

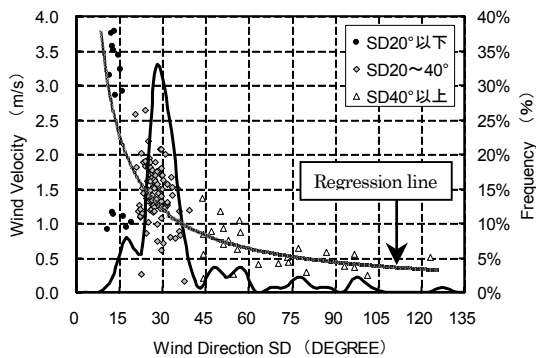


Fig. 6 Standard deviation frequency of wind direction and its relation to wind speed.

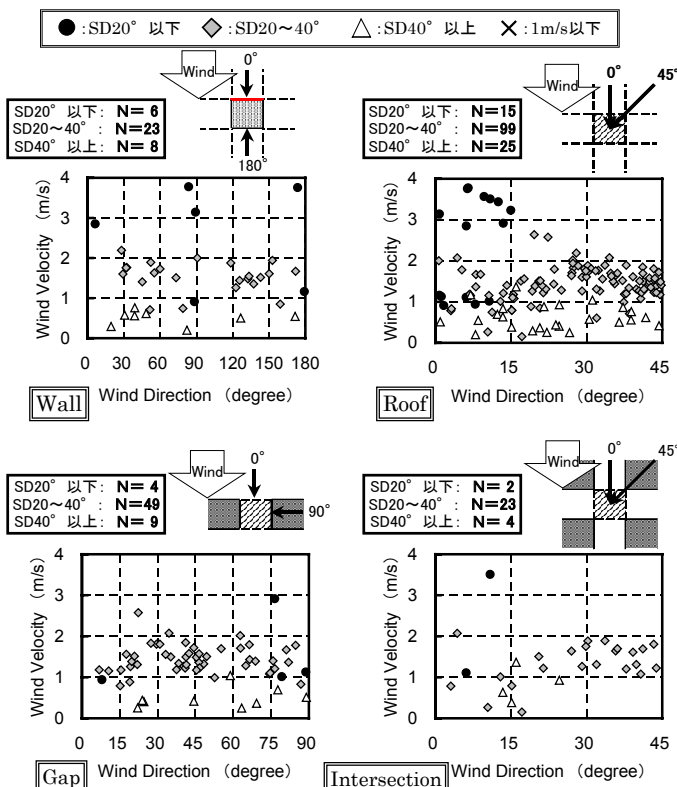


Fig. 7 Acquired samples for each type of surface.

面ずつ同時に設置し(Fig.5)、その間の気温、湿度、風速、日射量等を測定。さらに水分蒸発量を電子天秤(1mg 精度)で秤量した。試料の運搬および秤量中は水分蒸発を防ぐため密閉袋を用いた。屋上面は基準面として常に測定した。

3. 風洞実験と野外実験における輸送速度の比較検討

3-1. 自然風の把握

自然風の特徴を把握するため、濾紙面蒸発実験中の風向を 0.1 秒毎に求め、その標準偏差と頻度分布、および風速との関係をプロットした(Fig.6)。風速の増加に伴い、風向の振れ幅が小さくなる傾向が見られ、強風時ほど風向が安定している。平均的には主風向に対し ±30° 程度の振れ幅で変化していることがわかる。

3-2. 野外での濾紙面蒸発法の妥当性

Fig.7 は、取得できたデータの条件範囲を示すため、壁面、屋上面、建物間面、交差点面の 4 グループについて、風速と風向についてプロットしたものである。横軸の風向は、図中に示す各測定面ごとに定義した角度に変換した風向を表している。

次に、秤量による蒸発量(E)と表面温度、気温・湿度から、次式を用いて物質輸送速度 $WT=C_E U$ を算出した。輸送速度 $WT(m/s)$ を風速 $U(m/s)$ で除して無次元化したものは、スカラー輸送のバルク係数 C_E と呼ばれる。

$$E = WT(\rho_s - \rho_a) = C_E U(\rho_s - \rho_a) \quad [g/m^2 \cdot s]$$

WT : 輸送速度 [m/s] ρ_s : 表面の飽和絶対湿度 [g/m³]
 C_E : バルク係数 [無次元] ρ_a : 空気絶対湿度 [g/m³]
 U : 風速 [m/s]

(1) 日射影響の検討

日射のある条件で濾紙面蒸発法における表面温度測定に誤差が生じていないかを確認するため、日射とバルク係数の関係を検討した(Fig.8)。日射量の増加に伴う系統的なズレは認められなかった。

(2) バルク係数の風速依存性

最もデータ数が多い屋上面について、風速とバルク係数 C_E との関係を Fig.9 に示した(C_H については後述する)。風速 1m/s 以上ではバルク係数がほぼ一定となっている。すなわち、1m/s 以上の風速条件では建物による形状が流れ場を決める支配的要因となっており、十分乱れた乱流条件とみなせることを意味している。

(3) 大気安定度の影響

物質輸送が浮力による影響を受けているかを確認するため、風の効果(慣性力)に対する浮力の

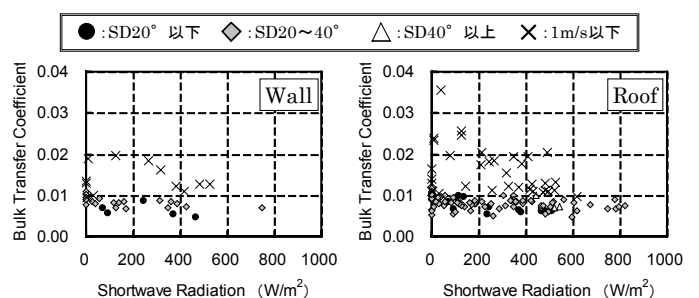


Fig.8 Relation between bulk transfer coefficient and shortwave radiation (left: wall, right: roof).

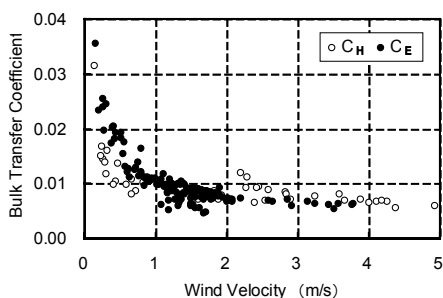


Fig.9 Wind speed dependency of the roof bulk transfer .

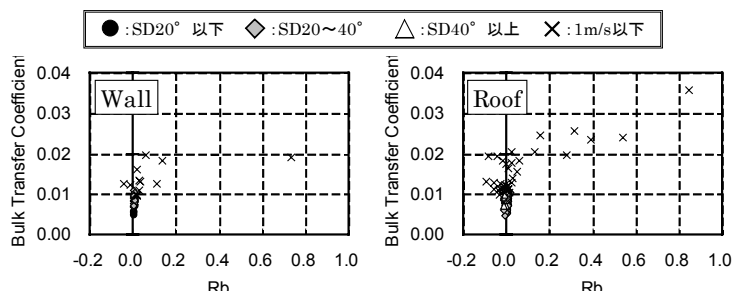


Fig.10 Relation between bulk transfer coefficient and bulk Richardson number (left: wall, right: roof).

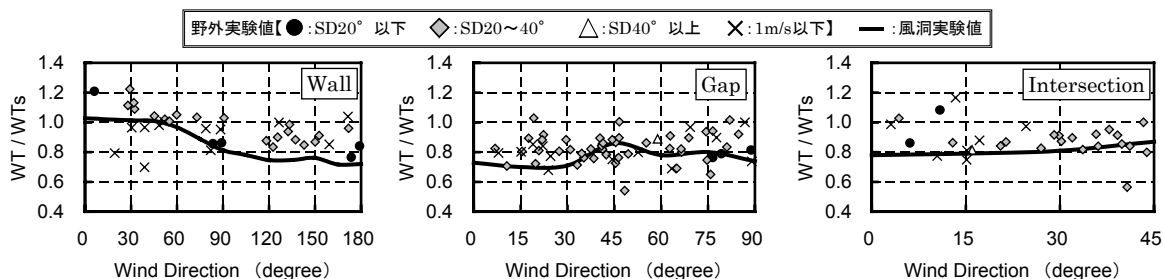


Fig.11 Change of the normalized transfer velocity due to wind direction.

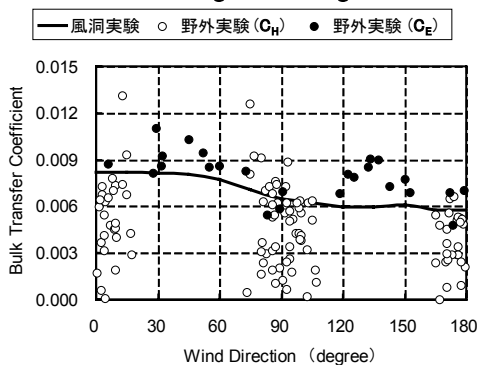


Fig.12 Comparison of wind direction dependency of the bulk transfer coefficient.

効果の比を表すバルク・リチャードソン数 Rb を次式により算出し、バルク係数との関係を検討した(Fig.10)。

$$Rb = \frac{gZ}{T} \times \frac{T_a - T_s}{U^2}$$

g : 重力加速度 [m/s²] T_s : 表面温度 [K]
 Z : 温度測定高さ [m] T_a : 気温 [K]
 T : 平均温度 [K]

Rb が負になるほど浮力による自然対流が卓越することを意味するが、そのような系統的な傾向は見られなかった。

3-3. 風洞内と自然風下の輸送速度の比較 壁面、建物間面、交差点面の物質輸送速度(WT)と同時に測定していた屋上面の物質輸送速度(WT_s)から輸送速度比(WT/WT_s)を求めた。既に得られている風洞実験値との比較を Fig.11 に示す。風向の振れ幅に関係なく、風速 1m/s 以下を除くと、壁面は風洞実験値と全体傾向が概ね一致することがわかった。しかし、交差点面や建物間面ではバラつきがまだ大きく、風向変化の確認までには至らなかった。

4. 物質輸送速度と熱輸送速度のアナロジーの検証

4-1. スカラー輸送のバルク係数と熱輸送のバルク係数の比較 各構成面について熱流板で測定している伝導 flux(G)と、多重反射を考慮した放射モデル計算から求めた正味放射量(Rn)より、熱収支式の残差 $H = Rn - G$ として構

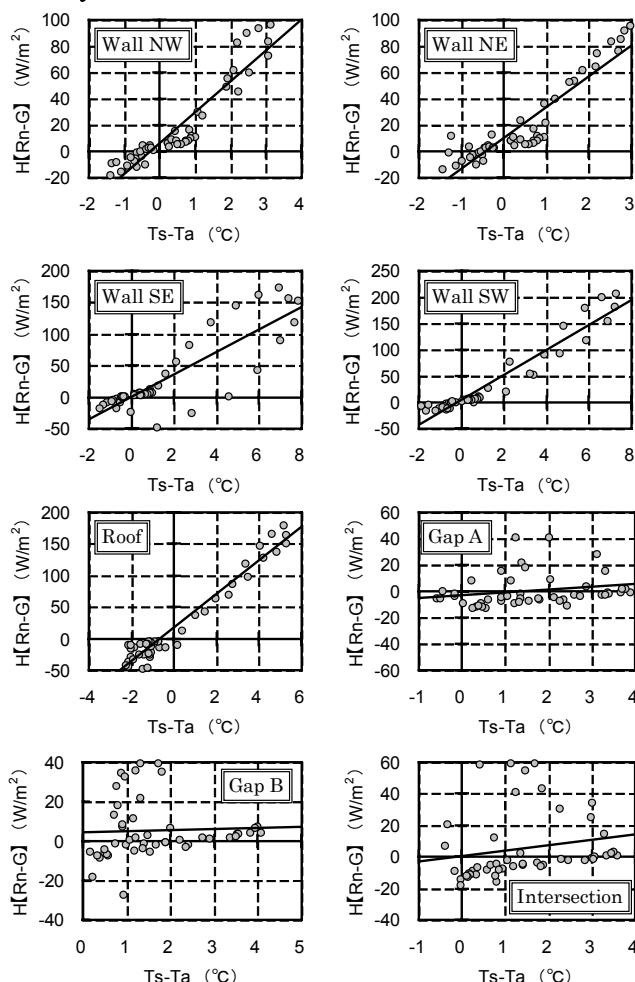


Fig.13 Relation between the sensible heat flux and the surface-air temperature difference.

成面から輸送される顕熱 flux(H)を算出した。次に、この構成面別の H と構成面の表面温度(T_s)および気温(T_a)から、面別の熱輸送のバルク係数 C_H を算出した (バルク法)。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad [W/m^2]$$

$c_p \rho$: 空気の体積熱容量 [J/m³·K] C_H : バルク係数 [無次元]

風向による変化がもっとも顕著に現れると考えられる壁面について、濾紙面蒸発法から算出したスカラーのバルク係数 C_E 、およびバルク法より算出した熱輸送のバルク係数 C_H 、と風向との関係を Fig.12 に示す。 C_H については、やはり C_E に比べバラつきが大きく、風向による関係は検討できなかった。次に、二つのバルク係数の風速に対する変化を比較するため、屋上面についての C_H と風速との関係を C_E 同様 Fig.9 にプロットした。両者の変化はほぼ一致することから、風速依存性に関してはアナロジーが検証できた。

4-2. 熱収支法における誤差要因について C_H の誤差が何によるものかを調べるため、各構成面について顕熱 flux と温度差 ($T_b - T_a$) の関係をプロットした (Fig.13)。壁面については相関関係が見られるものの、床面について顕熱 flux と温度差に関係が見られない。従って、特に床面に関しては、flux の推定精度に問題があることがわかった。

5. 建物表面から輸送される顕熱量積算値と上空通過顕熱 flux の比較検討

5-1. 渦相関法の測定高さの検討 渦相関法とは、超音波風速温度計で測定される風速の鉛直変動成分と温度変動成分から顕熱 flux を導く方法で、次式より算出される。

$$H = c_p \rho w' t' \quad [W/m^2]$$

t' : 気温変動成分 [K]
 w' : 鉛直風変動成分 [m/s]

渦相関法では、都市キャノピーの熱影響をうける領域の高さを捉え、その範囲内に超音波風速温度計を設置しなければならない。一方、低すぎると個々の建物の影響が強くなり、空間代表性が得られなくなる。そこで街区の境界層を明らかにするため、熱電対を鉛直方向に設置して気温を測定した。気温の鉛直プロファイルを Fig.14 に示す。高さ 150mm 以下の温度は、高さ 150mm (=H: 建物高さ) のコンクリート柵によるキャノピー層の温度であり、その高さ付近に気温の急変域が存在する。約 400mm (=2.5 H) にもう一つの急変域が存在し、それ以上の高度ではほぼ等温となっている。この高さが地表面の影響を受けている境界層の上端と考えられる。このことからスケールモデル街区の渦相関法の測定高さは 300mm (=2 H) が適切であると判断した。

5-2. バルク法による顕熱量積算値と渦相関法により算出した顕熱 flux の比較 冬季の晴天時の観測データについて、熱収支の残差から算出した構成面からの顕熱 flux の積算値 ($Rn - G$) と渦相関法より算出した顕熱 flux (H_{eddy}) を算出し、両者の関係をプロットした (Fig.15)。先の解析で、床面に誤差があったにもかかわらず、非常に高い相関係数が得られた。ただし、プロットの傾きは 1 を下回っており、渦相関法は顕熱 flux を過小評価してい

ることがわかる。これは、長周期成分の flux への寄与が、渦相関法では十分評価できていないためと思われる。

5-3. 構成面別の顕熱 flux 寄与率

各構成面からの顕熱 flux がどのような割合かを見るために、屋上面、壁面、床面について分け、その時間変化を示した (Fig.16)。太陽高度の低い冬季では、鉛直壁面の寄与が大きく、床面の比率は小さくなっている。

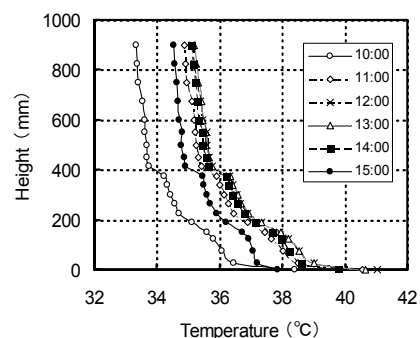


Fig.14 Vertical profile of air temperature.

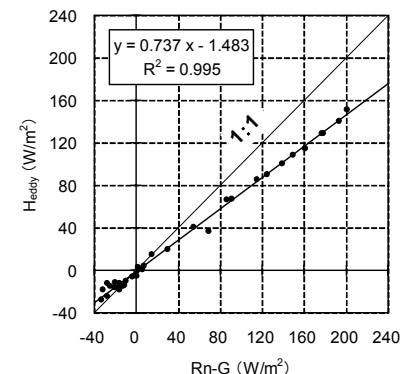


Fig.15 Comparison of the sensible heat flux by eddy correlation method and the accumulated heat release from all surfaces.

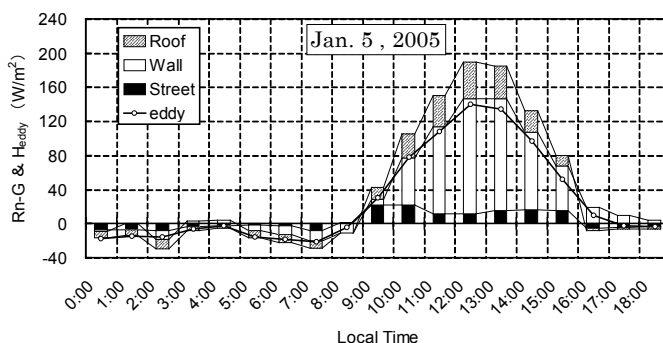


Fig.16 Contribution of each type of surface to total sensible heat flux.

6. まとめ 平均風速が概ね 1m/s 以上の十分乱流が発達した条件下では、物質輸送速度は風洞実験と概ね同様の傾向を示した。熱輸送と物質輸送のアナロジー検証では、熱収支法におけるバルク係数の推定誤差が大きく、風向依存性については十分な検証には至らなかった。しかしながら、屋上面の風速依存性に関しては概ね一致する傾向が見られた。都市キャノピーを構成する各面から輸送される顕熱量の積算値よりエリア平均 flux を算出し、境界層での渦相関法と比較した結果、長周期成分の影響で渦相関法が顕熱 flux を過小評価していることがわかった。また、冬季の大気加熱に関しては、鉛直壁面の寄与が大きいことが明らかとなった。

1)成田ほか『都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験』-都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その 2)-日本建築学会計画系論文集 No.527 69-76 2000,1