実在都市キャニオン内における実測値と風洞実験による流れ場の比較

実在都市キャニオン内の流れ場に関する風洞実験（その1）

COMPARISON BETWEEN WIND TUNNEL EXPERIMENTS AND
FIELD MEASUREMENT VALUES ON FLOW FIELD
IN REAL URBAN CANYONS

Wind tunnel experiments on flow field in real urban canyons (Part 1)

香月 壮亮*, 佐藤 歩**, 道岡 武信**, 萩島 理***

*Takeaki KATSUKI, Ayumu SATO, Takenobu MICHIOKA
and Aya HAGISHIMA*

Improvement of outdoor ventilated environment contributes not only to energy-saving and suppression of CO₂ but also to indoor air quality and its comfort. To consider outdoor well-ventilated environment, a flow field within ideal urban canyons has been investigated by wind tunnel experiment, but the behaviors of turbulence and mean characteristics of canyon vortices within real urban canyons are still not comprehended. In this study, a wind tunnel experiment for a real apartment complex was conducted to confirm the reproducibility of flow field within the canyon. The apartment complex is located at Musashino city, Tokyo, where field measurement was conducted. The buildings with a height more than two-stories were resolved within 200m radius under the model length ratio of 1/150 was measured using both PIV (Particle Image Velocimetry) and LDV (Laser Doppler Velocimeter). These measurements at 5 points within the urban canyon were compared with field measurement values. The wind velocities and turbulent intensities obtained by both PIV and LDV fairly agreed with the field measurement values within the urban canyons, though a small-scale surface roughness like a balcony was not modeled in the present wind tunnel experiment.

Keywords : Urban canyon, Flow field, Wind tunnel experiment, Laser Doppler Velocimeter, Particle Image Velocimetry

都市キャニオン, 流れ場, 風洞実験, レーザー流速計, 粒子画像流速測定法

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けて、民生(業務その他および家庭)部門のエネルギー消費の増加を抑制するために、製造業ではトップランナー基準を採用しエネルギー消費効率を向上させている¹⁾。また、市街地における省エネルギー対策では、「風の道」と呼ばれる市街地全体の風通しが有効であり、ヒートアイランドに代表される市街地の高温化を抑制し²⁾、快適性を上げる効果がある。民生部門の主である建物に関しても、高断熱高気密、自然換気の導入、ヒートポンプの利用などといった省エネルギーの対策が行われている。なかでも、自然換気による屋内への効率的な風の導入方法に関する研究は数多く行われており³⁾、屋外の良好な風通しを確保することは、省エネルギーやCO₂排出抑制に寄与するだけでなく、屋内の空気環境やその快適性にも大きな影響を与える。

これまでに、街区を対象とした屋外の風通しに関して、多くの風洞実験による研究が行われてきた。例えば、久保田ら⁴⁾⁵⁾は実市街地を対象とした風洞実験を実施し、16風向で地区全体の平均的な風通しについて検討を行った。その結果、低層住宅地、中高層集合住宅団地ともに地区のグロス建蔽率(道路等の公共用地を含めた全体面積に対する建築面積の割合)の増大に伴って地区全体の風速の平均値が低下すること、地区のグロス建蔽率が同じ場合には、中高層集合住宅団地の方が地区全体の平均風速が大きくなり、建物群の高さより中高層集合住宅団地の混在比率による平面形態の違いが重要であることを明らかにした。義江ら⁶⁾は香港のMong-kokを対象に単純化した建物モデル群を用いた風洞実験を行い、グロス建蔽率、グロス容積率(道路等の公共用地を含めた全体面積に対する建物の延床面積の割合)および建物高さのバラツキ等が歩行者レベルの

* 電力中央研究所環境科学研究所
特別契約研究員・博士(工学)

** 電力中央研究所環境科学研究所 主任研究員・博士(工学)

*** 九州大学大学院総合理工学研究院 准教授・博士(工学)

Visiting Researcher, Environmental Science Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

Research Scientist, Environmental Science Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyusyu Univ., Dr. Eng.

風速や気温分布に与える影響について検討した。その結果、建物高さのバラツキによって効果的に上空の冷気を街区へ取り入れることが可能であることを明らかにした。しかしながら、これらの研究における風通しの検討はキャニオン内の風向はあまり考慮せず風速に焦点を当てている。屋外の良い風通しを詳細に検討するためには、風洞実験により都市キャニオン内の流れの挙動を把握することが重要と考えられる。

単純化された都市キャニオンを対象に、流れ場の詳細は様々な風洞実験で検討されており、その一部の例を以下に示す。**Brown *et al.***⁷⁾は、2次元の都市キャニオンを対象に、最も風下側の建物からおよそ建物高さの3.5倍離れた下流近くに剥離の再付着点があることを明らかにした。また**Brown *et al.***⁸⁾は、3次元の都市キャニオンを対象に実験を行い、2次元キャニオン内の循環渦の中心がキャニオン中央付近に存在するのに対し、3次元のキャニオン内の循環渦の中心はやや風上側へ移動することを明らかにした。**Leitl *et al.***⁹⁾は、都市のラフネスを模擬した120個のコンテナを並べた**Mock Urban Setting Test(MUST)**¹⁰⁾を対象に、キャニオン群の中央で流れの鉛直分布を計測し、実測値の再現性の確認を行った。その結果、風洞実験では実測と大気安定度がやや異なるものの、運動量フラックスは良く一致することを明らかにした。**Monnier *et al.***¹¹⁾は、4×3列のブロックに対してキャニオン内の3次元の流れを詳細に測定し、主流方向の街路幅と模型高さのアスペクト比の差異だけでなく、流入風のキャニオンに対する入射角が流れ場に与える影響を検討した。主流方向の街路幅と模型高さのアスペクト比が4のケースにおいて、キャニオン内とその上空の空気の変換量が最大になることを示した。以上のような単純模型による検討は他にも多数行われている¹²⁾が、実在都市キャニオンを対象とした複雑流れ場の検討例は少ない。

実在都市キャニオンの流れ場を計測した研究は、例えば以下のものがある。**Offerle *et al.***¹³⁾は、スウェーデンのヨーテボリ市内における主流方向の街路幅と模型高さのアスペクト比が2.1のキャニオン内の日射による表面温度の不均一温度分布と流れ場に関する実測を行った。その結果、計測された乱流熱フラックスの大きさと方位は、加熱された壁面に対する風向に強く依存することを明らかにした。風洞実験では以下の例がある。**Klein and Rotach**¹⁴⁾は、ナント市内を対象に実験データを基にしたレイノルズストレスのパラメータ化を提案することを目的として、都市キャニオン内の詳細な流れ場の計測を行った。その結果、キャニオン内における様々な測定点の乱流挙動からレイノルズストレスのピーク値の大きさとその高さを基にしたレイノルズストレスのパラメータ化が提案された。**Robin *et al.***¹⁵⁾は、**Dispersion of Air Pollution and its Penetration into the Local Environment (DAPPLE)**¹⁶⁾プロジェクトで、ロンドン市内を対象に交差点付近から排出された煙の挙動を可視化により確認した。上昇流とともに断続的に現れる鉛直方向のせん断層の渦と交差点内に生成される水平方向の渦によって、交差点近傍の流れ場は非常に不規則であることを明らかにした。**Carpentieri *et al.***¹⁷⁾も、同じく**DAPPLE**¹⁶⁾でロンドン市内を対象に、実在都市キャニオンにおける交差点付近の流れ場を検討した。その結果、交差点近傍では複雑な循環渦が形成され、その構造が汚染物質の拡散に強く影響することを明らかにした。このように、交差点付近の流れの挙動は明らかになりつつある。しかしながら、居住空間周辺の

風通しを検討するためには、交差点付近だけでなく、建物に挟まれたキャニオン内の循環渦の構造および乱流挙動の空間分布を正確に把握することが重要である。

そこで、本研究では実在都市における様々なキャニオン内の循環渦の構造および乱流挙動を把握するため、異なる建物幅やアスペクト比の様々なキャニオンを対象に実験を行い、得られた知見から実在都市における様々なキャニオン内の循環渦の構造および乱流挙動と居住空間周辺の風通しの関係を明らかにすることを最終目的とする。

風洞実験を実在都市の流れ場に適用する場合、都市の微細な形状（建物のバルコニー、外階段、壁面などの凹凸、看板、街灯などの粗度）を陽的に再現することは非常に困難であるため、ある程度の簡略した都市形状の模型を使わざるを得ない。しかしながら、そのような簡略化した都市形状を適用した風洞実験において、実在キャニオン内の流れの再現精度は明らかでない。

そこで、キャニオン内の循環渦の構造および乱流挙動を把握する前に、実測データとの比較による風洞実験の妥当性の検討が必要不可欠である。本報では、萩島らが実測を行った旧桜堤団地(東京都武蔵野市)¹⁸⁾を対象に、簡略化した都市形状模型を適用した風洞実験を行い、実測値と比較することにより風洞実験結果の再現精度の検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 風洞および計測装置

本風洞実験は、(財)電力中央研究所・我孫子地区に設置されている乱流輸送モデリング風洞(**Twinned wind tunnel: TWINNEL**)を用いて行った。本風洞は、測定部の断面積および長さの異なる二種類の試験セクション(第1試験セクション:長さ17m×幅3.0m×高さ1.7m、第2試験セクション:長さ10m×幅1.0m×高さ1.0m)を有しており、可動式のコーナーベーンで切り替えて使用する。本研究では、第1試験セクションにて実験を行った。試験セクション上流の整流部にはハニカムおよびメッシュが取り付けられており、試験セクション内に模型等がない場合には、平均風速の変化、乱流強度はともに壁面近傍を除き断面全体で1%以内である。風速測定には、2次元レーザドップラー流速計(**LDV: Laser Doppler Velocimeter**)と粒子画像流速測定法(**PIV: Particle Image Velocimetry**)を用いた。

本実験では、**DANTEC DYNAMICS**社製の14mmφファイバブローブを試験セクション内のトラバース装置に取り付け、LDVによって主流(流れ)方向とスパン方向、鉛直方向の風速三成分を計測した。風速測定のためのトレーサ粒子として、発煙装置を用いて発生させたオイルフォグを測定部入口付近より風洞内へ添加した。LDVのサンプリング条件は、データ取得数10,000点または測定時間60秒とした。このサンプリング条件に関しては、データ取得数および測定時間を増加させた場合でも測定結果に変化が無いことを予め確認している。

LDVによる計測に加え、PIVによる計測も行った。本実験では、**NEW WAVE RESEARCH**社製のNd:YAGレーザ(出力120mJ、波長532nm)を用いて天井面よりレーザシート光を照射し、試験セクション内に設置したCCDカメラ(1344×1024pixel)により撮影

を行った。レーザシート厚は約 3mm, カメラレンズは焦点距離 60mm のものを用いた。PIV では、撮影間隔 1.2msec の 2 枚の画像を 1 秒間に 15 組撮影し、180 秒間の計測より平均風速 2 成分を求めた。画像相関法は、適応相関を用いた。探査窓サイズは 32×32 pixel でオーバーラップ率は 50% とした。各 pixel の速度ベクトルを算出した後に周囲の速度ベクトルとの比較により誤ベクトルの除去を行った。

2.2. 建物模型

流れ場の計測概要を図 1 に示す。測定座標系は試験セクション入口の床面中央を原点とし、風洞主流（流れ）方向を X , 流れ方向に対して直交する横断（スパン）方向を Y , 鉛直方向に Z とした。なお、流れ方向およびスパン方向、鉛直方向の平均風速をそれぞれ U , V , W , 変動風速 u' , v' , w' の標準偏差をそれぞれ σ_u , σ_v , σ_w と記す。本実験では建物模型の縮尺率を実在都市キャニオン¹⁷⁾の 1/150 とした。

試験セクション入口から 1.55m の風下位置にスパイヤを、そこから 1.32m 離れた風下に高さ 30mm の L 型アングルを 1.32m 間隔で 5 本設置し（図 1）測定範囲において十分に発達した境界層が形成されるように気流の調整を行った。実験風速 U_∞ は境界層上空（ $Z=1.0$ m）で 3.0m/s と設定した。

風洞実験で用いた模型の写真を図 2, $X=7.2$ m における流入風の前平均風速および風速変動の標準偏差を図 3 に示す。 $Z=1.0$ m での平均風速 U_∞ で無次元化した平均風速 U/U_∞ の分布は、図中の実線で示す 1/5 べき乗則に従っており、低層住宅地上空の風速分布に相当する。本実験の境界層高さ Z_∞ は 1m であり、実現象では 150m となる。また、粗度長は実スケールで 60cm であり、市街地¹⁹⁾のものに相当する。風速変動の標準偏差は σ_u , σ_v , σ_w の順に大きく、地表面近傍では上空風 U_∞ に対して、およそ 10% 程度の乱れが生成されている。

桜堤団地模型の立体概略図を図 4a, 計測対象キャニオン断面図を図 4b に示す。対象とした風向はこの地域の卓越風向である北とした。 X 軸は北から南向き、 Y 軸は西から東向きに設定した。図 4a の中央部の南北方向に並んだ 4 棟の建物で形成されたキャニオンを「中央キャニオン」とし、その東側のキャニオンを「東キャニオン」、その西側を「西キャニオン」とした。（以後、それぞれ「中央キャニオン」、「東キャニオン」、「西キャニオン」と呼ぶ。）中央キャニオンおよび東キャニオンの屋根はフラットであるが、西キャニオンは傾斜のついた三角形の屋根である。本報では実測が行われた中央キャニオンを対象とした。地上高さを Z , 建物高さを H , 建物幅を L , 建物間の幅を W と定義する。なお、図 4a で示す変数の下付の添え字 c , w , e はそれぞれ中央キャニオン、西キャニオン、東キャニオンの値を示す。ただし、下付の添え字がない H は中央キャニオンの値である。建物間の幅に基づくアスペクト比は $W_w/H_w=1.46$, $W/H=1.72$, $W_e/H_e=1.70$ であり、西キャニオンのアスペクト比が他のキャニオンのものに比べ小さい。また、建物幅に基づくアスペクト比は、 $L_w/H_w=5.09$, $L_c/H_c=3.91$, $L_e/H_e=2.55$ であり西から順に小さくなる。建物の長辺は風向にほぼ直交するが、およそ $5-8^\circ$ ずれている。中央キャニオン C1 の主流方向断面（緑線部分）において実測値との比較を行った。図 4b の 1~5 は主流方向断面（緑線部分）の

図 1 流れ場の計測概要

図 2 風洞実験模型

図 3 平均風速と風速変動の標準偏差 ($X=7.2$ m)

a 桜堤団地模型の立体概略図

b 計測対象キャニオン断面図

図 4 計測対象領域

計測点である。

3. 実験結果

風洞実験によるキャニオン内の流れ場の再現精度を検討するため、PIV と LDV による風洞実験結果を既往の屋外実測値と比較した。比較に用いた実測値は、2004 年 9 月 22 日～2004 年 12 月 2 日に旧桜堤団地で行われたものであり、実測の詳細については萩島らの論文¹⁸⁾に述べられている。風速の測定に用いられた機器は、3 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) である。サンプリング周波数・平均化時間は、10Hz・10 分である。この実測結果より大気安定度がほぼ中立 (リチャードソン数が $-0.09 \sim -0.08$) で、風向が本風洞実験条件と最も近い幾つかの時刻のデータ (2004 年 11 月 4 日 10:30～10:40, 12:00～12:10, 12:10～12:20, 11 月 5 日 8:20～8:30, 11 月 24 日 10:30～10:40, 11 月 25 日 12:20～12:30) を抽出し、その平均値を比較対象とした。実測値との比較は、実測値のない C1-3 を除く C1-1～C1-5 の 4 地点で行った。(C1-3 は LDV と PIV の比較のみ)

平均風速 $U/U_{1.8H}$ を図 5、平均風速 $W/U_{1.8H}$ を図 6 に示す。図中の横バーは実測から抽出した各統計量の 6 つの時間帯の 10 分間サンプルをアンサンブル平均する際に用いた時間平均値に対する偏差の最大値と最小値の範囲を示す。まず、実測データにおける平均風速の偏差を考える。 U も W も平均値に対して数%の差異であり非常に小さい。特に、 U の偏差は非常に小さく、横バーがプロットに隠れているケースが多い。これは、ほぼ同様の大気安定度と風向であれば、キャニオン内には同様な流れが形成されることを意味している。風洞実験結果は $Z/H=1.8$ における C1-2～C1-5 の 4 点平均による LDV の平均風速 $U_{1.8H}$ で無次元化した。なお、C1-1 では周囲の模型建物との干渉により LDV のプローブがキャニオン内に入らなかったため、LDV での測定は行っていない。Brown *et al.*⁸⁾や佐藤ら²⁰⁾の単純建物により形成されたキャニオン内流れの風洞実験結果と同様に、キャニオン下方で主流方向と逆の流れが生じる。また、キャニオン側壁の C1-1 と C1-5 の W の絶対値が大きいくことから、実在都市キャニオン内にも循環流が形成されることがわかる。風下側建物近傍の C1-5 において、LDV と PIV から得られた W が実測値と少し差異がみられるが、それ以外の測定点では風洞実験の平均風速はキャニオン内 ($Z/H < 1.0$) で実測値と良い一致を示す。本実験では建物のベランダなど微細な構造を考慮しなかったが、実在団地で行われた実測値と本実験結果は良好に一致した。

壁面近傍の C1-5 において、平均風速 W の風洞実験結果と実測値に多少差が見られる原因として、建物近傍では風速が遅いため、LDV、PIV のトレーサ粒子であるオイルミストが入りにくいことなどが挙げられる。そのため、C1-5 における LDV、PIV の結果は測定誤差も一因と考えられる。しかしながら、実測値にも風向変動等の外乱の影響が含まれていることを考えると、両者の差異は非常に小さいと考えられる。

風速変動 u' の標準偏差 $\sigma_u/U_{1.8H}$ を図 7、風速変動 w' の標準偏差 $\sigma_w/U_{1.8H}$ を図 8 に示す。 $Z/H=1.8$ の実測値 (図中の口印) は、キャニオン C1 の風下建物上空で計測された値であるが、参考のためにすべての地点にプロットした。キャニオンの上空 ($Z/H > 1.0$) に

おいて、 σ_u の風洞実験結果は実測値よりおよそ 2 倍程度小さくなる。これは、実大気中にはメソスケール擾乱などの比較的大きな乱流渦が存在するが、風洞実験ではアクティブグリッド (例えば、Michioka *et al.*²¹⁾) などの特殊な装置を用いなければそれらの渦を

図 5 平均風速 $U/U_{1.8H}$

図 6 平均風速 $W/U_{1.8H}$

図7 風速変動 u' の標準偏差 σ_u $\sigma_u/U_{1.8H}$

図9 レイノルズストレス $\overline{u'w'}$ $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$

図8 風速変動 w' の標準偏差 σ_w $\sigma_w/U_{1.8H}$

再現できないためである。一方、キャニオン内 ($Z/H < 1.0$) においては、風洞実験の σ_u は実測値とほぼ一致しており、キャニオン内では建物により形成される乱流渦が実大気中の擾乱の影響より支配的である。これは、キャニオン上空 ($Z/H > 1.0$) において、上空の実測値 σ_u の偏差が大きいのに対して、キャニオン内 ($Z/H < 1.0$) の σ_u の偏差が小さいことから判断できる。

また、キャニオンの上空 ($Z/H > 1.0$) において、 σ_w の風洞実験結果は実測値とほぼ同様であり高さ方向にほぼ一定である。このキャニオン上空における σ_w は σ_u とは異なる傾向であるが、屋外都市スケールモデルで得られた結果²²⁾²³⁾と一致した。これは、 σ_u は外層スケールの変動が支配的であるが、 σ_w は地表面条件に依存するためである²³⁾。

一方、キャニオン内 ($Z/H < 1.0$) においては、風洞実験の σ_w は実測値とほぼ一致しており、 σ_u と同様に建物により形成される乱流渦が実大気中の擾乱の影響より支配的であることがわかる。

PIV と LDV の σ_u 、 σ_w を比較するとほとんど違いが見られないが、乱れが強い C1-5 で LDV の σ_w が PIV より若干大きい。これは、LDV の方が高応答でより小さな乱流変動を計測しているためであると考えられる。

乱流運動による運動量輸送を表すレイノルズストレス $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$ を図9に示す。風洞実験結果は実測値と良く一致しており、建物高さ近傍の $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$ のピーク値も捉えている。これは、レイノルズストレスも σ_w と同様に、建物により形成された乱れに強く支配されるためである²²⁾。また、実測値と比べて風洞実験の σ_u は小さいが、 $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$ にほとんど差異は見られない。これは、実大気中には境界層の上層で形成される比較的大きな渦が存在するため、 σ_u は大きくなるが、Roth²⁴⁾や稲垣・神田²⁵⁾が指摘したように、その渦は $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$ にほとんど影響を与えないためと考えられる^{注1)}。キャニオン内では、 $\overline{u'w'}/U_{1.8H}^2$ はほぼゼロとなり、乱流運動は運動量輸送にほとんど寄与していない。風洞実験から得られた上空の σ_u が実測値より大きくなることや、 σ_w や $\overline{u'w'}$ が実測値に比較的良い一致を示す傾向は、既往の屋外都市スケールモデルの研究²¹⁾²²⁾と良く類似している。

以上のように、実測結果と比較することにより、実在都市キャニ

オンを対象とした風洞実験において、平均流だけでなく乱流統計量を含めたキャニオン内の流れ場の特性を再現できることが明らかになった。

4. まとめ

実在都市キャニオン内における流れ場の再現性を検討するため、旧桜堤団地(東京都武蔵野市)を対象とした風洞実験を行い PIV (Particle Image Velocimetry) と LDV (Laser Doppler Velocimeter) によってキャニオン内の流れ場を計測した。風洞実験結果の妥当性を検討するため、実測結果との比較検討を行い、以下の知見を得た。

1. 実測において、上空の風向や大気安定度がほぼ同様の条件下であれば、キャニオン内には再現性のある流れ場が形成される。
2. 実在都市キャニオン模型を用いた風洞実験結果を、キャニオン内の多点において実測値と詳細に比較することにより、実現に近いキャニオン内の流れ場の特性を再現できることを明らかにした。本実験では、建物のベランダなど微細な構造を考慮しなかったが、平均風速、乱れ強さは実測値と良く一致した。
3. キャニオンの上空において、風洞実験では実大気中のメソスケール擾乱などの比較的大きな乱流渦を再現できないため、主流方向の風速変動の標準偏差は実測値より小さくなる。一方、鉛直方向の風速変動の標準偏差とレイノルズストレスは、建物により形成された乱れに強く支配されるため、実測値に近い値となる。これらの傾向は、既往の屋外都市スケールモデルの実測および風洞実験による結果と良く一致している。

以上より、風洞実験結果が実現に近いキャニオン内の流れ場の特性を再現できることが明らかになった。次報では風洞実験による実在都市キャニオン内の循環渦の構造および乱流挙動の解明を行う。

謝辞

本研究の遂行に際し、日本工業大学 成田健一教授、防衛大学校 菅原広史准教授、九州大学 谷本潤教授らによる現地実測データを使用させて頂いた。また、九州大学 谷本潤教授、東京工業大学 神田学教授には風洞実験に関して貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁:平成 21 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2010), 2010. 6.
- 2) 成田健一:風の道と都市気候形成, 日本風工学会誌, 第 107 号, pp. 109-114, 2006. 4.
- 3) 例えば河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生: 横風時における単一開口換気に関する実験的研究 片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, 第 611 号, pp. 29-35, 2007. 1.
- 4) 久保田徹, 三浦昌生, 富永禎秀, 持田灯:実在する 270m 平方の住宅地に

おける地域的な風通しに関する風洞実験 建物群の配置・集合形態が地域的な風通しに及ぼす影響 (その 1), 日本建築学会計画系論文集, 第 529 号, pp. 109-116, 2000. 3.

- 5) 久保田徹, 三浦昌生, 富永禎秀, 持田灯: 風通しを考慮した住宅地計画のための全国主要都市におけるグロス建ぺい率の基準値 建築群の配置・集合形態が地域的な風通しに及ぼす影響 (その 2), 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp. 107-114, 2002. 6.
- 6) 義江 龍一郎, 田中 英之, 白澤 多一, 小林 剛: 高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 627 号, pp. 661-667, 2008. 5.
- 7) M.J. Brown, R.E. Lawson, D.S. Decroix and R.L. Lee: Mean Flow and Turbulence Measurement around a 2-D Array of Buildings in a Wind Tunnel, Report LA-UR-99-5395, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 7pp, 2000.1.
- 8) M.J. Brown, R.E. Lawson, D.S. Decroix and R.L. Lee: Comparison of Centerline Velocity Measurements Obtained Around 2D and 3D Building Arrays in a Wind Tunnel, Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulic, 2001.12.
- 9) B. Leitl, K. Bezpalcova, F. Harms: Wind Tunnel Modelling of the MUST Experiments, Proceeding of the 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regular Purposes, pp.435-439, 2007.7.
- 10) E. Yee and C.A. Biltoft: Concentration Fluctuation Measurements in a Plume Dispersing through a Regular Array of Obstacles, Boundary Layer Meteorology, Vol.111, pp.363-415, 2004.11.
- 11) B. Monnier, B. Neiswander and C. Wark: Stereoscopic Particle Image Velocimetry Measurements in an Urban -Type Boundary Layer: Insight into Flow Regimes and Incidence Angle Effect, Boundary Layer Meteorology, Vol.135, pp.243-268, 2010.2.
- 12) M. Kanda: Progress in the scale modeling of urban climate Review, Theor. Appl. Climatol., Vol.84, pp.23-33, 2005.9.
- 13) B. Offerle, I. Eliasson, C.S.B. Grimmond and B. Holmer: Surface Heating in Relation to Air Temperature, Wind and Turbulence in an Urban Street Canyon, Boundary Layer Meteorology, Vol.122, pp.273-292, 2006.8.
- 14) P.K. Klein and M. Rotach: Mean Flow and Turbulence Characteristics in an Urban Roughness Sublayer, Boundary Layer Meteorology, Vol.111, pp.55-84, 2004.
- 15) A. Robins, H. Cheng, P. Hayden and T. Lawton: Flow Visualisation Studies - I, Note DAPPLE - EnFlo 04, 2004.5.
- 16) S.J. Arnold, H. ApSimon and J. Barlow et al.: Introduction to the DAPPLE Air Pollution Project, Science of the Total Environment, Vol.332, pp.139-153, 2004.10.
- 17) M. Carpentieri, A.G. Robins and S. Baldi: Three-Dimensional Mapping of Air Flow at an Urban Canyon Intersection, Boundary Layer Meteorology, Vol.133, pp.277-296, 2009.9.
- 18) 萩島理, 成田健一, 菅原広史, 谷本潤: 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, 日本建築学会環境系論文集, 第 626 号, pp. 511-518, 2008. 4.
- 19) 社団法人日本鋼構造協会編: 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局,

- 1997.
- 20) 佐藤歩, 道岡武信, 田中伸幸, 市川陽一, 竹内信次, 江守吉洋: 集合住宅周辺の気流・熱拡散に関する風洞実験, 電力中央研究所報告 第 08055 号, 2009. 7.
- 21) T. Michioka, A. Sato and K. Sada: Wind tunnel experiments for gas dispersion in an atmospheric boundary layer with large scale turbulent motion, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.141, pp.35-51, 2011.7.
- 22) 佐藤歩, 瀧本浩史, 道岡武信, 神田学: 建物キャニオン内の流れと拡散に関する屋外都市スケールモデル実験, 土木学会水工学論文集, 第 53 号, pp. 247-252, 2009. 2.
- 23) A. Inagaki and M. Kanda: Turbulent Flow Similarity over an Array of Cubes in Near-neutrally Stratified Atmospheric Flow, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.615, pp.101-120, 2008.
- 24) M. Roth: Review of atmospheric turbulence over cities, *Q.J.R. Meteorolol. Soc.*, 126, pp.941-990, 2000.4.
- 25) 稲垣厚至, 神田学: 屋外都市スケールモデルで観測された乱流統計量の鉛直分布, 土木学会水工学論文集, 第 51 号, pp.247-252, 2007.2.

注

注 1) 上空の乱れには境界層の上層で生成される *inactive turbulence* と地表面近傍で生成される *active turbulence* の 2 種類があり, 既往の文献から

inactive turbulence は運動量輸送に寄与しないことが確認されている。そのため, *active turbulence* を適切に再現できれば, 実測のレイノルズストレスを風洞実験で再現可能だと考えられる。

また, Michioka et al.は *active grid* と呼ばれる特殊な装置を用いて境界層の上部の乱れを増加させた風洞実験で, σ_u は大きくなるがレイノルズストレスは変化がないという結果を示した。

さらに, 本実験の異なる境界層高さによる実験結果の比較例を以下に示す。境界層高さを変化させると σ_u は変化しても, レイノルズストレスはほとんど変化しない結果となった。この結果からもレイノルズストレスは地表面から生成される *active turbulence* に支配されるという結果を支持している。

異なる境界層高さによる実験結果の比較例

(2011年7月28日原稿受理, 2011年12月19日採用決定)