

PIVを用いた乱流計測

—屋外模型都市と室内模型都市の相互比較—

PIV MEASUREMENTS OF URBAN CANOPY TURBULENCE -INTERCOMPARISON STUDY BETWEEN OUTDOOR AND INDOOR URBAN SCALE MODEL-

瀧本浩史¹・佐藤 歩²・小野村史穂³・神田 学⁴
Hiroshi TAKIMOTO, Ayumu SATO, Shiho ONOMURA, and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工修 (財)電力中央研究所 物理環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学准教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

Particle image velocimetry (PIV) was applied to the turbulent flow within urban canopies both in outdoor and indoor experimental facilities. We compared the results from those experiments with each other, and investigated the effects of large scale disturbance or highly fluctuating wind direction. Field PIV measurements are still rare, especially for the measurements of atmospheric turbulence. We validated the datasets from outdoor and indoor PIV measurements with an ultrasonic anemometer and a laser Doppler anemometer, respectively. They showed good agreements although there are some exceptions. The size of the field of view of outdoor PIV measurement was 3m x 2.25m and that of indoor PIV measurement was 288mm x 219mm. In the comparison of mean wind vectors, the structures of canyon flow were a little different between outdoor and indoor urban canopies. Also shear stress and turbulence intensity were found to be larger in the outdoor urban canopy.

Key Words : PIV, Turbulent structure, Urban canopy layer, Field experiment, Wind tunnel experiment

1. はじめに

大気中の熱や物質の輸送は主に乱流が担っており、都市の大気環境問題を考える上で、乱流の時空間構造の把握は重要である。しかしながら、都市においては社会的な制約や流れの非再現性等の要因により、空間的な流れの計測が難しい。そのため、大気乱流の計測は専ら超音波風速温度計を用いた点計測、あるいは鉛直1次元計測がほとんどであり（例えば、Roth¹⁾, Moriwaki and Kanda²⁾）、乱流の空間像を把握するには大量の測器が必要となる。実都市のストリートキャニオンにおける2次元計測の例としては、例えばLouka et al.³⁾, Eliasson et al.⁴⁾, Sugawara et al.⁵⁾らの超音波風速（温度）計を用いた観測例があるが、計測点は最大でも十数点であり、空間的な流れの構造を把握するのに十分な解像度とはいえない。

これに対して風洞実験では、流れ場の可視化画像から高い時空間解像度で流速を求めることのできるPIV (Particle Image Velocimetry) を用いた計測によって、よ

り詳細な流れの構造が解明されつつある（例えば、上原ら⁶⁾）。しかしながら、PIVを屋外の大気乱流計測に用いることは難しく、その計測例はZhu et al.⁷⁾による植生上での計測など非常に限られている。そこで著者らは前報（瀧本ら⁸⁾）において、大気乱流下における都市大気の流れを高い空間解像度で捉えるために、これまで行われることのなかった屋外都市キャノピーにおいてPIV計測を行い、その計測実績をつくった。

本研究では、屋外模型都市でのPIV計測に加えて、風洞においても同様のPIV計測を行い、両者の結果を相互比較することで、大気乱流の特徴である大きなスケールの擾乱や風向の変動が都市大気の流れにもたらす影響を検討した。

2. 観測概要

(1) 屋外PIV計測システム

a) 観測サイトおよび実験装置

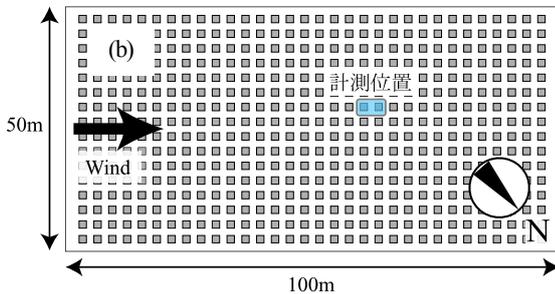
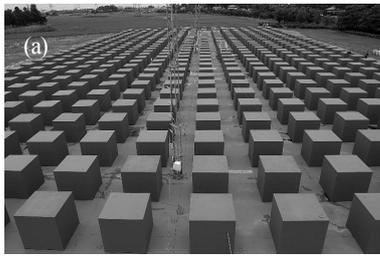


図-1 屋外模型都市

屋外での計測には、埼玉県、日本工業大学の敷地内に構築された屋外模型都市（図-1）を利用した。本サイトは100m x 50mのコンクリート基盤上に、1辺が1.5m (=H) のコンクリートキューブが建蔽率25%で規則的に配置されており、サイトの長手方向は季節風の卓越風向に一致する。本サイトについてはInagaki and Kanda⁹⁾に詳しい。

流れの可視化では連続発振方式のNd:YAG レーザ（1000mW、カトウ光研）を使用し、トレーサとしてオイルベースのフォグをフォグジェネレータから発生させた。発生させたトレーサは、計測領域の風上とキャニオン内に設置した塩ビパイプ（φ20mm）を通すことで広範囲に散布できるようにし、さらに風向の変動に対応できるように塩ビパイプを可動式とした（図-2）。このとき、キャニオン内からのトレーサの散布では、流れに影響を与えないように流出速度を十分遅く設定した。また、トレーサが発生時に持つ熱を取り除くために、濡れタオルを巻いたアルミパイプをフォグジェネレータと塩ビパイプの間に接続した。可視化画像の撮影には、解像度1392 x 1040 pixelsのCCDカメラ（30fps, 8bit, 日立国際電気）を使用し、画像データの保存には、高速でデータを書き込むことのできる特殊なRAID構成のHDD（グラフィン）を用いた。さらに、上空の風速測定および精度検証を目的として2Hと1.2Hの高さにプローブのパスが5cmの超音波風速計（Kaijo）を設置した。

b) 実験内容

屋外でのPIV計測の大きな欠点の1つは、可視化が可能な夜間にしか計測が行えないという点である。今回解析に用いたPIV計測のデータは図-1 (b) に示すストリートキャニオンにおいて、2008年9月4日、21時から22時の1時間にわたって計測された。計測領域はストリートキャニオンの鉛直断面、幅3m、高さ2.25mであり、サンプリ

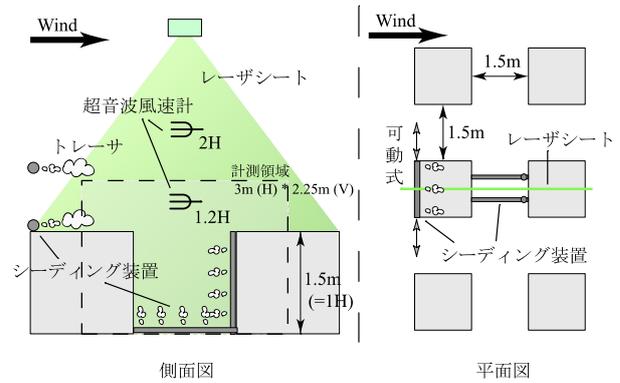


図-2 屋外実験の概要

ング周波数は30Hzとした。また、PIVにおいて画像間の相関の計算に用いる検査領域のサイズは88.9mm x 88.9mmとした。PIV解析では、この検査領域に含まれる粒子の空間平均速度を求めている。

実験時の平均風速は2Hにおいて0.73m/s、平均風向はサイトの長手方向から西側に26.2° 傾いており、大気安定度 z/L は-0.146であった。なお、大気安定度の算出は以下の式による。

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(\overline{w'T'})}{u_*^3 / kz'} \quad (1)$$

ここで、 $z'=z-d$ とし、 z は測定高度、 d はゼロ面変位である。ゼロ面変位はMacDonald¹⁰⁾による実験式より求め、カルマン定数 k には0.4を用いた。また、建物高さ H と2Hでの風速 U_{2H} を用いたレイノルズ数 $Re_H (=U_{2H}H/\nu)$ は約 7.1×10^4 である。

(2) 室内PIV計測システム

a) 風洞および実験装置

室内でのPIV計測には、(財)電力中央研究所の水平二風路回流式温度成層風洞を用いた。本風洞の試験セクションは長さ10m、幅1m、高さ1mである。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、平均風速、乱流強度はともに壁面近傍を除き、断面全体で1%以内であることを確認している。気流温度の制御には、風洞入口に設置した温度成層装置と床面温度調整装置を併用した。温度成層装置は、フィン付きの電気ヒータによって気流温度を12~100°Cに制御でき、床面温度調整装置は電気ヒータまたは水冷コイルにより床面温度を12~90°Cに制御することができる。

建物の模型としては、スタイロフォーム製の1辺が75mmの立方体を用い、屋外実験と同様、建蔽率25%で正方配置した（図-3）。ブロックは、流れ方向に44列、スパン方向に5列の計220個を並べ、さらに、計測領域の下流側にも3列分のブロックを配置した。このとき、下流側に4列分のブロックを配置したケースについても計測を行ったが、3列分のブロックを配置したケースと比

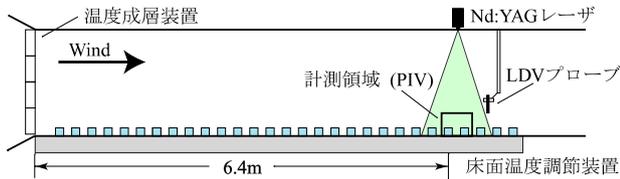


図-3 風洞実験の概要

較して、大きな変化は見られなかった。

流れの可視化にはパルス発振方式のNd:YAGレーザ (120mJ/pulse, NEW WAVE RESEARCH) を、撮影には解像度1344 x 1024 pixelsのCCDカメラ (12bit, Kodak) を使用し、2枚の画像を1秒間に4組撮影した。2枚の画像の撮影間隔は2.5msecであり、サンプリング周波数は4Hz、計測時間は3分間とした。また、トレーサの散布には屋外と同様にオイルベースのフォグを使用し、風洞入り口に設置した塩ビパイプを通して散布を行った。

b) 実験内容

風洞実験では計測領域を288mm x 219mmとし、検査領域を6.9mm x 6.9mmとした。実験風速は、ストリートキャニオンの中心、高さ2Hでの風速 U_{2H} が約1m/sとなるように設定した。また、大気安定度の影響を考慮するため、安定度を中立としたケース (NT) に加えて、気流温度 T_a と床面温度 T_f を変化させた不安定成層流のケース (US) についても計測を行った。 Re_H は約 4.8×10^3 である。**表-1**に各ケースの計測条件を示す。バルクリチャードソン数は以下の式より求めた。

$$R_b = gz'(T_{2H} - T_f) / ((T + 273.15) * U_{2H}^2) \quad (2)$$

ここで、 T は平均気流温度、 T_{2H} は高さ2Hでの気流温度である。

3. 結果と考察

(1) 精度検証

屋外PIV計測の精度検証では、1.2Hに設置した超音波風速計を使用し、近傍の点でのPIVの計測結果との比較を行った。超音波風速計の計測周波数は50Hzであるが、PIVとの比較では、それぞれのデータを10Hzに間引いたものを用いた。ただし、風向がレーザ断面から大きく傾くような時間帯には流れの可視化が困難になり、PIV計測にデータ欠損が生じてしまうため、両者の比較にはPIVにおいて計測が可能であった時間帯のみのデータを用いた(**表-2**)。ここで、 u , w は流れ方向(観測サイトの長手方向)および鉛直方向の風速であり、それぞれの標準偏差を σ_u , σ_w 、摩擦速度を $u_* = \sqrt{-u'w'}$ と表す。PIVと超音波風速計との比較では、いずれの乱流統計量についても数%以内の誤差で一致している。また、風速の時間変動(**図-4**)についても良い一致を見せていることから、十分な精度で計測ができていることが分かる。

室内PIV計測の精度検証にはファイバプローブの ϕ が14mmの2次元Laser Doppler Anemometer (DANTEC) を

表-1 風洞計測条件

Case	U_{2H}	T_a (°C)	T_f (°C)	R_b
風洞中立	0.96	20.0	20.0	0
風洞不安定	1.00	23.5	86.0	-0.480

表-2 PIVと超音波風速計の比較 (60分平均値)

	PIV (m/s)	SONIC (m/s)	PIV/SONIC
\bar{u}	0.65	0.67	0.96
σ_u	0.37	0.38	0.97
σ_w	0.18	0.17	1.06
u_*	0.12	0.11	1.03

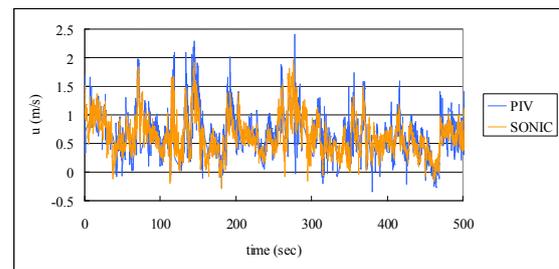


図-4 PIVおよび超音波風速計による水平風速uの時間変化

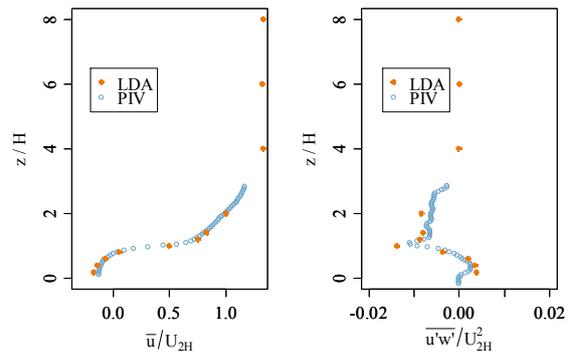


図-5 PIVおよびLDAで得られた u , $u'w'$ の鉛直プロファイル

使用し、キャニオン中心において鉛直方向に11点の計測を行った。計測時間は各点において90秒とした。**図-5**は、中立のケースについてPIVとLDAで得られた水平風速 u とレイノルズ応力 $u'w'$ の鉛直プロファイルである。水平風速については非常によく一致しているが、レイノルズ応力については、PIVがLDAの結果よりも過小評価になっている。これは、LDAが厳密な点計測であるのに対し、PIVによる計測が検査領域における空間平均値になっていることが1つの原因だと考えられる。ただしその差は最大でも15%程度であり、鉛直プロファイルもよく似ていることから、過小評価であることに留意すれば、本研究において大きな問題ではないとした。

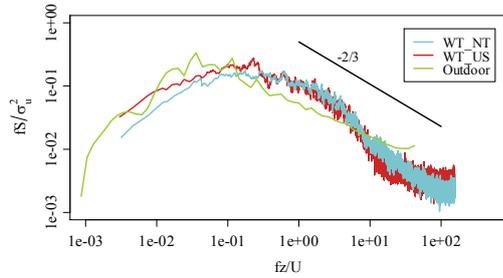


図-6 屋外および風洞での水平風速uのスペクトル

(2) スペクトル解析

次に、屋外および風洞計測で得られた水平風速uのスペクトル解析の結果を図-6に示す。解析に用いた風速データは、超音波風速計およびLDAにより高度2Hにおいて計測されたものである。図-6から、屋外のケースでの卓越周波数が風洞のケースよりも低周波側にあり、夜間に行われた本実験においても熱対流などの大きなスケールの擾乱が支配的であることが分かる。また、風洞のケースでNTとUSを比較すると、USのほうが低周波側でスペクトルが大きく出ている。これは、熱浮力によって対流が生じ、建物が生み出す剥離渦よりも大きなスケールの渦が発生するためだと考えられる(佐藤ら¹¹⁾)。

(3) 乱流統計量の空間分布

次に、屋外と風洞でのPIV計測より得られた乱流統計量の空間分布を示す。図-7~9はそれぞれ、平均風速ベクトルとせん断応力 \overline{uw} 、乱流強度 $I = 0.5\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_w^2}$ のコンターであり、(a)は屋外、(b)は風洞中立、(c)は風洞不安定のケースに対応している。結果はすべて U_{2H} あるいは U_{2H}^2 により無次元化されている。ただし、屋外での水平スカラー風速 $U_s = \sqrt{U_{2H}^2 + V_{2H}^2}$ は U_{2H} の1.14倍であった。図-7において、(b)と(c)の比較では、USの方がわずかに上昇流が強くなっていることを除いて違いはほとんど見られない。これはUehara et al.¹²⁾と類似の結果であるが、屋外の結果と比較すると、キャニオン内の循環の中心位置や、地表面付近での鉛直風速の強さが大きく異なることが分かる。

この違いの1つの原因として、風向変動が考えられる。図-10の(a)、(b)は、屋外計測で u_{2H} が0.5m/sよりも大きいときの風速分布を、風向 θ がサイトの長手方向に対して $|\theta| < 5^\circ$ の場合と、 $15^\circ < \theta < 45^\circ$ の場合とに分け、アンサンブル平均したものである。風向がキャニオンに対して直角に入ってくるときには、キャニオン下部で地面に平行な流れが見られ、風洞の結果に近い。これに対して、風向が傾いているときには、キャニオン内で風速の鉛直成分が大きくなっている。Vardoulakis et al.¹³⁾は、屋

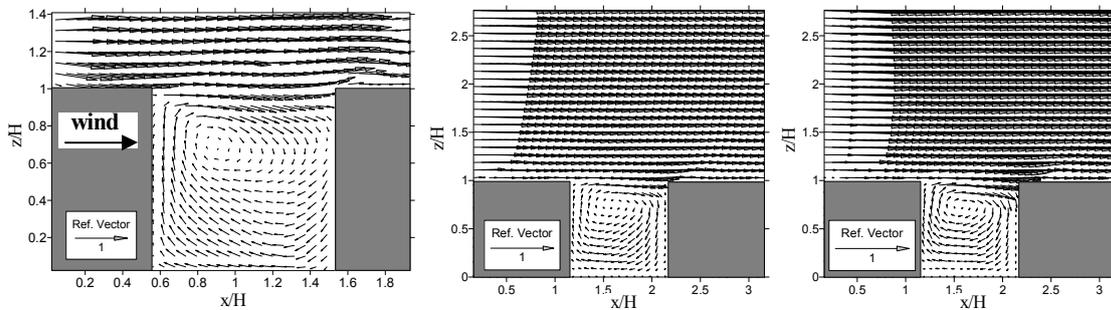


図-7 平均風速ベクトル (U_{2H} により無次元化)。左から、(a)屋外、(b)風洞中立、(c)風洞不安定

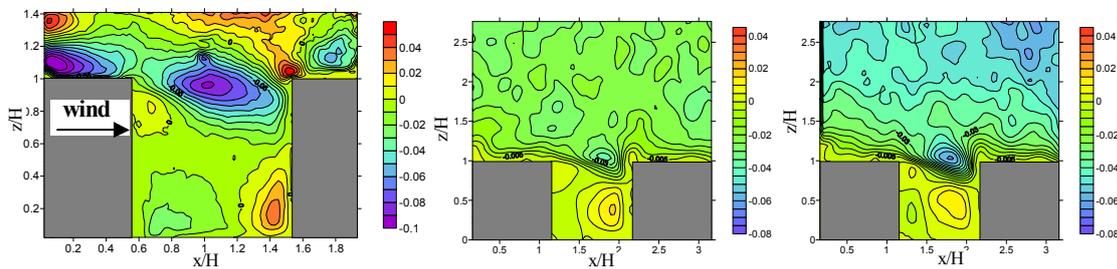


図-8 \overline{uw}/U_{2H}^2 。左から、(a)屋外、(b)風洞中立、(c)風洞不安定

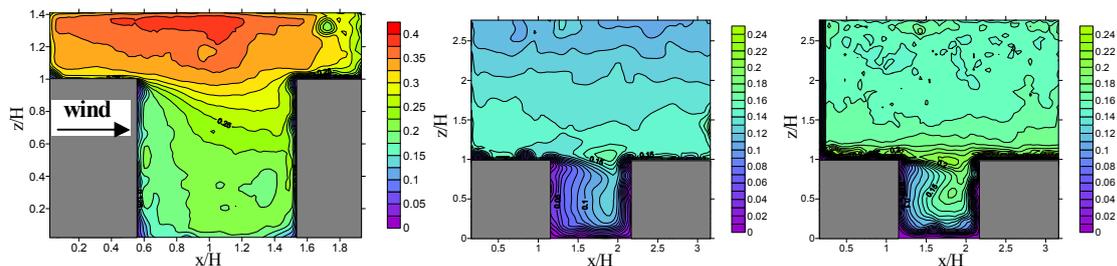


図-9 $0.5\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_w^2}/U_{2H}$ 。左から、(a)屋外、(b)風洞中立、(c)風洞不安定

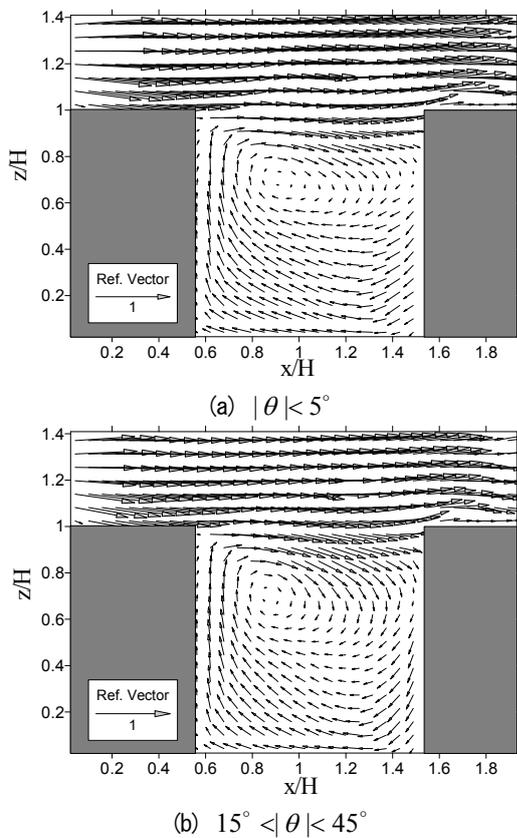


図-10 風向の傾きによる循環構造の違い

根面レベルでの風向がキャニオンに対して傾いているときには、キャニオン内の流れがスパイラル状になり得るとしており、上原ら⁹⁾もキャニオン水平断面のPIV計測により、風向が傾けばキャニオン内の流れも大きく変わることを示唆している。本実験においても、風向が傾いているときにはキャニオン内において流れの3次元性が増し、断面方向からの流出入が盛んになることで循環の様子が変化したと考えられる。

図-8を見ると、屋外での \overline{uw} が風洞の結果と比べて全体的に大きい。Inagaki and Kanda⁹⁾は、内層の \overline{uw} に対する外層の擾乱の影響は小さいことを示しており、外層の乱れによって、 \overline{uw} が風洞の2~3倍にもなるのは考えにくい。これは、図-10からも分かるように、風向変動の影響が大きいと考えられる。風向が傾いて入ってくるときには、建物の配列が千鳥格子に近くなる。Kanda¹⁴⁾はLESによって、建物の幾何配列が千鳥格子のときには、正方格子に配列されている場合に比べて抵抗が大きくなることを示しており、本研究においても風向が傾いたときに抵抗が大きくなり、運動量交換が増大したと考えられる。図-9の乱流強度についても、屋外での計測結果が風洞よりも大きく、特に建物上空で顕著である。これは、外層の擾乱による大きな風速・風向変動が効いているのに加え、レイノルズ数の影響も含まれていると考える。実際、風洞において、 U_{2H} を3m/sにしたところ、1m/sのケースと比べて乱流強度はわずかに強くなった。また、風洞と比較して、屋外での乱流強度がキャニオン内において一様となっているのは、様々な風向、風速の流れが

キャニオン内に流れ込んでいるためだと考えられる。

(4) 瞬間的な流れの検討

流れを平均すると、屋外・風洞ともにキャニオンの中に1つの大きな循環が見られたが、瞬間的にはキャニオン上端部での強い渦やsecondary vortex (例えば、DePaul and Sheih¹⁵⁾)を確認することができた。特に、図-11に示すようなキャニオン内からの強い上昇流は興味深い。前

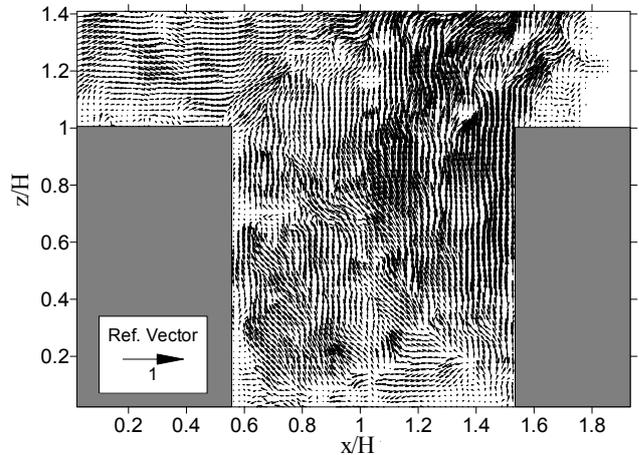


図-11 屋外計測で見られたキャニオン内からの強い上昇流

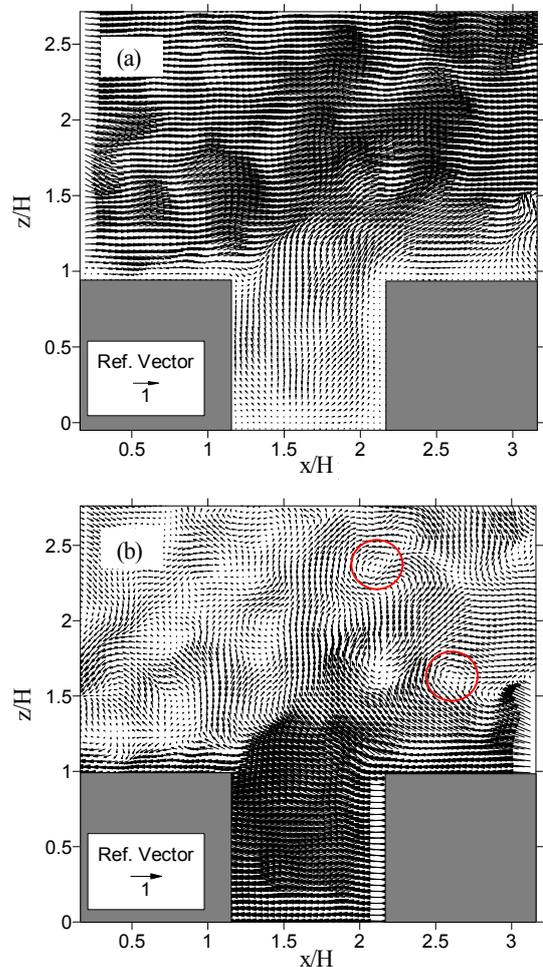


図-12 風洞計測で見られたキャニオン内からの強い上昇流
(a) ある瞬間の風速ベクトル図
(b) (a)から一定風速 $u=0.8\text{m/s}$ を引いたベクトル図

報⁸⁾でも同様の現象について簡単に触れたが、このようなイベントは数秒の継続時間を持ち、強さにばらつきはあるものの数分に1度の頻度で確認することができた。数分に1度と間欠性が高いため、外層の乱れによるものと考えたが、同様の上昇流は風洞でも確認することができた(図-12(a))。風洞での継続時間は0.5秒以下と短く、頻度は10秒~20秒に1度程度のものであった。ただし、風洞でのサンプリング周波数が4Hzと小さいことから、計測できなかったイベントがあり、実際には、より高い頻度で起こっている可能性もある。屋外と風洞での時間スケールの違いを考慮すれば、これは屋外で観測された上昇流と同一のメカニズムで発生していると考えられる。

Eliasson et al.⁴⁾もshear stress layerを突き抜ける渦について言及しているが、その要因は屋根の複雑な形状や地形によるものではないかとしている。その渦が同じ現象を指しているかは分からないが、本研究ではどちらの要因も考えにくく、別の要因によって発生している可能性が高い。この強い上昇流の発生要因の1つとしては、都市の接地層に発達し、運動量輸送の大部分を担うとされるストリーク状の乱流構造(例えば、稲垣ら¹⁶⁾)が関係していると予測される。実際、風洞実験において上流側の建物ブロックを徐々に減らしていき、都市境界層のフェッチを短くしたときには、このような強い上昇流が起きる頻度は段々と低くなっていった。つまり、フェッチが長いときには、建物群によって生み出された乱れが発達し、強いイジェクションとなってキャニオン内の上昇流を引き起こしたのではないかと考えられる。図-12(b)はAdrian et al.¹⁷⁾の手法に従い、図-12(a)の瞬間風速ベクトルから一定の流速を減じたものである。ここでは、全ての風速ベクトルから $u=0.8\text{m/s}$ を引いた。赤丸で囲んだ部分はヘアピン渦のheadに対応すると考えられるもので、それらによって建物の上空に上向きの流れ(強いイジェクション)が誘起されていることが分かる。他の上昇流イベントについても同様の処理を施すことで、建物上空に類似の傾向が見られたことから、乱流構造がこの上昇流の発生に大きく関わっていることが分かる。

4. 結論

屋外および風洞において、都市境界層中のストリートキャニオン内および上部の流れをPIVにより計測した。本研究により以下の結論が得られた。

- (1)屋外と風洞では、キャニオン内の流れの構造が異なることが分かった。その原因の1つとして、屋外での強い風向変動が挙げられる。
- (2)乱流統計量の比較により、屋外と風洞では乱流強度の大きさが異なることが分かった。その要因としては、外層の乱れの有無、レイノルズ数の違いが挙げられる。
- (3)瞬間的な流れの検討から、キャニオン内から発生する間欠性の強い上昇流イベントを捉えた。その発生要因と

して、都市の乱流構造が関係していることを示した。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号：18360234)による財政的援助を受けた。また風洞実験に際しては、(株)電力テクノシステムズ星順一氏のご協力を頂いた。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- 2) Moriwaki, R., Kanda, M.: Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol.84, pp.127-135, 2006.
- 3) Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P.G., Rosant, J.-M.: Thermal effects on the airflow in a street canyon-Nantes99 experimental results and model simulations, *Water, Air, and Soil Pollut.*, Focus 2, pp.351-364, 2002.
- 4) Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C.S.B., Lindqvist, S.: Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon, *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.1-16, 2006.
- 5) Sugawara, H., Ogawa, H., Hagishima, A., Narita, K., Tanimoto, J.: Observation of stability-influenced canyon flow patterns, *Proc. 6th Int. Conf. on Urban Climate*, pp.180-183, 2006.
- 6) 上原清, 若松伸司, 老川進: 沿道建物列の隙間がストリートキャニオン内濃度に及ぼす影響に関する風洞実験 —市街地における大気汚染物質の拡散に関する研究 その7, 日本建築学会環境系論文集, No.610, pp.51-58, 2006.
- 7) Zhu, W., van Hout, R., Luznik, L., Kang, H.S.: A comparison of PIV measurements of canopy turbulence performed in the field and in a wind tunnel model, *Exp. Fluids.*, Vol.41, pp.309-318, 2006.
- 8) 瀧本浩史, 森脇亮, 津國眞明, 神田学: 屋外都市スケールモデルにおけるPIV計測, 土木学会水工学論文集, Vol52, pp.259-264, 2008.
- 9) Inagaki, A., Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow, *J. Fluid Mech.*, submitted.
- 10) MacDonald, R.W., Griffiths, R.F., Hall, D.J.: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, Vol32, pp.1857-1864, 1998.
- 11) 佐藤歩, 瀧本浩史, 道岡武信: 不安定成層流中に置かれた立方体建物後流計測の風洞実験, 第20回風工学シンポジウム論文集, 2008, in press.
- 12) Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., Wakamatsu, S.: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons, *Atmos. Environ.*, Vol34, pp.1553-1562, 2000.
- 13) Vardoulakis, S., E.A. Fisher, B., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N.: Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmos. Environ.*, Vol37, pp.155-182, 2003.
- 14) Kanda, M.: Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol118, pp.151-168, 2006.
- 15) DePaul, F.T., Sheih, C.M.: Measurements of wind velocities in a street canyon, *Atmos. Environ.*, Vol20, pp.455-459, 1986.
- 16) 稲垣厚至, 神田学, 森脇亮: 屋外都市スケールモデル実験で観測された乱流構造に関する考察, 土木学会水工学論文集, Vol50, pp.445-450, 2006.
- 17) Adrian, R.J., Meinhart, C.D., Tomkins, C.D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol422, pp.1-54, 2000.

(2008. 9. 30受付)