

# 屋外都市スケールモデルにおけるPIV計測

## PIV METHOD FOR TURBULENCE STATISTICS WITHIN AND ABOVE OUTDOOR URBAN SCALE MODEL

瀧本浩史<sup>1</sup>・森脇 亮<sup>2</sup>・津國眞明<sup>3</sup>・神田 学<sup>4</sup>

Hiroshi TAKIMOTO, Ryo MORIWAKI, Masaaki Tsukuni, and Manabu KANDA

<sup>1</sup>学生会員 工学 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 愛媛大学准教授 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

<sup>3</sup>工学 独立行政法人 都市再生機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

<sup>4</sup>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 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

Particle image velocimetry (PIV) was applied to the turbulent flow within and above an outdoor urban scale model. The setup of the PIV system and the preliminary results were presented. Two dimensional turbulent flow fields in a vertical cross section of street canyon (3 x 3 m) were measured continuously for 60 min; the spatial and temporal resolutions were 5cm and 1/30 sec, respectively. The mean wind vector and turbulent statistics were successfully obtained. Also the PIV results were validated with measurements of ultrasonic anemometer which is conventional instrument for the investigation of atmospheric turbulence. Most of them showed good agreements within the error of 10% although the data acquisition ratio was still low.

**Key Words :** PIV, Turbulent structure, Urban canopy layer, Outdoor field 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。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、森脇ら<sup>1)</sup>, 2004), 乱流の空間像を把握するには大量の測器が必要となる。そこで本研究では、風速の面計測が可能なPIV計測手法を屋外の乱流計測に適用することを試みた。PIV (Particle Image Velocimetry) とは、可視化した流れの画像から流速の断面分布を計測する手法であり、流れ場の把握に絶大な威力を発揮する。PIVは室内実験での応用は進んでいるが、屋外に適用された例は非常に少ない (Hommemma and Adrian, 2003<sup>2)</sup>)。その理由として、(1)屋外では流れの変動が激しくトレーサの散布(シーディング)方法が難しいこと、(2)屋外で有意な乱流統計量を取得するためには最低でも通常30分以上の連続計測が必要であるが、長時間のシーディング供給および膨大な画像データの高速

保存・処理が困難であること、などが主に挙げられる。しかし、大気環境下での計測は、室内実験・数値シミュレーションでは検討できない以下の利点がある。(1)レイノルズ数が極めて大きい。(2)建物から大気境界層スケールまで様々なスケールの渦が存在している。(3)日影・日向が存在する。また、PIVはセンサーによる攪乱の影響が無いため、建物上空の乱流構造(稲垣ら, 2006<sup>3)</sup>)はもとより、複雑に入り組んだキャノピー空間内における乱流構造の把握に大きな役割を果たすと期待される。数少ない屋外PIV計測の例として、Hommemma and Adrian (2003)がある。しかし、対象は障害物のない平坦境界層であり、また、短時間計測であるため乱流統計量の定量的算出には至っていない。

そこで本研究では、屋外での建物群において、乱流統計量の算出に足る長時間連続PIV計測システムを構築することを始めて試みた。本報ではそのシステムを紹介するとともに、試行的に行った実験をもとに、(1)屋外PIVの精度検証、(2)乱流統計量の空間分布の結果を紹介する。

## 2. 観測概要

### (1) PIVシステムの構築

屋外でのPIV計測の難点はシーディング方法と長時間連続運転の2つに集約される．本研究では，この2点を打開するため以下のようにシステムを構築した．

・シーディング装置 本研究では可視化用のトレーサーとして舞台効果用の煙を用いた．煙の熱による浮力と噴出による運動量の影響を最小限に抑えるため，発生させた煙をいったん箱に貯め，それを外気とともにファンで流す方式を採用した．また風向が変動しても計測領域に煙が流れるようにするためシーディングはラインソースとして与えた．具体的には，長さ4mの塩ビ管の両側からファンで煙を送り，塩ビ管に空けた複数の穴から煙が出るようにした（図-1）．さらに，電流調節装置を作成しファンの強弱を調節することで，煙の出方を自由に制御できるようにした．この他にも，シーディング装置の風上側にいくつかのフォグマシンを配置することにより，風速の変動にも対応させた．

・長時間連続システム 舞台効果用の煙を発生させるフォグマシンは90秒間の運転の後，ヒートアップのために30秒間の休止を必要とする．そこで，シーケンス制御装置を作成し2台のフォグマシンを交互運転させることにより，長時間連続で煙を発生させることを可能にした．また，大容量データを高速書き込みできる特殊なRAID構成ハードディスクを採用し，1時間以上のデータ保存を可能とした．

また，実験に用いるレーザーは出力1000mW，波長532nmのLD励起Nd:YVO<sub>4</sub>固体レーザーであり，CCDカメラは解像度1392(H)×1040(V)pixel，フレームレート30fpsのものを使用した．PIV解析に用いたソフトは「FlowPIV」（株式会社ライブラリー）と呼ばれるもので，変位量の解析に「輝度差累積の逐次棄却法」（加賀ら，1994<sup>4</sup>）というアルゴリズムを用いている．このアルゴリズムは画像間の相関関数を求める代わりに，画像間の輝度値の差を積算した値を計算しており，数値処理が簡潔であるため計算速度が非常に速い．そのため，長時間のデータを解析する本研究に適している．



図-1 シーディング装置

### (2) 実験方法

実験は2006年12月27日18時45分頃から1時間，1辺が1.5mのコンクリートブロックが1.5m間隔で一様に配置された屋外模型都市（図-2）において，長時間連続PIV計測システムを用いて行った．風向は冬季に特徴的な模型都市の長手方向に沿った北西の風が卓越しており，風速は1m/s程度であった．また，大気不安定度はやや不安定であった．図-3のように各装置を設置して流れの可視化を行い，CCDカメラで撮像した．計測領域は，キャンピー内外の相互作用を見るため，3.4m(H)×2.5m(V)とした．また，PIVの精度検証のため，大気の乱流計測では現在最も信頼の置ける超音波風速計（Kaijo, DA-600）を計測領域内に設置し同期計測を行った．

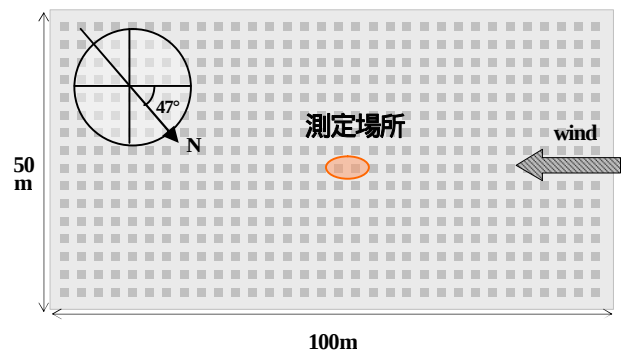


図-2 屋外模型都市 (COSMO)

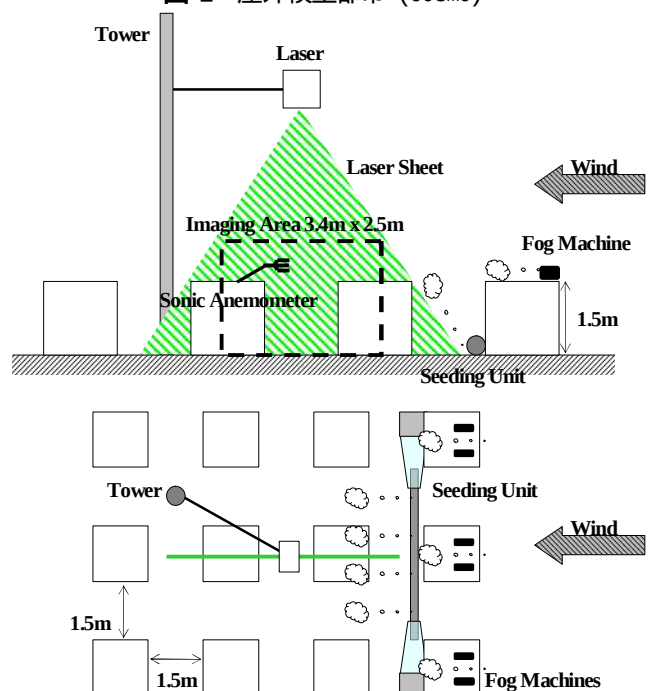


図-3 実験装置の配置

### 3．結果と考察

#### (1) PIVと超音波風速計の比較

実験は1時間連続で行ったが、風向の安定した30分間のデータを解析に用いた。はじめに、PIV計測で得られた水平風速と鉛直風速を超音波風速計のデータと比較する。比較を行うPIVの計測点は、超音波風速計周辺の流れが乱れていることから、風速計の12cm風上側のデータを用いた。今回の実験では、各格子点においてデータが計測できた時間とできなかった時間が存在するが、計測できたデータ数の比率をデータ取得率とし、図-4にその分布を示す。この計測点でのデータ取得率は25.1%であり、精度を検証するためには十分な取得率であると考えられる。図-5は5分間の水平風速 $u$ 、鉛直風速 $w$ を時系列で示したグラフである。水平風速については互いの結果がよく対応しており、鉛直風速についても多少のばらつきはあるものの、よい一致を見せている。しかし、図-6から分かるように、PIVによる計測結果には、風速がある値に偏ってしまうピークロッキングと呼ばれる誤

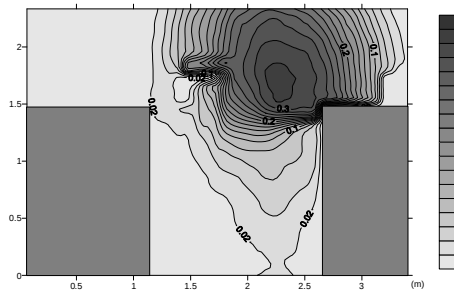
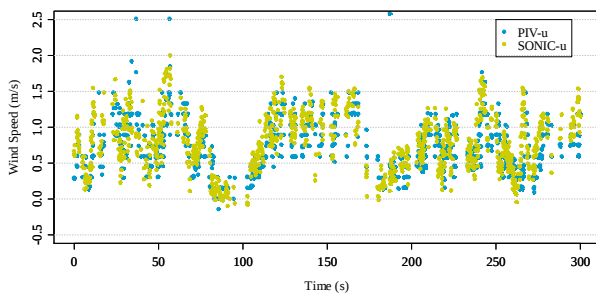
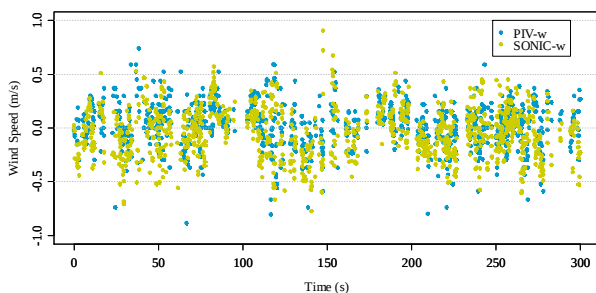


図-4 データ取得率



(a) 水平風速 $u$ の比較



(b) 鉛直風速 $w$ の比較

図-5 PIVと超音波風速計で測定した風速の時系列変化

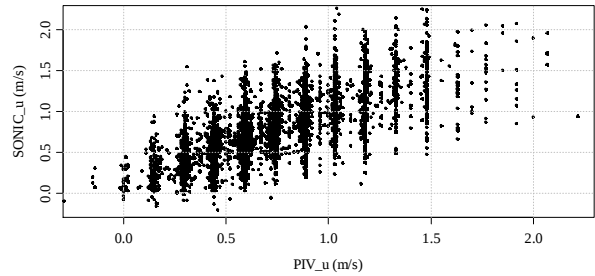


図-6 PIVと超音波風速計で測定した水平風速 $u$ の比較

差が生じている。これは、トレーサの移動量サブピクセルとよばれるピクセル以下のオーダーで求めたいときに、2画像間の輝度パターンの相関係数の分布を適切な曲線で補間する際、移動量が整数値に偏ってしまう現象である。今回解析に用いたFlowPIVでは相関係数の分布を2次曲線により補間しているが、この方法では強いピークロッキングが生じてしまうと指摘されており、これに対していくつかの解決策が提示されている（例えば、Chen and Katz., 2005<sup>5)</sup>, Scarano, 2001<sup>6)</sup>）。ただし、これらの方法では解析時間が長くなるという短所もある。今後、異なるアルゴリズムを用いて解析を行い、ピークロッキングの解消について比較する予定であるが、本論文においては、後に示すように深刻な問題ではないと考えられるため、アルゴリズムの検討は見送った。

次にPIV計測で得られたデータと超音波風速計のデータの30分統計量を比較する（表-1）。表中の"SONIC"は超音波風速計の結果であり、"#SONIC"は超音波風速計のデータをPIVのデータが取得できた時間に合わせて間引いたものである。PIVと#SONICを比較すると、 $u$ の平均値、標準偏差、 $w$ の標準偏差は10%以内でよく合致している。 $u_*$  ( $=\sqrt{-u'w'}$ ) は20%程度の差があるが、大気乱流計測に基づく統計量には10%程度のデータのばらつきはよく見られることを鑑みると、本研究のPIVで得られた風速および乱流統計量是有用であるといえる。しかしながらPIV計測による風速や標準偏差は超音波風速計に比べて過小に見積もられる傾向にある。これは、超音波風速計自体が障害物としてゼロ風速域と判定されることに起因している。すなわち、超音波風速計近傍のPIV風速を見積もる際に、粒子軌道の空間相関を取るための検査領域が超音波風速計にかかってしまうと、その風速が過小に導かれてしまうことになる。また、PIVの計測結果を間引いていない超音波風速計のデータと比較すると、その差はさらに大きくなっており、風速が速いときには計測がうまくいっていないことが分かる。これは、風速が速いときには煙が拡散して、輝度のばらつきが弱くなったり、解析を行う2画像間で輝度パターンが大きく変形するためであると考えられる。この対策としては、カメラのフレームレートをあげる、シーディング装置を計測領域に近づけるなどが考えられる。

表-1 乱流統計量の比較

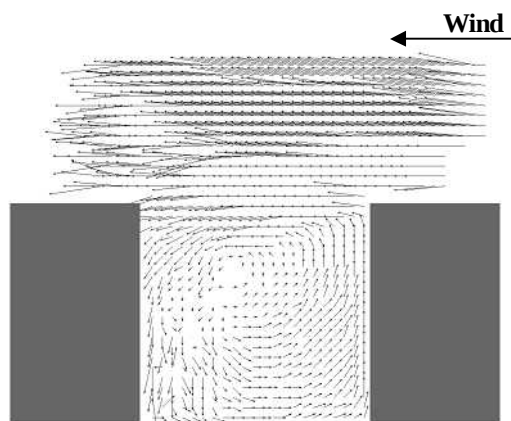
|            | PIV<br>(m/s) | #SONIC<br>(m/s) | SONIC<br>(m/s) | PIV/<br>#SONIC | PIV/<br>SONIC |
|------------|--------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| $\bar{u}$  | 0.702        | 0.749           | 0.806          | 0.94           | 0.87          |
| $\sigma_u$ | 0.315        | 0.339           | 0.431          | 0.93           | 0.73          |
| $\sigma_w$ | 0.217        | 0.234           | 0.251          | 0.93           | 0.86          |
| $u_*$      | 0.136        | 0.171           | 0.197          | 0.80           | 0.69          |

## (2) 乱流統計量の空間分布

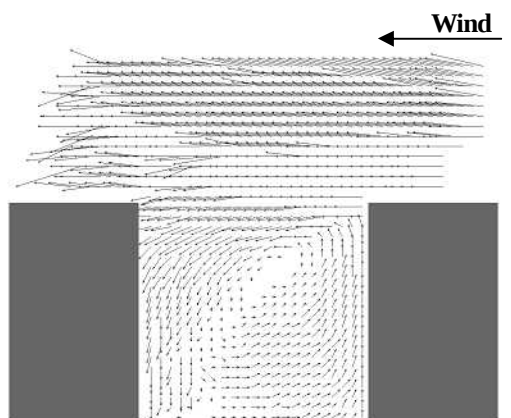
次にPIV の利点である風速および乱流統計量の空間分布情報について示す。

### a) 平均ベクトル

図-7は実験を行った30分間を前半15分、後半15分に分けて、それぞれの15分平均したベクトル図を示したものである。これらの図から、キャニオン内（建物に挟まれた領域）の循環流れの様子が良好に計測できていることが分かる。しかし、2つのグラフでは循環の中心が異なり、前半15分は中心が風下側に、後半15分では風上側に位置している。Kanda et al. (2004)<sup>7)</sup>によるLESを用いた数値計算では、キャニオン内の循環の中心はキャニオン中心よりも上方に、また風下側にずれるとされて



(a) 前半15分間、 $u=0.84\text{m/s}$ 、 $Re=-0.76$



(b) 後半15分間、 $u=0.68\text{m/s}$ 、 $Re=-2.25$

図-7 15分間の平均ベクトル図

おり、図-7(a)と一致する結果となっている。ただし、風速が変動すればキャニオン内の循環の中心が移動することは数値計算でも指摘されており、超音波風速計で計測された水平風速の15分平均  $\bar{u}$  は、前半が0.84m/s、後半が0.68m/sであることから、風速が速いほど循環の中心は風下側に移動する傾向が窺える。Uehara et al. (2000)<sup>8)</sup>による風洞実験の結果では、成層状態が不安定から中立、安定になるにつれて、循環の中心が風下側に移動してい

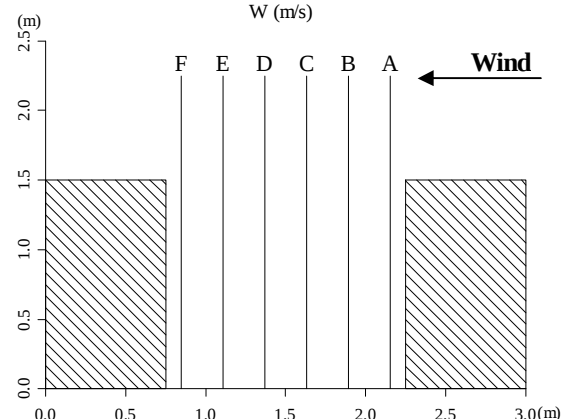
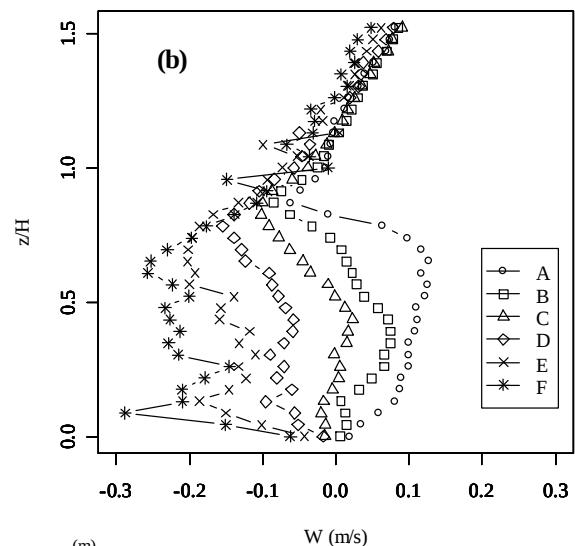
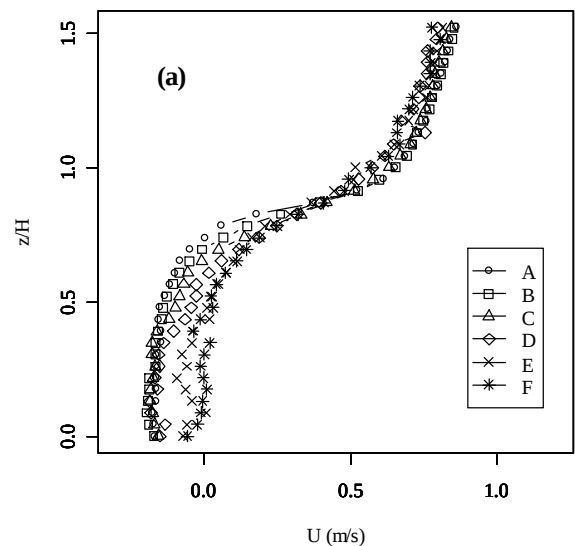


図-8  $u, v$ の鉛直プロファイル

る．実験を行った日は大気が不安定であり，本実験におけるフラックスリチャードソン数は，前半が $Ri_f=0.76$ ，後半が $Ri_f=2.25$ であったことから，大気安定度と循環の中心の位置の関係がUehara et al.の示した結果と一致していることが分かる．また，図-8は30分平均した $u$ と $w$ の鉛直プロファイルを示したものであるが，図-8(a)では，キャニオン上端部で大きな速度勾配が見られ，強いせん断力が働いている．さらに，図-8(b)から，1Hの少し下で極めて強い鉛直混合が生じていることが分かる．

#### b) 乱流統計量

次に，30 分平均をした乱流統計量のコンター図を図-9に示す．図中の白い破線は超音波風速計の影響がある範囲を示している．図-9(a)，(b)はUehara et al.の風洞実験の特徴をよく反映しており，特に大気状態を不安定としたときの結果に近い．図-9(c)では，風速が速いキャノピー上空で分散が大きく，風速が小さく風向の自由度も小さい壁面付近では小さくなっている．図-9(d)では，キャニオン中央から風下側の壁面にかけて分散が大きくなっている．これは，その領域にさまざまな風速の風が

流れ込んできているためだと考えられる．図-9(e)ではキャニオン上端部で最もレイノルズ応力が大きく，運動量が盛んに交換されている（図中白丸部分）．また，図-9(f)では，風上側の壁面上端部で，反時計回りの渦度が強く出ていることが分かる．ただし，図-9の(c)～(f)図では，下流側の壁面下部付近で，複雑なパターンが見られるが，これは図-4に示すように，データ取得率が低いためである．データ取得率が10%であってもデータ数は数千近くあるため，信頼度自体は低いと考えられるが，キャニオン内は多くの点でデータ取得率が数%であり，下流側の下部ではほとんどデータが取れていなかった．これは，撮像領域に入ってくる流れの鉛直風速が正のときには，キャニオン内にトレーサーが入ってこず，また，鉛直風速が0または負のときにトレーサーが入ってきたとしても，その量が十分でないためである．これに対してトレーサーを増やしたとしても，今度はキャノピー上空でむらがなくなってしまうという問題が発生する．そこで，今後，コンクリートブロックの壁面に穴を開け，その穴からもシーディングを行うことを予定している．

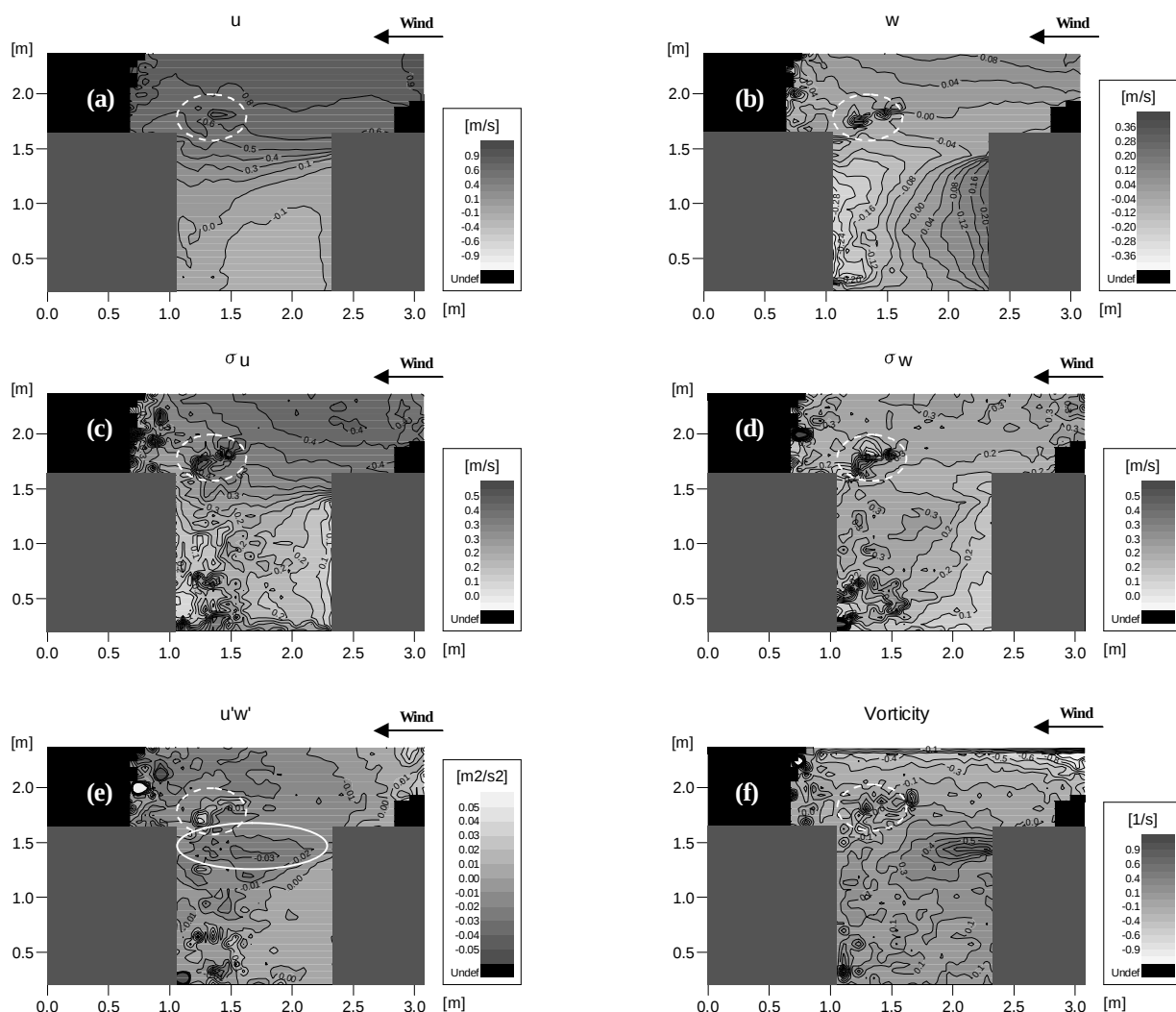


図-9 乱流統計量のコンター図

### (3) 非定常性の検討

屋外実験の特徴を生かし、流れの非定常性を検討した。図-10は超音波風速計によって得られた風速3成分の時系列データを示している。円で囲んだ2つの時間帯は、それぞれ乱流構造の下降流モード（スイープ）と上昇流モード（イジェクション）に対応しており、従来はこのような点計測の風速時系列データからその非定常性が検討されていた（例えば、稲垣ら<sup>3)</sup>）。しかし、PIV法ではそれらのイベントにおける空間分布情報が得られる。図-11 (a), (b)はそれぞれ図-10中の実線、破線で囲んだ時間帯のベクトル図である。図-11(a)に示すように、スイープのモードでは水平風速が速くなっており、キャニオン内に強い循環が見られる。図-11(b)はキャニオン内から上昇流が発生する様子を捉えたものである。この上昇流は、キャノピー上空の水平風速が弱まったときに見られることが多く、キャニオン内にたまったトレーサー

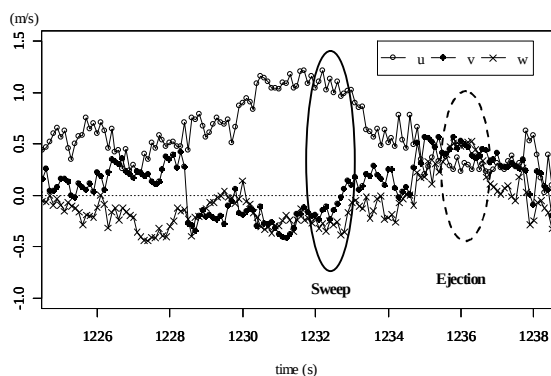


図-10 下降流，上昇流が見られる時間帯の風速変動

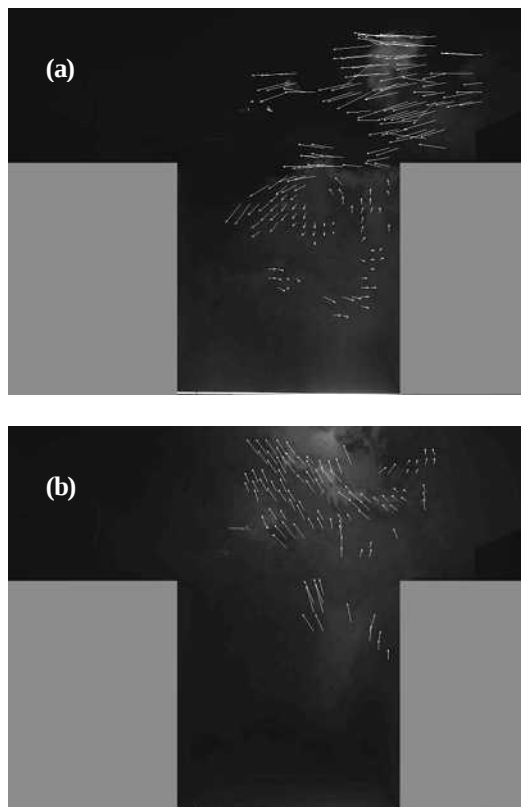


図-11 瞬間のベクトル図

を一掃するような数秒～10秒程度の継続時間を持つ現象であり、上空の大規模な乱流構造と関連していることが予想される（例えば、Kanda et al., 2004<sup>7)</sup>）。

## 4. 結論

屋外における大気乱流把握のためのPIV 計測システムを構築し、その計測実績を作った。PIV 計測の結果は、キャノピー上空で、超音波風速計の結果と比較して誤差10%以内であり精度は良好であった。また乱流統計量の空間分布が得られ、キャニオン上端部での盛んな運動量輸送を捉えることができた。さらに、キャノピー内の流体が一気に上空へ一掃されるような大規模で間欠性の強い乱流イベントが抽出された。データ取得率のさらなる向上は、今後の課題である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号：18360234），科学技術振興機構・戦略的創造研究（代表：神田学）による財政的援助を受けた。ここに合わせて謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 森脇 亮，神田 学，木本由花，2004：都市境界層における風速・温度のシア関数，水工論文集，48巻，139-144．
- 2) Hommema and Adrian, 2003：Packet structure of surface eddies in the atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology* Vol.106, pp.147-170.
- 3) 稲垣厚至，神田学，森脇亮，2006：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，水工論文集，51巻．
- 4) 加賀昭和，井上義雄，山口克人，1994：気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム，可視化情報，vol.14, pp.38-45.
- 5) Chen, J., Katz, J., 2005: Elimination of peak-locking error in PIV analysis using the correlation mapping method, *Meas. Sci. Technol.* Vol.16, pp.1605-1618.
- 6) Scarano, F., 2001: Iterative image deformation methods in PIV, *Meas. Sci. Technol.* Vol.13, pp.R1-R19.
- 7) Kanda et al., 2004: Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube array *Boundary-Layer Meteorology* Vol.112, pp.343-368.
- 8) Uehara et al., 2000: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons, *Atmos. Environ.* Vol.34, pp.1553-1562.

（2007.9.30受付）