

## 粒子画像流速測定法 (PIV) を用いた室内気流測定方法に関する基礎的研究 その3 風洞内における単純住宅通風モデルを対象とした気流分布の測定

### *Basic Study on the Measuring Method of the Indoor Air Flow by PIV Part3 Wind Tunnel Experiments about Cross Ventilation of Simple House Model*

正会員 ○大久保 肇<sup>1)</sup> 同 赤林 伸一<sup>2)</sup> 同 坂口 淳<sup>3)</sup> 同 富永 禎秀<sup>4)</sup>  
同 有波 裕貴<sup>1)</sup> 同 楊 曉韻<sup>1)</sup>

*OKUBO Hajime, AKABAYASHI Shin-ichi, SAKAGUCHI Jun, TOMINAGA Yoshihide  
ARINAMI Yuki, YANG Xiaoyun*

大型境界層風洞内において、PIVを用いて単純住宅通風モデルの測定を行い、縮尺模型内部及び周辺の非定常気流分布の可視化を行い、通風時における気流性状を把握し、定量的な流速ベクトルの測定を行う。各 case において、算出した風速ベクトル分布に違いがあり、開口部を風上・風下側に設けた場合は、測定対象内部ではほぼ左右対称の循環流が形成される。開口部を風向に対して左右に設けた場合は渦状の流れ場が形成される。いずれも、乱れの強さの変化は大きい。

**Keywords** *PIV, Wind Tunnel, Cross Ventilation of Simple House Model, Air Flow Distribution, Turbulence*  
PIV 風洞 単純住宅通風モデル 気流分布 乱れの強さ

#### 1 研究目的

流れの可視化は古来より流れの特性を直感的に把握する手法として様々な測定法が試みられている。近年の画像処理技術の発展及びPCの性能向上により、流れの可視化技術にデジタル画像処理技術を加えた粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: 以下 PIV) が実用化されている。PIVは従来の熱線風速計などによる計測と異なり、流れに対して非接触で多数の空間位置で同時に気流速度情報を得られる利点があるため、有力な流れの解析手法の一つとして考えられる。しかしながら、現在一般的に利用されている PIV システムは比較的狭い範囲 (300mm × 300mm 程度) を対象としており、実大の室内気流分布を PIV で実測した例はない。実大の室内空間の PIV 測定を可能にすることで、建物室内の床から天井までの連続的な気流分布を測定することができ、更に、室内での人体等の移動回りの風速分布の計測や、窓や扉が開閉する際の気流測定等も可能になると考えられる。既往の研究<sup>1)</sup> では、実大の室内空間を PIV で測定する基

礎段階として、600mm × 400mm × 400mm の縮尺室内模型を対象とした PIV 測定を行い、気流速度及び乱れの強さの分布を明らかにし、実大の室内空間を PIV 測定する際の問題点等の検討を行った。本報 (その1) では、大型境界層風洞内において、単純住宅通風モデルの測定を行い、模型内部及び模型周辺の非定常気流分布の可視化を行い、通風時における気流性状を把握し、定量的な流速ベクトルの測定を行うことを目的とする。

#### 2 測定概要

##### 2.1 可視化手法の概要

表1に実験装置の仕様を、図1に実験装置の概要 (水平断面測定時) を、図2に測定対象の設置条件を示す。測定は断面が 1800 mm × 1800 mm の大型境界層風洞内で行い、風洞内の風速は約 1.7 m/s に設定する。測定対象は単純住宅通風モデルとし、300 mm × 300 mm × 300 mm、開口部が 40 mm × 40 mm の立方体の縮尺模型を風洞内に設置して測定を行う。又、図2の測定対象の設置条件より、測定は縮尺模型の開口部を風上、風下側に対して設けた場合

- 1) 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生 1) Graduate Students, Division of Science and Technology, Graduate School of Niigata Univ.  
2) 新潟大学大学院自然科学研究科 教授 工学博士 2) Prof., Division of Science and Technology, Graduate School of Niigata Univ., Dr. Eng.  
3) 新潟県立大学国際地域学部国際地域学科教授 3) Prof., Faculty of International Studies and Regional Development, Department of  
博士 (工学) International Studies and Regional Development, University of Niigata Prefecture, Dr. Eng  
4) 新潟工科大学建築学科 教授 博士 (工学) 4) Prof., Department of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of  
Technology, Dr. Eng

(case 1, 2) 及び風向に対して左右に設けた場合 (case 3, 4) とする。本実験では、出力 2 W のレーザーと高速度 CCD カメラを使用する。2 W レーザーを側面から測定対象に照射し、上部から高速度カメラで水平断面を撮影する場合と、開口部が設けてある面が断面となるように三脚に取り付けたレーザーで上部から測定対象に照射し、側面から高速度カメラで垂直断面を撮影する場合の 2 つの条件で測定を行う。投入するトレーサ粒子には残存性の高い難燃性のスモークを使用し、ダクトを取り付けたスモークジェネレーターを風上側に測定対象から十分に離して設置し、風洞内を一様にシーディングする。

## 2.2 PIV 解析の概要

図 3 に本研究で使用した PIV 解析システムの概要を、表 2 に PIV 測定のパラメータを、表 4 に PIV の測定可能最大流速を示す。PIV 測定では、微細なトレーサ粒子を混入させた気流をレーザーなどの光源でシート状に照明し、高速度カメラで一連のトレーサ粒子の動きを撮影し、得られた可視化動画を画像解析プログラムで解析することで気流速度分布を算出する。本研究の PIV 解析では、異なる 2 時刻の画像間で、最初の時刻に取得した画像中の検査領域と最も濃度パターンの類似する領域を次の時刻の画像中の探査領域内から探し出し、流速ベクトルを算出する直接相互相関法を用いる。撮影した可視化動画を解析するための画像解析プログラムは FlowExpert

表 1 実験装置の仕様

Camera	ハイスピードデジタルCCDカメラK-2	
Laser	JLC DPGI-2 W	LD振起Nd:YAG/YVO <sub>4</sub> レーザー 波長532nm、出力2 W 0~30kHzで変調可能な連続光
Seeding	DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002	
Soft Ware	カメラ制御	Ditect k-II Soft Ware
	PIV解析	Flow-Expert ver1.11

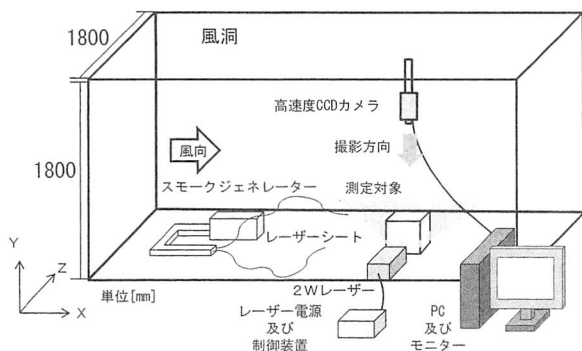
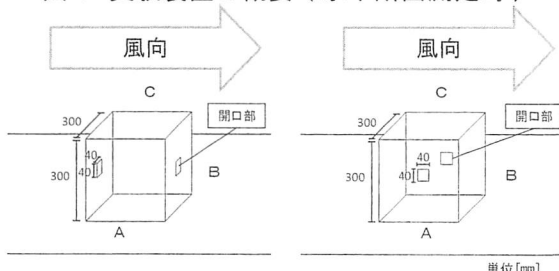


図 1 実験装置の概要 (水平断面測定時)



( a ) 開口部を風上・風下側に設けた場合 ( b ) 開口部を風向に対して左右に設けた場合

図 2 測定対象の設置条件

(ver. 1.11) を使用し、解析の際のパラメータである検査領域は  $\pm 23\text{pixel}$ 、探査範囲は測定可能最大流速との関係よりいずれの測定 case も  $\pm 10\text{pixel}$  と設定する。実際の長さとの画像上の長さとの換算値 (キャリブレーション値) は、case 1 及び case 3 は  $0.6699\text{mm/pixel}$ 、case 2 は  $0.7567\text{mm/pixel}$ 、case 4 は  $0.7454\text{mm/pixel}$  である。

## 3 測定結果

### 3.1 風速ベクトル分布

表 3 に各測定 case の位置条件を、図 4 に case 1 及び case 2 の PIV 測定結果を、図 6 に case 3 及び case 4 における PIV 測定結果を示す。

( 1 ) case 1 : 図 4 ( a ) に case 1 における平均風速ベクトル分布を示す。風上側から流れてきた空気が測定対象の開口部から内部に流入し、測定対象内部の流れ場の中心部で風速  $0.6\text{m/s}$  程度の比較的速い気流を生成する。又、風下側の開口部から排出されなかった空気が、測定対象の内壁に衝突し、壁面を沿って拡散し、測定対象内部の  $Y = 50\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 、 $250\text{mm} \sim 350\text{mm}$  にほぼ左右で対称の循環流を生じさせる様子が観察される。

( 2 ) case 2 : 図 4 ( b ) に case 2 における平均風速ベクトル分布を示す。風上側の  $X = 0\text{mm} \sim 200\text{mm}$  より、床面付近は床面の影響により比較的風速が遅く、床面から離れた中央部分の気流は風速が速いことが観察される。又、風上側から流れてきた気流が、測定対象の開口部から下降しながら流入し、測定対象内部に流れ場を形成する

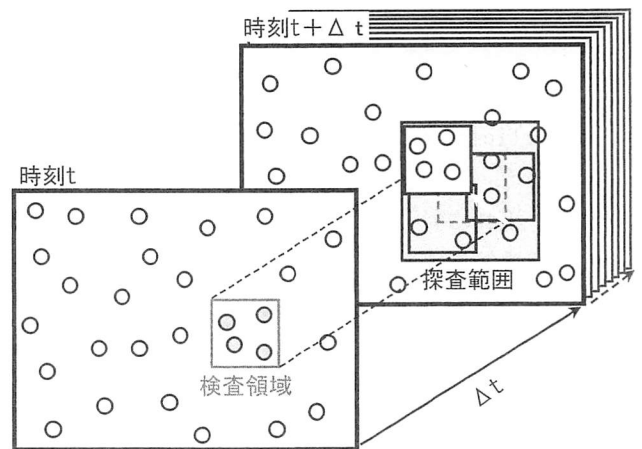


図 3 PIV 解析システムの概要

表 2 PIV 測定のパラメータ カメラ、レーザーの設置位置

画像サイズ	640pixel × 480pixel	測定 case	カメラ位置	レーザー位置	可視化断面
測定時間	24s	case 1	C	A	水平断面
測定間隔	5 ms (200fps)	case 2	A	B	垂直断面
検査領域	23pixel × 23pixel	case 3	C	A	水平断面
探査範囲	$\pm 10\text{pixel} \times \pm 10\text{pixel}$	case 4	B	A	垂直断面

表 4 PIV の測定可能最大流速

測定対象	フレームレート [fps]	キャリブレーション値 [mm/pixel]	測定可能最大流量 [m/s]			
			探査範囲 [pixel]			
			5	10	15	20
case 1	200	0.6699	0.67	1.34	2.01	2.68
case 2		0.7567	0.76	1.51	2.27	3.03
case 3		0.6699	0.67	1.34	2.01	2.68
case 4		0.7454	0.75	1.49	2.24	2.98

様子が観察される。これは接近流の境界層により上部の風速が速いことが原因と考えられる。又、流出口では、上向きのベクトルが観察される。

(3) case 3: 図6(a)に case 3における flame353/4800の風速ベクトル分布を、図6(c)に case 3における平均風速ベクトル分布を示す。測定対象内部で形成される流れ場は case 1と異なり、渦状の流れ場となる。又、開口部からの空気の流出入では、片側からの流入の方が多くみられる場合があり、測定に使用した縮尺模型の寸法精度や模型の配置等の影響があると考えられる。

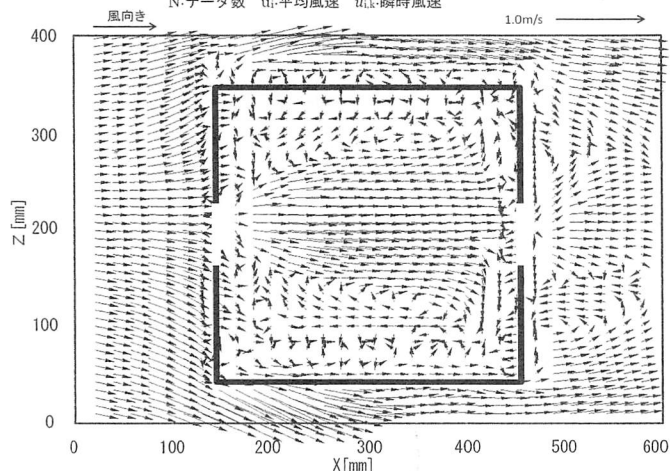
(4) case 4: 図6(b)に case 4における flame350/4800の風速ベクトル分布を、図6(d)に case 4における平均風速ベクトル分布を示す。撮影方向は風向に対して正対させており、算出された風速ベクトルは主流成分に直行する成分である。case 3と同様、空気の流入は X=450mmの外壁に設けられた片側の開口部からの流入が多く、もう一方の開口部からの流入はほとんどない。

### 3.2 乱れの強さ

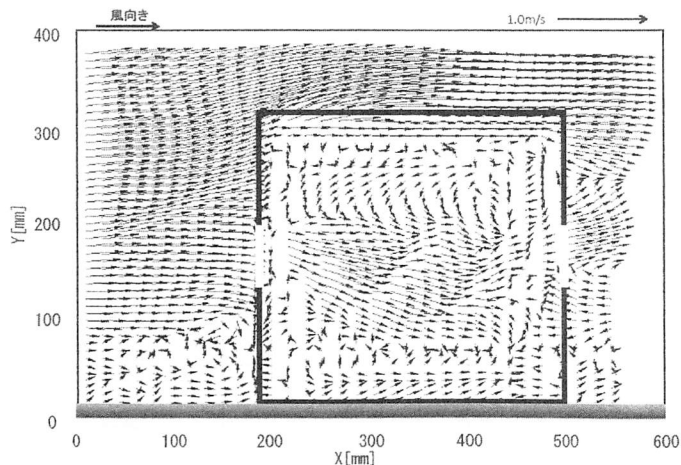
乱れの強さは、次式(1)で求められる。

$$u_{i,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\tilde{u}_{i,k} - u_i)^2}{N}} \div u_i \quad \dots (1)$$

i:測定位置 k:時刻  
N:データ数  $u_i$ :平均風速  $\tilde{u}_{i,k}$ :瞬時風速



(a) case 1における平均風速ベクトル分布



(b) case 2における平均風速ベクトル分布

図4 case 1及び case 2のPIV測定結果

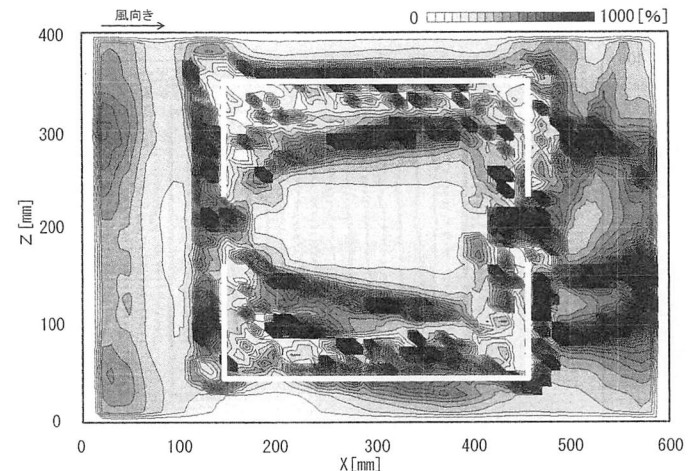
測定対象領域の全ベクトル算出点において、24秒分の計4800個のデータを使用する。

(1) case 1: 図5(a)に case 1における乱れの強さを示す。X=200mm~400mm、Y=150mm~250mmの流れ場の中心部となる箇所では、乱れが200%程度と比較的小さい。又、測定対象内部において循環流が形成される Y=50mm~150mm、250mm~350mmは、乱れの強さの変化が大きい。

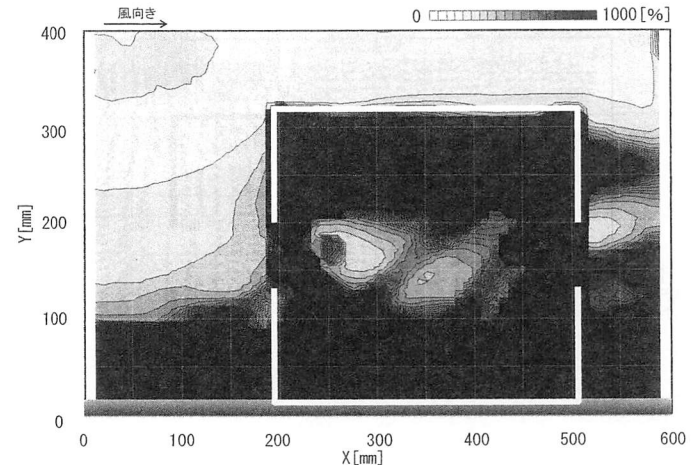
(2) case 2: 図5(b)に case 2における乱れの強さを示す。測定対象周辺の Y=100mm~400mmの風速が比較的速い領域では乱れが300%程度と小さく、X=0mm~200mm、Y=0mm~100mmの床面の影響を受ける領域では乱れが700%程度と大きくなる。

(3) case 3: 図7(a)に case 3における乱れの強さを示す。測定対象周辺の乱れの強さは case 1の結果と類似した分布となる。又、測定結果3.1(3)より測定対象内部には渦状の流れ場が形成されており、全体的に乱れの強さの変化が大きい。

(4) case 4: 図7(b)に case 4における乱れに強さを示す。他の case 同様、空気の流入がおこる開口部や測定対象内部で比較的風速が速い流れ場の中心部では、乱れは200%程度と小さい。

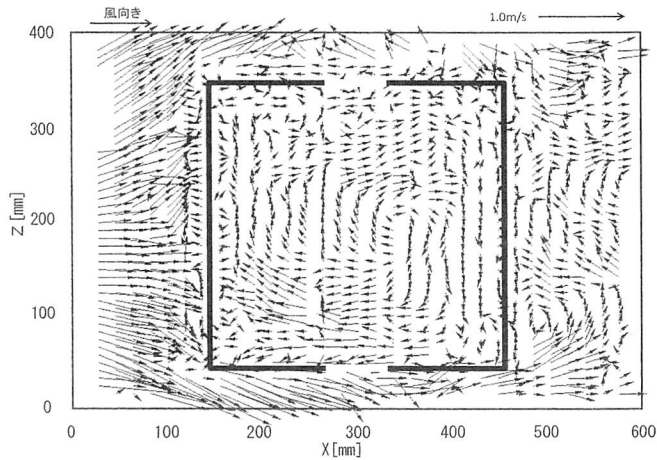


(a) case 1における乱れの強さ

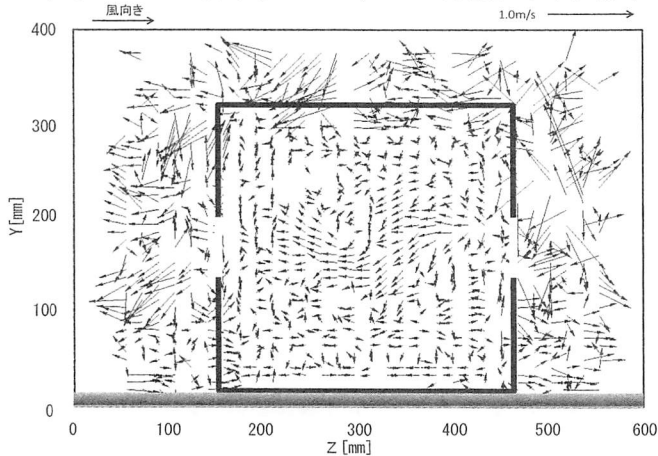


(b) case 2における乱れの強さ

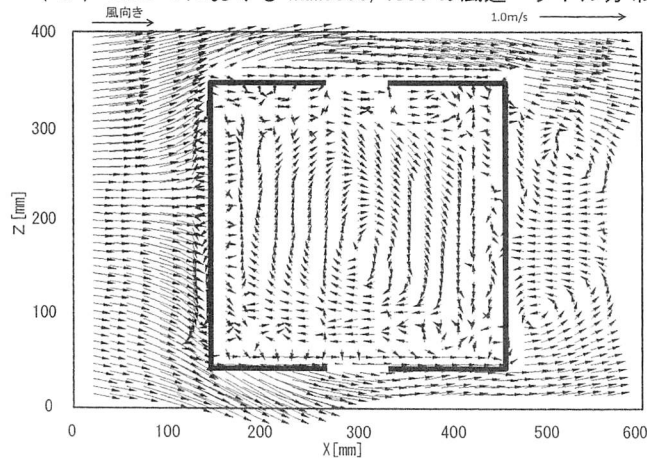
図5 case 1及び case 2の乱れの強さ



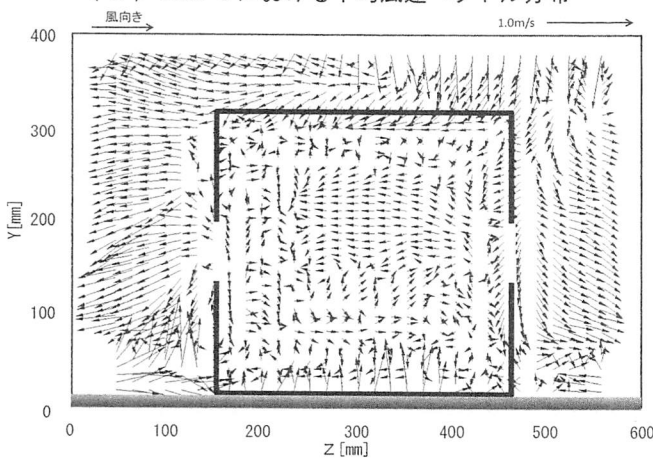
(a) case 3における flame353/4800 の風速ベクトル分布



(b) case 4における flame350/4800 の風速ベクトル分布



(c) case 3における平均風速ベクトル分布



(d) case 4における平均風速ベクトル分布

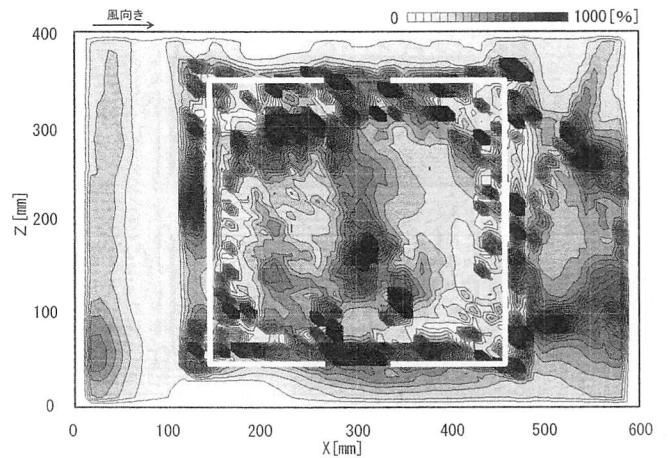
図6 case 3及びcase 4のPIV測定結果

#### 4 まとめ

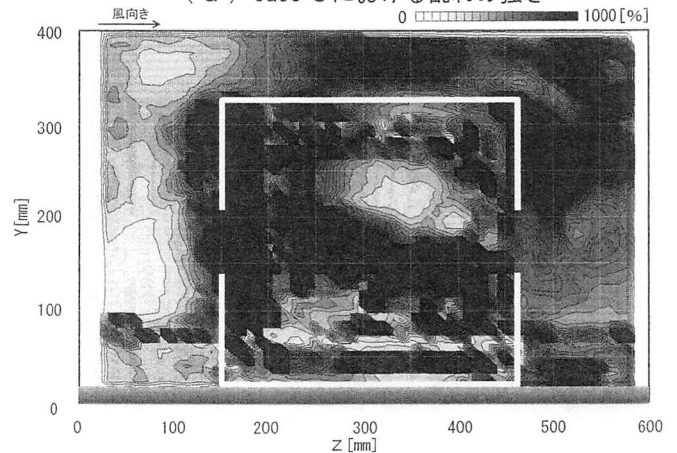
- ① case 1では、風上側からの空気が開口部から測定対象内部に流入し、測定対象内部の流れ場の中心部で風速0.6m/s程度の比較的速い気流を生成する。又、風下側の開口部から排出されなかった空気が、壁面を沿って拡散して、ほぼ左右対称の循環流を形成する。
- ② case 2では、床面付近は床面の影響により比較的風速が遅く、床面から離れた中央部分では空気は風速が速い。空気は、開口部からの流入時に下向きの流れが形成され、流出口では上向きとなる。
- ③ case 3では、測定対象周辺の風速分布はcase 1と殆ど変化はないが、測定対象内部に渦状の流れ場が形成される。
- ④ case 3及びcase 4において、片側の開口部に流入が偏るが、これは、測定対象である縮尺模型の寸法精度や模型の配置等の影響が考えられる。
- ⑤ どのcaseにおいても風速が比較的速い流れ場の中心部は乱れが小さくなる。又、case 1やcase 3などの測定対象内部の風速が遅い循環流では、乱れの強さの変化が大きい。

#### 【参考文献】

- 1) 赤林・坂口他「粒子画像流速測定法(PIV)を用いた室内気流測定法に関する基礎的研究 その1~2」日本建築学会北陸支部研究報告集、2011年
- 2) 可視化情報学会編：PIVハンドブック、森北出版株式会社、2002年



(a) case 3における乱れの強さ



(b) case 4における乱れの強さ

図7 case 3及びcase 4の乱れの強さ