# 室内気流模型を対象としたシーディング手法の検討及び測定結果 室内気流を対象とした PIV 計測に関する研究 その1

# AIR FLOW MEASUREMENTS IN A SCALE MODEL OF A ROOM AND METHOD SELECTION OF SEEDING WITH TRACER PARTICLES

Study on PIV Measurement and Analysis for Room Air Flow Distribution Part 1

# 赤林伸一<sup>·</sup>,大嶋拓也<sup>··</sup>,有波裕貴<sup>···</sup>,大久保肇<sup>···</sup>,楊暁韻<sup>···</sup>,坂口 淳<sup>····</sup> Shin-ichi AKABAYASHI,Takuya OSHIMA,Yuki ARINAMI, Hajime OKUBO,Xiaoyun YANG and Jun SAKAGUCHI

This paper describes particle image velocimetry (PIV) air flow measurements in a room model of scale 1:10; the model has inlets and outlets across its width. The PIV measurements use three types of tracer particles: water mist, oil mist, and metal powder. The air flow distribution and turbulence intensity are measured by PIV with metal powder tracers in four combinations of inlet and outlet positions.

The results are as follows;

- (1) Among the three tracer particles, metal powder yields the best air flow measurements in the 1:10-scale room model.
- (2) To obtain uniform luminance, an appropriate tracer particle concentration and increased laser output are required.
- (3) When the inlet and outlet are located midway across the scale model, the air flow velocity in the room in nearly symmetrical. In this case, air enters straight through the inlet, is sucked into the outlet, and is largely discharged. The air not discharged from the outlet collides with the side-wall of the outlet to forms a symmetrical vortex area.

Keywords: 2D2CPIV, Seeding, Model Experiment, Air Flow Distribution, Turbulence Intensity 2次元2成分PIV, シーディング,模型実験,気流分布,乱れの強さ

# 1.はじめに

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、画像処理技術の 発展及びパソコンの性能向上により、流れの可視化技術にデジタ ル画像処理技術を融合し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 は熱線風速計等に よる従来の風速測定と異なり、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が得られる利点があるため、従来の風速 計では測定が困難な流れ場に対して、有力な流れの解析手法の一つ として考えられている<sup>1)-2)</sup>。

図1にPIV測定の原理を、図2に直接相互相関法の概要<sup>注1)</sup>を示す。 PIV測定は、流れ場に微細なトレーサ粒子を混入させ、レーザなどの 光源をシート状に照射することで、2次元の流れの可視化を行う。可 視化した流れ場を対象に、トレーサ粒子の動きを高速度カメラで撮影 し、得られた連続した可視化画像をデジタル画像処理することで、気 流速度情報を算出する。直接相互相関法は、異なる2時刻の画像間で、

- 新潟大学大学院自然科学研究科 教授 工学博士
- " 新潟大学工学部建設学科 助教 博士(環境学)
- … 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生
- \*\*\*\* 新潟県立大学国際地域学部国際地域学科 教授 博士(工学)

初め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 る領域を次時刻の画像中の探査範囲内から探し出し、風速ベクトル を算出する手法であり、現在のPIV測定の主要な処理法の一つである。 現在一般的に利用されているPIVシステムは、比較的狭い範囲を



Prof., Division of Science and Technology, Graduate School of Niigata Univ, Dr. Eng. Research Assoc, Faculty of Engineering Niigata University, Ph D. Environmental Science Graduate Students, Division of Science and Technology, Graduate School of Niigata Univ. Prof., Faculty of International Studies and Regional Development, Department of International Studies and Regional Development, University of Niigata Prefecture, Dr. Eng. 対象としており<sup>3)~12</sup>、実大の室内気流分布を PIV で実測した例はな い。PIV による実際の建物空間を対象にした測定が可能になれば、建 物室内の床から天井までの気流分布において空間的・時系列的にシー ムレスなデータを得ることができる。更に、室内での人体等の移動 体周りの気流分布の計測や、窓や扉が開閉する際の変動気流の測定 等も可能になると考えられる。

建築分野におけるレーザを用いた流れの可視化に関する研究は、 1985年に村上、加藤、赤林<sup>3)</sup>によって出力4Wのアルゴンイオンレー ザを用いて行われたのが最初である。その後2001年頃からPIVを用 いた研究が行われ、建築環境系分野の研究では朱、林、加藤、村上 ら<sup>4)</sup>がチャンバー内にサーマルマネキンを設置しPIV測定により人 体呼吸域の流れ場を明らかにしている。山中、甲谷ら<sup>5)~7)</sup>は風洞実 験により通風量の解析及び建物周りの気流分布の解析を行っている。 近藤ら<sup>8)~10)</sup>は空調機吹出口周辺の気流分布等の測定を行っている。 また建築構造系分野では吉川ら<sup>11)</sup>、喜々津ら<sup>12)</sup>は三次元柱周りの流 れ場をPIVを用いて解析している。

本論文では、従来使用されている PIV の測定範囲(300m × 300m 程度)から実大室内空間へと測定範囲を拡張するための基礎段階<sup>(1)</sup> <sup>- '2)</sup>として可視化方法及び撮影条件の検討を行う。測定対象は大きさ が 600mm × 400mm で同一面上に給気口及び排気口を持つ典 型的な縮尺室内模型とし、PIV 測定により模型内部の気流分布を明ら かにする。PIV 測定では、良好なトレーサ粒子の動きを捉えた連続し た可視化画像を取得することが極めて重要な条件である。このため







本論文では、実大室内空間を対象とした PIV 測定を想定し、トレーサ 粒子の選択及びシーディング手法を検討し、実大室内空間における PIV 測定に関する課題を明らかにすることを目的とする。PIV 測定はレーザ 出力、高速度カメラ分解能、撮影速度、シーディング方法等のそれぞ れについて最適化が必要である。本論文で得た PIV 測定に関する課題 は限られたレーザ出力、高速度カメラで行っているものであるが、通 常の模型実験や実大実験も同様の課題が発生すると考えている。本論 文はそれぞれの実験対象に共通する基礎資料になると考えられる。

# 2. 縮尺室内模型を対象としたシーディング手法の検討(実験)

#### 2.1 測定対象の概要

図3に縮尺室内模型の詳細を、図4に実験装置の概要を示す。室内 模型は、厚さ8mmのアクリル板<sup>注2)</sup>で作成されており、寸法は600mm × 400mm × 400mm、両側面には40mm × 40mmの給気口と排気口がそれ ぞれ3ヶ所設置されている。給気口及び排気口はそれぞれ模型上部 から給気口A、B、C、排気口D、E、Fとし、PIV測定のための撮 影条件に関する検討では、給気口はB、排気口はEとして実験を行う。 室内模型は、給気口及び排気口が設置された典型的な室内を再現し た縮尺 1/10のモデルであり、室内において風速が速い部分と循環流 が形成されることを意図して作成した。給気ダクト内には、ハニカ ムメッシュで作成された整流板と絞り及びDCファンを設置し、模型 内部に整流した空気を送風する。給気口からの風速の調整はDCファ ンに接続するDC電源の電圧を調整して行う。

表1 実験機器の詳細

Camera	ハイスピードCCDカメラK-I (640pixel×480pixel, 200fps)				
	DPGL-2 W	LD励起Nd:YAG/YVO₄レーザ			
		波長532nm,出力2W			
Looor		O~30kHzで変調可能な連続光			
Laser	G1000	LD励起Nd:YAG/YVO₄レーザ			
		波長532nm,出力1W			
		O~10kHzで変調可能な連続光			
SoftWare	カメラ制御	Ditect K-II ソフトウェア			
	PIV解析	Flow-Expert ver1.12			

表2 PIV の測定可能最大風速

<b>7</b> 1. / 1. k	渔中围宿	測定可能最大風速[m/s]				
JU-AU-F	/則に同陋 「ms]	探査範囲[pixel]				
	2	5	10	15	20	
50	20	0. 23	0.47	0.70	0.94	
100	10	0.47	0.94	1.40	1.87	
200	5	0.94	1.87	2.81	3.74	

表 3 各測定 case における PIV 測定のパラメ
------------------------------

	case1-1	case1-2	case1-3	
測定対象領域	600mm × 400mm			
画像サイズ	640pixel×480pixel			
撮影時間	10sec			
撮影間隔	5 ms (200fps)			
検査領域	33pixel×33pixel			
探査範囲	±10pixel	±20pixel	±10pixel	

表4 各測定 case の実験条件

測定case	トレーサ	レーザ出力	給気口中央の設定風速
case1-1	スモーク		1.5m/s
case1-2	液体窒素	1 W + 2 W	3.Om/s
case1-3	金属パウダー		1.5m/s

#### 2.2 実験機器の概要

表1に実験機器の詳細を示す。レーザ<sup>注3)</sup>は出力1Wと2Wの2 台を同時に使用する。出力2Wのレーザを可視化測定領域全体に照 射し、レーザシートの端部では相対的に暗くなるため、出力1Wの レーザを比較的粒子密度の濃い給気口付近に照射することで、可視 化測定領域全体を均一に可視化する<sup>注4)</sup>。高速度カメラ<sup>注5)</sup>はハイス ピード CCD カメラ K- を、得られた連続した可視化画像の解析には Flow-Expert ver1.12を使用する。

#### 2.3 解析条件

表 2 に PIV の測定可能最大風速を、表 3 に各測定 case における PIV 測定のパラメータを示す。本論文の PIV 測定は直接相互相関法を 用いる。実際の長さと画像上の長さとの換算値であるキャリプレー ション値は 0.94mm/pixel であり、探査範囲と撮影間隔から表 2 に示 す高速度カメラのフレームレート、探査範囲、測定可能最大風速の関 係を算出する。更に、熱線風速計<sup>注6)</sup>で給気口付近の風速を計測し、 高速度カメラと PIV 測定の最適な測定パラメータを決定する。実験 では、各測定 case で最大風速が異なるため、探査範囲を 10pixel ~ 20pixel までとし、それぞれの最大風速に合わせて探査範囲を設定す る。高速度カメラは 200fps に設定し、1 回の撮影時間は 10 秒とする。 2.4 実験条件

表4に各測定 case の実験条件を示す。本実験では、トレーサに難 燃性のスモーク(DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002、粒径:数10 µm)、 液体窒素と熱湯を混合して得られる水ミスト(粒径:数10 µm)、極 薄鱗片状の金属パウダー<sup>注7)</sup>(薄さ12 µm、粒度44 µm以下が85% 以上、88 µm以下が95%以上)の3種類を使用し、それぞれのト レーサとしての特性及び実用性等について検討する。スモーク、液 体窒素による水ミストを用いたシーディング(シーディングとはト レーサを発生させ、流れ場へトレーサを供給することをいう)は給 気用ダクトから流入させ、金属パウダーを用いたシーディングでは、 給気用ダクト内に設置した金属パウダー使給装置を使用する。金属 パウダーを用いた実験ではリターン用フレキシブルダクトを設置し、 排気口から排出された気流を再び給気口へ戻し、トレーサを循環さ せている。実験時の給気風速は、良好な連続した可視化画像を得る ために液体窒素によるミストの測定では風速3.0m/s、スモーク及び 金属パウダーの測定では風速1.5m/s に設定する。

本実験では縮尺室内模型中心断面の2次元2成分のPIV測定を行っ ている。模型実験では流れの3次元構造についての検討が必要になる が、対象の縮尺室内模型は給排気口が同一平面に設置された比較的単 純な形状であるため、2次元2成分PIV測定でシーディング手法の検 討を行っている。

# 2.5 平均風速ベクトルの測定結果

図5 に各測定 case における平均風速ベクトル分布(給気口B、排 気口E)を、図6に各測定 case におけるスカラー風速分布(給気口B、 排気口E)を示す。

# (1) case1-1: スモークを使用した場合

スモークを使用した場合では、PIV 測定による最大風速は、流れ場 の主流部分である X が 400 ~ 475mm において約 1.2m/s である。又、 X が 0 ~ 200mm において上下対称の位置に渦やベクトルが観察され、 渦の発生領域や対象空間全体の気流性状については概ね正しく測定が できていると考えられる。一方、給気口直後の領域では熱線風速計で の測定風速(1.5m/s)と一致しない傾向にある。

(2) case1-2:液体窒素によるミストを使用した場合

液体窒素によるミストを使用した場合では、Xが0~200mm、Yが 0~100mmの位置に渦が観察されるが、上下対称の位置に渦やベク トルが算出されていない。又、PIV測定による最大風速は、流れ場の 主流部分であるXが300~400mmにおいて約2.1m/sとなる。給気口 直後の算出結果は、熱線風速計での測定風速(3.0m/s)より遅い風速



図 5 各測定 case における平均風速ベクトル分布 (給気口 B、 排気口 E )

## 約0.6m/sとして算出されている。

### (3) case1-3:金属パウダーを使用した場合

金属パウダーを使用した場合では噴流の中心軸に対して対称な流れ 場が算出される。又、PIV測定による最大風速は、給気口直後におい て約1.3m/s であり、全 case で最も給気口直後の測定風速(1.5m/s)







に近い値が算出される。

(4) 各測定 case の平均風速ベクトル分布

出力1Wと2Wの2台のレーザを使用することで可視化測定領域 を均一に可視化することができ、どのトレーサを用いた場合におい ても測定対象領域全体で風速ベクトルを算出することが可能である。 しかし、スモークと液体窒素を用いた場合(case1-1、case1-2)で は、PIV測定による給気口直後のベクトル算出点での風速は熱線風速 計での測定風速(case1-1:1.5m/s、case1-2:3.0m/s)と比較して 極端に遅い風速が算出されている。給気口直後のPIV測定が熱線風 速計の結果と異なる理由はスモーク(case1-1)や液体窒素(case1-2)は金属パウダー(case1-3)を用いたシーディングと比較して給気 口直後ではシーディングの粒子密度が高く、PIV測定(直接相互相関 法)に適した濃淡画像が得られていないことが原因と考えられる。又、 スモーク(case1-1)や金属パウダー(case1-3)を用いた場合に測 定対象領域全体の気流性状を測定できているが、後者ではXが0~ 200mmで観察される渦の大きさに関しても上下対称であり、より正し い測定ができていると考えられる。

以上の結果より、今回使用した実験装置を用いて縮尺室内模型を 対象とした PIV 測定を行う場合、金属パウダーをトレーサとして使 用することが最適であると考えられる。

## 3.開口位置を変化させた場合の PIV 測定(実験)

実験 では、縮尺室内模型における PIV 測定のための連続した可 視化画像取得条件とシーディング方法について明らかにした。実験

では、実験の結果を用いて、給気口と排気口の位置を変化させ、 PIV 測定により模型室内の気流分布を明らかにする。更に、実大室内 空間の PIV 測定の際の課題について明らかにする。

# 3.1 実験条件

表5 に開口位置を変化させた場合の PIV 測定のパラメータを、表6 に各測定 case における給気口と排気口の位置を示す。測定対象には、実験 と同様の縮尺室内模型を使用する。実験 では実験 の結果よりトレーサは極薄鱗片状の金属パウダーを使用し、給気ダクト内に設置した金属パウダー供給装置を使用してシーディングを行う。出力2 Wのレーザを可視化領域全体に照射し、出力1 Wのレーザを給気口付近に照射する。実験 では、表6 に示す給気口と排気口の位置をそれぞれ変化させ、合計4 case の実験を行う。高速度カメラのフレームレートは200 fps に設定し、10 秒間の撮影を行う。給気口の直後の風速は熱線風速計で測定し、全ての測定 case において給気口直後の風速が1.5m/s 程度となるよう DC ファンを調整する。3.2 誤ベクトル率

表7に各測定caseの誤ベクトル率[%]を示す。誤ベクトル率<sup>注8)</sup>は、 10秒間の撮影における連続した可視化画像のPIV測定より得られた ベクトル数から誤ベクトル削除後のベクトル数を引いたものを、誤ベ クトル削除前のベクトル数で除して求める。算出式は以下となる。

$$R_{ev} = (N_{db} - N_{da})/N_{db} = N_{ev}/N_{db} \qquad \cdots \qquad (1)$$

ここで、 R<sub>ev</sub>: 誤ベクトル率[%] N<sub>db</sub>: 削除前の算出されたベクトル数[-] N<sub>da</sub>: 削除後の算出されたベクトル数[-] N<sub>ev</sub>: 誤ベクトル数[-] 算出の結果、実験 ではどの測定 case においても誤べクトル率は 3.00%以下である。

#### 3.3 平均風速ベクトルの測定結果

図7に各測定 case における平均風速ベクトル分布を、図8に各 測定 case におけるスカラー風速分布を示す。

# (1) case2-1: 給気口 B、排気口 E

給気口の中心高さであるYが 200mm を軸として、ほぼ上下対称の 風速ベクトルとなる。給気口Bから流入した気流は、拡散しなが ら排気口Eに向かう。給気口直後での風速は約1.3m/s であり、排 気口に近づくにつれて徐々に風速は遅くなり、排気口付近では約 0.5m/s となる。給気口からの噴流は幅が広くなり、直接排気口で 吸いこまれない気流は排気口の上部と下部の模型壁面へ衝突し、X が100mm、Yが50mmの位置及びXが100mm、Yが350mmの位置を中 心とした対称の渦を形成する。この測定 case での誤ベクトル率は 0.04%である。

#### (2) case2-2: 給気口B、排気口D

給気口 Bより流入した気流は、拡散しながら排気口壁面へ直進する。 壁面に衝突した気流は、Xが0~200mm、Yが0~100mm 付近の位置で、 case2-1と同様の渦を形成しているが、Xが0~200mm、Yが300~ 400mm 付近の位置では、case2-1と異なり渦は形成されず、気流は排 気口に誘引される風速ベクトルを示している。PIV 測定による最大風 速は、流れ場の主流部分であるXが425~525mm において約1.1m/s である。この測定 case での誤ベクトル率は2.69%である。

# (3) case2-3: 給気口A、排気口D

給気口Aより流入した気流は、ほとんど拡散することなく排気口D へ直進する。排気口から吸い込まれなかった気流により、排気口側の 壁面に沿って風速約0.1m/sの下降気流が生じている。Xが100mm、Y が75mmの位置において渦を形成し、Xが100~300mm付近の模型底面 より斜め上向きの気流性状となっている。PIV測定による最大風速は、 給気口付近であるXが350~450mm、Yが350~400mmにおいて約0.9m/ sとなる。この測定 case での誤ベクトル率は1.28%である。

#### (4) case2-4: 給気口C、排気口D

給気口 C より流入した気流は、徐々に風速が低下し模型底部から 排気口側壁面に沿って排気口 D に向かう。X が 50 ~ 600mm、Y が 50 ~ 400mm の範囲の風速は 0.1 ~ 0.5m/s 程度であり、模型全体に広がっ ている大きな循環流を形成している。この測定 case での誤ベクトル 率は 1.64%である。

## 表 5 開口位置を変化させた場合の 表 6 各測定 case における PIV 測定のパラメータ 給気口と排気口の位置

測定対象領域	600mm × 400mm		給気口	排気口	給気口の 設定風速
画像サイズ	640pixel×480pixel	00002-1		-	政定域还
·년 명시 마는 8명	10222	Casez-1	Ь	E	
<b>坂</b> 前	TUSEC	case2-2	в	D	
撮影間隔	5 ms(200fps)	case2-3	A	D	1.5m/s
検査領域	23pixel×23pixel	case2-4	С	D	
探査範囲	$\pm 10$ pixel × $\pm 10$ pixel				

#### 表7 各測定 case における誤ベクトル率 [%]

	case2-1	case2-2	case2-3	case2-4
削除前ベクトル数	2019635	2004202	2007342	2015445
削除誤ベクトル数	2018869	1950201	1981581	1982376
誤ベクトル率[%]	0.04	2.69	1.28	1.64







3.4 PIV 測定結果と CFD 解析結果の比較

図9に case2-1(給気口B、排気口E)におけるCFD 解析結果<sup>注9)</sup> を示す。PIV 測定結果とCFD 解析結果を比較すると、給気口からの吹 出気流の拡散状況及びXが50~150mmにおいて観察される渦の位置 は概ね対応し、模型内の気流性状は一致している。しかし、PIV 測定 の給気口及び排気口直近のスカラー風速はCFD 解析結果と比較して低 い傾向がある。本論文のPIV 測定では、PIV 解析領域は模型壁面に設 定している。給気口及び排気口は解析領域と重なるため、この部分の PIV 測定結果については測定精度が低い結果となっている。PIV 測定 の解析領域について、今後、引き続き検討を行う予定である。

4.まとめ

本論文により得られた知見と実スケールの室内空間を対象とした PIV測定における課題を以下に示す。

- 4.1 縮尺室内模型の撮影条件の検討(実験)
- ①スモークや液体窒素による水ミストは粒子密度が高いため、給気 口付近でのベクトルや、レーザ装置から離れた可視化領域深部での風速ベクトルが正しく算出されない傾向がある。

②トレーサに極薄鱗片状の金属パウダーを用いた場合、スモークや液体窒素に比べ、特に給気口直後で良い結果を得ることができる。

- ③給気口で設定した最大風速が速い場合、気流の流入風速を正確 に測定することは困難であるが、どのトレーサを用いた場合でも 流れ場の主流部分では比較的速い風速ベクトルを算出できる。
- ④本論文で用いた実験装置で縮尺室内模型内部の領域全体を PIV 測定

するためには、対象領域の最大風速が1.5m/s 程度の場合では、ト レーサ<sup>注10)</sup>には金属パウダーを用いるのが適当である。

4.2 開口位置を変化させた場合の PIV 測定(実験)

case2-1 は、給気口 B の中心高さである Y が 200mm を軸として、 ほぼ上下対称の風速ベクトルとなる。模型内部に流入した気流は、 排気口 E に近づくにつれて徐々に風速が遅くなり、排気口付近では 約 0.5m/s となる。直接排気口で吸いこまれなかった気流は排気口 の上部と下部の模型壁面へ衝突し、X が 100mm、Y が 50mm の位置 及びX が 100mm、Y が 350mm の位置を中心とした対称の渦を形成する。 case2-2 では、給気口 B より流入した気流は拡散しながら排気口 壁面へ直進する。X が 0 ~ 200mm、Y が 0 ~ 100mm 付近の位置で、 case2-1 と同様の渦を形成しているが、X が 0 ~ 200mm、Y が 300 ~ 400 mm付近の位置では、case2-1 と異なり渦は形成されない。

case2-3 は、給気口Aより流入した気流は、殆ど拡散することなく 排気口Dへ直進する。排気口から吸い込まれなかった気流により、 排気口側の壁面に沿って風速約0.1m/sの下降気流が生じる。Xが 100mm、Yが75mmの位置において渦を形成し、Xが100~300mm付 近の模型底面より斜め上向きの気流性状となっている。

case2-4 では、給気口 C より流入した気流は、徐々に風速が低下 し模型底部から排気口側壁面に沿って排気口 D へと向かう。 X が 50 ~ 600mm、 Y が 50 ~ 400mm の範囲の風速は 0.1 ~ 0.5m/s 程度 であり、模型全体に広がる大きな循環流を形成する。

本論文の実験条件におけるレーザ出力、高速度カメラ分解能、撮影 速度では、全ての測定 case において、金属パウダーをトレーサに使 用した場合に良好な測定結果を得られている。しかし、金属粉末を用 いて実大室内空間の PIV 測定を行う場合、実験環境の汚染や人体への 影響等の課題があり実用性に欠けることが考えられる。より高性能な 実験装置の使用等を含めて、実大室内空間での PIV 測定条件について 引き続き検討を継続している。

尚、本論文の図5、6、7、8に関連する連続した可視化画像及び 測定結果の連続したベクトル画像は本稿末尾に記載する URL から参照 することができる。更に、時系列データから算出した各測定 case に おける乱れの強さの分布を参考資料として本稿末尾に記載する。

#### 注

- 注1)本実験で使用した画像は8bitの階調を持った濃淡画像である。
- 注 2) 本実験で使用した縮尺室内模型は厚さ 5 mm の透明なアクリル板で製作し た。レーザー光を入射させる面以外の模型内部の壁面は黒色のウールペー パーで覆い、可視化測定領域に対するアクリル内壁面での二次元的なレーザ 光の反射を低減させている。
- 注3)本実験で使用する可視化用レーザは連続光で照射する。
- 注4)2台のレーザを用いることにより、レーザ光の境界ライン上における輝度 値の変化による誤ベクトルの増加や、2台のレーザ光源による干渉縞の発生 等が懸念されたが、本実験ではそのような現象は観察されていない。
- 注5)高速度カメラの露光時間は5 ms である。本実験では連続光レーザを使用 しているため、カメラの露光時間中に、撮影画像内における粒子像は風速 1.5m/sの所では8pixel、風速3.0m/sの所では16pixel 程度の流跡線状に変 形して撮影されている。しかし、撮影画像を観察すると、粒子の分布が存在 しており、流跡線状に変形した粒子像も流れ場に沿って移動して観察され、 測定結果への影響は少ないと考えている。この点は連続光レーザを用いた PIV 測定の特徴であるため、今後、高速度カメラの性能を向上させ、撮影対象に対 するより適切なフレームレート及び露光時間について検討を行う予定である。
- 注6)本実験で使用した熱線風速計は(株)芝浦電子製 PA1616 のサーミスタ 風速計であり、シーディングされた室内模型内で使用することは困難なため PIV 測定との同時測定は行っていない。

- 注7)本実験でトレーサに使用した金属パウダーは、極薄鱗片状の金属パウダー (材質:アルミニウム)である。金属パウダー一片当たりの重量は6.27× 10<sup>\*</sup>g程度であり、一般的に PIV でトレーサとして用いられている難燃性スモー クの粒子重量は3.02×10<sup>\*</sup>g程度のため、金属パウダーを用いることによる重 力沈降の影響は難燃性のスモークとほぼ同様であると考えられる。
- 注8)本論文での誤ベクトルの判定は、直接相互相関法を用いて PIV 測定を行う 際に算出される相関係数により判定する。その際、判定基準である相関係数 閾値は0.3である。
- 注9)表8にCFDの解析条件を示す。

		表8 CFDの解	析条件	
乱流モデル		標準k-ε モデル(等温)		
数値解析領域メッシュ数		$40(x) \times 27(y) \times 29(z)$		
	流速	QUICK		
移流項精度	乱流エネルギー	QUICK		
	乱流散逸率		QUICK	
給気口及び排気口寸法		開口面積:0.0016[m <sup>2</sup> ]、開口幅 D:0.04[m <sup>2</sup> ]		
境界条件	流入境界	流入量 <i>Q<sub>in</sub></i> [m³/s]	<i>Q<sub>in</sub></i> = 0.0024 流速 <i>U<sub>in</sub></i> =1.5[m∕s]	
		乱流エネルギ <del>ー</del> k <sub>in</sub> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$k_{in} = \frac{{U_{in}}^2}{100}$ (管内乱流の経験式より)	
		乱流散逸率 ε <sub>in</sub> [m²/s³]	$\varepsilon_{in} = 0.09^{\frac{3}{4}} \frac{k_{in}^{\frac{3}{2}}}{0.07D}$ (管内乱流の経験式より)	
	流出境界	表面圧力境界条件(相対圧力P=0.0[Pa])		
	壁面境界		対数則	

注10)本実験では各トレーサを試用する際、粒子密度等を調整する目的でそ れぞれのトレーサにおいて発生量や発生間隔など調整し、様々な試行錯誤を 繰り返した。

#### 参考文献

- 1) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版株式会社, pp.1-3, 2002.7
- 2) 可視化情報学会編:可視化情報ライブラリー4 PIV と画像解析技術,朝 倉書店,2004.6
- 3) 村上周三,加藤信介,赤林伸一:レーザライトシート (LLS)を用いた乱流の微細構造の可視化システムに関する開発研究風洞内における建物周辺気流の可視化を中心として,流れの可視化,5巻,18号,pp.213-218,1985.7
- 4) 朱晟偉,林立也,加藤信介,村上周三:可視化実験と数値解析による静穏 室内の人体呼吸域流れ性状の検討,日本建築学会環境系論文集,第583号, pp.37-42,2004.9
- 5) 山中俊夫,甲谷寿史,加藤正宏:単一開口を持つ室の風力現象に関する研究 その4 PIVによる単一開口部における気流性状の把握,日本建築学会大 会学術講演梗概集,D-2,pp.669-670,2002.8
- 6) 甲谷寿史,相良和伸,山中俊夫,小林知広,塩崎康弘:PIV による通風時の建物周辺の気流場解析,可視化情報学会誌,vol29,No. 112, pp. 18-24, 2009.1
- 7) 有森輝紀,甲谷寿史,山中俊夫,桃井良尚,相良和伸,宮原治:屋上設 置物の配置計画のための屋上近傍気流場に関する研究 その3 PIV 測定 による剥離気流性状に関する検討,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2, pp.889-892,2011.8
- 近藤靖史,中島裕史:移動物体による室内気流場への影響に関する実験と CFD 解析,日本建築学会環境系論文集,第681号,pp.863-871,2012.11
- 9) 茨城行史,中島裕史,近藤靖史:室内における移動物体周辺の気流性状に 関する実験と CFD 解析 その3 PIV による測定とその精度の検討,日本 建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.813-814,2011.8
- 10) 中島裕史,茨城行史,近藤靖史:PIVによる吹出口周辺の気流分布測定と その精度の検証,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp877-880,2011.8
- 11) 吉川清峰,奥田泰雄,伊藤真二,大橋征幹,佐々木康人: PIV を用いた流 れの可視化と風圧の同時測定による細長い三次元柱周りの流れと空気力に 関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 573 号,pp. 53-60, 2003.11
- 12) 喜々津仁密,奥田泰雄,大橋征幹,神田順:PIV 測定結果に基づく相互作 用現象の実験的評価:後流域との相互作用を考慮した三次元角柱の振動発 生機構に関する基礎的研究(その1),日本建築学会構造系論文集,第612 号,pp.31-38,2007.2
- 13) 大久保肇,赤林伸一,坂口淳,富永禎秀,富永誠子,有波裕貴,楊暁韻: 粒子画像流速測定法(PIV)を用いた室内気流測定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, 日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.617-618,2012.9
- 14) 楊暁韻,赤林伸一,坂口淳,有波裕貴,大久保肇,富岡誠子:粒子画像流 速測定法 (PIV) を用いた室内気流測定に関する基礎的研究 その4 扇風機

を対象とした実測,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.619-620,2012.9

15) 富岡誠子,赤林伸一,坂口淳,大久保肇,有波裕貴,楊暁韻:粒子画像流 速測定法(PIV)を用いた室内気流測定に関する基礎的研究 その5 実大 室内空間における天井埋め込み型空調機を対象とした実測,日本建築学会 大会学術講演梗概集,D-2,pp.621-622,2012.9

本論文に関連した既発表文献

- \*1) 赤林伸一,坂口淳,角間隆之,有波裕貴,楊暁韻:粒子画像流速測定法 (PIV)を用いた室内気流測定に関する基礎的研究 その1 シーディング 手法の検討,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.881-884,2011.8
- \*2) 角間隆之,赤林伸一,坂口淳,有波裕貴,楊暁韻:粒子画像流速測定法 (PIV)を用いた室内気流測定に関する基礎的研究 その2 開口位置を変 化させた場合のPIV測定,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.885-888,2011.8

本論文に関連した連続する可視化画像及び測定結果の連続したベクトル画像のURL http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/dougainfo/piv2013\_1/piv2013\_1.html http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/(新潟大学赤林研究室ホームページのURL) 赤林研究室ホームページの中段右側の論文関連可視化画像からも参照できる。

## 参考資料

乱れの強さは、乱流の持つ乱れのエネルギーを表す尺度であり、 時系列データの統計処理から求める。本実験では、測定対象領域全 てのベクトル算出点において、200fps で 10 秒間の計 2000 個の各測 定位置毎の2次元瞬時風速データを使用し、そのデータを各測定位 置毎に平均速度成分で除することにより、平均速度成分に対する乱 れの強さを測定位置毎に求める。(2)式に算出式を示す。

ここで、*i*:測定位置 [-]、*k*:時刻 [s]、*N*:データ数 [-]、 *u<sub>i</sub>*:平均風速 [m/s]、*ũ<sub>i k</sub>*:瞬時風速 [m/s]



図 10 各測定 case における乱れの強さの分布