

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

楊 曉韻

指導教員 赤林 伸一教授

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、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る。

図 1 に PIV 測定の原理を、図 2 に直接相互相関法の概要を示す。PIV 測定は、流れ場に微細なトレーサ粒子を混入させ、レーザー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 CCD カメラで撮影し、得られた可視化動画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、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時刻の画像中の探索領域内から探し出し、流速ベクトルを算出する手法であり、PIV 解析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、機械工学の分野で比較的狭い範囲（30cm

× 30cm 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。PIV による実大の建物空間を対象と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を空間的・時系列的にシームレスなデータが得ることができる。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変動気流の測定等も可能になると考えられる。

本研究では、実大室内空間を PIV で測定する基礎段階として、縮尺 1/10 の模型を対象として、給気口と排気口の位置を変化させた場合の室内を対象とした PIV 測定を行い、気流分布を明らかにする。又、近年注目を集めている無翼型扇風機は回転翼や大口径の吹出口等が存在しないにも関わらず、従来の有翼型扇風機と比較して同様の性能を持っている。実大空間において、両扇風機を対象に PIV による風速測定を行い、比較、考察し気流性状の把握を行う。次に、一般的な室内天井埋込み型空調機である 4 方向カセット型エアコンを対象とし、定性的な流れの可視化及び PIV による定量的な流速ベクトルの測定を行い、気流性状の特性を把握し、数値流体解析を行う際の参考データを得ることを目的とする。

2 縮尺室内模型を対象とした室内気流速度分布の PIV 測定

2.1 実験対象の概要

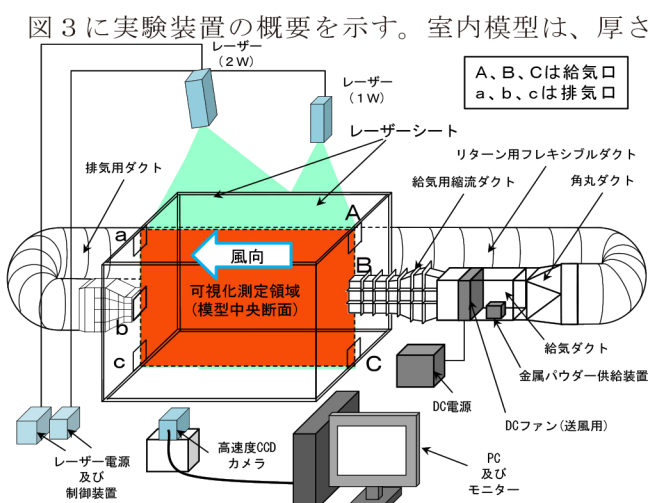


図 3 実験装置の概要

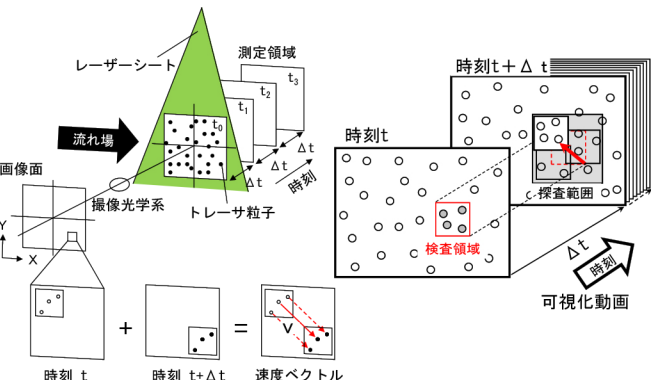


図 1 PIV 測定の原理

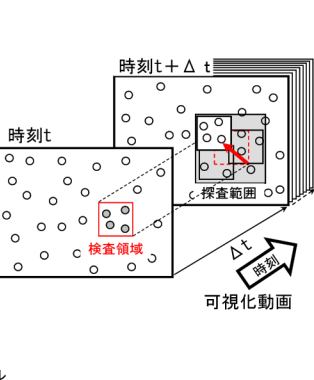


図 2 直接相互相関法の概要

8 mm のアクリル板で作成されており、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 a、b、c 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 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。

2.2 実験概要

表 1 に実験機器の詳細を、表 2 に PIV の測定可能最大風速を、表 3 に PIV 解析のパラメータを示す。本研究の PIV 解析は直接相互相関法を用いる。実際の長さと言像上の長さと言算値であるキャリブレーション値は 0.94mm/pixel であり、探査範囲と言影間隔から表 2 に示す高速度 CCD 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、熱線風速計で給気口付近の風速を計測し、高速度 CCD カメラと PIV 解析の最適な測定パラメータを決定する。

表 1 実験機器の詳細

Camera	ハイスピード CCD カメラ K-II (640pixel × 480pixel, 200fps)	
Laser	DPGL-2 W	LD 振起 Nd:YAG/YVO ₄ レーザー 波長 532nm, 出力 2 W 0 ~ 30kHz で変調可能な連続光
	G1000	LD 振起 Nd:YAG/YVO ₄ レーザー 波長 532nm, 出力 1 W 0 ~ 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

フレームレート [fps]	測定間隔 [ms]	測定可能最大風速 [m/s]			
		探査範囲 [pixel]			
		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 PIV 解析パラメータ

測定対象領域	600mm × 400mm
画像サイズ	640pixel × 480pixel
測定時間	10sec
測定間隔	5 ms (200fps)
検査領域	23pixel × 23pixel
探査範囲	±10pixel × ±10pixel

表 4 各 case における給気口と排気口の位置

	給気口	排気口	吹出風速
case1	B	b	1.5m/s
case2	B	a	
case3	A	a	
case4	C	a	

2.3 実験条件

表 4 に各 case における給気口と排気口の位置を示す。測定対象には縮尺室内模型を使用する。本実験では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 のレーザーを可視化領域全体に照射し、出力 1 W のレーザーを給気口付近に照射する。本実験では、表 4 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 CCD カメラのフレームレートは 200fps に設定し、10 秒間の撮影をする。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 において給気口の直後の風速が 1.5m/s 程度となるよう DC ファンを調整する。

2.4 測定結果

2.4.1 平均風速ベクトル

図 4 に各測定 case における平均風速ベクトルを示す。

(1) case1 : 給気口 B、排気口 b

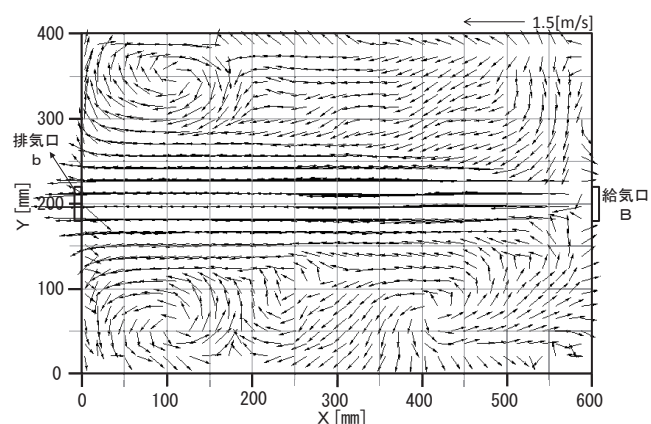
給気口の中心高さである Y が 200mm を軸として、ほぼ上下対称の風速ベクトルとなる。給気口 B から流入した気流は、拡散しながら排気口 b に向かう。給気口付近での風速は約 1.5m/s であり、排気口付近では 0.5m/s となる。給気口からの噴流は幅が広くなり、直接排気口から吸い込まれない気流は排気口の上部と下部の天井、床面へ衝突し、X が 100mm、Y が 50mm の位置及び X が 100mm、Y が 350mm の位置を中心として対称の渦を形成する。誤ベクトル率は 0.04% である。

(2) case2 : 給気口 B、排気口 a

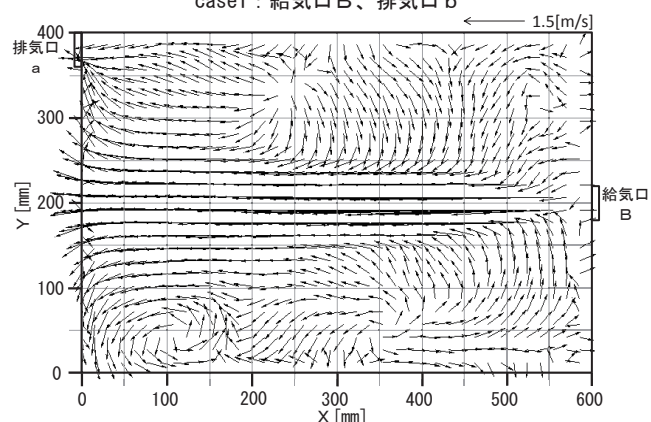
給気口 B より流入した気流は、拡散しながら排気口壁面へ直進する。壁面に衝突した気流は、X が 0 ~ 200mm、Y が 0 ~ 100mm 付近の位置で、case1 と同様の渦を形成しているが、X が 0 ~ 200mm、Y が 300 ~ 400mm 付近の位置では、case1 と異なり渦は形成されず、気流は排気口に誘引される風速ベクトルを示している。測定対象領域の最大風速である給気口直後の風速約 1.5m/s であり、熱線風速計の値と同じ値で得られている。誤ベクトル率は 2.69% である。

(3) case3 : 給気口 A、排気口 a

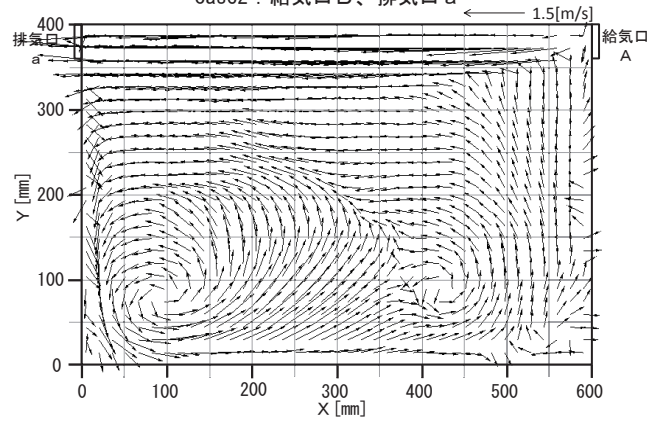
給気口 A より流入した気流、ほとんど拡散することなく排気口 a へ直進する。排気口から吸い込まなかった気流により、排気口側の壁面に沿って風速約 0.1m/s の下降気流が生じている。X が 100mm、Y が 75mm の位置において渦を形成し、X が 100mm ~ 300mm 付近の模型底面より斜め上向きの気流性状となっている。測定対象領域内最大風速である給気口直後の風速は約 1.5m/s であ



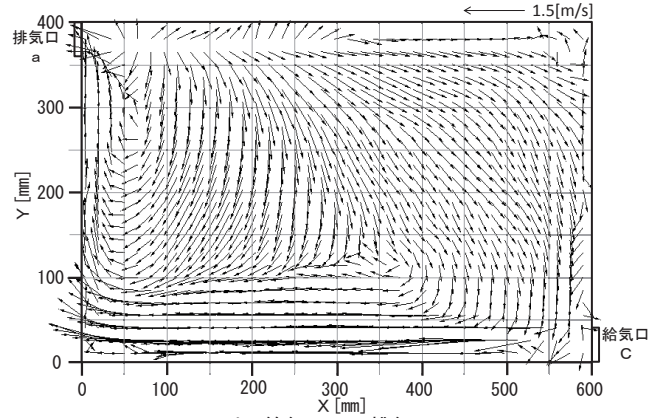
case1 : 給気口 B、排気口 b



case2 : 給気口 B、排気口 a

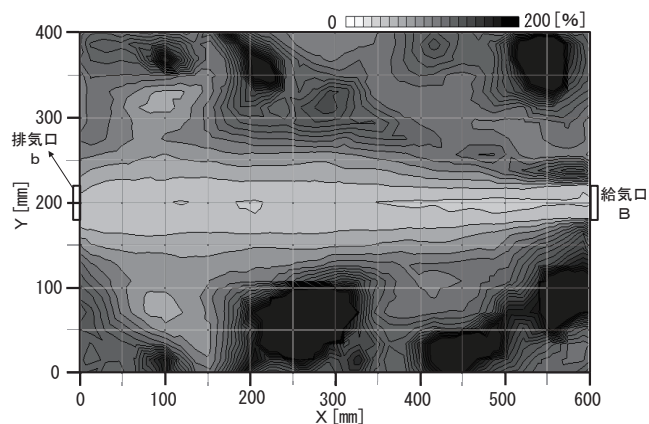


case3 : 給気口 A、排気口 a

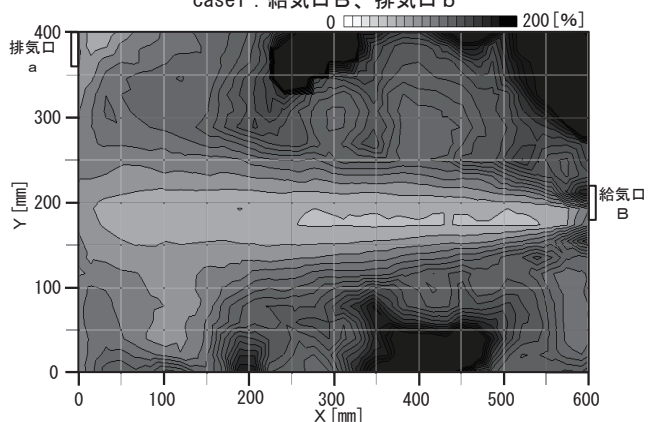


case4 : 給気口 C、排気口 a

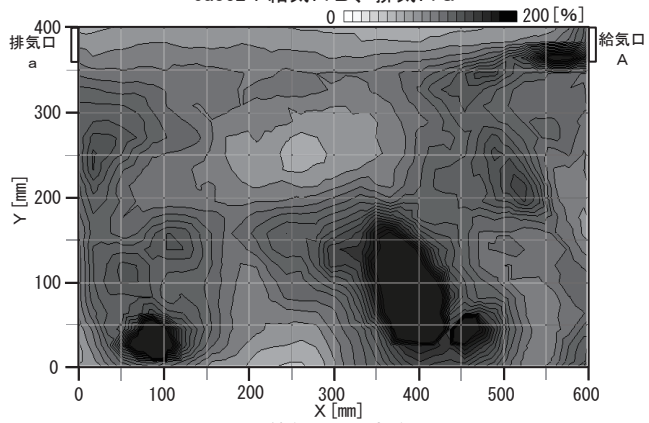
図4 各測定 case における平均風速ベクトル



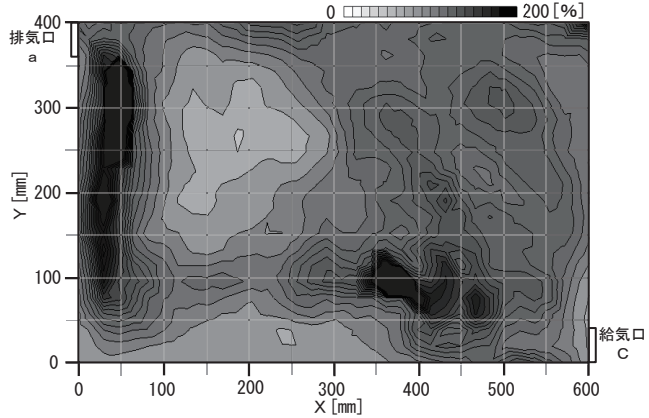
case1 : 給気口 B、排気口 b



case2 : 給気口 B、排気口 a



case3 : 給気口 A、排気口 a



case4 : 給気口 C、排気口 a

図5 各測定 case における乱れの強さ

り、熱線風速計の値と同じ値が得られている。誤ベクトル率は1.28%である。

(4) case4：給気口C、排気口a

給気口Cより流入した気流は、徐々に風速は低下し模型底部から排気口側壁面に沿って排気口a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。誤ベクトル率は1.64%である。

2.4.2 乱れの強さ

図5に各測定caseにおける乱れの強さの分布を示す。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、撮影対象範囲の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。算出式は以下となる。

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

ここで、 i：測定位置 [-]

k：時刻 [s]

N：データ数 [-]

u_i ：平均風速 [m/s]

$\tilde{u}_{i,k}$ ：瞬時風速 [m/s]

(1) case1：給気口B、排気口b

Yが150～250mmの領域では、乱れの強さは20%程度と小さい傾向があり、Xが550～600mmの給気口の上部と下部の位置に乱れの強さが200%を超える。

(2) case2：給気口B、排気口a

case1と比べて乱れの強さが大きい領域が広く分布する傾向にあるが、全体的にcase1とほぼ同様の乱れの強さの分布を示している。

(3) case3：給気口A、排気口a

給気口からの気流は排気口へ向かって直進するYが350～450mmの領域において乱れの強さは10～30%程度の値である。渦の中心があるXが100mm、Yが75mmの領域とXが400mm、Yが100mm付近の領域において乱れの強さは大きい傾向がある。それ以外の領域で乱れの強さは10～140%程度の範囲に入る。

(4) case4：給気口C、排気口a

給気口からの吹出し気流により相対的に風速の速い模型底部のYが0～50mmの領域において乱れの強さは30～40%程度である。領域全体で見ると、排気口下部

周辺で、乱れの強さが約180%と大きな値を示している。

各測定caseの乱れの強さの分布を見ると、給気口からの直進方向の領域では、乱れの強さが小さくなる傾向がある。一方、模型の隅部、給気口の上下周辺領域及び循環流や渦の中心付近において乱れの強さが大きくなる傾向がある。

3 空調装置を対象とした室内気流分布のPIV測定

3.1 扇風機を対象としたPIV測定（実験①）

3.1.1 実験概要

図6に扇風機の実験装置を、表5に扇風機のPIV測定パラメータを、表6にPIVの測定可能最大風速を示す。本実験で用いたトレーサ粒子は難燃性スモークとし、測定対象は無翼型扇風機及び有翼型扇風機とする。無翼型扇風機の吹出リングは直径300mm、リング内の吹出スリットの幅は約1.3mmであり、測定対象と2台のレーザー（出力1W+2W）を正対させて設置し、高速度CCDカメラをトラバースに設置することで上部から水平断面を対象に測定を行う。シーディングはいずれの測定対象もスモークジェネレーターにダクトを接続し、トレーサ粒子を広範囲で一様に拡散できるようにした供給装置を用い、測定対象の後方に設置してシーディングを行う。キャリブレーション値は、無翼型扇風機は1.5789mm/pixel、有翼型扇風機は1.4706mm/pixelである。

3.1.2 測定結果

(1) 無翼型扇風機

図7（1）に無翼型扇風機を対象とした平均風速ベクトルを示す。無翼型扇風機は比較的少量の空気をリング状の開口部から高速で前方に吹出す様子が観察され、Xが600～750mmの撮影範囲の端部ではほぼ一様となる。Xが0～150mmでは、無翼型扇風機のリングに周囲の空気が誘引されている。これはリングに設置されたスリットから高速で空気を吹出すことで、リング内部に負圧を発生させているためと考えられる。無翼型扇風機は開口部から吹出した空気だけでなく、周囲の空気を誘引して送り出すことで風量を増大させている。吹出された気流は徐々に減速しながら次第に拡散していき、全体として概ね左右対称となる流れ場を形成する。

(2) 有翼型扇風機

図7（2）に有翼型扇風機を対象とした平均風速ベクトルを示す。Xが225～600mm、Yが150～375mmでは渦状の気流を交差しながら送り出し、無翼型扇風機と比較して断続的な気流を生成する。流れ場の中心部の速度は速いが、周囲の空気を誘引する様子は観されない。

3.2 天井埋込み型空調機を対象とした PIV 測定（実験②）

3.2.1 実験概要

図 8 に天井埋込み型空調機の実験装置を、表 7 に空調機の PIV 測定パラメータを、表 8 に PIV の測定可能最大風速を示す。測定対象は730×730mmの4方向天井カセット型エアコンとし、吸気口は450×450mm、吹出口は65×460mmである。エアコンの風速は弱風に設定し、冷房18℃と暖房22℃の設定で測定を行う。測定中の吹出気流の平均温度は冷房8.6℃、暖房34.2℃であり、吸込気流の平均温度は冷房21.1℃、暖房26.6℃である。測定対象領域は1箇所の吹出口とする。出力が1Wと2Wの2台のレーザーは正対させて設置し、上方に向けて測定対象に照射する。トレーサは実験①と同様に難燃性スモークを使用する。測定は50mm間隔で中央部をcase1とし、端部をcase5として冷暖房運転時で各1回ずつ計10回測定を行う。本実験では、空調機の吹出気流を主に測定するため、シーディングは吹出口に十分にトレーサ粒子を供給できるダクトを取り付けたスモークジェネレーターを使用して行う。キャリブレーション値は0.7407mm/pixelである。

3.2.2 測定結果

(1) 冷房運転時・中央断面

図 9（1）に天井埋込み型空調機の冷房運転時・中央断面の平均風速ベクトルを示す。測定対象が吸気口か

表 5 扇風機のパイブ測定パラメータ

画像サイズ	640pixel×480pixel
測定時間	24sec
測定間隔	5ms(200fps)
検査領域	23pixel×23pixel
探査範囲	±10pixel×±10pixel

表 6 PIV の測定可能最大風速

測定対象	フレームレート [fps]	測定間隔 [ms]	キャリブレーション値 [mm/pixel]	測定可能最大風速 [m/s]			
				探査範囲 [pixel]			
				5	10	15	20
無翼型扇風機	200	5	1.5789	1.58	3.16	4.74	6.32
有翼型扇風機	200	5	1.4706	1.47	2.94	4.41	5.88

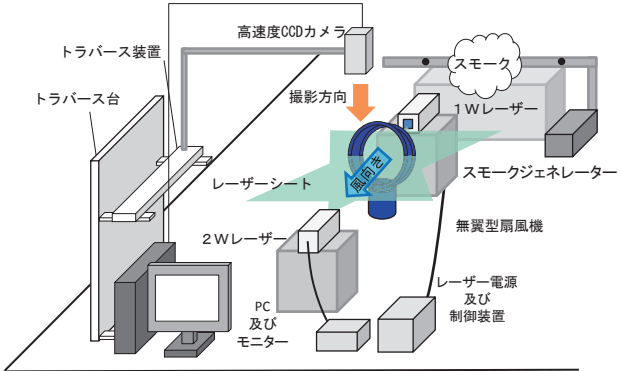


図 6 扇風機の実験装置

ら吸引した空気を吹出口から吹出す様子が観察される。Xが300～375mm、Yが450mmの吹出口付近では風速1.0m/s程度の比較的速い気流が生成され、気流が周囲に拡散する様子は殆ど観察されない。又、流れ場の中心部では風速が最も速く2.0m/s程度となる。Xが525～900mmにおいて気流は徐々に減速し、Xが675～900mmでは風速0.5～1.0m/s程度となり、気流が周囲に拡散する様子が観察される。

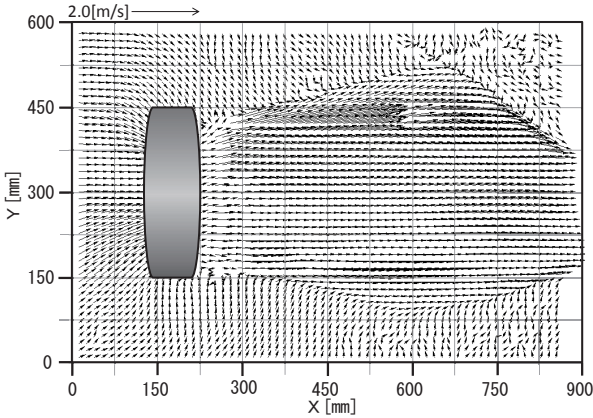
(2) 暖房運転時・中央断面

図 9（2）に天井埋込み型空調機の暖房運転時・中央断面の平均風速ベクトルを示す。冷房運転時と同様に吹出口付近の気流は風速1.0m/s程度であり、周囲に拡散する様子は殆ど観察されない。流れ場の中心部で風速が最も速く2.0m/sとなる。暖房運転時では、吹出された気流は次第に上方に反るような気流となり、Xが450～900mmでは天井面を沿って流れる気流を形成する。

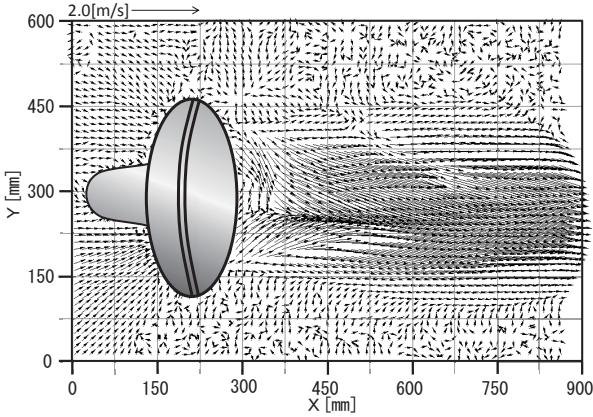
4 結論

(1) 縮尺室内模型における室内気流速度分布の開口位置を変化させた場合の PIV 測定

① case1 は給気口 B の中心高さである Y が 200mm を軸



(1) 無翼型扇風機



(2) 有翼型扇風機

図 7 扇風機を対象とした平均風速ベクトル

- として、ほぼ上下対称の風速ベクトルとなる。吹出口から流入した気流は拡散しながら排気口に向かう。拡散して排出されなかった気流は排気口側の模型側面に衝突して、対称的な渦を形成する。
- ② case2 は給気口から流入した気流は拡散しながら排気口側面に向かい、そこで衝突した気流は渦を形成するが、X が 0 ～ 100mm、Y が 300 ～ 400mm では case1 と異なり渦は形成されない。
- ③ case3 は給気口から流入した気流は殆ど拡散されることなく排気口に向かう。給気口から排出されなかった気流は壁面に沿って約 0.1m/s の流速で下降し、ほぼ模型全体を対象とした対流が生じる。
- ④ case4 は給気口より流入した気流は徐々に速度は低下し模型の内壁に沿って排気口に向かう。流速は 0.1 ～ 0.5m/s 程度であり、模型全体に広げる大きな循環流を形成する。
- ⑤ 乱れの強さは全体的に給気口からの直進方向の領域では乱れの強さが小さくなる傾向がある。一方、室内模型の隅部、給気口の上下周辺領域及び循環流や渦の中心付近において乱れの強さが大きくなる傾向がある。

(2) 扇風機を対象とした室内気流分布の PIV 測定

a . 無翼型扇風機

- ①無翼型扇風機において、リングに設置されたスリット

表 7 空調機の PIV 測定パラメータ	
画像サイズ	640pixel×480pixel
測定時間	24sec
測定間隔	5 ms (200fps)
検査領域	33pixel×33pixel
探査範囲	±15pixel×±15pixel

表 8 PIV の測定可能最大風速							
測定対象	フレームレート [fps]	測定間隔 [ms]	キャリブレーション値 [mm/pixel]	測定可能最大風速[m/s]			
				探査範囲[pixel]			
				5	10	15	20
天井埋込み型空調機	200	5	0.7407	0.74	1.48	2.22	2.96

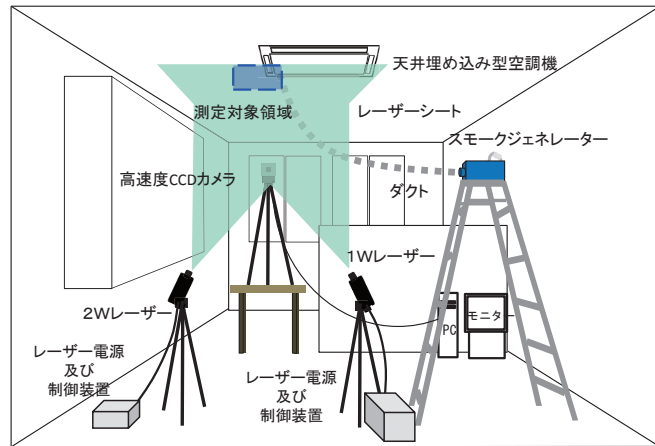


図 8 天井埋込み型空調機の実験装置

から吹出された空気は、次第に減速しながら拡散していき、全体として左右対称の流れ場となる。

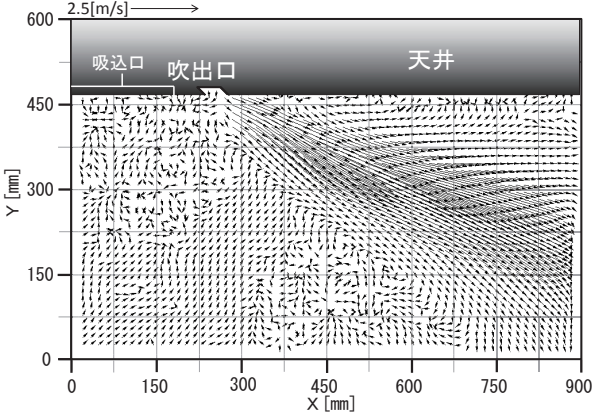
- ②無翼型扇風機はリングに設置されたスリットから高速で空気を吹出すことにより、リング内部に負圧を発生させ、周囲の空気を誘引することで風量を増大させる。

b . 有翼型扇風機

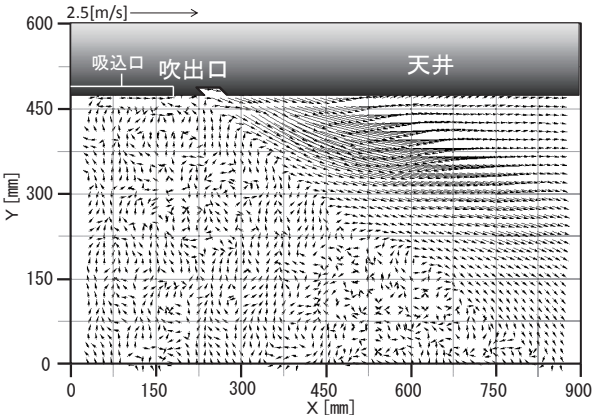
- ①有翼型扇風機は、自身の回転翼を高速で回転させることで断続的な空気を送り出す。
- ②有翼型扇風機では、流れ場の中心部の速度は速いが、周囲の空気を誘引する様子は観察されない。

(3) 天井埋込み型空調機を対象とした PIV 測定

- ①吹出された気流は風速 1.0m/s 程度であり、周囲に拡散する様子は殆ど観察されない。又、吹出された気流は冷房運転時及び暖房運転時共に流れ場の中心部において、風速が最も速く 2.0m/s 程度となる。
- ②冷房運転時では流れ場の端部では風速 0.5 ～ 1.0m/s 程度となり、気流が周囲に拡散する様子が観察される。
- ③暖房運転時では吹出された気流は次第に上方に反るような気流となり、天井面を沿って流れる気流を形成する。



(1) 冷房運転時・中央断面



(2) 暖房運転時・中央断面

図 9 天井埋込み型空調機の平均風速ベクトル