

実大室内空間を対象としたPIV解析に関する基礎的研究

江川 将史 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用いられている。近年、画像処理技術の発展及びパソコン性能の向上により、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^{文1)}(PIV:Particle Image Velocimetry)が実用化されている。この手法は、熱線風速計等による測定法とは異なり、流れに非接触で空間的・時系列的に多数の測定点における風速ベクトルを得ることができる。

図1にPIV測定方法を示す。PIV測定は、流れ場に微小なトレーサ粒子を混入させ、シート状のレーザー光を照射することで、2次元流れ場の可視化を行う。可視化した流れ場を対象に、トレーサ粒子の動きを高速カメラで撮影し、得られた可視化動画をもとにトレーサ粒子の動きから風速ベクトルを算出する。直接相互相関法は、異なる2時刻の画像間で1時刻目の画像中に検査領域^{文1)}を設定し、トレーサ粒子群の輝度分布の形状の相関が高い画像を2時刻目の画像中の探査領域^{文2)}から探し出す。1時刻目の検査領域が2時刻目の探査領域から探し出された画像の位置に移動したと考え、画像の移動距離と画像間の時刻差から風速ベクトルを算出する手法である。

現在一般に使用されているPIVは、機械工学の分野で開発され、比較的狭い範囲(300[mm]×300[mm]程度)を対象としてきたが、既往の研究^{文2)}では建築分野における実大室内空間の測定を目的として1,000[mm]×1,000[mm]程度の範囲の測定が行われている。更に、実大の室内空間を対象とした測定が可能になれば、室内全体の空間・時系列的気流データを得ることが可能となる。

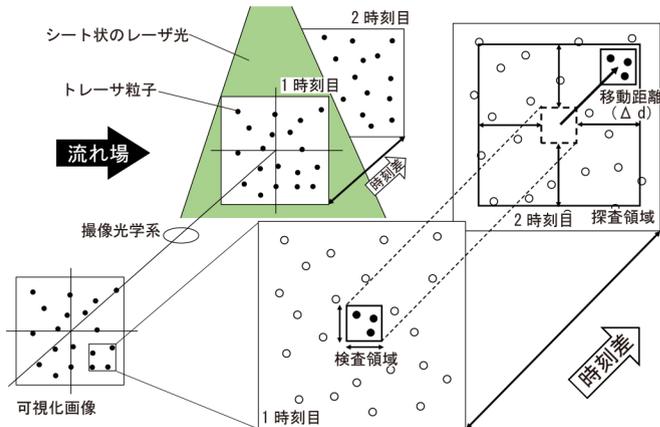


図1 PIV測定方法

本研究では、家庭用エアコンを設置した実大の実験用チャンバーを対象に3[m]×3[m]程度に測定範囲を拡大し、実大空間の流れ場をPIV解析するための基礎的な検討を行う。最初に、気流の可視化に重要な光源となるレーザー配置の検討を行う。次に、実大室内空間では流速の速い部分と遅い部分が混在するため測定対象面内で適切なPIV解析条件が異なる可能性がある。そこで、PIV解析パラメータ^{文3)}と画像のフレームレートを変化させた解析を行う。さらに、エアコンの吹出風向を変化させた場合の定量的な風速の測定を行い、気流性状の変化を把握することで建築分野で実用的なPIV計測手法の基礎的な検討を行うことを目的とする。

2 測定概要

2.1 実験対象：図2に実験で対象とした実大室内空間を示す。2,900[mm](幅)×2,600[mm](高さ)×2,900[mm](奥行き)の実験用チャンバーを対象とする。実験用チャンバーは、一つの壁面を透明なアクリル板で作成し、室外から内部空間の撮影が可能である。壁には、家庭用エアコンが設置されている。PIV測定対象は、部屋中心の鉛直断面(Y=1,450[mm])とする。エアコンは送風運転とし、風量は強(942[m³/h])とする。

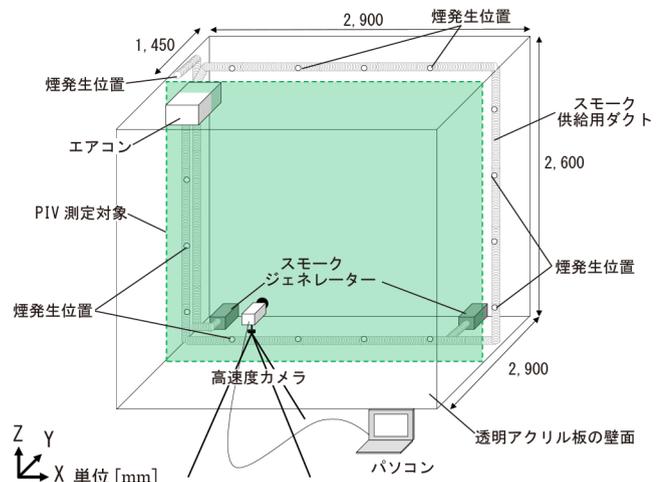


図2 実大室内空間

表1 使用した測定機器

カメラ	高速カメラ	Photron FASTCAM SA3 (1,024×1,024[pixel])
レーザー	DPGL-3W×2台	出力：3[W]
	DPGL-2W	出力：2[W]
	G1000	出力：1[W]
解析ツール	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver 4.0.2.1
	PIV解析	Flow-Expert ver 1.2.13

2.2 実験概要：表1に使用した測定機器を示す。可視化には、シート状レーザ4台（出力3[W]を2台、2[W]を1台、1[W]を1台）を同時に使用し、照射断面を一致させる。シージングには、ダクトを設置したスモークジェネレーターを2台使用する。1台はダクトをエアコンの吸込口に、もう1台は壁面に沿わせて穴を開けたダクトに接続し、可能な限り気流場に影響が生じない様にダクトの穴からシージングする。撮影には、高速度カメラ PhotronFASTCAM SA3 を、得られた動画のPIV解析にはFlow-Expert ver1.2.13を用いる。

2.3 PIV測定パラメータ：表2にPIV測定パラメータを示す。PIVのキャリブレーション値^{※4}は2.95[mm/pixel]である。高速度カメラの撮影時のフレームレートは125[fps]、シャッタースピードは1/125[sec]である。室内全体を撮影した場合のPIV解析の計測点間隔は、PIVによる流速解析時間を考慮し25[mm]とする。

3 レーザ配置の検討

3.1 実験概要：図3にレーザ配置を変化させた時の実験 case を示す。caseA、Bでは、出力3[W]1台を天

表2 PIV測定パラメータ

対象断面	鉛直断面 (Y=1,450[mm])
画像サイズ[pixel]	1,024×1,024
キャリブレーション値 ^{※4} [mm/pixel]	2.95
対象領域[mm]	2,600×2,900
撮影時間t[sec]	43
撮影時のフレームレート[fps] ([msec])	125 (8)
シャッタースピード[sec]	1/125
計測点間隔[mm]	25

表3 レーザ配置を変化させた時のPIV解析パラメータ

解析時のフレーム間隔[msec]	8	
検査領域 ^{※1} [pixel]	32×32	
探査領域 ^{※2} [pixel]	±14×±14	
解析可能風速 ^{※6} [m/s]	1[pixel]あたり	0.36
	最大風速	5.04

井面の左側（エアコン側）に、その他3台を床面に配置する。caseC、D、Eでは、出力3[W]1台を天井面の中央に、出力1[W]、3[W]を床面に、出力2[W]を右側壁面の中央に配置する。caseFでは、出力3[W]1台を天井面の右側に、その他3台を床面に配置する。エアコンの吹出風向は鉛直下向きから38°とする。

3.2 PIV解析概要：表3にレーザ配置を変化させた時のPIV解析パラメータを示す。解析時のフレーム間隔は8[msec]、検査領域は32×32[pixel]、探査領域は±14×±14[pixel]とする。平均風速を算出する測定時間は、撮影時間43[sec]のうちの8[sec]^{※5}とする。平均風速は、X、Z成分のベクトルとする。解析可能風速^{※6}は、探査領域、解析時のフレーム間隔とキャリブレーション値から0.36～5.04[m/s]となる。

3.3 PIV解析結果：図4にレーザ配置を変化させた時の平均風速ベクトル分布を示す。caseA、Fでは、1.5～2.5[m/s]のエアコンの吹出気流がみられる。caseDでは、他のcaseと同様にエアコンからの吹出気流がみられるが床面に配置したレーザ1[W]付近で正確に風速ベクト

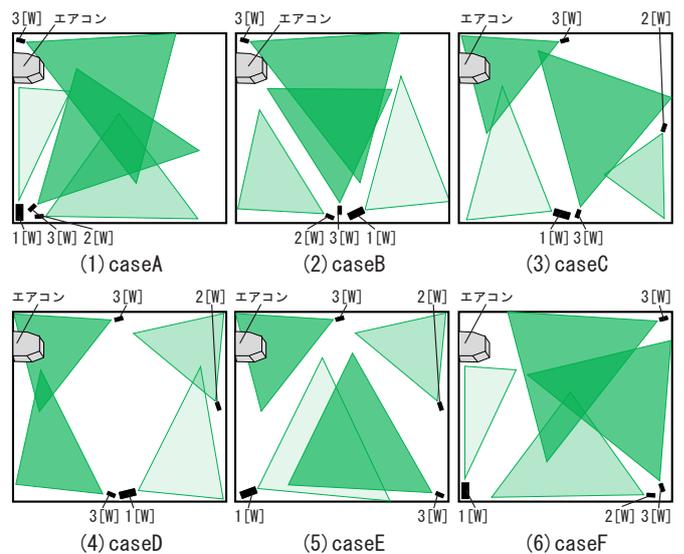


図3 レーザ配置を変化させた時の実験 case

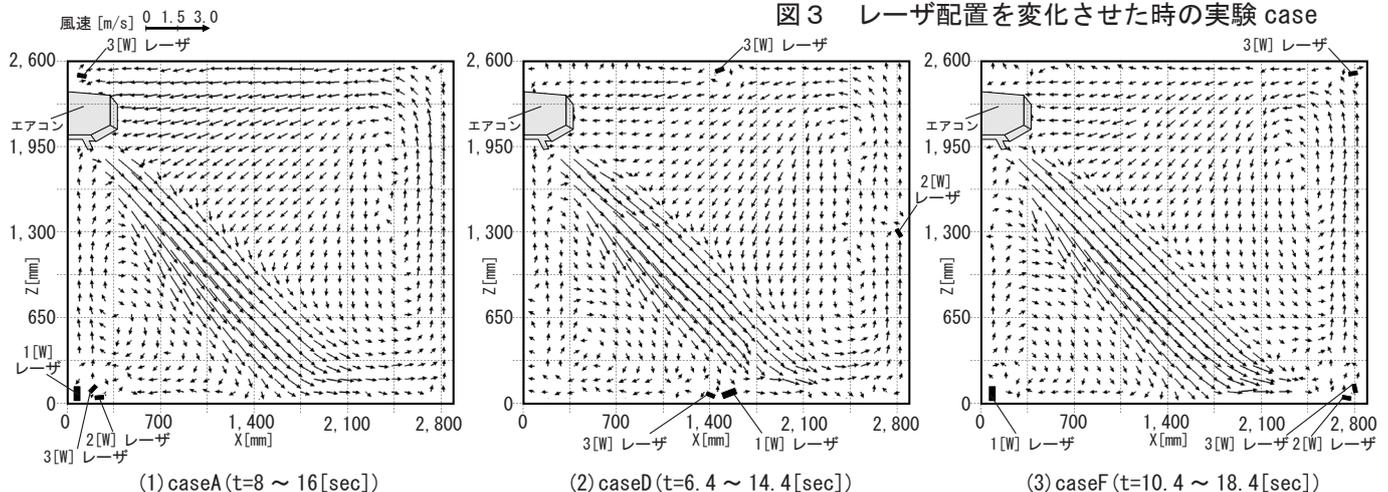


図4 レーザ配置を変化させた時の平均風速ベクトル分布

ルが算出されていない。床面に配置したレーザ 1 [W] 付近に過剰なスモークが滞留し、解析時に輝度の分布が不明確となり解析が困難だったためと考えられる。また、caseD、F では、エアコン上部での風速は殆ど算出されていないが caseA では、0.3 ~ 0.4[m/s] の風速が算出され、他の case に比較してエアコンの吸込気流が算出されている。エアコン上部のスモークに対してレーザの光量が十分であるためと考えられる。PIV 測定において、メリハリのある輝度分布をもつ可視化動画を撮影することは重要である。レーザの光量とスモークの供給方法と供給量を検討し、測定対象範囲内でメリハリのあるトレーサの輝度分布を撮影する必要がある。caseA は、他の case よりも室内全体の気流分布が把握できる解析結果であり、今回の測定対象では最適なレーザ配置と考えられる。シージングにより最適なレーザ光源の配置は異なると考えられ、両者のマッチングが重要である。

4 PIV 解析パラメータ^{*3}の検討

4.1 PIV 解析概要：図 3 の caseA の可視化画像を対象に PIV 解析パラメータを検討する。図 5 に撮影時のフレーム間隔とフレーム間隔をスキップさせた解析方法の概要、表 4 に PIV 解析パラメータを検討する時の解析 case を示す。高速度カメラの撮影時のフレーム間隔による解析とフレーム間隔をスキップさせた解析を行う。解析対象時刻に対して 1 フレーム毎の画像を比較する場合のフレーム間隔は 8 [msec]、5 フレームスキップして 6 フレーム毎の画像を比較する場合のフレーム間隔は 48[msec] である。どちらの解析時のフレーム間隔でも、検査領域は、 4×4 、 9×9 、 26×26 、 32×32 [pixel]、探査領域は、 $\pm 2 \times \pm 2$ 、 $\pm 4 \times \pm 4$ 、 $\pm 8 \times \pm 8$ 、 $\pm 16 \times \pm 16$ 、 $\pm 32 \times \pm 32$ [pixel] とする。

4.2 PIV 解析結果

4.2.1 解析時のフレーム間隔を変化させた場合：図 6 に検査領域を 32×32 [pixel]、探査領域を $\pm 32 \times \pm$

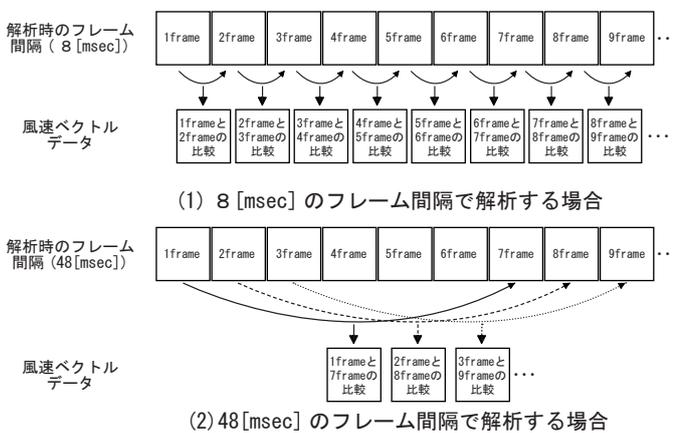


図 5 撮影時のフレーム間隔とフレーム間隔をスキップさせた解析方法の概要

32[pixel] として解析時のフレーム間隔が 8 [msec] と 48[msec] の場合の瞬時風速ベクトル分布（撮影時間 43[sec] の $t=10.8$ [sec]）を示す。

(1) エリア①(エアコン吹出気流): エリア①はエアコンの吹出部分で速い風速エリアである。解析時のフレーム間隔が 8 [msec] では、2.0 ~ 3.0[m/s] の相対的に速い風速ベクトルが算出されており、風向も妥当である。フレーム間隔が 48[msec] では、2.0[m/s] 以上の風速が算出されないため解析されない領域や風向が異なるベクトルが散見される。風速が速い気流場では、解析時のフレーム間隔が 8 [msec] の方が探査するフレーム間隔が短くなるので、粒子群の移動の把握が正確となり、1 時刻目の画像パターンと相関の高い画像が 2 時刻目の画像パターンから得られやすいと考えられる。

(2) エリア②(測定対象の右上): エリア②は隅角部で相対的に遅い風速エリアである。解析時のフレーム間隔が 8 [msec] では、0.6 ~ 0.8[m/s] の風速となる。フレーム間隔が 48[msec] では、0.7 ~ 0.9[m/s] の天井面に沿う風速が算出されており、風向も妥当である。

(3) エリア③(測定対象の右下): エリア③は隅角部で相対的に遅い風速エリアである。解析時のフレーム間隔が 8 [msec] では、どの計測点でも 0.1[m/s] 以下の風速となる。フレーム間隔が 48[msec] では、0.8 ~ 1.0[m/s] の床面付近から壁面に沿って上昇する風速が算出されており、風向も妥当である。風速が遅い気流場では、解析時のフレーム間隔が 48[msec] の方が探査するフレーム間隔が長くなるので、粒子群の移動の把握が正確となり、1 時刻目の画像パターンと相関の高

表 4 PIV 解析パラメータを検討する時の解析 case

解析 case	解析時のフレーム間隔[msec]	検査領域 ^{*1} [pixel]	探査領域 ^{*2} [pixel]	最大解析可能風速 ^{*6} [m/s]	
case1-1	8	4 × 4	$\pm 2 \times \pm 2$	0.73	
case1-2			$\pm 4 \times \pm 4$	1.47	
case1-3			$\pm 8 \times \pm 8$	2.95	
case1-4			$\pm 16 \times \pm 16$	5.90	
case1-5			$\pm 32 \times \pm 32$	11.81	
case2-1		9 × 9	$\pm 2 \times \pm 2$	0.73	
case2-2			$\pm 4 \times \pm 4$	1.47	
case2-3			$\pm 8 \times \pm 8$	2.95	
case2-4			$\pm 16 \times \pm 16$	5.90	
case2-5			$\pm 32 \times \pm 32$	11.81	
case3-1		26 × 26	4 × 4	$\pm 2 \times \pm 2$	0.73
case3-2				$\pm 4 \times \pm 4$	1.47
case3-3				$\pm 8 \times \pm 8$	2.95
case3-4				$\pm 16 \times \pm 16$	5.90
case3-5				$\pm 32 \times \pm 32$	11.81
case4-1	32 × 32		$\pm 2 \times \pm 2$	0.73	
case4-2			$\pm 4 \times \pm 4$	1.47	
case4-3			$\pm 8 \times \pm 8$	2.95	
case4-4			$\pm 16 \times \pm 16$	5.90	
case4-5			$\pm 32 \times \pm 32$	11.81	
case5-1	48		4 × 4	$\pm 2 \times \pm 2$	0.12
case5-2				$\pm 4 \times \pm 4$	0.24
case5-3				$\pm 8 \times \pm 8$	0.49
case5-4				$\pm 16 \times \pm 16$	0.98
case5-5				$\pm 32 \times \pm 32$	1.96
case6-1		9 × 9	$\pm 2 \times \pm 2$	0.12	
case6-2			$\pm 4 \times \pm 4$	0.24	
case6-3			$\pm 8 \times \pm 8$	0.49	
case6-4			$\pm 16 \times \pm 16$	0.98	
case6-5			$\pm 32 \times \pm 32$	1.96	
case7-1		26 × 26	$\pm 2 \times \pm 2$	0.12	
case7-2			$\pm 4 \times \pm 4$	0.24	
case7-3			$\pm 8 \times \pm 8$	0.49	
case7-4			$\pm 16 \times \pm 16$	0.98	
case7-5			$\pm 32 \times \pm 32$	1.96	
case8-1	32 × 32	$\pm 2 \times \pm 2$	0.12		
case8-2		$\pm 4 \times \pm 4$	0.24		
case8-3		$\pm 8 \times \pm 8$	0.49		
case8-4		$\pm 16 \times \pm 16$	0.98		
case8-5		$\pm 32 \times \pm 32$	1.96		

い画像が2時刻目の画像パターンから得られやすいと考えられる。エアコンの吹出気流がある室内気流では、風速の速い部分と遅い部分が混在しており、対象とする解析範囲によってフレーム間隔を変化させて解析することで全体の風速分布をより正確に解析できると考えられる。

4.2.2 検査領域と探査領域を変化させた場合：図7に探査領域を $\pm 32 \times \pm 32$ [pixel]として検査領域を変化させた場合の平均風速分布を、図8に検査領域を 32×32 [pixel]として探査領域を変化させた場合の平均風速分布を示す。平均風速分布を比較した位置Aでは解析時のフレーム間隔を8[msec]とした場合、位置Bでは解析時のフレーム間隔を48[msec]とした場合で平均風速を比較する。

(1) 検査領域による変化(図7)：位置A(8[msec])の場合、検査領域が 26×26 [pixel]以上では、風速はほぼ一致する。位置B(48[msec])の場合、どの計測高さでも検査領域が 9×9 [pixel]以下では、速い風速

が正しく解析されていない。検査領域が狭いと速い風速が解析できる相関の高い画像が見つげにくく、妥当な風速ベクトルが算出されない。どちらの解析時のフレーム間隔でも検査領域 26×26 [pixel]以上であれば平均風速の値に大きな差はみられず、妥当なパラメータと考えられる。

(2) 探査領域による変化(図8)：位置A(8[msec])の場合、探査領域が $\pm 16 \times \pm 16$ [pixel]以上では、風速はほぼ一致する。探査領域が $\pm 4 \times \pm 4$ [pixel]以下では、速い風速が解析できない。位置B(48[msec])の場合、探査領域が狭くなるほど算出される最大風速が遅くなる。どの風速が正しいのかは今後検討が必要であるが、想定される風速に対応した探査領域の検討が必要である。解析時のフレーム間隔8[msec]では、探査領域 $\pm 16 \times \pm 16$ [pixel]以上、フレーム間隔48[msec]では、 $Z=650 \sim 2,600$ [mm]で探査領域 $\pm 16 \times \pm 16$ [pixel]以上であれば平均風速の値に大きな差はみられず、妥当なパラメータと考えられる。

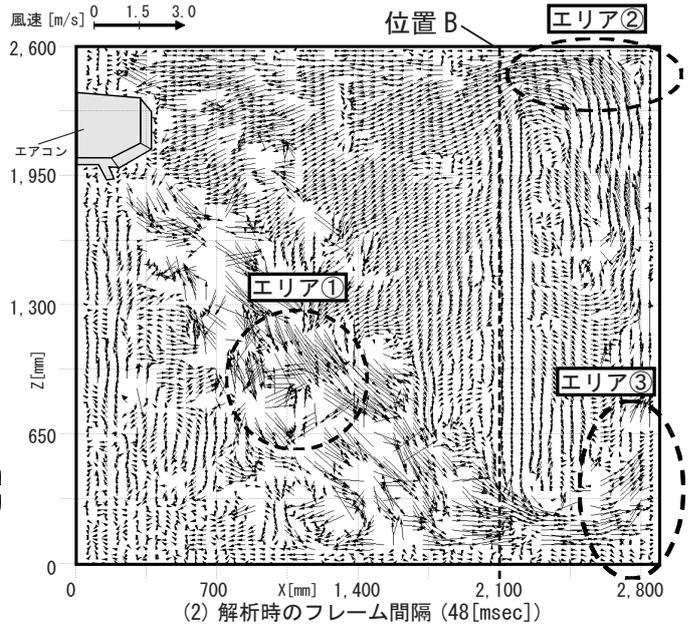
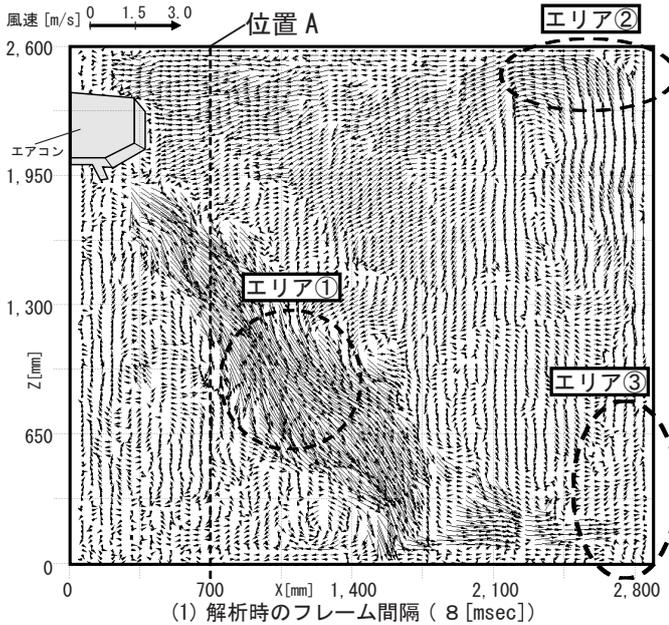


図6 検査領域を 32×32 [pixel]、探査領域を $\pm 32 \times \pm 32$ [pixel]として解析時のフレーム間隔が8[msec]と48[msec]の場合の瞬時風速ベクトル分布(撮影時間43[sec])の $t=10.8$ [sec]

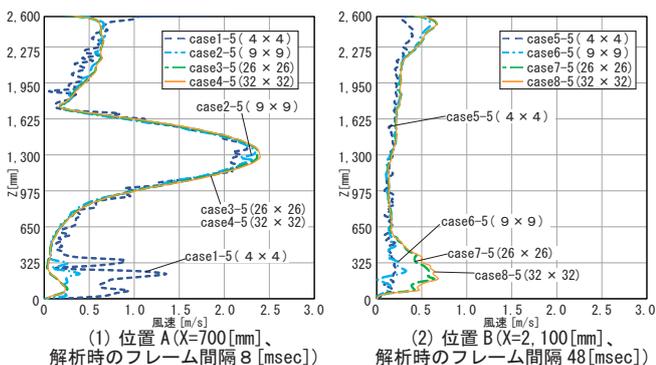


図7 探査領域を $\pm 32 \times \pm 32$ [pixel]として検査領域を変化させた場合の平均風速分布

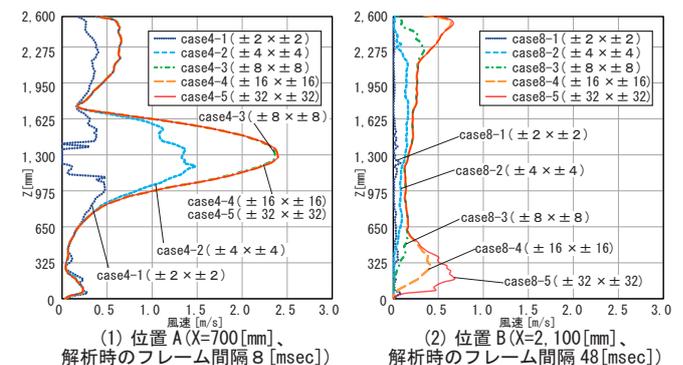


図8 検査領域を 32×32 [pixel]として探査領域を変化させた場合の平均風速分布

5 エアコンの吹出風向を変化させた場合の PIV 測定

5.1 実験概要：表 5 にエアコンの吹出風向を変化させた場合の実験 case を示す。レーザ配置は、図 3 の caseA とする。エアコンの吹出風向は、鉛直下向きから 28[°]、60[°] とする。

5.2 PIV 解析概要：表 6 にエアコンの吹出風向を変化させた場合の PIV 解析パラメータを示す。解析時のフレーム間隔は、8、16、32、48[msec] とする。検査領域は 26 × 26[pixel] とし、探査領域は ± 16 × ± 16[pixel] とする。

5.3 PIV 解析結果：図 9 に解析時のフレーム間隔と最小解析可能風速を、図 10 に最適と考えられる風速ベクトルの選択方法の概要^{*7}を、図 11 に各フレーム間隔で算出された最適と考えられる風速を合成した平均風速ベクトル分布を、図 12 に解析時のフレーム間隔の分布を示す。各解析時のフレーム間隔で算出された風速ベクトルのデータを用いて、同じ時刻、同じ計測点毎に最適と考えられる風速ベクトルを選択して合成することで、瞬時風速分布を作成する。最適と考えられる風速ベクトルは、解析可能風速の範囲内で算出された風速ベクトルとする。同じ時刻、同じ計測点に複数存在する場合は、最小の移動量^{*8}で算出された風速ベクトルを最適と考えられる風速ベクトルとする。

5.3.1 平均風速ベクトル分布

(1) caseG(吹出風向 28[°]、t=8.8 ~ 16.8[sec])：エアコンの吹出気流は、X=350 ~ 1,400[mm]、Z=0 ~ 1,950[mm] の領域で 1.7 ~ 2.5[m/s] の風速となり、床に衝突し、右側と左側壁面に向かう気流が生じる。また、床面付近から右側壁面に沿って、天井面に向かう気流が 0.4 ~ 0.5[m/s] の風速となる。

(2) caseH(吹出風向 60[°]、t=6.4 ~ 14.4[sec])：エアコンの吹出気流は、X=350 ~ 2,900[mm]、Z=0 ~ 1,950[mm] の領域で 1.5 ~ 2.0[m/s] の風速となり、右側壁面に衝突し、天井面と床面に向かう気流が生じる。天井面と床面付近では循環流を形成し、0.4[m/s] 以下の風速となる。エアコンの吹出気流が右側壁面に衝突し、天井面と床面に向かう気流が生じるとともにエアコンの吹出気流に誘因されている。

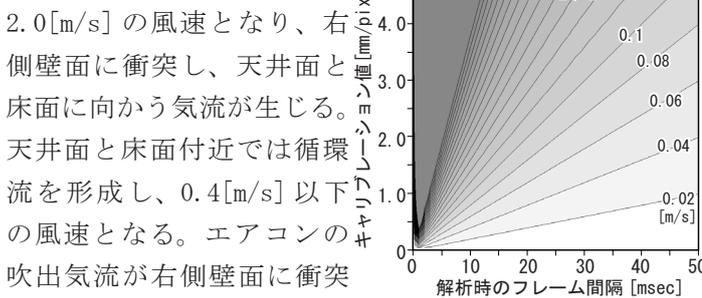


図 9 解析時のフレーム間隔と最小解析可能風速

表 5 エアコンの吹出風向を変化させた場合の実験 case

実験 case	鉛直下向きに対する吹出風向[°]
caseG	28
caseH	60

5.3.2 解析時のフレーム間隔の分布：最適と考えられる風速を合成した解析時の

フレーム間隔の分布は、平均風速を算出する際に計測点毎に最適と考えられる風速ベクトルとして選択されたフレーム間隔である。caseG(吹出風向 28[°]) では、天井面付近の領域でフレーム間隔が 8 [msec] の風速ベクトルが選択され、エアコンの吹出気流と天井面付近を除く領域ではフレーム間隔が 16、32[msec] の風速ベクトルが選択される場合が多い。caseH(吹出風向 60[°]) では、エアコンの吹出気流を除く領域でフレーム間隔が 16、32[msec] の風速ベクトルが選択される場合が多い。どの case でもエアコンの吹出領域では、解析時のフレーム間隔が 8 [msec] の風速ベクトルが選択されている。また、どの case でも領域によって適したフレーム間隔は異なるため、各フレーム間隔で算出した風速ベクトルのデータから最適と考えられる風速ベクトルを選択して、瞬時風速ベクトル分布を合成することは、全体の風速分布をより正確に把握できる可能性があると考えられる。

6 まとめ

6.1 レーザ配置の検討

① caseD の場合、床面に配置したレーザ 1 [W] 付近に過剰なスモークが滞留し、解析時に輝度の分布が不明確となり解析が困難と考えられる。

② caseA の場合、エアコン上部で 0.3 ~ 0.4[m/s] の風速が算出され、エアコンの吸込気流がみられる。エアコン上部のスモークに対してレーザの光量が十分であるためと考えられる。

6.2 PIV 解析パラメータの検討

① 風速の速い部分と遅い部分が混在している室内気流では、対象とする解析範囲によってフレーム間隔を変更して解析をすることで全体の風速分布をより正確に解析できると考えられる。

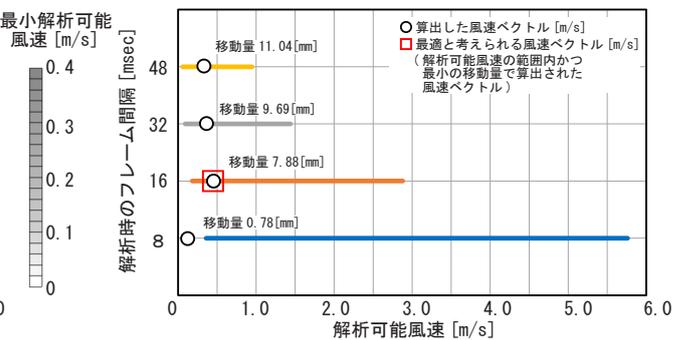


図 10 最適と考えられる風速ベクトルの選択方法の概要^{*7}

表 6 エアコンの吹出風向を変化させた場合の PIV 解析パラメータ

解析時のフレーム間隔[msec]	8	16	32	48	
検査領域 ^{*1} [pixel]	26 × 26				
探査領域 ^{*2} [pixel]	± 16 × ± 16				
解析可能風速 ^{*6} [m/s]	1[pixel]あたり	0.36	0.18	0.09	0.06
	最大風速	5.76	2.88	1.44	0.96

②検査領域を狭くすると妥当な風速ベクトルが算出されない。

③探査領域を狭くすると算出される風速が遅くなる。

6.3 エアコンの吹出風向を変化させた場合のPIV測定

① caseG (吹出風向 28[°]) では、エアコンの吹出気流は、1.7～2.5[m/s] の風速となり、床に衝突し、右側と左側壁面に向かう気流が生じる。

② caseH (吹出風向 60[°]) では、エアコンの吹出気流は、1.5～2.0[m/s] の風速となり、右側壁面に衝突し、天井面と床面に向かう気流が生じる。天井面と床面付近では循環流を形成し、0.4[m/s] 以下の風速となる。

③各フレーム間隔で算出した風速ベクトルのデータから最適と考えられる風速ベクトルを選択して、瞬時風速

ベクトル分布を合成することは、全体の風速分布をより正確に把握できると考えられる。

注釈

- ※1 輝度分布を比較する範囲。
- ※2 検査領域の輝度分布と類似性の高い領域を探索する範囲。
- ※3 検査領域と探索領域。
- ※4 撮影画像の画素の間隔と実際の距離との換算係数であるキャリブレーション値は、撮影断面に校正用のプレートを設置し、実際の距離が認識できる画像を撮影し求める。
- ※5 本研究で対象とした実験用チャンバーは、換気設備がないため一定時間スモークを供給すると室内全体がスモークで充満してしまい、室内全体を可視化できる時間は限られる。
- ※6 解析可能風速は、解析時のフレーム間隔 8 [msec]、探索領域 ± 2 [pixel] とした場合、最小値で $2.95[\text{mm}/\text{pixel}] \div 8[\text{msec}] \times 1[\text{pixel}] = 0.36[\text{m}/\text{s}]$ 、最大値で $2.95[\text{mm}/\text{pixel}] \div 8[\text{msec}] \times 2[\text{pixel}] = 0.72[\text{m}/\text{s}]$ となる。
- ※7 異なる解析時のフレーム間隔で算出した吹出風向 60[°] の瞬時風速分布 (t=6.4[sec]) の測定点 (X=350[mm]、Z=375[mm]) のデータを用いる。
- ※8 最小の移動量は、1時刻目の検査領域内の粒子群の形状と2時刻目の探索領域から探し出された粒子群の形状の変化が小さく、妥当な風速ベクトルを算出できると考えられる。

参考文献

- 文1) 可視化情報学会：PIVハンドブック、森北出版株式会社、2002年
- 文2) 小前、赤林ら：「住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式に関する研究 その4 IHレンジ周辺の気流性状のPIV測定」、日本建築学会大会学術講演会論文集、2017年

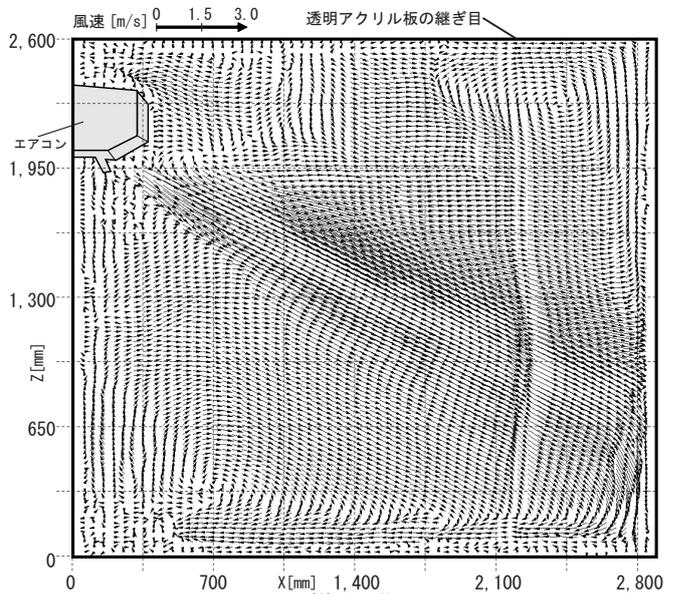
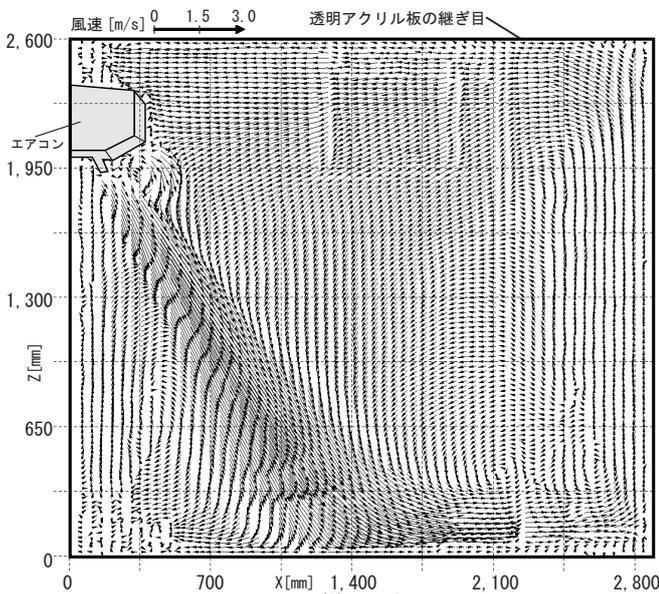


図 11 各フレーム間隔で算出された最適と考えられる風速を合成した平均風速ベクトル分布
 (1) caseG (吹出風向 28[°]、t=8.8～16.8[sec])
 (2) caseH (吹出風向 60[°]、t=6.4～14.4[sec])

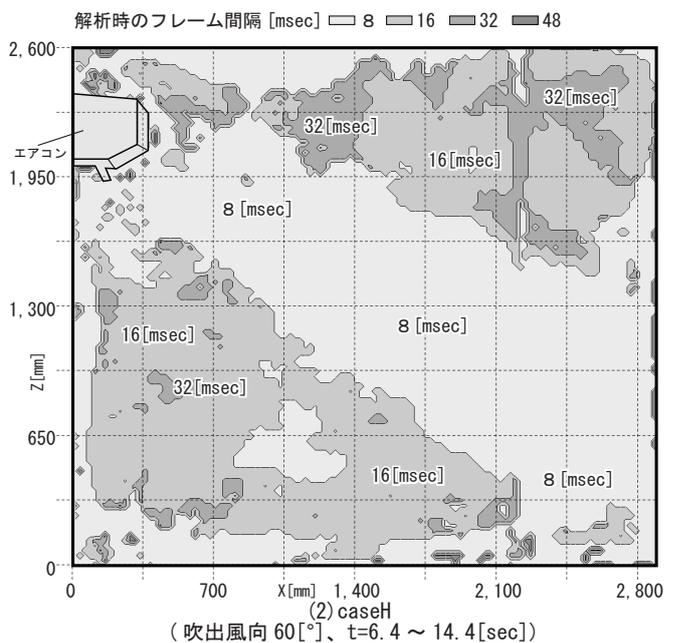
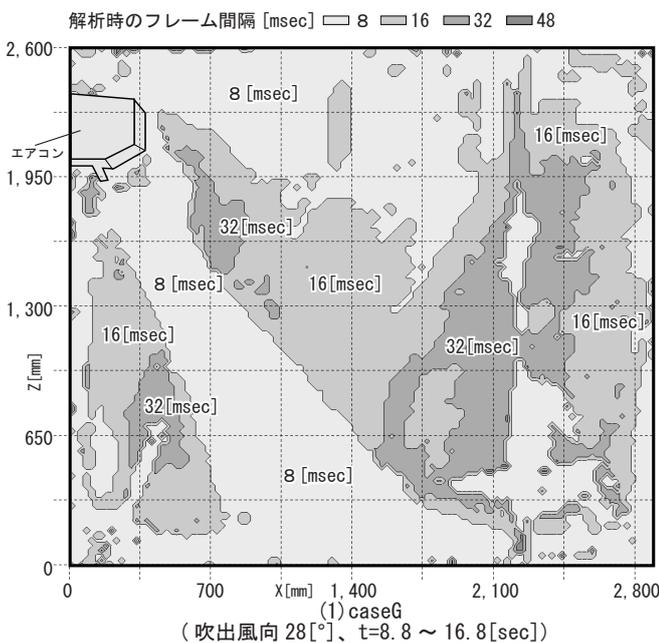


図 12 各フレーム間隔で算出された最適と考えられる風速を合成した解析時のフレーム間隔の分布
 (1) caseG (吹出風向 28[°]、t=8.8～16.8[sec])
 (2) caseH (吹出風向 60[°]、t=6.4～14.4[sec])