

実大室内空間を対象とした PIV 測定に関する基礎的研究 冷暖房時及び複数のカメラを用いた PIV 解析方法の検討

小栗 壮太 指導教員 有波 裕貴 助教

1 研究目的

流体の速度情報を得る手段として、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) がある。PIV は、非接触で同一面の速度情報を複数の位置において測定することが可能な解析手法である。

これまでの PIV 測定に関する研究では、300[mm]×300[mm] 程度の範囲を撮影、解析することが多く、実大の室内空間を床から天井までの範囲で測定した例はない。既往の研究^{文1)}では、実大室内空間 (3[m]×3[m]) に測定対象範囲を拡大し、様々な気流速度が混在する室内空間の PIV 解析手法について検討を行った。本研究では、上記で検討した PIV 解析手法を用いて、家庭用エアコンが設置された実大室内空間における PIV 測定を行い、冷暖房時と送風時の解析手法の比較検討を行う (実験①)。更に、測定範囲を拡大し、複数台カメラで撮影した場合において検討を行う (実験②)。実大室内空間を対象とする PIV 測定に関する基礎的な検討を行うことを目的とする。

2 PIV 解析

図1に PIV 解析方法、図2にフレーム間隔をスキップさせた解析方法の概要、図3に最適と考えられる風速ベクトルの選択方法の概要を示す。PIV では、キャリブレーション値^{*1}と解析フレーム間隔によって算出できる風速範囲が変化し、遅い風速は解析フレーム間隔を変化させることで解析することが可能であると考えられる。そこで、解析フレーム間隔を変化させた PIV 解析を行い、算出された同時刻・同位置の風速ベクトルの中から最適と考えら

れる風速ベクトルを選択することで、速い風速と遅い風速が混在する室内気流にも対応した解析方法を検討する。本研究では、画像取得時の撮影フレーム間隔及びスキップしたフレーム間隔での解析を行う。解析可能風速範囲内で算出されたベクトルの中から、最小移動量^{*2}のベクトルを選択することで一つの風速ベクトル分布を作成する^{*3}。

3 冷暖房時を対象とした PIV 測定 (実験①)

3.1 実験条件: 表1に実験①の case、図4に実験①の測定対象空間を示す。チャンバーの左側壁面上部には家庭用エアコンが設置されており、実験時に稼働する。エアコンの吹出風向は case1 で風向1 (水平面から下向き 30[°])、case2 で風向6 (水平面から下向き 62[°]) とする。温度条件は等温、冷房、暖房とする。エアコン吸込・吹出の温度差^{*4}は、等温、冷房、暖房でそれぞれ、約 0 [°C]、20 [°C]、30 [°C] とする。エアコンの風量は微風 (約 500 [m³/h]) とする。

3.2 実験概要: 表2に実験①の測定機器の仕様、表3に実験①の PIV 測定パラメータを示す。チャンバー内には室温調整用の空調機と蓄熱材を設置する。まず最初に空調機を用いてチャンバー内の温度を、冷房では約 45 [°C]、暖房では約 0 [°C] に設定する。蓄熱材の温度が室温と同様となった後、空調機を停止し、測定対象エアコンを稼働させる。エアコンの吸込・吹出温度差が一定となった状態で PIV 測定を行う。エアコンの設定温度は冷房で 18 [°C]、暖房で 30 [°C] とする。PIV 測定対象断面は y 方向の中央とし、レーザ

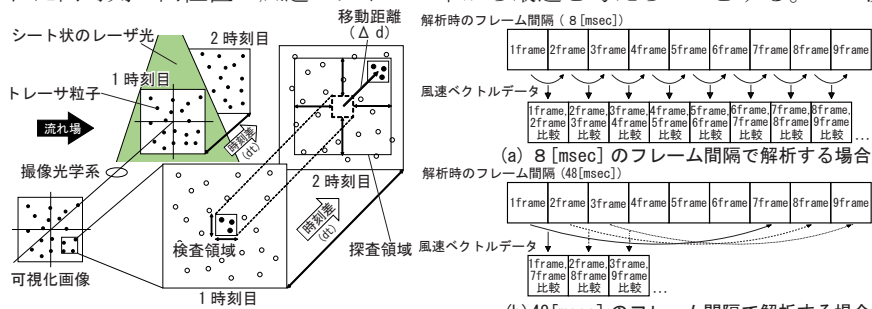
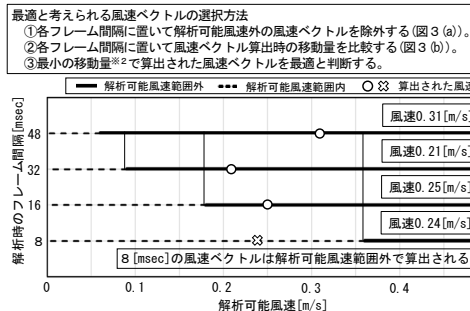


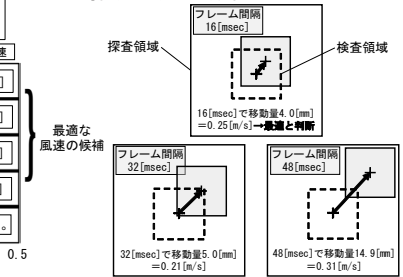
図1 PIV 解析方法



(a) 解析可能風速外のベクトルの削除



図2 フレーム間隔をスキップさせた解析方法の概要



(b) 風速ベクトルの算出に用いられた移動量の比較

図3 最適と考えられる風速ベクトルの選択方法の概要

表1 実験①の case

case	吹出風向(風向角)		空調条件
	case1	case1-1	風向1 (水平面から下向き30[°])
	case1-2	風向1 (水平面から下向き30[°])	冷房
	case1-3	風向1 (水平面から下向き30[°])	暖房
case2	case2-1	風向6 (水平面から下向き62[°])	等温
	case2-2	風向6 (水平面から下向き62[°])	冷房
	case2-3	風向6 (水平面から下向き62[°])	暖房

表2 実験①の測定機器の仕様

ハイスピードカメラ		Photron FASTCAM SA3	
レーザ	LD励起:	出力: 3 [W]	DPGL-3W×2台
	YAG/YVO ₄ レーザ	出力: 2 [W]	DPGL-2W
	波長: 532 [nm]	出力: 1 [W]	G1000
スモークジェネレータ	DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002×2台		
解析ツール	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver. 4.0.2	
	PIV解析	FlowExpert ver1.2.13	

表3 実験①の PIV 測定パラメータ

対象断面		鉛直断面 (y=1,500 [mm])			
画像サイズ [pixel]	1,024×1,024				
キャリブレーション値 ^{*1} [mm/pixel]	2.94				
対象領域 [mm]	2,900×2,600				
撮影時のフレーム間隔 [fps] [msec]	125 (8)				
シャッタースピード [sec]	1/125				
解析時のフレーム間隔 [msec]	8	16	32	48	
検査領域 [pixel]	32×32				
探査領域 [pixel]	±10				
解析可能風速 [m/s]	最小風速	0.368	0.184	0.092	0.061
	最大風速	6.615	3.308	1.654	1.103

4台(3[W]×2、2[W]、1[W])とスモークジェネレータ2台によって可視化する。撮影にはハイスピードカメラ(Photron FASTCAM SA3)、解析にはFlowExpert ver.1.2.13を使用する。PIV解析は、撮影時のフレーム間隔(8[msec])とスキップしたフレーム間隔(16、32、48[msec])で行う。解析可能風速範囲はフレーム間隔8[msec]で約0.37~6.6[m/s]、16[msec]で約0.18~3.3[m/s]、32[msec]で約0.09~1.7[m/s]、48[msec]で約0.06~1.1[m/s]となる。

3.3 各 case の気流性状: 図5、6に実験①の平均風速ベクトル分布を示す。

(1) 等温条件(図5、6(a)): case1-1では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.4[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.3[m/s]となる。右上隅角部付近と床面付近に渦が形成される。case2-1では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.1[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.5[m/s]となり、左下隅角部付近と右側壁面付近で渦が形成される。

(2) 冷房条件(図5、6(b)): case1-2では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.1[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.3[m/s]となる。吹出気流に対して室の上部では概ね下降気流となる。下部では小さな渦が形成され、

複雑な気流分布となる。case2-2では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.3[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.4[m/s]となる。室の上部では小さな渦が形成される。

(3) 暖房条件(図5、6(c)): case1-3では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.3[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.3[m/s]となる。吹出気流はx=2,100[mm]付近から室の上部に拡散し、下部では複雑な気流分布となる。case2-3では、風速はエアコン吹出部分中心で約1.5[m/s]、吹出部分以外で約0.1~0.5[m/s]となり、吹出気流に対して室の上部では小さな渦が形成される。

3.4 最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布(図7、8): 図7、8に実験①の最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布を示す。case1-1(等温)では、吹出気流の領域を除く部分でフレーム間隔16、32[msec]が選択される。case1-2(冷房)では、風速が比較的遅い渦の中心付近で局所的にフレーム間隔48[msec]が選択され、case1-2(暖房)では、吹出気流周辺付近や風速の変動が大きい部分でフレーム間隔32、48[msec]が選択される。case2-1(等温)では、選択されるベクトルがcase1-1と概ね同様となる。case2-2(冷房)では、吹出気流が吹き降ろす部分と風速の変動が大きい部分でフレーム間隔32、48[msec]が選択され、case2-3(暖房)では、吹出気流周辺でフレーム間隔32、48[msec]が選択される。

4 複数台のカメラを用いたPIV測定(実験②)

4.1 実験条件: 図9に実験②の測定対象空間を示す。

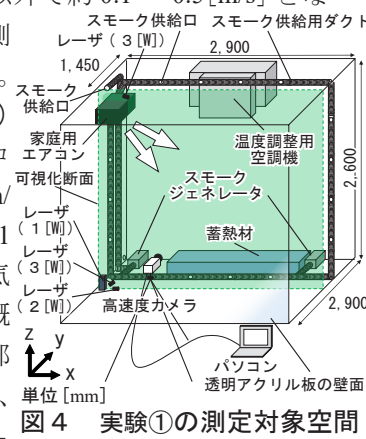


図4 実験①の測定対象空間

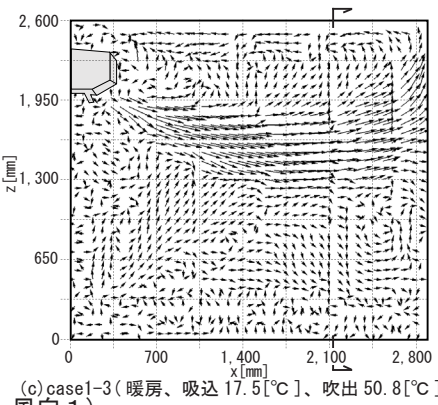
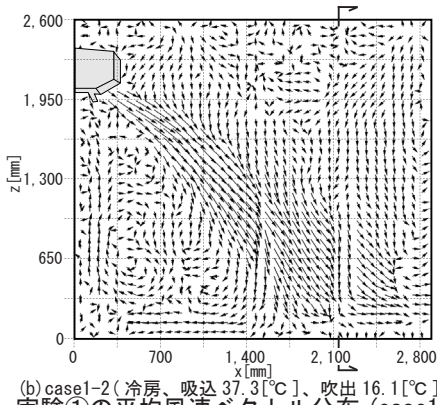
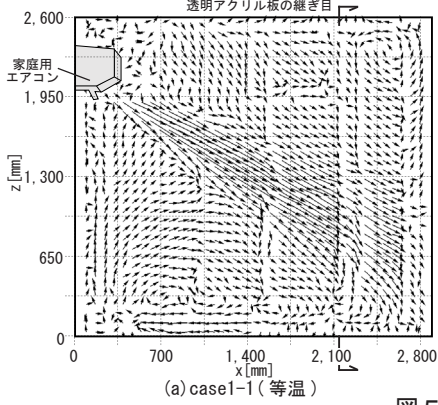


図5 実験①の平均風速ベクトル分布 (case1、風向1)

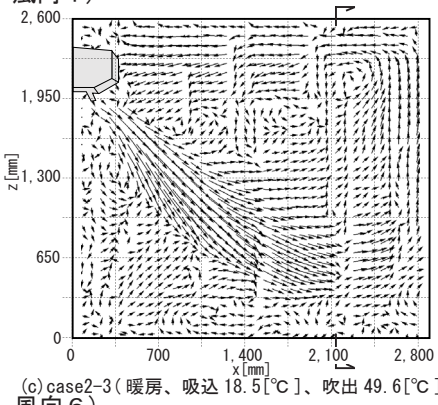
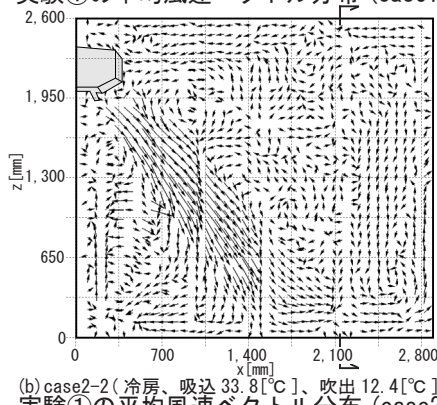
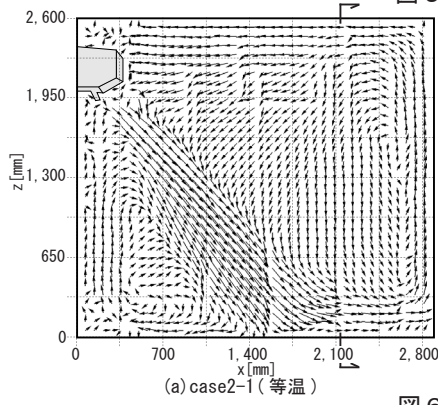


図6 実験①の平均風速ベクトル分布 (case2、風向6)

測定対象は 5,000[mm]×2,200[mm]×3,000[mm] の実大室内空間を模擬したチャンバーとする。チャンバー右壁面上部には家庭用エアコンが設置されており、実験時には送風運転を行う。実験条件は、caseA では家庭用エアコンのみによる送風、caseB では家庭用エアコンに加えて、測定対象断面左上と左下に小型扇風機を 2 台設置する。扇風機①の風向は下向き、扇風機②の風向は右向きとする。

4.2 実験概要：表 4 に実験②の測定機器の仕様、表 5 に実験②の PIV 測定パラメータを示す。PIV 測定対象断面は y 方向の中央とし、レーザ 7 台 (3 [W]×2、2 [W]×4、1 [W]) とスモークジェネレータ 2 台によって可視化する。4 台のカメラ 1 は測定対象断面を四分分割するように配置し、カメラ 2 はエアコン吹出部分を詳細に撮影するため接近して配置する。PIV 解析には Flowexpert ver.1.2.13 を使用する。実験②でも実験①と同様に撮影時のフレーム間隔とスキップしたフレーム間隔で解析を行う。解析可能風速範囲は、カメラ 1 では 8、16、32、48[msec] のフレーム間隔でそれぞれ約 0.174～4.17、0.087～2.09、0.043～1.04、0.029～0.695[m/s]、カメラ 2 では約 2.67、5.33、10.7、16[msec] のフレーム間隔でそれぞれ約 11.1～0.461、5.54～0.231、2.77～0.115、1.85～0.077[m/s] となる。図 10 に可視化断面の各範囲における PIV 解析結果の合成方法を示す。各カメラの撮影範囲には重複する領域が存在する。重複する領域では、まずカメラ 1 により各測定点ごと解析時のフレーム間隔 [msec] 8 16 32 48

に算出された風速成分を平均して PIV 解析結果を合成する。その後、カメラ 2 の撮影範囲ではカメラ 2 の PIV 解析結果により各測定点の値を置換する。

4.3 各 case の気流性状 (図 11)：図 11 に実験②の平均風速ベクトル分布を示す。

(1)caseA (家庭用エアコンのみ)：エアコン吹出部分中心で風速は約 3.0[m/s] となり、吹出気流は風速約 1.0[m/s] で床面付近に到達する。床面付近では左右に吹出気流が分かれ、風速約 0.1～0.5[m/s] で壁面と天井面に沿ってエアコンに向かう 2 つの循環流が形成される。吹出気流右側では、風速約 0.01～0.07[m/s] で中心部に小さな渦や細かい気流の乱れが発生する。左側では、x=0～1,000[mm] の範囲で定常的な渦が発生する。

(2)caseB (家庭用エアコン+扇風機 2 台)：エアコン吹出部分中心での風速は、約 2.7[m/s] となり、吹出気流は風速約 1.0[m/s] で床面に到達する。扇風機の吹出気流では約 0.5～1.3[m/s] が算出され、左下の扇風機とエアコンの吹出気流が衝突し、風速約 0.3～0.9[m/s] の上昇する気流が発生する。エアコン吹出気流左側では、風速約 0.05～0.3[m/s] で上昇する気流の両側に定常的な渦が発生し、天井面付近では、風速約 0.06～0.2[m/s] の複雑な気流分布となる。

4.4 最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布 (図 12)：図 12 に実験②の最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布を示す。2 case 共にカメラ 1 では概ね 8 [msec]、カメラ 2 で

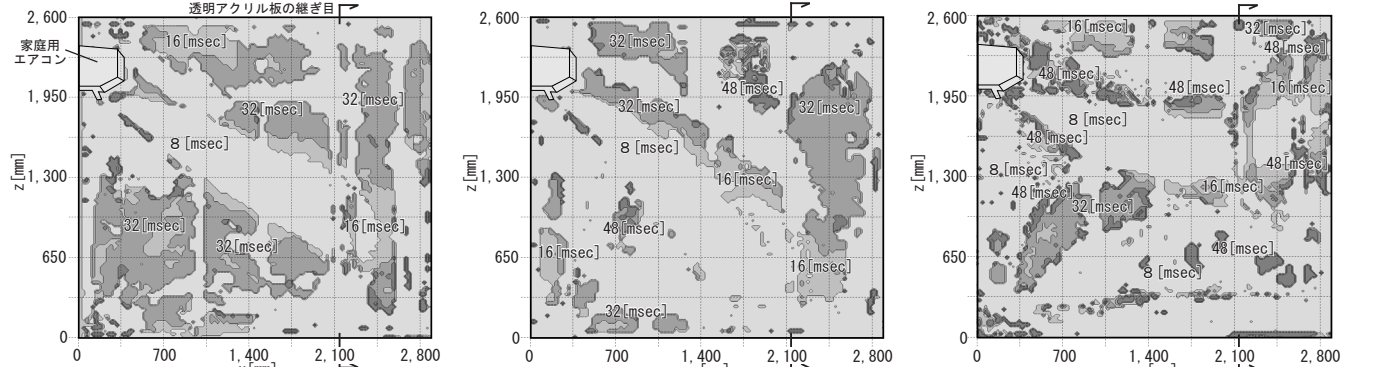


図 7 実験①の最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布 (case1、風向 1)

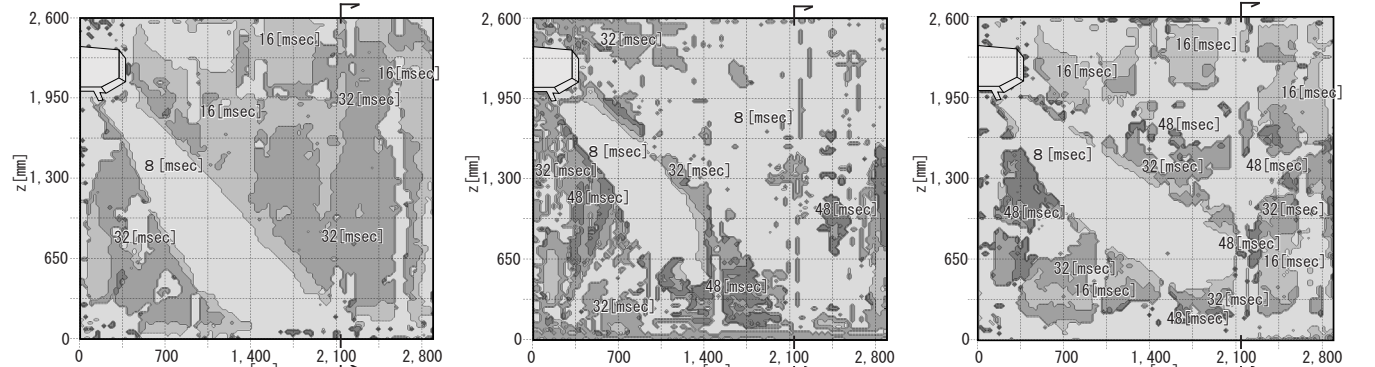


図 8 実験①の最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布 (case2、風向 6)

は概ね 2.67、5.33[msec] のフレーム間隔が選択される。
 caseA では、左側壁面付近の大きな渦で概ね 16[msec]、吹出気流左側では中心部に、カメラ 1 では概ね 16、32[msec]、カメラ 2 では概ね 10.7[msec] が選択される。
 caseB では室上部で 16[msec] が選択される傾向がある。

5 まとめ

5.1 冷暖房時を対象とした PIV 測定

- ① 冷暖房時では下降気流や上昇気流が生じ、等温時と比較して小さな渦が形成される。
- ② 等温時と比較して、冷暖房時では渦の中心部分や吹出気流付近、風速の変動が大きい部分で比較的長いフレーム間隔のベクトルが選択される。

5.2 複数台撮影カメラを用いた PIV 測定

- ① caseA (家庭用エアコン) の場合、吹出気流が床面に到達後、左右に分かれて循環流を形成する。
- ② caseB (家庭用エアコン+扇風機 2 台) の場合、エア

表 4 実験②の測定機器の仕様

カメラ	カメラ1	ARGO VCXU-23M × 4 台
	カメラ2	ARGO VCXU-04M × 1 台
レーザー	LD 励起:	DPGL-3W × 2 台
	YAG/YVO ₄ レーザ	DPGL-2W × 4 台
	波長: 532[nm]	G1000
スモークジェネレータ		Antari FOG MACHINE Z-1200 II
		DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002 × 2 台
解析ツール	カメラ制御	ARGO StreamPix ver8.4
	PIV解析	FlowExpert ver1.2.13

表 5 実験②の PIV 測定パラメータ

カメラ	VCXU-23M (カメラ1)	VCXU-04M (カメラ2)
対象断面	鉛直断面 (y=1,500[mm])	
カメラ 1 台の画像サイズ [pixel]	1,920 × 1,200	
キャリブレーション値*1 [mm/pixel]	1.39	1.23
対象領域 [mm]	5,000 × 2,200	
撮影時のフレーム間隔 [fps]	125	375
シャッタースピード [sec]	1/125	1/375
解析時のフレーム間隔 [msec]	8.00 16.0 32.0 48.0	2.67 5.33 10.7 16.0
検査領域 [pixel]	40 × 40	
探査領域 [pixel]	±24	
解析可能風速 [m/s]	最小風速	0.174 0.087 0.043 0.029 0.461 0.231 0.115 0.077
	最大風速	4.17 2.09 1.04 0.695 11.1 5.54 2.77 1.85

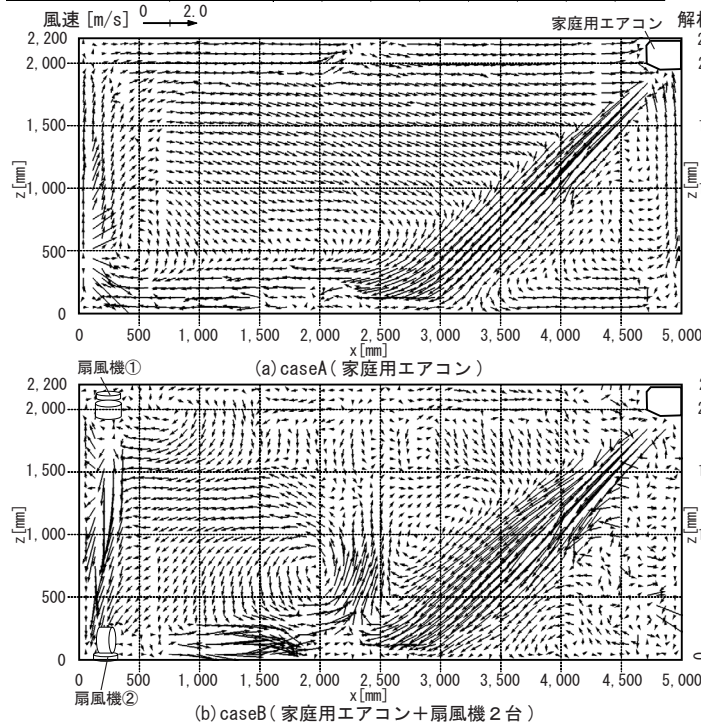


図 11 実験②の平均風速ベクトル分布

コンと扇風機の吹出気流が衝突し上昇する気流が発生し、その両側に定常的な渦が発生する。

- ③ 広い範囲で 8、(2.67、5.33) [msec] が選択され、渦の中心や風速の変動が大きい部分で概ね 16、32、(10.7) [msec] が選択される。

注釈
 ※1 撮影画像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て、実際の距離が画像上で認識できるように撮影して求める。
 ※2 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時刻目の探査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。
 ※3 解析可能風速の範囲内の風速ベクトルが存在しない場合は、例外的にサブピクセル解析で算出した風速ベクトルを選択する。
 ※4 吸込・吹出温度差は、吸込口と吹出口それぞれに2点ずつ設けた熱電対で測定し、実験時の平均値とする。

参考文献

- 文1) 本多・赤林ら:「実大室内空間モデルを対象としたPIV解析に関する基礎的研究 その2 フレーム間隔をパラメータとした解析」日本建築学会学術講演梗概集、2021年
- 文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

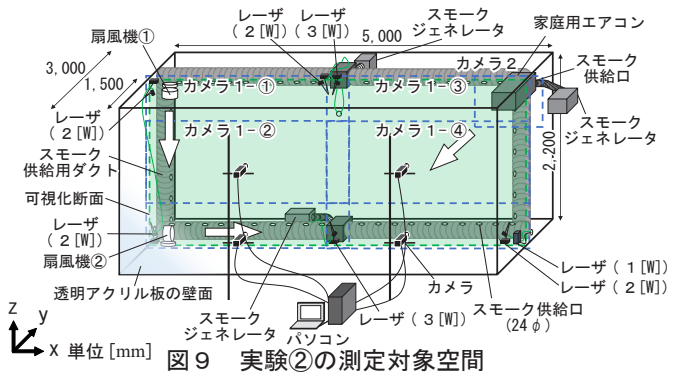


図 9 実験②の測定対象空間

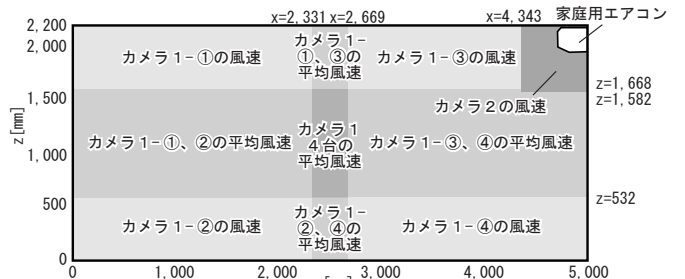


図 10 可視化断面の各範囲における PIV 解析結果の合成方法

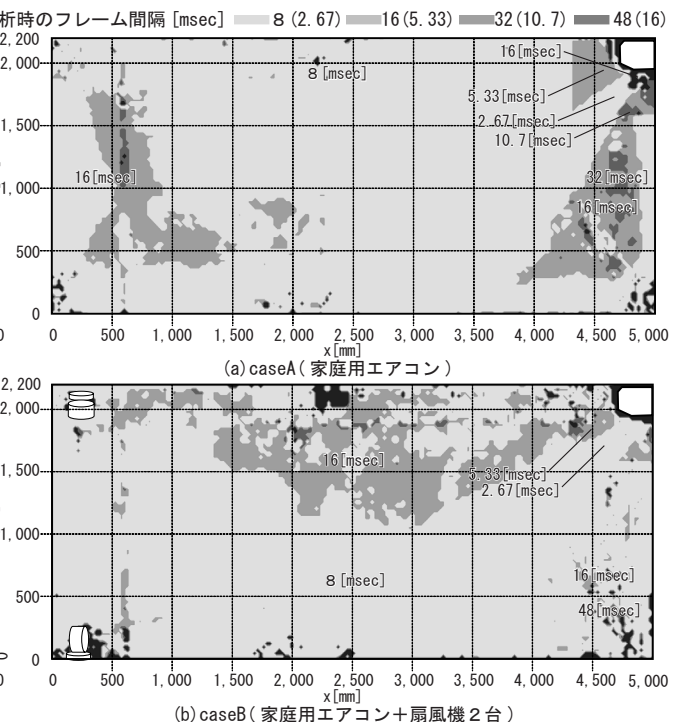


図 12 実験②の最適と考えられる風速が選択された解析フレーム間隔の空間分布