

実大室内空間を対象とした PIV 測定法に関する基礎的研究 等温時における模擬人体周辺気流を対象とした PIV 測定

張 欽 指導教員 有波 裕貴 助教

1 研究目的

流体の速度を可視化画像から解析する手法として、粒子画像流速測定法^{文1)}（以下 PIV）が挙げられる。PIV は熱線風速計等による測定法とは異なり、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手法である。

これまで建築分野における PIV 測定に関する研究では縮尺模型や室内空間の一部を対象とした撮影、解析が多く、実大の室内空間全体を同時に測定した例はほぼない。既往の研究^{文2)}では、実大室内空間を対象として測定範囲を 5,000[mm] × 2,200[mm] に拡大し、複数台のカメラを用いて様々な気流速度が混在する室内空間の PIV 解析手法の検討を行った。

本研究ではまず、家庭用エアコンが設置された実大室内空間 (5,000[mm] × 2,200[mm]) において、模擬人体 (パネル^{※1}及びマネキン) を移動させ、マルチカメラ・レーザによる人体周辺の全体的な気流性状と実大室内空間の気流性状の同時撮影・PIV 解析を行う (実験①)。更に、実験①と同様な実大室内空間に模擬人体を椅座位で設置し、人体周辺の全体的な気流性状と人体各部付近の局所的な気流性状の同時撮影・PIV 解析 (マルチスケール PIV) を行い (実験②)、実大室内空間における人体周辺の気流性状の把握する手法を検討することを目的とする。

2 研究概要

2.1 模擬人体を移動させた場合の PIV 測定 (実験①)

2.1.1 実験条件：図 1 に測定対象空間と機器の概要、表 1 に実験 case を示す。case1-1 ではパネル移動・エアコン停止、case1-2 ではパネル移動・エアコン稼働、case2-1 ではマネキン移動・エアコン停止、case2-2 ではマネキン移動・エアコン稼働となる。対象空間は家庭用エアコンが設置された 5,000[mm] (幅) × 2,200[mm] (高

さ) × 3,000[mm] (奥行き) の実大室内空間を模擬したチャンバーとする。1つの壁面は撮影のため透明なアクリル板で作成されている。チャンバーに向かって右壁面上部に家庭用エアコンが設置されており、実験時には送風運転 (風向：水平から下向き 51[°]、風量 5) を行う。チャンバー中央に設置したパネル (1,600[mm] (高さ) × 900[mm] (幅)) 及び模擬人体 (身長:1,700[mm]) はトラバースを用いて 1,000[mm] の直線レールを 4 秒で一往復 (最大速度:0.5[m/s]) させる。

2.1.2 実験概要：表 2 に測定機器の仕様、表 3 に PIV 測定パラメータを示す。PIV 測定対象断面は y 方向の室中央とし、レーザ 10 台 (3 表 1 実験 case (実験①) [W] × 2、2 [W] × 7、1 [W] × 1) とスモークジェネレータ 4 台を用い、スモーク供給用ダクト^{※3}を接続することでシーリングを

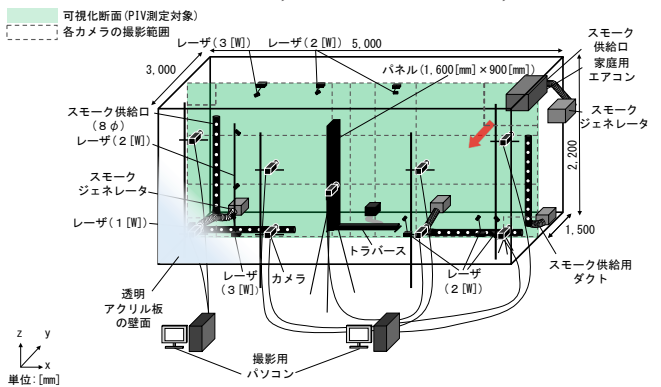
表 2 測定機器の仕様 (実験①、実験②)

実験case	移動物体	エアコン
case1-1	パネル	停止
case1-2		稼働
case2-1	マネキン	停止
case2-2		稼働

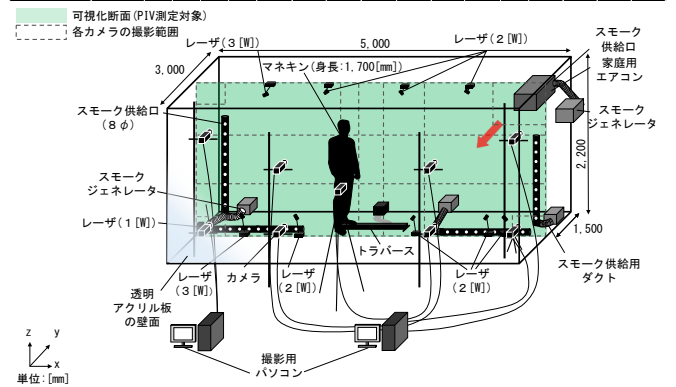
カメラ	カメラA	カメラB
カメラA	工業用カメラ (実験① × 5 台、実験② × 6 台) (1920[pixel] × 1200[pixel], 125[fps])	工業用カメラ (実験① × 4 台、実験② × 6 台) (720[pixel] × 540[pixel], 375[fps])
レーザ	LD 励起: YAG/YVO4 レーザ 波長: 532[nm]	出力: 3 [W] 出力: 2 [W] 出力: 1 [W]
スモークジェネレータ	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 4 台 (実験①) Officeek 400W FOG MACHINE × 5 台 (実験②)	
解析ツール	PIV解析	FlowExpert ver 1.2.13

表 3 PIV 測定パラメータ (実験①)

カメラ	カメラA	カメラB-1 (case1-1, case2)	カメラB-1 (case1-2)	カメラB-2、B-3、B-4												
PIV解析手法	直接相互相関法															
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	720 × 540														
キャリブレーション値 ^{※2} [mm/pixel]	1.19	1.21	1.15	0.64												
対象領域 [mm]	2,285 × 1,428	871 × 653	828 × 621	461 × 346												
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														
検査領域 [pixel]	36 × 36	35 × 35	37 × 37	66 × 66												
探査領域 [pixel]	±28	±9	±10	±17												
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	2.67	5.33	10.7	16.0				
解析可能風速 [m/s]	最大風速 4.17	2.08	1.04	0.69	4.10	2.05	1.03	0.68	4.30	2.16	1.08	0.72	4.10	2.04	1.02	0.68
	最小風速 0.15	0.07	0.04	0.03	0.453	0.227	0.113	0.076	0.431	0.216	0.108	0.07	0.240	0.120	0.060	0.040



(a) case1-2 (パネル移動、エアコン稼働)



(b) case2-2 (マネキン移動、エアコン稼働)

図 1 測定対象空間と機器の概要 (実験①)

行う。カメラは9台(カメラA(125[fps])×5、カメラB(375[fps])×4))使用し、カメラAは測定対象断面の中央部分を撮影するように1台設置し、合計5台で測定対象断面全体を分割するように設置する。カメラBはエアコン吹出部分、またはチャンバー隅角部を詳細に撮影するためそれぞれ設置する。

PIV解析にはFlowExpert ver 1.2.13を使用する。PIV解析ではキャリブレーション値と解析対象とする2時刻画像のフレーム間隔によって算出できる風速範囲が変化する。そこで、既往の研究^{文3)}で検討を行った解析方法を用いて、解析する際のフレーム間隔を変化(スキップ)させて解析を行い、解析した4つのフレーム間隔で最適なベクトルを選択する^{文4)}。解析可能風速は、カメラAでは8、16、32、48[msec]の解析フレーム間隔で、それぞれ0.149~4.17、0.074~2.08、0.037~1.04、0.025~0.69[m/s]、カメラBでは約2.67、5.33、10.7、16.0[msec]の解析フレーム間隔でそれぞれ0.24~4.1、0.12~2.04、0.06~1.02、0.04~0.68[m/s]となる。

既往の研究^{文4)}で検討を行った補間方法を用いて任意の時刻及び測定点のPIV解析結果に対して周囲の空間の速度情報を参照する補間による誤ベクトルの補正を行う。対象とする測定点の風速がその周囲8点の平均スカラー風速に対して一定^{文5)}の範囲を超える場合は、周囲8点の各風速成分の平均風速^{文6)}により補間する。

図2に可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法を示す。本研究では複数のカメラでPIV測定を行った場合、各カメラの解析結果を1つに合成し、測定対象全体の解析結果とする。カメラAの撮影範囲が重複する領域では、各カメラの同じ測定点において、算出された風速成分を平均することで解析結果を合成する。またチャンバー隅角部とエアコン吹出部分を撮影しているカメラBでは、カメラBの解析結果のみを用いて合成を行う。

2.2 人体周辺気流のマルチスケールPIV測定(実験②)

2.2.1 実験条件

図3に測定対象空間と機器の概要を示す。測定対象空間は実験①と同様な空間であり、実験時には送風運転(風向:水平から下向き51[°]、風量5)を行う。模擬人体(身長1,700[mm])は右側壁面から1,500[mm]の位置に設置し、エアコンの吹出気流が

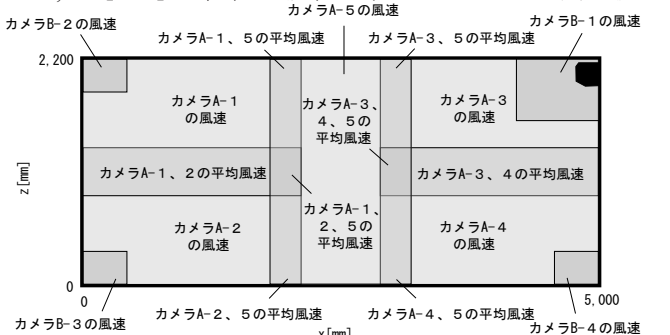


図2 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法(実験①)

直接当たることを意図する。

2.2.2 実験概要:表4にPIV測定パラメータを示す。なお、測定機器の仕様は表3と同様である。図4に可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法を示す。PIV測定対象断面はy方向の室中央とし、レーザ10台(3[W]×2、2[W]×7、1[W]×1台)とスモークジェネレータ5台を用いてスモーク供給用ダクト^{文3)}を接続することでシー징を行う。カメラは計12台(カメラA(125[fps]×6)、カメラB(375[fps]×6))による同時撮影を行う。6台のカメラAは人体周辺領域を6分割するように設置し(図4(a))、6台のカメラBは人体周辺の局所的な気流を詳細に撮影するため1台ずつ接近して配置する(図4(b))。撮影時間は10秒間とする。

実験①と同様にPIV解析にはFlowExpert ver 1.2.13を

表4 PIV測定パラメータ(実験②)

カメラ	カメラA(全体)			カメラB(局所)		
PIV解析手法	直接相互相関法					
対象断面	鉛直断面 (y=1,500[mm])					
カメラ一台の画像サイズ[pixel]	1,920×1,200			720×540		
キャリブレーション値 ^{文2)} [mm/pixel]	0.63			0.38		
対象領域[mm]	1,210×756			274×205		
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	48.0	2.67	5.33	16.0
検査領域[pixel]	50×50			32×32		
探査領域[pixel]	±50			±28		
解析可能風速[m/s]	0.079	0.039	0.013	0.142	0.071	0.024
	3.91	1.96	0.65	4.00	2.00	0.67

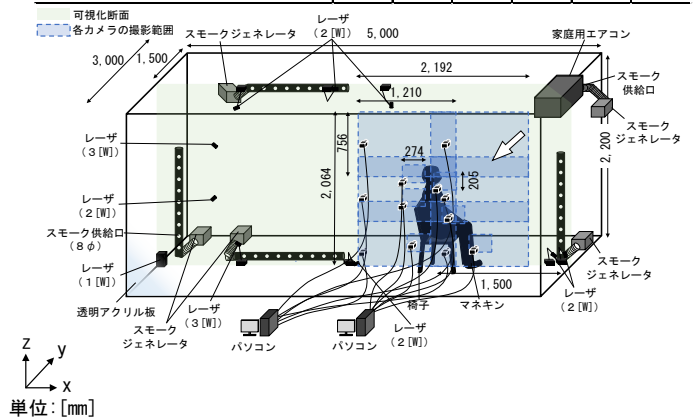


図3 測定対象空間と機器の概要(実験②)

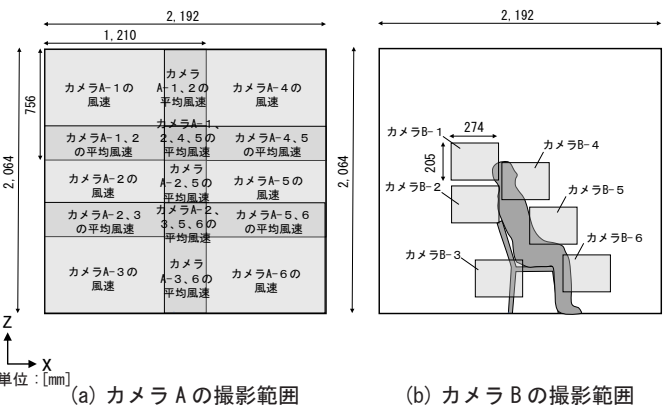


図4 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法(実験②)

使用し、撮影時のフレーム間隔とスキップした間隔で解析を行い、3つのフレーム間隔で最適な風速ベクトルを選択する^{*4}。解析可能風速は、カメラAでは8、16、48[msec]の解析フレーム間隔で、それぞれ0.079～3.91、0.039～1.96、0.013～0.65[m/s]、カメラBでは約2.67、5.33、16.0[msec]の解析フレーム間隔でそれぞれ0.142～4.0、0.071～2.0、0.024～0.67[m/s]となる。

その後、実験①と同様に誤ベクトルの補正を行う。

カメラAにおいて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、PIV解析により算出された風速成分を各測定点ごとに平均して合成を行う。

3 実験結果

3.1 模擬人体を移動させた場合のPIV測定(実験①)

図5に各caseの瞬時風速ベクトル分布を示す。

(a) case1-1(エアコン停止、パネル移動): 室中央付近では移動するパネルに引き込まれ、風速約1.0[m/s]の気流が生じる。パネル後流域の上部では定常的な渦が形成される。
 (b) case1-2(エアコン稼働、パネル移動): エアコン吹き出し部分で1.3～2.0[m/s]の風速が算出される。case1-1と比較してパネル後方では気流が引き込まれる範囲はパネルの上下方向に大きくなる傾向がある。また室中央付近の気流は風速約1.0[m/s]で移動するパネルに引き込まれる。移動中はパネル後流域の上部で定常的な渦が形成される。

(c) case2-1(エアコン停止、マネキン移動): 室中央付近では移動するマネキンに引き込まれ、風速約0.5[m/s]の

気流が生じる。気流を引き込む範囲はパネルの場合と比較して小さくなる傾向がある。またマネキンの移動範囲以外では物体の移動による定常的な気流はほとんど発生せず、風速0.1～0.3[m/s]の比較的複雑な気流分布となる。

(d) case2-2(エアコン稼働、マネキン移動): エアコン吹出部分で1.3～2.0[m/s]の風速が算出される。マネキン後方において気流が引き込まれる範囲は概ね上半身の後流域となり、他のケースと比較して小さくなる傾向がある。エアコンによる気流は室の左側壁面下部付近で風速約0.3[m/s]となり、室全体を循環する気流分布を形成する。

3.2 人体周辺気流のマルチスケールPIV測定(実験②)

図6に模擬人体周辺の瞬時風速ベクトル分布を示す。

3.2.1 人体周辺の全体的な気流性状(カメラA): エアコンの吹出気流は風速約3.0[m/s]で模擬人体の胸から腰付近に到達し、上下に分かれる。上方に流れた気流は頭部に沿って上昇し、後頭部から背部付近では風速約0.1[m/s]の渦を形成する。下方に流れた気流は模擬人体の膝に沿って流れ、風速約0.5[m/s]で床面に到達する。椅子の下部付近では風速約0.5～0.8[m/s]の上昇する気流が生じる。

3.2.2 人体周辺の局所的な気流性状(カメラB): 局所①(図6(b))では、気流は0.1～0.6[m/s]の風速で模擬人体の頭頂部から後頭部付近にかけて流れる。頭部の後流域では風速約0.1[m/s]の渦が生じる。局所②(図6(c))では風速約0.7[m/s]で背部に沿い上昇する気流が生じる。また背部付近の後流域では中心風速約0.1[m/s]の

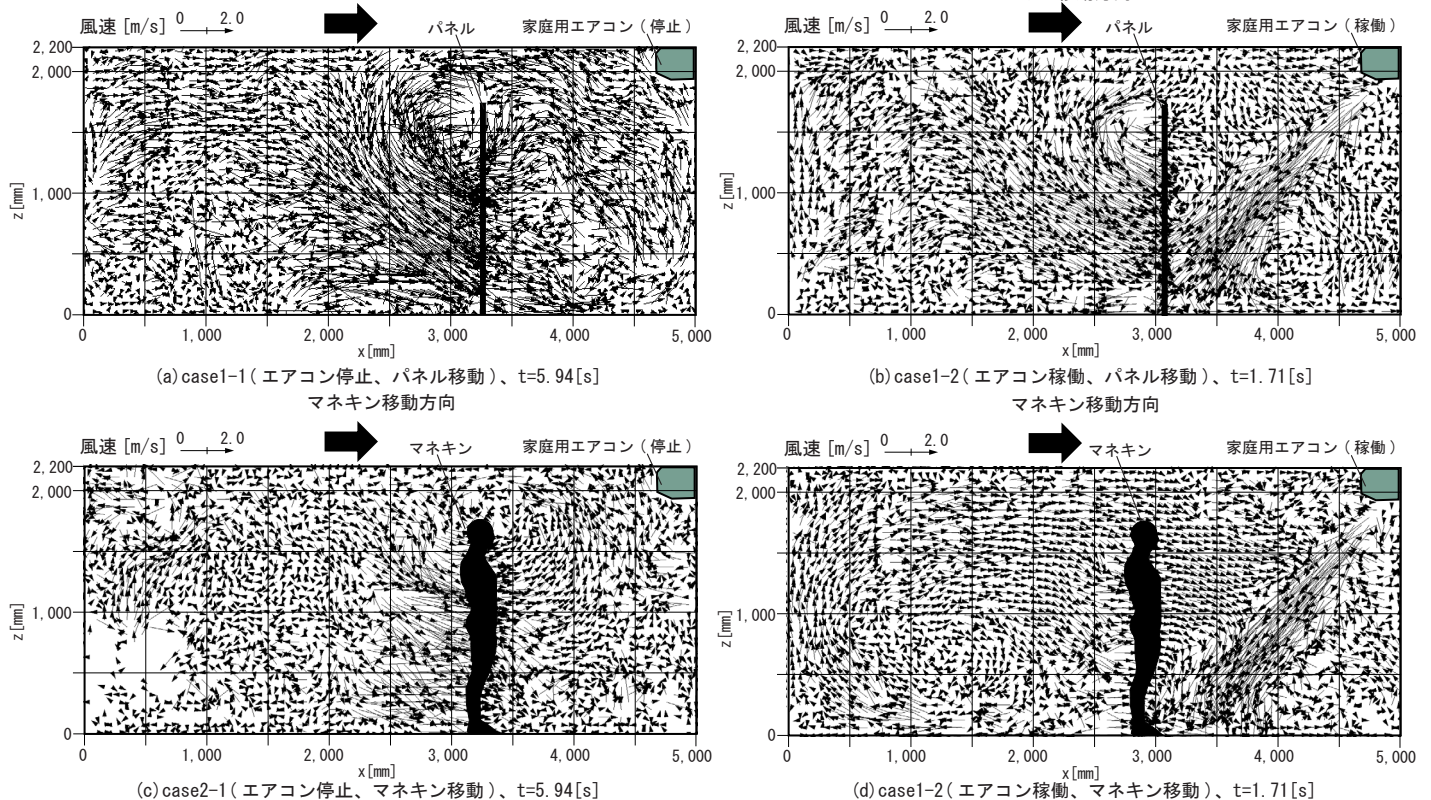


図5 瞬時風速ベクトル分布(実験①)

渦を形成する。局所③（図6(d)）では、床面付近から椅子の背もたれにかけて複雑な気流分布となる。局所④（図6(e)）では、気流は鼻先に沿い風速約1.2[m/s]で上昇する。局所⑤（図6(f)）では吹出気流は風速約3.0[m/s]で人体の腰付近に衝突し、人体に沿って下降する気流となる。局所⑥（図6(g)）では膝付近に沿って風速1.2～1.8[m/s]程度で気流が下降する。

4 まとめ

4.1 模擬人体を移動させた場合のPIV測定（実験①）

- ① case1（パネル移動）では、室中央付近の気流がパネルに引き込まれ、パネル後流域の上部においては風速約1.0[m/s]の定常的な渦が形成される。エアコンを稼働した場合、エアコンの気流はパネルによって遮られ、パネルの前後で気流分布が大きく変化する。
- ② case2（マネキン移動）では、室中央付近の気流がマネキンに引き込まれ、マネキン後流域の上部で風速約0.5[m/s]の小さな渦が形成される。エアコンを稼働した場合、マネキンが気流を引き込む範囲は小さいため、室全体を循環する気流が形成される。
- ③ case2（マネキン移動）の場合、case1（パネル移動）と比較して気流を引き込む範囲が小さいため、障害物として部屋の気流に与える影響は小さい。

4.2 人体周辺気流のマルチスケールPIV測定（実験②）

①カメラ計12台による人体周辺気流のマルチスケール

PIV測定を行った。

- ②全体的な気流場としては、エアコンの吹出気流が風速約3.0[m/s]で模擬人体の胸から腰付近に到達し、上下に分かれて流れ、後頭部から背部付近の後流域で風速約0.1[m/s]の渦を形成する。椅子下部の空間で風速約0.2[m/s]の上昇気流となる。
- ③局所撮影の結果では、模擬人体頭部と背部付近の後流域ではそれぞれ風速約0.1[m/s]の渦が形成される。椅子の背もたれ付近では複雑な気流となる。

注釈

- ※1 移動物体の気流を把握するための基礎的な実験として、単純形状であるパネルを用いる。また、厨房における局所排気装置の直接捕集率測定法では（JSTM V 6210）ではパネルを用いて人による影響を与えている。
- ※2 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、実際の距離が認識できるように撮影して求める。
- ※3 長さ1,400[mm]、直径60[mm]であり、φ8の穴が100[mm]間隔で空いている。
- ※4 解析可能風速の範囲内にあるフレーム間隔を選択する。解析可能風速が重複している範囲で複数のフレーム間隔で風速が算出された場合には相関係数の最も高いベクトルを選択する。
- ※5 測定点と8近傍の計9点の平均風速スカラー値>補正前全カメラにおける測定点の時間平均速度の最大値の0.33倍の場合、一回目の補間において、周囲8点の平均スカラー風速に対して、0.4倍以下又は1.6倍以上で補間する。その後、二回目において、0.005倍以下又は1.995倍以上で補間する。測定点と8近傍の計9点の平均風速スカラー値≤補正前全カメラにおける測定点の時間平均速度の最大値の0.33倍の場合、一回目と二回目の補間において、周囲8点の平均スカラー風速との差の値が2.0[m/s]以上の場合、補間する。
- ※6 ただし、平均する周囲8点のベクトルはそれぞれ補間前の各点の時間平均ベクトルに対して500[%]に達していないベクトルとし、500[%]以上のベクトルは平均に含めない。

参考文献

- 文1) 可視化情報学会編：PIVハンドブック、森北出版株式会社、2018年
- 文2) 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4 マルチレーザ・マルチカメラによるPIV解析」、日本建築学会学術講演梗概集、2022年
- 文3) 小栗・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3 冷暖房を対象としたPIV解析」、日本建築学会学術講演梗概集、2021年
- 文4) 赤林・有波：「マルチレーザ・カメラを用いたPIV測定・解析に関する基礎的研究 その1 実大室内空間を対象としたPIV測定法に関する基礎的検討」、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、2022年

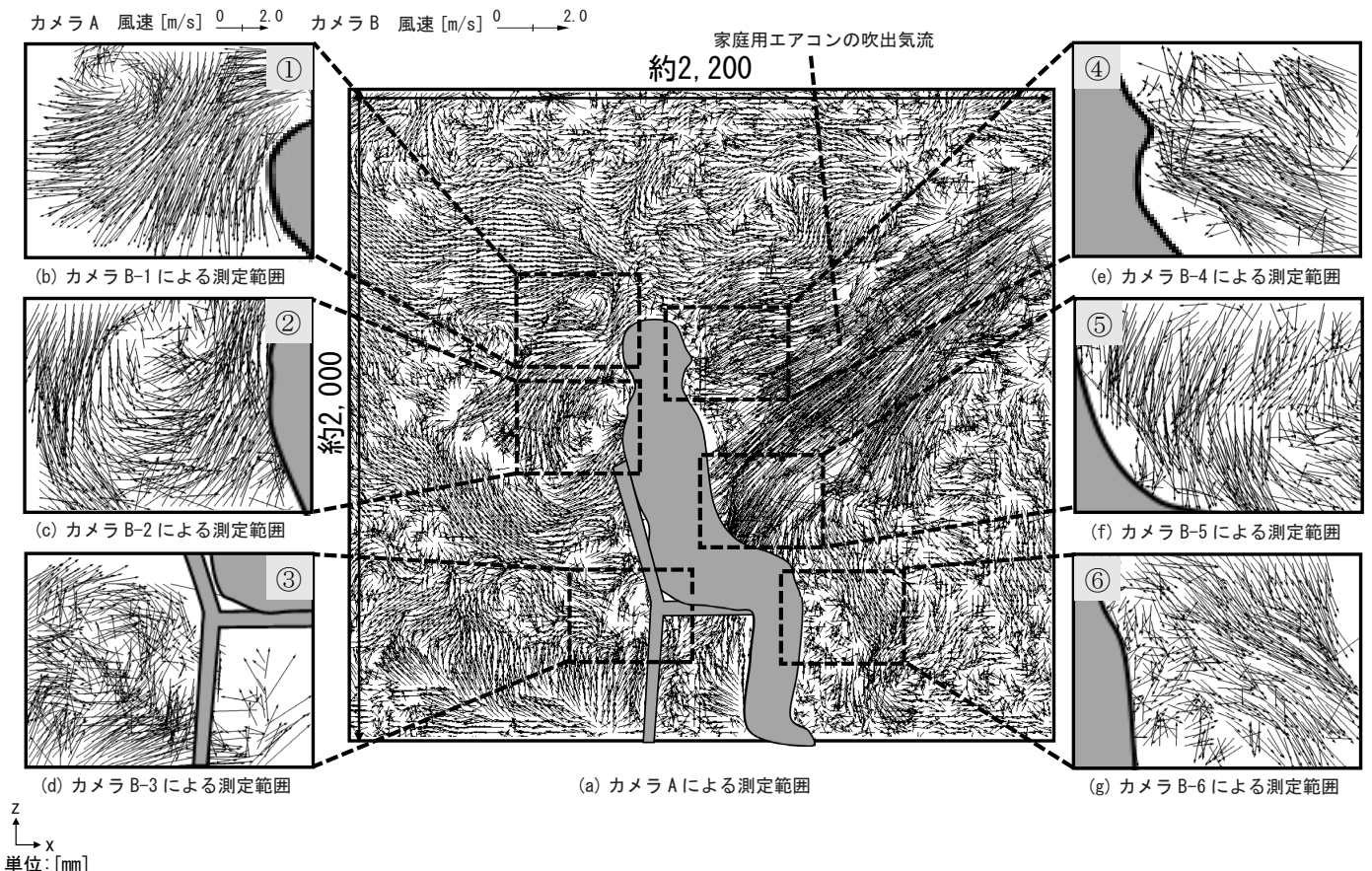


図6 模擬人体周辺の瞬時風速ベクトル分布（実験②）