

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 障害物及びエアコンの風向を変化させた場合のPIV測定・解析

本多 丈逸 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解析手法である。

これまでの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。

本研究では測定対象空間において障害物の設置やエアコンの吹出風向を変化させることで比較的複雑な気流場の可視化・PIV解析を行う。またPIV解析では対象とする2時刻画像のフレーム間隔を変化させる。複数のカメラで測定対象空間を分割して可視化・PIV解析した結果の合成手法及び誤ベクトルの補正に関する検討を行う。

2 研究概要

2.1 実験条件：図1に測定対象空間と機器の概要を、表1に実験・解析 case を示す。測定対象は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つの壁面は室外からの撮影の為に透明なアクリル板で作成されている。チャンバー右壁面上部に家庭用エアコンが設置されており、実験時には等温で送風運転を行う。風量設定は5とし、風向はcase1～case3では水平から下向き51[°]、case4では水平から下向き22[°]とする。設置する障害物は、case1では測定断面中央部に机を模擬した箱、case2では机、case3、case4では机に加えて椅子に座った模擬人体（マネキン）とする。

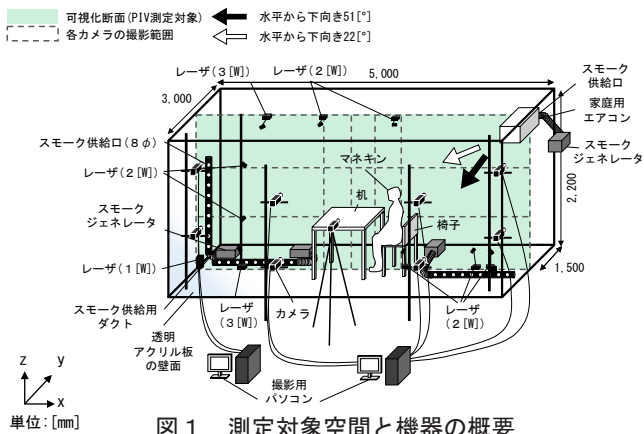


図1 測定対象空間と機器の概要

2.2 実験概要：表2に測定機器の仕様を、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、レーザー10台（3[W] × 2、2[W] × 7、1[W] × 1台）とスモークジェネレータ4台を用いる。カメラは9台（カメラA × 5、カメラB × 4台）使用

表1 実験・解析 case

Case No.	障害物	風向	8近傍計測点平均による補間対象	前後フレーム平均による補間対象
case1-1	机を模擬した箱 (900[mm] × 900[mm] × 900[mm])	水平から下向き 51[°]	補間しない	補間しない
case1-2			周囲8点の平均スカラー風速に対して0.2倍以上又は1.8倍以上	前後の時刻における平均スカラー風速に対して5倍以上
case1-3				3倍以上
case1-4			0.4倍以上又は1.6倍以上	2倍以上
case1-5				補間しない
case1-6			0.6倍以上又は1.4倍以上	5倍以上
case1-7				3倍以上
case1-8			補間しない	2倍以上
case1-9				補間しない
case1-10				5倍以上
case1-11				3倍以上
case1-12				2倍以上
case1-13			机	水平から下向き 51[°]
case2-1	周囲8点の平均スカラー風速に対して0.2倍以上又は1.8倍以上	前後の時刻における平均スカラー風速に対して5倍以上		
case2-2		3倍以上		
case2-3	0.4倍以上又は1.6倍以上	2倍以上		
case2-4		補間しない		
case2-5	0.6倍以上又は1.4倍以上	5倍以上		
case2-6		3倍以上		
case2-7	補間しない	2倍以上		
case2-8		補間しない		
case2-9		5倍以上		
case2-10		3倍以上		
case2-11		2倍以上		
case2-12	机+マネキン(着席)	水平から下向き 22[°]		
case2-13			周囲8点の平均スカラー風速に対して0.2倍以上又は1.8倍以上	前後の時刻における平均スカラー風速に対して5倍以上
case3-1				3倍以上
case3-2			0.4倍以上又は1.6倍以上	2倍以上
case3-3				補間しない
case3-4			0.6倍以上又は1.4倍以上	5倍以上
case3-5				3倍以上
case3-6			補間しない	2倍以上
case3-7				補間しない
case3-8				5倍以上
case3-9				3倍以上
case3-10				2倍以上
case3-11			水平から下向き 22[°]	水平から下向き 22[°]
case3-12	周囲8点の平均スカラー風速に対して0.2倍以上又は1.8倍以上	前後の時刻における平均スカラー風速に対して5倍以上		
case3-13		3倍以上		
case4-1	0.4倍以上又は1.6倍以上	2倍以上		
case4-2		補間しない		
case4-3	0.6倍以上又は1.4倍以上	5倍以上		
case4-4		3倍以上		
case4-5	補間しない	2倍以上		
case4-6		補間しない		
case4-7		5倍以上		
case4-8		3倍以上		
case4-9		2倍以上		
case4-10	補間しない	5倍以上		
case4-11		3倍以上		
case4-12		2倍以上		
case4-13		補間しない		

表2 測定機器の仕様

カメラ	カメラA	工業用カメラ × 5台 (1920[pixel] × 1200[pixel], 125[fps])
	カメラB	工業用カメラ × 4台 (720[pixel] × 540[pixel], 375[fps])
レーザー	LD励起:	YAG/YVO ₄ レーザー
	波長:	532[nm]
	出力:	3[W] DPGL-3W × 2台 2[W] DPGL-2W × 7台 1[W] G1000 × 1台
スモークジェネレータ	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 4台	
解析ツール	FlowExpert ver1.2.13	

表3 PIV測定パラメータ

カメラ	カメラA	カメラB-3	カメラB-1, B-2, B-4										
PIV解析手法	直接相互照法												
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[mm/pixel]	1.19	1.15	0.64										
対象領域[mm]	2,284 × 1,428	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	37 × 37	66 × 66										
探索領域[pixel]	±28	±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	4.30	2.16	1.08	0.72	4.10	2.04	1.02	0.68
	最小風速	0.149	0.074	0.037	0.025	0.431	0.216	0.108	0.072	0.240	0.120	0.060	0.040

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、4台は測定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、またはチャンパー隅角部を詳細に撮影するためそれぞれ設置する。

2.3 PIV 解析、補正、画像合成の手順：図2にPIV解析、補正、画像合成のフローを、図3にPIV解析結果における誤ベクトルを対象とした補間による補正方法を、図4に複数のカメラによるPIV解析結果の画像合成方法を示す。本研究のPIV解析はFlowExpert ver. 1.2.13を使用し、

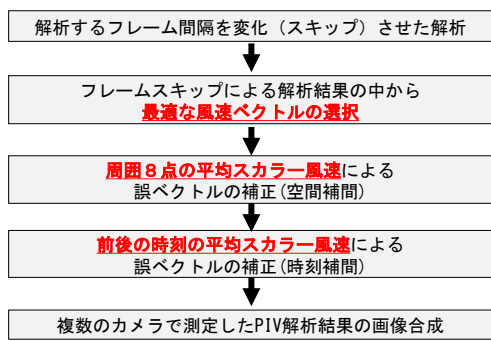
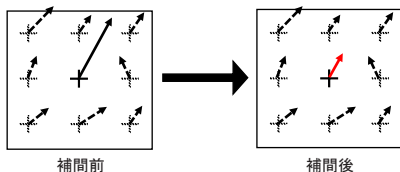


図2 PIV解析、補正、画像合成のフロー

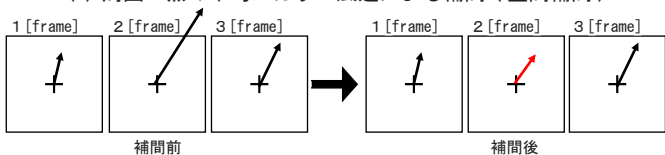
補間方法

1. 周囲8点の平均スカラー風速に対して一定範囲を超える場合、周囲8点の各速度成分の平均風速で補間する。(図3(a))
2. 前後の時刻の平均スカラー風速に対して一定以上異なる場合、前後の時刻の平均風速で補間する。(図3(b))



- ①対象の測定点のスカラー風速 : 2.0[m/s]
 ②周囲8点の平均スカラー風速 : 0.8[m/s]
 ③周囲8点の平均スカラー風速 0.8[m/s] × 1.8 = 1.44[m/s] ≤ 対象のスカラー風速 2.0[m/s]
 →補間対象と判断

(a) 周囲8点の平均スカラー風速による補間（空間補間）



- ①対象の測定点のスカラー風速 : 0.8[m/s]
 ②前後の時刻の平均スカラー風速 : 0.1[m/s]
 ③前後の時刻の平均スカラー風速 0.1[m/s] × 5倍 = 0.5[m/s] ≤ 対象のスカラー風速 0.8[m/s]
 →補間対象と判断

(b) 前後の時刻の平均スカラー風速による補間（時刻補間）

case1-3: 周囲8点の平均スカラー風速に対して0.2倍以下又は1.8倍以上
 ・前後の時刻の平均スカラー風速に対して5倍以上で補間

図3 PIV解析結果における誤ベクトルを対象とした補間による補正方法

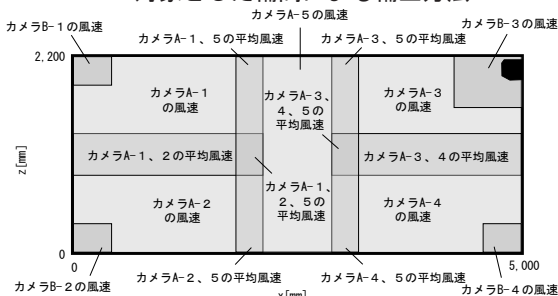


図4 複数のカメラによるPIV解析結果の画像合成方法

直接相互相関法により行う。

(1) 解析フレーム間隔を変化させた場合の解析：PIV解析ではキャリブレーション値と解析対象とする2時画面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、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、その中から最適な風速ベクトルを選択する^{※1}。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2.67、5.33、10.7、16[msec]の解析フレーム間隔でそれぞれ0.24～4.3、0.12～2.16、0.06～1.08、0.04～0.72[m/s]となる。

(2) PIV解析結果の補間による補正方法（図3）：本研究では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、前後時刻の速度情報を参照する補間による誤ベクトルの補正方法の検討を行う。まず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^{※2}により補間する（空間補間）。その後、前後の時刻の各風速成分の平均スカラー風速に対して一定以上異なる場合は前後の時刻の平均風速で補間を行う（時刻補間）^{※3}。

(3) 複数のカメラで測定したPIV解析結果の合成方法（図4）：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。その際、各カメラ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。またチャンパー隅角部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。

3 実験結果

3.1 各caseにおける補正結果：図5に瞬時風速ベクトル分布（case1:783[frame]、case2:1192[frame]、case3:813[frame]、補正なし・あり^{※4}）を示す。床面や天井付近、壁面隅角部、エアコン下部に散見されるベクトルは誤ベクトルと考えられる。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・前後の時刻の平均スカラー風速に対して3倍以上で補間を行った場合、補間の前後で室内全体の気流分布に大きな変化はないが、周囲と比較して明らかな誤ベクトルが減少している。(図5(b)、(d)、(f))

3.2 各caseにおける補正率^{※5}の比較：図6に各caseにおける補正率を示す。補正率は補間された測定点数をベクトルが算出された総測定点数で除したものである。どちらの補間方法による補正でも補間基準が厳しくなるにつれて補正率が高くなる。空間補間では、周

図8 8点の測定点の平均スカラー風速に対し0.6倍以下又は1.4倍以上の場合、全ての case で10[%]程度の補正率となる。また時刻補間では前後の時刻の平均スカラー風速の2倍以上で補間を行うと case1、case3、case4 で40[%]、case2 で30[%]を超過する補正率となる。

今回の測定対象では、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・前後の時刻の平均ス

カラー風速に対して3倍以上の場合に補間を行う事が最も適当であると考えられる。

3.3 各 case における気流性状：図7に平均風速ベクトル分布（補正あり^{※4}）を示す。

(1)case1（障害物：机を模擬した箱、風向：水平から下向き51[°]）：エアコン吹出部分の中心で風速は約2.5[m/s]となり、吹出気流は風速約2.0[m/s]で箱の右側面に到

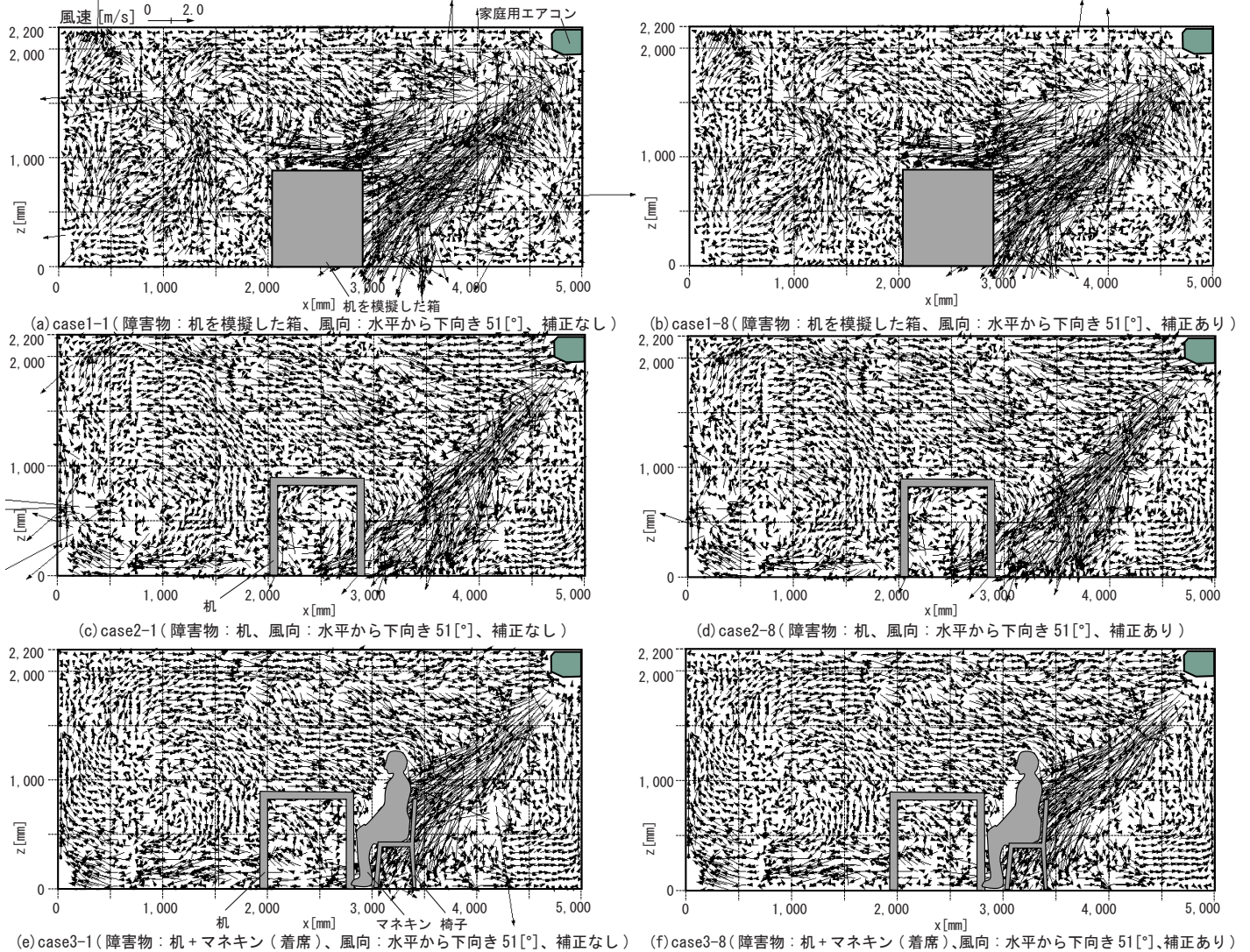


図5 瞬時風速ベクトル分布 (case1:783[frame]、case2:1192[frame]、case3:813[frame]、補正なし・あり^{※4})

□ : case1 (障害物:机を模擬した箱、風向:水平から下向き51[°])周囲8点の測定点の平均スカラー値による補間	▨ : case1 (障害物:机を模擬した箱、風向:水平から下向き51[°])前後フレーム平均スカラー値による補間
▤ : case2 (障害物:机、風向:水平から下向き51[°])周囲8点の測定点の平均スカラー値による補間	▩ : case2 (障害物:机、風向:水平から下向き51[°])前後フレーム平均スカラー値による補間
■ : case3 (障害物:机+マネキン(着席)、風向:水平から下向き51[°])周囲8点の測定点の平均スカラー値による補間	▧ : case3 (障害物:机+マネキン(着席)、風向:水平から下向き51[°])前後フレーム平均スカラー値による補間
● : case4 (障害物:机+マネキン(着席)、風向:水平から下向き22[°])周囲8点の測定点の平均スカラー値による補間	▦ : case4 (障害物:机+マネキン(着席)、風向:水平から下向き22[°])前後フレーム平均スカラー値による補間

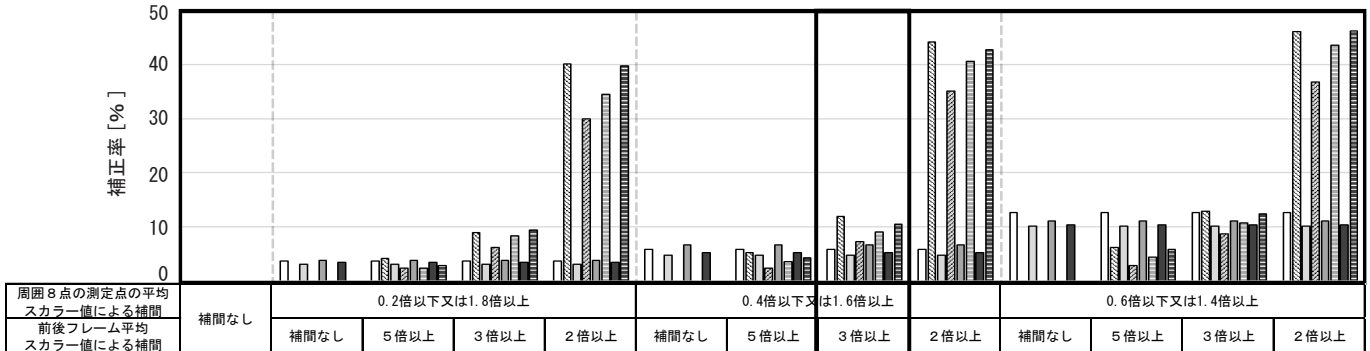


図6 各 case における補正率^{※5}

達する。箱の右側面付近では風速 0.5 ~ 1.0[m/s] で箱上部とチャンバー床面方向に分かれる。箱上部の気流はチャンバー左下隅角部からの気流と合流し箱の左上付付近で循環流を形成する。チャンバーの右側床面付近の気流はチャンバー右壁面に沿って風速 0.1 ~ 0.5[m/s] で循環流を形成する。

(2) case2 (障害物：机、風向：水平から下向き 51[°])：エアコン吹出部分の中心で風速は約 3.0[m/s] となり、吹出気流は風速 1.0 ~ 2.0[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、エアコン吹出気流の下流部は風速 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循環流が形成される。

(3) case3 (障害物：机 + マネキン (着席)、風向：水平から下向き 51[°])：エアコン吹出部分の中心で風速は約 2.5[m/s] となり、吹出気流は風速 1.0 ~ 2.0[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 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循環流が形成される。一方、机下部では、床面を沿ってチャンバー左壁面に向かう気流とマネキン前面、机左上部から吹き込む気流によって複雑な気流が形成される。

(4) case4 (障害物：机 + マネキン (着席)、風向：水平から下向き 22[°])：エアコン吹出部分の中心で風速は約 2.5[m/s] となり、吹出気流は風速約 2.0[m/s] でマネキン頭頂部に到達する。マネキン頭頂部付近では風速 0.3 ~ 1.0[m/s] で机上部とマネキン前面に分かれる。机上部の気流はチャンバー左側壁面に到達し、天井面と床面で風速約 0.5[m/s] の渦を形成する。マネキン前面の気流は

チャンバー床面、右壁面に沿って吹出気流に合流する。

4 まとめ

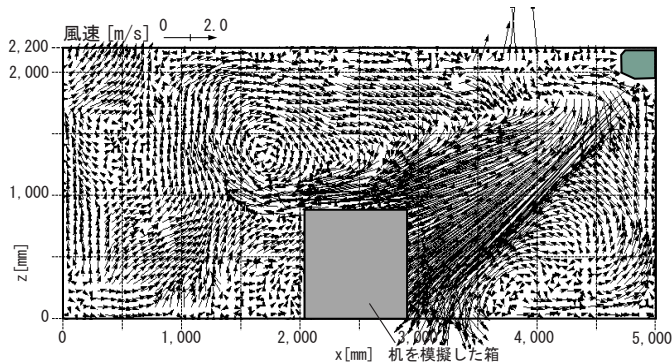
- ① 今回の測定対象では、周囲 8 点の平均スカラー風速に対して 0.4 倍以下又は 1.6 倍以上・前後の時刻の平均スカラー風速に対して 3 倍以上の場合に補間を行う事が最も適当であると考えられる。
- ② 本研究で提案した風速ベクトルの補正・補間方法により室内全体の気流性状に大きな変化は生じないが、誤ベクトルと考えられるデータの補正を行うことが可能であると考えられる。
- ③ case1 (障害物：机を模擬した箱) の場合、箱左上部で循環流を発生させる。case2 (障害物：机)、case3 (障害物：机 + マネキン (着席)) の場合、模擬人体の有無によって机下部の気流性状が変化する。
- ④ case3 (風向：水平から下向き 51[°]) の場合、吹出気流は概ね室内を循環し、エアコン吸込に流れるが、case4 (風向：水平から下向き 22[°]) の場合、右壁面に到達した吹出気流は上下に分かれながら各所で複雑な気流を形成する。

注

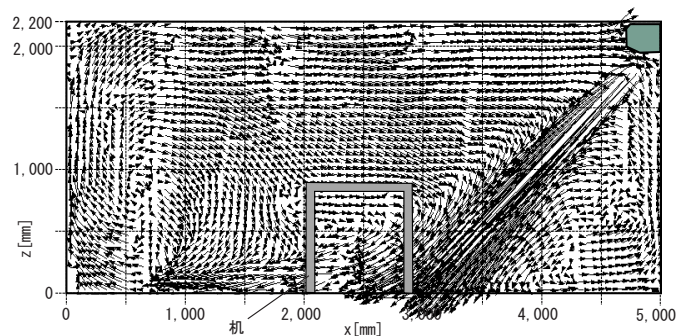
- ※1 解析可能風速の範囲内にあるフレーム間隔を選択する。解析可能風速が重複している範囲で複数のフレーム間隔で風速が算出された場合には相関係数の最も高いベクトルを選択する。
- ※2 ただし、平均する周囲 8 点のベクトルはそれぞれ補間前の各点の時間平均ベクトルに対して 500[%] 以内のベクトルとし、500[%] 以上のベクトルは平均に含めない。
- ※3 補間対象となるベクトルが 10[frame] 以上連続している場合は時間平均風速で補間する。
- ※4 周囲 8 点の平均スカラー風速に対して 0.4 倍以下又は 1.6 倍以上・前後の時刻の平均スカラー風速に対して 3 倍以上で補間した case とする。
- ※5 補正率は補間された測定点数をベクトルが算出された測定点数で除したものである。空間補間の場合では最適な風速ベクトルの選択後、周囲 8 点の測定点の平均スカラー風速によって補間された測定点数、時間補間の場合では前後の時刻の平均スカラー風速によって補間された測定点数で補正率を算出する。

参考文献

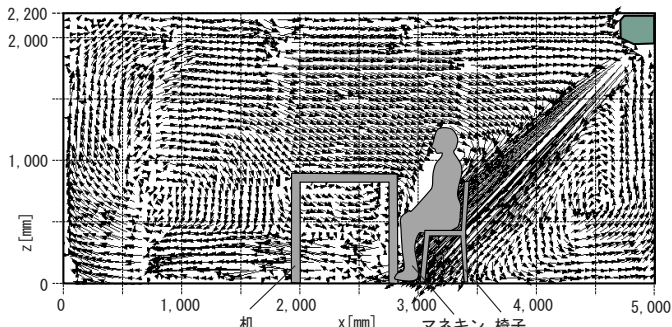
- 文1) 可視化情報学会編：PIV ハンドブック、森北出版株式会社、2018 年
- 文2) 本多・赤林ら：「美大室内空間モデルを対象とした PIV 解析に関する基礎的研究 その4 マルチレーザ・マルチカメラによる PIV 解析」、日本建築学会学術講演梗概集、2022 年



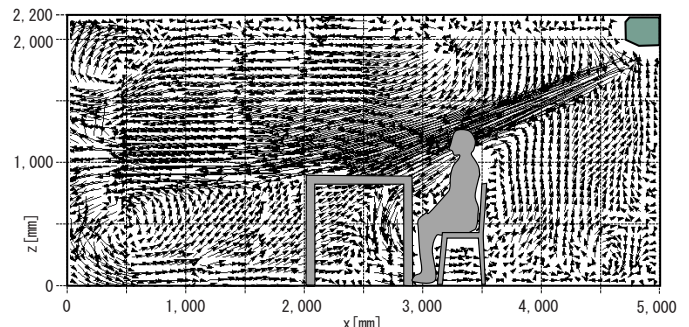
(a) case1-8 (障害物：机を模擬した箱、風向：水平から下向き 51[°])



(b) case2-8 (障害物：机、風向：水平から下向き 51[°])



(c) case3-8 (障害物：机 + マネキン (着席)、風向：水平から下向き 51[°])



(d) case4-8 (障害物：机 + マネキン (着席)、風向：水平から下向き 22[°])

図7 平均風速ベクトル分布 (補正あり^{※4)})