粒子画像流速測定法(PIV)を用いた住宅の自然換気・通風に関する研究

1 研究目的

近年、自然エネルギーの積極的活用が求められる中、 我が国で夏季における温熱環境改善手法の一つとして 行われてきた通風が改めて注目を集めている。適切な 換気・通風計画を行う上で、通風時の室内外気流性状 を正確に把握することは極めて重要である。しかしな がら外部風を主たる駆動力とする通風現象は、窓等の 開口部を室内外の境界として、建物周辺及び室内の気 流速度と壁面の全圧分布が極めて複雑に影響を及ぼし 合う流体現象であるため、その構造を詳細に解明する ことは困難である。

この様な複雑な流体現象を解析する有力な手法の1 っとして、粒子画像流速測定法(PIV:Particle Image Velocimetry)^{注1)}が挙げられる。この手法は従来の熱線 風速計等による風速測定とは異なり、流れに非接触であ り、かつ2次元の平面上での多数の測定点で同時に気流 速度情報を得られる利点がある。そのため建築分野にお いても、有力な流れの解析手法としてその有用性が期 待されている。しかしながら、この手法は主に機械工 学の分野で開発されており、建築学で対象とする相対 的に大きな空間へ適用するには様々な問題点がある。

本研究では、最初に大型境界層風洞内^{注2)}において、 一般に通風を得る事が困難と考えられる、同一壁面上 に2つの開口を持つ2棟の単純住宅モデルを対象とし てPIV測定を行う。又、2棟間を通過する気流を効率的 に室内へ誘引するための風力換気促進装置(ガイドベー ン)を各開口部に設置した場合についても同様にPIV測 定を行う。相対的に広い範囲を対象とする場合の問題点 を把握・解決しながら、隣接する2棟の住宅における 室内外気流性状の特性を明らかとする。次に、気流制 御が可能な人工気候室^{注3)}において、サーマルマネキン (人体と同様に発熱する人体模型)を設置し通風時の PIV測定を行う。室内における発熱体である人体の表 面及び周囲の流れ場は、その複雑な形状ゆえに従来の 測定方法では気流性状を詳細に把握することは困難で あった。人工気候室の温度及び風速を変化させて人体 小林 海斗 指導教員 赤林 伸一 教授

周囲の通風時の気流分布に関する PIV 測定を行い、熱 上昇流を考慮した人体周辺気流の特性を明らかにする。

これらの PIV 測定を行うことで、通風時における室 内外気流性状の特性を把握するとともに、通風により 室内へ流入した気流が人体周囲の流れ場へどのように 作用するかを把握することを目的とする。

2棟の単純住宅モデルを対象とした室内外気流性 状の PIV 測定(測定①)

2.1 実験対象建物の概要

実験対象建物は同一壁面上に 40mm × 40mm の 2 開口を 設けた、一辺が 300mm の単純住宅モデル 2 棟とする。モ デルは厚さ 3mm の透明なアクリル板で作成されている。

2.2 実験 case の設定条件

表1に測定①における実験条件を、図1に測定①に おける実験対象モデルの概要を示す。2棟の単純住宅

ガイドベーンの取付位置 ガイドベーンの 隣棟間隔 実験case 風上側開口部 サイズ[mm] [mm] 風下側開口部 100 1-1 case1 無し 無し 1-2 200 2-1 100 40 2-2 200 case2 風上側 風下側 2-3 100 20 2 - 4200 3-1 100 40 3-2 200 case3 風下側 風上側 100 3 - 320 3-4 200 300 300 300 ガ ガ ハイドベ イドベーン アン 300 300 300 4 Ø μ 40 300 300 300 (a) case1-1 (c) case3-1 (b) case2-1 300 300 300 ガイドベーン ガイドベーン 300 300 300 40 40 40 40 40 40 100 20 20 40 風向 40 85 130 85 85 130 85 85 130 85 300 300 300 単位:[m (e) case2-1の配置 (f) case3-1の配置 (d) case1-1の配置 図1 測定①における実験対象モデルの概要

表1 測定①における実験条件

モデルの開口を設けた壁面を正対させ、風向に対して 並列に設置し、ガイドベーンの有無及び取付位置の計 3パターンの開口条件で実験を行う。実験条件は、ガ イドベーンが無い場合(casel)、ガイドベーンを風上 側開口部の風上側と風下側開口部の風下側に取り付け た場合(case2)、ガイドベーンを風上側開口部の風下 側と風下側開口部の風上側に取り付けた場合(case3) の3つの case とする。また各 case において対象モデ ルの隣棟間隔を 100mm とする場合と、200mm とする場 合の2条件、更に case2、case3 ではガイドベーンのサ イズを 40mm とする場合と 20mm とする場合の2条件を 設定し、計 10case の実験を行う。

2.3 実験機器の概要

表2に実験機器の詳細を示す。可視化には出力1W、 2W、3Wのシート状レーザ3台を同時に使用し、レーザ 3台の照射断面を一致させ、3Wのレーザに対向する位 置に1Wと2Wのレーザを設置することで実験対象領域全 体をほぼ均一な輝度分布にして実験を行う。カメラはハ

	表 2	実験機器の詳約	田				
0	ハイスピードカメラ Photron FASTCAM SA3						
Camera	最大解像度1024;	×1024pixel					
	DPGL-3W	LD励起Nd:YAG/YVO₄ レーザ					
Laser		波長532nm,出力3W					
	O~30kHzで変調可能な連続光						
	DPGL-2W	DPGL-3Wと同様(但し、出力2W)					
	G1000	DPGL-3Wと同様(但し、出力1W)					
SoftWare	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver. 3. 3. 8					
	PIV解析	Flow-Expert ver.1.2.10					
表3 測定①における PIV 解析のパラメータ							
測定対象領域		800mm × 800mm					
画像サイズ		860pixel×860pixel					
キャリブレーション値		0.9414mm/pixel					
測定時間		11sec					
測定	間隔	2ms(500fps)					
検査領域		15pixel×15pixel					
探査範囲		±9pixel×±9pixel					
	風向 ──→	2.0	[m/s] →				
च 008	Cherry A						
600- <u> </u>							
200-		加拉認認	TEL MARKEN				

4Ó0

(a) case1-1 における瞬時風速ベクトル分布

X [mm]

600

800

200

イスピードカメラ Photron FASTCAM SA3 を、可視化画 像のPIV 解析には Flow-Expert ver.1.2.10 を使用する。

2.4 実験及び解析条件の詳細

表3に測定①におけるPIV解析のパラメータを、図 2に風洞内における実験装置の概要を示す。実験は幅 1.8m×高さ1.8m×長さ16mの大型境界層風洞内で行う。 ハイスピードカメラのフレームレートは500fpsに設定 し、1回の実験の撮影時間は11秒である。本実験では トレーサに難燃性のスモークを使用し、風上側の可能 な限り気流場に影響が生じない位置にダクト付スモー クジェネレータを設置し、シーディングを行う。実験 時の基準風速は基準高さ1.0mで5.0m/sに設定する。

2.5 PIV 解析結果

2.5.1 case1 における PIV 解析結果

図3に、case1におけるPIV解析結果を示す。case1 では、どの実験条件でも隣接する2棟のモデルともに風 下側開口部から気流が流入し、風上側開口部から気流 が流出する。図3(a)では、気流が風速0.2~0.8m/s 程度で室内に流入する。気流の平均流入風速は約0.5m/s である。更に、流入した気流が壁面内部に沿って室内を



図3 case1 における PIV 解析結果





循環し、風上側開口部から風速 0.1m/s 程度で流出する。

図3(b)では、気流が風速0.5~1.6m/s程度で室 内に流入する。気流の平均流入風速は約0.6m/sである。 更に、流入した気流が壁面内部に沿って室内を循環し、 風上側開口部から風速0.1m/s程度で流出する。

2.5.2 case2 における PIV 解析結果

図4に、case2におけるPIV解析結果を示す。case2 でも、全ての実験条件で隣接する2棟のモデルともに 風下側開口部から気流が流入し、風上側開口部から気 流が流出する。図4(a)では気流が風速0.5~1.4m/ s程度で室内に流入する。更に、流入した気流が壁面 内部に沿って室内を循環し、風上側開口部から風速 0.1~0.3m/s程度で流出する。気流の平均流入風速は 約0.6m/sである。気流が流入出する開口部の位置は case1と同様となるが、隣棟間の開口部付近では極め て複雑な気流場が形成されている。

図4(b)では、気流が風速0.7~2.0m/s程度で変動しながら室内に流入する。気流の平均流入風速は約0.8m/sである。更に、流入した気流が壁面内部に沿って室内を循環し、風上側開口部から流出する様子が観察される。室内に流入する気流の平均風速は全ての実験 case の中で最も速い。

図4(c)では、気流が風速0.6~1.8m/s程度で変動しながら室内に流入する。気流の平均流入風速は約0.7m/sである。又、流入した気流が壁面内部に沿って室内を循環し、風上側開口部から風速0.1~0.3m/s程度で流出する。又、後流域では対象モデル隅角部での剥離による渦と、隣棟間を流れる気流に誘引された渦



が形成されている様子が観察される。

2.5.3 case3 における PIV 解析結果

図5に、case3におけるPIV解析結果を示す。図5(a) では、隣接する2棟のモデルともに風上側開口部から 気流が風速0.4~1.6m/s程度で振動しながら室内に流 入し、風下側開口部から風速0.1m/s程度で流出する。 気流の平均流入風速は約0.5m/sである。流入する気流 は両モデルで異なる指向性を持ち、case1,2と異なり 壁面内部に沿って室内を循環する様子は見られない。

図5(b)では、case3-1と異なり、隣接する2棟の モデルともに風上側開口部と風下側開口部の両方の開 口部から気流が交互に流入出する様子が観察される。 気流の流入方向は時間的に変化し、室内で複雑な気流 場を形成する。流入する気流風速は0.3~1.3m/s程度 であり、流出する気流風速は0.1m/s程度である。気流 の平均流入風速は約0.3m/sである。

図5(c)では、case3-2と同様、隣接する2棟のモ デルともに風上側開口部と風下側開口部の2つの開口部 から気流が交互に流入出する。室内へ流入する気流風速 は0.3~1.9m/s程度であり、気流の流入方向は時間的 に変化する。室内から流出する気流風速は0.1m/s程度 である。また、気流の平均流入風速は約0.3m/sである。

日 サーマルマネキンを対象とした人体周りの気流性 状の PIV 測定(測定2)

3.1 実験対象の概要

図6に測定②における実験装置の概要を示す。実験 は幅約5.0m×長さ約11m×高さ約3.0mの人工気候室 内で行う。人工気候室は幅約3.7m×長さ約8.0m×高 さ約2.7mの実験室と、前室及びファンルームで構成さ れている。気流発生装置の風速は0.1~2.7m/sの範囲 で設定が可能である。実験対象は身長170cmの人体を 模擬したサーマルマネキンとし、表面温度を30℃に設

実験case		室内温度[℃]	模型表面温度[℃]		風速[m/s]		
	4-1		20	30			
case4	4–2		30			1.0	
	4–3		35				
	5-1		20				
case5	5-2		30			0.0	
	5-3		35				
表5 測定②における実験・解析パラメータ							
実験case		case1		case2			
実験風速		1.Om/s		Om/s			
測定対象領域		1700mm × 1700mm					
画像サイズ		1024pixel×1024pixel					
キャリブレーション値		1.6935mm/pixel					
測定時間			22sec		45sec		
測定間隔		4ms(250fps)		17ms(60fps)			
検査領域			15pixel×15pixel		13pixel×13pixel		
探査範囲		:	± 5 pixel × ± 5 pixel		± 5 pixel× ± 5 pixel		

表4 測定②における実験 case の詳細

定し、椅子に腰掛けさせた状態で実験を行う。なお、 体表面でのレーザ光の反射を抑えるためサーマルマネ キンは黒い全身タイツを装着している。

3.2 実験 case の設定条件

表4に測定②における実験 case の詳細を示す。気流 の可視化実験時の人工気候室の室内空気温度は、人体 模型表面温度(30℃)より低い20℃(温度差-10℃)、 人体模型表面温度と等温の30℃(温度差 ± 0 ℃)、人 体模型表面温度より高い35℃(温度差 ± 5 ℃)の3条 件とする。また、それぞれの室内温度設定条件におい て周囲風速を1.0m/sに設定した場合と、気流発生装置 を停止させ周囲風速を0m/sに設定した場合の2つの case について、計6caseの実験を行う。

3.3 実験機器の概要

使用する実験機器は測定①と同様である。レーザは 出力1W、2W、3Wの3台を同時に使用し、シート状レー ザ3台の照射断面を一致させ、3Wのレーザをサーマル マネキン正面に設置し、後方に1Wと2Wのレーザを設 置することで実験対象領域全体をほぼ均一な輝度分布 にして実験を行う。

3.4 実験及び解析条件の詳細

表5に測定②における実験・解析パラメータを示す。 ハイスピードカメラのフレームレートは case4 では 250fps、case5 では60fps に設定する。なお、人体周 囲の風速を0m/sとした case2 ではトレーサが可視化測 定領域に達することなくスモーク吐出部周辺に滞留す るため、実験開始以前に風速0.15m/sの気流を発生さ せ、トレーサを実験対象近傍までシーディングした後、 気流発生装置を停止させてから撮影を行う。

3.5 解析結果

図7に測定②における PIV 解析結果を示す。

3.5.1 case4(周囲風速 1.0m/s) における PIV 解析結果

図7(a)に case4の代表として case4-1(室温 20℃) における平均風速ベクトル分布を示す。 case1 ではいず れの case においても、気流は測定対象領域内で緩やか に上昇する様子が観察され、各 case の体表面温度と空 気温度の差の違いによる気流性状の差異は殆ど見られな い。また、いずれの case においても、X=500 ~ 800mm、 Z=600 ~ 1100mm の人体模型胸部及び腹部の前方で、風 速 0.1 ~ 0.3m/s 程度で気流が体表面に沿うようにして 上昇する様子が観察される。

3.5.2 case5(周囲風速 0m/s) における PIV 解析結果

3.5.2.1 case5-1(室内温度 20℃)

図7(b)では、気流が測定対象領域全体で緩や かに上昇していることが観察される。またX=500~ 1000mm、Z=600 ~ 1200mmの人体模型正面において、体 表面によって暖められたことによる熱上昇流が発生し、 風速 0.08 ~ 0.15m/s 程度で胸部に沿って上昇する。更 に、X= 0 ~ 400mm、Z=500 ~ 1700mmにおいても人体周 囲の熱上昇流により気流が椅子の背もたれに沿って上 昇する気流が観察される。

3.5.2.2 case5-2(室内温度 30℃)

図7(c)では、X=800~1700mm、Z=700~1400mm では気流が緩やかに下降する様子が観察される。体 表面温度と空気温度が等温の場合、X=600~800mm、 Z=600~1100mmの人体模型正面において、気流が殆ど 静止し、風速0.01~0.03m/s程度でわずかに胸部に沿っ て上昇する。また、X=0~1700mm、Z=1400~1700mm において、気流がほぼ水平に生じている。更に、X=0 ~400mm、Z=500~1700mmにおいて、気流が椅子の背 もたれに沿って緩やかに上昇する様子が観察される。

3.5.2.3 case5-3(室内温度 35℃)

図7(d)では、X=0~800mm、Z=0~1700mmの 模型近傍で体表面で空気温度が低下し、風速0.01~ 0.08m/s程度で気流が下降する。また、X=700~900mm、 Z=700~1000mmの模型正面において、風速0.01~ 0.04m/s程度の渦が形成される。

4 測定結果

4.1 2棟の単純住宅モデルを対象とした室内外気流性 状の PIV 測定

4.1.1 case1

① case1 では、どの実験条件でも風下側開口部から気 流が流入し、風上側開口部から気流が流出する。

② case1-1 では、流入気流の平均風速は約0.5m/s である。
 ③ case1-2 では、流入気流の平均風速は約0.6m/s である。

4.1.2 case2

- ① case2 では、どの実験条件でも風下側開口部から気 流が流入し、風上側開口部から気流が流出する。
- ② case2 における流入気流の平均風速は 0.6 ~ 0.8m/s
 程度であり、どの条件でも殆ど変らない。

4.1.3 case3

- ① case3-1 では、風上側開口部から気流が振動しなが ら室内に流入し、風下側開口部から気流が流出する。
- ② case3-2, 3, 4 では、風上側開口部と風下側開口部の 両方の開口部から気流が交互に流入出する。

③ case3 における流入気流の平均風速は 0.3 ~ 0.5m/s 程度であり、どの条件でも殆ど変らない。

- 4.2 サーマルマネキンを対象とした人体周りの気流性 状の PIV 測定(測定②)
- 4.2.1 case4(周囲風速1.0m/s)

 case4 では、室内温度を 20℃、30℃、35℃に設定した どの case においても、気流は測定対象領域内で緩やか に上昇する様子が観察され、各 case の体表面温度と 空気温度の差の違いによる差異は殆ど見られない。

4.2.2 case5(周囲風速Om/s)

4.2.2.1 case5-1(室内温度 20℃)

- ①測定対象領域全体で気流が緩やかに上昇していること が観察される。
- ②人体模型正面において、体表面によって暖められた ことによる熱上昇流が発生し、気流が風速 0.08~ 0.15m/s 程度で胸部に沿って上昇する。

4.2.2.2 case5-2(室内温度 30°C)

①人体模型正面において、気流が風速 0.01 ~ 0.03m/s 程度でわずかに胸部に沿って上昇する。



② X= 0~1700mm、Z=1400~1700mm において、気流が

ほぼ水平に生じている。

- 4.2.2.3 case5-3(室内温度 35°C)
- ① X= 0~800mm、Z= 0~1700mmの人体模型近傍では、 体表面で空気温度が低下し、風速 0.01 ~ 0.08m/s 程 度で気流が下降する。
- X=700~900mm、Z=700~1000mmの人体模型正面に おいて、風速 0.01 ~ 0.04m/s 程度の渦が形成される。

5 結論

室内へ流入する気流の性状はガイドベーンの有無や 取付位置に大きく影響を受ける。また室内に流入した 気流は速度を落としながら人体周辺へ接近し、人体表 面との温度差により上昇気流又は下降気流を形成する。 注釈

赤林・坂口他「粒子画像流速測定法 (PIV) を用いた室内気流測定法に関する基礎的

```
本研究における PIV 測定には直接相互相関法を用いる。
```

```
注2) 新潟工科大学所有の風洞。
注3)東京工芸大学所有の人工気候室
```

参考文献



図7 測定②における PIV 解析結果