粒子画像流速測定法(PIV)を用いた通風時の室内外気流分布に関する研究

1 研究目的

住宅における通風は、我が国では古来より中間季及 び夏季において身近な環境調整手法の一つである。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及 び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、現象の構造の解明が困難である。 流体現象の解析手法の一つに風洞実験等による流れの 可視化が挙げられる。流れの可視化とは、人間の目に は見えない自然風や空調機器等が作る流れを、何らか の手法により観察可能にする技術であり、古来より流 れの特性を直感的に把握する手法として、様々な測定 法が試みられている。

近年、画像処理技術の発展及びパソコンの性能向 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(Particle Image Velocimetry:以下PIV)が実用化されている。PIV 測定 は、流れ場に微細なトレーサ粒子を混入させ、レーザ 光などの光源をシート状に照射することで、平面上の 流れの可視化を行う。可視化した流れ場を対象に、ト レーサ粒子の動きを高速度カメラで撮影し、得られた 連続した可視化画像をデジタル画像処理することで、 気流速度情報を算出する測定方法である。このため、 PIV は熱線風速計等による従来の点による風速測定と 異なり、流れに非接触で、多数の空間位置で同時に気 流速度情報が得られる利点があるため、従来の風速計 では測定が困難な流れ場に対して、有力な流れの解析 手法の一つとして考えられている。

本研究では、大型境界層風洞内^{注1)}において、先ず対 向する壁面に開口部を有する単純住宅モデルのPIV測 定を行う。次に同一壁面に2開口を有する単純住宅モ デルを対象としたPIV測定を行う。同一壁面に2開口 を有する開口条件は、非定常流れ場において両開口部 の圧力差により室内に気流の流入出が観察される条件 ではあるが、一般的には通風の効果は小さいとされる。 そこで、両モデルにおいて定性的な流れの可視化及び PIV による定量的な風速ベクトルの測定を行い、非定

指導教員

常的な通風時の気流性状の特性を把握することを目的

大久保 肇

赤林伸一教授

2 研究概要

とする。

2.1 測定対象の概要

測定対象モデルは厚さ 5mm のアクリル板で作成され ており、寸法は 300mm × 300mm × 300mm の立方体で、 壁面には 40mm × 40mm の開口部が 2 箇所設けられてい る。測定には対向する壁面中央部に開口部を有する場 合と、同一壁面上に開口部を有する場合の 2 種類の単 純住宅モデルを使用する。

2.2 測定 case の設定条件

表1に各測定 case の撮影条件を、図1に測定対象 モデルの開口部位置と風向の関係を示す。2種類の単 純住宅モデルにおいて、それぞれ風向に対する開口設 置条件を変化させることで計5パターンの開口条件で 可視化及びハイスピードカメラによる撮影を行う。撮 影条件は、対向する壁面中央部に開口を設け、開口部 を風上・風下側に向けた場合 (caseA)、開口部を風向 に対し平行に向けた場合 (caseB)、同一壁面に2箇所 の開口部を設け、開口のある壁面を風上側に向けた 場合 (caseD)、開口のある壁面を風下側に向けた場合 (caseD)、開口のある壁面を風下側に向けた場合 (caseE)とする。

図2にカメラの画角の中心と測定対象モデルの関係 の例を示す。通風現象を初めとして、立方体の模型の 内外を撮影対象とする場合、撮影画像奥行き方向へパー

表1 各測定 case の撮影条件

<u>測定対象モデル</u>	測定case	測定断面	画角の中心	
caseA	A-1	鉛直断面	対象モデルの中心	
	A-2		風上側開口部	
	A-3	水平断面	対象モデルの中心	
	A-4		風上側開口部	
	A-5		風下側開口部	
caseB	B-1		対象モデルの中心	
	B-2		片側開口部	
0	C-1		対象モデルの中心	
casec	C-2		風上側壁面の中心	
caseD	D-1		対象モデルの中心	
	D-2		風下側壁面の中心	
caseE	E-1		対象モデルの中心	
	E-2		開口部を有する壁面の中心	

ス効果が働く。このため模型内壁面が開口部の内外の 流れ場に映り込み、開口部付近の気流の流入出を鮮明 に撮影することが困難である。そこで本研究では、カ メラの画角の中心を、測定対象モデルの中心として撮 影を行う場合と開口部の中心に合わせて撮影を行う場 合に分けて撮影を行う。カメラの画角の中心を測定対 象モデルの中心とした場合では主に室内の通風性状を 解析し、開口部の中心に合わせて撮影を行う場合では 主に開口部付近における気流の流入出及び縮流等を解 析対象とする。建物の室内外における非定常的な気流 場のより鮮明な可視化画像を取得し、通風現象特有の 縮流や流入出気流の風向・風速等の変動を PIV 解析す ることを意図している。

2.3 実験機器の概要

表2に実験機器の概要を示す。出力の比較的大きな レーザをアクリル模型に照射する場合、模型壁面の接 合部や開口部端部においてレーザ光が屈折し、可視化 対象領域に明瞭な影が生じる。影の部分では周辺と比 較して不自然な輝度値の差が生じる為、影の部分の算 出点においてベクトルが算出されないことや明らかな 誤ベクトルが算出されることが多い。そのため本研究 では、模型周辺から複数のレーザを照射し、測定結果 に影響のある影を除去することを意図する。レーザは 出力1Wと2Wと3Wの3台を同時に使用し、レーザ3台 の可視化対象断面を一致させて実験を行う。出力 3₩の レーザを可視化測定領域全体に照射し、対向する位置 から出力 1Wと 2Wのレーザを照射することで、可視化 測定領域全体を均一に可視化する^{注2)}。カメラはハイス ピードカメラ Photron FASTCAM-SA3 を、得られた連続 した可視化画像の解析にはFlow-Expert ver1.25を使 用する。

2.4 実験及び解析条件の詳細

表3にPIV解析のパラメータを、図3に風洞内にお ける実験装置の概要を、図4にPIV解析(直接相互相 関法)の詳細を示す。測定は1800mm×1800mmの大型 境界層風洞内^{注1)}で行う。撮影画像の画素と実際の距離 との換算係数であるキャリブレーション値^{注3)}は鉛直 断面で0.59mm/pixel、水平断面で0.66mm/pixelであ る。高速度カメラのフレームレートは500fpsに設定し、 シャッタースピードは1/500秒、1回の実験の撮影時 間は16秒である。本研究はトレーサに難燃性のスモー ク(DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002、粒径:数10 μ m) を使用する。又、可能な限り気流場に影響が生じない 風上側の位置にスモークジェネレータを設置すること でシーディングを行う。実験時の風洞内の基準風速は、



测定case	caseA(鉛直断面)	caseA~E(水平断面)	
画像サイズ[pixel]	1024pixel × 1024pixel		
キャリブレーション値[mm/pixel]	0.59	0.66	
測定対象領域[mm]	604mm × 604mm	674mm × 674mm	
測定時間[s]	16s		
測定間隔[ms]	2ms(500fps)		
検査領域[pixel]	27pixel × 27pixel	19pixel × 19pixel	
探査範囲[pixel]	± 14 pixel × ± 14 pixel	± 12 pixel × ± 12 pixel	

基準高さ1.0 mで5.0m/s に設定する。本研究の PIV 解 析は、2時刻の画像間での局所的な濃度パターンの類 似性を相互相関により求め、そのピーク位置から移動 量を定める直接相互相関法により風速ベクトルを算出 する。又、各測定 case において速度2成分による乱流 エネルギー^{注4)}を算出する。

3 測定結果

3.1 caseA(鉛直断面)における PIV 解析結果

図5にcaseA(鉛直断面)における PIV 解析結果を示 す。図5(a)では風上側から気流が対象モデルに衝突 し、風上側の開口部より下降しながら気流が流入する様 子が観察される。又、対象モデル室外の風上側壁面にお いて、開口部より上部のZ=280mm 付近で風速が殆ど0と なる淀み点が観察され、上下に分かれる気流を形成する。 室内に流入した気流は、主流部分の風速は0.8m/s 程度 であるが、開口部直近では風速ベクトルは算出されてい ない。対象モデル室内上部では風速0.4m/s 程度の主流 部分に誘引され、風上側壁面へ向かう気流を形成する。 又、風下側の開口部から流出した気流は風速1.3m/s 程 度で斜め方向に上昇する気流となる。

図5(b)では風上側において、接近流の境界層が 鮮明に観察でき、上部ほど風速が速い様子が観察でき る。又、対象モデル室外の風上側壁面に衝突した気流 が壁面に沿って下降し、床面における X=80 ~ 280mm、 Z=100 ~ 170mm 付近では風速 1.0 ~ 2.0m/s 程度の大き



な渦を形成する。気流は対象モデルに衝突し、壁面上部 から風速1.5m/s 程度で下降した気流が風上側の開口部 より流入する様子が観察される。対象モデル室内の開口 部直近では風速1.0m/s 程度で気流が下降しながら流入 する。流入後の気流は主流部分で風速1.4~1.8m/s 程 度となり徐々に減速しながら室内に拡散する。図5(a) と比較して、風上側の開口部付近では撮影画像奥行き方 向へパース効果が働かないため、気流分布が鮮明に捉え られたと考えられる。対象モデル室外上部では気流の剥 離による渦が形成される。

3.2 caseA(水平断面)における PIV 解析結果

図6にcaseA(水平断面)におけるPIV解析結果を示 す。図6(a)では風上側からの気流が対象モデルに衝 突し、開口部付近で風速0.5m/s程度と比較的遅く、左 右に分かれる気流を形成する。対象モデル室内におい て、開口部直近は風速ベクトルが算出されず、主流部 分では風速1.0~2.0m/s程度で左右に振幅する気流と なる。気流は徐々に減速し、風下側壁面付近では風速 0.2~1.0m/s程度で室内に拡散する。対象モデル室外 において、風下側の開口部から風速0.8~1.5m/s程度 で流出した気流は、流入気流と同様に左右に振幅する様 子が観察される。又、後流域におけるX=510~680mm、 Y=170~300mm付近では渦が形成される。

図6(b)では風上側の対象モデル正面で気流は徐々 に減速し、開口部付近では風速1.0~2.0m/s程度とな る。対象モデル室内において、流入した気流は風速1.0 ~2.0m/s程度で左右に振幅しながら室内に拡散する。 又、対象モデル室内において、流出側の開口部付近では 風速の速い気流は算出されない。対象モデル室外におい て、風向に対し平行な壁面では風速0.5~2.5m/s程度 の渦が形成される。

図6(c)では風向に対し平行な壁面で風速3.0m/s 程度の比較的速い気流が観察される。風下側の開口部か ら風速1.0~1.5m/s程度で気流が流出する。更に、流 出した気流の周辺において、風速0.3~0.5m/s程度の 渦が形成される。又、風上側から壁面を沿って流れた気 流と混ざり、後流域において極めて複雑な気流場を形成 する。

3.2 caseB(水平断面)における PIV 解析結果

図7にcaseB(水平断面)における PIV 解析結果を示 す。図7(a)では気流は風速 0.5~1.0m/s 程度で風 上側壁面に衝突して、壁面中心部付近で左右に分かれ、 壁面を沿って風下側に流れる。風向に対し平行な壁面 の開口部からは、気流の流入出が交互に生じる様子が観 察される。対象モデル室内において、気流は風速 0.5~ 1.0m/s程度で風上側壁面に向かって流入する。又、気流は風速0.5~0.8m/s程度で開口部から流出する。対象モデル後流域において、風速の速い気流は殆ど算出されない。

図7(b)では開口部から気流が風速0.5~1.0m/s 程度で流入する様子が観察される。又、室内に流入した 気流は、風上側壁面に向かう流れ場を形成する。対象 モデル後流域における X=560~680mm、Y=480~680mm 付近では、風速0.3~0.5m/s程度の渦が形成される様 子が観察される。

3.3 caseC(水平断面)における PIV 解析結果

図8に caseC(水平断面)における PIV 解析結果を示 す。図8(a)では風上側の対象モデル正面で気流は 減速しながら対象モデルに衝突する。風上側壁面に設 けられた両開口部から気流が交互に流入出する様子が 観察される。気流は対象モデル室内に風速1.0m/s 程度 で流入し、流出側の開口部から風速0.5~0.8m/s 程度 で流出する。

図8(b)では風上側からの気流が 対象モデルに衝突し、風上側壁面中 心部において、風速が殆ど0となる 淀み点が観察される。風上側の両開 口部より気流が交互に流入する様子 が観察される。

図8(c)の乱流エネルギー分布 では対象モデル室外において、風上 側壁面及び風下側壁面付近で0.05~ 0.2m²/s²程度と比較的小さい。風向に 対して平行な壁面では0.8m²/s²と比 較的大きい。対象モデル室内では両開 口部付近で乱流エネルギーは0.01~ 0.05m²/s²程度であるが主流以外の領



瞬時風速ベクトル分布

域では殆ど0となる。

3.4 caseD(水平断面)における PIV 解析結果

図9に caseD(水平断面)における PIV 解析結果を示 す。図9(a)では風上側の対象モデル正面で気流は 減速しながら対象モデルに衝突する。風下側壁面の両 開口部より風速0.3~0.5m/s 程度で気流が交互に流入 出する様子が観察される。対象モデル後流域では流出 気流以外の風速の速い気流は殆ど算出されない。

図9(b)では図9(a)と比較して両開口部から風 速0.5~1.0m/s程度で気流が流入出する様子が観察で きる。対象モデル室外に流出した気流は、風上側から の風速3.0m/s程度の比較的速い気流の影響により開口 部付近で渦を形成する様子が観察される。又、対象モ デル後流域では、風速1.0m/s程度で風上側に向かう気 流が観察でき、極めて複雑な気流場となる。

図9(c)の乱流エネルギー分布では他の測定 case と同様に対象モデル室外の風上側壁面及び風下側壁面 付近で0.05~0.2m²/s² 程度と比較的小さい。風向に対



して平行な壁面では $0.5m^2/s^2$ と比較的大きい。他の測定 case と比較して、対象モデル室内の両開口部付近で は乱流エネルギーは $0.001 \sim 0.005m^2/s^2$ 程度と極めて 小さい。又、主流以外の領域では乱流エネルギーは殆 ど0となる。

3.5 caseE(水平断面)における PIV 解析結果

図 10 に caseE(水平断面) における PIV 解析結果を 示す。図 10(a) では風上側からの気流は風速 1.0~ 2.0m/s 程度で対象モデルに衝突する。壁面上の風下側 の開口部から気流が風速 0.8~1.3m/s 程度で対象モデ ル室内に流入する。

図 10(b)では(a)と同様に、風上側からの気流は 風速 1.0~2.0m/s 程度で対象モデルに衝突する。風向 に対して平行な壁面では、気流の剥離により風速 0.8~ 1.5m/s 程度の比較的速い渦が形成される。壁面上にお ける風下側の開口部からは気流が風速 0.8~1.5m/s 程 度で対象モデル室内に流入し、対向の壁面に向かう気流 を形成する。又、風上側の開口部からは風速 1.0m/s 程 度で気流が流出する。

図 10(c)の乱流エネルギー分布 では他の測定 case と同様に対象モ デル室外の風上側壁面及び風下側 壁面付近で $0.05 \sim 0.2m^2/s^2$ 程度と 比較的小さい。対象モデル室内で は、壁面上の風下側の開口部付近に おいて乱流エネルギーは $0.002 \sim$ $0.008m^2/s^2$ 程度となる。又、主流以 外の領域では乱流エネルギーは殆ど 0となる。

4 まとめ

4.1 caseA(鉛直断面)

①対象モデル室外の風上側壁面にお

3.0[m/s] 風向き 700 600 500 400 [m ≻ 300 200 100 0+ 0 100 200 300 400 500 600 700 X [mm] (a) caseC-1 における 瞬時風速ベクトル分布

いて、開口部の上部付近で風速が殆ど0となる淀み点 が観察され、上下に分かれる気流を形成する。

②気流は対象モデルに衝突し、風上側の開口部より風速 1.0m/s程度で下降しながら気流が流入する。又、風 下側の開口部より風速1.3m/sで流出した気流は斜め 方向に上昇する気流となる。

4.2 caseA(水平断面)

- ①風上側からの気流が対象モデルに衝突し、開口部付近で比較的遅い風速で、左右に分かれる気流を形成する。
- ②風上側の開口部から流入した気流は左右に振幅しなが ら室内に拡散する。又、風下側の開口部から流出した 気流は流入気流と同様に左右に振幅する。

4.3 caseB(水平断面)

- ①気流は風上側壁面に衝突して、壁面中心部付近で左右 に分かれ、壁面を沿って風下側に流れる。
- ②開口部からは、気流の流入出が交互に生じる。又、対象モデル室内において気流は風上側壁面に向かって流入する。





4.4 caseC(水平断面)

①風上側からの気流が対象モデルに衝突し、風上側壁 面中心部において、風速が殆ど0となる淀み点が観 察される。

- ②風上側壁面の両開口部から気流が風速1.0m/s程度で 交互に流入出する様子が観察される。
- ③対象モデル室内では両開口部付近で乱流エネルギーは 0.01 ~ 0.05m²/s² 程度である。

4.5 caseD(水平断面)

- ①風下側壁面の両開口部から気流が交互に流入出する。
- ②対象モデル室外に流出した気流は、開口部付近で渦を形成する様子が観察される。又、対象モデル後流域では、風速1.0m/s程度で風上側に向かう気流が観察でき、極めて複雑な気流場となる。
- ③対象モデル室内の両開口部付近では乱流エネルギーは 0.001~0.005m²/s²程度と極めて小さい。

4.6 caseE(水平断面)

①風向に対して平行な壁面では、気流の剥離により比較的速い渦が形成される。

- ②風下側の開口部からは気流が風速 0.8~1.5m/s 程度で対象モデル室内に流入し、対向の壁面に向かう気流を形成する。又、風上側の開口部からは風速 1.0m/s 程度で気流が流出する。
- ③対象モデル室内では、風下側の開口部付近において 乱流エネルギーは 0.002 ~ 0.008m²/s² 程度である。

注釈

- 注1)新潟工科大学所有の風洞 注2)1Wレーザは風上側、2Wレーザは風下側に設置して可視化を行う。
- 注3)撮影画像の画素と実際の距離との換算係数であるキャリプレーション値は、撮影面
- に校正用プレートを設置し、実際の距離が画像上で認識できる画像を撮影し、キャ リプレーション値を求める。
- 注4) 乱流エネルギーの算出式を以下に示す。

$$\begin{split} \mathbf{k} &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} \left[\frac{1}{2} \sum_{c=0}^{1} \{ (c, \tilde{u}_{t}) - (c, u_{t}) \}^{2} \right] \\ \mathbf{k} : 乱流エネルギ- [m]/s^{1}] : t:時刻 N: データ数 \\ \mathbf{c} : 成分番号 (u_{t}, u_{t} : こおいて計算する成分を示す) \\ i:格子点番号 : u_{t} : 鋼時風速 u_{t} : 平均風速 \end{split}$$

参考文献

- 文1)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 研究 その1~2」日本建築学会大会学術講演梗概集、2011年
- 文2)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研究 その3~5」日本建築学会大会学術講演梗概集、2012年
- 文3)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研究 その6~7」日本建築学会大会学術講演梗概集、2013年
- 文4)赤林伸一,大嶋拓也,有波裕貴,大久保肇,楊暁韻,坂口淳:室内気流模型を対象 としたシーディング手法の検討及び測定結果 室内気流を対象とした PIV 計測に関 する研究 その1,日本建築学会環境系論文集,第690号,pp631-638,2013.8

