領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その1)単室モデルを対象とした風洞実験

Unsteady Analysis of Cross-Ventilation Flow using Domain Decomposition Technique with LES (Part 1) Wind Tunnel Test for a Generic Isolated Building Model

○佐野	香之	(大阪大学)	小林	知広	(大阪大学)
山中	俊夫	(大阪大学)	丹原	千里	(大林組)
小林	典彰	(大阪大学)	崔	ナレ	(大阪大学)
田中	佑亮	(大阪大学)			

Kayuki SANO^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Chisato TAMBARA^{*2} Noriaki KOBAYASHI^{*1} Narae CHOI^{*1} Yusuke TANAKA^{*1} ^{*1} Osaka University ^{*2} Obayashi Corporation

In recent years, the use of LES, which can analyze unsteady airflow with high accuracy, has been expanding. However, in general, in cross-ventilation analysis, it is necessary to analyze both inside and outside of the building at the same time, which increases the computational load. In this study, the application of the Domain Decomposition Technique to LES, which can reduce computational load by analyzing only indoor airflow using outdoor airflow data is investigated. This paper presents the wind tunnel test to obtain experimental data for verifying the accuracy of LES analysis are reported.

はじめに

近年 Large Eddy Simulation (LES) を用いた気流解析の 利用拡大が見られ、室内換気・通風分野の研究において もLESを利用する例が見られるようになった¹⁾。しかし、 一般に LES での通風解析は建物内外を同時に解析する 必要があり、計算負荷が大きいため現状では複雑形状へ の適用は現実的ではない場合が多い。一方、屋外風環境 分野では LES を含むガイドラインが整備され²⁾、LES の 利用が拡大している。そこで本研究では、屋外気流の解 析データの利用を想定し、倉渕ら³⁾が RANS で検討し た建物開口部を流入境界として室内のみを解析領域とす る「領域分割法」を LES の非定常計算で適用する手法 の検討を行う。既に堂本ら⁴や Hoang ら⁵により同様の 検討がなされているが、適用条件は未だ少なく手法の確 立には至っていない。そこで本研究ではより多くの条件 での検証と課題抽出のため、実験と CFD 解析から基礎 的な検討を行い、解析精度を保ちながら計算負荷を抑え る手法の確立を目的とする。本報では「領域分割法」の 検討に用いる LES の精度検証用の実験値の取得を目的 として、風洞実験により風圧係数・換気量・建物周辺風 速および気流場の測定を行った結果について報告する。

1. 風洞実験概要

実験は大阪大学研究用風洞にて実施した。対象とす る室モデルは外寸一辺 200 mm、板厚 2 mm の角柱と し、開口を有しない模型(以下、シールドモデル)と、 Table 1 に示す条件で、20 mm×20 mm の開口を床上 100 mm にそれぞれ 2 箇所設けた模型を用いて、風圧係数・ 換気量・建物周辺風速・建物周辺気流場の測定を行った。 Fig.1 に示すように風洞内に模型を設置した。風洞内風 速は、PIV 測定実験においては床上 1,000 mm 高さで 5.0 m/s、その他の測定では同位置で 10 m/s に設定して境界 層流下で実験を行った。Fig.2 に模型を設置しない状態 で I 型熱線風速計(日本カノマックス,0241R-T5)を用 いて 1 kHz で 60 s 測定した風洞内アプローチフローを示 す。測定時の風洞内風速は 10 m/s に設定し、結果は床上 700 mm での風速で基準化して示した。測定の結果、概 ね 1/4.55 乗のべき乗則に従う境界層流となっていた。

2. 風圧係数測定

2.1 実験概要

まずはシールドモデルを用いて、風圧係数の測定を 行った。**Fig.3** にシールドモデルの風圧測定点と外部風



向条件(θ)を示す。測定点は壁面3面の床上100mm 高さ(開口中心高さを想定)で10mm間隔で各面19点、 計57点設置し、対称性を考慮して測定を行った。風圧 は微差圧計(Validyne 社, DP45)を用いて各点 100 Hz で 30 s 測定した。風圧係数の基準速度圧は軒高(床上200 mm)のアプローチフロー速度圧とし、風洞内基準静圧 は Fig.1 に示すピトー管位置での静圧とした。なお、実 験時は風洞を回流型で運転した。

2.2 実験結果

Fig.4 に対象モデルの各面における風圧係数の水平分 布を風向別に示す。なお、風向に対し対称となる面での 結果は省略している。全体的な傾向として風上面は正圧、 上流側から見た側面及び風下面は負圧となっている。次 報では、ここで取得した風圧係数の実験値と比較するこ とで、LES での屋外気流解析の精度検証を行う。

3. 換気量測定

3.1 測定概要

Table 1 に開口を有する模型を用いた換気量測定実験 の条件を示す。なお、同表には後述する実験結果を併せ て記載する。Fig.5 に測定概要を示す。実験時は風洞を 吹放し型で運転し、CO2を用いたトレーサーガス定常発 生法により換気量測定を行う。実験はまず CO2 を発生 させない通風状況下で、マルチガスモニター(LumaSense Technologies, Innova 1412i, 較正濃度 3,000 ppm) を用いて 室モデル内の空気を吸引し、5分間測定した濃度の平均 値を外気濃度 c。とした。その後、マスフローコントロー ラー(フジキン, FCST 1005 LC) で 150 sccm に流量を制 御して CO2 を模型内に供給し、定常状態に到達後 10 分 間測定した濃度の平均値を室内濃度 cr とした。空気の 吸引は、室平均濃度の測定を意図して中心に設置した配 管の 50 mm, 100 mm, 150 mm の高さで四方に設けた計 12 の吸引孔から行った。また、CO2 は室内一様発生を想定 して、模型内の4箇所に設けた配管から供給した。



Fig. 4 Wind pressure distribution (XY Section)

3.2 実験結果

Fig.6 に Case A-1, θ=0°の CO₂ 濃度応答を示す。外気濃 度と室内濃度は共に安定しており、測定した全条件で同 様に概ね定常に達していることを確認した。換気量は、 対象領域内で汚染源の希釈・排出に有効な換気量を示す Purging Flow Rate (PFR)[®]により評価する。

$$PFR = \frac{m}{c_r - c_o} [m^3 / s] \tag{1}$$

ここで m は単位時間当たりの室内 CO₂ 発生量 [m³/s]、c_r は室内濃度 [-]、c。は外気濃度 [-] である。Table 1 に各条 件での2開口間の風圧係数差(ACn)とPFRの測定結果 を示す。風に対し開口が対称な位置関係にあり AC=0 となる条件 (CaseA-1, θ=0°等) においても換気が行われ ることが示され、気流の乱れによる非定常な換気が行わ れたと考えられる。次報では、ここで取得した実験値と 比較することで、LES での全域計算の精度検証を行う。



Table 1	Experimental	l conditions	and obtained	d results





4. 建物周辺風速測定

4.1 測定概要

LES および次項の PIV 測定の精度検証用の実験値の取 得を目的として、平行流型熱線風速計(日本カノマック ス,0247R-T5)を用いてシールドモデルの側面近傍の風 速測定を行った。外部風向は θ=0°とし、測定面は上流 側から見た左側面の1面とした。Fig.7 に風速測定点を 示す。測定は床上100 mm 高さにおいて、主流方向に40 mm 間隔と側面中心位置、側面からの法線方向に10 mm 間隔の計70点で各点1 kHz で60 s 測定した。プローブ はワイヤーの向きが鉛直になるよう設置して水平面風速 を測定し、トラバーサーを用いて測定点を移動した。な お、実験時は風洞を回流型で運転した。

4.2 実験結果

Fig.8 に建物周辺風速の測定結果を示す。なお、図に は後述する PIV 測定の測定結果を併せて示している。風 速は、x = -100 mm、y = -200 mm 位置の測定値で基準化 して示した。壁面付近での風速低下、上流側での縮流に よる風速増加が見られ、剥離の様子が確認できる。次報 では、ここで取得した風速の実験値と比較することで、 LES での屋外気流解析の精度検証を行う。

5. 建物周辺気流場測定

5.1 測定概要

LES の気流場を検証するための実験値取得のため、 PIV によるシールドモデルの周辺気流場の測定を行う。 PIV は、トレーサーを注入した気流にレーザー光を照射 して可視化し、微小時間間隔で撮影した2枚の連続画像 間でのトレーサーの移動距離から風速ベクトルを算出 する手法である。可視化は、煙発生器(ダイニチ工業,



Fig. 7 Measurement points of velocity



PS-2006)を用いて模型上流側で煙を気流に注入するこ とで行った。光源にはCWレーザー(日本カノマックス, CW 532-10-3W)を用いて風洞内の模型側方から模型中 心高さの床上100 mmの水平断面を照射し、風洞上部に 設置した高速度カメラ(カトウ光研,K8)で可視化画像 を撮影した。外部風向 θ=0°とし、模型の上流側・下流側・ 側面片面をそれぞれ撮影した。壁面上部の写り込みによ り投影断面での壁面近傍が隠れるのを避けるため、カメ ラ位置は測定面の直上となるよう設置した。また、上流 面では 800 fps、下流面および側面では 500 fpsの撮影間 隔で1sの連続撮影を5度行い、合計5sの画像を取得 した。なお、実験時は風洞を吹放し型で運転した。

Table 2 に PIV 解析概要を示す。画像処理には、Davis 8.3 (La vision 社)を使用し、風速ベクトルの算出には直 接相互相関法を用いた。また、データの信頼性および画 像解像度を向上させるため再帰的相関法を用いており、 瞬時の速度場を計算するために必要な相互相関係数を算 出するプロセスは 20 回とした。

5.2 測定結果

-100

Fig.9 に、PIV による建物周辺の風速ベクトルの測定結 果を示す。ここで、図の表示ベクトル数は解析で得られ た総ベクトル数の 1/2 に省略して示している。また、各 図では赤色で示す面の近傍のみを測定対象としている。 上流面では壁面表面で風速が低下し、壁に沿って両側に 流れる様子が確認できる。側面では、風上側隅角部で風 速が大きくなり、壁面近傍では風速が低下し逆流が見ら れる。下流面では後流域に大きな渦が確認できる。これ らは一般的な角柱周りの気流性状と一致しており、PIV 測定によりシールドモデル周辺の気流場の性状は比較的 正確に捉えられていると考えられる。



Fig. 8 Velocity distribution near the model



Fig. 9 Velocity Vector field obtained from PIV measurement

5.3 PIV 測定の精度検証

熱線風速計での建物周辺風速の風速の測定結果を真 値として比較することで、PIV 測定の精度検証を行う。 Fig.8 に熱線風速計および PIV での測定結果を併せて示 す。比較は熱線風速計で測定を行った模型側面周辺で の70点で行い、前述のとおり、風速は x=-100 mm、y= -200 mm 位置の測定値で基準化して示した。なお、熱線 風速計での測定値はワイヤーに直交する x、y 方向の瞬 時風速 2 成分の合成風速であると仮定して、PIV におい ても同様に風速を算出し比較する。また PIV での測定 結果では、熱線風速計での風速測定点と同じ x 座標での 測定結果を得られなかっため、最も近い点の風速を用い て比較を行う。

上流側の模型から離れた位置では、PIV と熱線風速計 が一致している。一方、壁面近傍では PIV が風速を過 小評価している。これは、壁面付近では速度勾配が大き く画像間で検査領域内の輝度値パターンが変化するた め、正確にベクトルを算出できなかったことが要因の一 っと考えられる。本研究で風速ベクトルの算出に用いた 直接相互相関法では、設定した検査領域の輝度値パター ンが微小時刻後の画像で移動した位置を検出し移動量を 算出するため、2 画像間で輝度値パターンが大きく変化 しないことが解析の前提となる⁷。既往研究⁸において も、直接相互相関法を用いた PIV 測定により壁面近傍 付近の風速を過小評価することが示されている。この領 域で測定精度を向上させるためには、検査領域サイズを さらに小さくすることが有効と考えられる。

また下流側では、全体を通して PIV が風速を過小評価している。これは、気流の乱れにより煙が拡散し、トレーサーである煙が存在しないまたは少量である時間があったこと要因と考えられる。煙が十分に存在しない時間がある場合、その時刻では風速を適切に算出することができず、平均風速は低く算出されたと考えられる。

以上より、次報では PIV 測定がスカラー風速を過小 評価している点に留意して LES の精度検証を行う。

6. まとめ

本研究では領域分割法を用いた LES 解析手法の確立 を目的とし、本報ではその前段階として、LES の精度検 証用の実験値の取得を目的として行った風洞実験の結果 について報告した。実験では、風圧係数・換気量・建物 周辺風速・建物周辺気流場を測定した。また、熱線風速 計と測定結果と比較し PIV 測定の精度検証を行った結 果、PIV の測定結果が風速を過小評価することが確認さ れため、LES との比較を行う際には留意する必要がある。 次報では、本報で取得した実験値を用いて領域分割法の 検討に必要となる LES 解析の精度検証を行う。

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費(基盤研究(B) JP20H02311,研究 代表者:小林知広)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 高野康夫,赤林伸一,富永禎秀ら:単純住宅モデルを対象と した変動気流場における室内外通風性状の解析,日本建築 学会環境系論文集,第80巻,第716号,pp.925-934,2015.10
- 日本建築学会編:都市の風環境予測のための CFD ガイドブック,日本建築学会,2020.1
- T. Kurabuchi, M. Ohba, T. Nonaka : Domain Decomposition Technique Applied to the Evaluation of Cross-Ventilation Performance of Opening Positions of a Building, *The International Journal of Ventilation*, Vol.8, No.3, pp.207-217, 2009
- 4) 堂本浩規、小林知広、梅宮典子:LES による領域分割法を用 いた室内通風気流解析法に関する研究(その1)2 開口を有 する単室モデルを対象とした検証、空気調和・衛生工学会近 畿支部学術研究発表会論文集、2020.3
- 5) Hoang Minh Hung, 小林知広, 山中俊夫: LES による領域分 割法を用いた室内通風気流解析法に関する研究(その3)集 合住宅の一室を対象とした検討, 空気調和・衛生工学会学 術講演会講演論文集, D-15, 2020.9
- 6) D. Etheridge, M. Sandberg : BUILDING VENTILATION -Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 7) PIV ハンドブック 可視化情報学会編,森北出版株式会社, 2010
- H.Kotani, T.Kobayashi : Accuracy Verification of Processing Methodology in Particle Image Velocimetry for Flow around Building, *Journal of Environmental Engineering*, Vol.80, No715, pp741-749, 2015