

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研究
 (その 6) 風洞実験による風力と浮力が作用する場での室内気流及び換気量の測定
Unsteady Analysis of Cross-Ventilation Flow using Domain Decomposition Technique with LES
(Part 6) Measurement of Indoor Airflow and Ventilation Rate in a Wind
Tunnel Experiment where Wind and Buoyancy Force act

○宮澤 昇平 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学)
 山中 俊夫 (大阪大学) 小林 典彰 (大阪大学)
 崔 ナレ (大阪大学) 松原 暢 (大阪大学)
 蔣 子韜 (大阪大学) 丹原 千里 (大林組)

Shohei MIYAZAWA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Noriaki KOBAYASHI*¹
 Narae CHOI*¹ Toru MATSUBARA*¹ Zitao JIANG*¹ Chisato TAMBARA*²

*¹ Osaka University *² Obayashi Corporation

The use of LES, which can analyze unsteady airflow with high accuracy, has been expanding. However, generally, in cross-ventilation analysis, it is necessary to analyze both inside and outside of the building simultaneously, which increases the computational load. In this study, the application of the Domain Decomposition Technique to LES is studied to reduce computational load, which analyzes only indoor airflow using previously investigated outdoor airflow data. This paper shows the wind tunnel test to obtain experimental data for CFD validation under non-isothermal condition.

1. はじめに

近年の屋外気流解析では、非定常かつ高精度な気流予測が可能な Large Eddy Simulation (LES) の利用が拡大している¹⁾が、通風解析に適用するには建物内外の同時解析が必要となり計算負荷が膨大となる。田中ら²⁾は屋外気流の解析データを利用し、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³⁾を LES で適用し、解析精度を保ちつつ計算負荷を抑える検討を等温環境下で行った。しかし、室内外温度差による浮力を主たる換気駆動力として期待した自然換気設計が行われることも多いため、内外温度差が存在する場合を対象とした検討も必要と言える。本報ではその初期段階として非等温環境下で風洞実験を行い、CFD の境界条件及び精度検証用データを取得した結果を報告する。

2. 風洞実験概要

実験は Fig.1 に示す大阪大学研究用風洞にて実施した。風洞内風速は床上 1,000 mm 高さで 1.0 m/s に設定したが、後述する風圧係数の測定時のみ 10 m/s に設定した条件でも実験を行った。Fig.2 に 1.0 m/s 及び 10 m/s で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及び乱流強度の鉛直分布を示す。風速は高さ 600mm 位置の風速で基準化したものをアプローチフローとして採用した。測定の結果、1.0 m/s 条件では概ね 1/3.73 乗のべき乗則に 10 m/s の条件では概ね 1/4.20 乗のべき乗則に従う境界層流となっていた。

本研究で対象とする模型は Fig.3 に示す 4 種類で、外寸一辺 300 mm、板厚 5 mm の立方体である。開口の無いシールドモデルと、30 mm × 30 mm の開口を 2 箇所 (風上・風下) で開口中心高さ 15 mm、280 mm) 設けた単室モデル (温度測定用、換気量測定用、PIV 測定用) をアクリル板を用いて作成した。シールドモデルでは風圧係数の測定、単室モデルでは温度分布・床面熱流束、室内風速分布及び換気量の測定を行った。

単室モデルでは等温条件で風向を真逆とした 2 条件 (Case 1, 2) に加えて、換気駆動力として浮力も作用する非等温条件で風向を同様に変更した 2 条件 (Case 3, 4) も設定し、計 4 条件で実験を行った。Table 1 に実験条件を示す^{註1)}。ここで、Case 3 では風力と浮力による同程度の差圧が同方向に作用し、Case 4 では逆方向に作用する実験条件を意図して設定した。模型床面はアルミ板と

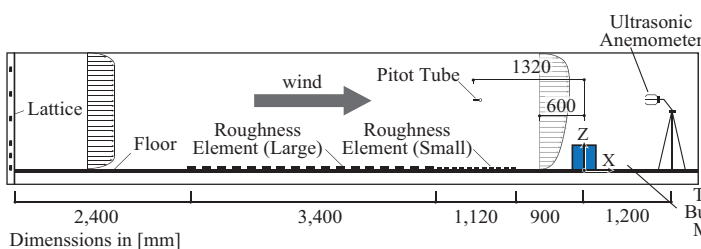


Fig. 1 Wind tunnel cross-section

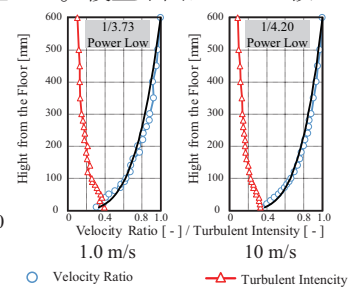


Fig. 2 Approaching flow

○ Velocity Ratio ▲ Turbulent Intensity

Table 1 Experimental Setting

	Assumed full-scale condition					Scaled experimental condition				
	Length [m]	Bilding Height Velocity [m/s]	Outdoor Temperature [°C]	Indoor Temperature [°C]	Ar Number	Length [m]	Bilding Height Velocity [m/s]	Outdoor Temperature [°C]	Indoor Temperature [°C]	Targetted Ar Number
Case1	3.0	2.0	15.0	15.0	0.388	0.3	0.88	15.0	15.0	0.388
Case2							0.84			
Case3			0.86	17.0			44.6			
Case4			0.79	16.4			47.2	6.113		

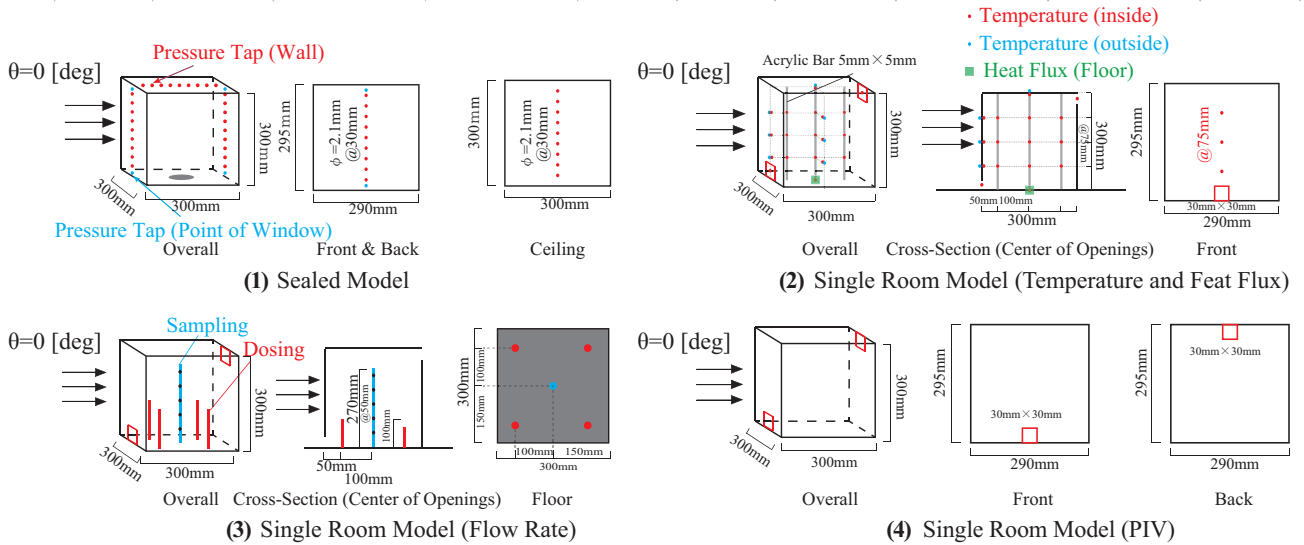


Fig.3 Test Models

し、その下部にシリコンラバーヒーターと断熱材を敷設して床面からの発熱により通風状態で内外温度差を発生させた。ヒーター発熱量は想定した室温となるよう調節し、流入出温度差と Eq.1 で算定した換気量を開口面積で除した流入風速による Ar 数 (Eq.2) が Table 1 の想定条件と一致するよう設定した。なお、室温は T 型熱電対により定常温度をモニターして確認し、室温の測定点は Case 4 では模型中心、Case 3 では流出開口中心とした。

$$Q_{predicted} = (\alpha A)_{connected} \sqrt{\frac{2}{\rho_o} |P_w - P_L + (\rho_o - \rho_i) g \Delta h|} \quad (1)$$

$$Ar = \frac{g \beta L \Delta T}{(u_{in})^2} = \frac{g \beta \Delta h (T_i - T_o)}{(Q_{predicted} / A_{opening})} \quad (2)$$

ここで、 $(\alpha A)_{connected}$ は有効開口面積の直列結合値 [m²]、 ρ は空気密度 [kg/m³]、 P_w 、 P_L は風上及び風下面の風圧 [Pa]、 g は重力加速度 [m/s²]、 Δh は開口中心間の高低差 [m]、 β は体膨張率 [1/K]、 u_{in} は流入風速 [m/s]、 T は空気温度 [K] である。添字 i, o はそれぞれ室内と屋外 (風洞内) を表す。

3. CFD 精度検証用のデータ取得

3.1 風圧係数の測定

Fig. 3 (1) に示すシールドモデルを用いて風圧係数の測定を行った。測定点は模型中心断面上の風上・風下・上面の各面 30 mm 間隔で 9 点と風上・風下の開口中心想定位置 (床上 15 mm, 280 mm) の 4 点の計 31 点設けた。風速は風洞床上 1,000 mm の位置で 1.0 m/s 及び 10 m/s で測定を行った。風圧は 10 m/s では微差圧計 (Validyne 社, DP45) を 1.0 m/s では沈鐘式微差圧計 (SIBATA IPS-350) を用いて各点 1 kHz で 60 s 測定した。風圧係数の基準速度圧は軒高 (床上 300mm) 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。

3.2 温度分布・熱流の測定

Fig. 3 (2) に示す単室モデルにて温度・熱流束の測定を行った。図中に記す通り、中心断面上の高さ方向と主流方向にそれぞれ 3 点、計 9 点で模型内の空気温を測定し、室の平面中央位置では床面と屋根面の内表面温度も測定した。また、側面 1 面と Case 3 における風上面では高さ方向 3 点で内外表面温度も測定した。また、熱流束は床面中央部 1 点で測定した。実験は模型温度を測定して定常状態に達したことを確認した後、1 秒間隔で測定した温度の 10 分間平均値を各測定点での温度とした。この一連の流れを三回繰り返し行った平均値をその点での定常温度の結果として最終的に採用した。なお、実験中は風洞を回流型で運転した。

3.3 換気量の測定

Fig. 3 (3) に示す単室モデルを用い、Fig. 4 に示すように CO₂ を用いたトレーサガス定常発生法により換気量測定を行った。実験は前述の通り室内温度をモニターして定常状態を確認し、CO₂ を発生させない通風状況

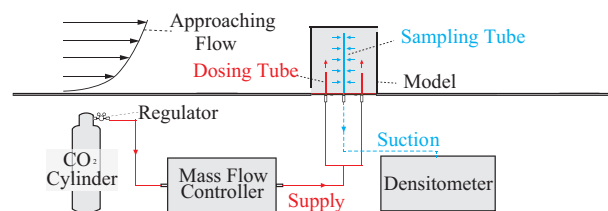


Fig.4 Schematic of ventilation rate Measurement using Tracer Gas

下で、CO₂ 濃度計 (Vaisala, GM70PUMP) により測定した濃度の時間平均値を外気濃度 C_o 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) で流量を 20 または 40 Nccm に制御して模型内に CO₂ を供給した。室内の CO₂ 濃度が定常状態に達した後、10 min 間測定を行った平均値を室内濃度 C_r とした。ここで、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床面から 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200mm, 250mm の高さで四方に設けた計 20 点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 箇所設けた高さ 100mm の配管上端から供給した。得られた平均濃度と Eq.3 から換気量 Q [L/min] の算定を行った。

$$Q = \frac{M}{C_r - C_o} \quad [L/min] \quad (3)$$

ここで、 M は CO₂ の発生量 [L/min]、 C_o 、 C_r はそれぞれ外気及び室内 CO₂ の体積濃度 [-] である。ここでは同じ実験手順を三回繰り返し、その平均値を最終的な実験結果として採用した。また、実験時は発生させたトレーサーガスが模型上流側のアプローチフローに混入しないよう風洞を吹放し型で運転した。

3.4 PIV 測定

Particle Image Velocimetry (PIV) により屋外、及び屋内の気流場を測定した。実験は前述の Table 1 の 4 条件で行い、内外温度差がある Case3, 4 では室温が定常状態に達したことを確認した後、煙発生器により模型上流で煙を発生させ、模型上部に設置したダブルパルスレーザー (日本カノマックス, DPIV-L50) を鉛直下向きに 2.0 Hz で照射し、2 開口の中心を通る鉛直面の可視画像を撮影した。

Table 2 Summary of PIV Setting

Program	Davis 8.3 (La vision)	
Algorithm	Direct Cross-Correlation Method	
Camera Flame Size	1600 [pixel] × 1200 [pixel]	
Interrogation Window Size	Pass1:48 [pixel] × 48 [pixel]	
	Pass2:32 [pixel] × 32 [pixel]	
Overlap	50 [%]	
Sampling Period	2 [Hz]	
Sampling Time	60 [s]	
Laser Output	50 [mJ/Pulse]	
Interval Time between 2 Flames	Case1, 2, 4	7500 [μs]
	Case3	10000 [μs]

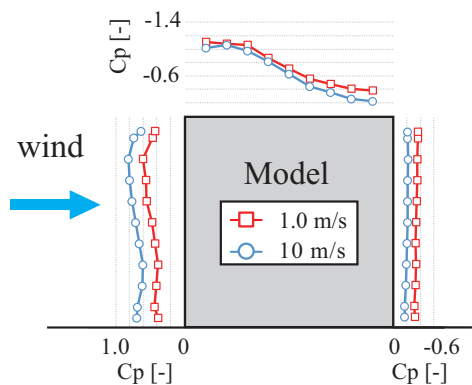


Fig.5 Distribution of Wind Pressure Coefficient

また、風洞外に CCD カメラ (LaVision, Imager ProX 2M) を設置し、レーザーと同期させて模型内部を 60 s 撮影した。PIV の解析には直接相互相関法を用い、再帰的相関法により精度向上を図った。Table 2 に解析概要を示す。なお、当該実験時は実験中は風洞を吹放し型で運転した。

4. 実験結果と考察

Fig. 5 に風圧係数の測定結果を示す。全体的な傾向として、風上面では正圧、模型上部及び風下面では負圧となっている。また、本報の実験では内外温度差と風圧のバランスから風速 1.0 m/s の条件を基本としたが、風速 10 m/s の条件と比較すると風圧係数が小さな値となっており、低レイノルズ数効果が見られたと言える。Table 3 に当該実験時の底面からの熱流束、風洞内温度、室温の結果を示す。これらは次報⁴⁾の CFD 解析の境界条件として利用する。Fig. 6 に非等温条件で実験を行った Case 3 及び Case 4 における室内温度分布測定の結果を示す。室内の空気温は概ね 50 °C 程度となっている。なお、室温は Case 3 では排気温度、Case 4 では室中央で測定した。

Fig. 7 にトレーサーガス法により得られた換気量の測定結果を示す。風力のみが換気駆動力として作用する条件 (Case 1, Case 2) では概ね同程度の風量となっている。これは Fig. 5 に示した開口部中心位置間の風圧係数差の絶対値が両条件で同程度であったためと言える。これに対して、Case 3 では風力と浮力による同程度の差圧が同

Table 3 Temperature (Indoor/Outdoor) and Heat Flux

	Outdoor Temperature [°C]	Indoor Temperature [°C]	Heat Flux from the Floor [W/m ²]
Case3	17.4	45	1077.5
Case4	17.8	48.6	1072.3

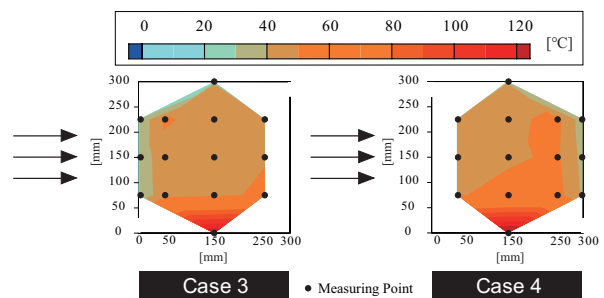


Fig.6 Indoor Temperature Distribution

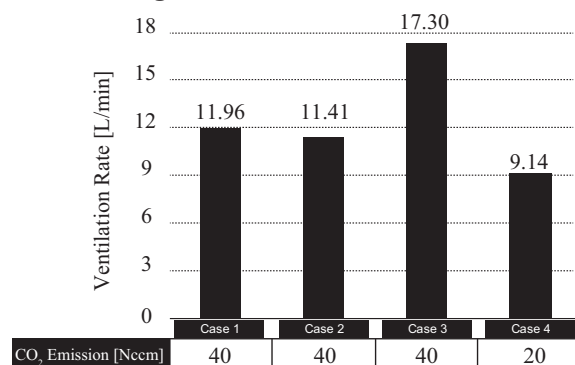


Fig. 7 Ventilation Rate obtained by Tracer Gas Measurement

方向に働くことから換気量が大きくなった。換気量の値は Case 1 の 1.45 倍という結果となったが、圧力差が概ね 2 倍となるため換気量はその圧力差の平方根に比例することからも概ね想定通りの値が得られたと言える。一方、Case 4 では浮力と風力による同程度の差圧が逆方向に作用することから、平均的に作用する圧力差は 0 に近い値となる。このため、通常の換気計算式に基づくこの条件では換気量も概ね 0 と算定されることになるが、実際の換気量は同じ風向で等温条件である Case 2 に対して 80 % 程度という結果となった。これは逆方向に作用する浮力と風力により室内の airflow が不安定となり、風上・風下の両開口で流入出が生じたためと推測される。

Fig. 8 に PIV 測定により得られた室内の風速コンターと風速ベクトルを示す。なお、Case 4 では繰り返し測定を行った際に異なる 2 種の傾向が見られたため、その両者の結果を併記する。Case 1 と Case 3 と比較すると、等温条件の Case 1 では床面及び風下壁面に沿った風速分布が見られたが、床面での発熱がある非等温条件の Case 3 では流入直後から斜め上に向かう気流が見られ、風下壁面に衝突後は壁面から剥離する傾向となった。Case 2 と Case 4 を比較すると、等温条件の Case 2 では流入後概ね水平な気流を形成し、風下側壁面に衝突して途中で時計回りの循環流を形成している。これに対して Case 4 では反時計回りの循環流を形成する傾向となり、風力が優勢な場合には風上側の上部開口から流入した気流が循環流と衝突した後に鉛直下方向に向かう気流分布を示す。一方、浮力が優勢な場合には上部開口からの流入気流は見られず、不明瞭ではあるが風下側の下部開口から循環流

に巻き込まれるような airflow パターンを示している。Case 4 では前述の通り浮力と風力による逆向きの換気駆動力が働き、実験を行った 60 s の間では平均化時間が十分ではなかったために片方の換気駆動力の影響が平均速度場の結果に比較的顕著に現れたものと考えられる。

5. まとめ

本報では単室を対象に等温及び非等温条件下で風洞実験を実施し、風圧係数、室内温度、換気量、室内 airflow の測定を行った結果を報告した。次報では LES の前段階として RANS を用いて非等温条件下での領域分割法の検討を行い、精度検証を行った結果を報告する。

【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。

【注】

1) 表中の実験時温度と目標 Ar 数は PIV 測定時のものである。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 田中佑亮, 小林知広, 山中俊夫ら: 領域分割法を用いた LES による室内通風 airflow の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その 5) 単室開口モデルを対象とした外部風向毎の各種領域分割法の解析精度検証, 令和 3 年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-6, 2022.03
- 3) T. Kurabuchi, M. Ohba, T. Nonaka: Domain Decomposition Technique Applied to the Evaluation of Cross-Ventilation Performance of Opening Positions of a Building, *International Journal of Ventilation*, Vol.8, No.3, pp.207-217, 2009
- 4) 松原暢, 小林知広, 山中俊夫ら: 領域分割法を用いた LES による室内通風 airflow の非定常解析手法に関する研究(その 7) 令和 4 年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2023.03, 掲載予定

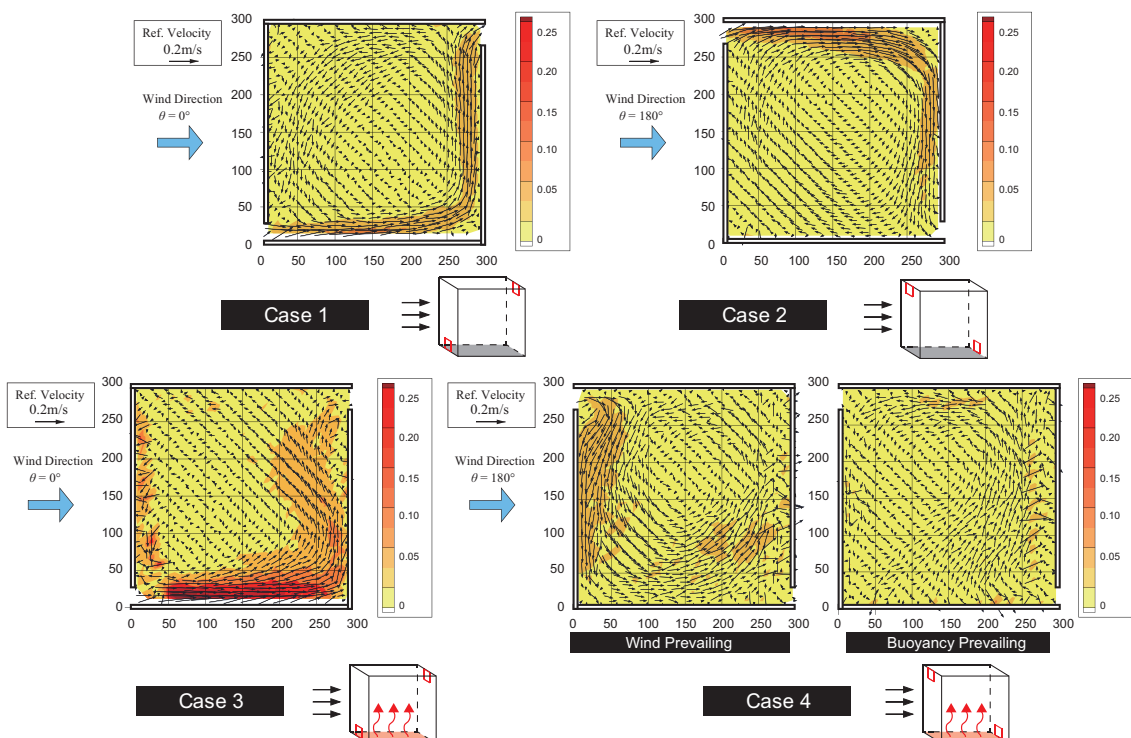


Fig.8 Indoor Airflow Pattern observed by PIV Measurement