

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 10) 流入風向に応じた流量係数補正を組み込んだ非等温条件での精度検証  
Unsteady Analysis of Cross-Ventilation Flow using Domain Decomposition Technique with LES  
(Part 10) Validation of LES under Non-isothermal Conditions  
considering Discharge Coefficient Modification

○松原 暢 (大阪大学)                      小林 知広 (大阪大学)  
    山中 俊夫 (大阪大学)                  山澤 春奈 (大阪大学)  
    丹原 千里 (大林組)

Toru MATSUBARA\*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup>  
    Haruna YAMASAWA\*<sup>1</sup> Chisato TAMBARA\*<sup>2</sup>  
    \*<sup>1</sup> Osaka University \*<sup>2</sup> Obayashi Corporation

In recent years, the use of Large Eddy Simulation (LES) is expanding. However, the computational load becomes much more enormous when LES is used. In the previous study, the Domain Decomposition Technique (DDT) was applied to LES under isothermal condition. In this paper, the DDT was applied to LES under four non-isothermal conditions with three different methods. The results of DDT were compared with whole domain analysis.

1. はじめに

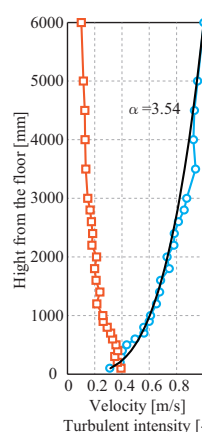
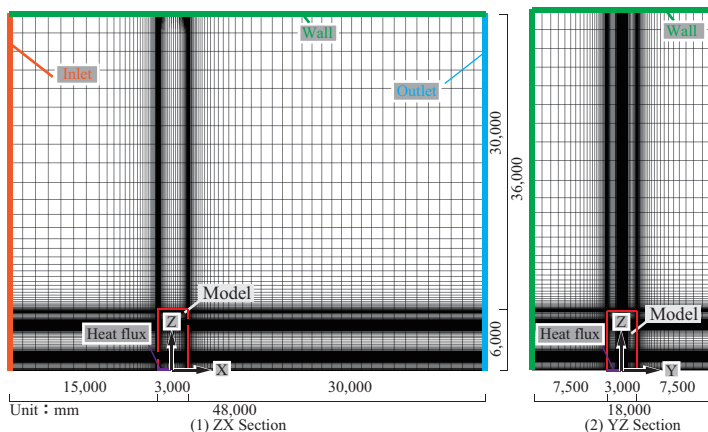
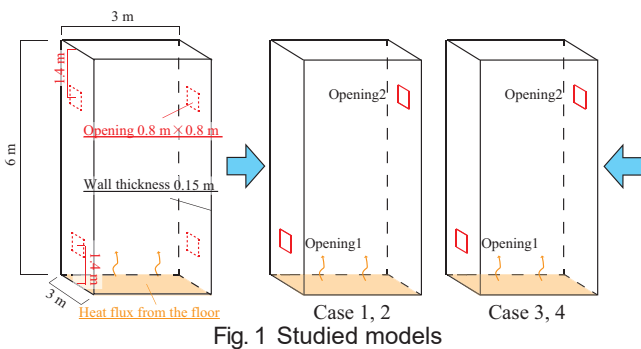
近年の屋外気流解析では、Large Eddy Simulation (LES) の利用が拡大しているが、計算負荷が大きく実務での使用は容易ではない。既往研究<sup>1)</sup>では屋外解析データを利用し、建物開口部を流入境界として室内のみの解析を行う「領域分割法」を用いて解析精度を保ちつつ計算負荷を抑える検討を等温環境下で行った。前報<sup>2)</sup>では縮小モデルを用いて非等温条件下で領域分割法を LES に適用し、非定常解析を行った。本報では、流入境界条件の与え方について3つの手法の検討を行い、室内外同時計算(全域計算)と比較し、精度検証を行う。

2. CFD 解析の概要

Fig. 1 に示すモデルを対象に、全域計算と領域分割法による室内のみの解析を行う。建物モデルは外寸一辺 6,000 mm、壁厚 150 mm とし、一辺 800 mm の開口を模型の前面と背面に一箇所ずつ設けた。内外温度差と、開口位置をパラメータとした計4条件を対象とし解析を行った。全域計算の室内気流分布、温度分布、換気量の時間平均値とその標準偏差、解析負荷を後述の領域分割法による結果と比較する。

2.1 室内外同時計算(全域計算: Whole Domain)

本解析は領域分割法を用いた解析の真値と位置付ける。Fig. 2 に解析領域とメッシュレイアウトの一例を示す。解析領域は長さ、幅、高さがそれぞれ 48,000 mm、18,000 mm、36,000 mm の流路とした。Fig. 3 にアプローチフローを示す。既往研究<sup>3)</sup>の風洞実験から得たアプローチフローを用いて、流入境界は高さ 6,000 mm で風速 1.0 m/s 想定の実験値に Smimov ら<sup>4)</sup>の手法を適用して作成した変動風を与えた。アプローチフローは概ね 1/3.54 べき乗則に従う境界層流である。Table 1 に解析条件を示す。ここでは、室温が 25 °C になるような条件を



Case	Wind direction [°]	Indoor temperature [°C]	Outdoor temperature [°C]	Heat flux [W/m <sup>2</sup> ]
Case 1	0	25.0	20.0	281.8
Case 2			15.0	700.31
Case 3	180		20.0	52.98
Case 4	15.0		422.74	

Fig. 2 Computational domain and mesh layout (Case 1, 2)

Fig. 3 Approaching flow

想定して、熱流束を算出し、床面から均一に与えた。Table 2 に解析概要を示す。総計算格子数は 1,583,040 である。乱流モデルは、Reynolds Stress Model での定常計算結果を初期値として、LES の Smagolinsky-Lilly Model を用いた。また、放射連成解析を行い、壁面の放射率は 0.9 とした。RANS の解析結果から LES への移行期間である助走計算時間は 60 秒としこの間の計算結果は破棄し、その後の本解析は 60 秒間行った。模型からの熱貫流による熱損失は換気によるものと比較して小さいため模型壁面は完全断熱とした。瞬時風量の算出のため、本計算中の全タイムステップにおいて、各開口部を 25 分割した各中央で 25 点で瞬時開口面接線方向風速を取得した。

### 2.2 非定常の室温変化を仮定した換気用計算に基づく領域分割法 (Method 1)

前報<sup>2)</sup>では流量係数を一定として領域分割法を LES に適用したが、本報では、局所相似モデル<sup>5)</sup>を用いて流量係数を補正し領域分割法を行う。領域分割法の計算手順を Fig. 4 に示す。まず、シールドモデルを用いて屋外解析を行い、開口想定位置の中心における瞬時壁面静圧と壁面から 200 mm 離れた位置での瞬時開口面接線方向風速 2 成分と瞬時全圧を取得した (Step 1)。これらを局所相似モデルに適用し、収束計算から瞬時の換気量を算出した。ここで、非定常の温度変化を想定した Eq. 1 により室温を算出し、換気量を算出した。

Table 2 Summary of CFD analysis (Whole Domain)

CFD code	Fluent 2023	
Turbulence model	LES Smagorinsky-Lilly model	
Algorithm	PISO	
Discretization scheme for advection term	Central Differencing	
Time step size	0.01 sec.(100 Hz)	
Pre-conditioning period	6,000 time steps (60 sec.)	
Main calculation period	6,000 time steps (60 sec.)	
Boundary condition (Velocity)	Inlet	Smirnov's method based on experimental value
	Outlet	Gauge Pressure: 0 [Pa]
	Walls	Werner and wengle wall function
Boundary condition (Thermal)	Based on Table 9.4	
Total number of cells	1,583,040	

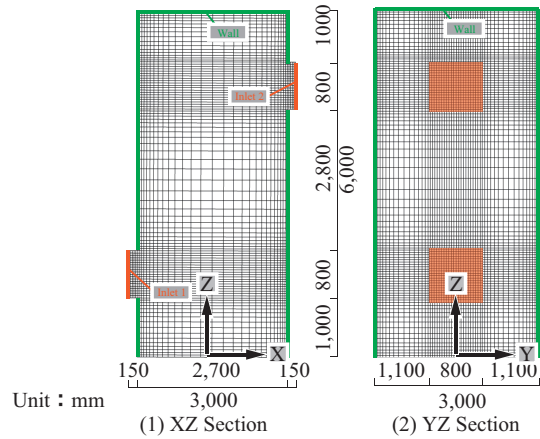


Fig. 5 Computational domain for indoor analysis and mesh layout

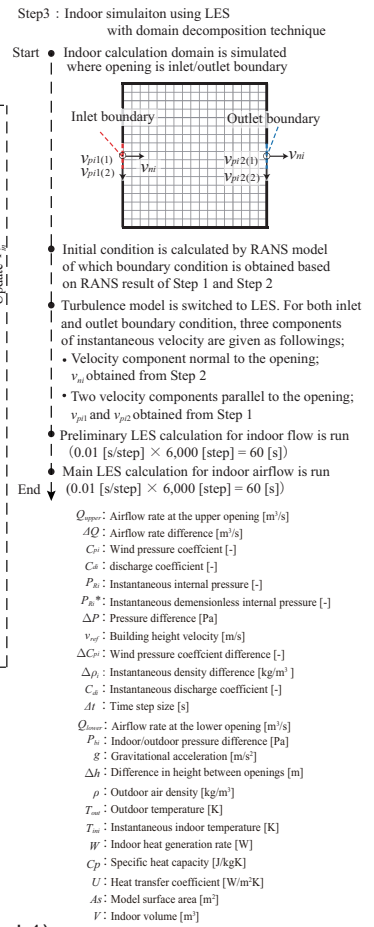
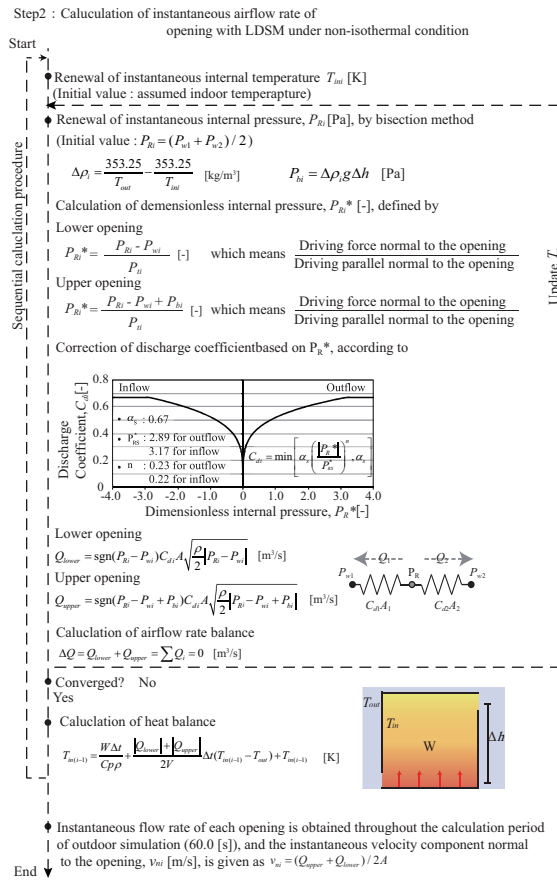
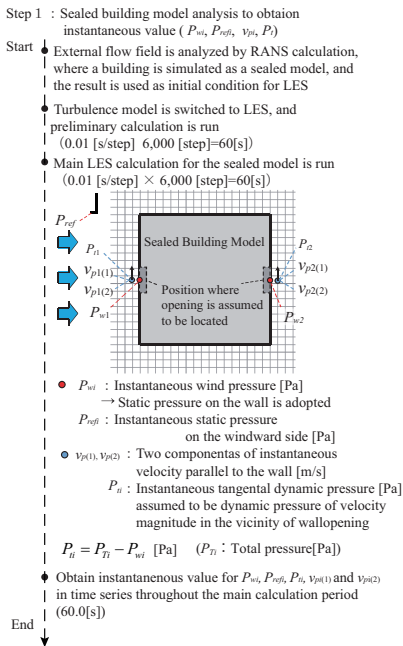


Fig. 4 Procedure of Domain Decomposition Technique (Method 1)

$$T_{in(i-1)} = \frac{W \Delta t}{Cp\rho} + \frac{|Q_{lower}| + |Q_{upper}|}{2V} \Delta t (T_{in(i-1)} - T_{out}) + T_{in(i-1)} \quad (\text{Eq. 1})$$

この瞬時の換気量を開口面積で除すことにより、瞬時開口面法線方向風速成分を算出した (Step 2)。Step 1 で取得した瞬時開口面接線方向風速と Step 2 から算出した瞬時開口面法線方向風速を室内解析の流入境界に与え、室内のみの解析を行った (Step 3)。室内解析のメッシュレイアウトを Fig. 5 に示す。助走計算時間、本計算時間、メッシュレイアウト、熱的境界条件は全域計算と同様とし、総計算格子数は 146,688 である。

### 2.3 瞬時定常の室温変化を仮定した換気量計算に基づく領域分割法 (Method 2)

Method 2 では収束計算中の熱量収支式 Eq. 1 を Eq. 2 に変更し、収束計算を行った。その他の手順は Method 1 と同様とした。

$$T_{in} - T_{out} = \frac{W}{Cp\rho \left( \frac{|Q_{lower}| + |Q_{upper}|}{2} \right) + UA_s} \quad (\text{Eq. 2})$$

### 2.4 流量係数を補正しない領域分割法 (室温瞬時定常仮定) (Method 3)

Method 3 ではより簡易的な手法として流入風向による開口部の抵抗の変化を考慮せず、流量係数を 0.65 で固定して Step 2 の収束計算を行い、瞬時の流入境界条件を

算出した。なお、温度の算出は前節同様 Eq.2 を用いて行った。

### 3. 解析結果

領域分割法による室内解析と全域計算の結果を比較する。Fig. 6 に室内風速分布の時間平均値を示す。Case 1 では、Method 1, 2 の風速分布はほとんど同じであった。これらを全域計算と比較すると、若干風速を過小評価していた。これは、換気量計算時に一樣な室温を仮定したために浮力を過小評価したことで、流量係数も過小評価されたと考えられる。一方、Method 3 では流入風速を若干過大評価していた。差異が生じた原因として流量係数を過大評価していることが考えられる。内外温度差が大きな Case 2 ではすべての Method で風速が小さくなった。Method 3 では Case 1 と傾向が異なるが、これは換気量計算時に室温を一樣にした仮定の影響が流量係数の過大評価の影響を上回ったためと考えられる。Case 3 の全域計算では、風上開口から風下開口への気流が見られた。そして、Method 3 が最も全域計算と近い結果となった。この原因として、風力と浮力が相殺してしまう条件において、Method 1, 2 では、極端に流量係数を小さく評価してしまうことがあるためと考えられる。Case 4 では、風下側からの流入と同一開口内での流入出が確認された。風速分布は Method 2 が最も全域計算と近い結果になった。Method 1 では温度を非定常で考慮することにより、

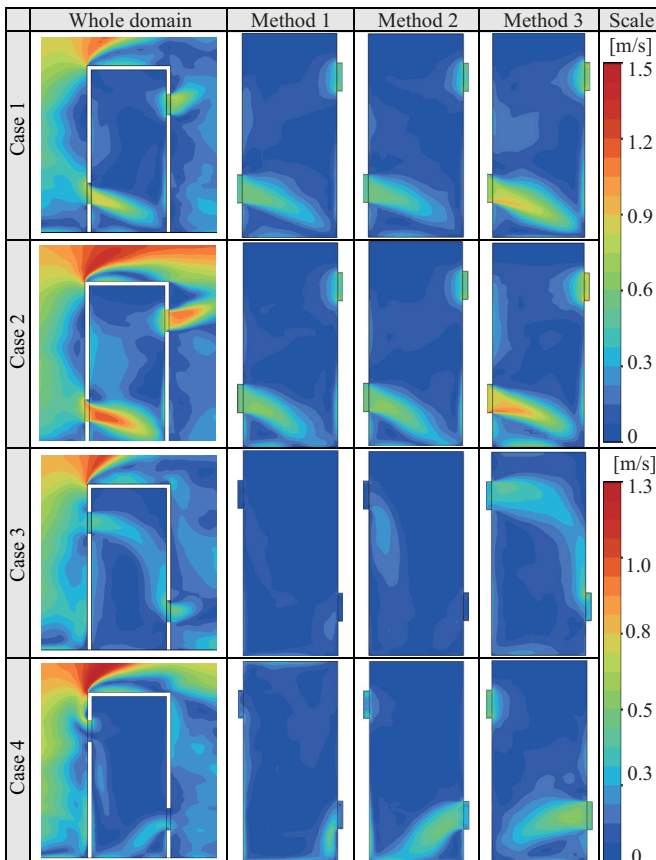


Fig. 6 Contour of mean velocity magnitude

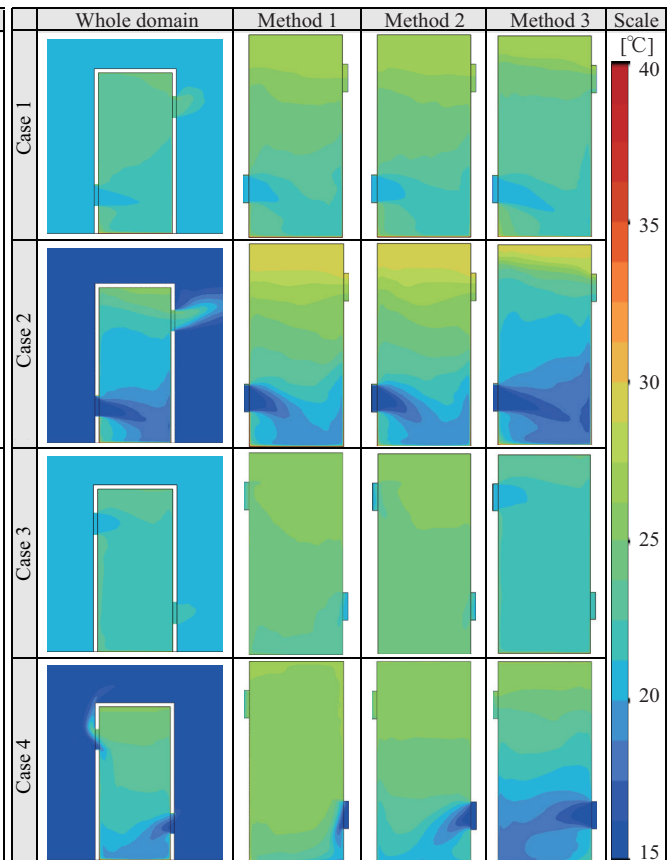


Fig. 7 Contour of mean indoor air temperature



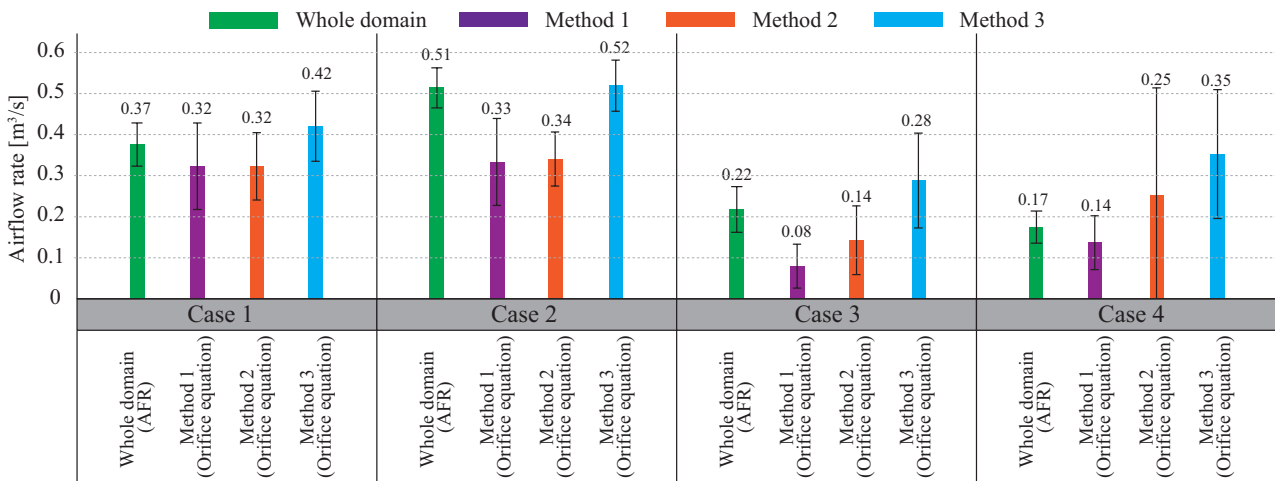


Fig. 8 Comparison of airflow rate

浮力による風下からの流入風量を過小評価してしまっていることがわかる。Method 3 では流量係数を過大評価しているため、開口面法線方向風速が大きくなり、流入風向角に差異が生じたと考えられる。領域分割法では同一開口での流入出が再現できないため、流入風速・風向に流入風速の差異が生じたと考えられる。Fig. 7 に室温分布の時間平均値を示す。すべての条件で Method 1, 2 のにおいて全域計算より温度が高くなる傾向が見られた。これは流量係数を過小評価しすぎたために、換気量が小さく算出されたことが原因として考えられる。Fig. 8 に換気量の比較を示す。Case 1 では領域分割法で概ね換気量は再現できていた。Case 2 では、Method 1, 2 で流量係数を適切に評価できていない可能性があり、換気量を過小評価していた。Case 3 の条件では Method 1, 2 で換気量を過小評価、Method 3 で過大評価していた。Case 4 では、Method 2, 3 で換気量とその標準偏差が大きくなった。これは瞬時定常に基づく計算方法で温度が収束計算中に大きく上昇すると、次のタイムステップで換気量を過大評価してしまうためであると考えられる。一方、非定常に基づく温度変化を採用した Method 1 では換気量は概ね一致しており、標準偏差も抑えられていた。なお、開口面の風速分布を再現できていないことから換気量は一致しても風速分布に差を生じたと考えられる。Fig. 9 に解析負荷の比較を示す。全域計算は全条件で概ね 90 時間前後、領域分割法では全て 20 時間前後であった。このため全ての条件で領域分割法は約 70% 以上の負荷を低減した。なお、解析は CPU Intel Xeon Gold 48 コアのプ

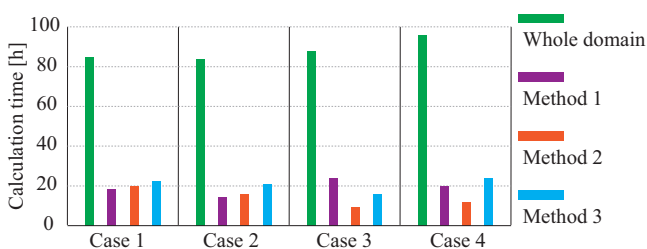


Fig. 9 Comparison of computational load

ロセッサを用いて行った。領域分割法では、一度の屋外解析から開口位置を変更した場合のケーススタディが可能であり、設計段階で複数回のシミュレーションを行う場合、領域分割法による計算負荷の軽減はさらに効果的となるといえる。

#### 4. まとめ

本報では、領域分割法を非等温環境下において LES に適用し、解析を行った。室内気流分布、温度分布換気量の時間平均値とその標準偏差、解析負荷を比較し、精度検証を行った。流量係数補正を組み込んだ領域分割法では、浮力を適切に評価できていない可能性が示唆された。また、開口面の風速分布を考慮していないための風速の差異がみられた。今後の課題として、Step 2 の収束計算中での室内温度分布の考慮と Step 3 での開口面風速分布の考慮が挙げられる。

#### 【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。

#### 【参考文献】

- 田中佑亮, 小林知広, 山中俊夫, 小林典彰, 崔ナレ: 領域分割法を用いた LES におけ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 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 (第 51 回) 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
- 松原暢, 小林知広, 山中俊夫, 小林典彰, 崔ナレ, 宮澤昇平, 蔭子韜, 丹原千里: 領域分割法を用いた LES におけ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 9) LES を用いた非等温条件下の基礎的検討, 令和 5 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, G-2, 2023.09
- 宮澤昇平, 小林知広, 山中俊夫, 小林典彰, 崔ナレ, 松原暢, 蔭子韜, 丹原千里: 領域分割法を用いた LES におけ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 8) 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, 令和 5 年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集, G-1, 2023.09
- A.Smironov, S.Shi, I.Celik: Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, Journal of Fluids Engineering, Vol.123, Issue 2, pp359-371, 2001.6
- T.Kurabuchi, M.Ohba, T.Nonaka: Evaluation of Cross-Ventilation Performance of Opening Positions of a Building, The International Journal of Ventilation, Vol.8, pp.207-271, 2009