

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2) 単室モデルを対象とした LES の解析精度検証

Unsteady Analysis of Cross-Ventilation Flow using Domain Decomposition Technique with LES (Part 2) Validation of LES for a Generic Isolated Building Model

○田中 佑亮 (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)
佐野 香之 (大阪大学)

Yusuke TANAKA^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Chisato TAMBARA^{*2}

Noriaki KOBAYASHI^{*1} Narae CHOI^{*1} Kayuki SANO^{*1}

^{*1} Osaka University

^{*2} Obayashi Corporation

Large Eddy Simulation (LES) will be widely used in cross ventilation. However, it takes an enormous amount of time to predict the indoor airflow of a complex-shaped building by cross ventilation if high accuracy is required. Therefore, a method is required for reducing the calculation load while maintaining the accuracy. This study presents CFD analysis using domain decomposition technique by LES and clarifies the issues. Following the previous paper, this paper validates CFD analysis in Sealed Model and Whole Domain by comparing them with Experiments³⁾.

はじめに

近年、屋外風環境分野では LES 利用の現実性が高まっており¹⁾、換気・通風分野でも Large Eddy Simulation (LES) の利用拡大が予想される。しかし、室内外を同時に解析する必要のある自然換気・通風解析では複雑形状建物への適用は計算負荷の観点から容易ではない。河内・倉渕ら²⁾は RANS で計算負荷を低減する手法として室内のみを解析する「領域分割法」を提案しているが、本研究ではその手法を LES で適用し、計算負荷を抑制しつつ非定常で室内気流を予測する手法の検討を行う。本報では前報³⁾の風洞実験を再現した CFD 解析を行い、室内外を同時に解析する全域計算の換気量と、開口を有さないモデル(以下、シールドモデル)における風圧係数・建物周辺風速を対象として、CFD 解析の精度検証を行う。

1. 全域計算による CFD 解析

1.1 解析概要

風洞での縮小模型実験を再現した CFD 解析を行った。解析領域は幅、高さ、長さがそれぞれ、1,400 mm、1,000 mm、3,200 mm の流路とし、外寸 1 辺 200 mm、壁厚 2

mm、上流及び下流の建物壁面中央部に 1 辺 20 mm の開口を有する建物を配置し室内床面中央を原点とした。

Fig. 1 に解析領域及びメッシュレイアウトの一例を示す。

1.2 解析条件

LES による CFD 解析を行う。標準 $k-\varepsilon$ のモデルの結果を初期条件とし、計算時間間隔は 1/2,000 s、計算開始後の 2,000 タイムステップ (=1.0 s) を LES への移行期間として計算結果を破棄し、その後の 5.0 s を本計算とみなして統計データを取得した。なお LES の流入境界には **Fig. 2** に示す前報の 1/4.55 べき乗則の境界層流に Smimov ら⁴⁾の手法を適用して作成した変動風を与えた。**Table 1** に CFD 解析条件について一覧で示す。

1.3 Purging Flow Rate (PFR) を用いた換気量評価方法

トレーサー粒子を発生させ換気量の評価を行う。**Fig. 3** に粒子発生概要を示す。風洞実験³⁾でのトレーサー供給部と同一地点から 1/2,000 s 毎に粒子を発生させ、建物内 ($-98 < x < 98, -98 < y < 98, 0 < z < 198$) の粒子個数の推移から粒子個数濃度 C_t [個/m³] を算出する。また、5.0 s では

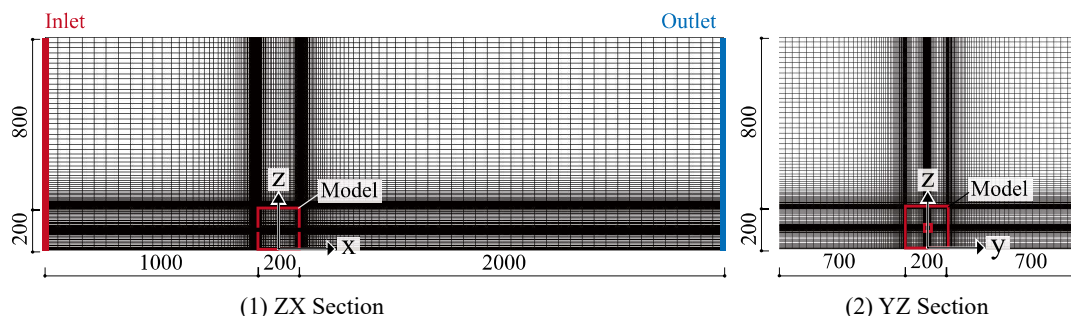


Fig. 1 Computational Domain and Computational grid on ZX and YZ section (Whole Domain)

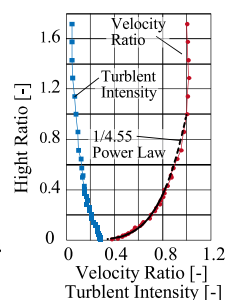


Fig. 2 Approaching flow

C_r が定常状態に達しないと考えられるため、Eq. (1) の非定常濃度予測式を用いて LES 解析結果との濃度の誤差の二乗和が最小となる換気回数 n [1/s] を求めて PFR ($= nV$) を算出した。ここで、 m は発生量 [個/s] である。

$$C_r(t) = \frac{m}{nV}(1 - e^{-nt}) \quad (1)$$

1.4 PFR を用いた換気量評価による精度検証

Fig. 4 に LES における粒子個数濃度の時系列変化のグラフを示す。解析を終了した 5.0 s 時点においても濃度は上昇傾向にあり、定常に達していないため、Eq. (1) に基づき換気回数 n を同定した。Fig. 5 に前報の風洞実験³⁾ と LES で算出された換気量を示す。ここで、実験では室中央に設置した配管の 3 つの高さ位置から計 12 点で吸引して濃度を測定している。このため、室平均濃度の測定を意図したものであるが、実際は完全混合状態でないことから平面中央位置の濃度の影響が大きく、室平均濃度を算出した CFD と厳密に比較が可能なものではないが、換気量のオーダーは概ね一致したと言える。

Table 1 Calculation Condition (Whole Domain)

CFD Code	Fluent 19.2	
Turbulence Model	Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model : $C_s=0.12$)	
Algorithm	PISO	
Discretization Scheme for Advection Term	Central Differencing	
Time Step	0.0005 sec. (2 kHz)	
Pre-conditioning Term	2,000 time steps (1 sec.)	
Mean Calculation Term	10,000 time steps (5 sec.)	
Boundary Condition	Inlet	Smirnov's Method based on Experimental Value
	Outlet	Gauge Pressure : 0 [Pa]
	Walls	Werner and Wengel Wall Function
	Symmetry	Free slip
Total Number of Cells	3,264,244	

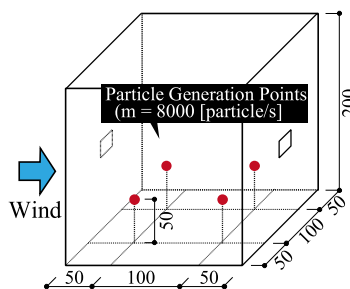


Fig. 3 Particle generation points

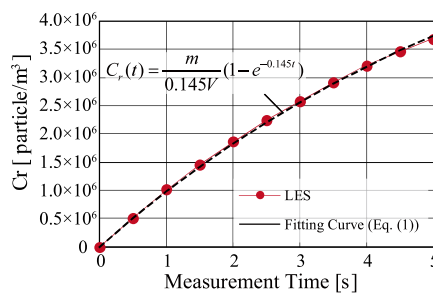


Fig. 4 Particle concentration C_r

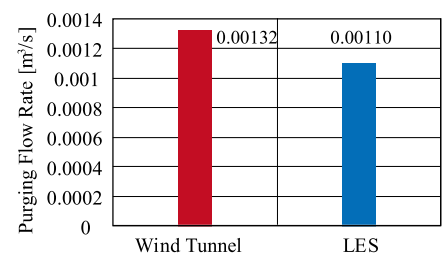


Fig. 5 Purging flow rate (PFR) obtained from Wind Tunnel Test and LES

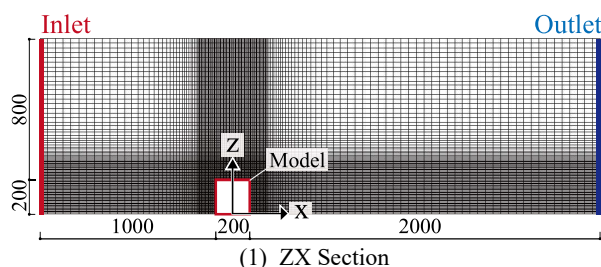


Fig. 6 Computational Domain and Computational grid on ZX and YZ section (Sealed Model)

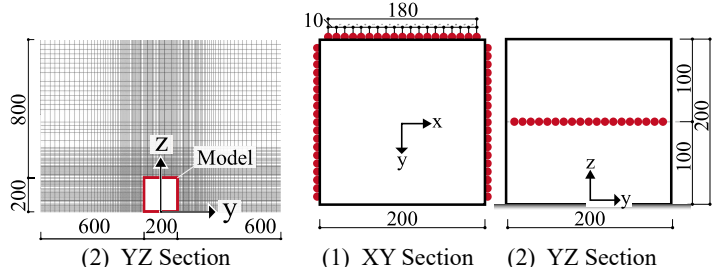


Fig. 7 Monitoring point of C_p Value

2. シールドモデルによる CFD 解析

2.1 解析概要および解析条件

シールドモデルを用いて風圧係数を測定した風洞実験を再現した CFD 解析を行った。解析領域は全域計算と同様で、流路内に外寸 1 辺 200 mm の開口を持たない建物を配置した。Fig. 6 に解析領域及びメッシュレイアウトを示す。ここで、総計算格子数は 2,284,272 である。CFD 解析の手法は Table 1 に示した全域計算時と同様であるが、総計算時間は 12 s (24,000 タイムステップ) として、うち最初の 1 s を助走計算とした。

2.2 風圧係数評価方法

建物の壁面静圧である風圧を、建物の影響を受けない上流アプローチフローの建物高さでの動圧で除した風圧係数を用いて LES と風洞実験³⁾ の結果を比較し、LES の解析精度を評価する。ここでは風洞実験で得られた時間平均の風圧係数を比較することとし、建物の対称性を考慮して Fig. 7 に示す 57 点において全計算タイムステップで壁面静圧を記録した。CFD においても風洞内基準静圧を全タイムステップで記録し、そのモニター点を $(x, y, z) = (-600, 400, 945)$ に設置した。各タイムステップで得た瞬時の壁面静圧から瞬時の基準静圧を減じることで瞬時風圧求めた。また、瞬時の基準動圧は点 $(x, y, z) = (-1100, 0, 200)$ で取得し、瞬時風圧をこれで除して得られる瞬時の風圧係数を助走計算を除く全タイムステップで時間平均することで平均風圧係数を算出した。

2.3 風圧係数分布評価による精度検証

Fig. 8 に LES 解析による本計算開始後 11 s 間の測定点における時間平均風圧係数と風洞実験³⁾ で取得した時間平均風圧係数を示す。図より建物風上面と風下面において LES と実験値は非常に良く一致したと言える。一方、

側面においては若干の差異が見られるが実験値と同様の分布傾向を示しており、比較的解析精度の良い結果が得られたと考えられる。なお、ここで見られた若干の差異の原因の一つとして、クーラン数 (CFL) が考えられる。

Fig. 9 に本計算開始後 11 s 時点の CFL が 1 を超える範囲をコンターで示す。本解析では建物近傍のメッシュを比較的細かく施したが、主に剥離による縮流域で瞬時的に CFL が 1 を超えてしまう領域が出現しており、計算タイムステップをさらに細かく設定することで一層の精度向上を図ることができる可能性もある。

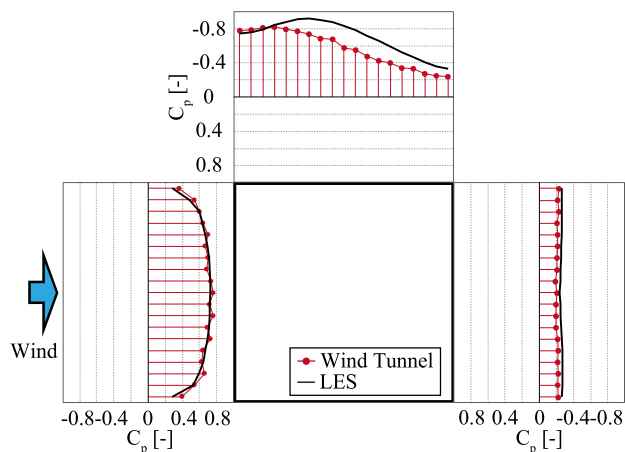


Fig. 8 C_p Value obtained from LES and experiment

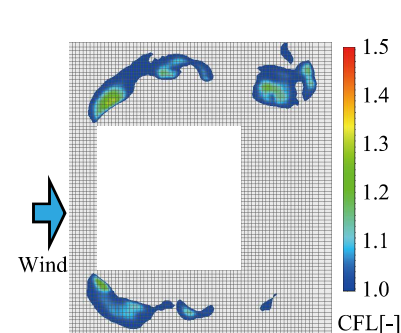


Fig. 9 Countour of CFL

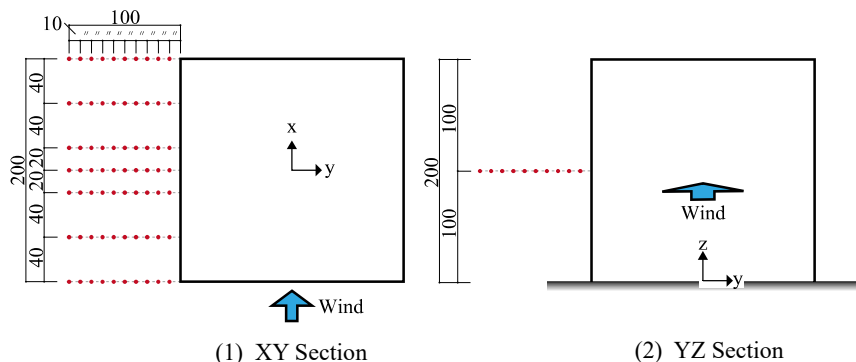


Fig. 10 Position of monitoring velocity

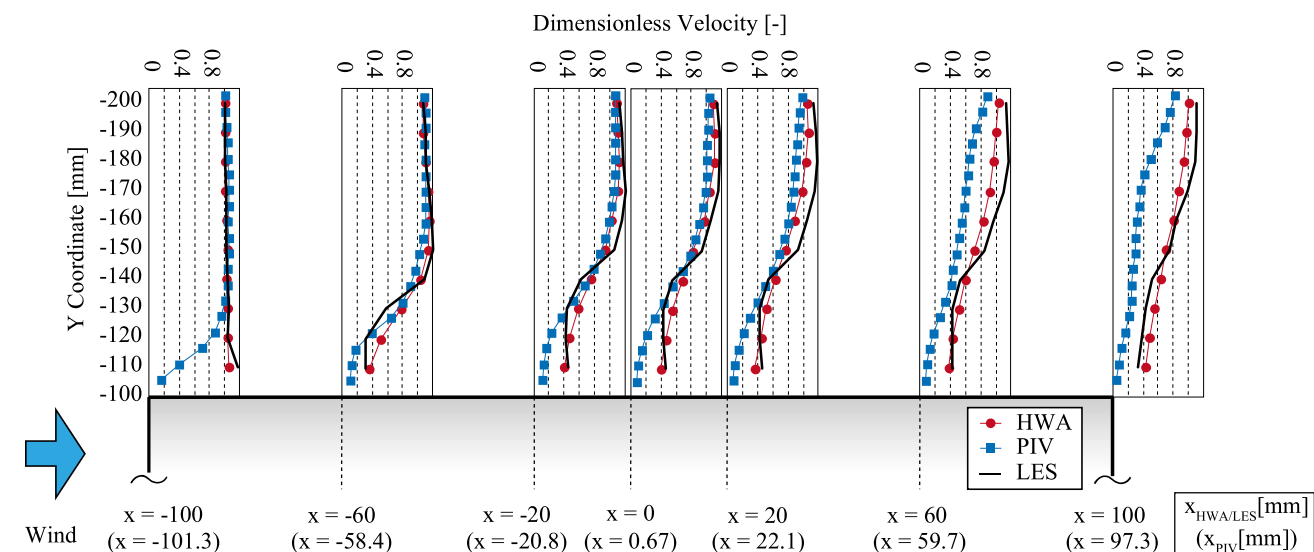


Fig. 11 Velocity in LES and experiment

2.4 建物周辺風速の評価方法

本節では LES における建物周辺風速の解析精度検証を行う。ここでは対称性を考慮し、建物側面の片側でのみ平均風速の比較を行う。**Fig. 10** に示す 70 点に瞬時風速のモニター点を設置した。得られた瞬時風速の水平成分を合成することで算出される各点での 2 次元スカラー風速を本計算中の全タイムステップで時間平均し、これを点 $(x, y, z) = (-100, -200, 100)$ における時間平均スカラー風速で無次元化して評価を行う。なお、前報³⁾の熱線風速計の測定結果は水平方向 2 成分の合成風速であると仮定している。

2.5 建物周辺風速評価による精度検証

Fig. 11 に風洞実験³⁾での熱線風速計 (HWA) 及び粒子画像測定法 (PIV) による風速測定で得た結果と、本報の LES で得た建物周辺風速の結果を示す。この結果から、HWA の測定結果と LES の解析結果が非常によく一致したと言える。一方 PIV と LES の結果を比較すると、上流側の壁面から離れた位置ではよく一致しているが、壁面近傍と下流側ではあまり一致していない。これは PIV による測定の際、該当箇所煙粒子が十分に存在しない時間帯があったために、PIV が過小評価をしていた可能性が考えられる。ここでは誤差要因が少ないと思われる

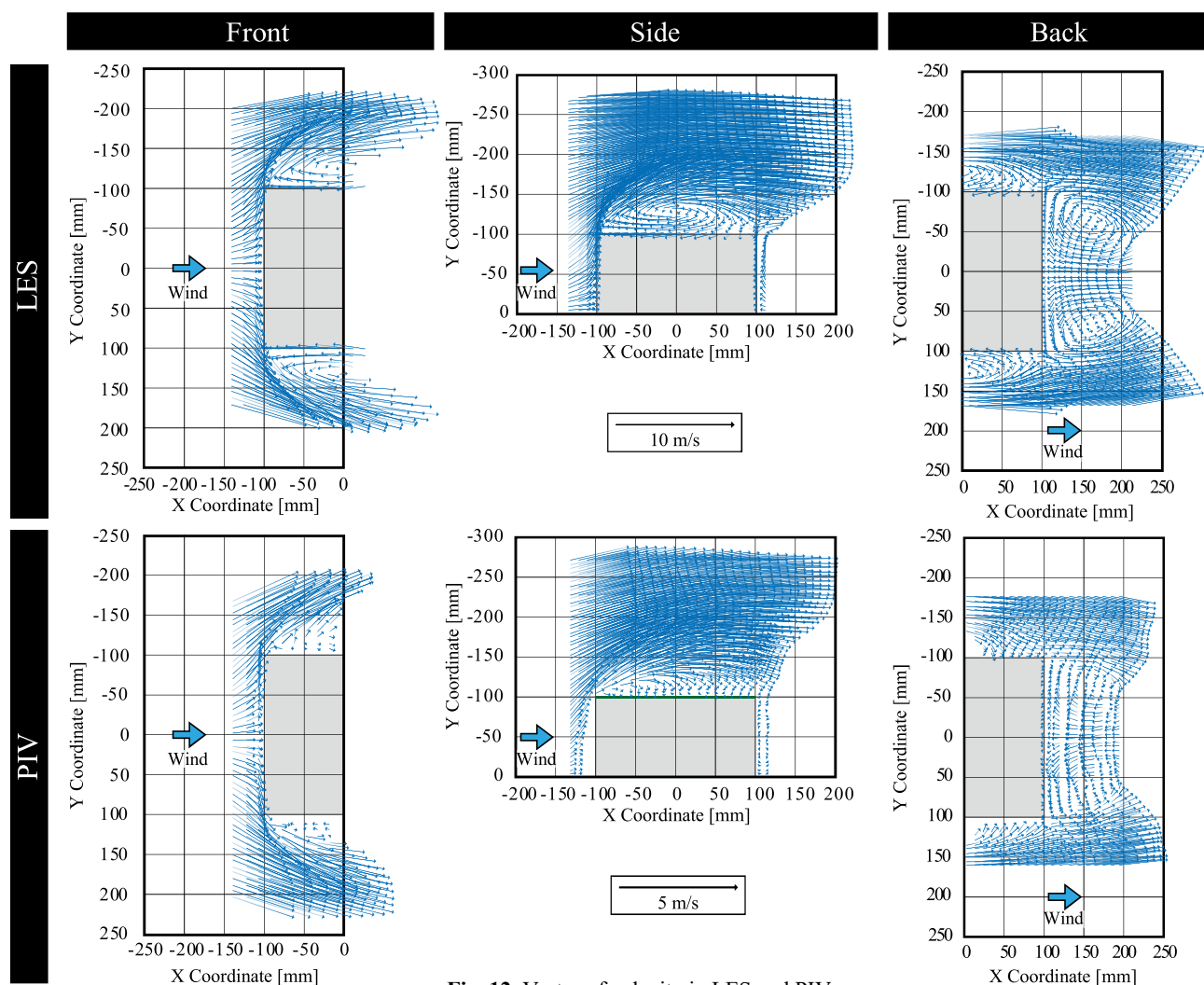


Fig. 12 Vector of velocity in LES and PIV

HWA での測定結果の信頼性が高いものと考え、この結果から建物周辺風速についても LES の解析精度は概ね良好と判断した。

2.6 建物周辺風速ベクトル場による評価

本節では建物周辺の気流場の精度を確認することを目的として、PIV と LES の比較を行う。Fig. 12 に建物周辺における平均風速ベクトル分布をそれぞれ示す。なお、PIV ではアプローチフロー風速を 5.0 m/s と半減させて測定されたため、基準ベクトルの長さを変更して表示している。上流部分・下流部分ではベクトル方向が非常に良く一致している事が分かる。また、側面部分では壁面近傍位置では概ね一致、壁面から離れた位置ではよく一致している。近傍位置での差異は、前報³⁾で示した通り PIV で壁面近傍位置に十分にトレーサが入り込んでいなかったことなどにより測定精度が高くない可能性がある。しかしながら、剥離流や縮流、循環流といった気流パターンは全体的によく一致しており、本研究で実施した LES が概ね精度良く解析できていると考える。今後はシールドモデルで得られた瞬時風圧と瞬時風速のモニター結果を用いて LES で領域分割法の検討を行う。

3. まとめ

本研究では LES による領域分割法の提案を目的とし、本報ではその前段階として LES の全域計算とシールドモデルの計算結果を風洞実験結果と比較して精度検証を行った。その結果概ね精度良く解析できていることを確認した。今後は本報の解析結果を用いて LES による領域分割法を適用した解析を行う所存である。

【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】

- 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) 河内悠磨, 倉渕隆, 大場正昭, 遠藤智行, 塚本健二, 野中俊宏, 鶴田久美子: 領域分割法を用いた数値シミュレーションによる通風室内気流予測に関する研究 (第 1 報) 領域分割法の精度検証, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, D-21, pp.1043-1046, 2009.9
- 3) 佐野香之, 小林知広, 山中俊夫, 丹原千里, 小林典彰, 崔ナレ, 田中佑亮: 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, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 掲載予定
- 4) A.Smirnov, 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