

# 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その2) LESによる単一開口及び複数開口の解析

## Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings (Part 2) Analysis of Single-Sided and Double-Sided Opening by LES

正会員 ○小林 知広 (大阪市立大学) 正会員 梅宮 典子 (大阪市立大学)  
技術フェロー 近本 智行 (立命館大学) 正会員 Lim Eunsu (東洋大学)

Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Noriko UMEMIYA\*<sup>1</sup> Tomoyuki CHIKAMOTO\*<sup>2</sup> Eunsu LIM\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka City University \*<sup>2</sup> Ritsumeikan University \*<sup>3</sup> Toyo University

The general prediction method of wind-induced ventilation rate cannot work well for a room with a single opening or multiple openings of the same time-averaged  $C_p$  value, because influence of wind turbulence cannot be considered. This work aims to evaluate ventilation effect due to turbulence, and the ultimate goal is to establish a simplified prediction method available for such flow fields. This paper presents CFD simulation using LES for a room model with a single-sided opening or double-sided openings with several cases of opening size. By using particle tracking technique, ventilation effect is evaluated through the purging flow rate (PFR), and the correlation between PFR and opening size is finally shown.

### 1. はじめに

風力換気量予測には一般に有効開口面積と風圧係数を用いるが、単一開口や風圧係数差がない2開口では風の乱れの影響により換気がなされるにも関わらず換気量が0と算定される。単一開口では室内空気の圧縮性による脈動現象と開口部での乱流拡散による混合現象により換気が行われると言われており<sup>1,2)</sup>、既往の研究として Cockroftら<sup>3)</sup>や Warrenら<sup>4)</sup>による研究が見られる。近年では混合理論に基づく山中ら<sup>5,6)</sup>の研究や、河野・加藤ら<sup>7)</sup>による開口換気促進のための開口附属要素に関する研究が見られる。しかし、2開口間で風圧係数差が小さい場合の換気効果には不明な点が多い。そこで本研究では、主として風圧係数差がない2開口を有する室モデルに着目して換気効果を評価する。本報では風圧係数差のない2開口の例として対面する2面に開口を有する室モデルに対して横風がアプローチする気流場を検討対象とし、単一開口との比較も行う。評価方法としては、LESでParticle Tracing<sup>8)</sup>を行うことでPurging Flow Rate<sup>9)</sup>(以降PFR)を算出し、最終的に開口面積と換気効果の関係を評価する。

### 2. 室外側のみ解析による計算格子の検討

#### 2.1. 研究対象とした室モデル

本研究では風洞における縮小模型実験を想定したCFD解析を行う。検討対象模型(室モデル)は外寸200 mm角の立方体模型とし、幅と高さが1,000 mm、長さ3,200 mmの解析領域の流路の床面に設置した。本章では開口無しの模型により室外の格子検討を行う。図1に解析領域と計算格子の一例(後述のType 2)を示す。

#### 2.2 格子検討におけるCFD解析概要

格子依存性の有無を確認するため、室モデル外壁面から各方向への第一メッシュの幅が異なる4種類の格子(Type 1~4)を設定した。各Typeの室モデル周辺のXY断面図を図2に示す。解析はまず標準k-εモデルを用いて十分に計算を収束させた後、その結果を初期条件としてLESを用いて計算を行った。LESでの計算時間間隔は0.0005 [s]とし、計算開始後の2,000 time step (1.0 [s])を標準k-εモデルからの移行期間とみなして計算結果を破棄し、その後の20,000 time step (10.0 [s])を本計算とした。流入境界条件は図3に示す境界層流(基準高さ900 mmで10 m/s)にSmirnovら<sup>10)</sup>の手法を

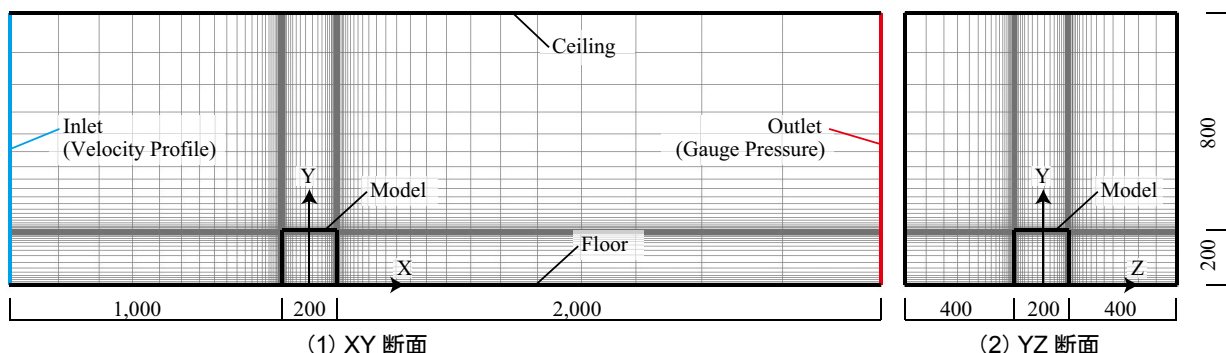


図1 計算対象領域とメッシュレイアウト

適用して変動風を与えた。なお、ここでの壁面境界条件は Linear-Log Law に基づく 2 層モデルとした。表 1 に CFD 解析手法をまとめて示す。

### 2.3 解析結果

図 4 に中心断面におけるスカラー風速の平均値を示す。ここでは時間平均風速が概ね滑らかに分布していることから、平均化時間に大きな問題はないと判断した。図 5 に示す風速の X 成分の時間平均値を見ると、Type 4 のみ大きく外れており、Type 1, 2, 3 は全体的には大きな差は見られない。ここでは計算負荷と精度の観点から Type 2 が実用的な格子配置と判断し、次章ではこの格子分割に基づいて室内外の解析と評価を行う。

表 1 CFD 解析の計算条件

CFD Code		Fluent 14.5	
Turbulence Model		Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)	
Algorithm		Implicit method(SIMPLE)	
Discretization Scheme for Advection Term		Central Differencing	
Time Step		0.0005 s	
Preconditioning Calculation Term		2,000 time step (= 1.0 s)	
Main calculation Term		20,000 time step (= 10.0 s)	
Boundary Condition	Inlet	Smirnov's method (Based on k and ε)	
	Outlet	Gauge Pressure:0[Pa]	
	Walls	Two Layer Model of Linear - Log Law	
Smagorinsky Coefficient		0.1	
Mesh Type	First Mesh Size in Y Direction[mm]	Total Number of Cells	
	type1	0.371	533,028
	type2	1.835	317,251
	type3	2.441	216,384
	type4	7.809	128,952

### 3. 室内外解析による換気効果の評価

#### 3.1 解析の概要

室外側は Type 2 の格子分割とし、気流に対して室モデル側面一方（単一開口）または両方（対面開口）の中央に開口を設けて室内も含めた解析を行う。開口は正方形とし、寸法  $L = 20, 40, 50, 60, 80$  [mm] の 5 条件を単一開口と対面開口のそれぞれについて解析する。ここで、室モデルの壁面厚さは  $2.0$  [mm] とした。本研究では PFR を用いて室内換気効果を評価する。PFR は対象領域内で実質的に汚染質を希釈・排出するのに有効な換気量を示すもので、領域内での汚染質発生量  $q_p$  と領域内平均濃度  $C_p$  を用いて  $PFR = q_p / C_p$  として計算する。ここでは室モデル内で  $1 / 2,000$  秒ごとに表 2 に示す座標を組み合わせた 27 点から粒子を発生 ( $q_p = 54,000$  [個/秒]) させ、個々の粒子を追跡して対象領域内の粒子個数濃度 [個/ $m^3$ ] を算定することで PFR を求めた。解析方法は前章と同様とし、対象領域内の濃度が概ね収

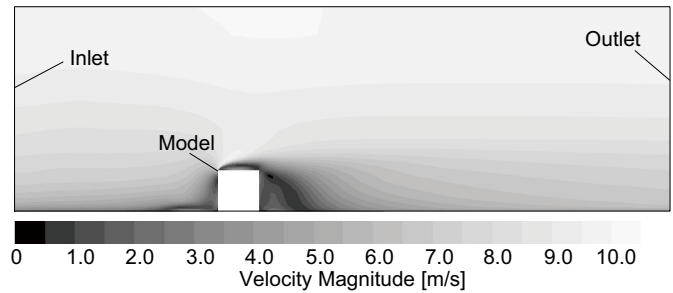


図 4 スカラー風速の時間平均値 (Type 2)

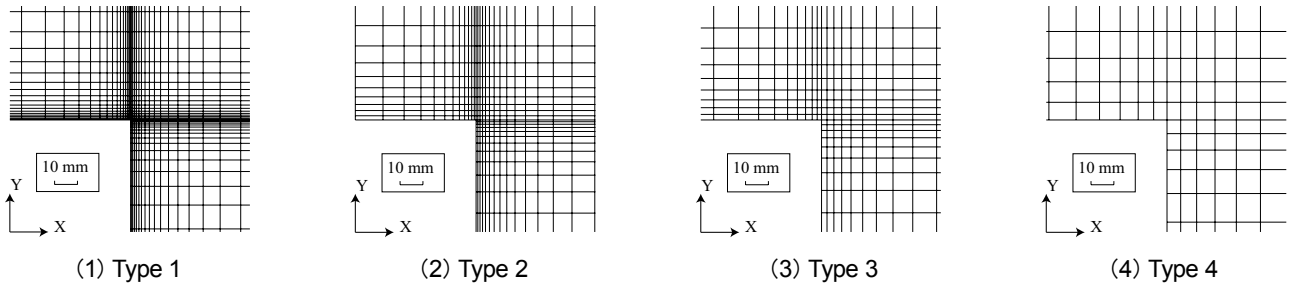


図 2 室モデル近傍の格子配置

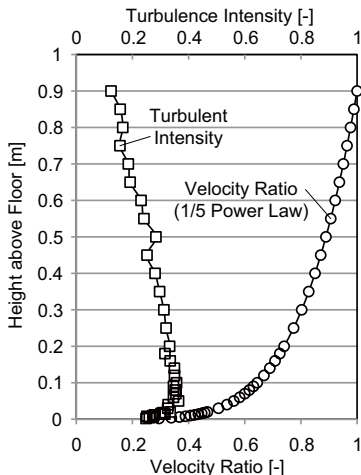


図 3 アプローチフローの平均風速及び乱流強度

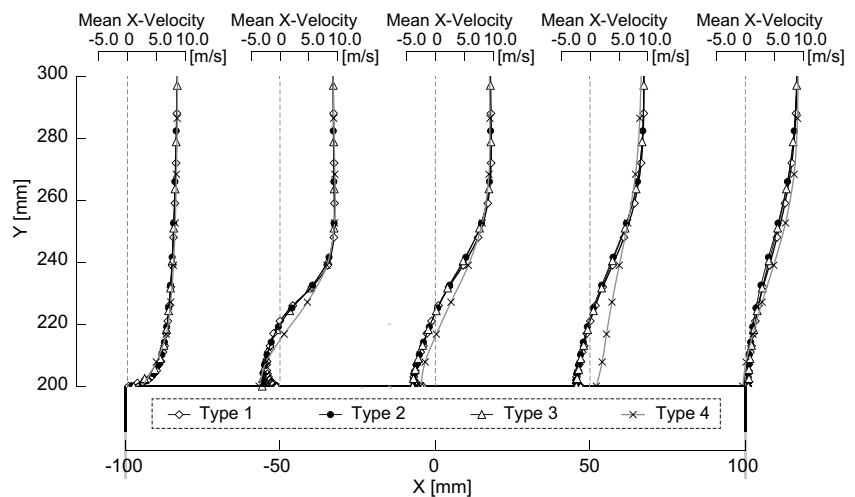


図 5 各格子 Type における風速の X 成分の時間平均値

束するまでを総計算時間の目安とした。図6に計算開始直後のY=100 mmにおける瞬時風速ベクトルと粒子分布を示す。濃度の対象領域は室モデル外表面から室内側に5 mmの室内壁近傍領域を除いた室内空間 (-95 < x < 95, 5 < y < 195, -95 < z < 95 [mm]) とした。ここでPFRは発生開始後の定常濃度により算出する必要があるが、条件によっては総計算時間が不十分となる可能性を考え、CFDの個数濃度と(1)式の個数濃度の差の二乗和が最小となるような換気回数n[回/s]を同定することでPFR(=nV)を算出した(Vは対象領域体積[m<sup>3</sup>])。

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

### 3.2 解析結果

開口部の気流性状を表す基礎情報として、図7に単一開口(L=50mm)と対面開口(L=40mm)条件における開口中心部での風速のZ成分の瞬時値を示す(対面開口ではZ=100mm側の開口で取得)。図8には同結果にフーリエ変換を施して得られた風速変動のパワースペクトルを示す。当然ながら平均値が0に近い風速変

動が見られているが、パワースペクトルからは明確なピークは見られない結果となった。図9に単一開口条件のCFDで得られた対象領域内の個数濃度と同定されたn及び(1)式による近似曲線を示す。同様に、図10に対面開口条件の結果を示す。開口面積が大きいほど実質的な換気量が大きくなるため収束までの時間は条件によって異なるが、概ね収束している条件が多く、どの条件でも濃度が一樣に近く近似曲線がCFD結果に概ね一致している。また、単一開口及び対面開口の両条件で気流の乱れによる換気が行われていることが確認できる。ここで得られた実質的な換気回数nに基づいて算出したPFRと開口面積の合計値との関係を図11に示す。単一開口条件と対面開口条件の両方でPFRが概ね開口面積に比例している。対面開口条件では時間平均

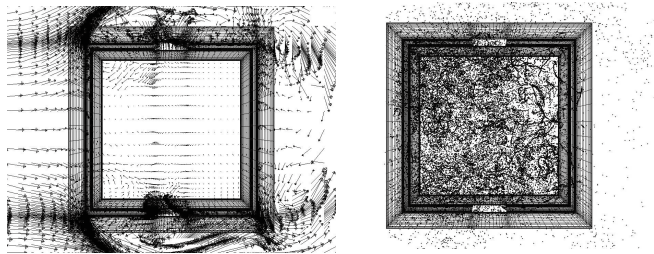
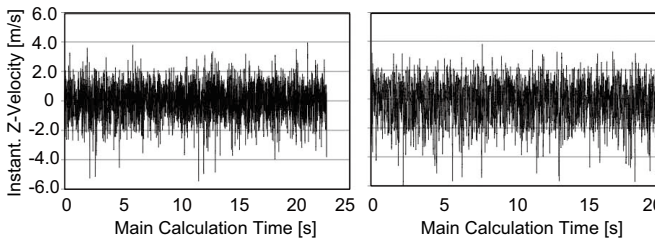


図6 瞬時風速ベクトルと粒子分布  
(対面開口 : L=40mm 条件、1.0 s 時点)

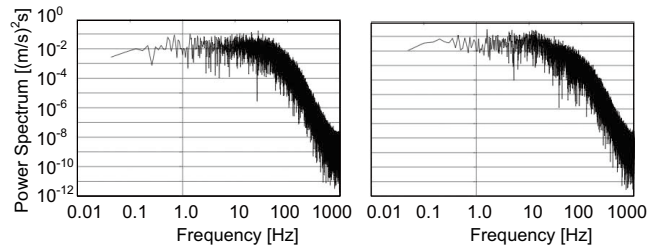
表2 室モデル内の粒子発生位置座標

X coordinate [mm]	-66 , 0 , 66
Y coordinate [mm]	33 , 100 , 166
Z coordinate [mm]	-66 , 0 , 66



(1) 単一開口 : L = 50 mm (2) 対面開口 : L = 40 mm

図7 開口中央部における風速のZ成分の瞬時値



(1) 単一開口 : L = 50 mm (2) 対面開口 : L = 40 mm

図8 開口中央部における風速のZ成分のパワースペクトル

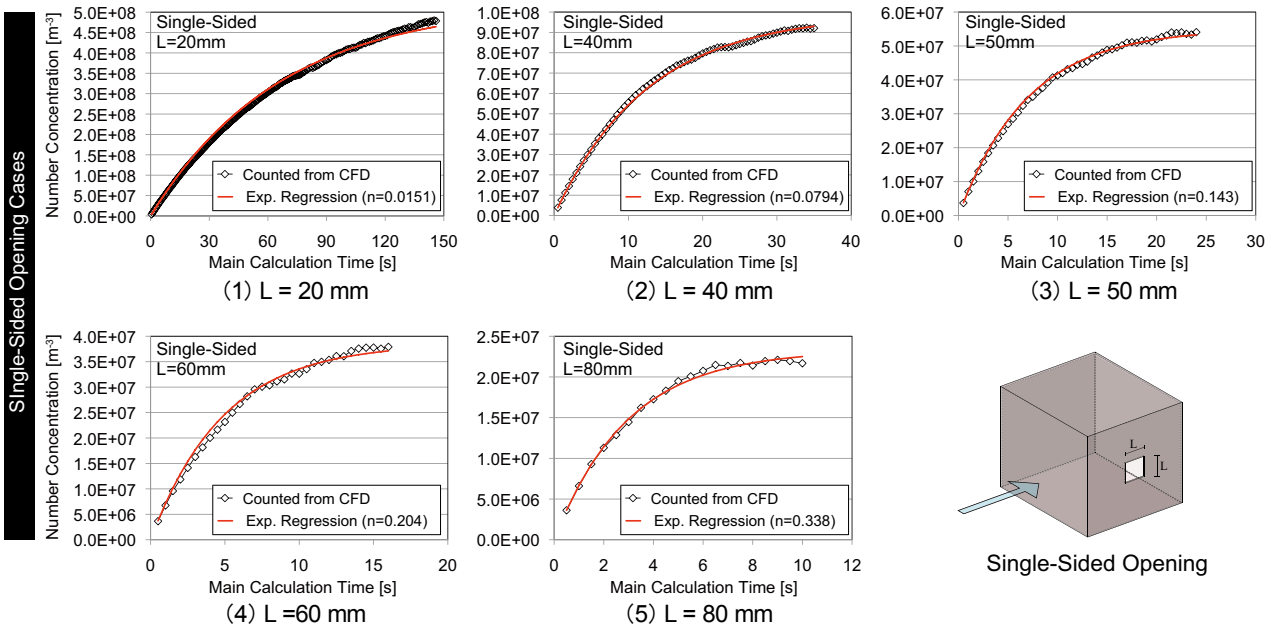


図9 単一開口条件における対象領域内の個数濃度 (CFD結果及び同定したnによる近似曲線)

値では風圧係数差がないものの、瞬時的には圧力差が生じて通風が両方向に交互に発生することにより、単一開口条件と比較して換気効果が著しく大きくなると予測したが、総開口面積が同じならば両者の換気効果に大きな差異はなく、若干増加するという結果になった。このため、風圧係数差のない対面開口条件では、瞬時の風圧係数差による通風現象よりも開口面での混合の影響の方が大きい可能性も考え得る。なお、山中ら<sup>6)</sup>は乱流下での単一開口を対象に混合層外端風速  $U_w$  [m/s] と開口面積  $A$  [m<sup>2</sup>] により換気量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] =  $0.064U_w$  を提案したが、仮に本研究で開口部高さのアプローチフロー風速 (6.44 [m/s]) を  $U_w$  とした場合、概ね程度の結果が得られた。このため、CFD 解析自体は乱れによる換気効果を比較的良くで予測できていると考えられる。

#### 4. まとめ

本報では風圧係数の時間平均値に差が無い対面開口に焦点を当て、単一及び対面開口条件の LES を行うことで換気効果を評価した。今後の課題として、各開口

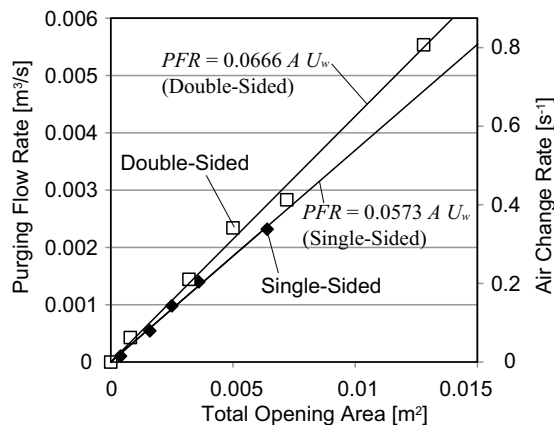


図 11 開口面積と PFR の関係

面内での瞬時の流入出を評価する等の詳細な現象解明により、瞬時的な風圧差による通風と開口面での混合の影響を分離した評価が有用と考えられる。また、開口部位置を変化させることで比較的小さな風圧係数差が生じた際の検討も行い、風圧係数差と従来の換気の式による誤差との関係を明らかにする所存である。

#### 【謝辞】

解析を行うにあたり黒川玲嗣氏 (当時立命館大学、現長谷工コーポレーション) 及び大野真斗氏 (当時大阪市立大学、現ヤマダエスバイエルホーム) に多大なるご尽力を頂いた。記して謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) F. Haghighat, J. Rao, and P. Fazio : The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No.2, pp.95-109, 1991
- 2) F. Haghighat, H. Brohus, and J. Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 3) J. P. Cockroft and P. Robertson : Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening, *Building and Environment*, Vol. 11, pp.29-35, 1976.
- 4) P.R.Warren and L.M.Parkins : Single-sided ventilation through open window, *ASHRAE SP49*, pp.209-228, 1985
- 5) 山中俊夫, 檜崎正也, 佐藤隆二, 岩本清孝: 単一開口を持つ室の風力換気に関する研究 - 開口に沿う気流により形成される混合層に基づく換気現象 -, 日本建築学会計画系論文集, 第 517 号, pp.37-43, 1999.5
- 6) T. Yamanaka, H. Kotani et al. : Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, *The International Journal of Ventilation*, Volume 5, Number 1, pp.179-187, 2006.6
- 7) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生: 横風時における単一開口換気の特長に関する実験的研究 - 片壁面上のみに開口を有する居室の換気正常に関する研究 (その 1) -, 日本建築学会環境系論文集, 第 611 号, pp.29- 35, 2007.1
- 8) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 - Particle Tracing による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の基礎的解析 -, 日本建築学会計画系論文集, 第 534 号, pp.41-48, 2000.8
- 9) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION - Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 10) A. Smirnov, et al. : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle - Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Volume 123, Issue 2, pp.359-371, 2001.6

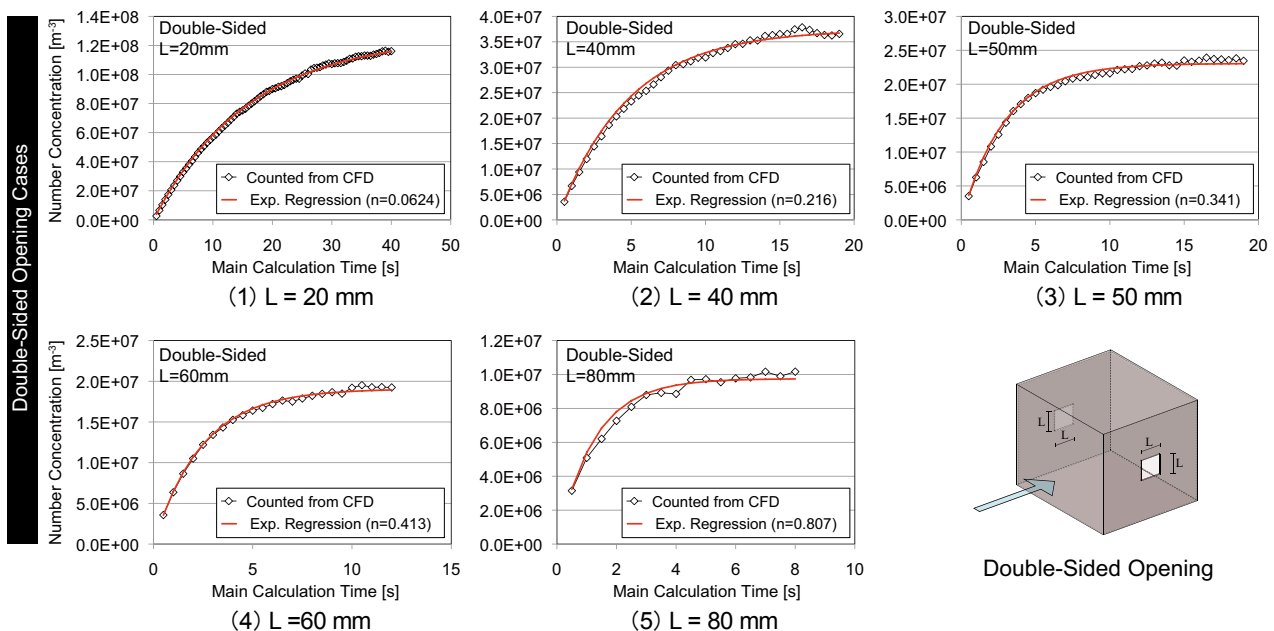


図 10 単一開口条件における対象領域内の個数濃度 (CFD 結果及び同定した n による近似曲線)