

複数の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4) 微小な風圧係数差の2開口を有する室の換気量評価

Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings
 (Part4) Ventilation Rate for Double-Sided Openings of Small Wind Pressure Difference

学生会員 ○藤田 拓也 (大阪市立大学) 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)

Takuya FUJITA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹ Noriko UMEMIYA*¹

*¹ Osaka City 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 performance due to turbulence. This paper presents CFD based on LES for a room with double-sided openings with several cases of small wind pressure difference. The ventilation performance is evaluated by purging flow rate (PFR) and air flow rate (AFR), and the correlations between flow rate and C_p value is shown.

1. はじめに

2開口を有する室の風力換気量算定には一般的に以下の換気の式が用いられる。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(a_1 A_1)^2} + \frac{1}{(a_2 A_2)^2}}} U \sqrt{C_1 - C_2} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad \dots(1)$$

ここで、 A : 開口面積 [m^2]、 C : 風圧係数 [-]、 U : 外部風速 [m/s]、 a : 流量係数 [-] である。この式では単一開口や風圧係数差がない複数開口で換気量が0となるが、実際には風の乱れで換気が生じる。乱れによる換気として単一開口を扱った研究はこれまでも見られ、そのメカニズム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の2種と言われている^{1,2)}。複数開口においても脈動と混合のメカニズムで換気が行われており³⁾、檜崎・山中ら⁴⁾、河野・加藤ら⁵⁾による研究例も見られるが、風圧係数差が微小な場合での換気効果は不明な点も多い。既報⁶⁾では風圧係数差が0となる2開口で実質的な換気量として Purging Flow Rate (PFR)^{7,8)} を評価したが、本報では微小な風圧係数差の対面開口条件を対象として LES を用いた CFD 解析を行い、PFR に Air Flow Rate (AFR) を加えた2種の換気量を用いて評価を行った結果を報告する。

2. 解析概要

2.1 解析対象

既報⁶⁾と同様に縮小模型による風洞実験を模擬した CFD 解析を行った。解析領域は幅 1,000 mm、高さ 1,000 mm、長さ 3,200 mm の流路として、風向に対して側面に対面開口を有する一辺 200 mm の立方体模型を室モデルとして設置した。メッシュレイアウトは、室モデルに近づくにつれてメッシュ間隔が細くなるように設定した (図 1)。

2.2 CFD 解析手法

LES による CFD 解析を行う。LES では標準 $k-\epsilon$ モデル (SKE) の結果を初期条件とし、計算時間間隔を 1/2,000 [s]、計算開始後の 2,000 time step (=1.0 [s]) を SKE から LES への移行期間とみなして結果を破棄し、その後の 19 [s] を本計算とした。LES の流入境界は図 2 の境界層流に Smirnov ら⁷⁾ の手法により変動風を与えた。表 1 に CFD 解析概要を示す。

2.3 換気量評価方法

本報では既報⁶⁾同様、次式で定義される PFR を用いた換気量評価を行う。

$$PFR = \frac{q_p}{C_p} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad \dots(2)$$

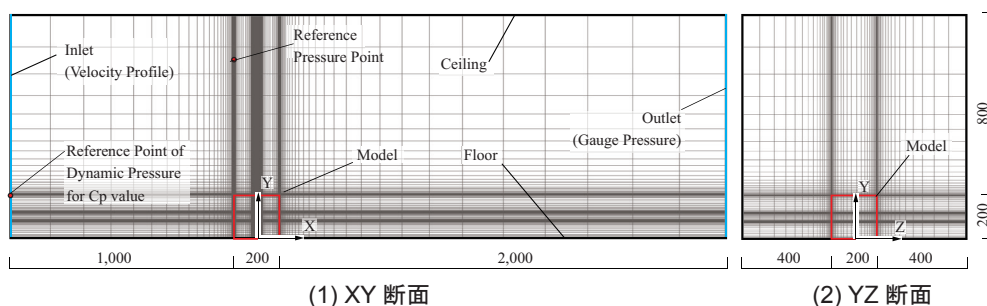


図 1 解析領域及びメッシュレイアウト

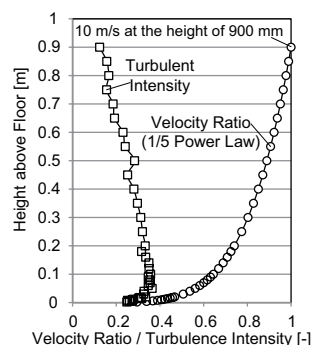


図 2 アプローチフローの平均風速及び乱流強度

PFR は対象領域内で汚染質の希釈・排出に有効な換気空気の流入量で (2) 式の q_p は単位時間当たりに対象領域内で発生する汚染物量 [kg/s]、 C_p は対象領域内の平均濃度 [kg/m³] である。本研究では室内で 1/2,000 [s] ごとに図 3 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/s]) させて、対象領域内 (-95<x<95, 5<y<195, -95<z<95) の室内粒子個数濃度から PFR を求めた。PFR は発生開始後の定常濃度から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、以下の汚染質濃度予測式を用いて CFD 解析の個数濃度と予測個数濃度の差の二乗和が最小となるような換気回数 n [1/s] を同定することで PFR ($=nV$) を算出した。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad \dots(3)$$

$C_r(t)$ は室内個数濃度 [個/m³]、 q_p は発生量 [個/s]、 V は室容積 [m³]、 t は本計算開始後の時間 [s] である。本報では PFR に加えて開口面法線方向の風速を流入出で区別して積分することで流入出風量を評価する。PFR と区別してこの風速ベースの換気量を通気量 AFR (Air Flow Rate) [m³/s] と表記する。本研究では開口に垂直に流入出する瞬時風速のモニター点を各開口で 64 点ずつ設置し (図 4)、両開口からの瞬時流入風量合計 Q_{in} 及び瞬時流出風量合計 Q_{out} を全 time step で求め、それらの時間平均値を AFR として算出した。

$$AFR(LES) = \left(\frac{Q_{in} + |Q_{out}|}{2} \right) \quad \dots(4)$$

AFR は風速のみに基づく換気量であるため、一度流出した汚染物の再流入は有効な換気とみなさない PFR と比較して大きい値をとると考えられる。

表 1 CFD 解析概要

Turbulence Model	Large Eddy Simulation Smagorinsky-Lilly Model (Cs=0.1)					
CFD Code	Fluent 15.0					
Algorithm	Implicit method(SIMPLE)					
Discretization Scheme for Advection Term	Central Differencing					
Time Step	0.0005 [s]					
Transition Term	2,000 time step (=1.0 [s])					
Boundary Condition	Inlet	1/5 Power law(Smirnov's method)				
	Outlet	Gauge Pressure :0 [Pa]				
	Walls	Two Layer Model of Linear-Log Law				
Total Number of Cells	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
	757,253	1,072,323	1,100,923	1,166,275	1,213,571	1,207,659
	Case0-1	Case0-2	Case0-3	Case0-4		
	728,613	728,613	728,613	728,613		

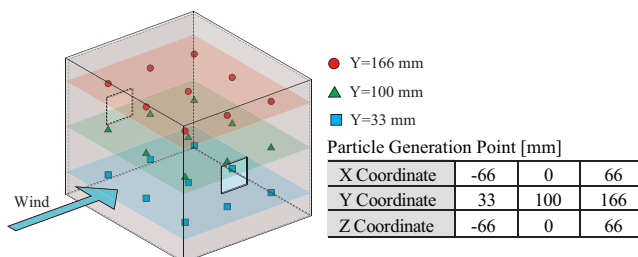


図 3 粒子発生位置図及び発生位置座標 [mm]

2.4 風圧係数差を変更した開口条件

本研究の目的である微小な風圧係数差における換気効果を明らかにするため、開口は風上側から見て左側の開口部 (開口 1) 位置を固定し、右側開口部 (開口 2) を主流方向に移動させることで異なる風圧係数差 6 条件 (Case0~Case5) を設定した (図 5)。全条件で開口サイズは 40×40 mm とし、開口部中心高さは 100 mm、壁厚は 2.0 mm とした。なお、風圧係数は前報⁶⁾で LES により行った開口を設置しない条件での解析結果から取得した。また、風圧係数の基準速度圧の位置は流入境界面の室モデル高さ座標である (X, Y, Z) = (-1100, 200, 0) を採用し、基準静圧は室モデル風上端上部で (-100, 800, 0) の位置とした。

3 風圧係数差を変更した CFD 解析の結果と考察

図 6 に LES による室内個数濃度の時間応答の CFD 解析結果を (3) 式による近似値と共に示す。Case 3 ~ Case 5 では風圧係数差が大きいほど定常濃度が低くなり換気量が大きくなる傾向が見られるが、Case 0 ~ Case 2 のように風圧係数差が非常に小さい条件ではその限りではない。よってこれらの条件では、時間平均した風圧係数の差ではなく、開口部周辺の乱流拡散や開口間の瞬時の風圧係数差といった気流の乱れが主な換気駆動力と考えられる。

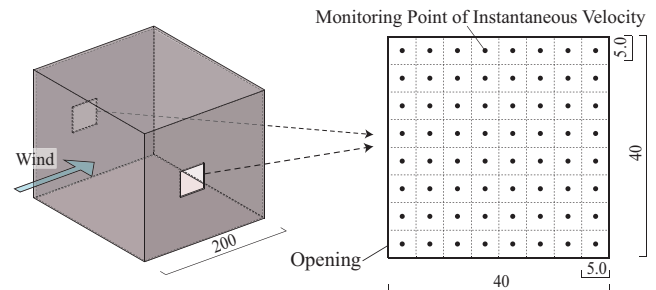


図 4 開口部 Z 成分風速モニター一点位置図 [mm]

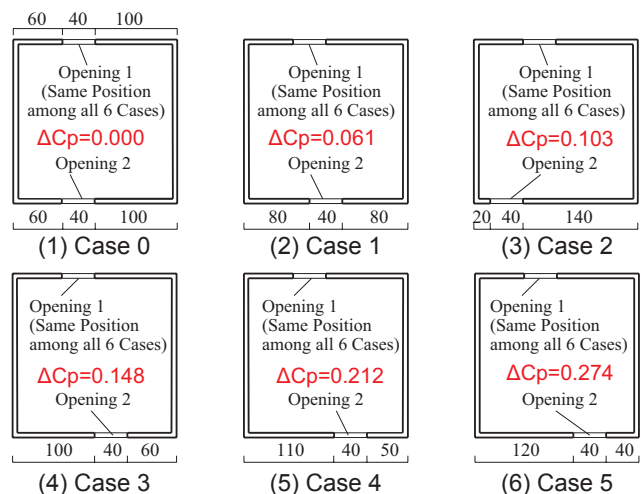


図 5 風圧係数差を変更した開口条件

図7にLESによる各開口条件の Q_{in} と Q_{out} の時間変動を2.0[s]まで示す。全条件で瞬時の風量バランスが取れており、開口部風速モニター点の配置間隔に大きな問題は無いと言える。また、Case 2の流入出風量の変動が他の条件より小さい結果となったが、これが図6でCase 2の換気量がCase 0やCase 1より小さくなった要因である可能性がある。つまり、風圧係数差が非常に小さい条件では乱れが主な換気駆動力と考えられることから、Case 2では開口部での気流の乱れが小さいため換気効果も小さく、図6の室内汚染物濃度がCase 0及びCase 1より高くなったと考えられる。図8に各条件のLES結果に基づいて次式から計算された開口2からの流入率($r_{in(2)}$)を示す。

$$r_{in(2)} = \left(\frac{Q_{in(2)}}{Q_{in}} \right) \times 100 [\%] \quad \dots(5)$$

$Q_{in(2)}$ は Q_{in} のうち開口2のみから流入する瞬時風量である。Case 0では風圧係数差が概ね0であるため、両開口から同程度の風量が流入して50%程度となる。また、全条件で開口2の風圧係数の方が大きいため、風圧係数差が大きくなるとともに開口2からの流入率が増加する傾向が見られるが、Case 2では50%となり左右の開口からの流入出量が同程度となった。このことからCase 2は開口部近傍の乱れ性状が支配的に影響を及ぼしていると考えられる。

図9に風圧係数差とPFR・AFRの関係を示す。なお、(1)式による換気量($\alpha=0.60$ で算出)も併せて示す。ここで(1)式は開口部を通過する空気量を表すためAFRとの比較を行うと、風圧係数差が0.1以上で(1)式に概ね一致する結果となった。したがって0~0.1程度の風圧係数差までは乱れが支配的な換気駆動力になるため従来手法による換気量算定では精度が著し

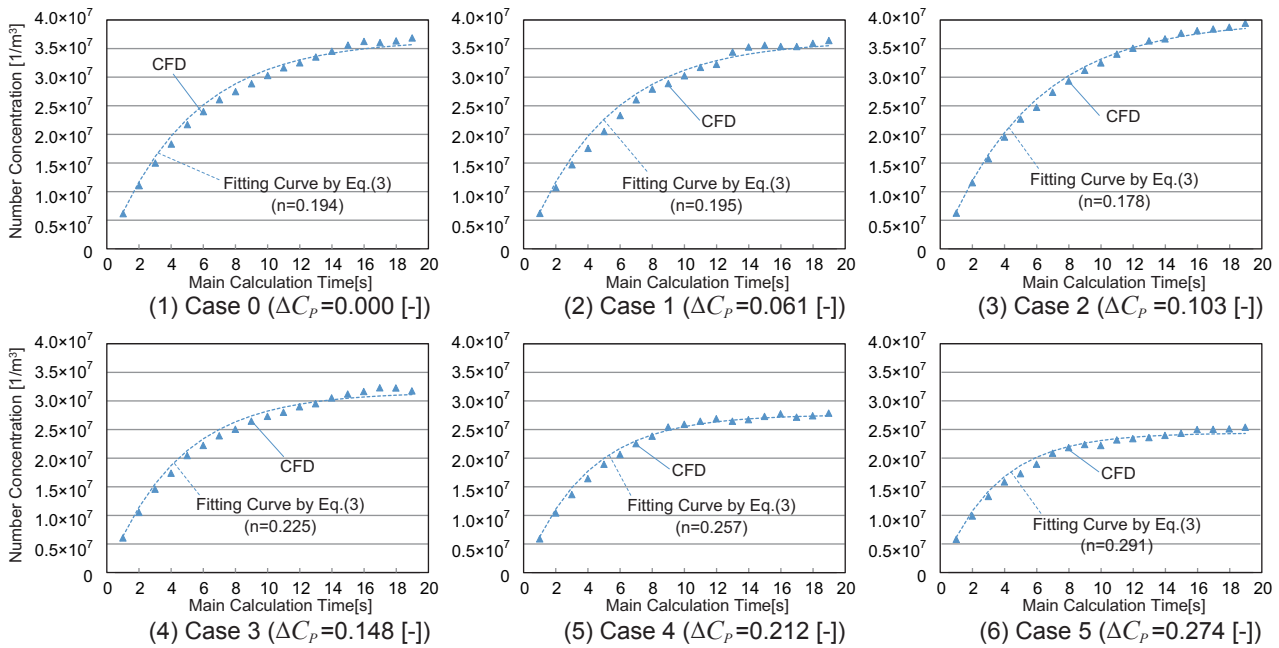


図6 室内濃度の推移 (CFD結果及び同定した換気回数による近似曲線)

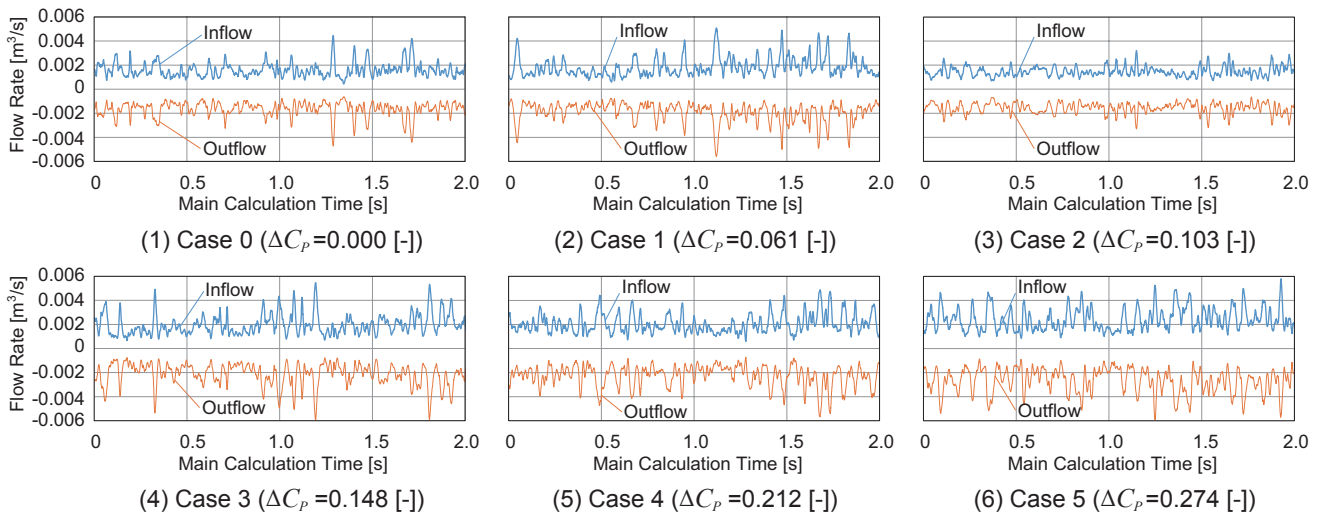


図7 開口面において流入出する風量の時間変動 (0~2[s])

く低下する可能性が示された。なお、PFRはAFRより若干小さいが、室内での空気の滞留箇所の存在や流出した汚染物の室内への再帰が原因と考えられる。

4. 風圧係数差が無く乱れ性状の異なる CFD 解析

前述の結果から開口部の乱れ性状が換気量に及ぼす影響を考慮するため、風圧係数差が0の左右対象の開口部配置として、その主流方向位置を変更した5条件 (Case0 及び Case0-1~Case0-4) を設定した (図10)。なお、Case0は前章と共通の条件である。開口位置と換気量の関係を図11に示す。風圧係数差が同じ0の条件でも風下に配置した場合に換気量が大きくなっている。次に開口部中心における空間静圧の標準偏差と換気量 (AFR) の関係を図12に示す。なお、左右対象であることからここでの横軸は2開口での平均値とした。この結果から静圧の標準偏差が大きくなるほど換気量が大きくなることが示された。

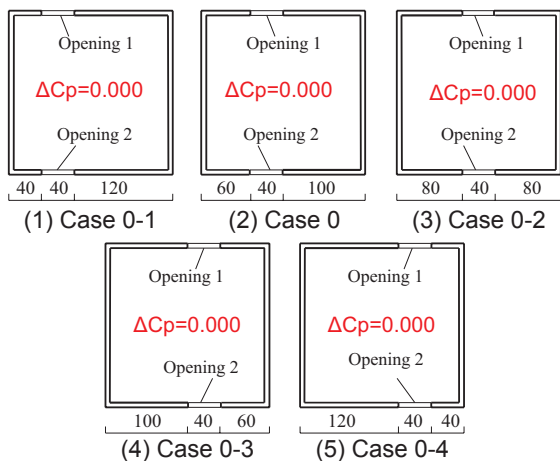


図10 風圧係数差を0に固定した解析の開口条件

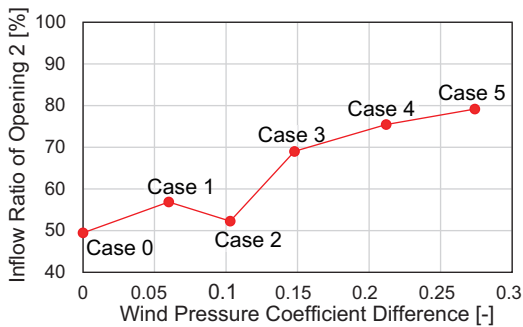


図8 開口2からの流入率

4. まとめ

本報では風圧係数差が微小な2開口を対象としてCFDにより換気量を評価した。その結果、風圧係数差が0.1程度以下で従来の換気の式が不適切になると示された。また、風圧係数差が0の条件でも開口部を風下に配置するほど換気量が大きくなり、開口部付近の静圧の標準偏差が影響することが示された。今後は一般式の精度の低い範囲における換気量算定手法の提案を目的とした解析を行う所存である。

参考文献

- 1) F. Haghghat, J. Rao, and P. Fazio : The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No2, pp.95-109, 1991
- 2) F. Haghghat, H. Brohus, and J. Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 3) 檜崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明: 風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第1報 風の乱れによる換気効果とそのメカニズム, *空気調和・衛生工学会論文集*, pp25-34, 1989.2
- 4) 山中俊夫, 檜崎正也, 岩本清孝: 自然風の乱れによる換気効果 (その31) 大小二つの開口を持つ室の風の乱れによる換気効果, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)*, pp819-820, 1993.9
- 5) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生: 欧風時における片側開口居室の換気量予測 片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究 (その3), *日本建築学会環境系論文集 第73巻 第626号*, pp437-443, 2008.4
- 6) 小林知広, 梅宮典子, 近本智行, LIM Eunsu: 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, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第4巻, pp.201-204, 2015.9
- 7) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 不完全性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, pp41-48, 2000.8
- 8) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION - Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 9) A. Smirnov, et al : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue2, pp359-371, 2001.6

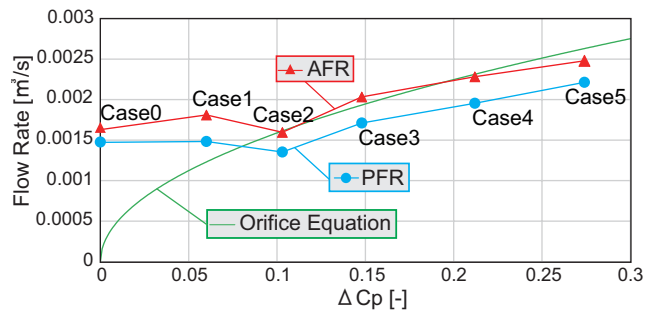


図9 風圧係数差と換気量の関係

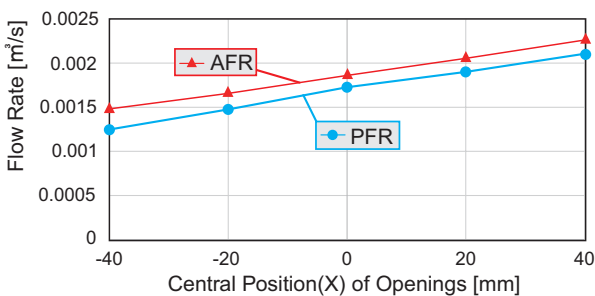


図11 開口中心座標 (X) と換気量の関係

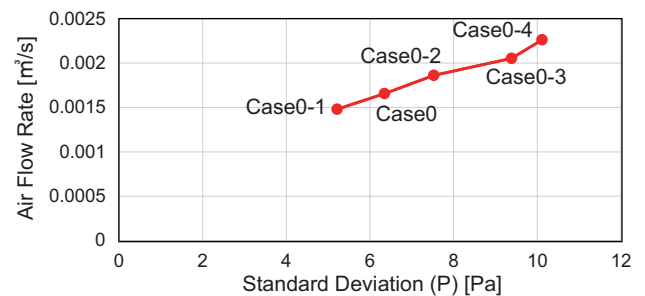


図12 開口部静圧の標準偏差と換気量 (AFR) の関係