

# クリーンルームにおける室圧制御に関する研究

## その1 扉開閉および局所排気発停による室圧変動に関する実験



村江 行忠 \*1

岩村多美勇 \*2 永井 裕之 \*3  
 栗木 茂 \*1 小出 剛男 \*2  
 柿沼 正道 \*4 長野 耕司 \*5  
 平原 省三 \*3 佐々木信光 \*6

### 概 要

クリーンルームにおいては、クロスコンタミネーションおよび汚染物質の拡散防止の観点から、室圧のコントロールが重要であり、多様化する施設の要求水準に応じた制御手法の導入が望まれている。

本報は、新たに構築したさまざまな室圧制御が可能な実験室の概要と、扉開閉時および局所排気稼働時の室圧変動などに関する基礎的な実験についての報告であり、実験結果においては以下の結論を得た。

扉の開閉については1) 扉開閉の速度に応じて前後で大きな変動が生じる、2) PCD 制御時にはオーバーシュートが生じる、3) PID 制御時には復帰に時間を要する、4) BD を用いることにより安定した制御が可能となるなどの変動特性を得るとともに、変動予測のための基礎データとして、5) 扉開度と扉通気量との関係を得ることができた。

また、PCD 制御における局所排気発停時の圧力変動については、6) 隙間面積が小さいほど変動が大きくなる、7) 全体の換気量に対する局所排気風量との比が小さいほど変動は小さくなる、8) 比例速度動作帯を小さく設定することで変動が小さくなることなどが確認された。

## Study on Room Pressure Control at Cleanroom

### Part 1 Experiments on Room Pressure Fluctuation with Door Operation and Local Ventilation Operation

Yukitada MURAE\*1 Tamio IWAMURA\*2  
 Hiroyuki NAGAI\*3 Shigeru KURIKI\*1  
 Takeo KOIDE\*2 Masamichi KAKINUMA\*4  
 Koji NAGANO\*5 Shozo HIRAHARA\*3  
 Mitsunobu SASAKI\*6

The Room Pressure Control is one of the Important Demand Performances for Contamination Control in a Cleanroom. This Paper is Outline of Basic Experiments on Room Pressure Fluctuation with Door Operation and Local Ventilation Operation, to Construct the Room Pressure Control System Corresponding to the Demand Performance, and are summarized as follows.

About Door Operating, 1) When the Door Operation Speed Quickens, the Pressure Fluctuation Becomes Violent, 2) At Control with PCD, the Overshoot is Caused, 3) At Control with PID, it Takes Time to Return, 4) The Control Can be Stabilized by Using BD and 6) The Relation Between the Door Opening Condition and Airflow of the Door was Obtained.

About Local Ventilation Operating, 6) When the Leakage Area is Small, the Pressure Fluctuation Becomes Violent, 7) the Pressure Fluctuation Becomes gently small the ratio to Local Ventilation Air Volume of Room Ventilation Air Volume and 8) If the Proportion Range is reduced, the Pressure Fluctuation Becomes gently.

\*1 戸田建設(株) 技術研究所 \*2 戸田建設(株) 建築設備部 \*3 戸田建設(株) 設備設計部

\*4 戸田建設(株) 関東支店 \*5 戸田建設(株) エンジニアリング部 \*6 戸田建設(株) 省エネ事業推進部

\*1 Technical Research Institute, Toda Corp. \*2 Building Equipment Department, Toda Corp. \*3 Equipment Design Department, Toda Corp.

\*4 Kanto branch, Toda Corp. \*5 Engineering Department, Toda Corp. \*6 Saving Energy Department, Toda Corp.

# クリーンルームにおける室圧制御に関する研究

## その1 扉開閉および局所排気発停による室圧変動に関する実験

村江 行忠\*<sup>1</sup> 岩村多美勇\*<sup>2</sup>  
 永井 裕之\*<sup>3</sup> 栗木 茂\*<sup>1</sup>  
 小出 剛男\*<sup>2</sup> 柿沼 正道\*<sup>4</sup>  
 長野 耕司\*<sup>5</sup> 平原 省三\*<sup>3</sup>  
 佐々木信光\*<sup>6</sup>

### 1. はじめに

製薬工場などのクリーンルームにおいては、クロスコンタミネーションおよび汚染物質の拡散防止の観点から、室圧のコントロールが重要である<sup>1, 2)</sup>。室圧の制御手法にはさまざまな方法がある一方、コストも含めて施設側の仕様や要求性能も多様であり、それらに応じた制御手法の導入が望まれている。

上記の背景のもと、本報では、新たに構築したさまざまな室圧制御が可能な実験室の概要と、室圧変動要因のうち急激な室圧変動をもたらすと思われる、扉開閉時および局所排気稼働時の室圧変動などに関して基礎的な実験を行ったのでその概要を報告する。

### 2. 実験室の概要

図-1に実験室のシステム構成の概要を、表-1に実験室仕様概要を示す。風量による室圧制御として、給気側は定風量装置(CAV)とし、排気側には手動ダンパ(VD)、差圧によりPID制御で開度制御する変風量ダンパ(VAV\*)、差圧によりダンパの作動速度を制御する室圧コントローラ(PCD)<sup>3)</sup>を設けた他、各部屋には微差圧ダンパ(BD)を壁面に設置し、それらを切り替えることで、さまざまな制御システムを再現できるようにした。さらにRoom-2とRoom-3には、局所排気を模擬した排気ファンを設置した。

建築的には、クリーンルーム用断熱パネルを使用し、ジョイント部をシールにして気密性を確保し、外部～Room-1間はセミエアタイト(SAT)、Room-1～2、Room-2～3間はエアタイト(AT)の扉を設けた。また各室には隙間調整用として、φ45のスリーブを設置した。気密性については加圧法により気密試験を行った結果、Room-3の相当隙間面積は0.43cm<sup>2</sup>(0.044cm<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)であった。

室圧の測定は、制御用とは別に微差圧計を用いて、フィルターなどはかけずに0.1s間隔で記録可能とした。

### 3. 扉の開閉に関する実験

#### 3.1 室圧制御下における圧力変動に関する実験

##### 3.1.1 実験概要

実験室(図-1)において、給気側を定風量装置(CAV)で固定し、排気側で手動ダンパ(VD)、室圧コントローラ(PCD)、差圧による変風量ダンパのPID制御(VAV\*)および微差圧ダンパ(BD)を用いてRoom-1～

3をそれぞれ10、20、30Paになるように調整・設定した(表-2)。扉の開閉操作は、Room-2～3間の扉(表-3)を対象とし、開から閉までの所用時間約4秒間の通常の入退室操作(パターン1)と、緩やかに開放しドアチェックの力だけで閉鎖する所用時間約7秒(パターン2)の2通りとした。

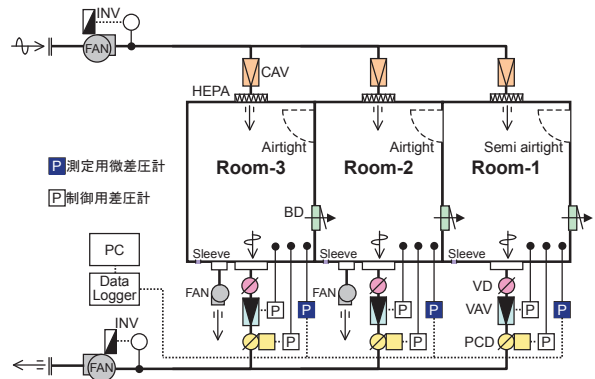


図-1 実験システム概要

表-1 実験室仕様概要

項目	Room-1	Room-2	Room-3
部屋容積	3.6m × 2.7m × 2.2m(h) 21.38m <sup>3</sup>		
風量制御	給気: CAV 排気側: VD, VAV*, PCD		
微差圧ダンパ	調整圧力 10Pa		
局所排気	無し	High 運転: 300m <sup>3</sup> /h Low 運転: 200m <sup>3</sup> /h	
扉	SAT	AT	AT
温度差	無し		
建築仕様	・天井・壁: クリーンルーム用断熱パネル ・ジョイント: シール打ち		
差圧計 (計測用)	・長野計器株式会社 デジタル微差圧計 GC62 範囲±100Pa, 精度±1.5%, 間隔50ms (基準圧: 天井裏)		

\* : VAVは室圧によるPID制御

表-2 実験ケース

実験ケース	給気	排気(室圧制御)			微差圧ダンパ
	CAV	VD	PCD	VAV	BD
CASE-1(VD)	作動	調整	全開	全開	密閉
CASE-2(PCD)		全開	作動	全開	密閉
CASE-3(VAV*)		全開	全開	作動	密閉
CASE-4(VAV*+BD)		全開	全開	作動	作動

\*<sup>1</sup> 戸田建設(株) 技術研究所 \*<sup>2</sup> 戸田建設(株) 建築設備部 \*<sup>3</sup> 戸田建設(株) 設備設計部  
 \*<sup>4</sup> 戸田建設(株) 関東支店 \*<sup>5</sup> 戸田建設(株) エンジニアリング部 \*<sup>6</sup> 戸田建設(株) 省エネ事業推進部

### 3.1.2 実験結果および考察

図-2～5に実験結果を示す。扉開閉時の室圧は、VDで室圧を調整して固定したCASE-2(図-2)にみられるように、扉が開放され2室間が同圧になる状態を挟んで、開放直後と閉鎖直後に相反する方向に大きく変動するのが基本的な変動である。その変動幅は、扉を速く操作したパターン1のほうが大きく、開放直後にはRoom-1と2の室圧が近づき、閉鎖にはRoom-2と3が逆転するなど、クロスコンタミネーションの可能性が高くなることが確認された。

PCDによる室圧制御であるCASE-2(図-3)では、扉閉鎖時の変動の後にオーバーシュートが発生し、Room-1にも影響を及ぼしていた。これは、PCDの制御動作が速く、同圧になった時点でRoom-2、3のダンパがそれぞれ開、閉の方向に急激に動くためと思われる。このような動作に対しては、扉開閉時に制御条件を変える手法が提案されている<sup>3, 4)</sup>。

VAVをPID制御しているCASE-3(図-4)では、VDを固定しているCASE-1に近い変動となった。これは制御動作が緩慢であるためと考えられるが、緩やかに扉を操作したパターン2ではダンパがある程度作動していると思われる、CASE-1より所定室圧への復帰に時間を要した。

微差圧ダンパー(BD)を加えたCASE-4(図-5)は、扉開放前後で若干室圧が異なっているが、扉開閉による室圧変動の影響が最も少なく、BDが室間差圧を安定的に確保するために有効であることがわかった。しかしながら、BDについては室間に開口を設けることになるため、要求性能に応じて採用を検討する必要がある。

## 3.2 扉開度と通気量に関する実験

クリーンルームの室圧変動の対策検討のためには、その予測が有効であり、佐久間らにより試みられている<sup>5)</sup>が、扉の開閉など建築的要因については検討がなされていないため、基礎データを得ることを目的に、扉開度と扉操作による開口部の通気量(扉通気量)との関係に関する実験を行った。

### 3.2.1 実験概要

実験条件を表-3に示す。実験室のRoom-1、2を開放して大気圧として、Room-3の室圧をPCDにより5、10、15、20、30、50Paに設定した。それぞれの室圧下で扉枠と扉先端との間隔(A)を固定して、室圧が安定した後に排気量を風量計(コーナー札幌製SwemaFlow 125)により測定し、扉閉鎖時の排気量との差から扉通気量を求めた。

### 3.2.2 実験結果および考察

実験結果として、扉開度と扉通気量との関係を図-6に示す。この結果をみると扉開度の範囲に応じて傾きが異なっており、扉開度(A)がパッキン厚(4.5mm)とクリアランス(6.5mm)の和と等しくなる11mm、扉開度(A)が扉枠の深さ(D=50mm)と等しくなる50mm付近に分岐点があると考えられた。

そこで、クリアランスなどを含む扉形状から、幾何学的に開度毎の開口面積(扉開放面積)を求めて、通気量との関係を示した(図-7)。これを見ると、ある程度直

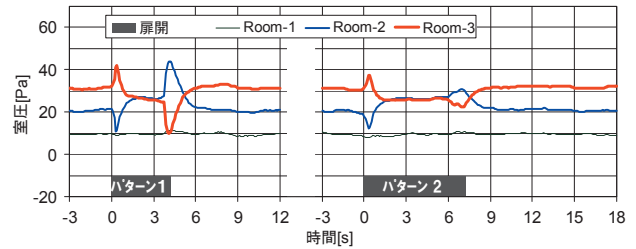


図-2 扉開閉時の室圧変動 CASE-1 (VD)

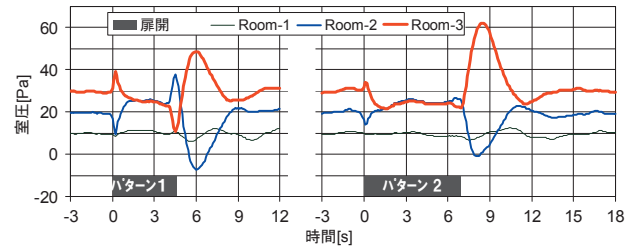


図-3 扉開閉時の室圧変動 CASE-2 (PCD)

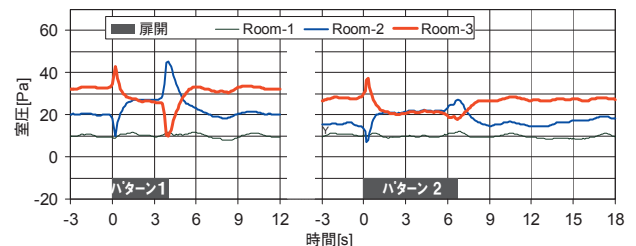


図-4 扉開閉時の室圧変動 CASE-3 (VAV\*)

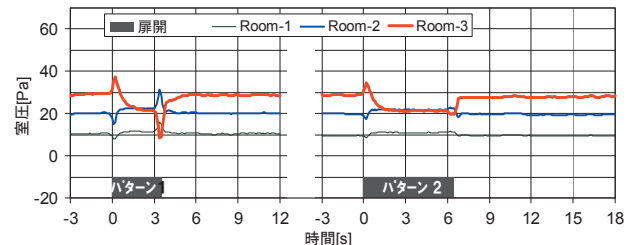


図-5 扉開閉時の室圧変動 CASE-4 (VAV\*+BD)

表-3 扉仕様および実験条件

扉仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・四方枠カラー鋼板エアタイトドア W740xH2035xD45[mm]</li> <li>・グレモンハンドル、ドアチェック(DC) 透明窓ガラス(W500xH600)付き</li> </ul>	
実験条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・扉開度(A): 4.5(ロック状態), 5.5(ロック解除)~80[mm]</li> <li>・室圧: 5, 10, 15, 20, 30, 50[Pa]</li> <li>・風量: 32[回換気/h]</li> </ul>	

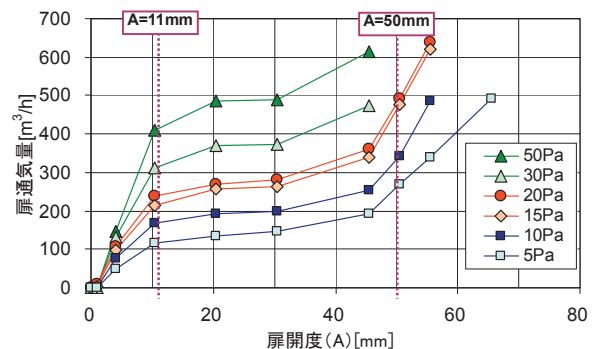


図-6 扉開度と扉通気量の関係

線的な関係が得られたが、ずれが生じる部分があった。原因としては、扉開放面積の算出および開口形状の変化による抵抗係数の変化などが考えられた。

各開度における室圧と扉通気量の関係は図-8に示す通り高い直線性が得られているが、室圧の予測の観点からは、扉形状・仕様から求めた開放面積と扉通気量との関係をさらに明確にする必要があると思われた。

#### 4. 局所排気発停時の室圧変動に関する実験

続いて、局所排気稼働時の室圧変動にして、近年採用が多くなりつつある室圧コントローラ(PCD、表-4)を用いて実験を行った。

各室への給気風量を22回換気/hとして、R/D(RB:20%、DB:3%)を用いてRoom-1~3をそれぞれ10、20、30Paに制御した状態において、局所排気を発停した場合、図-9に示すような室圧変動となった。他の制御方式に比べ短時間で設定圧力へ回復するが、起動・停止時に大きな変動が生じる。これに対し局所排気の起動速度を緩やかにする方法もあるが、機器からの直接排気の場合は起動速度を調整出来ない場合もあるため、PCDの設定値および隙間面積と室圧変動の関係について実験を行った。

##### 4.1 実験概要

Room-3の1部屋を用いてPCDにより室圧を10Paに固定し、表-5に示すように換気量、局所排気量、隙間面積およびPCD設定値である比例速度動作帯(RB)、不感帯(DB)を変えて、局所排気発停時の室圧変動を測定した。なおVD固定により室圧制御を行わない状態での局所排気発停時は図-10に示すような室圧偏差(起動・停止直前の室圧との差)の変動であった。

##### 4.2 結果および考察

###### 4.2.1 隙間面積の違いによる変動特性

図-11に30回換気/hでPCD設定値を固定(RB:20%、DB:3%)して隙間面積を変えた場合の局所排気(Low運転)の起動・停止時の室圧偏差を示す。最大値に達する時間および室圧回復に要する時間については隙間面積による明確な差異はみられなかったが、室圧変動幅は隙間面積が小さいほど大きかった。これは隙間からの漏気量の増減により室圧が調整されるためと考えられる。

また、特に隙間面積が小さい場合(0.4、15.6cm<sup>2</sup>)には、起動時においてオーバーシュートを起こしていた。これは、急激に室圧が変化することによりPCDが比例速度動作帯を超えて全速動作したためと思われるが、停止時にはファンの特性により時間を要する事に加え、局所排気の経路が隙間として機能するために、オーバーシュートはみられなかった。

###### 4.2.2 風量・隙間面積と室圧最大偏差との関係

図-12に換気量および局所排気の風量を変えた場合の隙間面積と局所排気起動時の室圧最大偏差との関係を示す。いずれの場合でも隙間面積が小さいほど室圧の最大偏差が大きくなるが、換気量が多いほど室圧変動が小さかった。これは、換気量が多いほどダンパ開度に対する調整風量が多いためであり、換気量に対する局所排気

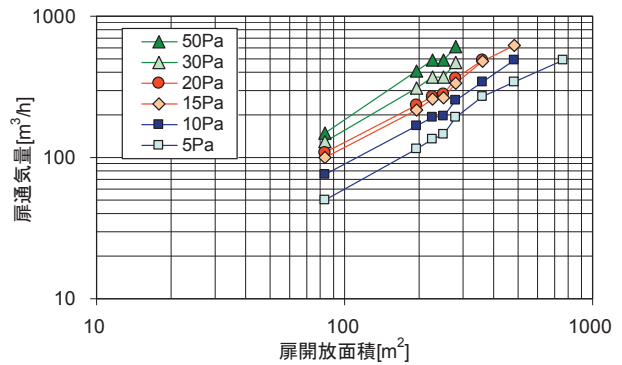


図-7 扉開放面積と扉通気量の関係

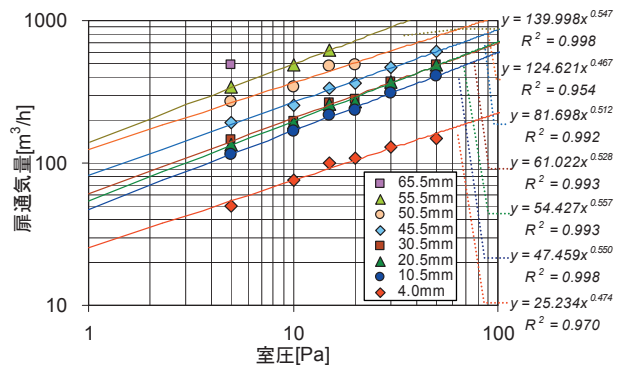


図-8 室圧と扉通気量の関係

表-4 PCD仕様

項目	仕様
形式	・PEC-10P(圧力範囲 -100~+100)
モータ部仕様	・操作時間:約 32sec(0~100%) ・サイクルタイム:約 1.0[sec]
比例速度動作帯(RB)	・調整範囲:10%~160%FS (±10~160[Pa])
不感帯(DB)	・調整範囲:0%~3%FS (0~±1.125[Pa])

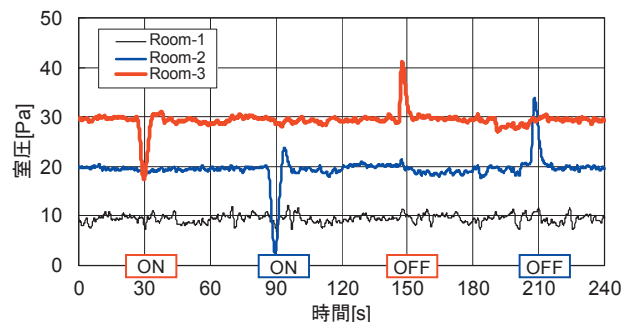


図-9 局所排気稼働時の室圧の変動 (22回換気/h,Low運転,RB:20%,DB:3%)

表-5 実験パラメータ

項目	実験パラメータ
換気量	22回換気/h, 30回換気/h
室圧	10Pa
局所排気風量	High運転:300m <sup>3</sup> /h, Low運転:200m <sup>3</sup> /h
隙間面積	0.4, 15.6, 48.4, 63.6, 82.1, 97.3cm <sup>2</sup>
PCD設定値	・比例速度動作帯(RB):10, 20, 30% ・不感帯(DB):0, 1, 2, 3%

風量との比が小さいほど変動は小さくなることを示している。

#### 4.2.3 PCD 設定値・隙間面積と室圧最大変位との関係

図-13にPCD設定値を変えた場合の隙間面積と局所排気起動時の室圧最大偏差との関係を示す。不感帯(DB)については、局所排気による大きな室圧変動にはほとんど影響がなかった、比例速度動作帯(RB)については、小さく設定することで、短い時間で動作速度が速くなるために、最大偏差が小さくなる傾向が確認された。

### 5. おわりに

扉開閉時の圧力変動に関しては、1)扉開閉の速度に応じて前後で大きな変動が生じる、2)PCD制御時にはオーバーシュートが生じる、3)PID制御時には復帰に時間を要する、4)BDを用いることにより安定した制御が可能となるなどの変動特性を得るとともに、変動予測のための基礎データとして、5)扉開度と扉通気量との関係を得ることができた。

また、PCD制御における局所排気発停時の圧力変動については、6)隙間面積が小さいほど変動が大きくなる、7)換気量に対する局所排気風量との比が小さいほど変動は小さくなる、8)比例速度動作帯を小さく設定することで変動が小さくなることなどが確認された。

今後は、建築的要因も含めて適切な室圧制御を行うためにさらに実験を重ねていきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 助宮他、室圧制御に影響を与える要因と対策、FDA Journal of GMP and Validation in Japan Vol. 1, No. 1, 1999
- 2) 本田他、クリーンルームでの扉開閉の動特性と開閉による浮遊微粒子の移送、第23回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、2005.4
- 3) 柴田他、微差圧制御システムの開発、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2004.9
- 4) 長谷川他、扉開閉に伴うコンタミネーションの制御(その1、2)、第24回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、2006.4
- 5) 佐久間他、多室間差圧制御システムに関する研究(その1)、第19回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、2001.4

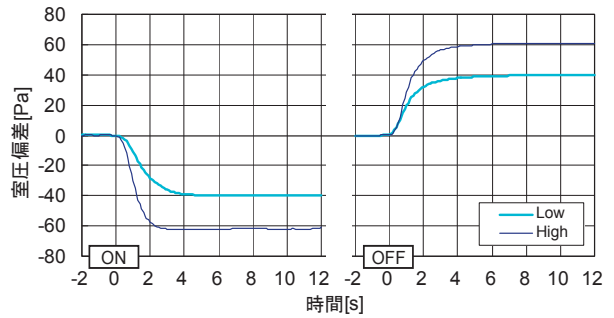


図-10 局所排気移動時の室圧の変動 (VD 固定)

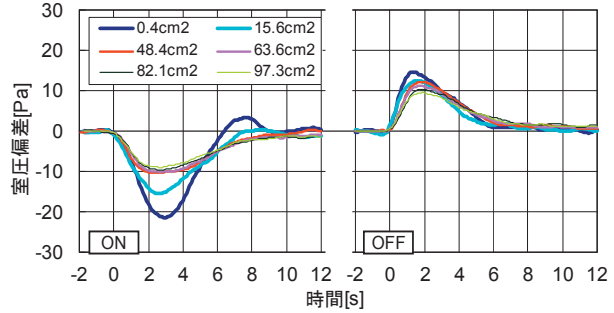


図-11 局所排気起動時の室圧変動 (30 回換気/h,Low 運転,RB:20%,DB:3%)

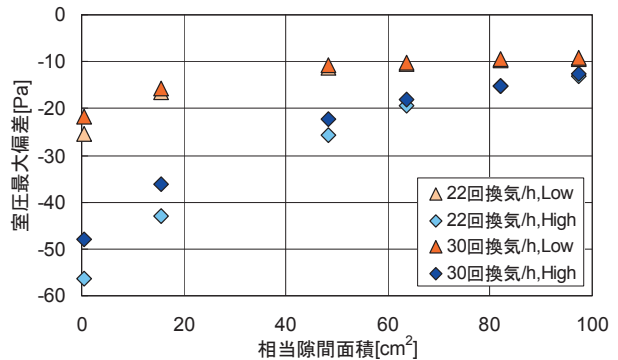


図-12 風量・隙間面積と室圧最大変位の関係 (RB:20%,DB:3%)

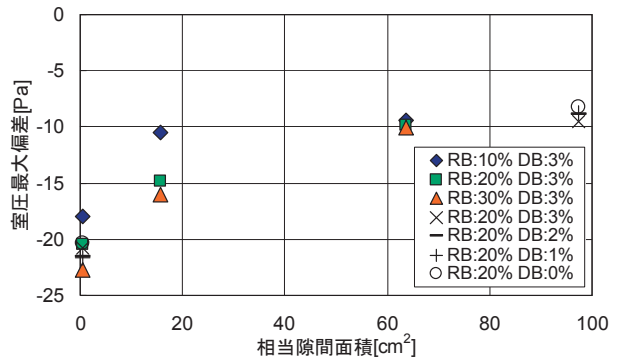


図-13 PCD 設定値・隙間面積と室圧最大変位の関係 (22 回換気/h,Low 運転)

