

クリーンルームにおける室圧変動に関する実験的研究

その5 入退室時の室圧変動と交叉汚染に関する実験



村江 行忠 *1

岩村多美勇 *2 永井 裕之 *3
 長野 耕司 *4 栗木 茂 *1
 新宮 守 *4 渡邊 義明 *5
 野沢 勇樹 *3 久保 夏希 *4
 齊藤 充 *6

概 要

本報告は、室圧制御されたクリーンルームにおける、扉仕様、エアロック室の有無、気密性などの建築的な仕様に着目した、入退室（扉開閉）時の室圧変動および交叉汚染に関する実験についての概要である。

実験の結果、建築的仕様に着目した入退室時の圧力変動および、入退室時の交叉汚染に関して以下の知見を得た。1) 開き戸に比べて引き戸の室圧変動が小さい。2) 開き戸の圧力変動に対しては扉の操作速度、気密性、室容積が影響する。3) エアロック室は2室間の差圧が確保されるため有効である。4) エアロック室の気密性を確保することで入退室の影響を低減できる。5) 扉操作時間が長く清浄室から汚染室に退室するときに交叉汚染のリスクが高い。6) 扉開放時に風量バランスを変えることで交叉汚染を低減できる可能性がある。

Experimental Study on Room Pressure Fluctuation at Cleanroom Part 5 Experiments on Room Pressure Fluctuation and Cross Contamination with Door Operation

Yukitada MURAE*1 Tamio IWAMURA*2
 Hiroyuki NAGAI*3 Koji NAGANO*4
 Shigeru KURIKI*1 Mamoru SHINGU*4
 Yoshiaki WATANABE*5 Yuki NOZAWA*3
 Natsuki KUBO*4 Mitsuru SAITO*6

This Paper is the Outline of Experimental Study on Difference of Room Pressure Fluctuation by Architectural Specifications and Cross Contamination with Door Operation.

The Results are following that, 1) Room Pressure Fluctuation with Hinged Door is Larger. than Sliding Door, 2) Operation Speed of Door, Air Leakage Efficiency and Volume of Room Influence Room Pressure Fluctuation with Hinged Door, 3) Airlock is Effective to Secure Differential Room Pressure, 4) Air Leakage Efficiency of Airlock is Important, 5) Risk of Contamination is Higher when Door Operation Time is longer and Leaves Cleanroom, 6) Risk of Contamination is Decreased by Changing Supply Air Balance with Door Operation.

*1 技術研究所 *2 建築購買部 *3 設備設計部 *4 エンジニアリング部 *5 関東支店建築設備部 *6 岡谷精立工業

*1 Technical Research Institute *2 Building Purchase Department *3 Equipment Design Department *4 Engineering Department

*5 Kanto Branch Building Equipment Department *6 Okaya Seiritsu Engineering

クリーンルームにおける室圧変動に関する実験的研究

その5 風量変更時の室圧変動とその抑制手法に関する実験

村江 行忠^{*1} 岩村多美勇^{*2} 永井 裕之^{*3}
 長野 耕司^{*4} 栗木 茂^{*1} 新宮 守^{*4}
 渡邊 義明^{*5} 野沢 勇樹^{*3} 久保 夏希^{*4}
 齊藤 充^{*6}

1. はじめに

製薬工場などのクリーンルームにおいては、交叉汚染および汚染物質の拡散防止の観点から、高度な室圧制御が求められており、風量変更時や入退室にともなう扉開閉時など人為的な室圧変動要因への対応が必要となる。風量変更に関しては前報¹⁾において室圧変動を抑制する手法を示し、扉開閉については既報²⁾において室圧制御方法による室圧変動の違いを示した。

本報では扉仕様、エアロック室の有無、気密性などの建築的な仕様に着目した、入退室（扉開閉）時の室圧変動に関する実験、および入退室時の交叉汚染に関する実験についての概要を報告する。

2. 実験 I 室圧変動に関する実験

2.1 実験概要

実験は Room1 と Room2 およびそれらの間に設けたエアロック室（AirLock）を模した小部屋で構成され、D0～D3の扉を設けた実験用クリーンルーム²⁾で行った（表-1、図-1）。実験対象とした扉はエアタイト（AT）仕様の開き戸 D1 と D2、ハンガータイプの引き戸 D3 であり、セミエアタイト（SAT）仕様の D0 は常時閉鎖したままとした。

室圧と風量の制御については、AirLock はボリュームダンパ（VD）により所定の風量（給気）および室

圧（排気）になるように調整後固定し、Room1 と Room2 は風量制御（給気）^{注1}と室圧制御（排気）に圧力偏差による速度制御ダンパ（PCD）を用い、所定の値になるよう制御を行った。また PCD については扉開放時のオーバーシュート^{注2}を防止するために、D1～D3に設けたドアスイッチにより、扉開放時に強制的に停止するようにした。

実験ケースは、表-2に示すとおりである。Case-1～

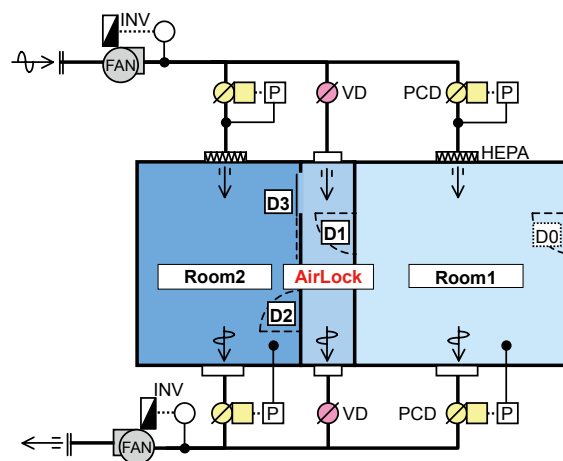


図-1 実験装置概要

表-1 実験装置概要

項目	概要
実験室	<ul style="list-style-type: none"> 容積；Room1：21.4m³、Room2：16.8m³、AirLock：4.6m³ 内装仕様；CR用断熱パネル+シール 漏気量；0.05m³/m²/h（10Pa）
扉	<ul style="list-style-type: none"> D0；SAT仕様開き戸 SAT、800×2,100mm=1.68m² D1；AT仕様開き戸、800×2,100mm=1.68m² D2；AT仕様開き戸、680×2,050mm=1.39m² D3；ハンガー開き戸、780×1,980mm=1.54m²
ファン	<ul style="list-style-type: none"> 給気；片吸込シロッコファン 2.2kw 排気；片吸込シロッコファン 1.5kw ダクト静圧（INV制御）；給気500Pa、排気200Pa
ダクト	<ul style="list-style-type: none"> 主ダクト；亜鉛鉄板ダクト400×400mm 枝ダクト；亜鉛鉄板スパイラルダクトφ200mm、φ100mm
室圧制御 風量制御	<ul style="list-style-type: none"> Room1, 2；給気；PCDによる動圧一定制御 排気；PCDによる室圧一定制御 ドアスイッチによる開放時ダンパ停止 AirLock；給気・排気ともVDにより調整後固定
差圧計	<ul style="list-style-type: none"> ダイヤフラム式、±100Pa（1.5%FS）、応答速度；50ms
データロガ	<ul style="list-style-type: none"> サンプリング周期；100ms

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 建築購買部 ^{*3} 設備設計部 ^{*4} エンジニアリング部 ^{*5} 関東支店 建築設備部 ^{*6} 岡谷精立工業

表-2 実験ケース

	扉				設定室圧 [Pa]			給気風量 [m ³ /h]		
	D0	D1	D2	D3	Room1	AirLock	Room2	Room1	AirLock	Room2
Case-1	×	○	◎	×	20		30	640	-	640
Case-2	×	○	◎	-	20		30	640	-	640
Case-3	×	○	×	◎	20		30	640	-	640
Case-4	×	◎	◎	×	10	20	30	640	100	640
Case-5	×	◎	◎	-	10	20	30	640	100	640

凡例：◎：開閉（実験対象）、○：開放、×：閉鎖、-：目張り

3では扉D1を開放して、Room1とAirLockを一体の空間とみなして、扉D2またはD3から直接Room2に入退室するケースで、さらにCase-2では引き戸である扉D3を目張りすることにより気密性を確保した。Case-4、5は扉D1とD2を使いAirLockを経由してRoom2に入退室するケースで、Case-5ではCase-2と同様に扉D3を目張りしてAirLockの気密性を確保した。

実験は各ケースにおいて、通常の扉操作（パターン1；操作時間^{注3}約4秒）でRoom1から2に入室し、ゆっくりとした扉操作（パターン2；開放時間約8秒）でRoom2から1に退室して、その時の室圧変動を測定・記録した。

2.2 実験結果および考察

実験結果として各ケースの室圧変動を図-2～8に示す。Case-1～3は空間を直接入退室するケースである。開き戸である扉D2から入退室したCase-1（図-2）、Case-2（図-3）では扉の開放直後と閉鎖直前に室圧が大きく変動し、瞬間的に室圧が逆転した。これは既報²⁾に示したとおり、開き戸の場合は扉が枠の幅内にあるときは、室容積が変化しているような状態となるためと考えられる。この変動は扉D3に目張りを行って気密性を高めたCase-2（図-3）で大きく、また扉の操作が速いパターン1での変動が大きいことから、気密性と扉の操作速度が変動の大きさに影響していると考えられた。

一方、引き戸である扉D3から入退室したCase-3（図-4）では開放直後と閉鎖直前の大きな変動はなく、速やかに2室間の差圧がなくなり同じ室圧となった。これは入退室時の変動という意味では望ましいが、一般に引き戸は気密性が低く、通常時のコンタミネーション防止および省エネルギー性についての検討も必要である。

Case-4（図-5、6）、Case-5（図-7、8）はAirLockを経由して入退室するケースである。扉D1、D2ともに開き戸であるため開放直後と閉鎖直前の変動がみられたが、Case-1（図-2）、Case-2（図-3）の変動に比べAirLockの変動が大きく、室容積が小さい室では前述した室容積変化の影響がさらに大きくなるものと考えられた。また扉D3の目張りが無く気密性の低いCase-4（図-5、6）ではRoom1からAirLockに入室した影響によりRoom2の室圧が低下しているの対して、気密性を確保したCase-5（図-7、8）ではAirLockの変動が大きく、AirLockとRoom1およびRoom2の室圧の逆転が生じるものの、Room2への影

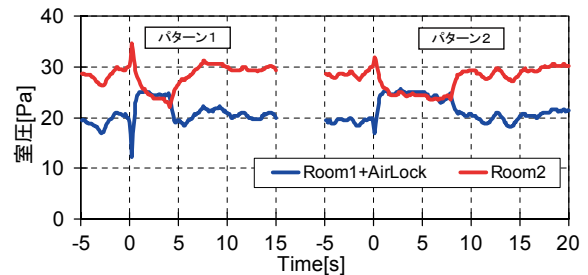


図-2 入退室時の室圧変動 (Case-1)

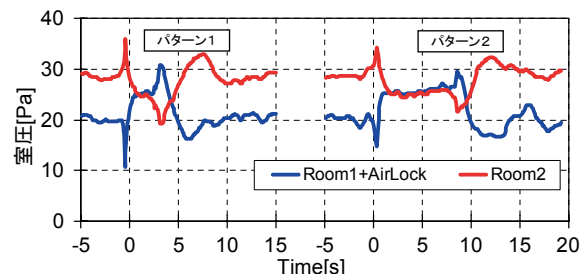


図-3 入退室時の室圧変動 (Case-2)

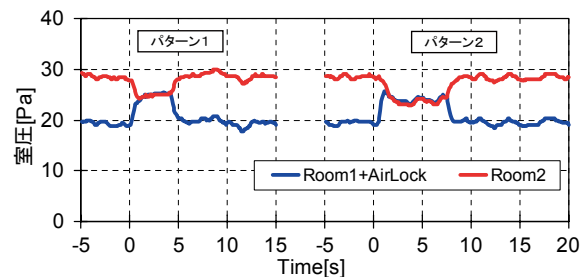


図-4 入退室時の室圧変動 (Case-3)

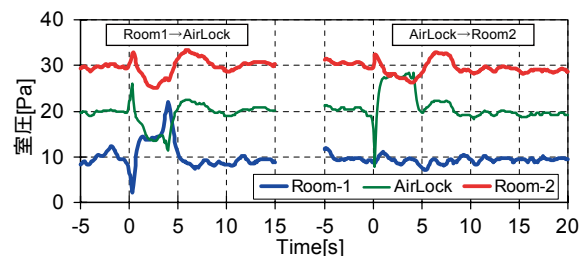


図-5 入退室時の室圧変動 (Case-4、パターン1)

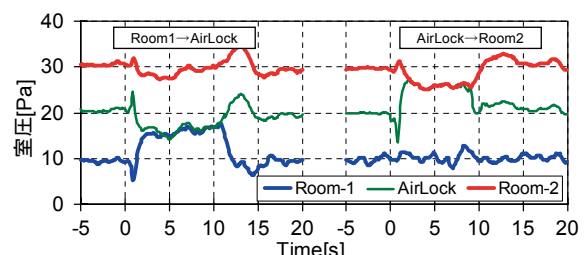


図-6 入退室時の室圧変動 (Case-4、パターン2)

響はほとんどみられず、Room1とRoom2の室間差圧は良好に保たれていた。このことより、AirLockについては扉のインターロックと同時に清浄性が確保されていれば、コンタミネーション防止に非常に有効であると考えられ、さらにCase-5のように気密性を確保することで、入退室の影響を低減できることが示唆された。

3. 実験Ⅱ 入退室時の交叉汚染に関する実験

実験Ⅰによる室圧変動から、エアロックがなく気密性が高い室に開き戸を設けた場合に、交叉汚染のリスクが高いことが推察された。扉開閉時の交叉汚染の低減手法については、山口らにより扉開放時に排気側ダンパの制御を変える方法が提案されている³⁾。

実験Ⅱでは、入退室による交叉汚染の状況を把握するとともに、前報¹⁾で示した給気側での風量制御手法を用いた交叉汚染低減方法を試行し、その可能性を検討した。

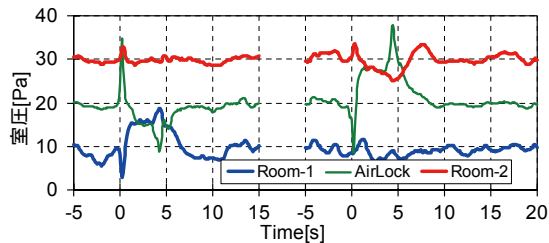


図-7 入退室時の室圧変動 (Case-5、パターン1)

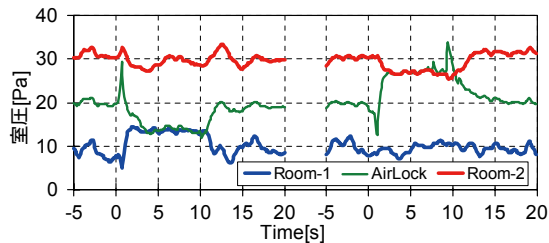


図-8 入退室時の室圧変動 (Case-5、パターン2)

3.1 実験概要

実験装置概要および実験条件を図-9、表-4に示す。実験Ⅰと同じ実験用クリーンルームの2室を用い、一方を非清浄室 (Room2)、他方を清浄室 (Room3) と想定し、非清浄室 (Room2) は微粒子発生器により微粒子濃度 (粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上) が約 40,000 個 /cf、清浄室 (Room3) は 100 個 /cf 以下で安定した状態で実験を行った。2室間の扉は実験Ⅰの扉 D3 と同じ AT 仕様の開き戸であり、無塵衣を着用した実験者 (成人女性、体重約 55kg) が所定の扉操作による入退室を行い、そのときの Room3 排気ダクトでの微粒子濃度を 30 秒間隔 (流量 0.05cf) でレーザーパーティクルカウンタを用いて測定した。

室圧と風量の制御については、実験Ⅰと同様に風量制御 (給気)^{注1)}と室圧制御 (排気) に圧力偏差による速度制御ダンパ (PCD) を用い、Case-A では、扉に設けたドアスイッチにより扉開放時に強制的にダンパが停止するものとした。Case-B は扉開放時に清浄

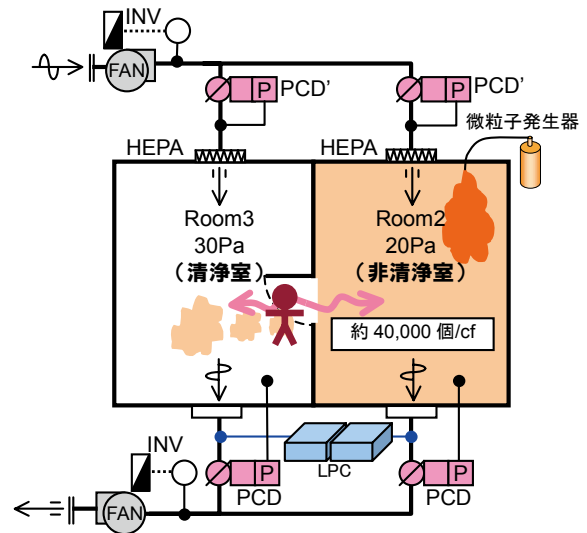


図-9 実験装置概要

表-4 実験条件

	Case-A	Case-B
給気制御	圧力制御ダンパ (PCD') による動圧一定制御	
給気風量 (設定値)	扉閉開共 Room2 : 600m ³ /h Room3 : 600m ³ /h ※ドアスイッチにより停止	扉閉 Room2 : 600m ³ /h Room3 : 600m ³ /h 扉開 Room2 : 400m ³ /h Room3 : 800m ³ /h ※ドアスイッチにより変更
室圧制御	圧力制御ダンパ (PCD) による室圧一定制御 (排気側) ドアスイッチにより扉開時は動作停止	
設定室圧	Room2 : 20Pa、Room3 : 30Pa	
清浄度	Room2 : 約 40,000 個 /cf ($0.3 \mu\text{m}$) Room3 : 100 個 /cf ($0.3 \mu\text{m}$) 以下	
微粒子測定	レーザーパーティクルカウンタ (LPC) ・測定位置 : 排気ダクト、・流量 : 0.05cf/30s	
扉操作	操作Ⅰ : Room2 から Room3 に入室、操作時間 : 約 4s 操作Ⅱ : Room3 から Room2 に退室、操作時間 : 約 4s 操作Ⅲ : Room2 から Room3 に入室、操作時間 : 約 8s 操作Ⅳ : Room3 から Room2 に退室、操作時間 : 約 8s	

室から非清浄室への気流を生じさせて、交叉汚染の低減を目的に、給気風量のバランスを変更するものとし、扉を開き始めると同時に清浄室 (Room3) の風量の設定値を大きく、非清浄室 (Room2) を小さく変更し、閉め始める同時に、もとの設定値にもどすように制御した。

なお、実験時の2室は等温であるとともに、吹出し気流などが直接扉に当たらないよう気流方向に配慮した。

3.2 実験結果および考察

実験結果として扉操作 I ~ IV における、Room3 排気での微粒子濃度変化を図-10に、Case-A、Bにおける扉操作 I および Case-B における扉操作 III の室圧と給気風量の変化を図-11 ~ 13 に示す。また、微粒子濃度と風量から、実験時間 (各扉操作あたり 600s) 中に排出される排気粒子数 (以下、排気粒子数) を求め、さらに扉を通じて Room2 から Room3 への侵入する空気量 (以下、侵入空気量) を推定 (式1) した結果を表-5 に示す。

$$Q_D = \frac{\sum(C_{E3} \times Q_{E3}) dt}{C_{R2}} \dots\dots\dots \text{式1}$$

- Q_D : 扉からの侵入空気量 [m³]
- C_{E3} : Room3 排気中の微粒子濃度 [個/m³]
- Q_{E3} : Room3 の排気風量 [m³/s]
- C_{R2} : Room2 の微粒子濃度 [個/m³]
- dt : 単位時間は微粒子サンプリング時間 (30s)
- ※実験時間は 600s。

なお、Room2 の微粒子濃度は Room2 の排気中の微粒子濃度と等しいものとした他、Room3 における初期の微粒子濃度、Room2 以外からの流入および入退出する実験者からの発塵については考慮していない。

すべての条件で入退室時に非汚染室から清浄室への交叉汚染が確認され、風量バランスを変更しない Case-A においては、扉の操作時間が長い操作 III、IV の濃度が高く、入室時 (操作 I、III) に比べ退室時 (操作 II、IV) の方がやや濃度が高くなった。これは、Room3 から Room2 に実験者が移動することで、その体積に相当する空気が Room2 から Room3 に逆流するものと考えられた。扉開放時に風量バランスを変更する Case-B は、Case-A に比べピーク濃度は低く、交叉汚染を低減する効果が確認できた。また、Case-B では扉操作による違いはほとんどなかったが、これは図-12、13 に示すように操作時間が短い操作 I、II に比べて、操作時間が長い操作 III、IV のほうが風量差が大きくなっているためと考えられた。

侵入空気量については Case-A が 2.5 ~ 5.1m³ であったのに対し、Case-B では 1.0 ~ 1.4m³ で、風量バランスの変更により侵入空気量が 1/2 程度に低減されており、わずかな風量差であっても扉での気流が生じて、逆流防止の効果があるものと考えられた。

室圧の変動については、Case-A (図-11) に比べて Case-B (図-12、13) では扉閉鎖直後に大きな変動が生じていた。これは給気風量が扉を開く前の状態

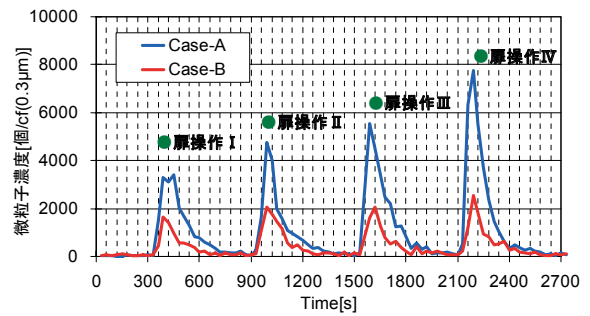


図-10 入退室時の Room3 微粒子濃度変化

表-5 排気粒子数と侵入空気量

	排気粒子数 [個]		侵入空気量 [m ³]	
	Case-A	Case-B	Case-A	Case-B
扉操作 I	3.73 × 10 ⁶	1.45 × 10 ⁶	2.64	1.02
扉操作 II	3.65 × 10 ⁶	1.95 × 10 ⁶	2.58	1.38
扉操作 III	4.92 × 10 ⁶	1.86 × 10 ⁶	3.49	1.32
扉操作 IV	5.82 × 10 ⁶	1.98 × 10 ⁶	4.12	1.40

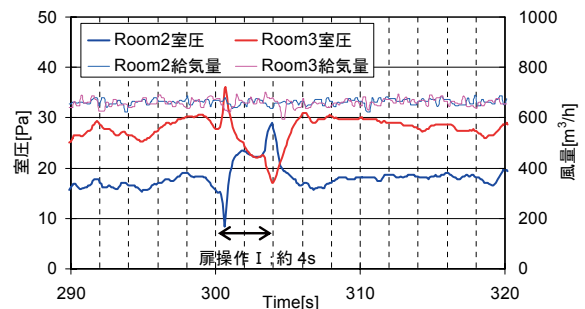


図-11 操作 I における室圧・風量変動 (Case-A)

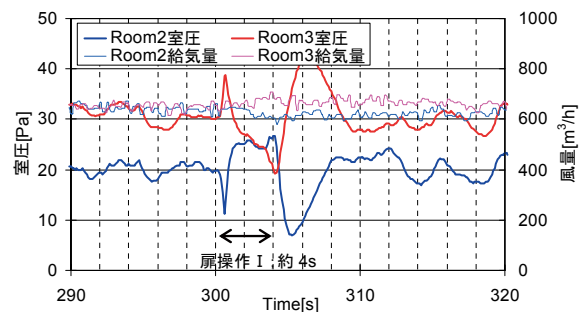


図-12 操作 I における室圧・風量変動 (Case-B)

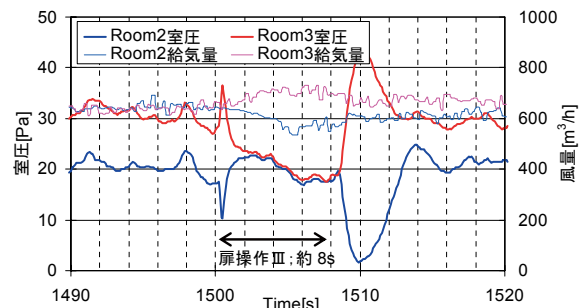


図-13 操作 III における室圧・風量変動 (Case-B)

に戻っていないために生じるものと思われる。この変動を抑制するためには扉の開閉に要する時間とダンパ動作速度の関係などを考慮して、タイミングなどを検討する必要があるとともに、交叉汚染の低減効果も踏まえて設定風量についても検討の余地があると考えられた。

4. おわりに

本実験により、建築的仕様に着目した入退室時の圧力変動および、入退室時の交叉汚染に関して以下の知見を得た。1) 開き戸に比べて引き戸の室圧変動が小さい。2) 開き戸の圧力変動に対しては扉の操作速度、気密性、室容積が影響する。3) エアロック室は2室間の差圧が確保されるため有効である。4) エアロック室の気密性を確保することで入退室の影響を低減できる。5) 扉操作時間が長く清浄室から汚染室に退室するときに交叉汚染のリスクが高い。6) 扉開放時に風量バランスを変えることで交叉汚染を低減できる可能性がある。

謝辞

本実験を行うにあたり、岡谷精立工業（株）京極氏、グエン氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 村江他、クリーンルームにおける室圧変動に関する実験的研究（その4）風量変更時の室圧変動とその抑制手法に関する実験、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2010
- 2) 村江他、クリーンルームにおける室圧変動に関する実験的研究（その1）実験室の概要と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、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2007
- 3) 山口他、クリーンルームにおける扉開閉に伴うクロスコンタミネーションの制御手法とその効果検証、空気調和・衛生工学会論文集、No.138、2008.9

脚注

- 注1：複合式ピトー管より得た動圧を利用して圧力制御ダンパにより定風量制御（文献1参照）。
- 注2：扉開放時に圧力保持ができない状態で室圧制御ダンパが大きく動くために閉鎖時に大きな室圧変動が生じる（文献2参照）。
- 注3：扉の開き始めから閉じるまでの時間。