

高度清浄空間における室圧制御技術の研究

—その2 流量直接指令方式の室間汚染防止性能—

得田健一* 茂木正史** 小河義郎**

1. はじめに

高度な清浄度が必要であったり、汚染物質の拡散を防がなければならない施設では空気の流れを管理して汚染を防いでいる¹⁾。クリーンルームや電子部品工場では、清浄度を確保するために室圧を外部より正圧に保って空気が外部に流れるように制御し、バイオハザード対策施設では汚染拡散防止のために室圧を外部より負圧に保ち、空気の流れが外部から対象室へ向かうように制御する。

日本の施設で一般に採用されている制御はフィードバック信号による差圧制御方式である(図-2参照)。この方式は制御量変更時に時間がかかる(数十秒~数分)²⁾ので、安全キャビネット風量変更時に、前室と飼育室間の必要差圧が確保できず、気流方向が逆転する問題がある。

欧米の施設では、差圧制御方式に替わって風量制御方式が主流になりつつある。風量制御方式は、各室の給排気風量を制御して室間の空気の流れを作る方式であるが、フィードバック信号による風量制御のため、差圧制御方式での問題を十分に解決できない。流量直接指令方式は、流れを制御する原理は風量制御方式と同様であるが、安全キャビネット等の風量変更に関連して直接的に風量を制御できる風量制御バルブ(Air Flow Control Valve)を備え、短時間の風量変更にも迅速に追従し、所定の空気の流れを維持できる。

本報告では、差圧制御方式と流量直接指令方式について解析による検討、および実物大の実験装置を用いて性能確認を行った結果について報告する。

2. 室圧制御方式の種類と流量直接指令方式

室圧制御方式は、パッシブ制御とアクティブ制御に分類できる³⁾。パッシブ制御には定風量制御方式、アクティブ制御には差圧制御方式と風量制御方式、さらに、流量直接指令方式が該当する。

2.1 定風量制御方式

定風量制御方式は、定風量装置(CAV)を用いて給排気風量を一定に制御する方式である。図-1に定風量制御方式の概要を示す。正圧制御では給気風量を排気風量よりも多く、負圧制御では排気風量を給気風量よりも多く

設定する。給気風量と排気風量の差をオフセット風量と呼ぶ。定風量制御方式は古くから用いられてきた方式で、システム構成は簡易であるが、例えば負圧制御に適用した場合には、適用条件が次のように限定される³⁾。

- i. 排気側に安全キャビネット等の風量変更が必要な装置を設置しないこと
- ii. 給排気設備の追加、削除がないこと
- iii. フィルターが目詰まりしても、給気風量と排気風量の大きさが逆転しないようにしておくこと

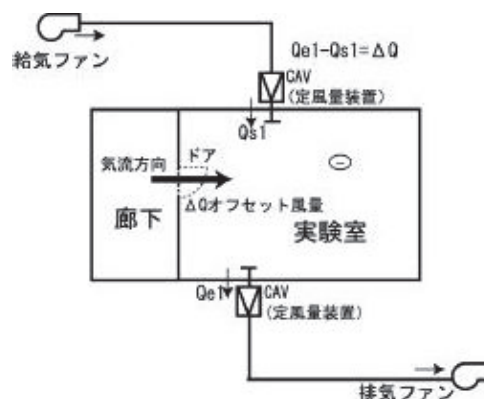


図-1 定風量制御方式の概要

2.2 差圧制御方式

図-2にバイオハザード対策施設における差圧制御方式の概要を示す。差圧制御方式では前室から飼育室に向かう空気の流れをつくるために、前室よりも飼育室の室圧が低くなるように制御する。具体的には、外部-前室間、外部-実験室間の差圧を変風量装置(VAV)によりフィードバック制御して、前室と飼育室の目標差圧を実現する。この事例では飼育室の中に図-3に示す構造の安全キャビネットが設置され動物実験が行なわれる。安全キャビネットには実験モードと実験休止モードとがある。実験モードではキャビネットの扉が大きく開けられ、実験休止モードでは小さく閉じられる。安全キャビネット内の汚染物質が飼育室に漏洩しないように安全キャビネットの扉の面風速を扉の開閉状態によらず一定にする制御が目標とされている。そこで、実験モードでは風量が多く、実験休止モードでは風量が少なくなるようにモータダンパー(MD)で制御される。

*本社建築設計部 **環境研究室

このような制御状況において次の不具合が生じる場合がある。飼育室の室圧が前室より低く保たれている状態で、安全キャビネットのモードを実験モード（大風量）から実験休止モード（小風量）に変更する。この変更は比較的短時間で行なわれる。この時、飼育室の排気風量は安全キャビネットからの排気風量の減少分を増加しなければならないが、フィードバック制御を用いた VAV の風量変更にかかる時間がかかる。従って、風量変更が行われている間、飼育室からの総排気風量が不足するため飼育室の圧力が高くなり飼育室から前室への逆流が生ずる。

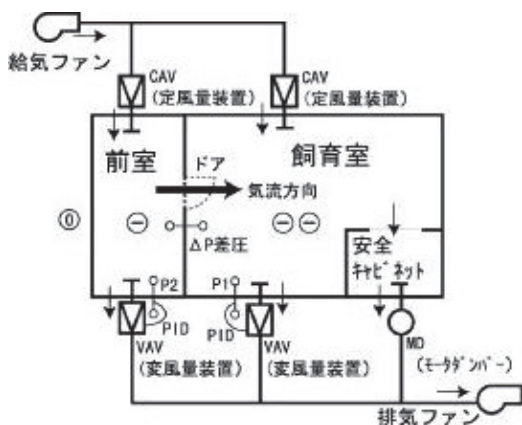


図-2 差圧制御方式の概要

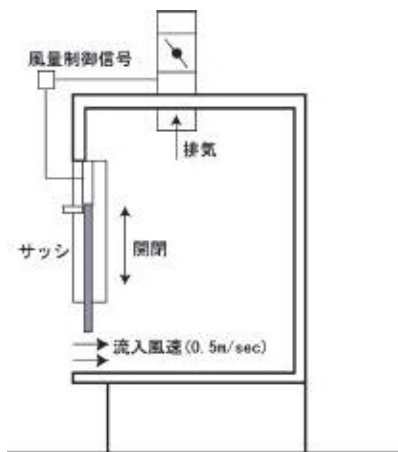


図-3 安全キャビネットの断面構造

2.3 風量制御方式

図-4 に風量制御方式の概要を示す。風量制御方式では給排気部に差圧制御方式と同様の変風量装置 (VAV) を配置し、これを通る風量をフィードバック信号で制御する。感染飼育室を例にとると、風量制御方式では、必要な排気風量 (Q_e) に対して給気風量 (Q_s) を式 (1)、(2) のように設定する。オフセット風量 (ΔQ) は排気風量の 10% ($\alpha=0.1$) 程度とされる。このように給排気風量のバランスを決めて制御すれば前室-飼育室間の空気の流れ方向

が一様に保たれる。ドアを開けた場合にも、両室の室圧はほぼ等しくなるが、前室から飼育室への流れは維持される。ただし、VAV による風量制御がフィードバック信号によるため、制御速度に問題が残っている。

$$Q_s1=Q_e1+Q_e2-\Delta Q \quad \text{----- (1)}$$

$$\Delta Q=(Q_e1+Q_e2) \times \alpha \quad \text{----- (2)}$$

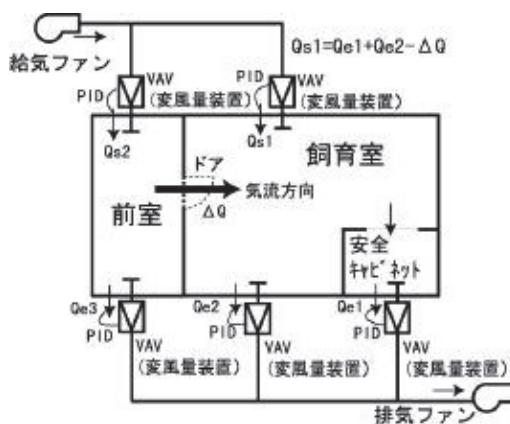


図-4 風量制御方式の概要

2.4 流量直接指令方式

当研究で検討している流量直接指令方式の概要を図-5 に示す。流量直接指令方式は、前節で述べた風量制御方式の原理を基本としているが、次のような特徴がある。

- i. 風量制御信号により瞬時に風量が変わえられる風量制御バルブ (Air Flow Control Valve) を用い、各給排気風量を直接制御する
- ii. 給気側にはボリュームダンパー (VD) を設けて機器構成を簡易にし、このボリュームダンパーの調整により差圧が設定できるとともに、ドア開閉時に風量制御方式よりも安全となる (3.2 解析結果を参照)

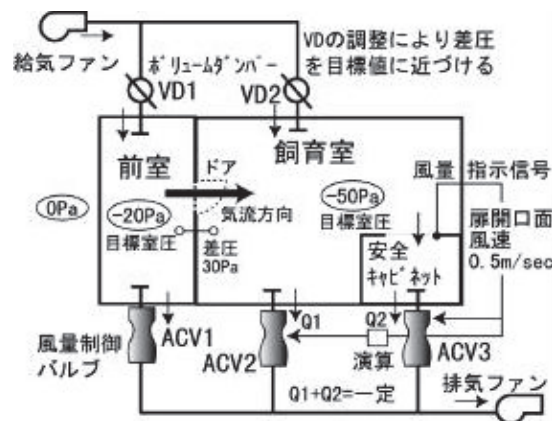


図-5 流量直接指令方式の概要

3. 解析による流量直接指令方式の検討

3.1 解析概要

a. 解析モデルと制御方法

解析は図-5に示したバイオハザード対策施設の構成と室圧制御方式をモデル化して行なった。前室の排気風量は一定とし、安全キャビネットと飼育室の排気風量の合計が一定となるように制御する。

b. 解析プログラム

解析プログラムには多数室換気回路網計算プログラムCOMIS3.0⁴⁾を用いた。風量制御バルブが風量を制御するためには、バルブ前後の差圧が所定の範囲内であることが必要であるが、COMIS3.0はそのような条件を設定できる機能を有している。

c. 解析ケース

以下のケースを検討した。

- i. 安全キャビネットの運転モード切り替えに対応して、安全キャビネットの扉開口を大から小に変更した場合の変化
- ii. 安全キャビネットの扉開口が大の状態、前室-飼育室間のドアを開けた場合の変化

d. 解析条件の設定

各部の風量設定を表-1に示す。各ケースとも飼育室の一般排気風量と安全キャビネットの排気風量の合計が一定(790m³/h)になるように制御している。表-2、図-6に給排気ファンの特性を示す。図-6に、解析で求めたファンを2台直列連結した場合の特性も示す。流量が等しい時に圧力が2倍で、理論通りの結果となっている。

表-1 各部の風量設定 (m³/h)

安全キャビネット扉開口	大	小
前室排気風量 ACV1	230	230
飼育室排気風量 ACV2	170	430
安全キャビネット排気風量 ACV3	620	360

表-2 給排気ファンの特性

風量 (m ³ /h)	120	840	1500	2100
静圧 (Pa)	310	300	200	30

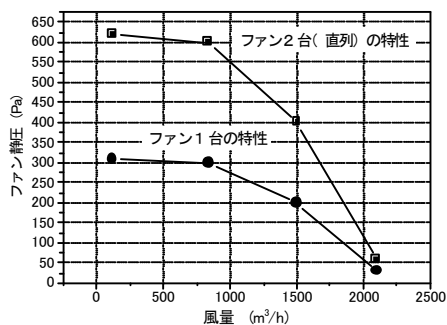


図-6 ファン特性

風量制御バルブ (ACV) の特性を図-7に示す。風量制御が可能なバルブ前後の差圧を市販風量制御バルブに合わせ、150Pa~750Paとした。

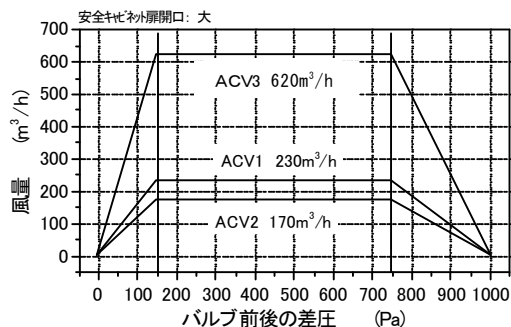


図-7 風量制御バルブの特性

前室と飼育室の給気部に設けたVD1とVD2の流量特性を調節し各室の室圧を目標値に近づけた。

3.2 解析結果

安全キャビネットの扉開口の変更を模擬した解析結果を表-3に示す。表中では変化した項目を太字で示した。安全キャビネットの扉開口を大から小に変更した場合、安全キャビネットの風量(ACV3)を変更しても、室圧をはじめ、各部の圧力、風量は変化しない。風量制御バルブ前後の差圧は約250Paとなった。

表-3 安全キャビネットの風量変更時の圧力と風量

部位	安全キャビネットの扉開口			
	大 (運転モード)		小 (運転休止)	
	圧力 Pa	風量 m ³ /h	圧力 Pa	風量 m ³ /h
VD1	310	233	310	233
VD2	339	787	339	787
ドア	29.7	3	29.7	3
ACV1	263	230	263	230
ACV2	233	170	233	430
ACV3	233	620	233	360
前室	-22	—	-22	—
飼育室	-52	—	-52	—
給気ファン	287	1020	287	1020
排気ファン	-285	1020	-285	1020

註) 圧力は、室圧または装置前後の差圧 (圧力損失) を示す。

安全キャビネットの扉開口が大の状態、前室-飼育室間のドアを開けた場合の解析結果を表-4に示す。ドアの開放はドアの流量係数を十分に大きくして模擬した。ドアを開けると前室と飼育室の室圧はともにほぼ-45Paで等しくなるが、ドアを通じて前室から飼育室へ流入する風量が11m³/h増加する。これは、飼育室への給気風量が減少し、前室への給気風量が増えた分である。

一般の風量制御方式では、給気風量は一定に制御されているので、ドアを開けてもドアを通る風量は変わらないが、給気部をボリュームダンパーにしたことによりドア開放後のドア風量が増加し、安全性が増すと見える。

表-4 ドア開放による各部の変化

部位	安全キャビネットの扉開口			
	大 (運転モード)		小 (運転休止)	
	圧力 Pa	風量 m ³ /h	圧力 Pa	風量 m ³ /h
VD1	310	233	332	244 (増)
VD2	339	787	332	776 (減)
ドア	29.7	3	0	14 (増)
ACV1	263	230	263	230
ACV2	233	170	240	170
ACV3	233	620	240	620
前室	-22	—	-45	—
飼育室	-52	—	-45	—
給気ファン	287	1020	287	1020
排気ファン	-285	1020	-285	1020

註) 圧力は、室圧または装置前後の差圧 (圧力損失) を示す。

4. 実験による流量直接指令方式の性能検証

同一の実験装置を用い、差圧制御方式と流量直接指令方式の性能を比較した。

4.1 実験概要

a. 実験装置

図-8 に実験装置を示す。写真-1 に実験装置の外観を示す。実験装置は図-5 に示した解析モデルと同様に、バイオハザード対策施設の一般的な室構成と差圧制御方式をモデル化したものである。各室の寸法を実物大とし、合板で製作した。従来の差圧制御ではフィードバック信号により風量を増減する変風量装置 (VAV) が用いられるが、ここでは排気側に電圧信号により直接風量が指定できる風量制御バルブを設けて直接指令方式の実験と兼用した。風量制御バルブの主な仕様は、風量レンジ 60~

1175m³/h、バルブ前後の必要差圧 150~750Pa である。安全キャビネットの排気風量は、変位計で感知した扉の開口面積の情報により風量制御バルブ (ACV3) の風量を制御し、扉開口部の面風速が 0.5m/sec となるようにした。



写真-1 実験装置 (排気側)

b. 差圧制御方式の制御

差圧制御方式の制御を図-9 に示す。差圧制御は次のように行なった。

前室-飼育室間の差圧を 30Pa とするために、外気-前室間の差圧が-20Pa、外気-飼育室間の差圧が-50Pa になるように、各差圧信号を PID 調節器に送って ACV1 と ACV2 の開度を調節した。

c. 流量直接指令方式の制御

流量直接指令方式では、前室の排気風量を一定、飼育室の排気風量と安全キャビネットの排気風量の和が一定となるように制御した。

安全キャビネット扉の開口状況に応じた電圧信号によ

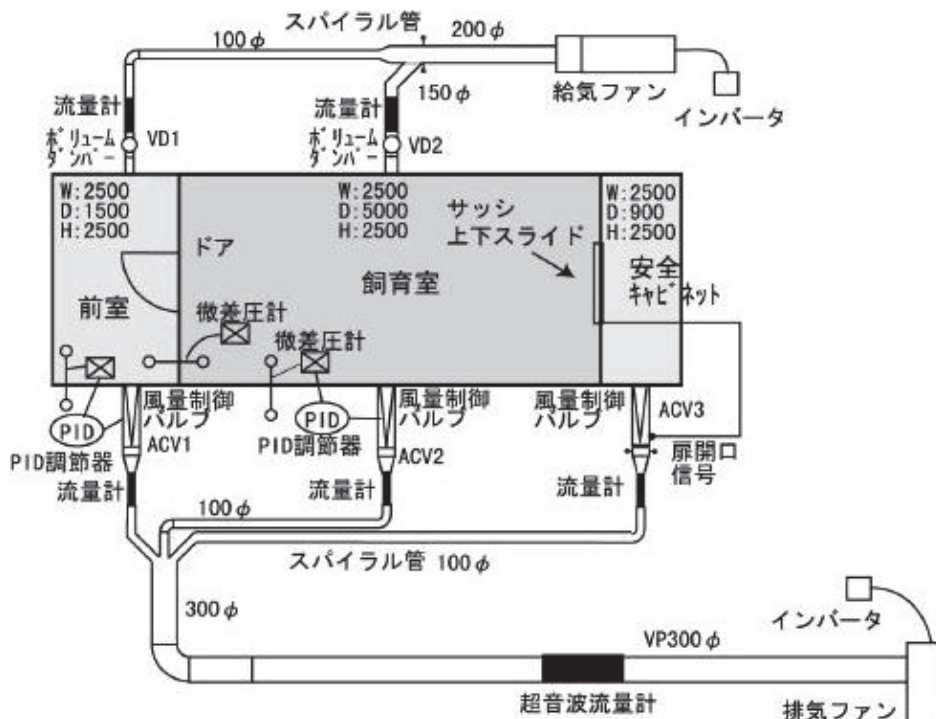


図-8 実験装置

り安全キャビネットの排気風量（ACV3）を制御した。

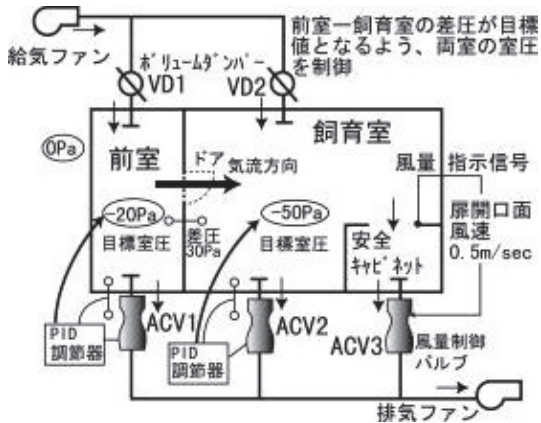


図-9 差圧制御方式の制御

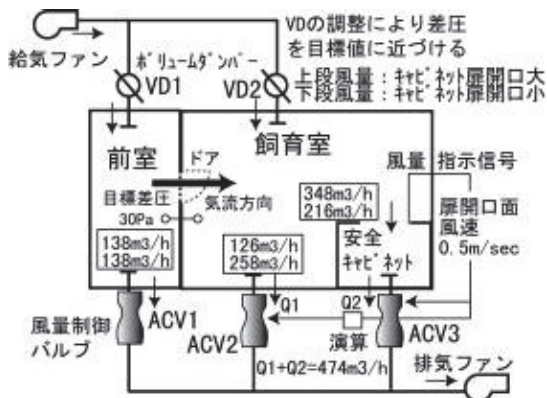


図-10 流量直接指令方式の制御

d. 実験ケース

差圧制御方式と流量直接指令方式について、安全キャビネットの扉を開閉（風量を変更）した場合の室圧や流量の変化を確認した。また流量直接指令方式において、前室-飼育室間のドアを開閉した場合の性能を検証した。

e. 測定項目と測定機器

測定項目と測定機器を表-5に示す。

表-5 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器
前室給気風量(VD1)	ピトー管式流量計
飼育室給気風量(VD2)	ピトー管式流量計
前室排気風量(ACV1)	ピトー管式流量計
飼育室排気風量(ACV2)	ピトー管式流量計
安全キャビネット排気風量(ACV3)	ピトー管式流量計
前室-飼育室差圧	微差圧計
外気-飼育室差圧	微差圧計

4.2 実験結果

a. 差圧の変化

図-11、図-12 は差圧制御方式と流量直接指令方式

で安全キャビネットの扉を開閉し、安全キャビネットの排気風量を変化させた時の前室と飼育室間の差圧の変化である。

差圧制御方式では測定された差圧データの標準偏差は14.1Paで、扉の開閉により差圧が大きく変化する。差圧が目標値に達するのにほぼ300秒を要している。また、扉の開閉が小さく変更時、前室-飼育室間の差圧がなくなり逆流が危ぶまれる。

流量直接指令方式では差圧データの標準偏差は1.57Paと差圧制御より小さく、扉開閉の影響はわずくであり、逆流の危険性は少ない。

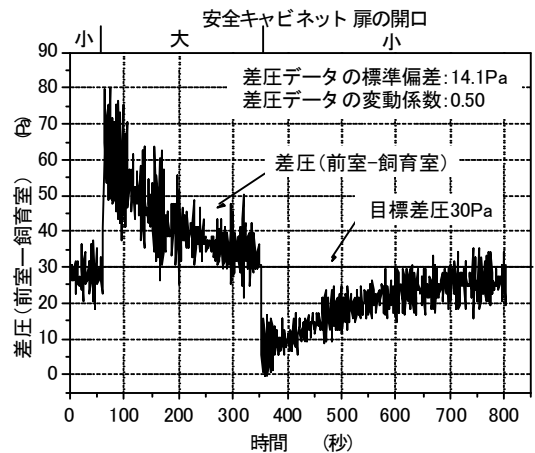


図-11 差圧制御方式による差圧の変化

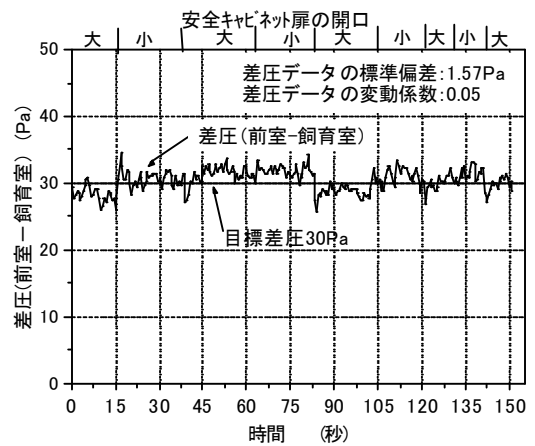


図-12 流量直接指令方式による差圧の変化

b. 風量の変化

図-13、図-14 は差圧制御方式と流量直接指令方式で安全キャビネットの扉を開閉し、安全キャビネットの排気風量を変化させた時の前室と飼育室間の風量の変化である。

差圧制御方式では、流量直接指令方式で制御されている安全キャビネットの排気風量は迅速に変わるが、PID

制御されている飼育室排気風量の変化は遅い。両者の風量変化速度の違いにより、差圧が0になる現象が生ずる。

流量直接指令方式では扉の開閉に応じて、安全キャビネット排気風量と飼育室排気風量の組み合わせが迅速に変化し、その風量の和は一定を保っている。このことにより飼育室の総排気風量が変わることがないので、前室と飼育室の差圧はほぼ 30Pa を維持できている。

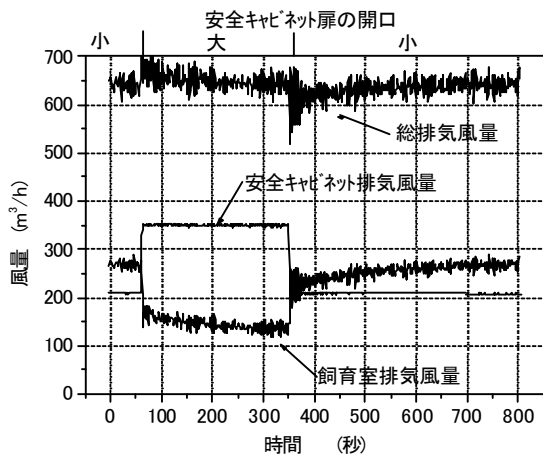


図-13 差圧制御方式による風量の変化

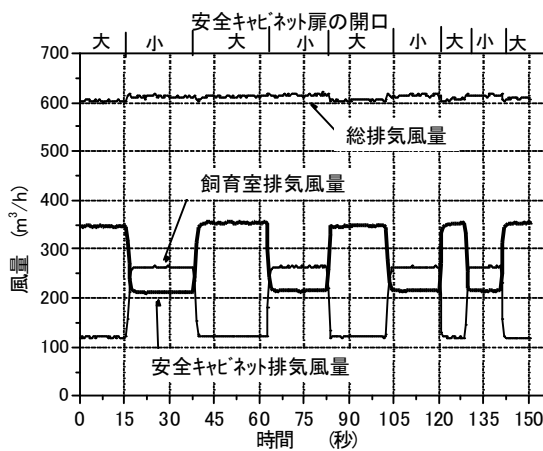


図-14 流量直接指令方式による風量の変化

図-15 は安全キャビネットが実験モードで前室と飼育室の間のドアを開閉した時の風量と差圧の変化である。ドアを開けることにより飼育室への給気風量が減り、前室への給気風量が増えており、解析結果と同様である。前室の排気風量は一定に制御されているので、ドアを通じて前室から飼育室へ流れる風量が増加していることになり、ドアを開けても安全といえる。

5. おわりに

従来の室圧制御方式に用いられている差圧制御方式の

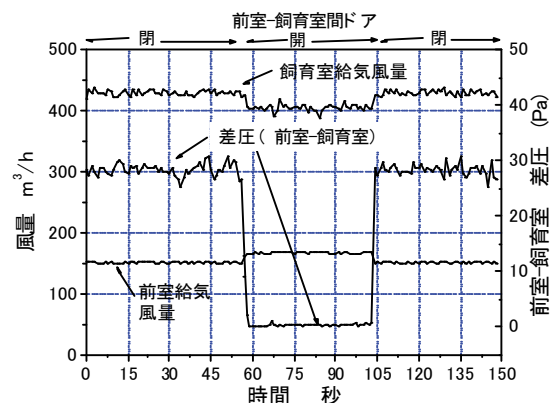


図-15 ドア開閉時の室圧、風量の変化

問題点を解決できる流量直接指令方式について、解析と実験による検討を行なった。検討は前室と飼育室、および飼育室内に安全キャビネットを有する構成のバイオハザード対策施設を対象とした。

多数室換気回路網計算プログラムを用いて定常状態に対する解析的検討を行ない、流量直接指令方式で制御すれば、安全キャビネットの風量を変化させても前室と飼育室間の差圧が変わらないこと、前室-飼育室間のドアを開けても気流方向が維持できることを確認した。

実大モデルの実験装置による差圧制御方式と流量直接指令方式の性能比較実験を行なった。

フィードバック信号による差圧制御方式は制御に時間がかかること、安全キャビネットの風量変更時に前室と飼育室間の差圧が確保できず、気流方向が逆転する恐れがあることを確認した。

一方、迅速に風量変更を指令できる風量制御バルブを用いた流量直接指令方式では、安全キャビネットの風量変更という過渡的応答時でも安定して空気の流れ方向を維持でき、差圧制御方式での問題を解決できることが検証できた。また、前室-飼育室間のドア開放時も、解析結果と同様に気流方向を維持しつつ風量が増加するため安全が維持できることを検証した。

【参考文献】

- 1) 得田健一、茂木正史、「高度清浄空間における室圧制御技術の研究」、奥村組技術研究所年報 No.26、2000
- 2) 広川他、「手術室における新室圧制御方式の評価」、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.729~732、1994
- 3) Dale T. Hitcings, 「Laboratory Space Pressurization Control Systems」、ASHRAE Journal, February 1994
- 4) 内海他、「多数室換気量計算モデル COMIS with IISiBat の開発研究」、日本建築学会学術講演梗概集、1997