

# 高度清浄空間における室圧制御技術の研究

得田健一\* 茂木正史\*\*

## 1. まえがき

高度な清浄度が要求される生産施設や、汚染物質を取り扱う産業施設では、当該室と他室（外部）との間の空気の相互汚染が問題となる。この問題を解決するために、室間の空気の流れを一方向とする室圧制御が行われている。医薬品製造工場、食品工場、半導体製造工場のように外部からの粉じんや雑菌の侵入を防がなければならない建物では、室圧を外気または周囲室に対して陽圧になるように制御する。一方、室内の空気が外部に漏洩するのを防がなければならない特殊薬品工場、パイオハザード対策施設（以降、BH施設と略称）では室圧を陰圧に保つような室圧制御を行っている。

空気の流れは、外部給気口から取り込まれ、ダクトや室内（ドア、すきま）、空気制御用装置を通過して外部排気口から排出されるという経路をとるが、その過程において種々の要因が作用して室圧制御を困難にする。

これらの要因の作用を制御して高度な室圧制御を実現すること、またその対策が低コストで利用しやすいものを目的に研究を行っている。ここでは、これまでに取り組んだ以下の内容について報告する。

- ①BH施設における現状システムの内容確認、解析等によるシステム特性把握
- ②BH施設におけるシステム特性の改良法の実験的確認
- ③低コストで使いやすい磁石型エアタイトドアの性能確認
- ④外風圧の影響を軽減するための機械式ダンパーの考案

## 2. 室圧制御の概要と事例

室圧は空調系統内のCAV（定風量装置）やVAV（変風量装置）、あるいはインバータ（ファンの制御）といった空気制御用装置によって制御される。空調系統内に配置されている各装置やドアのすきまは空気の流れに対して抵抗となりその前後では圧力差が生じる。この時の流量（ $Q$ ）と圧力差（ $\Delta p$ ）の間には次の式が成り立つ。

$$Q = a\Delta p^n \dots\dots\dots(1)$$

$Q$ ：流量(m<sup>3</sup>/h)  $\Delta p$ ：差圧(Pa)

$a$ 、 $n$ ：すきま特性値（すきま形状によって決まる定数）

(1)式より、 $Q$ や $a$ あるいは $n$ によって $\Delta p$ が定まる。

室圧制御では、室と室の間のドアのすきまのような固定設備が持つ定数（ $a$ 、 $n$ ）にCAVやVAV等の可動な制御用装置の定数（ $a$ 、 $n$ ）と流量（ $Q$ ）を組み合わせる多教室の室間に管理差圧を実現する。

定常状態では給・排気風量と各室間の抵抗との組み合わせにより規定の室圧を実現できていても、種々の外的要因あるいは内的要因が作用して、室圧が変動する。従って、理想的な室圧制御システムを実現するには表-1に示すような室圧の変動要因の作用を明確にし、合理的な設備の配置や制御をする必要があり、要素技術の蓄積が重要である。

表-1 室圧変動の要因

変動要因	発生要因		影響時間	
	人工的外乱	自然外乱	瞬時外乱	経年変化
給排気ファンの起動・停止	○		○	
局所ファンの発停	○		○	
ドアの開閉	○		○	
フィルター目詰まり		○		○
外風圧変動		○	○	
気流の脈動		○	○	

今回、システム特性の把握に取り組んだBH施設における室圧制御の実例を図-1に示す。ここでは飼育室内の汚染空気を外部に漏洩させないために、CAVとVAVを併用した室圧制御を行っている。前室を外部よりも陰圧にし、その前室よりも飼育室内をさらに陰圧に保つように、前室と飼育室との差圧によって制御している。この制御はCAVにより給気風量を一定に保つとともに、前室と飼育室間の差圧信号によって、VAVの流量を調整し、差圧を一定に保持しようとする方法である。しかしシステム上VAVが干渉仕合い、各室の室圧が一義的に定まらず差圧が不安定になる制御系の相互干渉の問題がある。また、運転実績より、ファン起動、停止時に室圧が外気に対して陽圧になったり、過剰な陰圧になることがあり、室圧のオーバーシュートに対して改善要望がある。

\*本社建築設計部 \*\*環境研究室

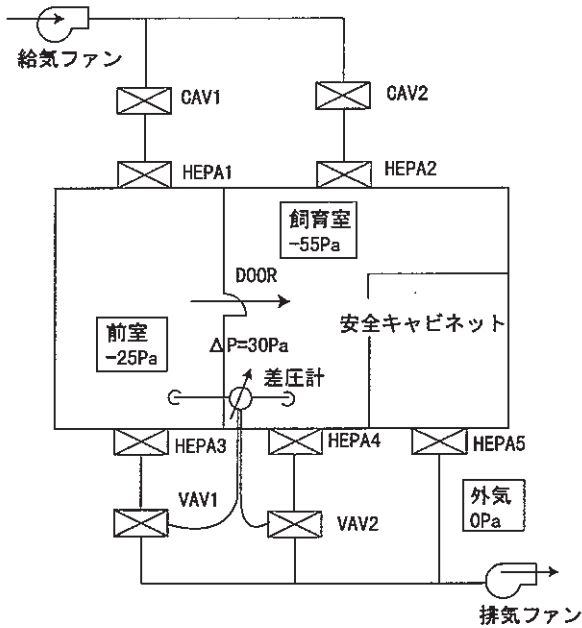


図-1 室圧制御の実例

### 3. 外乱による室圧変動の予測と対策

換気回路網プログラムを用いた解析を行い、外乱による室圧変動状況の模試と対策を検討した。また、解析で捉えた現象の確認と対策の有効性を図-1のBH施設で実験的に確かめた。検討を行ったのは以下の項目である。

- ① 制御系の相互干渉
- ② ファン起動、停止時における室圧のオーバーシュート

#### 3.1 解析によるシステム特性の把握

##### a. 解析プログラムの概要

解析に用いたのは多数室換気回路網計算プログラムCOMIS ver3.0<sup>1)</sup>である。このプログラムでは、建物外部の風圧の影響、空調システムやドア（すきま特性）の室圧への影響を検討可能である。プログラムの計算は、空調系統内の各室間の抵抗について流量と圧力を変数とする連立方程式を解く。プログラムはグラフィカルな入力インターフェースを備えており複雑な換気回路網でも容易に計算が可能である。図-2に換気回路網計算の流れを示す。

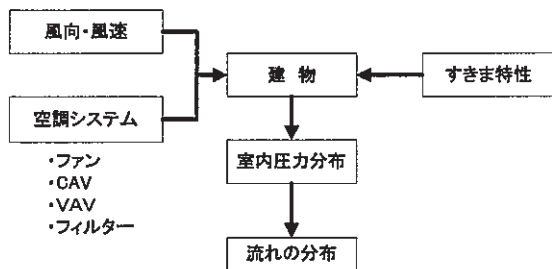


図-2 換気回路網計算の流れ

##### b. 解析モデル

解析モデルとして図-1に示した実例の室圧制御を用いた。定常時の設定室圧は外気を0Paとし、前室の室圧は-25Pa、飼育室は-55Paである。両室間に30Paの差圧をつけ、空気はドアを通して前室から飼育室へ流れている。定常時の差圧、室圧、流量を表-2に、各部のすきま特性値を表-3に示す。HEPA（高性能フィルター）の特性値はカタログ値であり、他は流量と差圧が実システムでの値に合うように定めた。

表-2 定常時の差圧、室圧、流量

飼育室-前室差圧 (Pa)	30
ドア流量 (kg/h)	0.069
前室室圧 (Pa)	-25
飼育室室圧 (Pa)	-55
流量(HEPA1) (kg/h)	405
流量(HEPA2) (kg/h)	869
流量(HEPA3) (kg/h)	405
流量(HEPA4) (kg/h)	216
流量(HEPA5) (kg/h)	653

\*室圧は外気に対する値

表-3 各部のすきま特性値

door	Cs	7.50E-07	VAV1	Cs	9.00E-04
	n	0.952		n	1.00E+00
VAV2	Cs	3.10E-04	HEPA1	Cs	1.17E-03
	n	1.00E+00		n	9.52E-01
HEPA2	Cs	2.48E-03	HEPA3	Cs	1.04E-03
	n	9.52E-01		n	9.52E-01
HEPA4	Cs	1.85E-03	HEPA5	Cs	1.00E-03
	n	9.52E-01		n	9.52E-01
CAV1	Cs	1.17E-03	CAV2	Cs	2.05E-03
	n	9.52E-01		n	9.52E-01

\* $Q(\text{kg/s}) = C_s(\text{kg/s}) \times P(\text{Pa})^n$

##### c. 制御系の相互干渉

図-1のシステムで外乱により各室の圧力が変化すると、それに応じてVAV1、VAV2が同時に作動するが、2室間の差圧制御では、各VAVの制御が干渉し合い、安定した制御は解析的に得られなかった。そこで、外乱としてドア開放による小さな偏差を与え、片方のVAVのみで制御する解析を行った。解析結果を図-3に示す。前室と飼育室間の差圧は確保できるが、VAV2を固定し、VAV1のみで両室間の差圧による制御をすると、室圧は外気に対して陽圧側へシフトした。また、飼育室用のVAV2で制御すると外気に対して過度に陰圧側へシフトした。両方のVAVで同時に制御すると、室圧が陽圧側と陰圧側の間で所定の差圧になるVAVの開度の組み合わせが無数にあるので制御が困難となる。

この特性を改良するには、外乱によって制御が混乱する2室間差圧制御でなく、比較的外乱の小さい外気圧などを基準にした制御システムを組めばよいと考えられる。

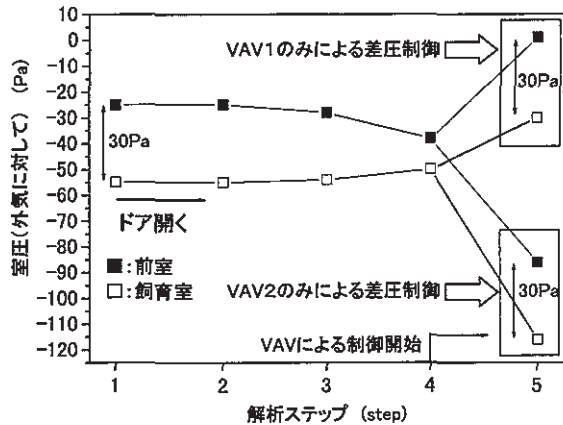


図-3 室間差圧を基準としたVAVによる制御

この方法で制御した場合の解析結果が図-4である。図-3におけるstep4の状態からVAV1は前室を外気に対して-25Paに、VAV2は飼育室を外気に対して-55Paにするように制御した場合の室圧変化である。VAV1とVAV2を外気を基準に作動させることにより、外気に対する所定の室圧を満足しながら必要な室間差圧30Paを回復できる。

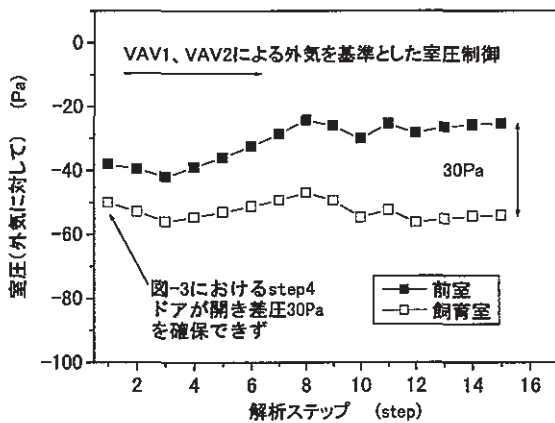


図-4 外気を基準としたVAVによる制御

d. ファン起動、停止時の室圧のオーバーシュート

給・排気ファン起動時の過渡的な状態で、室圧が外気に対して適切な陰圧を保ちながら定格運転に至るのが望ましい。また、給・排気ファン停止時にも、適切な陰圧を保ちながら停止するのが望ましい。ところが、給・排気ファンの起動時や停止時の過渡的な状態で、室圧が外気に対して陽圧になったり、過剰な陰圧になったりすることがある。この特性を改良するには、排気ファンの優勢を保ちつつ、給・排気ファンを同時に立ち上げてゆく方法が有効と考えた。この方法で給・排気ファンを起動させた場合の解析結果を図-5に示す。

室圧が外気に対して陽圧になったり、過剰な陰圧になったりすることを回避できる。

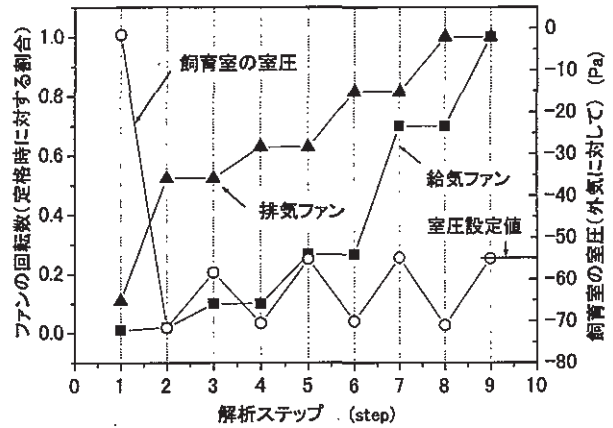


図-5 給・排気ファンの段階的起動と室圧変化

3.2 BH施設におけるシステム特性の改良法の実験的確認

実際のシステムでの室圧変動を計測し、解析的検討で得られた現象の把握と、対策の効果を確認した。実測したシステムは、図-1に示した解析モデルと少し異なり共通の前室に面して飼育室1～飼育室5の5室が並列しており、それぞれの室が前室に対して-30Paとなることを目標とした室圧制御を行っている。給・排気ファンやVAV、CAVは解析モデルと同様な位置関係で設置されている。また、室圧制御の基準は解析と同様に室間差圧としている。

測定項目は、飼育室2と前室および飼育室5と前室の差圧、ファンの回転数、前室の絶対圧力である。

a. 制御系の相互干渉

図-6は、現行の運転方法でファンを立ち上げた時の計測結果である。起動時には制御対象の室圧の偏差が大きくなり、VAVの制御が干渉しあって、解析で予測した通りの、不安定な差圧変化を示した。

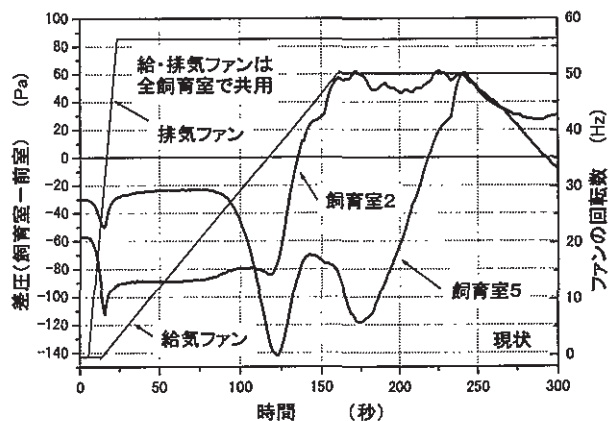


図-6 差圧基準のVAV制御での室圧変動

この特性を改良するには、VAVの制御の基準を、外乱を受けにくい外気等にするところであるが、実験時にはそのような変更は無理である。そこで、ファン立ち上がり

時に、5室並んだ飼育室側の各 VAV の動きを固定する便宜的対策を実施した。図-7にその結果を示す。図-6と比べ、陽圧の発生も押さえられ安定化している。

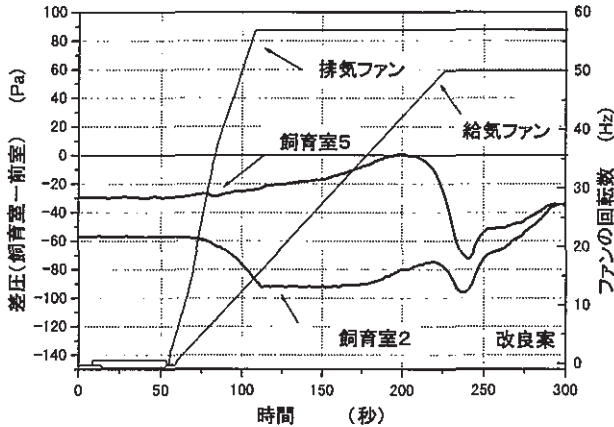


図-7 VAV 固定の場合の差圧変動

b. ファン起動、停止時の室圧のオーバーシュート

解析的検討で、ファンの起動時には給・排気ファンの回転数を徐々に上げてゆくことにより極端な室圧変化を回避できることを示した。その際、当システムのように陰圧制御が行われている場合には、排気ファンが優勢を保つべきことも確認された。そこで給・排気ファンをほぼ同時にスタートさせる現状の運転方法に従って、給・排気ファンをほぼ同時にスタートさせながらも、給気ファンの回転数の上昇勾配を排気ファンよりも小さくする対策を行った。結果を図-8に示す。前室の絶対圧は最大 350Pa 程度下降しており、排気ファンが優勢すぎると考えられた。そこで、給・排気ファンの回転数の上昇勾配は同程度で、給気ファンを遅らせて起動することにした。結果を図-9に示す。図-8に見られる前室の過剰な室圧低下は改善され、定常運転時より若干低い室圧レベル程度でファンを起動することができた。

実験による検討で部分的に問題解決の目処を得たが未実施の部分もある。今後種々の改良を加え、全体システムが所定の機能を発揮するようにしたい。

4. 磁石型エアタイトドアの性能

4.1 バリアの方式とドアの気密性

クリーンルームのバリアの方式には、気密バリアとエアフローバリアの2つの考え方がある。気密バリアは、空調停止時も気密性を維持する方法で、BH施設などで従来から用いられている。要所に締め付け型エアタイトドア（ここではグレモンハンドル使用）を設けて、室圧や清浄度を確保している。一方、エアフローバリアは、空調稼働時のみ性能を確保する方法で、差圧による空気流によりバリアを形成する方式であるためドアに厳密な気密性を必要とせず、開閉の容易性、低コスト化の長所

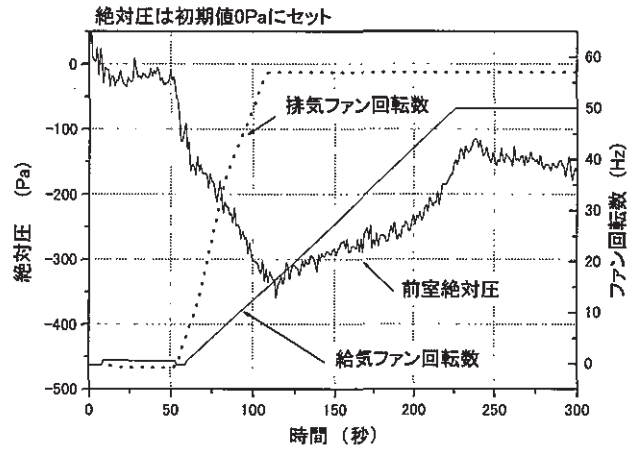


図-8 排気ファンの優勢割合が大きい場合の室圧変動

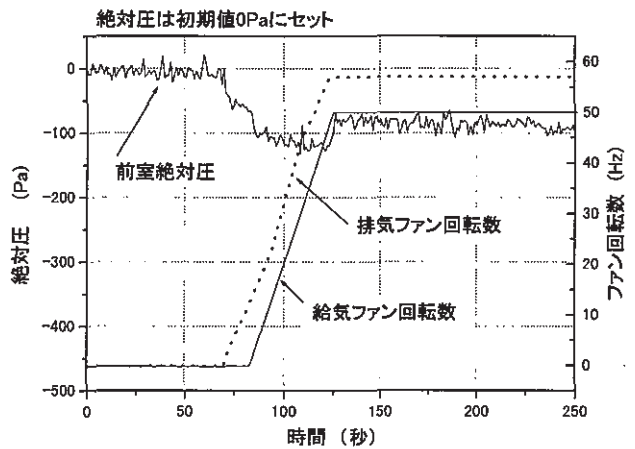


図-9 給・排気ファンを同速度で起動した場合の室圧

がある。このため、エアフローバリア形成用のドア開発が客先より望まれている。そこで、低コストなエアフローバリア形成用板磁石付エアタイトドア（以降、磁石型エアタイトドアと略記）をクリーンルームに採用し、その性能を評価した。図-10に磁石型エアタイトドアの断面を示す。

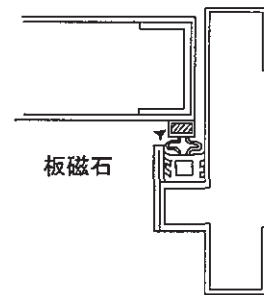


図-10 磁石型エアタイトドアの断面

4.2 ドアの気密性評価方法と測定方法

ドアの気密性評価は JIS<sup>2)</sup>の気密性評価方法に準じて行った。JIS では建具の気密性の等級線を次式で示して

いる。通気量が各圧力差において等級線を下回った時に、その等級を読む。

$$q = \alpha(\Delta P \times 10^{-1})^{1/n} \dots\dots\dots (2)$$

$q$  : 通気量 ( $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ )

$\alpha$  : 等級(2, 8, 30, 120) ( $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ )

$\Delta P$  : 圧力差 (Pa)

$n$  :  $n=1$

締め付け型エアタイトドアと磁石型エアタイトドアについて(2)式で示される圧力差と通気量の関係を以下の方法で求めた。

- ①測定対象となるドアの設置された室において対象のドア以外のすきまをシールする
- ②室内に持ち込んだボンベから空気を放出して室内圧力を適度 (大気圧に対して 100Pa 程度) に高め、空気放出停止後の圧力減衰過程から空気の密度変化を算出して対象ドアからの漏洩空気量を求める

図-11 に示す室内の流量の変化は空気密度の変化を用いて(3)式のように表わせる。

$$V \frac{d\rho}{dt} = H - \rho Q \dots\dots\dots (3)$$

ボンベからの空気放出を停止した時点以降の減衰過程を考えると、 $H=0$  なので (4) 式が成立する。

$$V \frac{d\rho}{dt} = -\rho Q \dots\dots\dots (4)$$

気体の状態方程式より

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{P}{RT} \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式により (4) 式を整理すると、

$$V \frac{dP}{dt} = -PQ \dots\dots\dots (6)$$

圧力  $P$  を室外圧力を基準に表すと、漏洩空気量  $Q$  との関係は (7) 式で表せる。

$$Q = a\Delta P^b \dots\dots\dots (7)$$

$a, b$  : 定数

$\Delta p$  : 室内外圧力差(Pa)

$\Delta p$  と  $Q$  の関係を圧力減衰過程の測定値を用いて求める。

図-12 の減衰過程の時刻 ( $t_i$ ) における  $p(t_i)$  を用いて得られる

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t_i) - P(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

を式 (6) の  $dP/dt$  に近似して、式 (6) より  $Q(t_i)$  を求める。これを時刻 ( $t_n$ ) まで繰り返し、 $n$  個の  $p(t_i)$ 、 $Q(t_i)$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) を用いて最小二乗法により  $a, b$  を求める。

$\rho$  : 空気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$P$  : 室内絶対圧力 (Pa)

$V$  : 室容積 ( $\text{m}^3$ )

$H$  : 放出空気量 ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$Q$  : 漏洩空気量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$G$  : 空気質量 (kg)

$T$  : 絶対温度 (k)

$R$  : 気体定数 ( $8.21\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{k})$ )

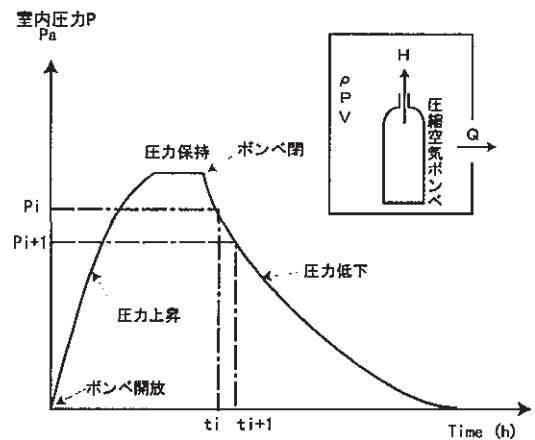


図-11 室圧の経時変化

### 4.3 測定結果

測定結果を図-12 に示す。磁石型エアタイトドアの気密性能は締め付け型エアタイトドアとほぼ同様である。また、JIS に準じて表せばその等級はほぼ 0.2 等級と言える。

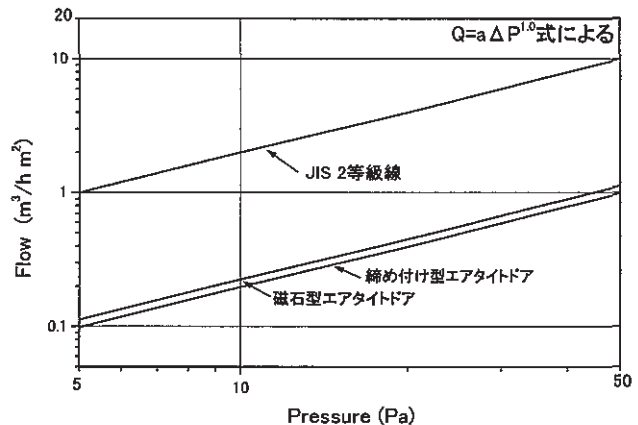


図-12 磁石型エアタイトドアの気密性能

## 5. 外風圧制御技術

### 5.1 外風圧軽減ダンパーの機構

外風圧が影響して室圧変動を引き起こすのを防ぐ方法として以下の機能を備えたダンパーを開発した。

ダンパーは可動の抵抗板を有し、この抵抗板が外風圧に応じて移動し、開口率を調整することによって風量を一定に保つ。図-13 に外風圧軽減ダンパーの機構を示す。振り子おもりによるモーメントによって、定風量になるまでは風速が増大してもダンパーの抵抗板(羽根)は動かない。定風量に達した後に、さらに風速が増大すると、羽根が回転をはじめ開口を狭め、流量を調整する。

また、風速が増大するにつれて開口が小さくなるように羽根が回転しなければならないが、流量が一定となるような開口面積に調整するために3本のバネが1本から3本まで段階的に効くようにしている。

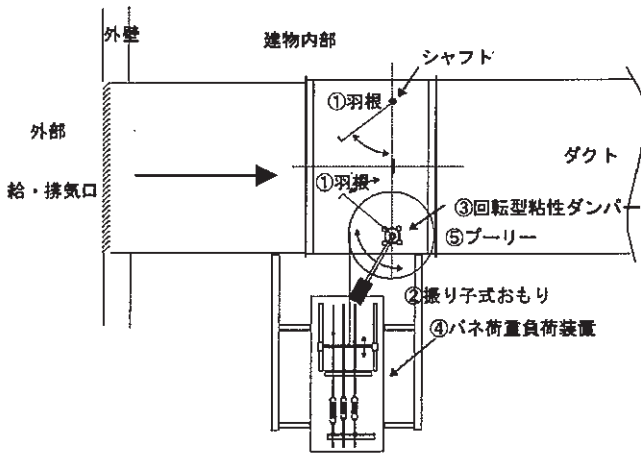


図-13 外風圧軽減ダンパーの機構

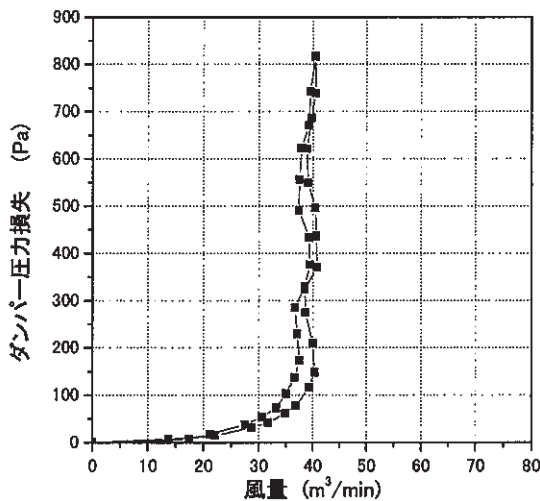


図-14 外風圧軽減ダンパーの性能(静的試験)

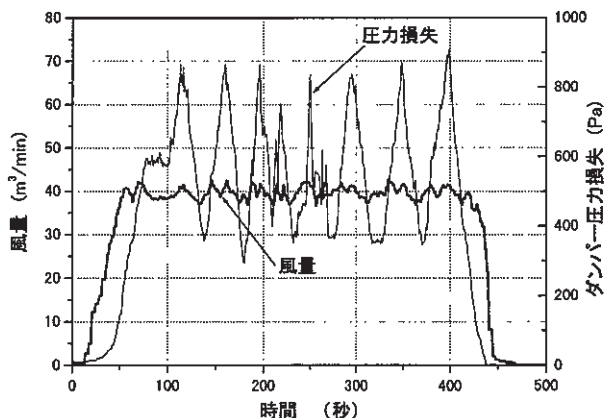


図-15 外風圧軽減ダンパーの性能(動的試験)

## 5.2 外風圧軽減ダンパーの性能

図-14 に静的試験になるダンパーの圧力損失と風量を示す。風量 40 m<sup>3</sup>/min を目標に設計したが、初期圧損 150Pa でほぼ目標風量が達成できている。

図-15 に同じダンパーについて風圧を動的に変化させた結果を示す。ダンパーの圧力損失は 300Pa~900Pa の間で変化しているが、風量の変化は 10%以内に収まっている。

## 6. まとめ

高度な室圧制御が要求される建物に適用するための要素技術を蓄積している。これまでに以下の成果を得た。

- ①現状システムにおいてファン起動時に一時的に飼育室内が外気に対して陽圧になったり、過剰な陰圧となる特性を、解析、実験で検討し、排気ファンの優勢を保ちつつ、給・排気ファンを同時に立ち上げてゆく対策の有効性を確認した
- ②ドア開閉時等に飼育室と前室の差圧が安定しない特性は、制御の基準を外気等の圧力変動の小さい部分に設定することで解決できることを解析的に明らかにし、そのようになっていない現状のシステムでの特性も実験的に確認した
- ③上の特性は差圧の偏差が大きくなるファン起動時に顕著であり、対象としたシステムではファン起動時に暫定的に VAV を固定することと、排気ファンの立ち上がり時間を長くすることで改善されることが実験的に明らかになった
- ④低コストで使用が簡易な磁石型エアタイトドアの性能を評価し、使用可能であることを確認した
- ⑤外風圧軽減ダンパーを製作し、その性能を把握した

## 7. あとがき

室圧制御に関して、施設の管理者や利用者の声を聞きながら、改良していくための技術検討を行っている。今後も技術の蓄積と適用を広め、きめの細かい設計や対策ができるよう研究を進めたい。

### 【参考文献】

- 1)内海他、[多数室換気量計算モデル COMIS with IISiBat の開発研究]、日本建築学会大会学術講演梗概集、1997
- 2)「JIS A 1516 建具の気密性試験法」、1994-改正