

高度清浄空間における室圧制御技術の研究

—その3 流量直接指令方式の実建物への適応と気密性能評価システム—

茂木正史* 中村裕介* 得田健一**

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隣接室との間に差圧を確保して室間の空気の流れを一方に制御し、対象室の要求性能を実現している。従来その方法として、変風量装置 (VAV) や定風量装置 (CAV) を組み合わせて、室間の差圧をフィードバック制御 (PID 制御) する差圧制御方式が一般的に用いられてきた。しかし、差圧制御方式は VAV の風量変更速度が遅いため (数十秒～数分) に急速な風量変更が必要な場面では必要差圧が確保できないなどの問題があった。流量直接指令方式は、高速に風量変更が可能な風量制御バルブ (AFV) を利用して風量を制御する方式である。解析と実大モデルの実験により安全キャビネットの風量変更に関連して直接的に風量を制御することで、短時間の風量変更にも迅速に追従し、安全キャビネットの扉を開閉しても実験室が所定の室圧 (空気の流れ) を維持できることを確認している¹⁾。

従来の差圧制御方式でも、流量直接指令方式においても、効率的で精度の良い制御を行うためには制御対象となる室が高い気密性能を有していることが必要である。また、各方式の空調設計では給気風量と排気風量のバランスを確保するためのファンの風量を設定する必要があるが、そのためには対象室の気密性能 (対象室からの漏気量) に関するデータが必要である。また、予想外の事故により空調設備が停止した場合や消毒で1室のみ加圧する場合は、室の気密性能による封じ込めが重要になるので、特に高度な施設では気密性能のスペックとして圧力減衰時間が定められる場合もある³⁾。このような場合には、室の気密性能を予測したり確保する技術が必須となる。

ここでは、流量直接指令方式を某研究所の動物実験室に適用したので、同時に適用された差圧制御方式と

比較しながらその性能測定結果について報告する。

さらに、室の気密性能測定方法や室を構成する躯体コンクリート、高気密ドア・サッシ、各種塗装材の透気性能を簡易な試験装置を用いて測定し、室の総合的な気密性能について評価する方法について報告する。

2. 流量直接指令方式の実建物への適用

2.1 差圧制御方式と流量直接指令方式について

a. 各方式の制御の仕組みと特徴

図-1に差圧制御方式の概要を示す。気流方向が1室から2室へ向かうように各室の室圧を P_1 、 P_2 ($P_1 > P_2$) となるように制御することを目的としている。ここに示す例では給気側に CAV (定風量装置) を設け給気風量を一定とし、排気側に VAV (変風量装置) を設け排気風量を変更できる様にしている。制御はフィードバック制御である PID 制御 (Proportional, Integral, Differential)²⁾ を用いている。具体的には、各室ごとに基準圧 (外気圧) との差が一定になるように制御する。

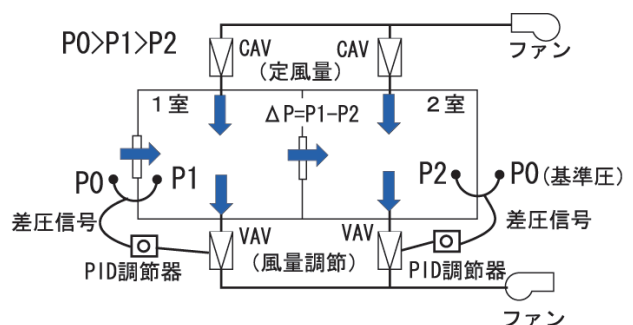


図-1 差圧制御方式の概要

差圧制御方式は一般的に用いられている制御方式であるが以下に示す問題点がある。

- ① フィードバック制御を行っているのでオーバーシュート (目標とずれた差圧の値を目標値に近づ

*技術研究所 **関西支社建築設計部

けようとして目標値を超える現象)が生じ気流方向が逆転してしまう場合がある

- ② VAV の動作が遅い(最小風量から最大風量までの変更に1分以上)ので、安全キャビネットの開閉などの急速な動作に伴う風量変更に対応できない
- ③ 低風量時の動作精度が悪く、最大風量の30%以下の領域ではほとんど使えない
- ④ 欠点を補おうとしてドア開閉時には制御を一時中断する機能などを追加し、制御アルゴリズムが複雑になっている

図-2に流量直接指令方式の概要を示す。気流方向が1室から2室へ向かうことを制御の目的としている。AFVからの風量を図に示しているが風量指示器は電圧によってAFVの風量を設定する。電圧値と風量は比例関係になっているので風量の指示が容易であり、例えば安全キャビネットの扉の開閉率に対応した風量設定が可能であるので開口面風速を一定にできる。扉を通過する風量はすきまを通過する風量の全体を頭わしておりオフセット風量と呼ばれている。下図の2室では風量バランスは下式で表せる。

$$Q_{2e} - Q_{2i} = Q_{12} \quad \text{————— (1)}$$

Q_{2e} と Q_{2i} は風量調節器で容易に変えられるのでその差が Q_{12} を維持するように変更すれば1室と2室間の差圧も一定に維持したままでの風量変更が可能である。

流量制御方式の特長は以下のとおりである。

- ① オフセット風量を一定に確保していればドア開閉などの外乱時にも空気の逆流は生じない
- ② 全開から全閉まで1秒程度で変更可能な装置と流量指示というフィード・フォワード制御により迅速な制御が可能である
- ③ 以下に示す圧力独立性により微小な室圧変動を吸収するので安定した制御が可能である

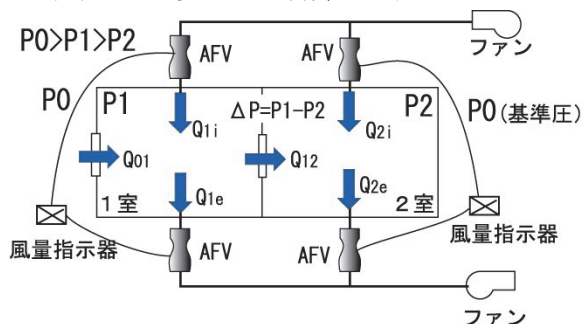


図-2 流量直接指令方式の概要

図-3にAFVの構造と圧力独立性の原理を示す。ベンチュリー管の中に風量調節のコーンが入っており、コーンは空気式アクチュエータとスプリングによってその位置を移動する。風量指示信号に従って空気式アクチュエータによってコーンを含む系が所定の位置に高速移動する。さらにコーンにかかる静圧によってスプリングが伸び縮みしてコーンの位置を調節する。静圧が低いとき、コーンにかかる力は弱くなり、コーン内のスプリングが伸びてコーンをベンチュリーから引き離す。低静圧と広い隙間の組み合わせで目的の風量を実現する。静圧が高まり、コーンにかかる力が強くなるにつれ、コーン内のスプリングは縮んで、コーンをベンチュリーの中に押し込む。高い静圧と狭い隙間の組み合わせで風量設定値を維持する。これが圧力独立性の原理である。

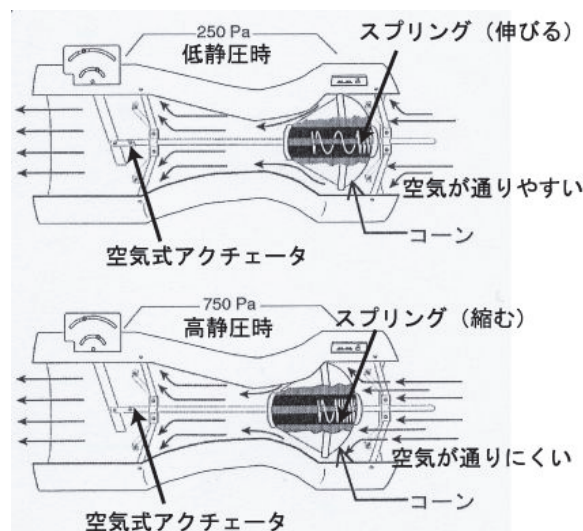


図-3 AFVの構造と圧力独立性の原理

b. 流量直接指令方式の適用例

上述した差圧制御方式と流量直接指令方式の特徴より、流量直接指令方式は、室の使用方法の中に風量の急速な変化が含まれる場面で特に有効である。図-4に流量直接指令方式の性能が有効に発揮される適用例を示す。図において、実験室の室圧は前室よりも30Pa低く設定されている。さらに実験室内には安全キャビネットがあり、その開口を通過する風速は開口面積によらず一定(0.5m/sec)であることを目標としている。このような要求性能に対して、流量直接指令方式ではキャビネットの扉の開閉時に開口面積に応じて開口面の風速が一定になるように算出した排気風量

Q2 が実現でき、瞬時に実験室の排気風量 Q1 を $Q1+Q2 = \text{一定}$ となるように制御することができる。これにより、開閉動作時でも安全キャビネットの面風速の維持と実験室の室圧維持を両立できるシステムの構築が可能である。

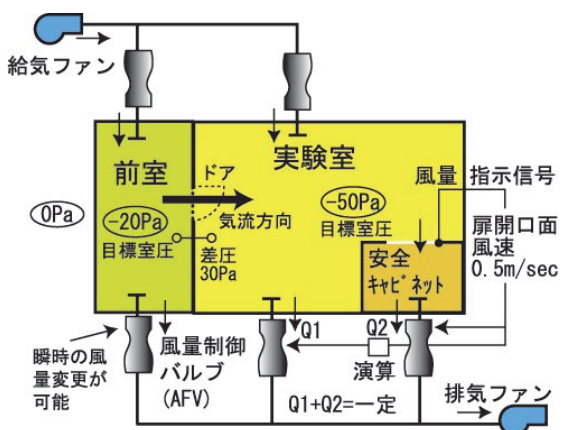


図-4 流量直接指令方式の適用例

2.2 実建物における検証

a. 飼育室の構成と空調システムの概要

某研究施設の空調リニューアル工事に流量直接指令方式を適用した。図-5 に流量直接指令方式を適用した飼育室の概要を示す。汚染廊下と飼育室廊下にはさまれて飼育室が複数並んでいる。飼育室は清浄であることが要求されるので、飼育室の室圧を汚染廊下や飼育室廊下よりも高くし、気流が飼育室から各廊下に向かうような制御が必要である。さらに、飼育室の使用方法を調査し、飼育室には動物飼育モードと休止モードがあり、休止モードでは飼育モードよりも換気風量が少なくても良いことがわかった。そこで、省エネ効果も期待できるので動的な風量変化に柔軟に対応できる流量直接指令方式の適用を提案し採用された。省エネ目的も含めて飼育室の換気量を各室独立に飼育モード（換気回数 15 回/h）と休止モード（換気回数 5 回/h）に変更できるシステムを構築した。各飼育室の給気と排気に AFV を設け、給気には無段階の風量制御が可能 AFV、排気には換気回数に合わせて 2 段階の風量制御が可能 AFV を設けた。一方の AFV を無段階風量式とすることで、室の気密性に依存するオフセット風量の調整や飼育室の室圧を精密に設定することが可能となる。スイッチで飼育室の排気量と給気量が飼育モードと休止モードに変更でき、その差が換気

回数を変更しても一定となるように設定した。

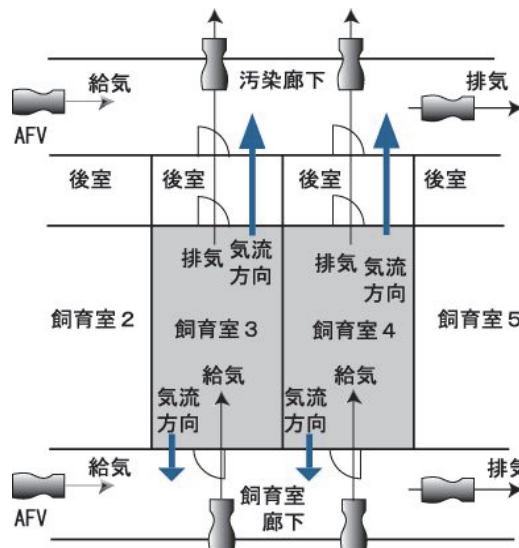


図-5 流量直接指令方式を適用した室の構成

図-6 に差圧制御方式を採用した前室の概要を示す。ここでは、動的な風量変更を伴う使用が行われないので従来方式である差圧制御方式が採用された。当飼育室では空気の流れが飼育室→前室→洗浄室の方向となることが要求仕様である。空調システムでは排気に VAV、給気に CAV を用いて、排気風量を PID 制御し、室圧（差圧）の維持を図るようにした。PID 制御の方式にはドア開閉時などは過剰反応しないよう制御を止めるアルゴリズムを組んだ複雑なシステムも可能であるが、ここでは制御速度を遅くしてドアを開放しても極端な VAV の風量変更がないように調整した。

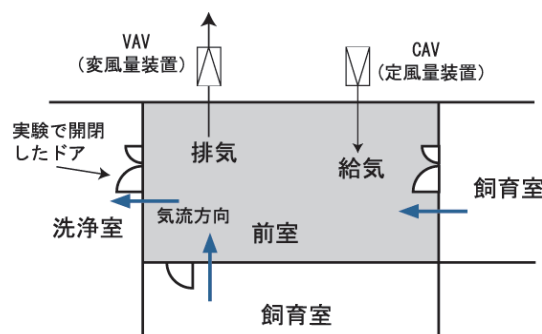


図-6 差圧制御方式を適用した室の構成

b. 測定内容

測定は以下のケースについて測定を行った。

- ①飼育室の換気回数変更
- ②飼育室のドア開閉

測定項目と測定機器を表-1 に示す。従来、室圧

制御の性能検証では外乱が無い、定常運転時を対象として静的性能検証を行うのが一般的であったが、流量直接指令方式のような外乱時の制御にも対応できる制御方式を採用した場合には外乱時の動的検証も実施するよう進めている。表-1に示したのは、動的性能検証を想定した性能検証項目である。

表-1 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	動的測定
飼育室給気風量	ピトー管式流量計	○
飼育室排気風量	熱線抵抗式風量計(可搬式)	○
飼育室室圧	微差圧計	○
飼育室廊下室圧	微差圧計	○
前室室圧(差圧制御)	微差圧計	○
室温	熱電対	○

c. 測定結果

図-7に流量直接指令方式において、飼育室3の換気回数を変更(15回/h→5回/h)したときの各室の室圧の変化と給気風量を示す。風量変更時に飼育室3の室圧は10Pa程度変動するが、約10秒で安定する。風量変更を行っていない飼育室4も若干の室圧変動がある。スイッチで換気回数変更の信号を発すると、2位置制御の排気VAVの風量に変更され、その信号を給気VAV(無段階制御)が受けて給気風量に変更される。この動作が1秒以内で行われるので動作中の排気風量と給気風量の差が一定でない瞬間があり室圧変動が生じたと考えられる。両方のVAVを無段階式として5秒程度の時間をかけて風量変更を行えばこのような変動はさけられる。室圧変動があっても飼育室の室圧の方が高く、気流方向は常に飼育室から各廊下に向かっていて、換気回数を変更しても要求機能を満たしている。

図-8に流量直接指令方式において、汚染廊下から飼育室廊下に向けて各室間のドアを開閉した際の室圧変動を示す。ドアを開閉したのは飼育室3である。ドア開閉時に飼育室3の室圧が15~20Pa低下する。室圧の復帰時間は10秒程度である。ドアを開閉しない飼育室4には飼育室3のドア開閉の影響がない。ドアを開閉しても室圧は廊下より飼育室が高く、気流方向は、飼育室から廊下方向を維持している。なお、給気、排気風量が変わらないのでオフセット風量も一定であると考えられる。以上よりドア開閉時も要求機能を満たしている。

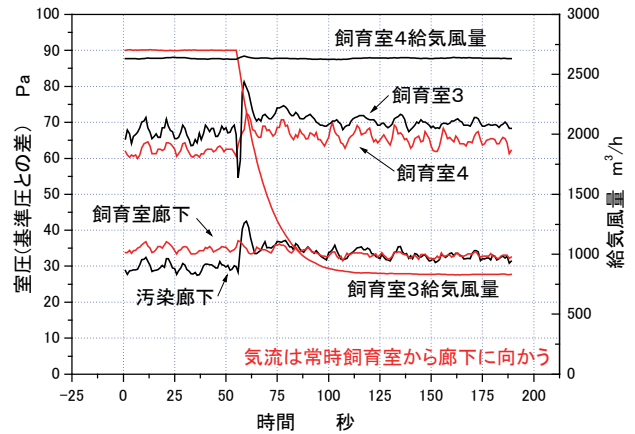


図-7 換気回数変更と室圧変化(流量直接指令)

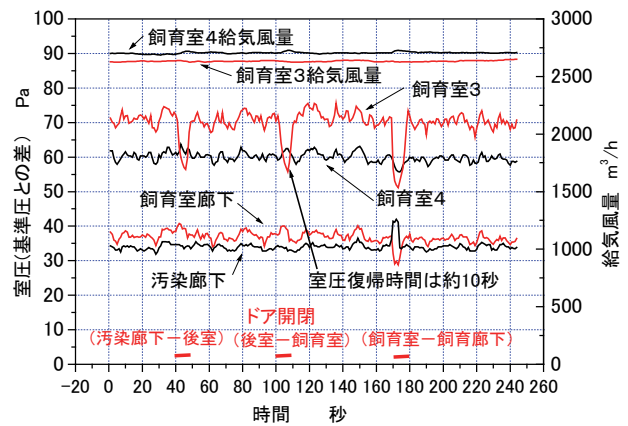


図-8 ドア開閉時の室圧変化(流量直接指令方式)

図-9に差圧制御方式において、ドア(洗浄室-前室間)を開閉した際の前室の室圧変動を示す。最初のドア開閉は通常の人出入りを模擬している。ドアを開けると室圧が5Pa程度低下する。この室圧は洗浄室と等しくなっている。復帰には約75秒要している。次にドアを300秒間開き続けると、前室の室圧は洗浄室と等しくなる。この間にVAVは、室圧を高めようと

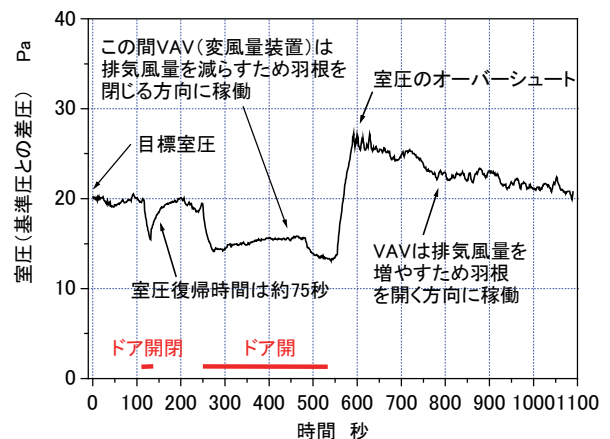


図-9 ドア開閉時の室圧変化(差圧制御方式)

排気風量が減るように羽根を閉じ続ける。そこで、ドアを閉めると VAV の羽根が閉まりすぎており、排気風量が足りないので室圧が高い方向へオーバーシュートする。以後、VAV がゆっくりと（制御速度を抑えているため）羽根を開き続け室圧が目標値に近づいてゆく。その間、10 分を要している。このように、差圧制御方式はドア開閉などの外乱に対する制御が不十分である。

3. 気密性能評価システム

3.1 気密性能評価システムの概要

図-10 に気密性能評価システムの概要を示す。室構成部材の気密性能を測定して得た気密性能データベースより室の気密性能を予測するとともに、確認（測定）する機能がある。このシステムにより、既往の室の気密性能を測定して空調設計に反映することができる。また、スペックとして室の気密性能が定められている場合には、構成部材レベルの気密性能の測定とその結果を用いた室の気密性能予測ができるので、事前に使用する構成部材の適不適を検討することができる。

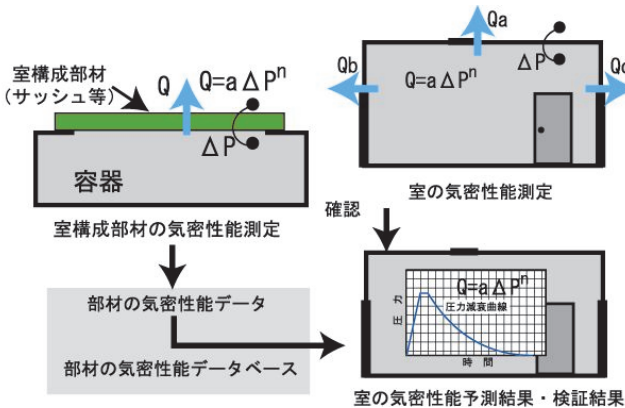


図-10 気密性能評価システムの概要

3.2 気密性能試験と室の気密性の検討

以下では室に気密性能（圧力減衰時間の規定値）が求められて実施した検討例を示す。

a. 気密試験対象（室構成部位）の選定

表-2 に気密試験対象とした室構成部位を示す。躯体コンクリートについては無垢部分以外に打継ぎ目地とセパ穴処理部（Pコン処理）を測定対象に含めた。塗装材は、躯体表面に多少のひび割れが生じた場合の補償のために塗布する計画があったのでひび割れに追

従できる伸縮の良い材料を伸び試験を行って選定した。また、設備関連部材についても同様の検討を行っている。

表-2 気密試験対象（室構成部位）

分類	部位、材質など	記号
躯体（RC）	一般部	一般
	打継ぎ目地	打継ぎ
	Pコン、セパレータ	セパ
塗装材	ウレタン防水材	塗材A
	水性不燃防水材	塗材B
	弾性吹付タイル	塗材C
	ゴムアスファルト系塗膜防水材	塗材D
サッシ（fix）	高気密 アルミ製	AW
	高気密 ステンレス製	SSW
ドア	高気密 ステンレス製	SSD

b. 構成部材の気密性能測定例

写真-1 にサッシの気密性能測定状況を示す。500×500 のモデルを製作し、アクリル製の気密容器を用いて気密性能を測定した。

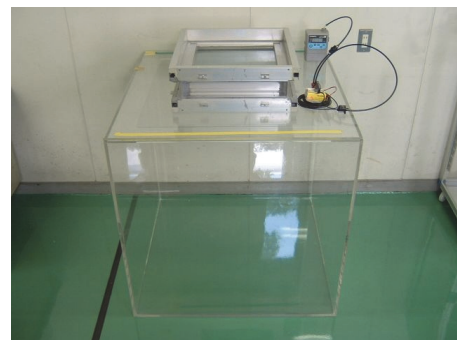


写真-1 サッシの気密試験状況

測定フローを図-11 に示す。サッシを気密容器に被せ、容器内の空気をエアポンプで吸引し圧力を所定までに低め、空気吸引停止後の圧力減衰（圧力上昇）過程から空気の密度変化を算出して減衰過程での容器内圧力と透過空気量を求める。他の部材についても同様の方法で測定を行った。試験結果の例を図-12 に示す。また、試験結果より求めた構成部材の気密性能の例を図-13 に示す。

漏洩空気量 Q と圧力 P の関係は (2) で表すことができ、透気試験で得られた圧力減衰過程より求めた。

$$Q = a \Delta P^b \text{ ----- (2)}$$

a, b : 定数（それぞれ流量係数、べき数）

Q : 漏洩空気量 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 又は $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$)

ΔP : 室内外圧力差 (Pa)

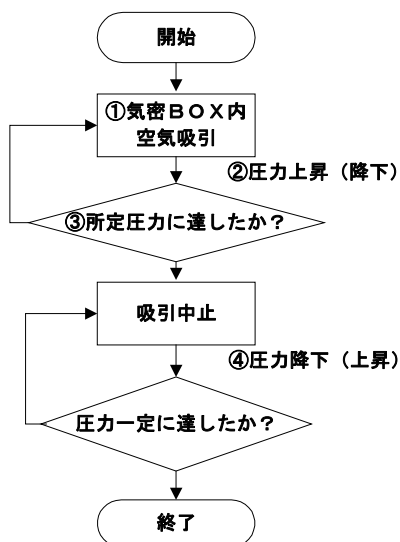


図-11 気密試験のフロー

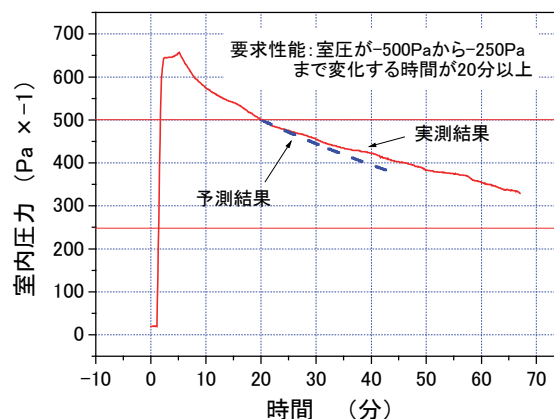


図-14 実験室の気密性能(実測と予測)

4. まとめ

流量直接指令方式の適用により従来の差圧制御方式では困難な、室間気流方向を維持しながら複数の室の換気回数を個別に変更することが可能となった。実建物において、流量直接指令方式で1室の換気回数を変更した際、室圧変動は10秒程度残るものの気流方向は常時要求された方向を維持する。また、ドア開閉時にも若干の室圧変動があるものの気流方向は常に一定に維持される。差圧制御方式を適用した室ではドア開閉時に長時間の室圧のオーバーシュート現象が確認された。

高气密性が必要な室に関して、簡易な気密測定装置によって構成部材の気密性能測定や室の気密性能の予測を行った。比較的容易に、気密性のスペックを満たすための構成部材の選定や改良が可能である。

5. おわりに

流量直接指令方式は風量が動的に変化する機能を含む用途で特に有効な制御方式であると考えられる。気密性能評価システムも加え高度機能空間のトータル技術として実物件に対応してゆきたい。

【参考文献】

- 1) 茂木他、「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」、奥村組技術研究年報 No. 27, 2001.
- 2) 山本他、「PID制御の基礎と応用」、朝倉書店、1999
- 3) Maureen Best et al. : The Laboratory Biosafety Guidelines 3rd Edition-Draft, 2001.9

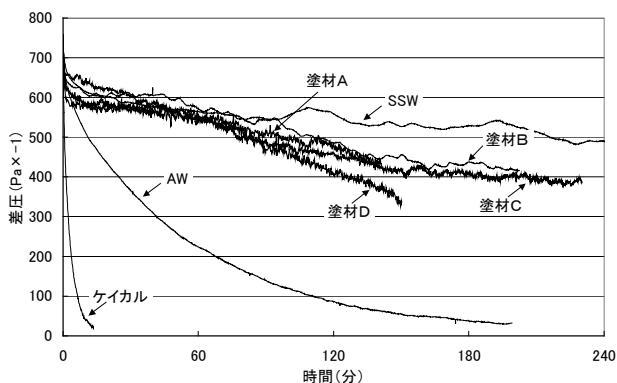


図-12 構成部材の気密試験結果(例)

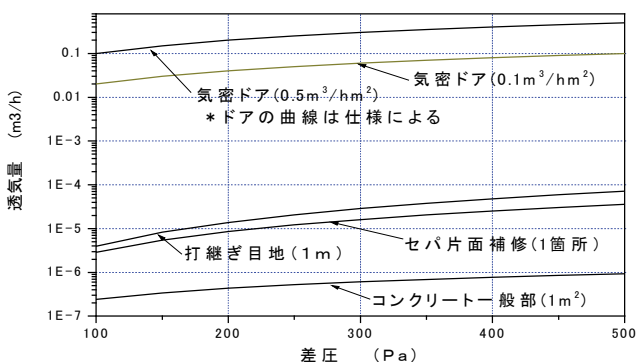


図-13 構成部材の気密性能算定結果(例)

c. 室の気密性能実測結果と解析結果

図-14 に某室の気密性能実測結果と、予測結果を示す。室の気密性能は、陰圧の500Paから250Paまで変化する時間が20分以上という要求であったが、要求を満たしている。他の室についても上記の方法で構成部材の仕様を検討し、要求性能を実現することができた。