

## 実証試験に基づく加圧防煙システムの計画手法の検証

掛川 秀史 (技術研究所) 石川 雅之 (設計本部)  
 矢代 嘉郎 (技術研究所) 中村 健 (設計本部)  
 広田 正之 (技術研究所)

### § 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景と目的

火災時の煙制御は、避難安全上重要な問題である。現在一般的な排煙設備は、居室および避難路から煙を吸引する方式である。この方式は、火災の発生した階で火災の進展に伴って、居室および廊下で排煙を行なう。しかし、気密性の高い最近のオフィスなどでは安定した給気経路を得ることができないため、排煙機の効率が低下し、計画時の排煙風量を確保できない可能性がある。また、火災進展状況に応じて各部の排煙操作を行なう必要があるが、これらを的確に操作することは難しい。さらに、使用段階におけるオフィスレイアウトの変更に伴って、防排煙計画との矛盾が発生することも考えられる。このように、現状の排煙設備では避難路を煙から長時間守る上で、維持管理上および設備計画上の課題がある。

これらの問題を解決するため、シーパンス（1991年竣工：東京都港区）では、廊下給気加圧・居室機械排煙方式の加圧防煙システムを導入した。このシステムは、火災時に避難路に対して新鮮空気を給気し、火災室との間に圧力差を与えることで避難路への煙の浸入を防ぐものである。この方式の主な利点は、避難方向から居室への安定した給気経路を確保できることと、システムを同時に起動させることにより避難路を安全に保つことができることの2点である。これによって排煙機の性能を保持し、避難路が煙に汚染されることなく長時間確保されるので、在館者の避難安全性を高めることができる。

一般に加圧防煙システムは、現状では建築基準法第38条による建設大臣の認定を必要としている。認定に際して火災時の避難状況、煙流動性状等を予測し、安全性を評価しなければならない。その手法としては、建設省総合技術開発プロジェクト（1982～1986年）の成果である「新防火設計法」<sup>1)</sup>が標準となっている。シーパンスは、新防火設計法の検討以後、加圧防煙システムとして建設省に申請された2番目の案件（1988年1月認定）であ

る注1)。

加圧防煙システムは、遮煙位置注2) および各室の給排気方法によって幾つかの方式に分類できるが<sup>2)</sup>、シーパンスにおける廊下給気加圧・居室機械排煙方式の加圧防煙システムは、他の方式と比べると加圧空気の漏気する流路が多いこと、遮煙位置の扉数が多く差圧が変動し易いことなど、特有の問題を含んでいる<sup>2)</sup>。設計に先立って、遮煙性能、差圧制御システム等に関して実験室実験で検討したが<sup>3)~5)</sup>、漏気量等の不明な点は種々の仮定を行なった上で設計している。また、新防火設計法の考え方に基づいて、シーパンスの計画時に用いた安全性評価手法である煙流動性状の予測手法（煙流動シミュレーション）は、加圧空間を対象とした場合に適用可能であるかどうかを確認されていない。また、加圧防煙システムの実施例は少なく、最近の申請システムについて実証試験の報告は少数にとどまっている<sup>6)7)</sup>。

このように、加圧防煙システムの計画手法には仮定に基づいた項目が多い。そのため、実証試験を行なって廊下給気加圧・居室機械排煙方式による加圧防煙システムの性能を検証するとともに、シーパンスの設計段階で不明であったシステム計画上の条件を明らかにする必要がある。

本研究は、加圧防煙システムの計画手法を確立するため、以下の4つの事項を目的とする。

- ・実物の建築物を用いた実証試験を通して、差圧変動が設定範囲内に収まっているかどうかを検証する。
- ・計画段階で不明であった条件（漏気量等）を測定する。

注1) 1番目の申請物件は、三井倉庫箱崎ビル（東京都中央区、設計施工：轉竹中工務店）であり、1987年9月に建設省の認定を受けている<sup>2)</sup>。なお、実証試験の結果については報告されていない。

注2) 漏煙を防ぐために設定した境界の位置を示す。通常、空間を区画する部位（シーパンスでは居室一廊下間）とし、その開口部を空気が通過することで生じる圧力差によって煙の浸入を防ぐ。居室一廊下間の他に、附室一廊下間、階段室一附室間などがある。

- ・当計画で安全性評価手法として用いた煙流動シミュレーションが加圧空間で成り立つかどうかを確認する。
- ・実証試験の結果から、今後の加圧防煙システムの計画に留意すべき事項を把握する。

## 1.2 研究の手順

前項の目的を達成するため、加圧防煙システムの実証試験を行ない、その結果に基づいて以下の手順で計画手法上の課題を検討するものである。なお、実証試験の結果の一部については既に報告を行なった<sup>8)9)</sup>。

(1)シーバンス加圧防煙システムの計画時での課題を整理し、実証試験で確認すべき項目を明らかにする。

(2)加圧防煙システムの実証試験によって計画時の課題を検討する。

(3)実証試験の結果に基づいて、計画時に使用した煙流

建物名称	シーバンス（東京都港区芝浦）
竣工年月	1991年2月
主要用途	事務所、店舗、駐車場
延べ床面積	167,807㎡
階数	地下2階、地上24階、塔屋2階
構造	地上階 鉄骨造 地階 鉄骨鉄筋コンクリート造 一部鉄筋コンクリート造
基準階面積	2,733㎡（事務所1棟当たり）
建物高さ	98.8m

表-1 シーバンス建物概要

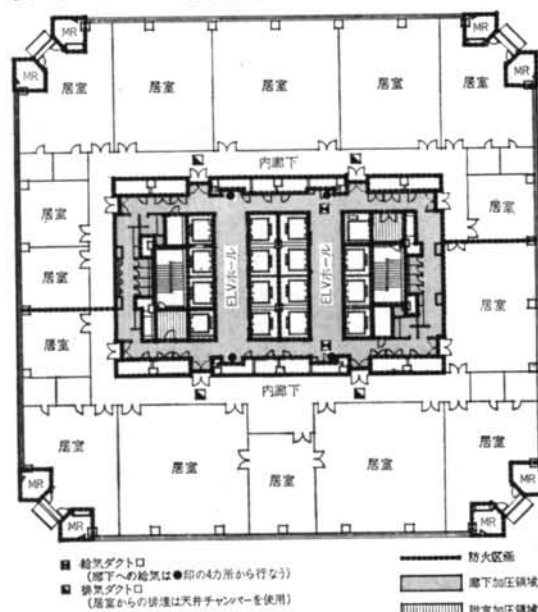


図-1 シーバンスS棟平面図（間仕切りのある場合）

動シミュレーションによる差圧の予測値と試験結果とを比較する。

(4)実証試験の結果に基づいて、加圧防煙システムの計画手法を検討する。

## § 2. シーバンスにおける加圧防煙システムの概要と計画上の課題

### 2.1 対象建築物の概要

今回、加圧防煙システムの計画を行なった建築物は、シーバンスの事務所棟2棟（N棟、S棟）である。実証試験はS棟を対象として行なった。シーバンスの建物の概要を表-1に、S棟の平面図を図-1に示す。

シーバンスにおける居室一廊下間遮煙方式加圧防煙システムの概念を図-2に、システム性能の概要を表-2に示す。差圧制御の制御範囲は、防煙に最低必要な差圧と、避難者が扉を開くことができる最大差圧より設定する。シーバンスでは、システムの計画値として差圧制御範囲を0.2～5.0mmAq{1.96～49.0Pa}とした。差圧制御

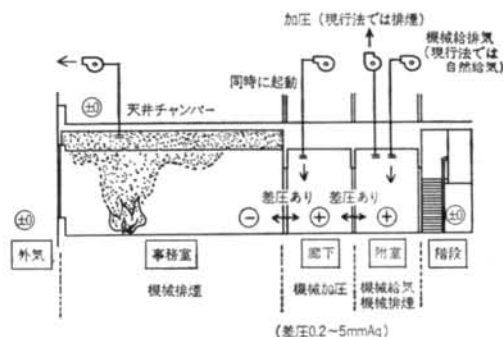


図-2 加圧防煙システムの概念

遮煙位置	居室一廊下（第1次安全区画）間
差圧制御範囲	0.2 <sup>*1)</sup> ～5.0 mmAq{1.96～49.0 Pa}
給排気風量	居室（排気） 22,140 m <sup>3</sup> /h × 2系統 廊下（給気） 25,000 m <sup>3</sup> /h × 2系統 附室（給気） 25,000 m <sup>3</sup> /h × 2系統 （排気） 21,600 m <sup>3</sup> /h × 2系統
差圧制御方法 （図-3参照）	廊下給気側 吸込みバーンの開度選択 ダンパによる風量制御 居室排気側 ダンパによる風量制御
差圧センサ設置位置	各階遮煙位置（居室一廊下間）

\*1)：居室扉2枚開放時に漏煙を防ぐために確保する必要差圧

表-2 シーバンス加圧防煙システムの概要

システムの構成を図-3に示す。

## 2.2 加圧防煙システムの計画の流れ

加圧防煙システムの計画には大きく分けて、システムの全体計画、設備計画、安全性の評価、維持管理計画の4つの段階がある。シーバンス加圧防煙システムを計画した際の流れを図-4に示す。

## 2.3 シーバンス加圧防煙システムの計画上の問題点

前項での計画の流れに従って、シーバンスにおける居室一廊下間遮煙方式による加圧防煙システムの計画上の主な問題点を整理し、次章に示す実証試験の課題を提起する。なお、ここではシーバンスの加圧防煙システムを対象としているが、これらの課題は他の加圧防煙システムにも共通した内容を含んでいる。

### 2.3.1 全体計画における課題

遮煙位置の設定は、防災計画の方針に従って決定される。シーバンスの防災計画では、煙から避難路を守るこ

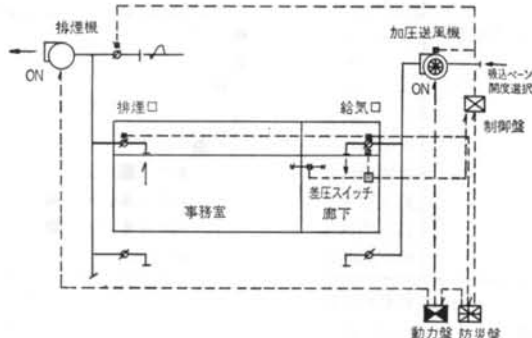


図-3 差圧制御システムの構成

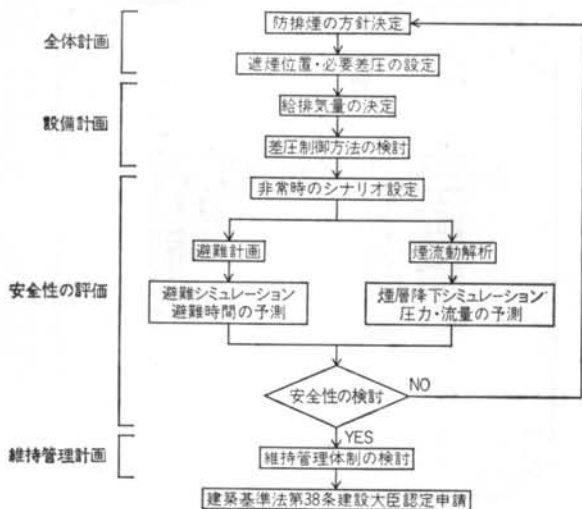


図-4 加圧防煙システムの計画の流れ

とに主眼をおき、居室一廊下間を遮煙位置として設定した。居室一廊下間遮煙方式の特徴は、差圧維持に影響する開口部が多いことである。したがって、避難開始からの一連の流れに基づいた扉の開閉状況をシステムのモードとして想定し、実証試験を通して各モードに対する差圧変動の特性を把握することが課題となっている。シーバンスにおける加圧防煙システムのモードを表-3に示す。

### 2.3.2 設備計画における課題

#### 1) 給排気風量の設定

給排気風量の設定には、遮煙位置における必要差圧を確保することと、図-2のような各部の圧力バランスを保つことが必要となる。扉前後の差圧と扉を通過する風量の関係は、以下のようになる<sup>10)</sup>。

$$\Delta p = \zeta \frac{\gamma}{2g} \left( \frac{q}{A} \right)^2 \quad \dots\dots(1)$$

$\Delta p$  : 扉前後の差圧

$q$  : 扉通過風量

$\zeta$  : 抵抗係数 (=2.6)

$\gamma$  : 空気の比重

$g$  : 重力加速度

$A$  : 開口面積

$\eta$  : 抵抗指数 (=2.0)

給排気風量を決定する際に主に問題となるのは、建築物各部位からの漏気量をどのように設定するかである。漏気量は、建築物のプランや構工法の影響を受ける各建築物固有のものであり、現状では基礎的なデータが不足している。今回の計画では隙間の実効面積 ( $A/L^{0.5}$ ) 等

モード	要素								備考
	1	2	3	4	5	6	7	8	
火災室扉	○	○	●	●	●	●	○	○	扉閉鎖失敗の可能性あり
非火災室扉	●	●	●	○	●	●	●	●	"
附室扉	●	○	○	○	○	●	○	○	開閉を繰り返す
階段室扉	●	○	○	○	○	●	○	○	"
ELV運行	運	停	停	停	停	停	運	運	
システム起動	起	起	起	起	起	起	起	起	
排気設備	起	起	起	起	起	起	起	停	排気設備停止の可能性
居室窓	●	●	●	●	●	●	●	○	窓破損の可能性あり
居室-廊下間差圧	±	±	++	±	++	++	++	++	
差圧制御装置	<	>	<	>	<	>	<	>	制御タイムラグあり

○ : 扉開放      ● : 扉閉鎖  
 ± : 差圧変動    + : 差圧0.2mmAq [1.96Pa]    ++ : 差圧増大  
 < : 風量増加    > : 風量減少

表-3 シーバンス加圧防煙システムのモード

のデータが未知の状態であったので、給排気風量を設定する場合に、安全率を大きめにとって設計を行なっている。しかし、この方法は不確定な要素が多く、合理的とはいえない。このようなことから、実際の建物を用いた実測によって漏気量の値を把握することが課題となる。

## 2) 差圧制御の応答速度

差圧制御は、防煙に必要な差圧の確保と、避難による扉閉鎖時の過大差圧による扉の開閉障害を防ぐために行なわれる。このため、制御システムは遮煙位置での差圧を設定範囲内に収め、かつ応答の速いものにならなければならない。現状では、給気ファンの回転数制御、バイパスダンパによる風量制御などの何種類かの方法を組み合わせさせて差圧制御システムを構成している場合が多い<sup>2)</sup>。制御に対する応答速度は、計画段階である程度把握しておく必要がある。今回の計画では、予め実験室実験を行ない、応答速度の速い方式を採用したが<sup>3)</sup>、実際の建築物において確認を行なうことが課題となる。

## 2.3.3 安全性の評価における課題

煙流動のシミュレーションには、複数室非定常二層ゾーンモデル<sup>注3)</sup>を用いている<sup>1)</sup>。非常時の避難シナリオ<sup>注4)</sup>に基づく居室の扉開閉条件は、避難シミュレーションから決定している。

加圧防煙計画で、煙流動性状を予測するために二層ゾーンモデルを用いる際の問題は、次の3つである。

- (1) 加圧空間内に漏煙した場合、二層流が維持されるか
- (2) 火災室内への加圧による気流が煙発生量に与える影響がないか
- (3) 各空間のモデル化 (特に、エレベータ (ELV) シャフト等の堅穴空間) をどのように行なえばよいか

二層流の維持と煙発生量は、避難安全性を検討する上で、また空間のモデル化は各空間の差圧変動を予測する上で重要な意味を持つ。このため、実証試験の結果をシミュレーションで再現できるか否かによって、加圧防煙システムにおけるシミュレーションの適用性を確認することが課題となる。

注3) 火災現象を表現する数学モデルのひとつ。火災空間を煙・ガスを含む高温の上層部と、煙・ガスを含まない低温の下層部の2つに分け、各層の温度、煙層、化学種濃度を与える方程式から、層の状態の推移を予測する。ここで、各層はそれぞれ物理・化学的に一様であると仮定している。

注4) 火災が発生した場合の避難行動と、それに伴って発生する扉の開閉状況および排煙機等システムの稼働状況を、火災発生時からの時間に従って列挙したもの。

## § 3. 加圧防煙システムの実証試験と解析

### 3.1 実証試験の方法

§2. で挙げた課題を検討するため、シーバンスで実証試験を行なった。試験条件の概要を表一4に示す。

試験の対象は、S棟の8階 (大部屋タイプ: 図一5)、および14階 (小部屋タイプ: 図一2) とした。なお、14階を対象とした試験の期間は給排気設備の調整初期であり、設計時の規定風量は確保されていなかった。

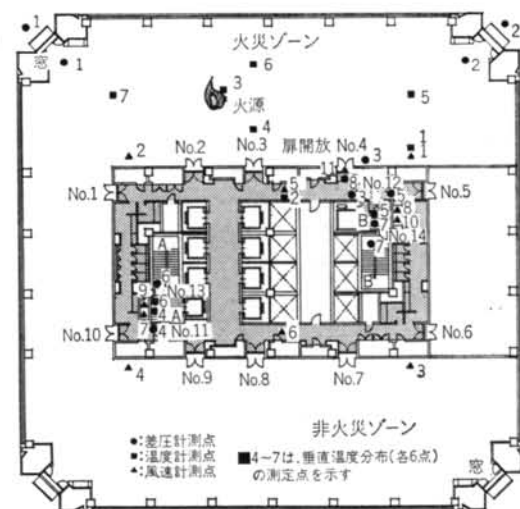
測定項目は、室間差圧、居室垂直温度分布、居室開口部 (扉番号4) の風速である。計測点の配置を図一5に示す。各データは2秒間隔で計測した。

実証試験は、表一5に示す7つのケースについて行な

実験 期 日	1990年11月28日～12月7日
実験対象階	大部屋タイプ 8階 小部屋タイプ 14階
燃 焼 条 件	メタノール 鋼製パン 0.25㎡ (約100kW) 発煙筒 2本による煙の可視化
計測項目*1)	差圧 居室一廊下 (●3) 廊下一附室 (●4, 5) 附室一階段室 (●6, 7) 居室一外気 (●1, 2) 火災室内垂直温度分布 (■3～7) 居室開口部の風速, 温度 (▲11, ■8) 廊下給気ダクト内の風速, 温度 (▲5, 6, ■2) 居室排気ダクト内の風速, 温度 (▲1～4, ■1) 附室給排気ダクトの風速 (▲7～10)

\*1): 括弧内の数字は測定点番号を示す (図一5参照)

表一4 実証試験の概要



図一5 実験対象階 (大部屋タイプ) 平面図

った。居室で火災が発生したものと仮定し、居室、附室、階段室の各扉を試験条件に従って開閉した。火災室での火源の燃焼は、ケース7のみについて行なった。竣工前であったことから、火源は小規模（約100kW）なものに限定している。

ケース6, 7は避難シナリオに基づいて扉の開閉を行なった。扉の開閉条件を表-6, 7に示す。ここでは、避難終了時に扉の開鎖に一部失敗し、防火区画を形成できなかった場合を対象としている。なお、扉開閉時間は避難シミュレーションの結果に基づいて決定したが、試験を行なった際にシミュレーションの時間とずれを生じた。表中の経過時間のうち、括弧内の値は試験時の扉開閉時間を表わしている。

### 3.2 試験結果

#### 3.2.1 システムの各モードにおける差圧変動

##### 1) 居室避難モード（ケース1）

居室の扉の開閉が遮煙位置での差圧変動に与える影響を検討する。試験結果を図-6に示す。図中の風速は、扉番号4の開口中央部分での廊下から居室へ流入する風速を示している。差圧は扉1枚開放時で約0.5mmAq{4.9Pa}、2枚開放時で約0.3mmAq{2.94Pa}、3～6枚開放時で約0.1～0.2mmAq{0.98～1.96Pa}であり、扉2枚開放時には計画時に設定した必要差圧(0.2mmAq{1.96Pa})を満たしている。扉がすべて開放されている場合でも、廊下側の正圧は保たれている。

居室避難時は火災初期の段階であり、煙層下端が居室扉上部まで降下していないと考えられることから、漏煙の可能性は少ないといえる。

##### 2) 階避難モード（ケース2）

避難者が居室から廊下への避難を終え、附室を経由して階段室へ避難する（階避難という）場合を想定したときの差圧変動を図-7に示す。遮煙位置での最大差圧は約4mmAq{39.2Pa}で、差圧制御装置は作動していない。附室の扉のみを開放した場合は、遮煙位置の差圧に殆ど

影響しない。遮煙位置の差圧の低下は、附室、階段室とともに開放した場合に大きく、附室1つで約1mmAq{9.8Pa}、また附室2つを同時に開放した場合で約1.5mmAq{14.7Pa}である。遮煙位置での差圧の低下に与える影響はあまりみられないが、これは附室で給排気を行なっているためと考えられる。

##### 3) 盛期火災モード（居室自然排煙）（ケース3, 4）

盛期火災では、火災熱で防火ダンパが作動することにより機械排煙が停止する。しかし、排煙が行なわれないため居室の温度が上昇し、窓が破損するものと考えられる。この場合、居室部分では窓を通して外気に直接排煙される。当建物では、4隅にそれぞれ1.87㎡の窓が外気に開放できる構造となっている。これらの窓を開放し、居室部分を自然排煙とした場合（ケース3）と、機械排煙の場合（ケース4）を比較した。

図-8～9に、自然排煙、機械排煙のそれぞれの場合の試験結果を示す。これより、自然排煙、機械排煙の両者の結果に違いはみられず、居室の扉2枚を開放した状態で附室、階段室のすべての扉を開放しても約0.2mmAq{1.96Pa}を保っており、防煙には充分であると判断できる。隣接のビルや、上階に延焼しないように対策すれば、自然排煙によって排気する方法も有効であると考えられる。ただし、風向・風速による影響などの要素が加わるため、外気等の環境条件に影響され易いシステムになる。

##### 4) 消防活動モード（非常用ELV運行）（ケース5）

消防活動時を想定し、システムを稼働させて附室扉と居室扉1カ所を開放し、非常用ELVを運行した。居室一廊下間での差圧変動を図-10に示す。

差圧は約0.4mmAq{3.92Pa}を中心に変動している。ELVの扉が開いた場合、瞬間的に廊下-附室間の差圧は0.2mmAq{1.96Pa}程度に下がるが、設定値以下になることはない。消防活動においてELVを運行しても差圧に与える影響は殆どなく、廊下を安全な消防活動のスペースとして利用できるものと考えられる。

ケース名	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
実証試験の特徴	居室避難モード	階避難モード	自然排煙	ケース3との比較 機械排煙	非常用ELV 運行	避難シナリオ	避難シナリオ
対象階	8F大部屋	8F大部屋	8F大部屋	8F大部屋	8F大部屋	8F大部屋	14F小部屋
燃焼	なし	なし	なし	なし	なし	あり	なし
安全区画	1カ所開放 ～全閉	1カ所開放	1カ所開放	1カ所開放	1カ所開放	全閉～ 1カ所開放	全閉～ 1カ所開放
居室窓	閉鎖	閉鎖	開放	閉鎖	閉鎖	閉鎖	閉鎖
非常用ELV	停止	停止	停止	停止	運行	停止	停止

表-5 実証試験のケース

経過時間*1)	想定事項	試験動作	扉開閉状態														
			事務室一廊下										廊下一 附室		附室一 階段		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
0:00		排煙ダンバ開, ファン起動	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0:40(0:50)	居室避難開始(火災ゾーン)	居室扉開放	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0:50(1:00)	階避難開始 (火災ゾーン側)	廊下出口扉開放, 附室出口扉開放	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1:00(1:25)	居室避難終了(火災ゾーン)	居室扉閉鎖 (1カ所故障)	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○
1:20(1:50)	居室避難開始(非火災ゾーン)	居室扉開放	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1:30(2:00)	階避難開始 (非火災ゾーン側)	廊下出口扉開放, 附室出口扉開放	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1:40(2:20)	居室避難終了(非火災ゾーン)	居室扉閉鎖	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2:15(2:35)	階避難終了 (火災ゾーン側)	廊下出口扉閉鎖	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2:30(2:50)	階避難終了 (火災ゾーン側)	附室出口扉閉鎖	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2:55(3:25)	階避難終了 (非火災ゾーン側)	廊下出口扉閉鎖	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3:10(3:40)	階避難終了 (非火災ゾーン側)	附室出口扉閉鎖	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3:30(4:30)		試験終了	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○: 防火戸・ガラス戸開放, ●: 防火戸・ガラス戸閉鎖

\*1): 括弧内の時間は実験時に実際に行なった扉開閉時間を示す

表一6 ケース6 (大部屋タイプ) における扉開閉条件

経過時間*1)	想定事項	試験動作	扉開閉状態														
			事務室一廊下*2)										廊下一 附室		附室一 階段		
			1	2	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14			
0:00		排煙ダンバ開, ファン起動	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0:05	居室避難開始(火災ゾーン)	居室扉開放	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0:10(0:15)	階避難開始 (火災ゾーン側)	廊下出口扉開放, 附室出口扉開放	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0:35	居室避難開始(非火災ゾーン)	居室扉開放	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0:40	階避難開始 (非火災ゾーン側)	廊下出口扉開放, 附室出口扉開放	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1:10	居室避難終了(非火災ゾーン)	居室扉閉鎖	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1:45(1:40)	居室避難終了(火災ゾーン)	居室扉閉鎖 (1カ所故障)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3:10	階避難終了 (非火災ゾーン側)	廊下出口扉閉鎖	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3:40	階避難終了 (火災ゾーン側)	廊下出口扉閉鎖	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4:10(4:00)	階避難終了 (非火災ゾーン側)	附室出口扉閉鎖	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4:40(4:00)	階避難終了 (火災ゾーン側)	附室出口扉閉鎖	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5:00		試験終了	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○: 防火戸・ガラス戸開放, ●: 防火戸・ガラス戸閉鎖

\*1): 括弧内の時間は実験時に実際に行なった扉開閉時間を示す

\*2): 小部屋タイプのプランでは扉3, 扉8がなく, 防火壁で区画されている

表一7 ケース7 (小部屋タイプ) における扉開閉条件

### 3.2.2 避難シナリオに伴う安全性の検証(ケース6, 7)

ケース6, 7における差圧変動の試験結果を図一11, 12に示す。ケース6では, 火災室避難と同時に給気ファンが起動されるため, 火災室避難の初期段階ではまだ風量が定格値に至らず, 廊下側が負圧となっている。しかし, 火災室避難の段階は出火直後と考えられ, 煙が居室開口部まで降下していないため, 火災室から廊下に漏煙する可能性は少ない。

非火災室避難の段階では既にシステムが安定しているため, 居室扉をすべて開放しても廊下側が負圧になることはなく, 約0.05 mmAq{0.49 Pa}を確保している。

ケース7は, 小部屋に間仕切られているぶん, ケース6に比べて避難による扉の開閉が複雑になる。しかし, 差圧変動の傾向は大部屋の場合とほぼ変わらない。ただし, ケース7の試験を行なったときは給排気設備やダンパの調整初期であり, ケース6と比べると全体的に差圧

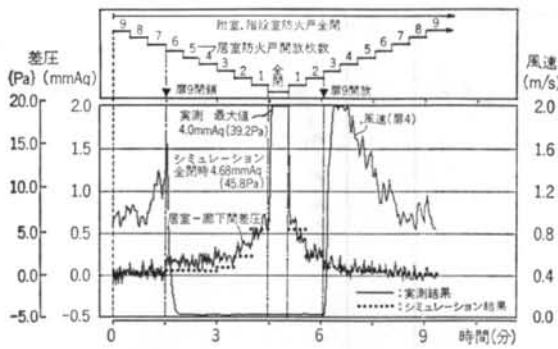


図-6 差圧変動(ケース1:居室扉閉鎖)

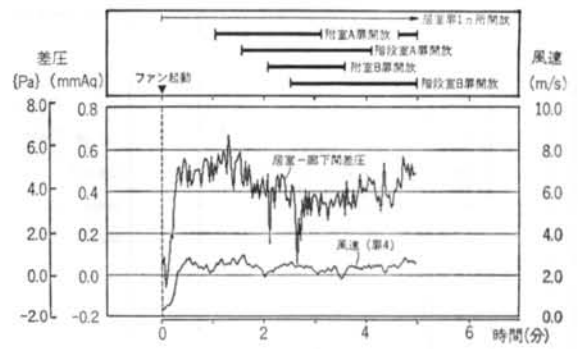


図-9 差圧変動(ケース4;機械排煙)

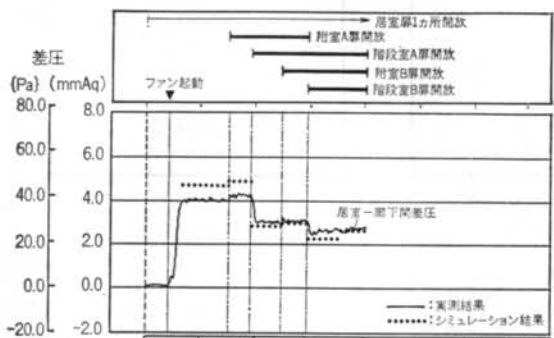


図-7 差圧変動(ケース2;附室,階段室扉閉鎖)

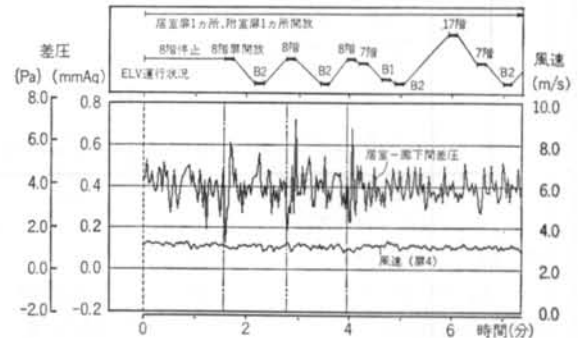


図-10 差圧変動(ケース5;非常用ELV運行)

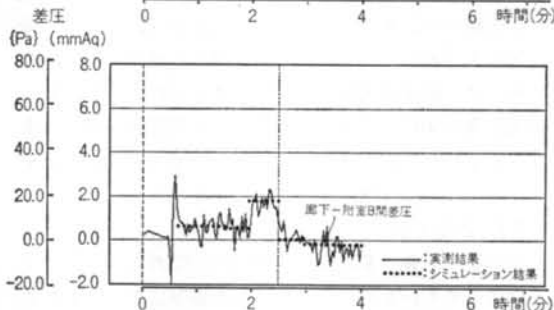


図-8 差圧変動(ケース3;自然排煙)

が低くなっている。

次に、ケース6について煙層温度に注目すると(図-13)、火源近傍では明らかに煙と空気が二層に分かれて

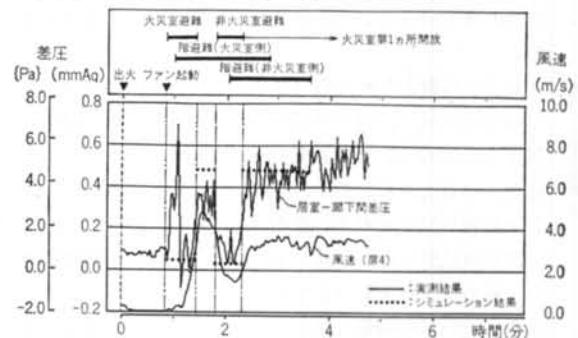


図-11 差圧変動(ケース6;大部屋避難シナリオ)

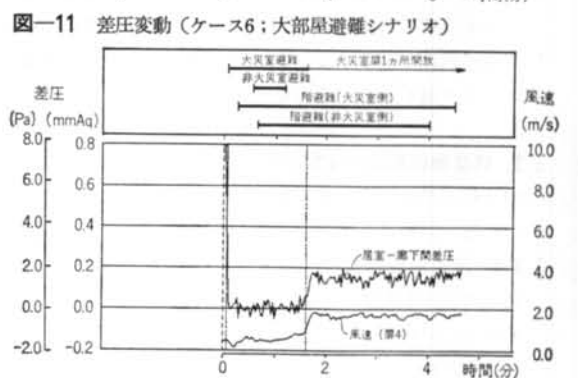


図-12 差圧変動(ケース7;小部屋避難シナリオ)

保たれていると考えられる。通常、安全性の評価は煙が

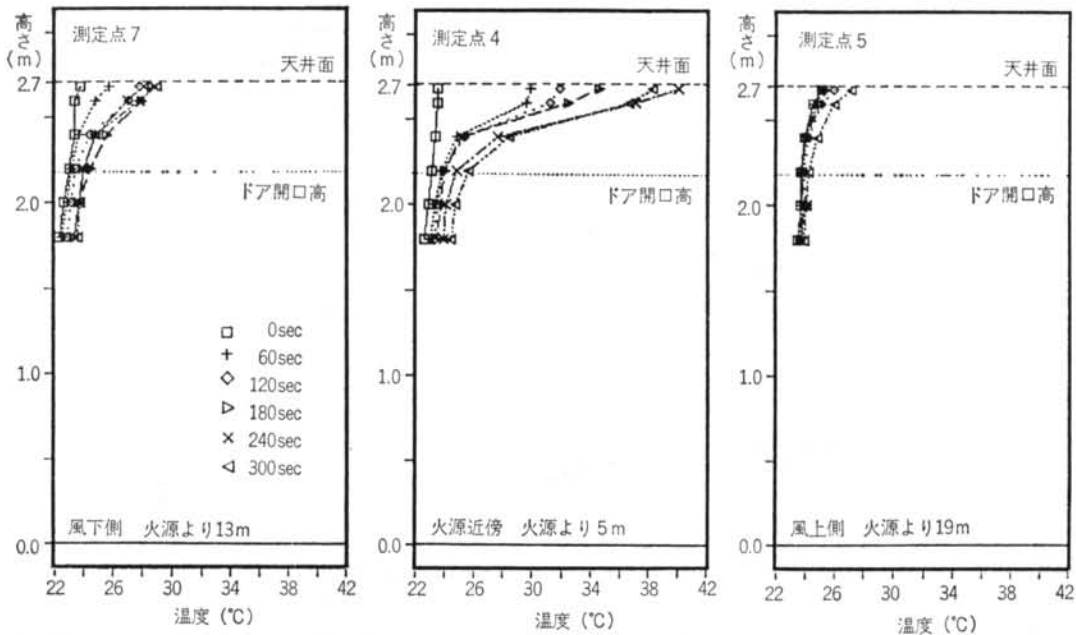


図-13 居室温度分布(ケース6:大部屋避難シナリオ)

二層流をなしていると仮定して煙流動を予測し、居室の扉上部の高さにまで煙が降下していなければ避難上問題がないとしている。試験結果から、煙層は開口部上端の2.2mまで降りておらず、避難上問題がないと考えられる。

火源から離れた計測点(計測点5(19m), 7(13m))では温度が低く、煙層は必ずしも明確ではない。特に、風上(計測点5)では温度上昇が小さく、煙が風下に流されていることが分かる。これは、火源が小さかったことが影響していると考えられる。

今回の試験では、火源が小さく、安定した煙層のできる一般の火災状況を示しているとはいえない。しかし、火源に近い扉が避難に使用されることは少ないこと、また火災室避難の段階では多くの扉が同時に開放されるので扉通過風速が減少することから、廊下からの流入空気によって煙層が乱される可能性は少ないと考えられる。

### 3.3 建築物各部位の隙間の測定

建築物各部位からの漏気量を把握するため、シーバンスの8階を対象にして測定を行なった。

#### 3.3.1 測定対象部位

測定対象とした部位は、次のとおりである。

- ・居室防火戸
- ・居室ガラス戸
- ・居室防火戸・居室ガラス戸(2重の区画の場合)
- ・乗用ELVシャフト

- ・居室廻り
- ・廊下廻り

居室廻りは、居室の天井・床・壁自体と、これらの接合部およびカーテンウォール廻り等から構成される。廊下廻りは、廊下の天井・床・壁自体とこれらの接合部、および乗用ELV以外のシャフトと附室防火戸等から構成される。なお、非常用ELV扉、附室入口扉、階段室入口扉については測定を行っていない。

#### 3.3.2 測定方法

測定条件を表-8に示す。部位の隙間の大きさは、室内に給気するかあるいは室内からの排気によって生じる室内外の圧力差と、各部位の漏気量との関係から求められる。ただし、給気風量あるいは排気風量は漏気量と等しいものと仮定している。

部位の隙間の大きさは、同一部位でも給気と排気によって異なるので、加圧防煙時における空気の流れを考慮し、部位によって廊下に給気を行なう場合と、居室から排気を行なう場合とに分けて測定を行なった。

廊下に給気する場合は、廊下以外の空間と外気との圧力差をなくすため扉を開放した。また、居室から排気する場合にも同様な理由から、居室以外の空間の扉を開放した。

測定項目は、廊下一居室間の圧力差、廊下給気ダクト内の風速と温度、居室排気ダクト内の風速と温度である。なお、風量は段階的に調整することができなかったため、一定のまま測定を行なった。



ケース	測定対象部位								給気・排気	扉開放設定
	居室防火戸	居室ガラス戸	居室防火戸とガラス戸(2重区画)	乗用ELV扉(シャフト)	他シャフト	廊下の天井・壁・トイレ換気口等	附室防火戸	居室の天井・壁・カーテンウォール等		
1	—	—	○	○	○	○	○	—	廊下給気	8 F ・居室窓 ・階段室入口 9 F ・居室窓 ・居室出口扉 ・附室入口扉 ・階段室入口
2	—	○	—	○	○	○	○	—		
3	○	—	—	○	○	○	○	—		
4	シール	シール	シール	○	○	○	○	—		
5	シール	シール	シール	シール	○	○	○	—		
6	—	—	○	—	—	—	—	○	居室排気	8 F ・附室入口扉 ・階段室入口 9 Fも同じ
7	シール	シール	シール	—	—	—	—	○		

○：測定値にその部位の隙間の大きさが含まれることを示す

シール：部位の隙間をシールして完全に密閉する。測定値にその部位の隙間の大きさは含まれない

—：測定値にその部位の隙間の大きさが含まれないことを示す

表—8 隙間の測定条件

### 3.3.3 測定結果

一般に部位の隙間の大きさは、単純なオリフィス型の開口の大きさ（実効面積という）と仮定すると、次式から求められる。

$$\alpha A = q / \{(2g/\gamma)\Delta p\}^{0.5} \quad \dots\dots(2)$$

$\alpha A$ ：部位の実効面積

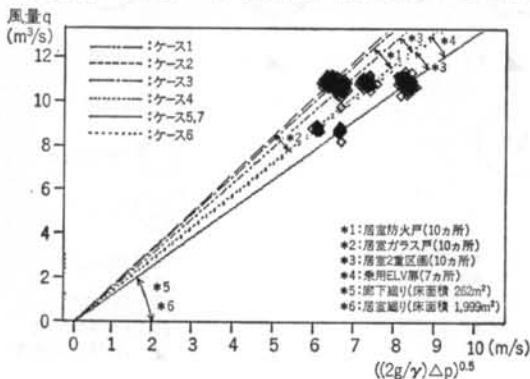
$q$ ：通過風量

$\Delta p$ ：開口前後の圧力差

$\gamma$ ：空気の比重

$g$ ：重力加速度

測定値をもとに、X軸に  $\{(2g/\gamma)\Delta p\}^{0.5}$ 、Y軸に  $q$  をとった結果を図—14に示す。風量を変えて行なった既往の実測例によると<sup>12)13)</sup>、各風量とそれに対する  $\Delta p$  は式



図—14 ケース毎の実効隙間面積

(2)でほぼ近似できる。すなわち、 $\alpha A$  は風量に係わらず一定であると考えられる。したがって、原点を通る直線の傾きから  $\alpha A$  を求めた。各部位に対する測定結果を表—9に示す。

測定結果より、次のことが分かる。

- ・居室廻り、廊下廻りに対する値が他に比べてかなり大きい。これは、測定が建築物の施工中であったことが影響しているとも考えられる。
- ・居室の扉が2重の場合は、1重の場合に比べてかなり漏気量が減じる。
- ・乗用ELVの扉の隙間の値は、8階と他階のELV扉の隙間が合成されたものと考えられる。

居室防火戸 (4.62㎡/カ所)	0.020㎡/カ所
居室ガラス戸 (3.48㎡/カ所)	0.023㎡/カ所
居室2重区画*1)	0.013㎡/カ所
乗用ELV扉 (2.75㎡/カ所)	0.023㎡/カ所
廊下廻り*2) (床面積 262㎡)	1.31㎡
居室廻り*3) (床面積1999㎡)	1.31㎡

\*1)：居室の防火戸とガラス戸を同時に閉めた場合を指す

\*2)：乗用ELV扉・居室扉以外の部分を指す。PS、EPS等のシャフト、機械室等のこと

\*3)：居室出入口以外の部分を指す。天井・床・壁・カーテンウォール等のこと

表—9 部位の隙間の実効面積

### 3.4 実証試験の結果に基づく煙流動シミュレーションの有効性の確認

煙流動シミュレーションの有効性を確認するため §2 で示したシステムの各モードに対して、建築物各部位の漏気量の測定結果を用いて煙流動シミュレーションを行ない、実証試験における差圧変動の結果と比較する。

#### 3.4.1 シミュレーションの条件

各モードに対するシミュレーションの条件を表-10に示す。また、シミュレーションを行なう際の各空間の構成を図-15に示す。各モードのシミュレーションは、以下の前提条件に従っている。

- ・居室避難モードでの附室の給排気はないものとする。
- ・階避難モードの階段室出口扉は外気に開放されているものとする。
- ・外気の風速は0 m/s とする。また、室温と外気温度は同じ(20℃)とする。

・間仕切りで分割された小部屋の漏気量は、大部屋での実測値を居室面積比で割り振った。

・階避難モードにおける附室の排気風量は、附室の機械給気を行わずに給気経路を確保した場合の実験から求めた。また、同モードにおける附室の給気風量は、附室から廊下、階段室、非常用ELV への個々の流出量を実験結果の圧力差をもとにして求め、これらを附室の排気風量に加算して設定した。

空間のモデル化は、次の仮定に基づいて行なった。

- ・火災階の各空間、堅穴空間、外気を対象として空間をモデル化する。
- ・非火災階は、堅穴空間から外気までの居室部分の隙間抵抗を合成して一つの隙間とする。

空間構成上の仮定は、次の理由に基づいている。一般的に、火災時には建築物内の他の部分に比較して、特に火災階各空間および堅穴空間に煙あるいは空気の優勢な流れが形成されると考えられる。また、非火災階における堅穴空間と外気とのつながりについては、

モード	空間構成	扉開閉	給気・排気	外気	火源
居室避難	火災階の各空間と堅穴空間(図-15参照)	実験条件と同様	・廊下に給気 ・居室から排気 ・附室の給排気なし	風速 0 (m/s) 温度 20 (℃)	なし
階避難			・廊下に給気 ・居室から排気 ・附室の給排気あり		
避難シナリオ					

注) 部位の隙間は実測値を使用した。ただし、附室入口扉、階段室入口扉は居室防火戸の実測値を用いた。また、非常用ELV 扉は乗用ELV 扉の実測値をもとに単位面積当たりの流量係数を与えた

表-10 シミュレーションの条件

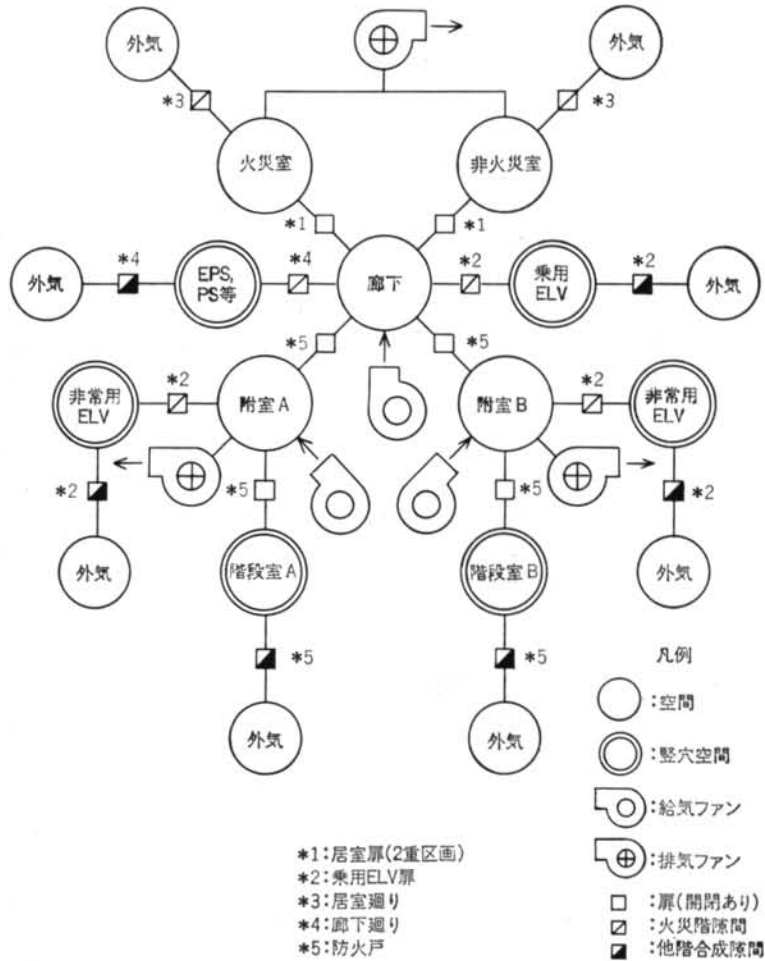


図-15 空間構成図

非火災階の流路がかなり複雑で、合成抵抗による近似に多少の無理がある場合でも、火災階の煙流動性状を満足できる範囲で予測できることが分かっている<sup>14)</sup>。加圧防煙時には強制的に流れが作られるので、合成抵抗による近似によって通常の排煙システムを用いた場合よりも、さらに満足する結果が得られるものと考えられる。

### 3.4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図-6, 7, 11に示す。各モードに対して、扉が開放され圧力差が小さい状態では、実証試験の結果とシミュレーション結果がよく一致している。しかし、扉が閉鎖され圧力差が高くなると、試験結果よりもシミュレーションの値の方が2割程度高くなっている。この理由は、シミュレーションでは室内と外気との温度差がないものとしたが、実際には多少の温度差があり、居室一廊下間の扉全閉時にその影響が大きくなるからであると考えられる。廊下一居室間の扉が開放されている場合は、居室への機械給気による流れが主流であり、煙突効果の影響は相対的に小さくなる。扉を閉鎖した場合には居室への流れが生じず、シャフトを通じて温度差による煙突効果の影響をより大きく受ける結果になると考えられる。

## § 4. 実証試験の結果に関する考察

### 4.1 システムの全体計画からみた考察

実証試験の結果、加圧防煙システムの各モードに対して、差圧変動が所定の設定差圧範囲内に収まっていること、また二層流が維持され、避難中も廊下に漏煙しないことが分かった。扉の数が多くても、各種のモードに対する検討結果に基づいて漏気量と風量を設定すれば、遮煙に対して問題のないことも分かった。これらの結果より、火災室避難から消防活動までのモードの変化に対して計画した性能が得られたものと判断できる。

### 4.2 設備計画からみた考察

#### 4.2.1 廊下給気風量の再検討

計画段階では建築物各部位からの漏気量が不明であったため、安全率を見込んで給排気風量を設定した。これに対し、今回の実験より建築物各部位の隙間実効面積のデータを得ることができた。これらのデータを用いて、遮煙位置での必要差圧を得るために必要な給排気風量の再検討を行なうと、以下ようになる。

居室の防火戸(2.1<sup>m</sup>×2.2<sup>m</sup>)が2枚開放されていると仮定すると、廊下給気風量、居室への流入量、隙間か

らの漏気量の関係は、

$$q_b = q_{b1} + q_{b2} \quad \dots\dots(3)$$

$q_b$  : 廊下給気風量

$q_{b1}$  : 居室への流入量

$q_{b2}$  : 隙間からの漏気量

また、式(1), (2)より、

$$q_{b1} = (A'/\zeta^{0.5} + A_1)(2g\Delta p'/\gamma)^{0.5} \quad \dots\dots(4)$$

$$q_{b2} = (A_2 + A_3)(2g\Delta p''/\gamma)^{0.5} \quad \dots\dots(5)$$

$A'$  : 防火戸開放面積

$A_1$  : 閉鎖防火戸の隙間実効面積

$A_2$  : ELV 扉の隙間実効面積

$A_3$  : 廊下廻りの隙間実効面積

$\Delta p'$  : 居室一廊下間の差圧

$\Delta p''$  : 廊下シャフト間の差圧

ここで、 $\Delta p' = \Delta p'' (= 0.2 \text{ mmAq} [1.96 \text{ Pa}])$ と仮定し風量を算出すると、 $q_b$ は47,533<sup>m</sup>³/hとなる。また、排気風量 $q_e$ は居室・廊下間の扉通過風量 $q_{b1}$ と等しいと仮定すると、37,962<sup>m</sup>³/hとなる。計画時の風量と比較すると、給気風量にはそれほど差がないが、排気風量は約6,000<sup>m</sup>³/h少なくなっている。実際に必要な排気風量は、この値に外気から居室への隙間を通した流入量の分を加える必要がある。なお、外気と居室間の差圧を設定するのが困難なため、今回はこの分の流入量を算出できなかったが、この流入量が加われば計画時との差はさらに小さくなると考えられる。

#### 4.2.2 差圧変動

実証試験においては、風量制御システムが作動する域には到達せず(約4<sup>mmAq</sup>[39.2 Pa])、設定差圧範囲内で変動した。これは、実証試験を行なったのが建築物の施工途中であり、給排気設備の調整中であつたことが影響している。このため、風量が設計値よりもやや小さかったことを考慮すると、実際使用する段階では制御装置が働く可能性はある。なお、システムの計画段階で実験室実験を行なった結果、給気、排気ともに風量制御することによって比較的速い応答速度(約15秒)を得られることが分かっている<sup>15)</sup>。

### 4.3 安全性の評価からみた考察

§2.で挙げた二層ゾーンモデルを用いる場合の課題に対して、実証試験の結果より加圧空間内でも二層流が保たれていることが確認できた。

また、シミュレーション結果から火災階、堅穴空間、外気をシミュレーションの対象とし、非火災階は隙間の流路としての抵抗を合成して空間のモデル化を行なえば差圧変動をシミュレーションできることが確認された。

なお、火災室内の気流が煙発生量に与える影響は、当実証試験では認められなかった。しかし、実験室実験の結果から小さい居室では、加圧空間内では空気の巻き込み量が1~2倍になることが分かっている<sup>4)</sup>。

以上から、加圧防煙システムを計画する際に二層ゾーンモデルを用いることで差圧変動等を予測できることが分かった。

## § 5. 加圧防煙システムの計画上の留意点

以上の検討結果を踏まえ、加圧防煙システムの今後の展開に対する計画上の留意すべき主な事項を検討する。

### 5.1 全体計画からみた留意点

シーバンスの実証試験を通して、居室一廊下間遮煙方式の加圧防煙システムについて、計画上の課題を検討した。ここでは、これらの検討結果を参考にして、遮煙位置の違うシステムについて問題点を整理する。

日本における実施例は、廊下一附室間の遮煙方式が一般的である<sup>2)</sup>。この方式は、居室一廊下間遮煙方式に比べて加圧空間が小規模に限定されるため漏気量の影響が小さく、設計上問題となる不確定な要因は比較的少ないといえる。ただし、階避難が行なわれる場合は附室と階段室の扉がほぼ同時に開放されるため、実証試験の結果(ケース2)から推測すると大部分の加圧空気が階段室側へ逃げる可能性がある。このような状況を防ぐためには、廊下側の排煙口の配置を適切に行なって、附室から廊下への空気の流れを作る必要がある。

階段室を加圧し、附室一階段室間で遮煙を行なう方式は米・加で一般的に用いられているが、日本では実施例が少ない。この方式の持つ問題点は次のとおりである。

- ・遮煙位置での差圧が居室扉の開閉の影響を受け易い。
- ・煙突効果の影響が大きい。
- ・階段室内の適正な圧力分布を得るため、建築物の形態に合った給排気方法を検討する必要がある。

今回の試験結果からは、附室一階段室間遮煙方式の問題点を検討することができなかつた。今後、この方式の開発を行なう際には堅穴空間内の差圧分布や差圧制御方法などについて、さらに検討する必要がある。

### 5.2 設備計画からみた留意点

#### 5.2.1 給気風量に対する煙突効果の影響

実証試験では、建築物各部位からの漏気量を測定したが、漏気量を考慮して設計する場合、煙突効果が重要と

なる。ここでは、煙突効果が給気風量に与える影響を検討する。

加圧空間内で煙突効果を考慮する必要のあるものは、ELV シャフト、階段室である。§ 3. で示した隙間実効面積には「廊下廻り」があるが、これらは煙突効果を考慮する必要はない。なぜなら、これらを通する漏気量は主に他の階へ逃げるものと想定されるからである。

ELV シャフト、階段室での煙突効果は扉が閉鎖された状態であれば、中性帯が中央高さ部分にあると考えられる。高さ  $h$  における煙突効果による差圧  $\Delta p_t$  は、次のようになる。

$$\Delta p_t = \Delta \gamma (h - H/2) \quad \dots\dots(6)$$

$\Delta p_t$ : 煙突効果によって生じる差圧

$\Delta \gamma$ : 堅穴空間と加圧空間の空気の比重差

$H$ : 建築物高さ

式(6)より、煙突効果による漏気量が最も大きくなるのは最上階であることが分かる。

この考えをシーバンスの加圧防煙システムに適用し、漏気量の違いを検討する。温度差による煙突効果は冬期の方が大きいので、廊下温度を20℃、シャフト内温度を0℃と仮定する。また、建築物の高さを100mとすると、最上階で煙突効果によって生じる差圧は式(6)より、4.5 mmAq {44.1 Pa} で、この分だけ室内側の圧力が高くなる。

煙突効果によって増加する廊下給気風量  $\Delta q_0$  は、ELV シャフトからの漏気のみを考慮すればよいから、

$$\Delta q_0 = A_2 (2 g \Delta p_t / \gamma)^{0.5} \quad \dots\dots(7)$$

$\Delta q_0$ : 廊下給気風量の増加分

$A_2$ : ELV シャフト扉の相当開口面積

であり、 $\Delta p_t$  を4.5 mmAq {44.1 Pa} とすると、 $\Delta q_0$  は4,968 m<sup>3</sup>/hとなる。これは、§ 4. で求めた廊下給気風量全体の約1割を占めている。超高層建築物に対して加圧防煙システムを計画する場合は、この影響がさらに大きくなると考えられる。この結果を予測して、加圧風量の計画を行なう必要がある。

#### 5.2.2 圧力センサの設置位置

シーバンスのシステムの特徴のひとつは、現在までに申請された他の加圧防煙システムと比べると、圧力センサの設置位置に大きな違いがあることである。シーバンスでは、各階の遮煙位置にセンサを設置しているが、最近の申請システムではセンサを効率よく配置するために建築物全体を幾つかのゾーンに分割し、給気ダクト内と非加圧空間(外気、機械室など)との差圧をとる方式が一般的となっている。

圧力センサの設置位置に関する計画上の主な問題点は、次の2つである。

### (1) 煙突効果の影響

建築物を高さ方向に幾つかのゾーンに分割し、圧力センサをゾーン毎に設置する場合、高さの違いによって生じる給気ダクト内の煙突効果の影響から、圧力制御の働く差圧が各階で異なる。このため、圧力センサの差圧設定値を決定する際に各階での最大差圧を予測して、それが許容範囲内に収まるように計画する必要がある。

実証試験では、風量、漏気量の関係から差圧制御システムが作動しなかった。実際の建築物では漏気量の予測が難しく、煙突効果を含めて差圧制御範囲を決定しなければならない。これらの点より、センサをゾーンで代表させる方式は、センサの作動設定範囲を決める際に不確定な要素が多いため問題があるものと考えられる。

### (2) 居室の区画の影響

居室一廊下遮煙方式では、居室が同一階で2つ以上に防火区画されている場合、加圧空間と居室の差圧は扉の開閉状況によって各居室毎に異なるため、遮煙位置での差圧を1つのセンサで代表させるのは難しい。

ケーススタディとして、シーバンスを例に同一階で区画されたものを対象として、一方の居室(B)の扉を全閉とし、残りの居室(A)の扉を順次開放した場合の差圧をシミュレーションした。また、センサをダクト内と外気で感知する場合を考え、廊下と外気との差圧も算出した。ここでは火源は設定せず、扉の開閉による圧力変動のみを考慮した。

シミュレーション結果を表-11に示す。 $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$ 、 $\Delta p_3$ を比較すると、それぞれの値を一つのセンサで代表してモニタすることはできないことが分かる。したがって、同一平面内で居室を区画する場合はセンサを区画毎に設けるなど、設置位置に注意をする必要があると思われる。

### 5.3 安全性の評価からみた留意点

§3.、§4.の検討結果より、各部位からの漏気量を前提条件として与え、空間をモデル化することで加圧空間

居室A扉 開閉条件	$\Delta p_1$		$\Delta p_2$		$\Delta p_3$	
	居室A一廊下間 (mmAq)	[Pa]	居室B一廊下間 (mmAq)	[Pa]	廊下一外気間 (mmAq)	[Pa]
居室A扉全閉	4.62	45.3	4.62	45.3	3.27	32.0
扉1カ所開放	0.39	3.82	2.24	22.0	0.76	7.45
扉2カ所開放	0.11	1.08	2.14	21.0	0.65	6.37
扉3カ所開放	0.05	0.49	2.12	20.8	0.62	6.08
扉4カ所開放	0.03	0.29	2.11	20.7	0.62	6.08
居室A扉全開	0.02	0.20	2.12	20.8	0.62	6.08

表-11 居室の区画が差圧に与える影響

での差圧変動を予測できることが分かった。附室加圧の方式では、加圧空間から漏気するルートが廊下加圧方式に比べて少ないため、漏気量の影響は小さくなると考えられる。今後は、異なる建築物の形態に対してこれらのデータを集積することが課題となる。

なお、§3.におけるシミュレーションと実証試験の結果の比較より、差圧変動をシミュレーションする場合、外気条件(温度、風速)が差圧の予測結果に大きな影響を与えることが分かった。超高層建築物では、堅穴空間において温度差による煙突効果の影響が大きい。また、風の影響も大きいので、過去の気象データ等をもとにして建物の立地に合った外気条件を設定すべきである。

## §6. おわりに

シーバンスの居室一廊下間遮煙方式加圧防煙システムの実証試験を行ない、システムの計画手法上の課題について検討を行なった。結果をまとめると、以下のようになる。

- ・火災発生から消防活動までのシステムの各モードに対して、差圧変動は設定範囲内に収まり、システムが計画時の性能を満たすことが検証された。
- ・計画段階で不明であった建築物各部位の隙間実効面積を測定した。このデータを用いて、加圧空間での建築物各部位からの漏気量の度合いを把握することができた。
- ・実証試験の結果より、煙流動シミュレーションを加圧空間に対して適用できることが確認された。また、建築物各部位からの漏気量のデータを与えれば、差圧変動を予測できることが確認された。

さらに、今後加圧防煙システムを設計する上での留意点として、以下に示す2つの事項が明らかとなった。

- ・煙突効果の影響を考慮した上で、給排気風量、建築物各部位からの漏気量、センサ設置位置等の計画条件を設定する必要がある。
- ・煙流動シミュレーションを行なう場合、堅穴空間のモデル化、外気条件の設定を適切に行なう必要がある。今回は、一つの方式のみを対象として計画手法の検討を行なった。今後、さらに合理的で整合のとれた加圧防煙システムの計画手法を確立するためには、他の方式のシステムを対象として実証試験を行ない、設計の基礎となるデータを蓄積していく必要がある。

なお、当加圧防煙システムはNS設計室、ならびにNTT都市開発㈱と共同で計画、実施したものである。

当研究は、システムの計画および実証試験の企画を矢代、設備設計を石川、中村、煙流動解析および実証試験

の実施を広田、実証試験の実施を掛川が担当し、本論文は掛川を中心にして作成した。

#### <参考文献>

- 1) 建設省大臣官房技術調査部監修：“建築物の総合防火設計法” 日本建築センター（1989年）
- 2) 日本建築防災協会編：“平成2年度建設省委託総合防火安全評価指針等検討報告書” 日本建築防災協会（1991年）
- 3) 矢代嘉郎，他：“加圧防煙方式の避難安全計画における課題” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年）No. 3045
- 4) 広田正之，他：“加圧防煙における火災ブルーム量からみた煙流動モデルの適用条件の検討” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年）No. 3046
- 5) 中村和人，他：“加圧防煙システムの実大実験” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年）No. 3047
- 6) 村田義郎，他：“附室加圧煙制御システムに関する実施建物の実測結果” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1991年）No. 3043
- 7) 宮川保之，他：“センチュリータワーにおける加圧防排煙システムの性能に関する実験研究（その1），（その2）” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1991年）No. 3040，No. 3041
- 8) 中村健，他：“加圧防煙システムの実証試験” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1991年）No. 3042
- 9) 矢代嘉郎，他：“芝浦シーバンスにおける加圧防煙システムの実証試験” ビルディングレター No. 262（1991年）
- 10) 石原正雄：“建築換気設計” 朝倉書店（1969年）
- 11) 田中孝義，他：“＜2層ゾーン概念に基づく＞建物内煙流動予測計算モデル” 建築研究報告 No. 123（1989年）
- 12) 山名俊男：“防火扉開閉装置の力に関する実験” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1990年）No. 3011
- 13) 建築研究振興協会編：“実在建築物の通気特性に関する文献調査および実測”（1984年）
- 14) 若松孝旺，他：“煙流動の略算法の精度に関する一考察” 建設省建築研究所年報（1974年）