

# センチュリータワーの防災計画と防災性能実験

宮川 保之 片岡 浩人

## Disaster Prevention Planning and Experiments on Performance of Disaster Prevention System of Century Tower

Yasuyuki Miyagawa Hiroto Kataoka

### Abstract

Century Tower is the first work in Japan of Sir Norman Foster. However, much of the architectural design of this building was not in agreement with the requirements of Japanese laws and regulations concerning fire protection. The authors considered the fundamental concept of total disaster prevention planning and proposed new disaster prevention systems for realization of Sir Norman's architectural design. A completely open atrium without fire shutters or glass partitions was one of the most typical examples. A smoke control system by pressurization including the atrium was adopted. A series of model experiments, full-size experiments, and numerical simulations to secure the safety of these systems is described in this paper. Furthermore, results of experiments in the actual building are examined.

### 概 要

センチュリータワーはノーマン・フォスター氏の日本での初めての作品である。しかし建築デザインの多くの部分が日本の防火に関する法規に合致していなかった。筆者らはフォスター氏の建築デザインを実現するために防災計画全般にわたっての基本コンセプトの立案と新しい防災システムの提案を行なった。この中で最も大きなものはシャッター、ガラス間仕切りの全くない完全にオープンなアトリウムである。この実現のために採用されたものがアトリウムを含めた建物全体の加圧防排煙システムである。本報告においては提案された防災システムの安全性を確認するために行なった一連の模型実験、実大実験、数値シミュレーションについて述べるとともに建物竣工直前において行なった実物建物における実測結果についても紹介する。

### 1. はじめに

平成3年5月、東京都文京区に完成した高層事務所ビル、センチュリータワーは英国の高名な建築家であるノーマン・フォスター氏の日本での初めての作品である。

大林組はこの計画のスタート時点からフォスター事務所の技術面での設計パートナーであった。その中で筆者らの役割はフォスター氏の建築デザインを実現するための防災計画全般にわたっての基本コンセプトの立案とその安全性の検証であった。

この建物ではダイナミックな内部空間が最大の特長であるが、オフィス空間の楽しさと快適さを飛躍的に高めるために階段の手すりの配色からトイレの照明方式に至るまできめ細かな配慮がなされている点もまた特筆すべきことである。

しかしながらこれらの建築デザインの少なからぬ部分は日本の防火に関する法規、指導条件に抵触していた。この中で最も大きなものがアトリウムである。このアトリウムは居室（事務室）に対して完全にオープンであり面積区画、堅穴区画を満足していない。日本においてこのようなアトリウムを実現するためには防火・防煙的な安全性を既存のものと同レベルまで引き上げていくことが必要であった。このために採用したものがアトリウムを含めた建物全体の加圧防排煙とドレンチャー散水の組み合わせシステムである。その他、網入りガラス張りの特別避難階段、床までの防煙区画がない高層エレベーターロビー等、これまでの日本ではあまり見受けられない斬新な設計が試みられている。これらデザインの実現のために立案した新しい防災計画の安全性を確認するため一連の模型実験、シミュレーションを1年がかりで行

なった。これらのデータをもとに日本建築センターでの38条特認を無事、得ることができ日本では初めての完全にオープンでダイナミックなアトリウムを実現することができた。また建物竣工時においてもこれらの防災システムが所定の能力を発揮しているかどうかを確認するために一連の実測を行なったところ良好な結果が得られた。

以下、順を追って建物概要、防災基本計画、防災システムの詳細、性能確認のための模型実験および実測等について述べる。

## 2. 建物概要

この建物の建築的な概要は次の通りである。

構造・階数：S造(地上)，SRC造，一部RC造(地下)，地下3階，地上21階

建物用途：事務所，美術館，アスレチック，レストラン等

建築面積：2,426 m<sup>2</sup>

延べ床面積：26,517 m<sup>2</sup>

この建物の指向するところは高級インテリジェントビルであり計画上の大きな特長は次の通りである。

① ツインの高層タワー(建物)を並列配置し、両タワーの間には高さ72mのアトリウム空間を設置。このアトリウムは中間の11階床レベルで網入りガラスにより上下に区画し、防災上の配慮を行なっている。

② アトリウム両側の居室はアトリウムに対してシャッター、ガラス間仕切りのない完全なオープン構造でありダイナミックな空間の広がりを意図している。

③ 耐震設計への対応から2層分を1つにした「ハの字型」のブレースフレームを採用している。このフレームにより内部には無柱空間を、外部にはデザイン上のユニークさをもたらしている。

④ 2層毎に吹抜けを設け、2層で一単位のテナントスペースを意図している。

⑤ ガラス張りエレベーター、ガラス張り特別避難階段。

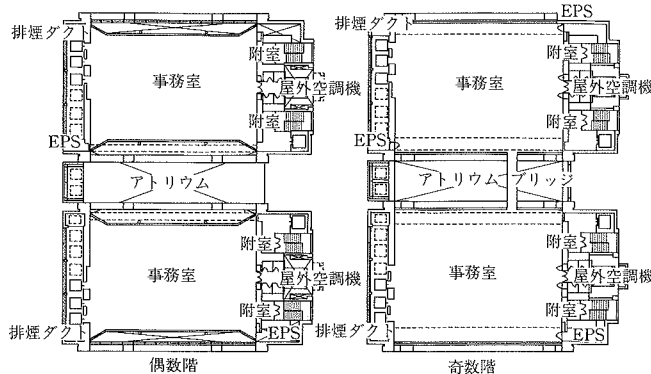


図-1 センチュリータワー基準階平面

建物の外観を写真-1に建物の平面、断面を図-1、2に示す。また建物の内部の状況を写真-2～写真-4に示す。

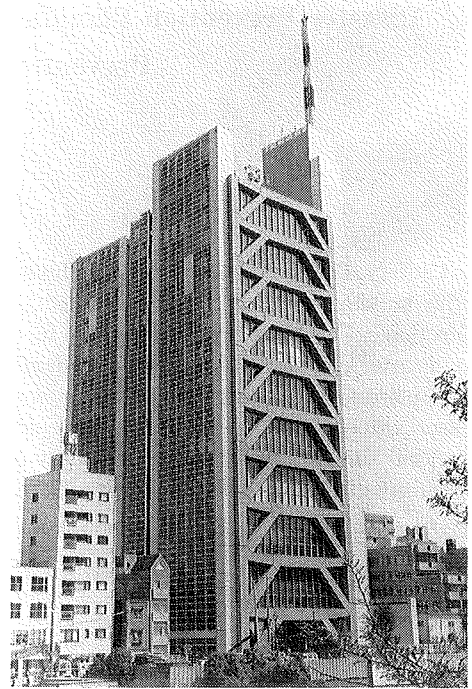


写真-1 センチュリータワー外観

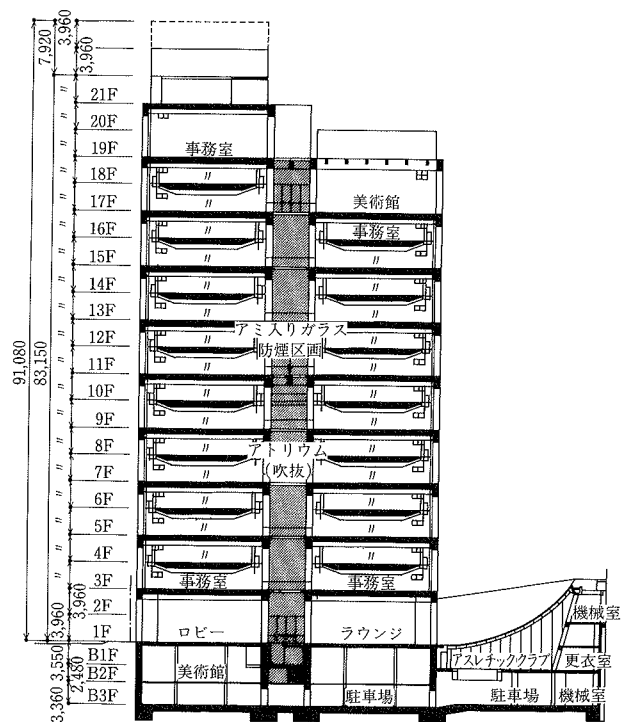


図-2 センチュリータワー断面

### 3. 防災基本計画

#### 3.1 建築的安全設計

この建物は建築計画的にも数々の防災安全対策がとられている。例を挙げるならば

- ① 約1,000 m<sup>2</sup>の基準階面積に対して特別避難階段を4カ所設置。
- ② 明快な避難動線。30秒以内の歩行時間で階段附室に到達。
- ③ 高級インテリジェントビルを指向しており、大テナント入居が前提であり、人口密度も小さく設定されている。(現実には11階を境に上下で2つの大テナントが入居している)
- ④ 見通しが良く出火の状況が一目でわかるアトリウム構造。
- ⑤ 2層居室の偶数階床が奇数階床よりもアトリウム側から見て約2.7 mセットバック。(上階延焼防止)
- ⑥ 1階ロビーに防災センターを設置。
- ⑦ アトリウム底部である1Fロビーの不燃化。(アトリウム底部での出火防止)
- ⑧ 敷地の3方向が道路に面しており他の1方向もオープンスペースとなっているため周囲からの延焼の危険性が小さい。
- ⑨ 全館スプリンクラー設置。

#### 3.2 防災計画基本コンセプト

この建物では斬新でダイナミックなデザインを実現するため現行法規(主として建築基準法)に抵触する部分が多かった。表-1にその主なものと対策を示す。設計のスタート時点で多くの議論を重ねた結果、次のような基本コンセプトを立案した。

- ① 煙制御は出火から盛期火災になるまでの時間帯(全館の避難は完了)で非火災階への煙の拡散を防止する。(アトリウムの加圧防排煙システムの採用)
- ② 上層階、対向面への延焼は盛期火災の時点でも完全に防止する。(偶数階床のセットバック、アトリウム側にドレンチャー設置)
- ③ 初期消火の徹底、つまりスプリンクラーの不作動を防止する安全設計(屋上に10tの補助水槽を設置することでスプリンクラーポンプが不作動でも重力落下で消火が可能。スプリンクラー配管のバルブが閉鎖している時には警報が出る等)。
- ④ フェールセーフの向上(防災システムを多段に構成)
- ⑤ 建物を上下に2分割し、各々のゾーンを防火・防煙的に分離。(アトリウムを11階の床レベルで水平に区画。網入りガラスを設置するとともに下からドレンチャー吹付けができるようにした。)

表-1の中の網入りガラス張り特別避難階段の状況を写真-5～写真-6に、居室と一体化した乗用エレベーターを写真-7に示す。

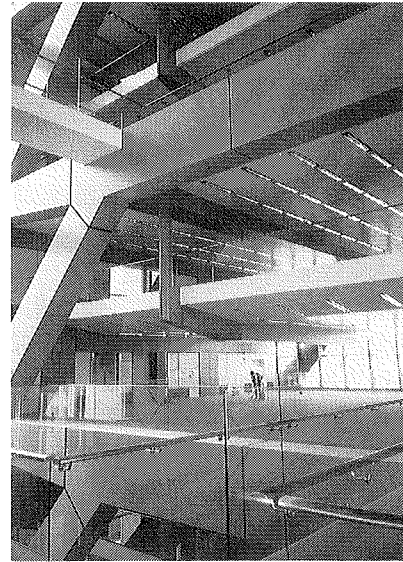


写真-2 完全にオープンなアトリウムとブリッジ

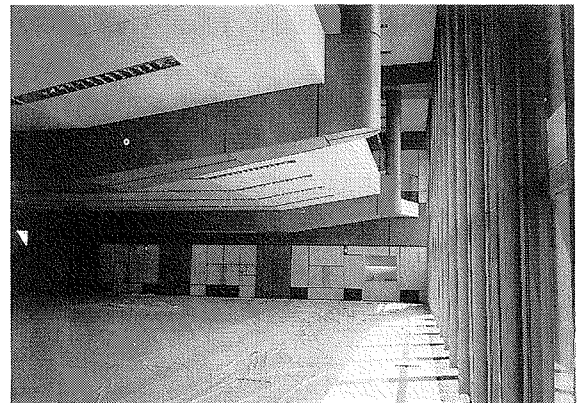


写真-3 外壁側の2層吹抜け



写真-4 1階エントランスロビー(高さは2層分)

### 4. 防災システムの詳細

#### 4.1 アトリウムを含む建物全体の加圧防排煙システムとドレンチャー散水システム

一般にアトリウム、吹抜けは堅穴となるため堅穴区画

(避難階を除く2層以上の吹抜けに対しては防火区画が必要)、面積区画(1,500 m<sup>2</sup> 以内、スプリンクラーがある場合は3,000 m<sup>2</sup> 以内に甲種防火戸による区画が必要)の両方の制約を受ける。

防火・防煙シャッター、ガラス間仕切り等がない開放的なアトリウムを実現したいという要望は以前から根強かったが、常に法の壁の前にはばまれていた。

今回、広大な居室(事務室)に対してシャッター、ガラス間仕切りが一切ない完全にオープンな大規模なアトリウムが日本ではじめて実現したわけである。これを可能にしたものがアトリウムの加圧防排煙とドレンチャーの組み合わせシステムである。このシステムの概念を図-3に示す。加圧防排煙システムの原理は次の通りである。

火災室では強力な排煙を行なう一方、非火災階の空調器を外気取入加圧ファンに転用して附室、アトリウム経由で火災階に空気を送り込む。このようにしてアトリウム→火災室への空気の流れをつくり、火災室の煙を封じ込め、煙をアトリウムに出さないシステムである。各居室とも床面の手すり(ガラス、1.1 m 高さ)、天井面からのロール型可動垂れ壁(天井から1.5 m 垂れ下がる)によ

ってアトリウムに面する開口面積を大幅に減少させているためこの開口部を通過する断面風速はかなり早くなる。センチュリータワーでは加圧風量=排煙風量=2,100 m<sup>3</sup>/min であり、断面風速は0.5 m/s 以上を確保できた。この程度の風速があり、垂れ壁深さが1.5 m あればどのような場所での初期から中期火災に対してもほぼ完全に煙を火災室に封じ込めることができる。(模型実験より確認) 万一の煙のアトリウムへの流出に備えてアトリウム頂部には機械排煙を設けている。またアトリウムに出た煙が上部の非火災階に流入したとしても非火災階の附室からアトリウムに向かって流れている加圧空気によって希釈されるとともに再びアトリウムに押しもどされる。

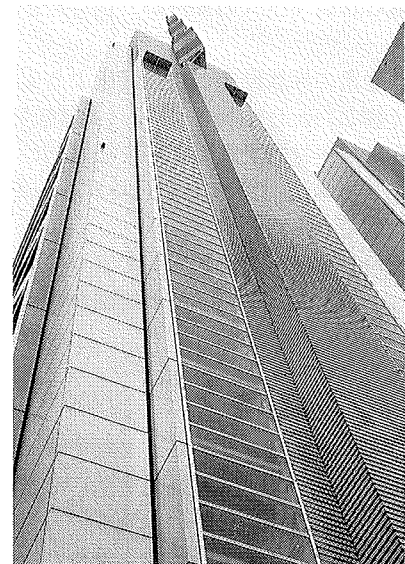


写真-5 網入りガラス張り特別避難階段外観

表-1 現行の法規、指導条件に抵触する主な項目と対策

合わない主な項目	対策	安全性確認の方法
アトリウム吹抜けと居室との間に床までの防火区画なし(竪穴区画、面積区画)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○アトリウムの加圧防排煙</li> <li>○アトリウムと居室との間のドレンチャーシステム</li> <li>○2層階の中間床が2.7 m セットバック</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○煙流動に関する縮尺模型実験</li> <li>○実大実験</li> <li>○上階延焼に関するシミュレーション</li> </ul>
居室の2層吹抜けの防火区画なし(竪穴区画)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○スプリンクラーヘッド数の増強</li> <li>○居室での強力な排煙</li> </ul>	○縮尺模型実験
特別避難階段附室の排煙なし	○附室の加圧防煙	○全館の圧力分布シミュレーション
特別避難階段外壁が網入りガラス張り	○特別避難階段が面する隣地との間に高さ9m(最大高さ)のコンクリート壁設置	○隣地での車輛火災による影響のシミュレーション
乗用エレベーターロビーに床までの防煙区画なし	○エレベーターシャフトの加圧防煙	○全館の圧力分布シミュレーション

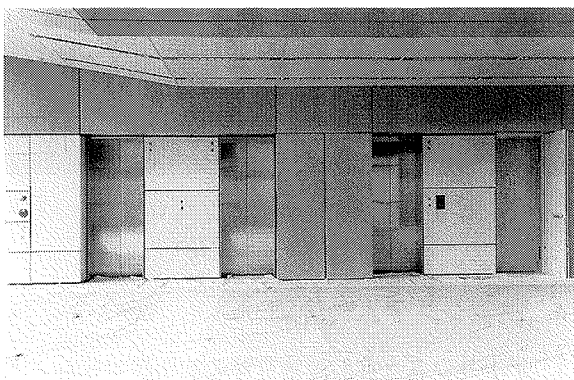


写真-7 居室と一体化した乗用エレベーター

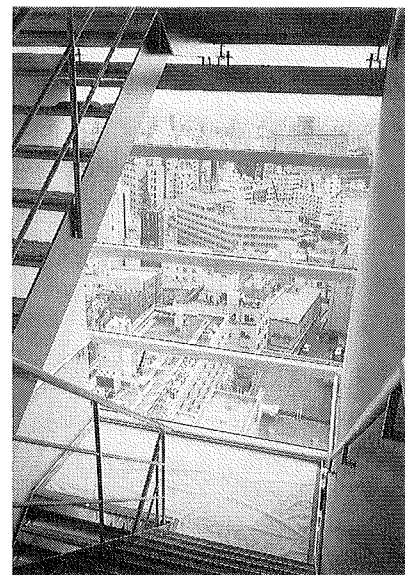


写真-6 網入りガラス張り特別避難階段内観

次に火による上階延焼の防止はアトリウムに面して設けたドレンチャーシステムによる。ドレンチャーが働けば最悪の場合でもアトリウムに噴出する熱気流は260°C以下に下がり、上階への延焼が防止できることが判明した。この建物ではアトリウムに面して床面が2層毎に約2.7m程度セットバックしているため、万一、ドレンチャーが働かなくても3層以上にわたって上部に延焼することはない。(シミュレーション、実大実験より確認。)

#### 4.2 特別避難階段附室の加圧防煙システム

この建物では附室の排煙がないかわりに加圧を行なっている。加圧のコントロールは附室と居室、附室と階段室の壁に設置されたリリーフダンパー(防火ダンパー付)によっている。一般に附室のような小空間の加圧コントロールを加圧ファンの回転数制御だけで行なう場合にはドアが開放された状態から急に閉められると急激な圧力上昇が起こり、単時間ではあるがドアが開かなくなる心配がある。リリーフダンパー方式によればこの圧力上昇は瞬時にしておさまり大変安全である。

この建物では附室と居室との間の差圧は50Pa、附室と階段室との間の差圧は20Paに設定している。また階段室と外部との間の壁には30Paで開くリリーフダンパーを同様に設けている。

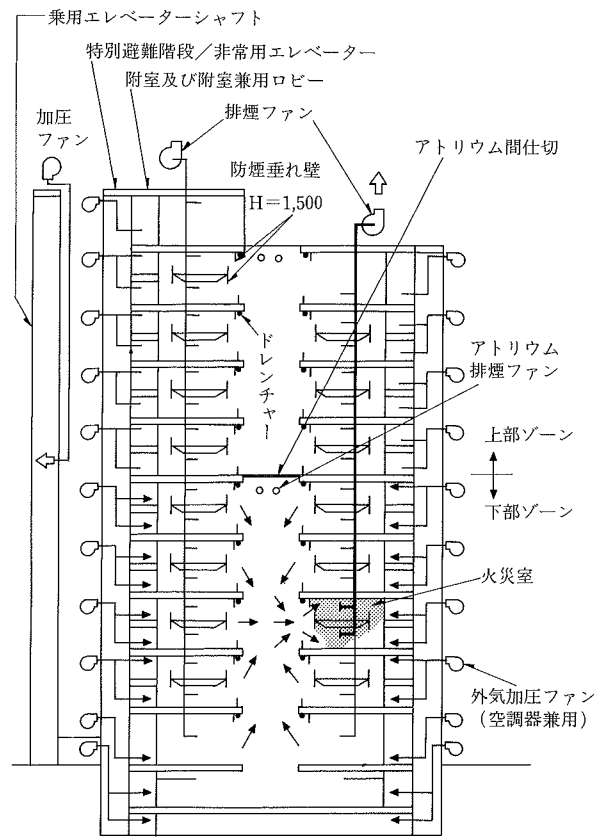


図-3 アトリウムを含む建物全体の加圧防排煙システム

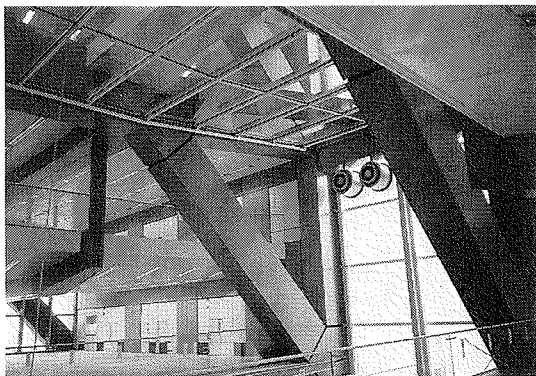


写真-8 アトリウムの水平防火区画と万一のための排煙ファン(11階床レベル、網入りガラスとドレンチャー散水)

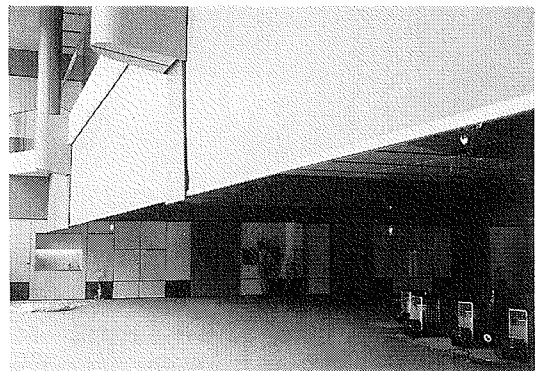


写真-9 居室のロール型可動垂れ壁の降下状況(垂れ壁の深さ1.5m)

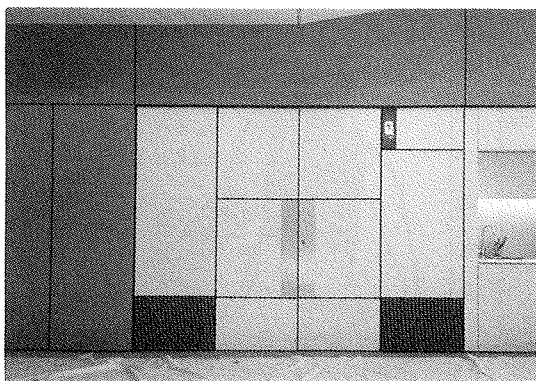


写真-10 居室・附室間のリリーフダンパー(下部の黒いグリル部分)

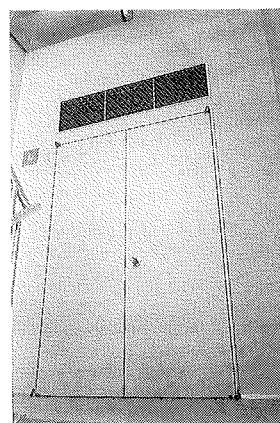


写真-11 附室・階段室間のリリーフダンパー

### 4.3 エレベーターシャフトの加圧防煙システム

エレベーターの扉と周囲枠材との間には通常6mm以上の隙間があるため火災時にはエレベーターシャフトが煙の伝播路となることが多い。この建物ではエレベーターの前にシャッター、防火戸が取り付けられなかったため、エレベーターシャフトの加圧防煙システムを採用した。加圧風量算定に際しては冬期の煙突効果を十分に考慮した。

## 5. 模型実験、シミュレーションによる防災システムの性能確認実験

### 5.1 アトリウムの加圧防排煙システムの煙流動模型実験 (1/10模型実験)

このシステムを採用した場合において所定の火災荷重に対して火災室とアトリウム間の断面風速をどの程度にとればアトリウムに出る煙が危険濃度以下になるかを検討した。模型としては3層分の居室とこれに面するアトリウムを取り出した。模型縮率は1/10である。実験時の相似則としてはアルキメデス数の一致を基にした。実験を $n_0=1$ として行なえば相似則は次のようになる。

$$n_v = n_l^{1/2}, n_q = n_l^{5/2}, n_t = n_l/n_v = n_l^{1/2}$$

ただし $n$ は模型の実物に対する縮率、 $v$ は速度、 $l$ は長さ、 $\theta$ は温度、 $q$ は発熱量、 $t$ は経過時間を表わす。

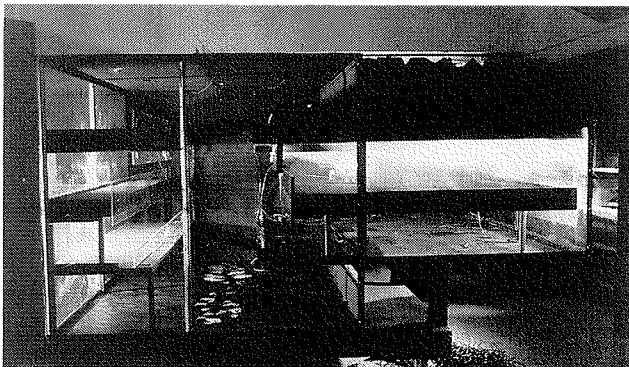


写真-12 模型実験による煙拡散状況 (上階が火災の場合)

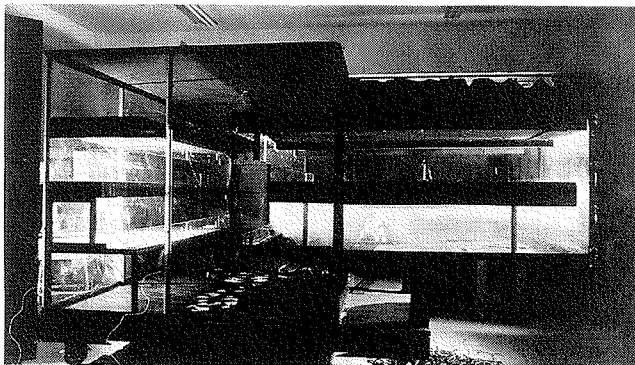


写真-13 模型実験による煙拡散状況 (下階が火災の場合)

実験時の火災荷重としては3人掛けソファ燃焼時の最大発熱量3,000kWを考えた。模型ではメチルアルコールを燃焼皿に入れ、これを燃焼させることにより火災を再現した。実験は断面風速(排煙風量)、火災発生場所を変化させて行なった。煙拡散の状況はCO<sub>2</sub>濃度計によった。(煙濃度とCO<sub>2</sub>濃度とは良い相関がある。)

写真-12、写真-13に2層居室の上階が火災の場合、下階が火災の場合の煙の拡散状況を示す。この時の垂れ壁直下での流入空気の断面風速は0.5m/sであった。いずれの場合も煙はアトリウムにはほとんど出ないことがわかる。アトリウムにわずかではあるが漏れ出た煙の濃度は1/60~1/230程度であるがアトリウムに面する非火災居室の濃度は安全上の許容値である1/250を大幅に下まわっており、避難上は全く問題がないことが判明した。

### 5.2 アトリウム側ドレンチャー散水システムの実大実験

オープンなアトリウムの上階延焼を防止する目的で設置するアトリウム側ドレンチャー散水システムの効果を確認するため実大実験を行なった。図-4に示すように5m(幅)×4.15m(奥行)×3m(高さ)の実大の居室を制作し、実物のドレンチャー散水ヘッド(水量20l/min個)を2.25m間隔で計2個設置した。燃焼は2m<sup>2</sup>の燃焼皿に入れたノルマルヘプタンに着火することにより行な

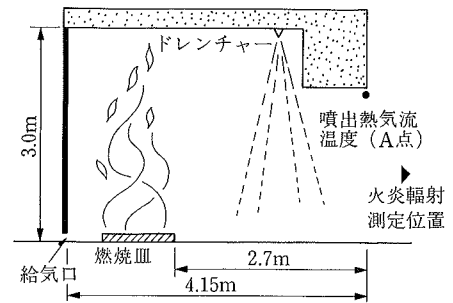


図-4 ドレンチャー散水システム実大実験装置

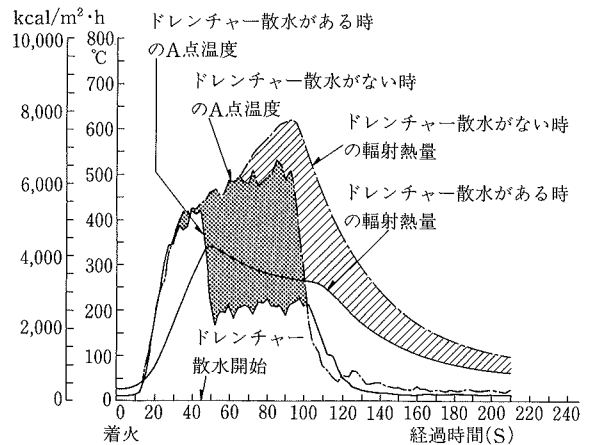


図-5 ドレンチャー散水システムの散水効果の実験結果

った。実験は2層居室の上階で火災が発生した場合を想定した。図-5に実験結果を示す。ドレンチャー散水がない場合に比較して、散水がある場合にはアトリウムに噴出する熱気流温度、火災室からの輻射熱量とも半分以下に減少しており、上層階へ延焼する危険性がないことが判明した。さらに実際の建物では2層居室のアトリウム側の梁は高さが1.8mもあり、また上層階の先端部分約1mも含めてすべてアルミパネルで被覆されていることを考えればさらに安全であることがわかる。

### 5.3 全館の圧力分布シミュレーション

この建物では特別避難階段附室、乗用エレベーターシャフトを外気で加圧する一方、火災室では強力な排煙を行なっている。風量、差圧が適切でない場合には最終状態で煙が避難ルートに逆流する可能性も考えられた。そこで全館のネットワークにより圧力分布の予測シミュレーションを行なった。手法としては圧力仮定による収束計算法を用いた。表-2に各部の設定差圧を示す。

結果は出火点をどのような場所に想定しても附室への煙の逆流の可能性がないことが判明した。

### 5.4 網入りガラス張り特別避難階段外壁の外部火災による影響の検討

階段外壁より17.3m離れた隣地の駐車場で火災が発生した場合の影響のシミュレーションを行なった。両者のほぼ中間位置に高さが9mのコンクリート製の遮断壁を設けており、これが輻射熱の大半を遮へいするものと期待された。火災荷重としては車両2台分を考え5m×5mの燃焼面積を設定した。外部風は火源方向から12m/sの風速があるものと想定した。図-6にシミュレーション結果を示すがガラス表面温度、熱応力（ガラス

表-2 各部の設定差圧

居室>附室	50Pa (パスカル)
附室>階段室	20Pa (パスカル)
階段室>外部	30Pa (パスカル)

評価点高さ (地上から)	ガラス面に当る輻射熱量	ガラス表面温度 上昇分	ガラスに発生する 熱応力
3m	504kcal/m <sup>2</sup> ・h	59℃	60kgf/cm <sup>2</sup>
6m	943 "	81 "	113 "
9m	1,664 "	117 "	200 "
12m	2,362 "	152 "	283 "

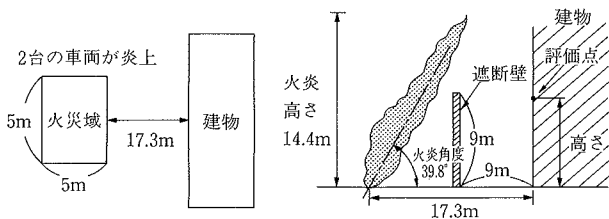


図-6 網入りガラス張り特別避難階段外壁の表面温度、熱応力のシミュレーション結果（風速 12 m/s）

の許容応力値は 500 kgf/cm<sup>2</sup>）とも安全な範囲にあることが判明した。

## 6. 建物竣工時における防災システムの性能確認実験

建物が竣工する直前の平成3年3月から4月にかけて防災システムの性能を確認するために一連の実験を行なった。

### 6.1 アトリウムの加圧防排煙システム

実験は下部ゾーンを対象とし、北タワー5階居室を出火室として加圧防排煙システムを運転した。火災室で発生させたCO<sub>2</sub>が、非火災室である他の上階にどの程度拡散しているかをCO<sub>2</sub>濃度計で測定することにより、防煙性能の評価を行なった。煙濃度とCO<sub>2</sub>濃度とは大変に良い相関があるためこのような測定方法を用いているわけである。CO<sub>2</sub>発生は多数の大型石油ストーブの燃焼と炭酸ガスボンベからの放出によった。また同時に火災室においては発煙筒を使用し、目視による防煙性能の確認も行なった。

結果を写真-14、図-7に示す。写真-14から明らかなように、アトリウムには煙はほとんど出ていない。垂れ壁直下の煙の流れは写真-13に示した模型実験の結果とも良く一致している。図-7のグラフから上階の非火災階およびアトリウムのCO<sub>2</sub>濃度は増化しておらず、一般に言われている「火災室濃度の1/250以下」の安全基準

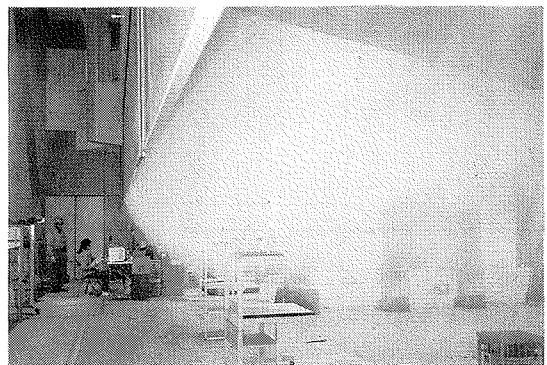


写真-14 実物建物における加圧防排煙システム運転時の煙流動

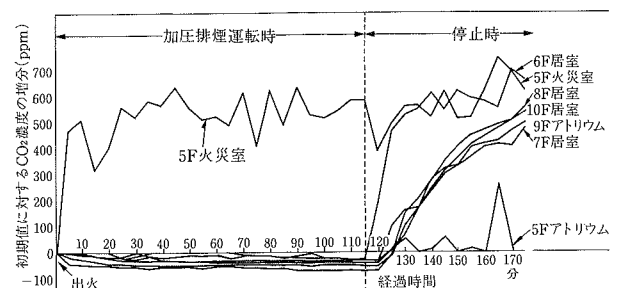


図-7 実物建物における加圧防排煙システム運転時の煙の拡散状況の実験結果

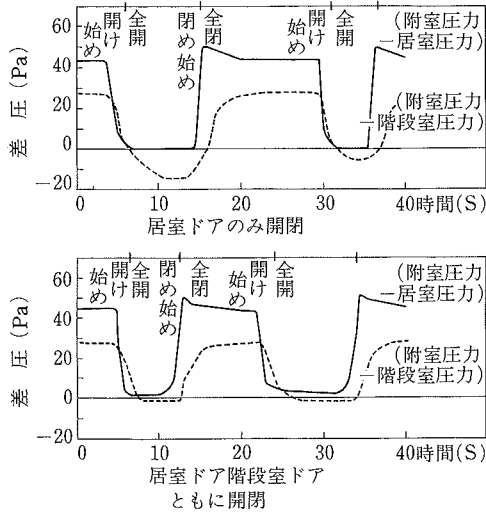


図-8 附室加圧時のドア開閉による圧力変動

表-3 全館の空気の流の実験ケース (○印は開放, ×は閉鎖)

ケース		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
排煙		運転	運転	運転	運転	運転	運転	運転	停止	停止	停止	停止
17F	居室~附室ドア	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○
16F	居室~附室ドア	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○
15F	居室~附室ドア	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○
14F	居室~附室ドア	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○
13F	居室~附室ドア	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○
12F	居室~附室ドア	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
	附室~階段ドア	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○
11F	居室~附室ドア	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	附室~階段ドア	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
階段室1階外部ドア		×	×	○	×	○	×	○	○	×	○	○

を十分に満足している。時間によって濃度が多少増減するのは、加圧外気自体に含まれるCO<sub>2</sub>濃度の変動のためと思われる。

### 6.2 リリーフダンパーによる附室の圧力コントロール

加圧される附室の圧力が過大にならないようにこの建物では一定圧力差で開くリリーフダンパー（直径30cmの円形タイプ）が附室・居室間の壁、附室・階段室間の壁、階段室・外部間の壁にそれぞれ設置されている。附室のドアの開閉による附室の圧力変動特性の実験を行なった。結果を図-8に示すがドアを開放した状態から急に閉鎖した時でも附室に過大な圧力がかかることは全く見られずドアの開閉障害の心配はないことが確認できた。

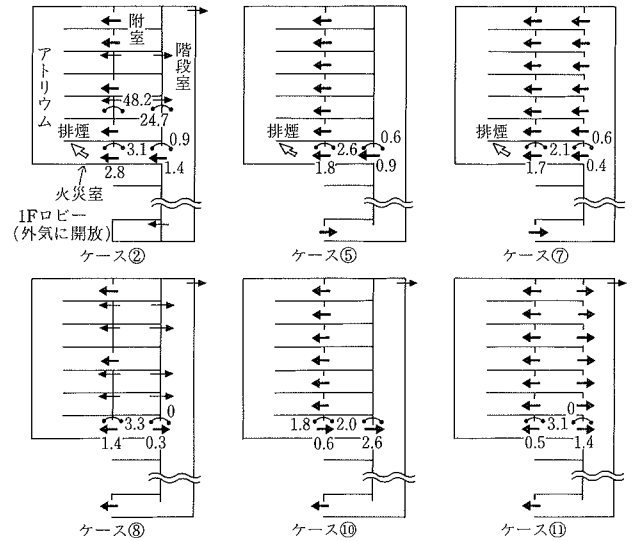


図-9 附室加圧時の実験結果 (差圧は高いゾーンに表示, 単位はPa, 風量の単位はm<sup>3</sup>/s)  
 ←開放されたドアからの流れ  
 ←リリーフダンパーを通しての流れ  
 □排煙

### 6.3 全館の圧力分布, 空気の流れ

避難ルートへの煙の逆流はどのような条件下で発生するのかを確認するため表-3に示すような条件で実験を行なった。結果を図-9に示すが排煙が行なわれている限りは煙の逆流はないことが判明した。ケース10では多少の逆流が観察されたが、このようなドアの開閉条件はまず考えられず実際にはほとんど起こりえないものと判断された。

## 7. おわりに

この建物で採用された新しい防災システムについて一連の実験から設計コンセプト通りの性能があることが確認できた。これほどオープンなアトリウムの実現例はこれまでの日本にはなく、数々の斬新な建築デザインとともに世の中に大きなインパクトを与えたものと確信される。最後にこの防災計画プロジェクトの実際的な作業は下記のメンバーによって行なわれたことを付記するとともに実験に際して御協力いただいたセンチュリータワー工事事務所の方々に謝意を表します。

大林組 技術研究所 宮川保之, 片岡浩人  
 // 設計第1部 三宅 章  
 // 設備設計第1部 磯崎日出雄, 山代隆裕  
 フォスターアソシエイト クリス・セドン