

空気膜構造棟に関する実験・研究（その2）

——煙流動・排煙に関する基礎的検討——

中川 恭次 宮川 保之
志村 昌巳
(本社 建築本部 設備設計部)

Experimental Studies on an Existing Air-Supported Structure (Part 2)

——Fundamental Studies on Smoke Movement and Control——

Kyoji Nakagawa Yasuyuki Miyakawa
Masami Shimura

Abstract

From the standpoint of disaster prevention it is necessary to study the movement of smoke and the characteristics of smoke exhaust in case of fire of an air-supported structure. This report describes the results of experiments on smoke movement and smoke exhaust in the existing air-supported structure constructed at the Ohbayashi Corporation Technical Research Institute. Furthermore, the calculation method for smoke movement was examined using the results of fire tests at the United States pavillion at Expo '70 (Osaka).

概要

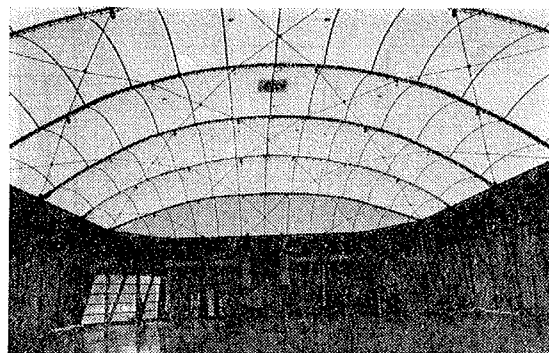
室内圧により屋根面を保持する空気膜構造物においては火災時の煙流動、排煙特性の把握が防災計画に、必要となる。本報告は空気膜構造物の煙流動、排煙特性に関して当技術研究所内に建設された空気膜構造棟において実験を行なったものである。また大阪万博アメリカ館における火災実験結果を基にして大規模空気膜構造物における煙流動モデルの検証も行なった。

1. はじめに

空気膜構造は加圧空間であるという特殊性から、火災時における煙制御、避難計画が防災上、最も大切な問題となる。従来より観客が密集する大空間建物においては火災時の排煙方式、煙層の降下、避難時間の算定、防災管理方式などが必要不可欠の検討事項となっている。空気膜構造物においてはこれらの項目のほか、膜面がデフレートした場合のパニック対策なども十分に考慮する必要が生じてくる。

本報告は空気膜構造の防災研究の第1段階として、当技術研究所内に完成した空気膜構造棟（床面積 840 m²）において火災時の煙流動、煙層降下および排煙口の排煙特性に関して各種の実験を行なったものである。さらに

当社が実施設計、施工を担当した大阪万博アメリカ館の火災実験結果を基にして種々の検討を加えた。



写真—1 空気膜構造棟内部状況

2. 排煙口の空気流動特性試験

2.1. 排煙口の形状

膜面に設置された排煙口は図一1に示すような断面形状を有し、モーターダンパーによって自動開閉される。このような特殊な形状であるため空気流動を規定する抵抗係数の値を実験から算出する必要がある。このため実物の排煙口の1/2スケールの模型を製作し、風洞実験から詳細な性能試験を行なった。抵抗係数をもとまれば任意の室内外の圧力差に対する流量が容易に算定できる。

2.2. 実験装置

図一1に示した排煙口の試験体は外部カバーの高さ H_0 が任意に調整できるようになっている。風洞実験装置を図一2に示す。抵抗係数 ζ の算定は次式によった。

$$\zeta = \frac{\Delta P}{(\gamma/2g) \cdot (Q/S)^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで

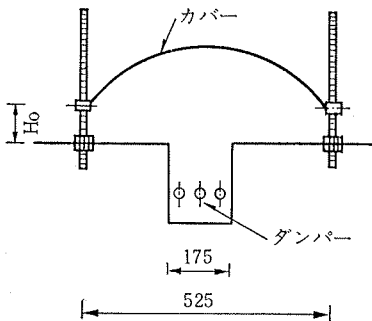
- ΔP : 試験体前後の静圧差 (kg/m^2)
- Q : 容積流量 (m^3/s)
- S : ダンパー部分開口断面積 (m^2)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- γ : 空気の比重量 (kg/m^3)

また流量測定は図一2において断面の異なる二つの位置 (B位置, C位置) の差圧を測る方法によった。流量 Q はベルヌーイの定理と連続の式から導かれる次式から算定するものとする。

$$Q = S_1 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{\Delta P'}{(S_1/S_2)^2 - 1}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで

- $\Delta P'$: 2点間の差圧 (静圧差)
- S_1, S_2 : 断面積 (m^2)



図一1 モーターダンパー付き排煙口の実験模型断面 (実物の1/2スケール, 単位 mm)

2.3. 実験結果

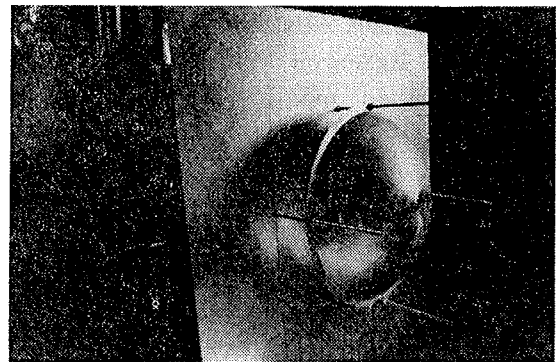
実験は外部カバー高さ H_0 , ダンパー開度を変化させた場合の抵抗係数 ζ を, 風量を変化させながら測定した。実験結果を図一3, 図一4に示す。Re 数 (レイノルズ数) が大きくなるに従い ζ の値は一定値に近づく結果が得られたので, この値を乱流状態における開口部の抵抗係数とした。

図一4より外部カバー高さ H_0 が 30 mm (実物の建物では 60 mm) 以上であれば ζ の値はほぼ一定値となり, 全開状態で 2.0 程度であることがわかる。この ζ の値を用いれば所与の室内外差圧 ΔP に対する流量 Q は式(1)を変形した次式から算出できる。

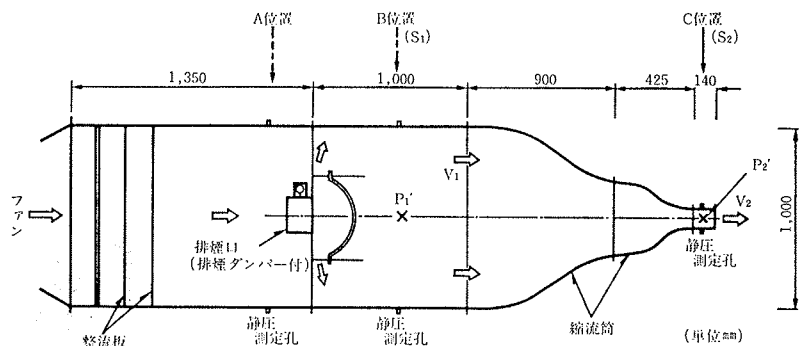
$$Q = S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{\Delta P}{\zeta}} = \alpha \cdot S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot \Delta P} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで

- α : 流量係数 ($=1/\sqrt{\zeta}$)



写真一2 排煙口の外部カバー



図一2 排煙口の抵抗係数測定のための風洞実験装置

3. 火災時の煙層降下モデル

3.1. 火災時の煙層降下

一般の室内では火災から上昇した煙は天井面で瞬時一様拡散した後、降下するモデルが用いられる。Thomas-辻本による面熱源からのプリュームによる上昇空気量(煙量) G (kg/s) は次式で表わされる²⁾。

$$G = 0.225 \gamma_r \left(\frac{g \cdot q}{\gamma_a \cdot C \cdot T_0} \right)^{1/3} \cdot (Z_1 + Z_2)^{5/3} \dots \dots \dots (4)$$

ただし

$$Z_2 = 1.5 \sqrt{A_r} \dots \dots \dots (5)$$

また煙層の降下式は次式で表わせる。

$$-(dZ_1/dt) \cdot F \cdot \gamma_s = G \dots \dots \dots (6)$$

ここで

- q: 熱源の発熱量 (kcal/s)
- Z₁: 火面から煙層下端までの距離 (m)
- Z₂: 火面から仮想点熱源までの距離 (m)
- γ_r: プリューム内の平均密度 (kg/m³)
- γ_s: プリューム外の煙層の平均密度 (kg/m³)

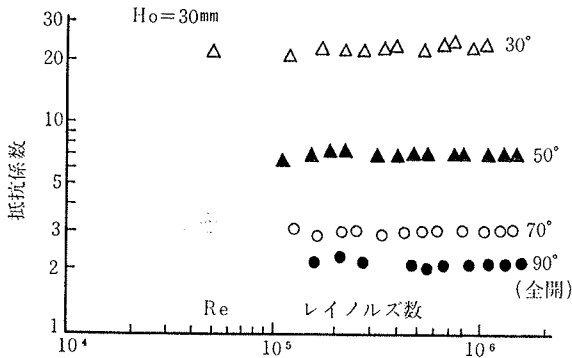


図-3 Re数の変化による抵抗係数ζの測定結果 (H₀=30 mm の場合)

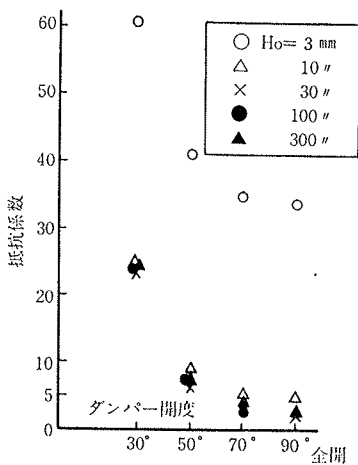


図-4 外部カバー高さ H₀ を変化させた場合の抵抗係数ζの測定結果

- γ_a: 常温空気の平均密度 (kg/m³)
- C: 空気の定圧比熱 (kcal/kg・°C)
- T₀: 常温 (°K)
- A_r: 火源面積 (m²)
- F: 天井面積 (m²)

ここで大規模な空気膜構造における煙流動実験として昭和46年において行なわれた大阪万博アメリカ館(床面積約 9300 m², 天井最高高さ 18 m)の実験がある¹⁾。実験結果の一例を文献¹⁾より転載して図-6に示す。水平方向約 125 m の距離を煙が移動するのに約 8 分を要している。つまり建物が大規模化するのに従い、厳密には煙の天井面での瞬時一様拡散の仮定は成り立たなくなる。しかしながらこのような煙の流動を物理的に表現することは複雑である。一方、この場合の実験においても煙が天井全面に拡散した後の煙層は水平方向に均一な状態で降下することが観察されている。そこで図-7に示すように現実には(a)の煙流動パターンであるが近似的に(b)のモデルが適用できると仮定し解析を行なう。このモデルを用いた場合、火災の初期の段階では誤差が生じるものの、煙が天井全面にゆきわたった後、居住域に降下する時間帯では現実の煙の流動を表現しうるものと予想される。万博アメリカ館の場合の煙層降下の実測値と式(4)~式(6)

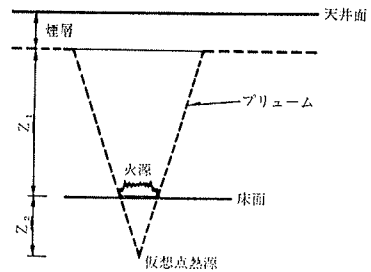


図-5 面熱源からのプリュームの拡大と煙層

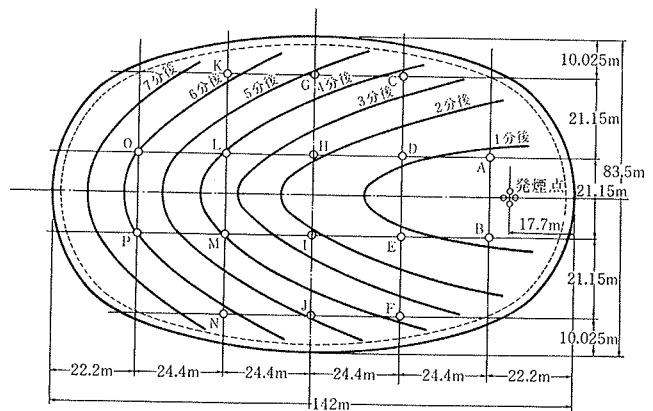


図-6 大阪万博アメリカ館における煙流動実験結果 (昭和46年, 文献¹⁾による)

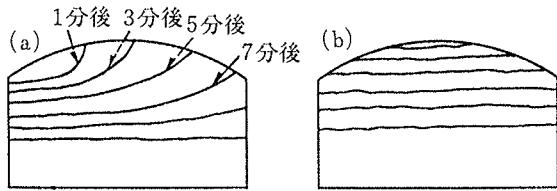


図-7 大規模空気膜構造における煙流動のモデル化

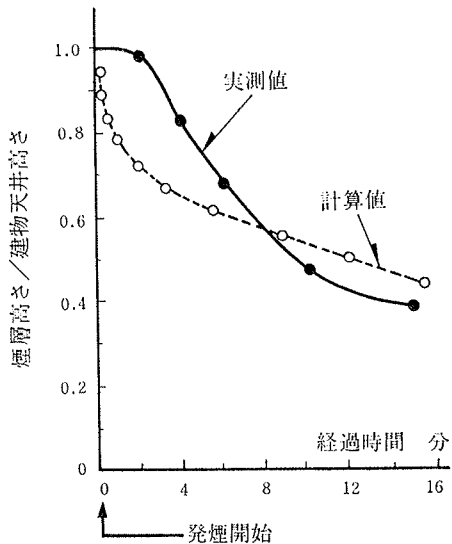


図-8 万博アメリカ館における煙層降下の実測値と計算値との比較 (オイル発熱量 890 kcal/s)

より計算できる計算値とを比較して図-8に示す。天井面が曲率をもつ空気膜構造では高さ方向に断面積(天井面積)が変化するので面積Fは次式で示すように区間ごとの近似式で表現した。

$$F = a(Z_0 - Z_1)^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで Z_0 は床から天井最高部までの高さである。図-8より煙層が居住域に近づくに従い計算値は実測値に近づいている。例えば15分経過した時点での煙層降下を表わす Z_1 の差異は1m程度である。本計算モデルの大規模空気膜構造への適用の限界等に関しては今後、さらに詳細に検討する必要がある。

4. 空気膜構造棟における煙流動実験

大規模な空気膜構造物における煙流動特性、排煙口の最適配置などを検討するためには縮尺模型実験が有用と考えられる。模型実験より実物建物の煙層降下を推定するためには相似則が必要となる。

いま式(4)を式(6)に代入した上で煙層降下高さも便宜上、仮想点熱源からの距離Zで考える。(Z = $Z_1 + Z_2$) 模型の実物に対する縮率をnとして両辺の縮率をとると

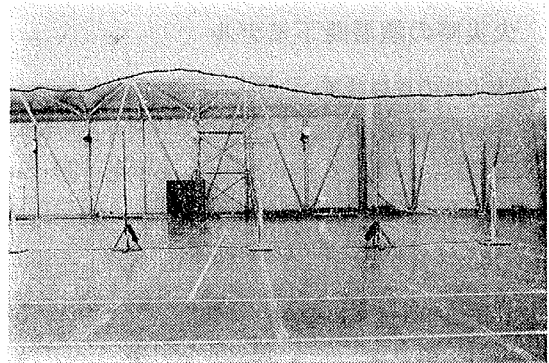


写真-3 空気膜構造棟における煙層降下の状況 (発煙後6分)

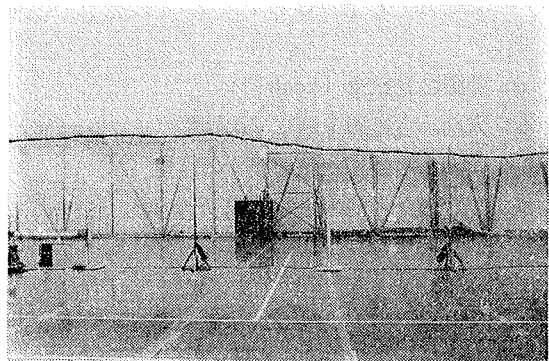


写真-4 空気膜構造棟における煙層降下の状況 (発煙後7分)

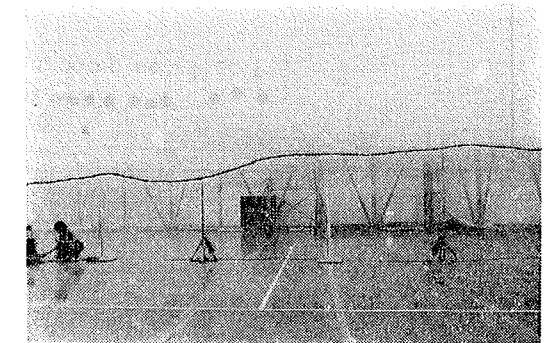


写真-5 空気膜構造棟における煙層降下の状況 (発煙後8分)

$$\frac{n_z}{n_t} = n_Q^{1/3} \cdot n \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s} \right) \cdot n_z^{5/3} / n_s \quad \dots\dots\dots(8)$$

結局,

$$n_t = n_s / \left(n_Q^{1/3} \cdot n \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s} \right) \cdot n_z^{2/3} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

煙の粒子に関しては粒子の運動方程式よりフルード数 ($v/g \cdot d$) を一致させることが条件となる³⁾。しかし燃焼煙の場合の粒子径は $0.5 \mu\text{m}$ 以下が大半であり、この域では粒子の重力落下速度がごく小さく短時間の煙層降下にはほとんど影響しないため粒子径の相似則は特に考慮

しなくてもよいことになる。

いま前述の万博アメリカ館を実物と想定し、これよりスケールの小さい空気膜構造棟を模型と考へて両者の煙層降下時間を比較検討する。アメリカ館での発煙源はオイルであり、実験棟の場合は石油燃焼器具による上昇気流中に混入したパラフィン煙である。所定の数値を式(9)に代入した後、建物天井高さの約2/3まで煙層が降下した時の模型(構造棟)での時間を式(9)より計算すると9.9分と予想できる。

一方、実際の煙実験からの模型での煙層降下時間は7.5～8分程度であった。今後は2m程度の模型と本構造棟における実験結果とを比較しながら相似則の適用の妥当性などについてさらに検討する予定である。

5. おわりに

今回の検討から、天井面での煙の瞬時一様拡散を仮定する計算モデルが大規模な空気膜構造物に対しても、煙

が居住域に近づく時間帯では精度良く適用できることが判明した。今後は煙流動に関する模型実験時の相似則をさらに厳密に検討するとともに、これらの模型実験法に基づく排煙効率、排煙口の最適配置などの問題について研究を行なっていく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築総合試験所：大規模な空気膜構造物における火災実験報告，(昭和46)
- 2) 斎藤，辻本：初期火災モデル，その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭和50)，pp. 411～412
- 3) 勝田，土屋：室内空気分布の模型実験法に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No. 17，(昭和56)，pp. 1～28
- 4) 日本建築センター：排煙設備技術規準，新日本法規，(昭和50)