

煙挙動予測にもとづく空気膜構造物の火災安全計画

矢代嘉郎
(技術研究所)

広田正之
(技術研究所)

中村裕幸
(技術研究所)

§ 1. はじめに

空気構造は、200m×200mクラスのスタジアムなどの大空間を可能にする構造として近年脚光をあびている。大規模のスタジアムでは、米国のシルバードーム(1976)他数か所で建設されている。当建築物の特徴は、加圧送風設備によって常時外気圧よりも内部の圧力を上げておく(膜屋根の荷重+構造安定性を保つ分、約25mm Aq)という「生きている」建築物であることであり、従来の建築物の概念と異なるものである。そのため、恒久建築物としては安全性を証明し、建築基準法第38条建設大臣特認を受けなければならない構造物である。特に、スタジアムや展示場などの大群集が利用する施設に適用される可能性が大きいことから、防災・避難に関する計画方法を確立することが当構造物を実現する上での課題である。

本研究は、空気膜構造物の火災安全計画方法の確立を目的として、当構造物の火災安全システムの主要な部分を占める煙の挙動について、2層ゾーンモデルによる解析方法と実用的シミュレーション手法を報告するものである。さらに、このシミュレーションを実施した防災計画の実例を報告し、空気膜構造物の火災安全計画方法のプロトタイプを提案するものである。

§ 2. 空気膜構造物の安全計画の課題

2.1 火災安全性に関する特徴

空気膜構造物は、構造安定性を保つ上で常時は約25mm Aq、積雪時や強風時には最大80mm Aq程度に内外圧力差(以後、内圧と省略する)を設けることによって、膜屋根をインフレート状態に保つ構造物である。当構造物の実現性をあげるには、漏気量を少なくし、加圧送風設備を少なくするとともに、維持管理費用を低く抑えることが重要である。そのため、日常の運営上は開口部をでき

るだけ少なくすることが望ましい。しかし、非常時の安全性を計画する上では、避難口を広くとるなど、以下の相反する問題点をもっている。

避難を早く終了させるために避難扉を一気に開放すると内圧は下がり、構造安定性がくずれるとともに膜屋根が降下する(デフレート)。これは、パニック発生の引金となる可能性がある。また、デフレートすると膜材が燃焼熱により溶融する。

デフレートを防ぐには非常用の加圧送風設備を多く必要とし、さらに給気の仕方によっては上部にたまった煙層を乱す可能性もある。

安全に避難できる時間を延すために排煙設備を設けると、漏気量を増す開口部が多くなる。また、屋根面に排煙口を設けると、膜屋根の荷重が大になり、内圧を大きくしなければならない。

このような特徴をもつ空気膜構造物の防災・避難に関して、例えば最新のBC プレース(バンクーバー、1983)では、デフレート時の膜の高さが身長以上であること、煙に対しては換気モニターと壁面上部のレリーズダンパを排煙に利用すること、避難に関しては屋外スタジアムと屋内体育館のコードに準じて計画し、避難計算によってチェックしていること、非常用加圧送風をコンコース側から行ない遮煙を計画していること、大空間以外の部分にはスプリンクラを設置していることなどが主な防災計画である。このように、北米では避難計算は行なっているものの、煙に対しては十分容積が大きいものとして避難と煙の関係には言及していないのが実情である。

2.2 既往の研究

昭和58年、当構造物を日本に導入するに際して、建築基準法上火災対策がクローズアップされ、(財)日本建築センターの大規模空気膜構造基準策定委員会において火災対策のあり方がまとめられた¹⁾。ここで、避難安全については煙と避難との関係で安全性を計画すること、避難行動上、パニック発生防止上、避難経路の各部の安全性を

図ることなどが定められた。なお、空気膜構造物の火災事例としては、展示場であった McComick Place (75m × 120 m, シカゴ, 1967) があり、これは6分間で膜屋根が破壊された。この火災はシミュレーションによって追跡されているが、9分間で煙が充満する結果が出されている²⁾。

このように、大空間の避難安全性に関しては煙と避難とのかかわりが主要課題となっている。

大空間の煙の挙動について、文献3)は一般の大空間における実験より煙層高さを解析したもので、ゾーンモデルが検証されている。文献4)は、このモデルで一般の大空間の煙蓄積の予測に基づく防災計画の報告である。文献5), 6)は空気膜構造物の煙についての実験の最初の報告であり、小火源によるブリュームの煙量を実験的にとらえ、大空間への相似性に言及したものである。文献7), 8)は当研究と同様にゾーンモデルによる煙層の解析方法を報告したものである。また、大空間の実大火災実験としては文献9)があり、燃焼拡大速度や煙の挙動が報告されている。

一方、防災計画を主眼にしたものでは、文献10)で清水建設㈱のテストプラントにおける火災実験に基づき、送風位置と煙の攪拌などの防災計画上の問題を報告している。

このように、大空間の煙についてはゾーンモデルで解析する方法と、大空間への相似則に言及したものがあ。一般に通常の火源の場合は、大空間の容積が大のため蓄煙量が大きく、煙が避難に影響しない場合が多い。しかし、文献2)の火災事例のように空気膜構造物における火災・避難の問題は、急激に大火災になる場合であると考えられることから、燃焼速度が大きい場合の実験・解析についても言及する必要があると考えられる。

また、既往のゾーンモデルの場合、開口部を通じて流入する煙や空気の流れがその先の空間に入る層を煙は煙層に、空気は空気膜層に特定し、相互に貫入する過程に配慮していない。そのため、煙層の温度を低く見積る可能性があるため、実用的方法の適用条件をとらえておく必要がある。

以上より、本報では実用的な煙挙動予測手法開発と空気膜構造物への適用方法を課題とした。

§ 3. 煙層降下シミュレーションモデル

3.1 フィールドモデルとゾーンモデル

火災現象の数学モデルは、フィールドモデルとゾーン

モデルに分類される。フィールドモデルは、火災時に発生する煙・ガスを含む熱気流を浮力を与えた乱流粘性圧縮流体として、Navier-Stokes の方程式を火災空間に適応したものである。これに対して、ゾーンモデルは火災空間を煙・ガスを含む高温の上部層と、煙・ガスを含まない低温の下部層の2つに分け、個々のゾーンに対して性状を平均化した方程式を立て、解析を行なうものである。前者は、後者に比べて空間内の熱気流の流れや温度分布等の詳細な火災現象を解析できるが、数値解を得る上で、(a)計算時間が非常にかかること、(b)火災現象を表現する基礎方程式に解明されていないものがあることなどから、実用化に至っていない。また、火災の解析値を設計レベルで活用する場合は、ゾーンの平均的な性質を知れば十分な場合が多い。

本報は、実用性からみてドーム内の火災現象(煙層降下現象)のシミュレーションを、後者のゾーンモデルを用いて行なう。

3.2 ゾーン方程式の一般化

3.2.1 煙層降下現象の概要

一様に加圧されたドーム内の、火災による煙・ガスの経時的状態は図-1のように考えられる。

すなわち、可燃物の熱分解により生成された燃焼ガスは、浮力を有し上昇する。燃焼ガスは周囲の空気を巻き込みながら上昇するため、火源上に火災ブルームを形成する。火災ブルームを通じて供給される燃焼ガスと空気は、ドームの上部に高温の煙層を形成する。可燃物の燃焼中は、煙層はその温度・濃度・厚みを増して成長する。そして、煙層が隣室との開口部の高さまで蓄煙すると隣室に流出し、そこにも煙層を形成する。このとき、ドームの圧力バランスを保つために、隣室からドームに空気が流入する。開口部を通じて流入・流出する煙・ガス・空気は、流出入した先の空間で上昇あるいは下降気流を生じ、進む先の層に一部貫入し、残りはもう一方の層に入る。この上昇・下降気流によって上部層と下部層との

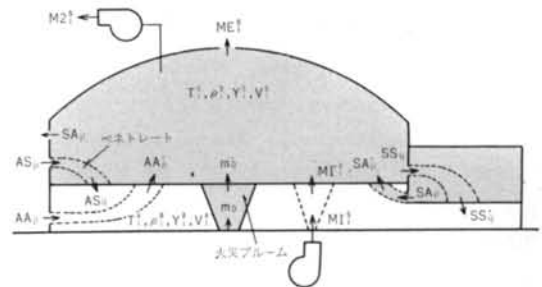


図-1 複数室からなる空気膜構造物の煙層降下

間で各層が保有する熱量・化学種等を交換し、各層は徐々にその性状を変化させる。また、各層はその保有する熱量を輻射熱伝達で他方の層および空間内の周壁へ、対流熱伝達で接する周壁等に伝え、それらの温度を上昇させる。

3.2.2 ゾーン方程式の誘導

火災現象のモデル化に当たって、基本となる次の仮定を設けた。これを加圧空間にも適用できるものとした。

- (a)空間内においては、水平な境界面によって明確に分けられた上部層と下部層が形成される。
- (b)各層は、物理・化学的性質に関して一様である。

以上の仮定を基に、各層に対して質量の保存・エネルギーの保存・化学種の保存・ガスの状態等の基本的関係が成立し、これらから各層の温度・層厚・化学種濃度を与える常微分方程式、室内圧力を与える圧力方程式が得られる（以下、これらをまとめてゾーン方程式という）。

既往のゾーンモデルでは、流出入の流れの一部が層を貫入する過程を考慮されていないが、一般化に当たってはこの点を含むモデル化が必要である。

この点について、田中³⁾は開口部を通る煙・ガスの流れが流出した先で上昇・下降気流を形成するとし、Zukoskiらに従って気流の温度分布を Gauss 分布と仮定して、上昇気流が上部層に、下降気流が下部層に貫入する量を ΔT_0 、 T_0 との関係から求めている。これは、火災プルームや機械給気にも適用できると考えられる。

この理論を適用し、図-1のような加圧された空間に対し貫入まで考慮した煙解析の基本式（ゾーン方程式）は、上部層・下部層について付録に示すように表わすことができる。

3.2.3 ゾーン方程式の単純化

付録に示すゾーン方程式は、給気・排煙まで含めた空間を対象として一般化されたものである。これに基づき実用化に当たっては、解析の目的や対象空間によって以

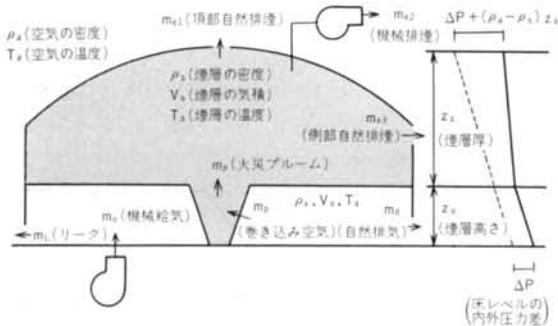


図-2 空気膜構造物ドーム内の煙層降下

下のように基本式の項を省略できる¹¹⁾。

- ・圧力勾配の項の省略は、密閉性の高い空間ではシミュレーション結果に矛盾を生じることが考えられるが、通常の建物ではリーク量が存在するため圧力勾配の項を無視しても、これによる誤差は小さい。
- ・単室空間をシミュレーションの対象とすれば貫入の問題等は考慮する必要がなく、下部層のゾーン方程式は省略することができる。
- ・煙高さを一定以上に保つための排煙計算の場合は定常計算でよく、ゾーン方程式の左辺の項を0として解くことができる。

3.3 空気膜構造物の煙層降下シミュレーションの単純化

3.3.1 単純化のための制約条件

空気膜構造によるスタジアムなどの施設の場合、防災計画上は、一般にコンコースなどの避難経路に煙が流出した場合は危険状態とみなすことが妥当である。この考え方により、以下の単純化を行なった。

- ・圧力勾配の項を省略する。単室の大空間を想定し、火災プルーム・開口部流量に関する貫入は考慮せず、また下部層の温度は一定として、上部層の性状（温度・層厚）のみに着目する。
- ・火源の燃焼は、一般の可燃物の場合十分に実用的レベルの予測が行なえるモデルはない。ここでは、燃焼速度を実験式で代用し、これから発熱量のみを求める方式とする。したがって、化学種濃度は求められない。
- ・内部圧力が外部より高いことから、図-2に示すような圧力分布ができ、開口部の流量は常時ドームから外部へ流れる。
- ・火災プルーム量は火源のガス化燃料の燃焼速度と空気の巻き込み量の和であるが、巻き込み量の方が量的に支配的なので、巻き込み量を火災プルーム量で代表させる。
- ・リークは、膜材とリングビームとのとりあい部、周壁材の組合せ部、排煙口や換気モナタ、非常口等の開口部回りなどに考えられる。これを全てドア回りで代表させる。
- ・他室に煙を流出させないことを防災計画の基本とし、他室への開口部高さまでの煙降下を予測する。

3.3.2 単純化ゾーン方程式

図-2の空気膜構造物を対象としたゾーン方程式は、次のように単純化された形で表わされる。

煙層の温度:

$$\frac{d}{dt} T_s = \frac{1}{C_p \rho_s V_s} [Q - Q_L - C_p (m_p + k m_0) (T_s - T_a)] \quad \dots\dots(1)$$

煙層の層厚:

$$\frac{d}{dt} V_s = \frac{1}{C_p \rho_s T_s} [Q - Q_L + C_p (m_p + k m_0) T_a - C_p (m_{e1} + m_{e2} + m_{e3}) T_s] \quad \dots\dots(2)$$

室内圧力:

$$f = \frac{1}{C_p T_a} (Q - Q_L) + m_0 - (m_{e1} + m_{e2} + m_{e3}) \left(\frac{T_s}{T_a} \right) - (m_d + m_L) = 0 \quad \dots\dots(3)$$

- T_s, T_a : 煙層および空気層の温度 (°K)
- V_s : 煙層の気積 (m³)
- ρ_s : 煙層の密度 (kg/m³)
- Q : 火源の発熱量 (kcal/s)
- Q_L : 周壁等が煙層から受けとる熱量 (kcal/s)
- C_p : 定圧比熱 (kcal/kg・°K)
- m_p : 火災ブルーム量 (kg/s)
- m_0 : 加圧送風量 (kg/s)
- m_{e1} : 頂部排煙口からの自然排煙量 (kg/s)
- m_{e2} : 機械排煙量 (kg/s)
- m_{e3} : 側部壁面にある排煙口からの自然排煙量 (kg/s)
- m_d : 非常口からの排気量 (kg/s)
- m_L : 空気層からのリーク量 (kg/s)
- k : 加圧送風量の煙層への混入率

3.3.3 要素過程

(1)火源の発熱量 (Q)

火源の燃焼速度を実験式(重量減少)で代用して、これに単位重量当たりの発熱量を乗じて与える。

(2)煙層の失う熱量 (Q_L)

Q_L は、煙層から輻射 (Q_R)・対流熱伝達 (Q_C) により、周壁が正味受け取る熱量である。輻射熱伝達量は、煙層の輻射率・煙層とそれを囲む周壁との間の形態係数・周壁材の内側表面温度が関係する。煙層の輻射伝熱量は、図-3の近似的な系として式(4)¹²⁾で表わす。

$$Q_L = Q_R + Q_C \quad \dots\dots(4)$$

$$Q_R = Q_1 + Q_2 \quad \dots\dots(5)$$

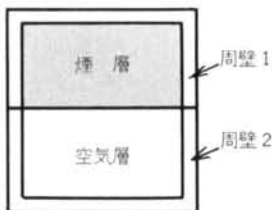


図-3 伝熱系

ここに、

Q_R : 輻射熱伝達により周壁が煙層から受けとる熱量 (kcal/s)

$$Q_1 = A_1 \varepsilon_1 \frac{P_1}{D}$$

$$Q_2 = A_2 \varepsilon_2 \frac{P_2}{D}$$

A_1, A_2 : 周壁1および周壁2の表面積 (m²)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 周壁1および周壁2の輻射率

$$D = [1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_G)F_{11}] [1 - (1 - \varepsilon_2)F_{22}]$$

$$- (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_G)^2 F_{12} F_{21}$$

$$P_1 = [1 - (1 - \varepsilon_G)F_{11}] [1 - (1 - \varepsilon_2)F_{22}]$$

$$- (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_G)^2 F_{12} F_{21}] \sigma T_1^4$$

$$- (1 - \varepsilon_G)F_{12} \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - [1 + (1 - \varepsilon_2) \{ (1 - \varepsilon_G)F_{12} F_{2G} - F_{22} \}] \varepsilon_G \sigma T_G^4$$

$$P_2 = [1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_G)F_{11}] (1 - F_{22})$$

$$- (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_G)^2 F_{12} F_{21}] \sigma T_2^4$$

$$- (1 - \varepsilon_G)F_{21} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - [1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_G)F_{11}]$$

$$\cdot F_{2G} + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_G)F_{21}] \varepsilon_G \sigma T_G^4$$

ε_G : 煙層の輻射率

T_1, T_2 : 周壁1および周壁2の表面温度 (°K)

σ : ステファン・ボルツマン定数

F_{ij} : 形態係数

$$F_{11} = 1 - \frac{A_d}{A_1}, \quad F_{12} = \frac{A_d}{A_1}, \quad F_{21} = \frac{A_d}{A_2},$$

$$F_{22} = 1 - \frac{A_d}{A_2}, \quad F_{2G} = \frac{A_d}{A_2}$$

A_d : 煙層と空気層の境界面の面積 (m²)

周壁材の表面温度は、材の厚さ方向に熱伝導方程式を解いて求めることを基本とする。

対流熱伝達は、現在のところ大空間等を始めとして火災の場の流れを特定できないため、式(6)¹²⁾で代用する。

$$Q_C = \alpha' \cdot A_1 \cdot (T_s - T_1) \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 α' はヌセルト数 (NU) を基に求められる

ここに、

$$NU = \begin{cases} 0.054 \cdot (GR \cdot RR)^{0.38} & (T_s \geq T_1) \\ 0.0029 \cdot (GR \cdot PR)^{0.38} & (T_s < T_1) \end{cases}$$

GR : グラッシュホフ数

PR : プラントル数

(ただし、煙層に接する周壁材を全て水平な天井とみなしたものである)

(3)火災ブルーム (m_p)

火源が室中央にある場合は、火災ブルーム量は z が火源の規模に比較して大きく、 z の高さでブルーム領域にあるとすれば、式(7)で表される(図-4)。ここで、

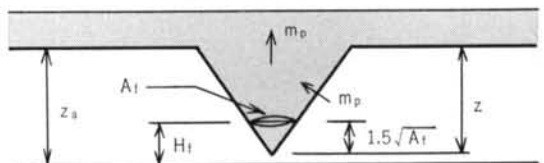


図-4 火災ブルーム

C_m は実験定数であり、乱れのない空間で0.21である (Zukoski に¹⁴⁾による)。

$$m_p = C_m \left(\frac{\rho_a^2 g}{C_p T_a} \right)^{1/3} Q^{1/3} z^{-5/3} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、
 g : 重力加速度 (m/s²)
 z : 仮想点熱源から煙層下端までの距離 (m)
 ρ_a : 空気の密度 (kg/m³)

火源の面積については、仮想点熱源の考えにより、ブルームが $1.5\sqrt{A_f}$ だけ下方より立ち上がっているものとした (Thomas¹⁵⁾ による)。

$$z = z_a - H_f + 1.5\sqrt{A_f} \quad \dots\dots(8)$$

ここに、
 H_f : 火源の床からの高さ (m)
 A_f : 火源面積 (m²)
 z_a : 煙層高さ (m)

火源が壁際、室隅にある場合は十分な予測は行なうことができないが、Alpert¹⁶⁾らの実験的研究をふまえ発熱量および火災ブルーム量を調整する。

(4)開口部流量 (m_{e1} , m_{e3} , m_d) およびリーク量 (m_L)

開口部流量は Berunouri の定理から式(9)で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} m_{e1} &= \alpha A_E \sqrt{2g\rho_a |\Delta P_E|} \\ &\quad \text{ここに、} \Delta P_E = \Delta P + (\rho_a - \rho_s) z_s \\ m_{e3} &= 2/3 \cdot \alpha B \cdot \sqrt{2g\rho_a |\rho_a - \rho_s|} \\ &\quad \cdot [(HH - NSA)^{3/2} - (HL - NSA)^{3/2}] \\ &\quad \text{ここに、} NSA = \Delta P / (\rho_s - \rho_a) + z_a \\ m_d &= \alpha A_d \sqrt{2g\rho_a |\Delta P|} \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

α : 流量係数
 ΔP : 床レベルにおける内外圧力差 (kg/m²)
 A_d, A_E : 非常口および頂部自然排煙口の面積 (m²)
 B, HH, HL : 側部壁面にある自然排煙口の幅 (m²), 上端高さ (m), 下端高さ (m)
 ΔP_E : 頂部の内外圧力差 (kg/m²)
 z_s : 煙層の厚さ (m)
 NSA : 中性帯高さ (m)

また、リーク量は対象建築物固有のものであるが、当社の船橋エアサポートドームの実験(昭和59年)より得られた次の実験式を適用する。

$$m_L = 4.44 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P^{0.662} \cdot \rho_a \quad \dots\dots(10)$$

3.3.4 シミュレーションプログラムの概要

式(1)~(3)に示されるゾーン方程式を解くに当たって、煙層の温度・気積を与える常微分方程式は Runge-Kutta-Gill 法を、圧力方程式は数値微分による Newton-Raphson 法を使用する。

シミュレーションのフローチャートを図-5に示す。

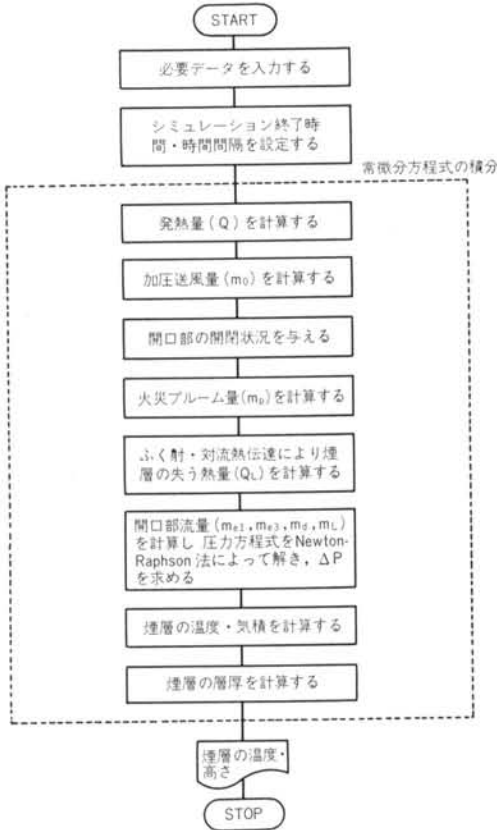


図-5 煙層降下シミュレーションのフローチャート

§ 4. シミュレーションモデルの検討

建設省建築研究所の実大火災実験棟の大空間で行なわれた火災実験¹³⁾ (以下、実験1)と、当社の船橋エアサポートドームで行なわれた火災実験 (以下、実験2)の結果を用いて、本シミュレーションモデルの検証を行なった。

実験1は、大空間における煙制御に関する基礎的データの蓄積、および煙層の温度等を設定した煙層降下モデルの検討を主な目的として行なわれたものである。実験2は、空気膜構造物の防災計画方法を確立するために、比較的規模の大きな火源を設定して、扉や排煙口の開閉・煙層降下現象・内外圧力差の変動等に関するデータの蓄積を行なったものである。

4.1 実験1

4.1.1 実験方法

(1)実験建物 (図-6, 図-7 参照)

建設省建築研究所内の実大火災実験棟大空間部分。

(2)実験条件 (表-1 参照)

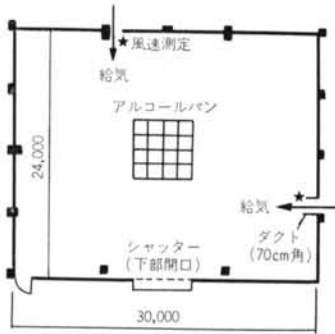


図-6 平面図



図-7 断面図

| 実験 No. | 初期温度 (°C) | 空間内静圧 (mmAq) | 下開口部 | | 上開口部 | | 給気量 (m³/s) |
|--------|-----------|--------------|--------|---------|--------|---------|------------|
| | | | 開口時間 | 面積 (m²) | 開口時間 | 面積 (m²) | |
| 1-a | 16.5 | 17.5 | — | — | — | — | 15.3 |
| 1-b | 14.0 | 16.5 | 3'30'' | 3.23 | 3'30'' | 3.25 | 23.4 |

表-1 実験条件

| 実験 No. | 建 物 | 開 口 | 周壁の熱特性 | 外 気 | 火 源 | 給 気 |
|--------|---|--|--|-----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1-a | 初期内圧 (kg/m²) 天井高 (m) 幅 (m) 奥行き (m) は、表-1 およ び図-6, 7に 同じ | — | 輻射率 0.8 | 風圧 0 (kg/m²) | 燃焼速度 6.67×10^{-2} (kg/s) | 送風口高さ 2 (m) |
| | | | 熱伝導率 2.87×10^{-4} (kcal/m·s·°K) | | 燃焼面積 3 (m²) | 送風量 (m³/s) は、 表-1 に同じ |
| 1-b | — | 開口部形状 幅 (m) 上端高 (m) 下端高 (m) 開閉時間 (s) を 入力 | 比熱 0.2 (kcal/kg·°K) | — | 火源高さ 0 (m) | — |
| | | | 密度 2.0×10^3 (kg/m³) | | 厚さ 0.5m | |

表-2 シミュレーションの条件 (実験1)

火源には燃焼用パン(45cm×45cm) 15枚にメタノールを入れ、実験棟の中央部に設置した。給気は、1階の2か所に設置したファンを同時に作動させて行なう。自然排煙は、大空間部分の側壁最上部にある外気に面する窓を開放して行なう。

(3)測定項目・方法

測定項目は煙層温度、煙層濃度、室内圧力、強制給気・排煙量、自然給気(下開口部)・排煙量(上開口部)、煙層高さ、燃焼速度である。

4.1.2 実験結果とシミュレーション結果の比較

(1)シミュレーションの条件(表-2参照)

実験1-aは加圧された空間の場合、実験1-bは上部開口と下部開口を開いて内圧を変化させた場合の煙挙動をみたものである。

火源上の上昇気流は、火炎領域・間欠火炎領域・ブルーム領域の3つに分けられる。この実験ではブルーム領域は2.6~3.5m程度であり、これよりも煙層の高さは高いことからZukoskiのブルーム領域のモデルを用いても差し支えない。

(2)実験結果とシミュレーション結果

煙層高さと温度の実験値と計算値を示した図-8, 9から以下のことが分かる。

(i)煙層の温度の実験値は一様ではなく、温度勾配がある。これは、層内で攪拌が十分行なわれていないことを示している。これに対し、煙層の平均的な温度を示す計算値は、煙層下端から3/4程度の高さの実験値とおおむね一致している。

(ii)煙層の高さは、実験値と計算値はおおむね一致しているが、計算値が実験値より低くなっている。

(iii)給気口は煙層を乱さないように設置しているため、

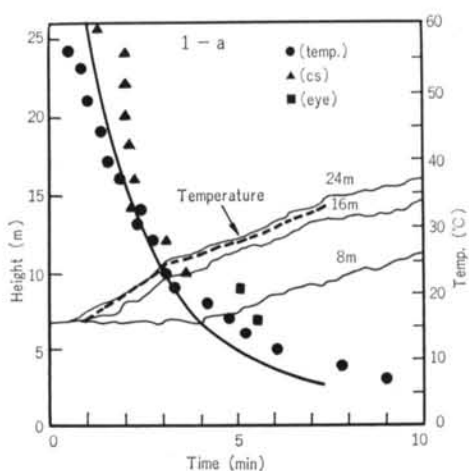


図-8 加圧時の煙層の自然降下

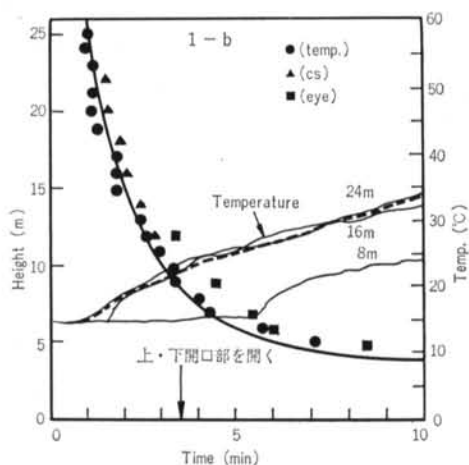
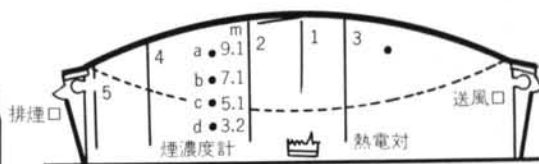
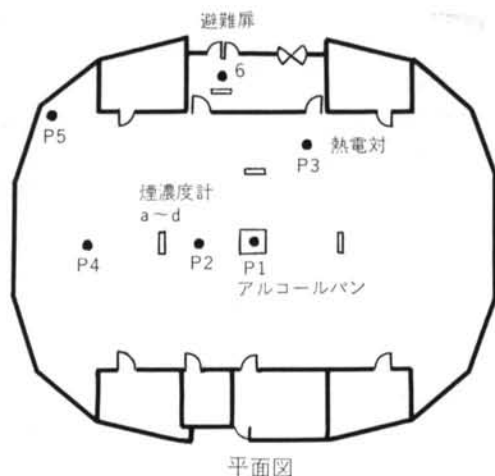


図-9 加圧・排煙時の煙層の降下



0 5 10 (m)

図-10 実験施設の概要

送風による煙拡散はみられない。

したがって、一様に加圧された大空間では煙層を拡散しないように加圧送風設備を計画すれば、単純なゾーンモデルで煙降下の傾向を予測することができると思われる。

4.2 実験2

4.2.1 実験方法

(1) 実験建物 (図-10 参照)

長軸 34m × 短軸 28m の楕円型平面であり、高さは周壁部分 8m、最高高さ 12m である。加圧送風機は、空気熱源 ヒートポンプパッケージ (50 HP) を 4 台設置し空調を行なうとともに、ドーム内を加圧する。

(2) 実験条件 (表-3 参照)

実験のタイプは、平常モード・排煙モード・避難モードの 3 タイプを行なった。

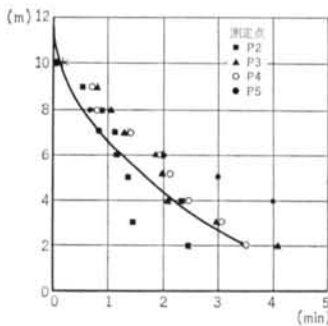
火源にはメタノール (4 m³) を使用し、これをドームの中央部の床上に設置する。給気は、壁面 (高さ 8 m) の 4 か所に設置された送風口のうち 2 か所を実験的に使用する。内外圧力差が低下するために起る膜屋根のデフ

| 実験モード | 初期温度 (°C) | ドーム内圧 (mmAq) | 排煙口開時間 (s) | 非常口開時間 (s) | 加圧送風量 (m ³ /s) | |
|-------|-----------|--------------|------------|------------|---------------------------|------|
| | | | | | 開前 | 開後 |
| 平常モード | 14.9 | | — | — | | 4.7 |
| 排煙モード | 13.7 | 25 | 120 | — | 4.7 | 15.4 |
| 避難モード | 17.1 | | — | 90 | | 24.1 |

表-3 実験条件

| 実験モード | 建 物 | 開 口 | 周壁熱特性 | 外 気 | 火 源 | 加圧送風 | |
|-------|---|-----|---|----------------------|---|---|--|
| 平 常 | ドームの形状は、内部の気積を実際のドームと等しくなるように下部部分を円筒とみなし、また屋根部分の断面は2次曲線で近似する。 | — | 膜材 輻射率 熱伝導率 3.06×10^{-5} (kcal/m \cdot s $^{\circ}$ K) 比熱 0.3 (kcal/kg $^{\circ}$ K) 密度 1.6×10^3 (kg/ml) 厚さ 8×10^{-4} (m) コンクリート壁 厚さ 0.1 (m) これ以外は表— 3と同じ | 風圧 0 (kg/m 2) | 燃焼速度 7.8×10^{-2} (kg/s) 燃焼面積 4 (m 2) 火源高さ 0 (m) | 送風口高さ 8 (m) 送風量 (ml/s) 作動時間 (s) は表—3に同じ | |
| 排 煙 | | | | | | | 開口部形状 幅 (m) 上端高さ (m) 下端高さ (m) 開閉時間 (s) を 入力 |
| 避 難 | | | | | | | |

表—4 シミュレーションの条件(実験2)



図—11 平常モードの煙層降下

レートは、コンピュータ制御によって給気量を増加させて防ぐ。自然排煙は、壁面(高さ8m)に設けられた排煙口を用いて行なう。

(3)測定項目・方法

測定項目は、煙層温度、煙層濃度、室内圧力、強制給気量、自然排煙量、煙層高さ、燃焼速度である。

煙層温度は、cc型熱電対を用いて図—10に示すように設置した。煙濃度は減光式で測定した。煙層の高さは煙温度等の測定結果を基に、初期温度+5 $^{\circ}$ Cに立ち上がる時点と仮定した。

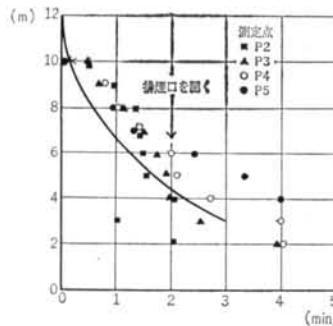
4.2.2 実験結果とシミュレーション結果の比較

(1)シミュレーションの条件

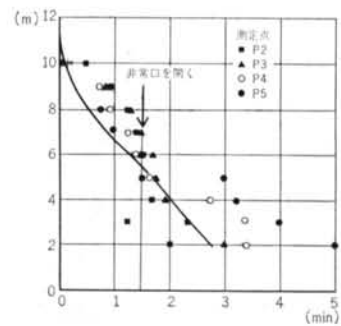
表—4に示す条件設定で煙層高さ・温度を予測した。

(2)実験結果とシミュレーション結果

実験値と計算値を示した図—11, 12, 13から、以下のことが分かる。



図—12 排煙モードの煙層降下



図—13 避難モードの煙層降下

(i)火源近傍の測定点 P2の実験値と送風口付近の P5の実験値は、計算値と良い一致はみられない。これは、規模の大きな火源のブルームの影響(P2)と、送風による煙層の乱れを無視できないこと(P5)を示している。

(ii)中央付近の P3, P4については比較的計算値と実験値は一致している。しかし、送風口より下に煙が降下した後は、送風量を全て煙層に入ると仮定した計算値よりも実験値の煙降下が大きい傾向を示す。この傾向は排煙、避難モードほど大きい。すなわち、加圧送風量の増大による煙層の攪拌によるものと考えられる。

送風口が上部にある空間においては、送風口近辺の煙の予測や排煙・避難モードのように給気量が大のケースの予測は、簡略化ゾーンモデルではとらえられない。少なくとも、貫入現象を入れた一般化したモデルによる解析が必要と考えられる。したがって、当モデルの適用には給気高さまでの煙降下に適用条件を限る必要がある。

§ 5. 空気膜構造物の安全計画ケーススタディ

5.1 ケーススタディの対象

図-14, 15に示す、展示やショーの開催などを行なう小規模の空気膜構造物が対象である。当施設は小規模ながらも不特定多数が利用し、しかも多目的空間である。そのため、避難による内圧の急激な降下と膜屋根の降下が予想される。その意味で、空気膜構造物固有の防災・避難計画が最も問題となる対象である。

- 面積：1501㎡（ドーム内1017㎡）
- 容積：約13000㎡
- 用途：展示、ショー、アイススケート、など
- 収容人数：500人（避難計画用最大750人）
- 可燃物：展示用具など5kg/㎡とする
- 構造：1重膜、ケーブルなし、常時内圧20mmAq
- 設備：常用加圧送風設備1万㎡/h×2台、退場用・非常用加圧送風設備5万㎡/h×3台
- 給気位置 GL+2m
- 感知器：減光式分離型

5.2 評価方法

防災の基本計画は、漏気量が多い出口を少なくするために、避難経路に当たる入口ホール部分を一時的に滞留できる場所としたことである。この考え方を基に、以下の評価項目を設定した。

- (a)避難中はドア高さ以下に煙を降下させない。
- (b)膜屋根はインフレートの形状を保つ(12mmAq)。
- (c)避難中は熱に対する膜面の安全性を保つ。

この目標に対して、加圧送風設備、避難施設、防排煙設備、維持管理を計画する。

5.3 避難、煙、内圧の予測

5.3.1 避難時間

コントロールすることが難しい避難が、火災安全計画の基本条件となる。つまり、避難開始時間と避難終了時間から、内圧の予測と煙挙動の予測の重要な要素となる開口条件を設定する。

図-16は、出火後覚知時間の想定に基づいて避難をシミュレーションした結果である。その結果、扉開放状態は図-16に示す時間となる。内圧は扉開放により瞬時に低下するから、加圧送風設備も避難開始とともに起動するものとする。

- 歩速： $v = \min[n/\rho, 1.0]$ m/s (ρ : 人口密度; 人/㎡)
- 流動係数: $n = 1.5$ 人/m・s
- 避難経路: 誘導により規定されるものとする
- 出火点: 出口近辺とし、その出口は使用不能とする



図-14 小規模空気膜構造物の平面図

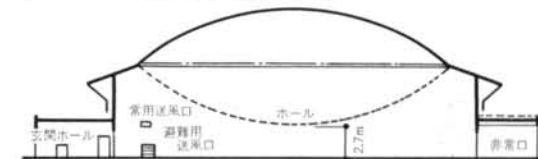


図-15 小規模空気膜構造物の断面図

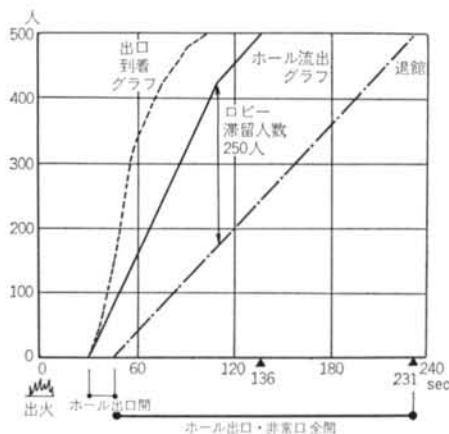
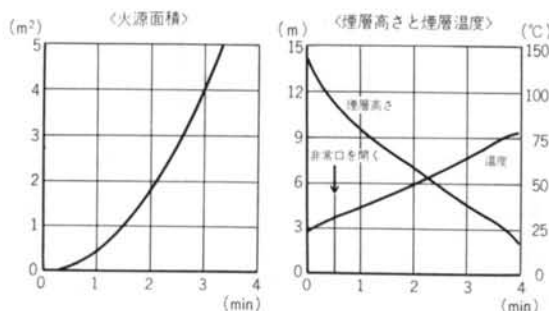


図-16 避難流動グラフ

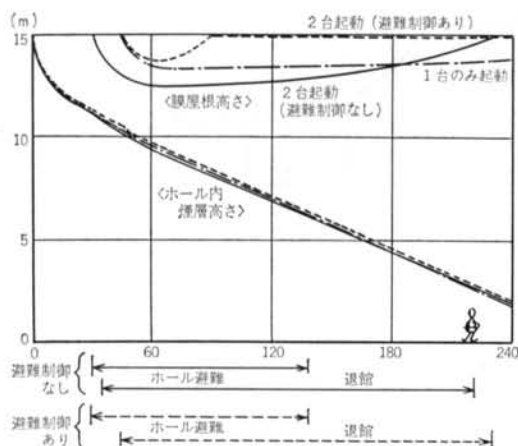
5.3.2 煙層高さ

火源には、東京消防庁の実大火災実験の燃焼速度実験式を引用した。内圧が低下して加圧送風設備を起動させても、全速運転になるまでにはタイムラグがある。このタイムラグを30secと仮定して煙層高さや煙層の温度を予測すると、図-17のようになる。

インフレート状態で、かつ避難出口が2か所の場合、避難時間中は身長まで煙層が降下しないことが分かる。



図一17 火源面積と煙層の高さ、温度



図一18 避難制御と膜屋根・煙層高さの関係

当施設では結果として排煙を行わず、空間内に蓄煙させ煙が降下する以前に避難する方法とし、前述の煙降下予測手法によって安全性を検討した。すなわち、頂部の排煙設備は膜屋根荷重が大きくなり、内圧高による空気漏洩量が増すわりに排煙効果はない結果となったためである。

5.3.3 膜屋根の高さ

避難開始後、加圧送風設備が全速運転になるまでのタイムラグにより、瞬時に内圧は屋根自重と釣り合う内圧まで落ち、さらに屋根は降下する。当然、積雪時は屋根自重が大であるため内圧は高く、したがって漏気量が大であるから屋根降下量も大となる。これらの予測を示したのが図一18である。

避難開始とともにドアを開放すると、容積の小さい当ドームは給気設備が全速運転になる前に膜屋根の降下が始まる。その後、ドア前に人垣ができると実質開口面積が小さくなり、内圧は徐々に高くなりインフレート状態になる。しかし、非常用送風機3台中1台が起動しない場合はインフレートを保てない。2台で構造的安定性を保つためには、ドア前に人垣ができる約15秒までは扉を開放せずにホールに滞留させるよう避難誘導する必要が

ある。積雪時には、送風機が全速運転になるまで滞留させなければならないことが分かる。

なお、膜屋根が降下した場合でも、煙層高さは避難時間中身長以上に保たれる。

(仮定)

- ・デフレート：水平に降下するものとする
- ・人垣による開口面積低減： $A'=(h-1.5)\times w$
(h : ドア高さ, w : ドア幅)
- ・膜屋根自重を 2 kg/m^2 とする

5.3.4 評価

避難に関しては、避難中は膜屋根が降下しても煙層は身長以上で、かつドア高さ以上であり、評価項目(a)を満たしている。ただし、避難時間の余裕がさほどないことから、給気位置は煙層を乱すような上部ではなく、2m以下にすることが必須の条件である。

しかし、避難行動を制御しない自由な避難の場合、内圧の急降下とそれによる屋根の降下が起こり、構造的安定性が保たれない。これは、容積が小さいことと送風機のタイムラグによるデフレートであるため、非常用加圧送風機を多くしても効果はない。そのため、評価項目(b), (c)に対しては避難行動を制御する方法をとらねばならない(ただし、積雪時に緊急に避難すべき事態が発生した場合はデフレートもやむを得ないとした)。

以上のように、避難も含めた非常時の運営方法と非常用加圧送風機の設置方法によって、安全性が保たれるものと考えられる。

5.4 火災安全計画の考え方

1室の単純な建築物であるが、以上に示す避難安全と内圧制御の計画概要は、不特定多数が利用するエアドームの火災安全計画において必須の要件である。当計画では、早期発見方法、避難計画、出入口の数、開閉方式の計画、加圧送風設備の風量と起動方式、さらに排煙計画によって火災時の状態は大きく異なるものとなった。特に計画対象が小規模の場合は、設備制御のタイミングや避難誘導方法などのソフトが安全性の鍵を担うことになる。

すなわち、不特定多数が利用する空気膜構造の安全システムは、内圧維持、避難、火・煙制御の3つのサブシステムが相互にかかわるダイナミックなシステムとしてとらえなければならない。図一19は、その火災安全システムの概要を示したものである。このなかで、それぞれのサブシステムに含まれる加圧送風設備の量、避難扉数、避難経路の計画、排煙方式、排煙量、非常時の運営方法(避難計画などの制御のタイミングなど)を最適にすることが安全計画上の計画内容となる。

当ケーススタディでは、図-20のようなシステム全体のダイナミック・シミュレーションによる評価には至っていないが、各サブシステムを関連づけて性状を予測し、計画にフィードバックさせる過程をとったものである。つまり、空気膜構造物の火災安全計画では、図-20に示す計画の流れにより火災時の状態を予測評価し設備計画、建築計画、さらに維持管理計画を行なえばよいであろう。一般には避難が防災計画の前提条件になるが、規模によって避難誘導方法などの維持管理計画にフィードバックする必要がある。

§ 6. おわりに

実際の防災・避難設計に当たってはさらに漏洩量の低減方法、空気膜構造全体システムの信頼性向上、消火設備やパニック防止など検討すべき課題は多いが、本報告は煙挙動の解析方法を中心に火災安全システムに言及した。

空気膜構造物の火災安全性を確認する手法として、大空間における煙挙動解析法を開発した。現段階では、使用に当たって防災計画上の制約条件が必要であるが、十分実用的に避難安全性を検討できる手法である。さらに、ゾーン方程式のなかの流入空気流の各層を貫入する現象を解明することによって一般化できる。

空気膜構造物の火災安全計画では、避難・防排煙・内圧による安全システムの系によって火災時の状態を予測評価できるが、規模や用途によってはこのシステムのうち、維持管理方法や入退場と設備の制御方法が火災安全性の核になることに配慮する必要があることが分かった。

なお、大空間の火災現象についてご指導いただいた東京大学工学部平野敏右助教授ならびに当プロジェクトのメンバーに末筆ながら謝意を表します。

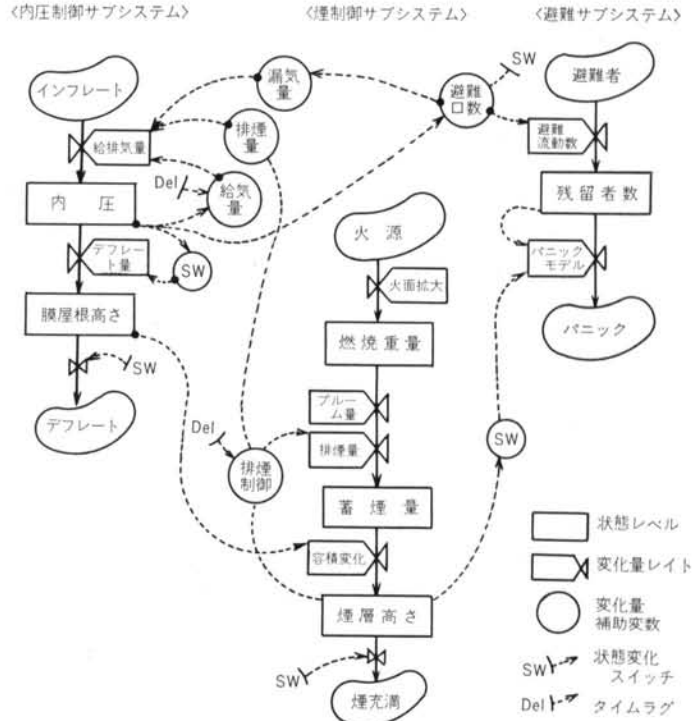


図-19 火災安全システムの概要

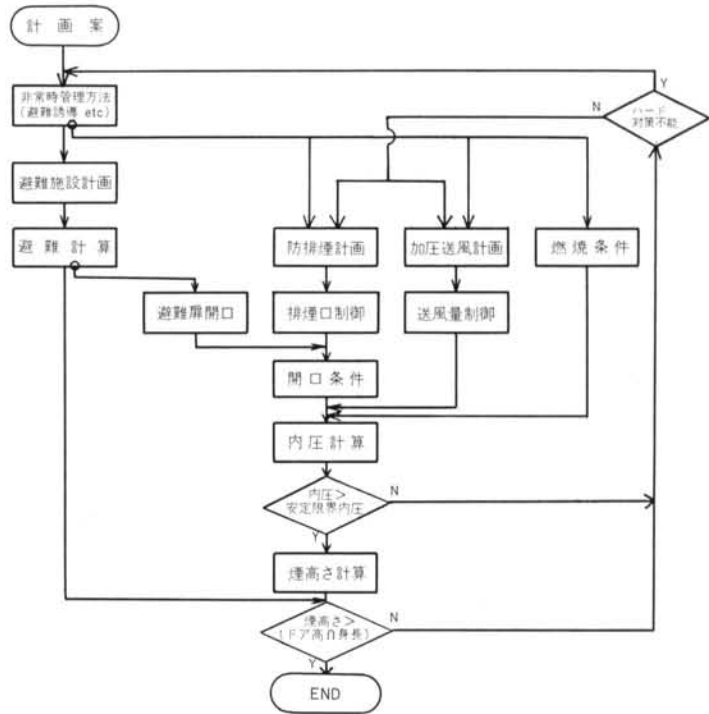


図-20 空気膜構造物の火災安全計画の流れ

〈参考文献〉

- 1) 財団法人日本建築センター：“大規模空気膜構造物に関する研究報告書”（1984年12月）
- 2) P. Yurkonis: “Modeling Smoke and Fire Progression” Specifying Engineer (1984)
- 3) 田中哮義: “A Proposed Model on the Behaviour of Plumes in Two Layer Models” 8th U.S.-Japan Panel on Fire Research and Safety (1985年5月)
- 4) 佐藤博臣: “大空間施設の防災計画” 建築技術 (1985年12月)
- 5) 古平章夫他: “空気膜構造物内の煙性状に関する実験” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1984年)
- 6) 坂本和彦他: “空気膜構造物内の煙の流動と蓄煙に関する模型実験” 同上 (1985年)
- 7) 宮川保之: “空気膜構造棟に関する実験・研究——煙流動・排煙に関する基礎的検討——” 同上 (1985年)
- 8) 原哲夫他: “空気膜構造物の煙制御—シミュレーションモデルの検討—” 同上 (1985年)
- 9) 東京消防庁: “蔵前国技館火災実験結果報告書” (1985年3月)
- 10) 矢代嘉郎他: “大空間空気膜構造物における火災安全システム” 安全工学研究発表会梗概 (1984年)
- 11) 建設省建築研究所: “建築物の防火設計法の開発, 出火拡大防止設計法の開発 (昭和59年度総合技術開発プロジェクト)” (1985年3月)
- 12) 田中哮義: “多数室の建物を対象とした火災拡大モデル” (1982年)
- 13) 建設省建築研究所: “建築物の防火設計法の開発, 煙制御・避難設計法の開発 (昭和59年度総合技術開発プロジェクト)” (1985年3月)
- 14) E. E. Zukoski, T. Kubota & B. Cetegen: “Entrainment in Fire Plumes” Fire Safety Journal (1981)
- 15) P. Thamas: “Investigations into the Flow of Hot Gasses in Roof Venting” Fire Research Technical Paper No. 7 (1963)
- 16) R. L. Alpert: “Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors” FMRC (1972)

付録 ゾーン方程式

(1)上層の化学種濃度:

$$\rho_i^s V_i^s \frac{d}{dt} Y_i^s = \gamma_i m_b^s + K^m m_0 (Y^p - Y_i^a) + m_0' (Y_i^a - Y_i^s) + (1 - K_i^{1s}) M_{i1}^s (Y_1 - Y_i^s) + M_{i1}^a (Y_i^a - Y_i^s) \\ + K_i^{1A} M_{i1}^a (Y_1 - Y_i^a) + \sum [(1 - K_{ji}^{ss}) SS_{ji} (Y_j^s - Y_i^s) + SA_{ji}' (Y_i^a - Y_i^s) + K_{ji}^{sA} SA_{ji} (Y_j^s - Y_i^a) \\ + (1 - k_{ji}^{As}) AS_{ji} (Y_j^a - Y_i^s) + AA_{ji}' (Y_i^a - Y_i^s) + k_{ji}^{Aa} AA_{ji} (Y_j^a - Y_i^a)]$$

(2)下層の化学種濃度:

$$\rho_i^a V_i^a \frac{d}{dt} Y_i^a = \gamma_i m_{ba} + (1 - k^m) m_0 (Y^p - Y_i^a) + (1 - k^{1A}) M_{i1}^a (Y_1 - Y_i^a) + M_{i1}^s (Y_i^s - Y_i^a) + K_i^{1s} M_{i1}^s (Y_1 - Y_i^s) \\ + \sum [SS_{ji}' (Y_i^s - Y_i^a) + k_{ji}^{ss} SS_{ji} (Y_j^s - Y_i^s) + (1 - k_{ji}^{As}) SA_{ji} (Y_j^s - Y_i^a) + AS_{ji}' (Y_i^s - Y_i^a) \\ + k_{ji}^{As} AS_{ji} (Y_j^a - Y_i^s) + (1 - k_{ji}^{Aa}) AA_{ij} (Y_j^a - Y_i^a)]$$

(3)上層の温度:

$$C_p \rho_i^s V_i^s \frac{d}{dt} T_i^s - V_i^s \frac{d}{dt} P_i = \Delta H m_b^s + q_i^s + C_p K^m m_0 (T^p - T^a) + C_p m_0' (T_i^a - T_i^s) + C_p (1 - K_i^{1s}) M_{i1}^s (T_1 - T_i^s) \\ + C_p M_{i1}^a (T_i^a - T_i^s) + C_p K_i^{1A} M_{i1}^a (T_1 - T_i^a) + C_p \sum [(1 - K_{ji}^{ss}) SS_{ji} (T_j^s - T_i^s) \\ + SA_{ji}' (T_i^a - T_i^s) + K_{ji}^{sA} SA_{ji} (T_j^s - T_i^a) + (1 - K_{ji}^{As}) AS_{ji} (T_j^a - T_i^s) \\ + AA_{ji}' (T_i^a - T_i^s) + K_{ji}^{Aa} AA_{ji} (T_j^a - T_i^a)]$$

(4)下層の温度:

$$C_p \rho_i^a V_i^a \frac{d}{dt} T_i^a - V_i^a \frac{d}{dt} P_i = \Delta H m_b^a + q_i^a + C_p (1 - K^m) m_0 (T^p - T^a) + C_p M_{i1}^s (T_i^s - T_i^a) + C_p K_i^{1s} M_{i1}^s (T_1 - T_i^s) \\ + C_p (1 - K_i^{1A}) M_{i1}^a (T_1 - T_i^a) + C_p \sum [SS_{ji}' (T_i^s - T_i^a) + K_{ji}^{ss} SS_{ji} (T_j^s - T_i^s) \\ + (1 - K_{ji}^{As}) SA_{ji} (T_j^s - T_i^a) + AS_{ji}' (T_i^s - T_i^a) + K_{ji}^{As} AS_{ji} (T_j^a - T_i^s) \\ + (1 - K_{ji}^{Aa}) AA_{ij} (T_j^a - T_i^a)]$$

(5)層厚:

$$C_p R T_i^s \frac{d}{dt} V_i^s + V_i^s \left(\frac{C_p}{R} - 1 \right) \frac{d}{dt} P_i = \Delta H m_b^s + q_i^s + C_p K^m m_0 (T^p - T^a) + C_p T_i^a m_0' + C_p (1 - K_i^{1s}) M_{i1}^s T_1 \\ - C_p (M_{i1}^s - K_i^{1s} M_{i1}^a) T_i^s + C_p K_i^{1A} M_{i1}^a T_1 + C_p (M_{i1}^a - K_i^{1A} M_{i1}^s) T_i^a \\ - C_p T_i^s (m_{e1}^s + m_{e1}^a) + C_p \sum [(1 - K_{ji}^{ss}) SS_{ji} T_j^s - (SS_{ji}' - K_{ji}^{ss} SS_{ji}) T_i^s \\ + K_{ji}^{sA} SA_{ji} T_j^s + (SA_{ji}' - K_{ji}^{sA} SA_{ji}) T_i^a + (1 - K_{ji}^{As}) AS_{ji} T_j^a \\ - (AS_{ji}' - K_{ji}^{As} AS_{ji}) T_i^s + K_{ji}^{Aa} AA_{ij} T_j^a + (AA_{ij}' - K_{ji}^{Aa} AA_{ij}) T_i^a \\ - (SS_{ij} + SA_{ij}) + T_i^s]$$

(6)圧力:

$$V_R \left(\frac{C_p}{R} - 1 \right) \frac{d}{dt} P_i = \Delta H (m_b^s + m_b^a) + q_i^s + q_i^a + C_p T_p m_0 + C_p T_1 (M_{i1}^s + M_{i1}^a) - C_p (T_i^s M_{i1}^s + T_i^a M_{i1}^a) \\ - C_p (T_i^s M_{e1}^s + T_i^a M_{e1}^a) + C_p \sum [T_j^s (SS_{ji} + SA_{ji}) + T_j^a (AS_{ji} + AA_{ji}) - T_i^s (SS_{ij} + SA_{ij}) \\ - T_i^a (AS_{ij} + AA_{ij})]$$

ここに,

ρ_i^s, ρ_i^a : 上部層および下部層の密度 (kg/m³)

T_i^s, T_i^a : 上部層および下部層の温度 (°K)

V_i^s, V_i^a : 上部層および下部層の気積 (m³)

Y_i^s, Y_i^a : 上部層および下部層の化学種 l (例えば, スス, CO, CO₂ 等) の質量分率

γ_l : 可燃物の燃焼により生成される化学種 l の発生速度

m_b^s, m_b^a : 上部層および下部層のガス化燃料の燃焼速度 (kg/s)

ΔH : 燃焼熱量 (kcal/kg)

q_i^s : 熱伝達により周壁および下部層が上部層から受け取る正味の熱量 (kcal/s)

q_i^a : 熱伝達により周壁および上部層が下部層から受け取る正味の熱量 (kcal/s)

SS_{ji} : ある開口部を通じての室 j の上部層から室 i の上部層への質量流速 (kg/s)

SA_{ji} : ある開口部を通じての室 j の上部層から室 i の下部層への質量流速 (kg/s)

AS_{ji} : ある開口部を通じての室 j の下部層から室 i の上部層への質量流速 (kg/s)

AA_{ji} : ある開口部を通じての室 j の下部層から室 i の下部層への質量流速 (kg/s)

SS_{ji}' : SS_{ji} の下降気流の室 i の下部層への貫入量 (kg/s)

SA_{ji}' : SA_{ji} の上昇気流の室 i の上部層への貫入量 (kg/s)

AS_{ji}' : AS_{ji} の下降気流の室 i の下部層への貫入量 (kg/s)

AA_{ji}' : AA_{ji} の上昇気流の室 i の上部層への貫入量 (kg/s)

M_{i1}^s, M_{i1}^a : 上部層および下部層への機械給気量 (kg/s)

M_{ij}^s, M_{ij}^a : 給気量の下部層および上部層への貫入量 (kg/s)

M_{2i}^S, M_{2i}^A : 上部層および下部層からの機械排気量 (kg/s)

M_{ei}^S, M_{ei}^A : 上部層がある場合およびない場合の室 i の頂部からの自然排気量 (kg/s)

K_{ji} :
 K_{ji}^{SA} :
 K_{ji}^{S} :
 K_{ji}^A :
 K_{ji}^S :
 K_{ji}^A :

} 層に貫入する熱量および化学種の質量分率に関する貫入率

m_0 : ガス化燃料の燃焼速度 (kg/s)

m_0' : 火災ブルームの上部層への貫入量 (kg/s)

C_p : 定圧比熱

R : 気体定数

P_i : 相対圧力 (kg/m²)

T_i : 給気温度 (°K)

Y_i : 給気中の化学種 l の質量分率

T^P : 熱分解の平均温度 (°K)

Y^P : 熱分解時の可燃物の化学種 l の質量分率