建築物の火災と可視化*

岡 泰資**, 須川修身***, 辻本 誠†

Building Fires and Visualization

Yasushi OKA, Osami SUGAWA and Makoto TSUJIMOTO

1. はじめに

建物火災の研究において利用されている可視化技術を筆者らの能力の範囲内で、できるだけ広く紹介したい。

火災現象そのものは、例えば「風」や「川の流れ」とは違って目に見えるものであって、マクロな現象として捉えるのであれば、特に可視化の技術が必要とされるわけではない。しかし、当然ながらミクロにその構造を知りたい現象はいくつもあるわけで、それぞれに応じてさまざまな可視化技術が適用されている。火災研究において、可視化に関連して注目される現象は、大きく以下の三つに分類される。

A. 燃焼の機構を明らかにするための可視化

たとえば、燃焼面の進み方、火炎の伝播速度

B. 火炎の内外を含む燃焼場の温度分布の可視化

たとえば、噴出火炎の温度分布

C. 発生する煙の拡散の仕方を明らかにするための可視化

たとえば、

煙層先端の進行速度

空間への拡がりかた

他の流れによる熱プルームへの影響

Aについては均質で透明な材料であるポリメタクリ酸メチル (PMMA) を用いて、火炎の伝播速度を算出する研究¹⁾ や、燦爛燃焼 (スモルダリング) において熱分解領域 (黒褐色) の進行速度を求める研究²⁾ などが行われているが、特別な材質の材料を選択する点はあるものの、直接的な測定によるものなので、特にはとりあげない。以下 B, C に関するいくつかの研究を紹介する。

2. 赤外カメラを用いた噴出火炎の可視化

開口部からの噴出火炎は上階部への延焼危険性を把握する上で重要な因子^{3), 4)} である。須川・岡は庇 (ベランダ) や垂れ壁の延焼防止効果を確認するため火災気流の温度場をステンレス網などと赤外カメラにより可視化した。

2.1 噴出火炎長さや発熱量との関係

火炎は雰囲気との温度差によって生じた浮力により伸長して形成されるから、発熱量 (Q)、重力 (g)、密度 (ρ)、比熱 (C_p)、温度 (T) によって支配される^{5), 6), 7), 8)}。火源規模を無次元発熱量 Q^* で火炎形状を (長さ/径: L/D) で表現すると、多くの可燃物や火源規模について(1)式のような関係が得られている。 $1 \leq Q^* \leq 7$ では $n = 2/5$ である。

$$L = Q^{*n} \cdot D \quad (1)$$

噴出火炎長は火炎 (あるいは火災室内の燃焼域) に流入する空気量に依存するが、燃焼規模が増加すれば火炎長も伸びるので、単純には上述の関係が成立する。実規模の盛期火災として 40MW

* 原稿受付 1989年10月3日

** 東京理科大学理工学部

*** 東京理科大学火災科学研究所

† 名古屋大学工学部

(15m²のガソリンプール火災に相当)を想定し、
 模型縮尺率を $k=1/15$ として、

$$\dot{Q}_{\text{model}} = k^{5/2} \cdot \dot{Q}_{\text{full}} \quad (2)$$

の熱量を模型に与えている。

2.2 可視化

図1は模型と実大実験との噴出火炎の形状と Q^* の関係を示したもので、相似則が成立していることを示している。したがって、開口部に延焼防火策を設けた場合の模型実験を行えばその効果が予測できる。温度分布の概観を知るため噴出火

(a)風無し：火源を奥に設定、(b) 風無し：火源を開口部に設定、(c) 風有り：火源を奥に設定、(d) 風有り：火源を開口部に設定

図1 模型と実大実験との噴出火炎形状と Q^* の関係

(a) 開口部に何も設置していない場合

(b) 開口部に底を設置した場合

(c) 開口部に垂れ壁を設置した場合

写真1 赤外カメラによる噴出火炎の可視化

炎気流の断面方向にメッシュサイズ 2mm のステンレス網あるいは厚さ 2mm のセラミックシートを設け、噴出火炎の温度分布を赤外カメラによって可視化した結果を写真 1 (a)(b)(c) に示す。

① 開口部に何も設置していない場合 (写真 1 (a))

開口部から流出した火炎熱気流は、熱気流の持つ水平方向への慣性力と浮力の合力方向へ噴出し、次第に上階部で垂直壁へ吸い付く。

② 開口部に庇を設置した場合 (写真 1 (b))

上階部への延焼防止上、庇を設置すれば火災安全性は高まるが、適切な庇長さを決定するには残された問題が多い。

③ 開口部に垂れ壁を設置した場合 (写真 1 (c))

垂れ壁によって流入する空気量が制限され、高温の未燃焼ガスが開口部から噴出し新鮮空気を巻き込んで開口部外に火炎を形成するので、垂れ壁の火災安全性は上記①②より低効果である。

この方法によれば熱電対を多数用いて分布を得る方法に比べ、簡便にしかも広範囲に噴出火炎が形成する温度分布を可視化することができるが、定量的な議論を行うためには放射率に対する十分な考慮が必要である。

3. 煙層先端の進行速度

建築物の安全計画の立場からは火災により発生した煙がどの程度の速さで広がり、いつ居住者の安全が脅かされるかを知ることは重要である。このため、煙の水平・垂直方向の進行速度に注目して研究が行われてきた⁹⁾。また、発生する煙は常温に比べてかなり高温であり、この煙が空間の上部を層を成して流れる時にどの程度下層の空気を巻き込み増量するか、また、厚さを増すかも重要な研究テーマである¹⁰⁾。

3.1 真水と塩水を用いた可視化実験

松下¹¹⁾は着色した塩水と真水を用いた実験で、図 2 の領域の流れを解析している。図 3 に実験装置の概略を示す。塩水への着色はローダミン B によりスリット光を下部からあて、ビデオカメラの映像により煙先端の移動および層厚を観測している (口絵 4 参照)。

結果として伝播速度が密度差および流量に関係し、水面の高さに関係しないこと、水理学的な手法により伝播速度をほぼ予測できることを示している。

3.2 スモークワイヤーによる速度プロファイルの測定

辻本ら¹²⁾は煙を熱気流と考え、図 4 のような廊下で熱気流の温度と速度の関係を測定した。この時、速度プロファイルの測定にスモークワイヤーを用いた (写真 2)。温度と速度プロファイルの例を図 5 に示した。また、同様の手法で傾斜した天井面での流れについても実験を行った¹³⁾。流れは 3.1

図 2 天井面に衝突するプルームの概念図

図 3 塩水と真水を利用する実験装置

図4 実験廊下の略図

図4で $X=65\text{ m}$ 地点, 左は発熱量0 (点火前) の状態
写真2 スモークワイヤーによる速度プロファイル測定例

図5 温度・速度プロファイルの測定例

と同様, 水平流については廊下の先端の条件を, 傾斜流では斜面角度を境界条件に水理学的手法で記述できることが示された。

3.3 大空間での煙プルーム挙動

火災安全, 特に避難安全にかかわる煙流動として, 3.1, 3.2でとりあげた水平・垂直方向への流れの他に, 大空間 (劇場やアトリウムなど) でどんなふうに煙が広がるかを知ることが必要となる。

る。

この現象については田中¹⁴⁾が模型実験に基づいて二層ゾーンモデルによる予測手法を提案し, 一般に用いられているが, 空間およびその開口部の幾何学的関係や熱プルーム (火源) の位置によっては精度に不十分さが否めない。そこで, 開口条件が特殊な空間に対しては模型実験による予測が必要となる。ところが, この種の現象について相似則の提案^{15), 16)}はあるものの, 確認実験がなされていなかった。辻本¹⁷⁾は大空間での煙流動を熱プルームが支配する対流現象と考え, 自由空間での熱プルームを記述する変数を用いた次元解析から, 下記のように代表長さと代表時間とが求まるとした。

$$[L] = \left(\frac{Q^2}{g \rho_0^2 C_p^2 T_0^2} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$[t] = \left(\frac{Q}{g^3 \rho_0 C_p T_0} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Q : 火源からの発熱量

C_p, T_0, ρ_0 : 周囲空気の比熱, 絶対温度, 密度

g : 重力加速度

この関係に従い図6のような空間

($27\text{ m} \times 27\text{ m} \times 15\text{ mH}$) の模型 (1/25, 1/10の2種類) で実験を行い, 煙層の動きと温度分布が相似になることを確認した (写真3, 図7)。

図6 実験模型の平面・断面図

1/25, 30''0

1/10, 47''4

写真3 1/25, 1/10スケールでの可視化結果の比較

図7 空間内および開口部での垂直温度分布の時間変化 (上段: 1/25, 下段: 1/10)

煙層の可視化には4Wのアルゴンレーザーによるライトシートを利用した。

4. クリーンルーム内における熱プルームの可視化

初期火災火源からの上昇気流は非常に弱い浮力による流れであるため既存の流れに極めて影響を受け易い。熱気層があれば上昇途中で停滞¹⁸⁾したり, 空調流によって希釈されたり流れの方向を大きく変化させられたりする。須川・岡は火災熱気流と区画内の流れとの相互作用により複雑な流れ^{19), 20)} となるため早期に感知できず, 清浄度も短時間に極度に低下して致命的な損害を受ける懸念があることを, 層流クリーンルーム内で火源上に形成される熱気流と天井面からの下降流とによって作り出される流れ場の可視化を行うことで示した。

4.1 実験方法および可視化方法

図8は実験用の実大層流クリーンルームで, 天井上部および床下に空調流の吹き出し, 吸い込み用のチャンバーが設置されている。吹き出し流は厚さ160mmのULPAフィルターを通して区画に降下し, 開口率40%のフリーアクセスフロアを通して還流する。

模擬火災火源には円火源($\phi 100\text{mm}$)

図8 実大層流クリーンルームの概要

図9 可視化方法

(a) 着火後1秒

(b) 着火後5秒

(c) 着火後10秒

(d) 着火後15秒

写真4 線状火源上に形成されるプルームの可視化

と線状火源 (1 cm×2 m) が使用されている。発熱速度は、それぞれ約 1.6 kW, 13 kW で、この火源規模は ISO の燐焼火災火源規模 (1.5~2.5 kW) に相当する。

可視化には煙発生装置からの煙²¹⁾および漏洩試験用発煙片を用いている。設定状況を図 9 に示す。

4.2 結果

線状火源上に形成されるプルームの着火直後の様子を写真 4 に示す。下降気流速度は 25 cm/sec である。

円形火源上に形成したプルームの様子を写真 5 に示す。下降気流速度は 45 cm/sec である。

どちらの流れの場合も上昇流と下降流の相互干渉のために乱流拡散・混合現象が顕著になる結果、クリーンルームの大部分の空間および床・壁が数秒のうちに汚染されることがわかった。

参考文献

- 1) 大谷英雄他 2 名: PMMA 円柱および角柱の底面燃熱における寸法効果, 火災学会研究発表会概要集, 1982, 27
- 2) 佐藤研二他 3 名: スモルダリングの伝ばの性質に関する研究, 火災学会研究発表会概要集, 1988, 139
- 3) 横井鎮男: 日本火災学会論文集, 第 7 巻 2 号, (1958)
- 4) 横井鎮男: 日本火災学会論文集, 第 8 巻 1 号, (1958)
- 5) Zukoski, E. E., Kubota, T. and Cetegen, B.: "Entrainment in Fire Plumes", Fire Safety Journal, 3, 107-121, 1981
- 6) McCaffrey, B. J.: "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results", NBSIR 79-1910, 1979
- 7) Thomas, P. H. et al: "Some experiments on buoyant diffusion flames", Combustion and Flames, 5, 359-367, 1961
- 8) 寺井俊夫, 新田勝通: 燃熱面熱源より上昇する PLUME について, 建築学会大会学術梗概集, 257-258, 1978
- 9) Handa T., Sugawa O.: "Characterization of Flow Behavior of Hot Fire Products in a Concrete Full-Scale Tunnel", J. Fire Science and Technology, Vol. 1 No. 1 p 45-70 (1981)
- 10) 新田勝通: 火災室からの流出煙性予測における熱損失, 建築学会大会学術梗概集, 1985
- 11) 松下敬幸: 天井面における軸対象煙伝播性状について, 建

写真 5 円形火源上に形成したプルームの可視化

- 築学会大会学術講演梗概集, 1987
- 12) 斉藤平蔵他 3 名: 廊下を流れる煙に関する知見, 建築学会大会学術講演梗概集, 1978, 259
 - 13) Tsujimoto, M.: "Smoke Movement as a Density Current", 7th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, 1985, 274
 - 14) 田中孝義: 小規模建築物の火災のモデル化に関する研究, 京都大学博士論文, 1978
 - 15) 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, 1981, 1
 - 16) Quintiere, J. G.: "Scaling Application in Fire Research", Proc. of the International Symposium on Scale Modeling, 1988, 361
 - 17) 辻本・矢野: 一部に開口のある閉空間での煙流動に関する相似則, 建築学会東海支部研究報告集, 1989. 2, 289
 - 18) Hotta, H., Oka, Y. and Sugawa O.: "Interaction between Hot Layer and Updraft from a Smoldering Fire Source: -Part 1 An Experimental Approach-", FIRE SCI. AND TECH., Vol. 7, No. 2, p 17-26, 1987
 - 19) 須川修身, 岡 泰資, 上野浩志: クリーンルーム内に存在する下降流と火災上昇気流の流れ場の可視化, 流れの可視化 Vol. 9, No. 34, p 221-224, 1989
 - 20) 岡 泰資, 須川修身, 上野浩志: クリーンルーム内の火災熱気流の流れ性状に関する研究, 日本建築学会大会学術梗概集 (九州), p 1017-1018, 1989
 - 21) 瀬田恵之, 菅原仁他: たばこの煙を用いたクリーンルーム内の気流の可視化実験例, 流れの可視化, Suppl. Vol. 7, p 93~96 (1987)