天井付け機械排煙口への空気混入率の予測式

二層ゾーンモデルにおける機械排煙口への空気混入の定式化 (その2)

PREDICTION FORMULA OF AIR ENTRAINMENT RATIO INTO MECHANICAL
SMOKE VENT ON CEILING

Formulation of air entrainment into mechanical smoke vent opening for two-layer zone model Part 2

仁井大策*, 原田和典**

Daisaku NII and Kazunori HARADA

A model was developed to predict the ratio of air entrainment into mechanical smoke vent on ceiling in two-layer environment where upper part is occupied by hot smoke, while lower part is occupied by cold air. Prediction model was developed for both cases that streamline of entrained air is visible (direct entrainment) and that lower air is mixed with smoke before entrained into vent (mixing entrainment). Direct entrainment takes place when actual smoke layer thickness is smaller than critical thickness for the onset of entrainment developed in part 1 of research. Mixing entrainment takes place when actual smoke layer is larger than critical thickness. In case of direct entrainment, flow pattern was approximated by either plane, line or point sink according to the scale of vent opening relative to the scale of flow field below opening. Air entrainment ratio is calculated by the fraction of surface area of control volume that is below smoke-air interface over the entire control volume surface. In case of mixing entrainment, interface is lifted towards the opening. It was assumed that the degree of mixing is proportional to the surface area of lifted interface. Varying the combination of smoke layer temperature, thickness and venting rate, experimental measurements was repeated for 88 times. In case of direct entrainment, it was demonstrated that the streamline for smoke-air interface outside control volume was lifted upwards when smoke layer thickness was close to critical thickness. The degree of lifting would be expressed by a linear function of the ratio of actual smoke layer thickness to critical thickness. In case of mixing entrainment, it was found that air entrainment ratio is inversely proportional to 2 power of ratio of actual smoke layer thickness to critical thickness. Predicted results are in good agreement with experimental results.

Keywords: Fire, Mechanical Smoke Venting, Air Entrainment Ratio, Critical Smoke Layer Thickness, Interface Mixing

火災, 機械排煙, 空気混入率, 限界煙層厚さ, 界面混合

1. はじめに

1.1. 研究の背景

建築物の火災時における煙制御計画を検討するためには、防排煙設備の効果を正しく考察した上で、煙流動性状を的確に予測することが重要である。

煙制御設備の代表的なものとして機械排煙がある。例えば出火室を機械排煙すれば、出火室の煙層降下時間を遅らせ、隣室や廊下、階段室等への漏煙を防ぐことができる。しかし、現在実務で広く用いられている二層ゾーン概念に基づく煙流動予測プログラム¹⁾においては、機械排煙口への質量流量は全て煙層から流入すると仮定されており、下部層の空気が誘引されて混入する現象は考慮されていない。^{注1)}

その結果、煙排出量を過大に評価することになり、煙層降下時間や隣室への漏煙開始時間を実際よりも長く見積もってしまう危険がある。また、意図的に空気を混入させて排煙ダクト内の煙温度を下げる事ができれば、火災室の温度が高くても排煙機を停止させずに長時間運転することが可能になると考えられる。

以上の観点より、機械排煙口へ混入する空気量を予測する方法が望まれている。

1.2. 既往の研究

下部層の空気が混入するような条件で機械排煙を行った場合の排煙効率に関する研究として、Vauquelinら²⁾の模型実験があげられる。彼等はチューブ状空間で発生した煙に対し、排煙口の設置部位や形状によって排煙量が異なることを示している。しかし、煙発生量と排出量の関係を示したのみで、煙層厚さ、温度および流れのパターンを考慮した予測方法には至っていない。

水理学の分野でも同様に、Hocking³⁾や Forbes⁴⁾が二層流体における超過限界での流れに関する研究を行っている。これらの研究では、下層流体中に理論的な線吸い込みあるいは点吸い込みを想定し、上層流体が吸引される際の界面形状を解析的に求めている。しかし、非圧縮、非粘性の理想流体を仮定しているため、界面での混合が考慮できない上、解析解は点吸い込みと線吸い込みに対してしか得られないので、実用のアスペクト比の機械排煙口への空気混入に適用するのは無理がある。

1.3. 研究の目的

以上のように、様々な排煙口寸法、煙層厚さと温度、排煙風量の組み合わせにおける排煙口への空気混入を定量的に予測することは現状の知見だけでは困難である。そのため、既報⁷⁾では二層状態に

* 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程
(日本学術振興会特別研究員)
** 京都大学大学院工学研究科 助教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.
(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion Scientists)
Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

おける機械排煙口への空気混入の有無を判別するための検討を行い、煙層厚さが小さければ、排煙口直下の空気が流路を形成して排煙口へ直接吸い込まれ（直接混入）、一方、煙層厚さが大きい場合には、下部層の空気が排煙口へ直接混入しないものの、界面において煙層へ混合した後に吸い込まれること（混合後混入）を調べた。その結果、下部層の空気が天井付け排煙口へ直接混入しない限界での煙層厚さ（限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ [m]）は、排煙口短辺を代表寸法としたフルード数 $Fr = v/(\Delta\rho g H/\rho_s)^{1/2}$ を用いて

$$\frac{d_{s,cr}}{H} = \begin{cases} 8.24Fr^2 & \text{[面吸い込み]} \\ 0.98Fr^{2/3} & \text{[線吸い込み]} \\ 0.64(W/H)^{2/5} Fr^{2/5} & \text{[点吸い込み]} \end{cases} \quad (1)$$

と表されることを示した。ここで、 W 、 H はそれぞれ排煙口の長辺 [m] および短辺 [m] ($W \geq H$)、 v は排煙口風速 ($=V_e/WH$) [m/s]、 ρ は密度 [kg/m³]、 g は重力加速度 [m/s²] である。

本報では、二層ゾーン煙流動予測プログラムに組み込むことを前提として、種々のアスペクト比の天井付け排煙口について限界煙層厚さと実際の煙層厚さが与えられたときの空気混入率の実験式を作成することを目的とする。

本報で検討した内容は次の3点である。

(1) 理論式の作成

空気が排煙口へ直接混入する場合、界面で煙と混合した後に吸い込まれる場合のそれぞれについて、空気混入率の理論式を導出した。

(2) 模型実験

模型実験により、排煙口周辺の流れのパターンに応じて空気混入率を測定し、考察を行った。

(3) 予測精度の確認

模型実験の結果から理論式の未知数を確定し、空気混入率の予測精度を確認した。

2. 理論式の作成

本章では、寸法 W [m] $\times$ H [m] の排煙口が天井に設けられ、風速 v [m/s] で排煙する場合の空気混入率の予測式を理論的に定式化する。煙層の温度を T_s [°C]、厚さを d_s [m]、下部層の温度を T_a [°C] とする。

図1に限界煙層厚さに対する煙層厚さの比 $d_s/d_{s,cr}$ の増加による空気混入率の変化の概要を示す。本報では、排煙口へ到達する過程に関わらず排煙風量に対する排出される空気の風量の比を空気混入率と呼ぶ。

界面での混合を無視して直接混入のみを考えると、煙層がない場合 ($d_s/d_{s,cr}=0$) には空気混入率 ϕ は1となり、実際の煙層厚さが限界煙

図1 煙層厚さによる空気混入率の変化

層厚さに近づくにつれて、空気混入率は0に漸近するはずである。

しかし、煙層がある程度厚くなると、混入する空気の流量に比べて界面で混合する空気量が無視できなくなり、煙層厚さが限界煙層厚さと等しくなっても、空気混入率は0にはならない。実際の煙層厚さが限界煙層厚さよりも大きい場合 ($d_s/d_{s,cr} \geq 1.0$) には、排煙口直下の界面が持ち上げられ、煙層と混合した空気が排煙口へ吸い込まれる。煙層厚さが大きくなると、界面の盛り上がり小さくなり、煙層へ混合する空気量も小さくなる。従って、空気混入限界を超えて煙層が厚くなると、空気混入率は徐々に減少すると考えられる。

本論文では、空気が直接混入する場合(2.1節)と界面で混合した後に排煙口へ吸い込まれる場合(2.2節)とに分けて理論式を作成する。

2.1. 空気が排煙口へ直接混入する場合

以下では、限界煙層厚さよりも煙層厚さが小さく、下部層の空気が排煙口へ直接混入する場合での空気混入率の定式化を行う。

図2に排煙口周辺の風速ベクトルを示す。排煙口のごく近傍では排煙口の大きさが流れに及ぼす影響が大きく、排煙口直下では風向がほぼ鉛直上向きとなる。排煙口から下方に離れるにつれて、排煙口の大きさが流れに及ぼす影響が徐々に小さくなり、排煙口短辺の影響が無視できるようになると、風向がほぼ鉛直上向きとなる部分は線分となる。さらに離れると、排煙口長辺の影響も無視でき、風向が鉛直上向きとなるのは排煙口中心直下の点のみとなる。

排煙口にほぼ垂直に流れる部分は図中に示す破線内の領域となり、以下ではこれを鉛直上昇領域と呼ぶ。また、これらの流れのパターンを面吸い込み、線吸い込み、点吸い込みと呼び、流れのパターンが遷移する位置は式(1)の3つの曲線の交点として、

$$\begin{aligned} \text{面吸い込み} : d_{s,cr}/H < 0.338 \\ \text{線吸い込み} : 0.338 \leq d_{s,cr}/H < 0.338(W/H) \\ \text{点吸い込み} : 0.338(W/H) \leq d_{s,cr}/H \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。図2中の一点鎖線は流れのパターンの遷移する高さを示したものである。式(1)で求められる限界煙層厚さに対応する高さで鉛直上昇領域を切断すると、図2に示すように、交差部分は長方形、線分または点となる。この寸法を W' [m] $\times$ H' [m] とすると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{面吸い込み} (d_{s,cr} < 0.338H) : \begin{cases} H' = H - d_{s,cr}/0.338 \\ W' = W - d_{s,cr}/0.338 \end{cases} \\ \text{線吸い込み} (0.338H \leq d_{s,cr} < 0.338W) : H' = 0, W' = W - d_{s,cr}/0.338 \\ \text{点吸い込み} (0.338W \leq d_{s,cr}) : H' = W' = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

図2 排煙口周辺の流れのパターンと鉛直上昇領域の形状

式(3)で求めた鉛直上昇領域の切断面とその周辺の領域とで構成される仮想検査面を考える。この仮想検査面を通過する煙と空気の流量より空気混入率の予測式を導く^{注2)}。切断面が長方形の場合は、仮想検査面として図3(上)のように切断面の端部に限界煙層厚さを代表半径とした4つの1/4円筒と4つの1/8球をとる。排煙風量が大きくなるにつれ、限界煙層厚さも大きくなり、鉛直上昇領域と限界煙層厚さとの交差部分は、図3(左下)に示すように、線分へと変化し、仮想検査面は1/2円筒と2つの1/4球となる。さらに排煙風量が大きくなると、図3(右下)に示すように、交差部分は点となり、仮想検査面は半球となる。

図3 線吸い込みと点吸い込みの仮想検査面

例として、点吸い込みの場合について、排煙口中央断面での流れの様子を図4に示す。図中の半円は仮想検査面であり、混入する空気は界面より下方の仮想検査面を通過して排煙口へ到達する。下部層の空気の混入に伴い、排煙口周辺の界面は持ち上げられ、下部層に接する仮想検査面を通過して排煙口へ空気が混入する。界面が仮想検査面と交差する位置での厚さ（以下、有効煙層厚さ）を $d_{s,eff}$ とおき、仮想検査面に流入する風速は均一であると近似すると、空気混入率 ϕ は次式のように仮想検査面の全面積に対する界面より下方部分の面積との比で表される。

$$\phi = \frac{WH' + 2d_{s,cr}(W' + H')\cos^{-1}\left(\frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}}\right) + 2\pi d_{s,cr}^2\left(1 - \frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}}\right)}{WH' + \pi d_{s,cr}(W' + H') + 2\pi d_{s,cr}^2} \quad (4)$$

また、図1に示したように、空気混入限界に近い条件では、図4に示すように混合層が生じ、界面が不鮮明になる。この場合には、混合層の中央を界面とし、有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ を求める。

図4 排煙口直下の流れ

有効煙層厚さは簡易に求めることができず、模型実験の結果より第4章で煙層厚さ d_s と有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ との関係を導く。

図5に界面での混合を無視し、界面は仮想検査面との交点から持ち上げられる ($d_s = d_{s,eff}$) と仮定した上での式(4)により計算した空気混入率と煙層厚さの関係を示す。式(4)を変形すると、

$$\phi = \frac{\left(\frac{W}{H} - \frac{d_{s,cr}}{H}\right)\left(1 - \frac{d_{s,cr}}{0.338H}\right) + 2\frac{d_{s,cr}}{H}\left(\frac{W}{H} + 1 - 2\frac{d_{s,cr}}{0.338H}\right)\cos^{-1}\left(\frac{d_s}{d_{s,cr}}\right) + 2\pi\left(\frac{d_{s,cr}}{H}\right)^2\left(1 - \frac{d_s}{d_{s,cr}}\right)}{\left(\frac{W}{H} - \frac{d_{s,cr}}{0.338H}\right)\left(1 - \frac{d_{s,cr}}{0.338H}\right) + \pi\frac{d_{s,cr}}{H}\left(\frac{W}{H} + 1 - 2\frac{d_{s,cr}}{0.338H}\right) + 2\pi\left(\frac{d_{s,cr}}{H}\right)^2} \quad (5)$$

となり、空気混入率 ϕ は $d_s/d_{s,cr}$ 、 W/H 、 $d_{s,cr}/H$ の3つのパラメータによって表される。

図5a)は $d_{s,cr}/H=1$ のままでアスペクト比を変化させたときの空気混入率である。アスペクト比が1~2のように小さければ、点吸い込みとなり、 $d_s/d_{s,cr}$ の増加に応じて空気混入率は直線的に減少する。アスペクト比が大きくなると、点吸い込みの場合に比べて空気混入率は増加し、上に凸の曲線となる。

図5b)に $W/H=10$ で $d_{s,cr}/H$ を変化させた場合の空気混入率を示す。 $d_{s,cr}/H=1$ の場合、排煙口の大きさの影響を受けやすいため、アスペクト比無限大とした予測値に近い値をとる。 $d_{s,cr}/H$ が大きくなるに従い、予測値は点吸い込みの値に近づき、 $d_{s,cr}/H > 4$ では点吸い込みの場合と一致する。

図5 界面の持ち上げりを無視した直接混入時の空気混入率の予測

2.2. 空気が煙と混合してから排煙口へ到達する場合

実際の煙層厚さが限界煙層厚さよりも大きく、空気が煙と混合してから排煙口へ到達する場合には、図6に示すように、排煙口直下の空気が誘引されて盛り上がり、空気と煙の混合が生ずる。界面の盛り上がりが大きいくほど混合量が増えることは容易に想像される。ここでは第一近似として、単位時間あたりに煙と混合する空気量が界面の盛り上がり部分（以下、混合面）の底面積 $A_{mix}[\text{m}^2]$ に比例すると仮定する。混合する空気量が最大になるのは、実際の煙層厚さと限界煙層厚さが一致するときである。このときの空気混入率 ϕ_{cr} を、混合面の面積を $A_{mix,cr}[\text{m}^2]$ とすれば、

$$\phi/\phi_{cr} = A_{mix}/A_{mix,cr} \quad (6)$$

となる。

空気混入限界での空気混入率 ϕ_{cr} は式(4)により求められる。一方、混合面積 A_{mix} を求めるためには、混合面の形状に関する情報が必要である。まず、界面が持ち上がる高さ（以下、界面上昇高さ）については、界面に誘引された空気を持つ運動エネルギーのほぼ全てが界面を持ち上げる仕事に使われると考えると、

$$\Delta Z = \frac{\rho_a v^2 / 2}{\Delta \rho g} \quad (7)$$

となる。ここで、 v は図6に示すように、排煙口中央部直下の煙層下端高さにおける空気の流れ速[m/s]である。 v を排煙風量で表すと、図3における仮想検査面の代表半径を実際の煙層厚さ d_s に置き換えた検査面の表面積を用いて

$$v = V_e / \left\{ W''H'' + \pi d_s (W'' + H'') + 2\pi d_s^2 \right\} \quad (8)$$

と表される。ここで、 W'' 、 H'' は図6（下）に示すように、煙層下端高さでの鉛直上昇領域の幅と奥行き[m]である。混合面の代表半径は界面上昇高さ ΔZ に比例すると仮定すれば、混合面積 A_{mix} は

$$A_{mix} = W''H'' + 2(a\Delta Z)(W'' + H'') + \pi(a\Delta Z)^2 \quad (9)$$

となる。ここで、 a は混合面の半径と界面上昇高さの比である。

以上の方法で求めた混合面積を式(6)に代入すると

$$\frac{\phi}{\phi_{cr}} = \frac{W''H'' + 2(a\Delta Z)(W'' + H'') + \pi(a\Delta Z)^2}{W''H'' + 2(a\Delta Z_{cr})(W'' + H'') + \pi(a\Delta Z_{cr})^2} \quad (10)$$

となる。ここで、 ΔZ_{cr} は空気混入限界での界面上昇高さ[m]である。上式を変形すると、式(5)と同様に空気混入率 ϕ は $d_s/d_{s,cr}$ 、 W/H 、 $d_{s,cr}/H$ の3つのパラメータによって表される。

例として、 $d_{s,cr}/H=1$ の場合を図7に示す。アスペクト比1~2の場合には点吸い込みとなり、式(8)~(10)で $W''=H''=0$ とし、更に式(7)を式(10)に代入すると、次式のように空気混入率は $d_s/d_{s,cr}$ の8乗に反比例する。

$$\frac{\phi}{\phi_{cr}} = \frac{\pi(a\Delta Z)^2}{\pi(a\Delta Z_{cr})^2} = \frac{v_{cr}^4}{v^4} = \left(\frac{V_e/2\pi d_{s,cr}^2}{V_e/2\pi d_s^2} \right)^4 = \left(\frac{d_s}{d_{s,cr}} \right)^{-8} \quad (11)$$

一方、アスペクト比が無限大の場合は線吸い込みとなり、空気混入率は $d_s/d_{s,cr}$ の2乗に反比例する。アスペクト比が4および5の場合をみると、 $d_s/d_{s,cr}$ が小さいときには線吸い込みであるが、煙層が厚くなると、それぞれ $d_s/d_{s,cr}=1.38$ 、 1.70 で点吸い込みへと遷移し、アスペクト比が1の場合と一致する。アスペクト比6、10の場合では、 $d_s/d_{s,cr}<2$ では点吸い込みとならず、アスペクト比10の場合はアスペクト比が無限大の場合とほぼ一致する。

図6 界面混合（線吸い込みの場合）

図7 界面混合時の空気混入率の予測

3. 模型実験

本章では、様々なアスペクト比の排煙口を用いて空気混入率を測定し、煙層温度と厚さによる流れ場の変化を調べ、空気の流れ口への到達過程に関して考察する。

3.1. 実験概要

図8に実験装置の概要を示す。実験装置に関しては、既報で述べたものと同一のものである。排煙口は天井面中央に設け、バルブの開度と火源の高さを調節することにより、排煙風量および煙層厚さを目標とする値に設定した。

煙層、下部層および排煙ダクト内の炭酸ガス濃度は、熱電対ツリー最上部、最下部および排煙ダクト内に設けた直径10mmのチューブから気体をサンプリングし、非分散型赤外線吸収式炭酸ガス濃度計（レンジ0-1%、誤差1%未満）により測定した。煙層の炭酸ガス濃度は、天井近傍の常時測定点（熱電対ツリー最上部）での測定値を煙層内の平均値に補正するために、各アスペクト比での濃度分布をあらかじめ測定しておき、その平均値と常時測定点での測定値の比率を補正係数として用いた。

空気混入率は煙層、下部層および排煙ダクト内の炭酸ガス濃度をそれぞれ Y_s 、 Y_a 、 Y_d とすると、次式を用いて計算した。

$$\phi = \frac{Y_s - Y_d}{Y_s - Y_a} \quad (12)$$

なお、その他の測定項目（煙層の温度と厚さ、排煙口風速、排煙口周辺の温度、炭酸ガス濃度、風速分布）は既報⁷⁾で示した方法によった。

図8 実験装置

3.2.実験条件

測定に用いた排煙口寸法を表1に示す。アスペクト比は1,2,8,13,40および排煙口短辺に沿って垂れ壁を設けることによりアスペクト比無限大を想定したもの7種類である。各アスペクト比について8~27条件、合計88条件で実験を行った。

表1 実験条件

アスペクト比	排煙口寸法[cm]	アスペクト比	排煙口寸法[cm]
1	10 x 10	13	3 x 40
	15 x 15	40	1 x 40
	25 x 25	∞ (垂れ壁付き)	5 x 40
2	10 x 20		1 x 40
8	5 x 40		

3.3.実験結果

以下では、排煙口周辺の流れ場を目視観察および測定し、空気混入時および混合時の性状を考察した。

例として、アスペクト比1($H \times W = 10\text{cm} \times 10\text{cm}$)で空気が直接混入する場合、空気混入限界および空気が煙層へ混合する場合の炭酸ガス濃度、温度、風速の分布をそれぞれ図9、10、11に示す。各分布の測定範囲は、高さが天井から15cmもしくは20cm、幅が排煙口を中心とした45cmの装置長手方向断面で炭酸ガス濃度、温度分布を測定し、風速は排煙口中心から10cmおよび20cm離れた同心円上の7点で測定した。

a) 空気が排煙口へ直接混入する場合

図9は排煙口風速が5.29m/s、煙層と下部層の温度差が56.1℃、煙層厚さが0.164mの場合の結果である。この条件では式(1)で計算した限界煙層厚さは0.195mとなり、空気混入が目視で確認された。

炭酸ガス濃度分布(図9左)を見ると、炭酸ガス濃度0.05%の等濃度線が排煙口に到達しており、空気の一部は排煙口へ直接混入している。少し外側には濃度勾配が生じており、空気が排煙口へ向かう途中で煙と混合して低濃度の混合気となった後に排出されるものもある。温度分布(図9右)でも同じ性質が見られるが、濃度分布に比べて少しなだらかな分布となる。

図9(右)に示す風速分布より、排煙口から10cmの距離では排煙口直下の風速が大きくなっているが、20cm($=d_{s,cr}$)離れるとほぼ均一となり、風向はほぼ排煙口中心に向かっていて、排煙口周辺の流れのパターンが点吸い込みであり、仮想検査面上の風速分布はほぼ均一である。

b) 空気混入限界の場合

図10に排煙口風速が2.45m/s、煙層と下部層の温度差が59.2℃、煙層厚さが0.132mで目視による空気混入限界の場合の結果を示す。

図9と比較すると明らかな違いが排煙口直下に表れている。排煙口に直接到達する部分はなく、全ての部分で煙層と下部層の中間の値となっており、下部層の空気は全て煙層と混合してから排煙口へ吸い込まれることを示している。この場合の空気混入率は0.17であり、目視で空気流路が確認されないにも関わらず、少なからぬ空気が下部層から排出されている。

風速分布をみると、排煙口から10cm離れた位置では排煙口直下の風速が比較的大きくなっているが、20cm離れるとほぼ均一の風速となる。

c) 界面で空気が混合する場合

図11に排煙口風速が1.80m/s、煙層と下部層の温度差が54.8℃、煙層厚さが0.219mで空気混入限界よりも煙層が十分に厚い場合の結果を示す。この条件での式(1)による限界煙層厚さは0.118mであり、設定した煙層厚さはこれの約1.9倍である。

等濃度線および等温線の形状は図9、10に比べるとかなり平坦なものとなり、排煙口直下の濃度および温度が低い領域はさらに小さくなる。風速分布では排煙口から10cm離れるとほぼ均一の風速である。

以上のa)~c)を総括すると、下記の2点となる。

- 1) $d_s/d_{s,cr}$ が小さいときには大部分の空気は排煙口へ直接混入し、 $d_s/d_{s,cr}$ が増加するにつれて、混入と混合の共存、さらには混合のみの3形態で空気が排出されることが確かめられた。
- 2) 限界煙層厚さが排煙口寸法と同等あるいはそれ以上であれば、限界煙層厚さを代表半径とする仮想検査面上の風速分布は均一とみなすことができ、理論式を導いた時の仮定と整合する。

図9 空気が混入する場合の炭酸ガス濃度・温度・風速分布
[$v=5.29\text{m/s}$, $d_s=0.164\text{m}$, $d_{s,cr}=0.195\text{m}$, $\Delta T=56.1^\circ\text{C}$, $\phi=0.37$] 図10 空気混入限界での炭酸ガス濃度・温度・風速分布
[$v=2.45\text{m/s}$, $d_s=0.132\text{m}$, $d_{s,cr}=0.131\text{m}$, $\Delta T=59.2^\circ\text{C}$, $\phi=0.17$] 図11 空気が煙層へ混合する場合の炭酸ガス濃度・温度・風速分布
[$v=1.80\text{m/s}$, $d_s=0.219\text{m}$, $d_{s,cr}=0.118\text{m}$, $\Delta T=54.8^\circ\text{C}$, $\phi=0.08$]

4. 未知数の確定と理論式の精度確認

4.1. 未知数の確定

第2章で導いた理論式において空気混入時の有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ については、陽に定式化を行っていないが、空気混入時の煙層と下部層との界面の形状から有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ と煙層厚さ d_s との関係を求めた。

図12に示す写真とスケッチは図9の条件において、発煙管により界面近傍の空気を着色して界面の形状を観察したものである。界面上昇の様子を明確にとらえるため、写真撮影時にはグリッドが描かれた紙を排煙口中央断面においた。図12右側のスケッチに描かれている円は限界煙層厚さを半径とした仮想検査面であり、天井面での矢印は排煙口中心を表す。

いくつかの場合には、図13に示すように、界面付近の空気を白く着色すると、着色された空気は煙と混合しながら排煙口へ吸い込まれた。この場合には、混合層の中央を界面位置とした。

吸い込みパターンによる界面上昇の違いを比較するために、図14にアスペクト比が1と無限大で $d_s/d_{s,cr}$ がほぼ等しい条件での界面形状を示す。2つの実験とも排煙口風速が約 2.3m/s、煙層と下部層の密度差が約 0.09kg/m³ の条件で行った。

結果を比較すると、風速、密度差が等しいにもかかわらず、アスペクト比1の場合の界面はアスペクト比無限大の場合のものより排煙口近くで上昇し始める。しかし、どちらの条件でも図中に示した限界煙層厚さを半径とする仮想検査面と交差する位置（図中・印）で界面が上昇し始める。従って、界面形状は空間寸法を限界煙層厚さで無次元化して整理する。

図12 空気混入時の写真およびスケッチ

図13 混合を伴う空気混入

図14 界面形状のアスペクト比による差

界面形状の観察は、模型実験で用いた各アスペクト比において3~6条件、合計29条件で行い、 $d_s/d_{s,cr}$ の範囲は0.325~1.18であった。

以上の方法で得られた界面形状を限界煙層厚さで無次元化して図15に示す。図中の天井面に示した矢印は排煙口中央を表す。

図15上段に示すように、 $d_s/d_{s,cr}$ が0.33~0.57程度の場合、仮想検査面より外側での界面はほぼ水平となり、煙層下端と一致する。仮想検査面と交差すると同時に界面が上昇し始め、排煙口へ向かう。一方、図15中段および下段左に示すように、 $d_s/d_{s,cr}$ が大きくなると、界面上昇位置は仮想検査面よりも外側になる。また、参考までに図15下段右に示すように、限界煙層厚さよりも煙層が大きくなると ($d_s/d_{s,cr}=1.18$)、着色された空気は直接排煙口へ混入しないが、界面の上昇は大きい。

図15に示した界面形状ごとに有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ を煙層厚さ d_s に対してプロットした結果を図16に示す。図中の各データに付属する線分は混合層上端および下端の幅を示す。

有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ は $d_s/d_{s,cr} < 0.5$ の範囲ではほぼ煙層厚さ d_s と等しいが、煙層厚さが大きくなると徐々に煙層厚さよりも小さな値となる。そこで、 $0.5 < d_s/d_{s,cr} < 1.0$ の範囲で直線回帰を行うと、

$$d_{s,eff}/d_{s,cr} = 0.73(d_s/d_{s,cr} - 0.5) + 0.5 \quad (13)$$

が得られた。上式を図16中にあわせて示す。

図15 界面形状の比較

図16 煙層厚さと界面上昇の相関

4.2. 理論式の精度確認

前節で求めた有効煙層厚さを理論式に用いれば、空気混入率の予

測が可能となる。そこで、本節では、実験で得られた空気混入率と比較することにより理論式の精度を確認する。

はじめに、全ての実験条件において限界煙層厚さを計算し、式(2)を用いて吸い込みパターンを分類した。その結果、合計 88 個の実験のうち、点吸い込みとなるものが 50 個、線吸い込みとなるものが 38 個（そのうち、有限のアスペクト比でも線吸い込みとなるものが 4 個）であった。面吸い込みとなる条件は今回使用した装置で再現できなかった。^{注3)}

4.2.1. 空気が直接混入する場合

本節では、煙層厚さが限界煙層厚さより小さく、空気が直接排煙口へ混入する場合の結果を示す。

図17に点吸い込み、線吸い込み（ただし、有限のアスペクト比で線吸い込みとなるものは除外する）のそれぞれについて、 $d_s/d_{s,cr} < 1.0$ となるものを示す。図中の実線は式(4)の有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ に式(13)を用いた場合の予測値である。実験値と予測値を比較すると、良く一致している。参考のため、有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ の代わりにあえて煙層厚さ d_s を用いると、界面の持ち上りを無視することになり、図中の破線となる。式(13)で示したように $d_s/d_{s,cr} \rightarrow 1.0$ では有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ が煙層厚さ d_s よりも小さくなるため、実験値との一致は悪くなる。

図17 直接混入する場合($d_s/d_{s,cr} < 1$)の予測値と実験値の比較

4.2.2. 界面で煙と混合した後に吸い込まれる場合

界面で空気が煙と混合した後に排煙口へ吸い込まれる場合の予測値と実験値を比較する。式(13)を用いると、空気混入限界、すなわち $d_s/d_{s,cr} = 1.0$ では限界煙層厚さで無次元化した有効煙層厚さは $d_{s,eff}/d_{s,cr}$ は 0.87 となる。これを式(4)に代入すると、図17に示すように、 $d_s/d_{s,cr} = 1.0$ における空気混入率 ϕ_{cr} は点吸い込みの場合には 0.14、線吸い込みの場合には 0.33 となる。この ϕ_{cr} で無次元化してプロットした $d_s > d_{s,cr}$ の実験値を図18に示す。混合時の予測式(10)より空気混入率は点吸い込みの場合では $d_s/d_{s,cr}$ の 8 乗に、線吸い込みの場合は

$d_s/d_{s,cr}$ の 2 乗に反比例する。これらを図示したものが図中の直線である。

図より、線吸い込みの場合の理論式 $\phi/\phi_{cr} = (d_s/d_{s,cr})^2$ が実験値のほぼ上限、点吸い込みの場合の理論式 $\phi/\phi_{cr} = (d_s/d_{s,cr})^8$ が実験値の下限に対応する。従って、空気混入率は $d_s/d_{s,cr}$ の 2 乗に反比例すると考えておけば空気混入率を大きめに予測できる。^{注4)}

図18 界面で混合する場合($d_s/d_{s,cr} \geq 1$)の予測値と実験値の比較

4.2.3. 理論式の精度

図19に全ての条件において予測値と実験値の比較を示す。図中の破線は誤差 $\pm 10\%$ を表し、この範囲に以内に 88%、また、誤差 $\pm 5\%$ 以内にも 49% のデータが入っており、ばらつきは十分に小さい。さらに、全てのアスペクト比において系統的な誤差は認められない。従って、予測式の精度は十分と考えられる。

図19 空気混入率の予測値と実験値との比較

5. 結論

限界煙層厚さと煙層厚さが与えられたときに、種々のアスペクト比の排煙口への空気混入率の予測式を作成し、以下の知見を得た。

- (1) 空気混入率の予測は、煙層厚さが混入限界煙層厚さよりも小さく、下部の空気が排煙口へ直接混入する場合と、煙層が混入限界煙層厚さよりも大きく、下部の空気が煙層の一部と混合した後に排煙口へ吸い込まれる場合とに分けて行える。
- (2) 空気が排煙口へ直接混入する場合には、仮想検査面の形状を流れのパターンに応じて設定し、空気が通過する仮想検査面の面積から空気混入率を求められる。仮想検査面を設定する際には排煙口直下の鉛直上昇領域、空気が通過する面積を求める際に

は界面の持ち上がりを考慮すればよい。

- (3) 下部の空気が上部の煙層へ混合した後に排煙口へ吸い込まれる場合では、界面の盛り上がり部分の面積に混合空気流量が比例するとして空気混入率を予測することができる。空気混入率の上限値は限界煙層厚さに対する煙層厚さの比 $d_g/d_{s,cr}$ の 2 乗に反比例し、下限値は $d_g/d_{s,cr}$ の 8 乗に反比例する。

注釈 1

本研究を進める途中で公表された BRI2002⁹⁾には、Spratt ら⁹⁾の実験式を用いて排煙効率を計算するモデルが組み込まれている。しかし、空気混入限界と煙層がない場合との予測値を単に補間したものであり、根拠は示されていない。結果として、本研究における混合を無視した点吸い込みの空気混入率の予測モデルと同一のものとなっており、本研究により理論的裏付けがなされた。

注釈 2

図3の仮想検査面の形状は既報で限界煙層厚さを求めたときのものとは異なる。限界煙層厚さを求める際の形状は排煙口風速および煙層と下部層の密度差との二次的関係を導くために近似したものであるが、式(1)は限界煙層厚さの測定値に基づいて係数を決定している。従って、仮想検査面とは形状は異なるが、本報においても限界煙層厚さを計算する際に式(1)を用いても問題ない。本報では、限界煙層厚さよりも排煙口に近い位置での流れを対象としているので、排煙口形状の影響を考慮するために仮想検査面の形状を既報とは違うものを用いた。

注釈 3

式(1)より面吸い込みと線吸い込みの境界となるフルード数を求めると 0.2 となる。例えば、煙層温度を 100℃、排煙口寸法を 30cm 角の正方形とすると、フルード数が 0.2 のとき、排煙風量は 0.86m³/min となり、極めて小さくなる。従って、実在の排煙設備では面吸い込みになることは非常にまれである。

注釈 4

煙層厚さが限界煙層厚さよりも大きく、下部の空気が煙と混合した後に排煙口へ到達する場合には、混合面の半径と界面上昇高さとの比 a がわかれば、式(7)(8)(10)を用いて空気混入率を直接的に予測できる。

今回行った実験のいくつかにおいて、本文図10に示すように、濃度分布を測定している。煙層下端より上方で最低の等濃度線を選び、その頂部を界面上昇高さ、煙層下端と交差する幅を混合面の直径とする。両者の比を求めると、 $a=22.3/8.89=1.25$ となる。同様に他の 2 例についても示すと次表となり、平均すると、 $a=1.62$ が得られる。これを式(10)に用いればよい。

表 界面上昇高ささと混合面直径

条件		上昇高さ	混合面直径	a
排煙口寸法	$d_g/d_{s,cr}$			
10cm x 10cm (図10)	1.01 (目視混入限界)	8.89cm	22.3cm	1.25
1cm x 40cm	0.87 (目視混入限界)	6.64cm	23.8cm	1.79
1cm x 40cm (infinite)	1.19 (目視混入限界)	5.58cm	20.4cm	1.83
平均				1.62

謝辞

本研究の一部は、文部科学省平成 14 年度科学研究費補助金（特別研究 14001990、研究代表者：仁井大策）の助成を受けた。ここに謝意を記す。

記号

a : 比例係数[-], A_{mix} : 混合面積[m²], $A_{mix,cr}$: 目視混入限界での混合面積[m²], d_s : 煙層厚さ[m], $d_{s,cr}$: 限界煙層厚さ[m], $d_{s,eff}$: 有効煙層厚さ[m], Fr : フルード数[-], g : 重力加速度[m/s²], H, W : 排煙口短辺および長辺[m], H', W' : 限界煙層厚さに対応する高さでの鉛直上昇領域の断面寸法[m], H'', W'' : 煙層下端高さでの鉛直上昇領域の断面寸法[m], T_a : 下部層温度[℃], T_s : 煙層温度[℃], v : 排煙口風速[m/s], v'' : 煙層下端で誘引される空気の風速[m/s], V_e : 排煙風量[m³/s], Y_a : 下部層の炭酸ガス濃度[vol%], Y_d : 排煙ダクト内の炭酸ガス濃度[vol%], Y_s : 煙層の炭酸ガス濃度[vol%], ΔZ : 界面上昇高さ[m], ΔZ_{cr} : 目視混入限界での界面上昇高さ[m], ϕ : 空気混入率[-], ϕ_{cr} : 目視混入限界での空気混入率[-], ρ_a : 下部層密度[kg/m³], $\Delta\rho$: 密度差[kg/m³]

参考文献

- 1)田中峰義, 中村和人 : “<二層ゾーンの概念に基づく>建物内煙流動予測計算モデル”, 建築研究報告, No.123, 1989.10
- 2)Vauquelin, O. and Megret, O. : “Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel”, Fire Safety Journal, Vol.37, 525-533, 2002.7
- 3)Hocking, G. C. : “Super-Critical Withdrawal from a Two-Layer Fluid through a Line Sink”, J. Fluid Mech., Vol.297, 37-47, 1995
- 4)Hocking, G. C. and Forbes, L. K. : “Super-Critical Withdrawal from a Two-Layer Fluid through a Line Sink If the Lower Layer Is of Finite Depth”, J. Fluid Mech., Vol.428, 333-348, 2001
- 5)Forbes, L. K. and Hocking, G. C. : “Withdrawal from a Two-Layer Inviscid Fluid in a Duct”, J. Fluid Mech., Vol.361, 275-296, 1998
- 6)Forbes, L. K. and Hocking, G. C. : “On the Computation of Steady axis-symmetric Withdrawal from a Two-Layer Fluid”, Computers & Fluids, Vol.32, 385-401, 2003
- 7)仁井大策, 原田和典 : “火災時の機械排煙口への空気混入限界の定式化と実験による検討 二層ゾーンモデルにおける機械排煙口への空気混入の定式化 (その 1)”, 日本建築学会環境系論文集, Vol.573, 9-15, 2003.11
- 8)“BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム”, (社)建築研究振興協会, 2003.2
- 9)Spratt, D. and Heselden, A. J. M. : “Efficient Extraction of Smoke from a Thin Layer under a Ceiling”, Fire Reserch Note, No.1001, 1974.

(2004年2月10日原稿受理, 2004年6月17日採用決定)