壁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3)

PREDICTION FORMULA OF AIR ENTRAINMENT RATIO INTO WALL-EQUIPPED
MECHANICAL SMOKE VENT

Formulation of air entrainment into mechanical smoke vent opening for two-layer zone model Part 3

仁井大策*, 原田和典**

Daisaku NII and Kazunori HARADA

A prediction model was proposed for air entrainment ratio into wall-equipped mechanical smoke vent under two-layer environment where upper part of room is occupied by hot smoke layer while lower part is occupied by air of normal temperature. This model consists of two parts similar to the prediction model for horizontal ceiling vent as described in preceding paper. The first is the case that lower air is directly entrained into vent opening when smoke layer thickness is small. The second is the case that air is entrained after mixing with upper smoke layer when smoke layer thickness is relatively large. Carrying out model scale experiments, three flow patterns (direct entrainment, visible critical condition for the onset of entrainment and mixing entrainment) were observed. Distributions of carbon dioxide concentration and temperature near wall-equipped vent opening were fairly similar to those for horizontal ceiling vent, which indicates that similar approximation with ceiling vent is reasonable. The accuracy of prediction model was verified against model-scale experiments for various aspect ratios of vent opening.

Keywords: Fire, Mechanical Smoke Venting, Air Entrainment Ratio, Direct Entrainment, Interface Mixing

火災, 機械排煙, 空気混入率, 直接混入, 界面混合

1. 序論

火災時の煙制御のため機械排煙を行う場合には、火災室からの避難安全を確保するための煙層降下遅延と火災階からの避難安全を確保するための隣接空間への漏煙防止とが期待される。これらの働きを評価するためには、正味の煙排出量および作動継続時間を正しく評価する必要がある。室の煙層が薄い場合に大きな風速で排煙を行うと煙のみならず下部の空気も吸引するので、正味の煙排出量は減る。その反面、下部の空気を混入するとダクトへの吸い込み温度が低下するので、排煙機の運転継続時間を長くすることができる。しかし、現在実務で広く用いられている二層ゾーン煙流動予測プログラム¹⁾では、下部層の空気が機械排煙口へ混入する現象が考慮されておらず、機械排煙の煙制御効果を正しく考慮しているとは言い難い²⁾。

そのため、既報その1²⁾では、二層状態において下部の空気が機械排煙口へ直接混入しない必要最小限の煙層厚さ（限界煙層厚さ）を定式化することを目的として、次元解析および模型実験を行い、排煙口寸法に応じて煙層温度、空気層温度および排煙風速と限界煙層厚さとを関係づけた。また、既報その2³⁾においては、天井付け機械排煙口への空気混入率を予測するモデルを作成し、模型実験により精度を確認した。

本報では、その2³⁾と同じ方法により、種々のアスペクト比の壁付け機械排煙口に対して、空気混入率の予測式を作成し、その精度を模型実験により確かめた。

2. 理論式の作成

幅 W × 高さ H [m] の排煙口の上端が天井に一致するように設けられ、風速 v [m/s] で排煙する場合を考える。排煙口が設けられた空間は、温度 T_s [°C]、厚さ d_s [m] の煙層と温度 T_a [°C] の空気層との二層状態を想定する。

この状況において、排煙すると排煙口直下の空気が誘引され、壁面に沿って排煙口に向かって上昇する。上昇する空気は煙層内で負の浮力を受ける。図1左に示すように、誘引空気の風速が負の浮力に比べて十分大きければ空気が排煙口へ直接混入する。一方、図1右に示すように、誘引空気の風速が小さければ、空気は煙層に押し返されるので排煙口へは到達しない。従って、誘引空気の運動エネルギーと空気が煙層内を上昇するために必要な位置エネルギーとの比が排煙口への空気混入を支配する要因と考えることができる。

既報その1²⁾では、これらの釣り合いから、目視により下部層の空気が混入しない限界条件の定式化を行った。誘引空気の風速と排煙風速とは、排煙口周辺の流れのパターンを面吸い込み、線吸い込み、点吸い込みで分類することにより関連づけ、限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ [m] は $d_{s,cr}/H > 2$ の範囲であれば、

$$\frac{d_{s,cr}}{H} = \begin{cases} 1.27 Fr^{2/3} & \text{[線吸い込み]} \\ 1.12 (W/H)^{2/5} Fr^{2/5} & \text{[点吸い込み]} \end{cases} \quad (1)$$

と表されることを示した。ここで、 Fr は排煙口高さ H [m] を代表寸

* 御建築研究所 博士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科 助教授・工博

Building Research Institute, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

法とした Froude 数

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{\Delta\rho g H / \rho_a}} \quad (2)$$

である。また、 ρ は密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]である。

煙層厚さと空気混入率との関係を図 2 に示す。煙層厚さが限界煙層厚さよりも小さければ($d_s/d_{s,cr} < 1$)、下部層の空気が排煙口へ直接混入する。目視による混入が確認されない領域($d_s/d_{s,cr} \geq 1$)であっても、空気は煙と混合した後に排煙口へ吸引されることが既報その 1²⁾にて確認されている。以下では、既報その 2³⁾と同様の手法を用いて壁付け機械排煙口への空気混入率を定式化する。

2.1 空気が排煙口へ直接混入する場合

排煙口周辺の流れをポテンシャル流で近似した時の風速ベクトルを図 3 に示す。天井面および壁面での摩擦による影響は無視し、排煙口が点ではなく有限の大きさを有することを考慮する。排煙口のごく近傍では風向は排煙口に垂直になるが、排煙口から離れるに従って端部の効果が現れるので、等ポテンシャル面は球形に近づく。風向が排煙口に垂直となる領域（以下、水平流入領域と呼ぶ）の形状を、排煙口近傍では長方形、離れるに従って、線分または点で近似する。排煙口から限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ と等しい距離だけ水平に離れた位置における水平流入領域の切断面が長方形、線分、点になる状況に応じて、流れのパターンをそれぞれ面吸い込み、線吸い込み、点吸い込みと呼ぶ。

既報その 1²⁾の結果を利用して水平流入領域の形状を求める。線吸い込みから点吸い込みへと流れのパターンが遷移する条件は式(1)の 2 式が等しくなる条件より、

$$d_{s,cr} = 0.928W \quad (3)$$

となる。よって、限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ が $0.928W$ よりも小さければ線吸い込み、大きければ点吸い込みと分類される。

図 4 に示すように、排煙口から限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ だけ離れた水平流入領域の切断面の寸法を $W'[m] \times H'[m]$ とすると、本報で考えている範囲内では、面吸い込みにはならないので $H'=0$ である。 W' は線吸い込みであれば $d_{s,cr}$ の増加に伴い単調減少し、 $d_{s,cr} \geq 0.928W$ では点吸い込みとなるので 0 となる。従って、

$$\begin{aligned} \text{線吸い込み: } W' &= W - d_{s,cr}/0.928 \\ \text{点吸い込み: } W' &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

と表すことができる。

排煙口へ混入する空気量を考えるため、図 4 に示すように、限界煙層厚さに相当する位置に仮想検査面を設ける。切断面が線分の場合は、図 4 (左) 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 1/4 円筒と 2 つの 1/8 球をとる。切断面が点の場合は図 4 (右) のように仮想検査面は 1/4 球となる。

排煙口へ混入する空気は仮想検査面の界面より下方部分を通じて流入し、仮想検査面に流入する風速は煙、空気ともに均一であると近似すると、空気混入率は仮想検査面の全面積に対する空気に接する部分の面積との比となる。界面が仮想検査面と交差する位置での煙層厚さ（以下、有効煙層厚さ）を $d_{s,eff}[m]$ とおくと、空気混入率は

$$\phi = \frac{d_{s,cr} W' \cos^{-1}(d_{s,eff}/d_{s,cr}) + \pi d_{s,cr}^2 (1 - d_{s,eff}/d_{s,cr})}{(\pi/2) d_{s,cr} W' + \pi d_{s,cr}^2} \quad (5)$$

図1 排煙口直下の空気の流れ

図2 煙層厚さによる空気混入率の変化

図3 壁付け排煙口周辺の流れのパターン

図4 水平流入領域と仮想検査面

と表すことができる。上式を変形すると、空気混入率は3つのパラメータ $d_{s,cr}/H$ 、 W/H 、 $d_{s,eff}/d_{s,cr}$ で次式のように表される。

$$\phi = \frac{\frac{d_{s,cr}}{H} \left(\frac{W}{H} - \frac{d_{s,cr}}{0.928} \right) \cos^{-1} \left(\frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}} \right) + \pi \left(\frac{d_{s,cr}}{H} \right)^2 \left(1 - \frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}} \right)}{\frac{\pi}{2} \frac{d_{s,cr}}{H} \left(\frac{W}{H} - \frac{d_{s,cr}}{0.928} \right) + \pi \left(\frac{d_{s,cr}}{H} \right)^2} \quad (6)$$

上式で有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ は、排煙口近傍の煙層が局所的に持ち上げられて薄くなった状態での煙層厚さである。これを理論的に導く

ことは困難であるので、後述の模型実験から実験的に推定する。ここでは、上式において有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ の代わりに煙層厚さ d_s を用いて、 $W/H=10$ で $d_{s,cr}/H$ を変化させた場合に空気混入率を計算した結果を図5に示す。煙層厚さが排煙口高さよりも小さい場合 ($d_s/H < 1$) には、必然的に排煙口へ空気が混入してしまうので、限界煙層厚さを本来定義することができない。しかし、ここでは式(1)で計算される限界煙層厚さを用いることができるものとして空気混入率を求めた。

大略の傾向として、 $d_{s,cr}/H$ が大きくなるほど、 ϕ の変化は線形に近づく。これは、仮想検査面の半径が大きくなると排煙口を点吸い込みと見なせることを意味している。

2.2 空気が煙と混合してから排煙口へ到達する場合

限界煙層厚さよりも煙層厚さが大きく、空気が煙と混合してから排煙口へ到達する場合の空気混入率を定式化する。壁面での摩擦や衝突の影響を無視し、単位時間、単位面積あたりに煙と混合する空気が図6に示すような混合面の底面積 A_{mix} に比例すると仮定する。

$$\phi/\phi_{cr} = A_{mix}/A_{mix,cr} \quad (7)$$

ここで、 ϕ_{cr} および $A_{mix,cr}$ はそれぞれ目視による空気混入限界での空気混入率[-]および混合面面積[m²]である。

混合面の代表半径と界面上昇高さ ΔZ [m] とが比例関係にあるとすれば、混合面積 A_{mix} は

$$A_{mix} = (a\Delta Z)W^* + (\pi/2)(a\Delta Z)^2 \quad (8)$$

となる。ここで、 a は混合面の半径と界面上昇高さの比、 W^* は図6に示すように煙層下端高さでの鉛直上昇領域の寸法[m]である。また、界面上昇高さ ΔZ は誘引空気の持つ運動エネルギーと煙層内を持ち上がる位置エネルギーとが等しくなる条件より

$$\Delta Z \approx \frac{\rho_a v^{*2}/2}{\Delta \rho g} \quad (9)$$

となり、上式中の排煙口中央部直下における煙層下端高さでの空気風速 v^* [m/s] は

$$v^* = \frac{V_e}{(\pi/2)d_s W^* + \pi d_s^2} \quad (10)$$

により求める。以上の式より空気が煙層と混合した後に排煙口へ混入する場合の空気混入率を求めることができる。

例えば、アスペクト比無限大の場合および点吸い込みとなる場合は、空気混入率は

$$\frac{\phi}{\phi_{cr}} = \begin{cases} \frac{(a\Delta Z)W}{(\pi/2)d_s W^*} = \frac{v^{*2}}{v_{cr}^{*2}} = \left(\frac{V_e/(\pi/2)d_s W}{V_e/(\pi/2)d_{s,cr} W} \right)^2 = \left(\frac{d_s}{d_{s,cr}} \right)^{-2} & [\text{アスペクト比}\infty] \\ \frac{\pi(a\Delta Z)^2}{\pi(a\Delta Z_{cr})^2} = \frac{v^{*4}}{v_{cr}^{*4}} = \left(\frac{V_e/2\pi d_s^2}{V_e/2\pi d_{s,cr}^2} \right)^4 = \left(\frac{d_s}{d_{s,cr}} \right)^{-8} & [\text{点吸い込み}] \end{cases} \quad (11)$$

となる。ここで、目視混入限界での空気混入率 ϕ_{cr} は式(5)において右辺の分母、分子の第1項あるいは第2項を無視して、

$$\phi_{cr} = \begin{cases} \frac{d_{s,cr} W \cos^{-1}(d_{s,eff}/d_{s,cr})}{(\pi/2)d_{s,cr} W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}}\right) & [\text{アスペクト比}\infty] \\ \frac{\pi d_{s,cr}^2 (1 - d_{s,eff}/d_{s,cr})}{\pi d_{s,cr}^2} = 1 - \frac{d_{s,eff}}{d_{s,cr}} & [\text{点吸い込み}] \end{cases} \quad (12)$$

図5 直接混入時の空気混入率の予測

図6 壁付け排煙口直下での界面混合 (線吸い込みの場合)

図7 界面で混合する場合の空気混入率の予測値
[$V_e=100\text{m}^3/\text{min}$, $\rho_a=1.2\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_s=0.2\text{kg}/\text{m}^3$, $H=0.3\text{m}$]

となる。有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ は後述の煙層厚さ d_s との関係式において $d_s=d_{s,cr}$ として求めれば良い。

図7に排煙風量 V_e が $100\text{m}^3/\text{min}$ 、空気層の密度 ρ_a および煙層との密度差 $\Delta \rho$ がそれぞれ 1.2 , $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ 、排煙口高さ H が 0.3m の場合に排煙口幅 W を変化させた場合の空気混入率の予測値を示す。

排煙口幅が 1m ($W/H=3.3$) の場合、混入限界時に点吸い込みとなっており、式(11)に示すように $d_s/d_{s,cr}$ の8乗に反比例する。排煙口幅が大きくなるに従い、勾配は緩やかになり、線吸い込みの予測値に近づく。しかし、 $d_s/d_{s,cr}$ の増加に伴い、勾配は徐々に急になっており、煙層厚さが大きくなれば点吸い込みの予測値に近づく。

3. 空気混入率の測定と精度確認

前節で述べた空気混入率の予測式の精度を確認するために模型実験を行った。本節では、流れ場の考察を行い、物理モデルの妥当性を検討する。さらに、前述の有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ を確定し、予測式の精度確認を行う。

3.1 実験概要

実験装置に関しては、図8に示すように、既報その2³⁾と同一のものを用い、排煙口は上端が天井と一致するように火源と正対する壁面に設けた。火源から発生した煙は排煙口を介して、ダクトおよびファンにより排出した。排煙風量はファン直前に設けたパルプの開

度により調整した。

空気混入率は煙層、空気層および排煙ダクト内の二酸化炭素濃度から求めた。煙層厚さ、温度は装置内の熱電対ソリで、排煙風速はダクト内に設けたオリフィス流量計で測定した結果より算出した。詳細は既報²⁾³⁾に示した方法によった。

測定に用いた排煙口寸法を表1に示す。実験に用いた排煙口のアスペクト比は1,2,4,8 および無限大を想定したものの5種類であり、アスペクト比1の場合のみ2種類の排煙口寸法を用いた。アスペクト比無限大とは、図8に示すように、排煙口を設置した壁面と垂直に奥行き60cm×深さ30cmの垂れ壁を設けた場合を指す。測定ケースは各アスペクト比で11~22条件、合計94条件である。

3.2 実験結果

以下では、壁付け排煙口周辺の流れ場を目視観察および測定した結果より、空気混入時、空気混入限界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($H \times W = 5\text{cm} \times 5\text{cm}$)で空気が混入する場合、空気混入限界および空気が煙層へ混合する場合の温度、風速、二酸化炭素濃度の分布をそれぞれ図9、図10、図11に示す。各条件における分布の測定範囲は、排煙口中心を通る排煙口に垂直な面とし、幅は排煙口から20cmで一定、天井面からの高さは20,25,30cmと変化させた。風速分布は排煙口中心から10cmおよび20cm離れた同心円状の風速を各5点測定した。

a) 空気が直接排煙口へ混入する場合

図9は排煙風速が12.5m/s、煙層と下部層の温度差が47.5℃、煙層厚さが0.220m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0.262mであり、空気混入が目視で確認された^{注2)}。

二酸化炭素濃度分布(図9左)を見ると、等濃度線が排煙口へ向かって上昇しているが、二酸化炭素濃度分布からは明らかに空気とわかる濃度の気体は排煙口へ到達していない。しかし、空気が排煙口へ直接混入していることが目視により確認されており、さらに排煙口直下で濃度勾配を生じていることから、空気は煙と混合しながら排煙口へ到達したと考えられる。温度分布(図9右)でも同じ性質が見られるが、勾配は緩やかになっている。

風速分布では、排煙口から10cmの距離では風速はほぼ均一であり、20cm離れると僅かに天井近傍の風速が比較的大きいが、風向は全て排煙口中心に向かっている。

b) 空気混入限界の場合

図10に排煙風速が10.5m/s、煙層と下部層の温度差が53.2℃、煙層厚さが0.256mで目視による空気混入限界の場合の結果を示す。空気は排煙口に直接到達しておらず、排煙口直下で等温線、等濃度線ともに排煙口に向かって僅かに上昇していることから、排煙口直下で空気は煙と混合した後に上昇していることがわかる。この場合の空気混入率は0.24であり、少なからぬ空気が煙層と混合していることを示している。

風速分布をみると、排煙口から10cm離れた位置では風向が水平に近くなる。しかし、20cm離れると全ての点で風向は排煙口中心に向かい、風速はほぼ均一となる。

図8 実験装置

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	5×5	4	5×20
	10×10	8	5×40
2	5×10	∞ (垂れ壁付き)	3×40

図9 空気が混入する場合のCO₂濃度・温度・風速分布
[$v=12.5\text{m/s}$, $d_s=0.220\text{m}$, $d_{s,c}=0.262\text{m}$, $\Delta T=47.5^\circ\text{C}$, $\phi=0.29$]

図10 空気混入限界でのCO₂濃度・温度・風速分布
[$v=10.5\text{m/s}$, $d_s=0.256\text{m}$, $d_{s,c}=0.240\text{m}$, $\Delta T=53.2^\circ\text{C}$, $\phi=0.24$]

図11 空気が煙層へ混合する場合のCO₂濃度・温度・風速分布
[$v=8.35\text{m/s}$, $d_s=0.266\text{m}$, $d_{s,c}=0.218\text{m}$, $\Delta T=55.3^\circ\text{C}$, $\phi=0.13$]

c) 界面で空気が混合する場合

図11に排煙風速が8.35m/s、煙層と下部層の温度差が55.3℃、煙層厚さが0.266m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0.218mであり、設定した煙層厚さはこれの約1.2倍である。

等濃度線および等温線の形状は図9、図10に比べるとかなり平坦なものとなり、70℃以下の等温線および0.4%以下の等濃度線はほ

ば水平となっている。しかし、排煙口直下の二酸化炭素濃度は天井付近よりも僅かではあるが低くなっており、少量の空気が煙と混合していることがわかる。風速分布では排煙口から 10cm 離れるとほぼ均一の風速で排煙口中心に向かう流れとなる。

以上から、直接混入、空気混入限界、煙層との混合後に排煙口へ到達の 3 形態で下部層の空気が排出されることが確かめられた。図 9-図 11 に示す温度、二酸化炭素濃度分布が、天井付け排煙口周辺での分布と同様の傾向を示していることから、既報その 2³⁾と同様の手法での定式化が妥当であるといえる。また、いずれの条件でも限界煙層厚さは 20cm より大きく、排煙口から限界煙層厚さ分だけ離れると風速分布は均一であるといえる。これは前節で示した近似と整合する。

3.3 有効煙層厚さの確定

以下では、界面形状のスケッチより有効煙層厚さ $d_{s,eff}$ と煙層厚さ d_s の関係を確定する。

界面形状の観察は、アスペクト比 1, 4, 8 および ∞ の排煙口で、模型実験で用いた各アスペクト比において 6~13 条件、合計 34 条件で行った。 $d_s/d_{s,cr}$ の範囲は 0.317~0.787 であった。限界煙層厚さでスケールを無次元化した界面形状を図 12 に示す。図中の矢印は排煙口上端、1/4 円は仮想検査面を表す。

図 12 上段、中段に示すように $d_s/d_{s,cr}$ が 0.56 以下ならば、界面は仮想検査面外側ではほぼ水平であり、仮想検査面と交差した後に排煙口に向かって持ち上げられる。一方、図 12 下段に示すように、 $d_s/d_{s,cr}$ が大きくなると、仮想検査面よりも外側で界面が上昇し始める。

図 12 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 13 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。これらのデータより、 $0.5 < d_s/d_{s,cr} < 1.0$ の範囲で直線回帰を行い、

図12 界面形状の比較

図13 煙層厚さと界面上昇の相関

$$d_{s,eff}/d_{s,cr} = 0.89(d_s/d_{s,cr} - 0.5) + 0.5 \quad (13)$$

なる関係を得た。上式を図 13 中にあわせて示す。

式(13)を用いると、目視による空気混入限界では、有効煙層厚さと限界煙層厚さの比 $d_{s,eff}/d_{s,cr}$ が 0.95 となる。これを式(5)に代入すると、目視による空気混入限界での空気混入率 ϕ_{cr} は、点吸い込みでは 0.06、線吸い込みでは 0.21 となる。

3.4 予測精度の確認

全ての実験条件において限界煙層厚さを計算し、式(3)を用いて流れのパターンを分類した。その結果、合計 94 個の実験のうち、点吸い込みとなるものが 57 個、線吸い込みとなるものが 37 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 13 個）であった。

a) 空気が直接混入する場合

空気が直接排煙口へ混入する場合($d_s/d_{s,cr} < 1.0$)における空気混入率の実験値と予測値とをプロットした結果を図 14 に示す。図 14a) に点吸い込みの場合について示す。図中の実線は式(5)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り、破線は界面の持ち上げりを考慮しない場合の点吸い込みの予測値である。実験値と予測値を比較すると、良く一致している。

図 14b) にアスペクト比無限大の場合を示す。 $d_s/d_{s,cr} < 0.6$ では実験値と予測値は良く一致しているが、 $d_s/d_{s,cr} \geq 0.6$ では、実験値が予測値を下回っている。これは排煙口直下の壁面に衝突した煙が下降流となり、空気が混入しづらくなったためと推測される^{2,3)}。しかし、誤差は大きくとも 0.2 程度であり、予測精度には大きな影響はない。

b) 界面で煙と混合した後に吸い込まれる場合

$d_s > d_{s,cr}$ の実験値を $d_s/d_{s,cr} = 1$ として式(5)で求めた空気混入率 ϕ_{cr} で無次元化してプロットしたものを図 15 に示す。図中には点吸い込みの予測式 $(d_s/d_{s,cr})^8$ とアスペクト比無限大で線吸い込みの予測式 $(d_s/d_{s,cr})^2$ を併せて示す。

図より、線吸い込みの場合の理論式 $\phi_{cr} = (d_s/d_{s,cr})^2$ および点吸い込みの場合の理論式 $\phi_{cr} = (d_s/d_{s,cr})^8$ はそれぞれ実験値の上限および下限と勾配は一致しているものの、天井付け排煙口の場合と比較すると、ばらつきが大きくなっている。これは、上述のように壁付け排煙口の場合は目視混入限界での空気混入率 ϕ_{cr} が小さく、この ϕ_{cr} で無次元化したために見かけの誤差が大きくなっていると考えられる。

詳細に空気混入率を求めるには、式(8)中の混合面の半径と界面上昇高さとの比 a を決定する必要がある。図 9 中に示すように、測定した二酸化炭素濃度分布から界面上昇高さや混合面直径を求め、係数 a を決定すると表 2 に示すように約 1.81 となる。

c) 総括

図 16 に全ての条件において予測値と実験値の比較を示す。誤差 $\pm 10\%$ (図中の破線) 内に 89%、誤差 $\pm 5\%$ 内に 60% のデータが入っており、予測式の精度は十分と考えられる。

5. 結論

本報では、壁付け機械排煙口への空気混入率の予測式を提案し、

精度を模型実験により確かめた。その結果、壁付け排煙口の場合でも天井付け排煙口の場合と同様の手法で、空気が排煙口へ直接混入する場合と煙と混合した後に排煙口へ混入する場合とに分けて定式化できることを示した。

空気が排煙口へ直接混入する場合には、下部層の空気が混入しない限界煙層厚さにより流れのパターンの分類および仮想検査面の設定を行い、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。下部の空気が煙層へ混合した後に排煙口へ吸い込まれる場合には、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。いずれの場合も、空気混入率は限界煙層厚さに対する煙層厚さの比 $d_s/d_{s,cr}$ の関数として表されることを示した。

注

注1) 本研究を進める途中で公表された BRI2002⁵⁾に組み込まれている排煙効率を計算するモデルは、Spratt ら⁶⁾の実験式を用いている。この実験式は天井付け排煙口への空気混入限界（本論文における限界煙層厚さ）を定式化したものであり、壁付け排煙口への空気混入率の計算には適用できない。

注2) 図9と同じ条件で、排煙口が天井に設けられた場合、限界煙層厚さ $d_{s,cr}$ は 0.149m となり、煙層厚さを下回る。この場合、既報その 2³⁾で示した方法では空気混入率は 0.06 となる。従って、既報その 1²⁾で述べたように、排煙口を壁に設けた場合の方が、空気が混入しやすい。

注3) 下降流が生じるのは、排煙口に接するように垂れ壁を設けたアスペクト比無限大の場合のみである。その他の場合では、壁面に衝突した煙は水平に広がるため、下降流は生じない。

参考文献

- 1) 田中孝義, 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) 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., 9-15, 2003.11
- 3) 仁井大策, 原田和典: “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)” 日本建築学会環境系論文集, Vol., 1-8, 2004.10
- 4) 建築基準法施行令 126 条の3, “排煙設備の構造”
- 5) “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
- 6) Spratt, D. and Heselden, A. J. M.: “Efficient Extraction of Smoke from a Thin Layer under a Ceiling”, Fire Research Note, No.1001, 1974.

図14 空気が直接混入する場合の予測値と実験値の比較

図15 界面で混合する場合の予測値と実験値の比較

表2 界面上昇高さと混合面直径

条件		上昇高さ	混合面直径	a
排煙口寸法	$d_g/d_{s,cr}$			
5cm x 5cm (図 9)	1.07 (目視混入限界)	3.50cm	7.67cm	2.19
5cm x 5cm	1.03 (目視混入限界)	5.17cm	9.33cm	1.80
3cm x 40cm (∞)	1.02 (目視混入限界)	3.00cm	4.33cm	1.44
			平均	1.81

図16 空気混入率の予測値と実験値の比較

(2005年7月8日原稿受理, 2005年10月24日採用決定)