

廊下状空間における火災時の煙と空気の混合性状に関する研究

A Study on the Mixing Behavior of Smoke and Air during Fire in Corridor

建築学専攻 原田研究室 畠山侑己

1. 序論

廊下状空間や大平面をもつ空間で火災が生じると、煙が長距離を流動し、その過程で周壁への失熱や下部空気との混合により煙が下方に拡散することが予想される。現在煙流動性状の予測に広く使用される二層ゾーンモデルではこれらの要因を考慮できないため、上記のような空間での避難安全性を論ずるには煙と空気の混合過程をモデル化して煙流動性状を予測する必要がある。

廊下状空間での煙降下に関して、有年^[1]は張^[2]の模型実験結果から、煙と空気の界面間で双方向に気体が連行されるモデルを作成し、煙層下端高さの予測を試みた。空間内への煙流入直後の煙層の降下は良く再現できているものの、床面の圧力差を考慮しておらず、空気層の質量収支を満足していなかった。

森口^[3]は、廊下状空間において流れの支配方程式から相似則を導出し、1/10 スケールと 1/5 スケールの模型実験を行った結果を比較することでその妥当性を確認した。実験結果から廊下空間内の気体は煙と空気の対向流となっており、さらに煙は天井付近の流速の大きい層(天井流領域)と、空気と混ざり流速の小さくなる層(混合層領域)に分かれることを明らかにした。また、廊下内の煙と空気の混合については、煙内や煙-空気の境界面付近での乱流混合と、壁面付近で煙が冷却されることによる下降流があることを明らかにしたが、定量的な分析には至っていない。

本研究では森口によって示された 2 種類の要因による煙と空気の混合量を定量的に分析し、混合性状に影響するパラメーターを明らかにすることを目的とする。

2. 廊下状空間の縮小模型実験

2.1 実験概要

実験装置の概要を図 2.1-1 に示す。装置は長さ 300mm の火災室と 5,300mm の廊下空間で構成されており、一端は外気に開放した。天井面は鉄板、壁面的一方はアクリル板、もう一方はセラミックボードとした。火災室ではヒーターで加熱した熱気流を煙とみなして廊下空間と接続する開口(煙流入口)から流入させた。流入する煙の温度

と流量をヒーターへの電力供給量と送風機の回転数によって制御した。廊下空間には温度と流速を行うための測定区間を 700mm ごとに設け、火災室に近いものから測定区間 0,1,...,8 とした。

2.2 測定項目

図 2.1-1 中一点鎖線の断面でレーザーによる煙流動性状の可視化し、一部の実験を除いて廊下内での各層の境界面高さを記録した。また、各測定区間の中央で温度、流速を図 2.2-1 に示す高さにおいて測定した。また、測定区間 2,4,6 のアクリル板壁面の外側表面温度も高さ 275mm,150mm の 2 点で測定した。熱流束は測定区間 1-2 間,3-4 間,5-6 間,7-8 間の中央の天井面外側で測定し、同じ位置の天井面の両面で表面温度も測定した。煙流入口からの流量は、送風機下流に設けたオリフィス流量計の測定値から換算した。温度は T 型熱電対を、流速は無指向性の熱線風速計を用い、加熱開始後十分に時間が経過した定常状態での測定値を以下の分析に用いた。

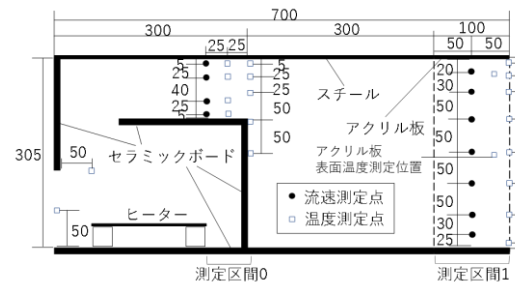


図 2.2-1 測定点の詳細

2.3 実験条件

表 2.3-1 に実験条件を示す。煙流入口の厚み L [m]、流入する煙の温度上昇値 ΔT_0 [K]、流速 V_0 [m/s]、断熱性能を実験条件とした。断熱性能は模型の両壁面と天井面にセラミックファイバースランケット(厚さ

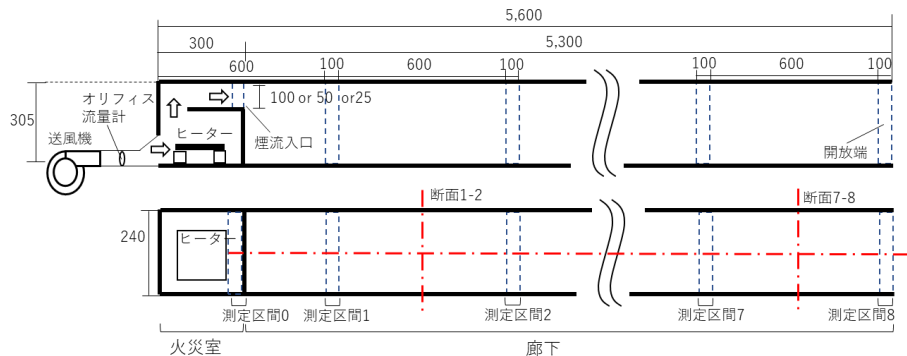


図 2.1-1 実験模型の断面図(上)と平面図(下)

25mm)を貼付して性能を変更した。

表 2.3-1 実験条件

実験 No	L[mm]	ΔT_0 [K]	V_0 [m/s]	断熱	外気温[°C]
S1	100	15	0.063	-	12.7
S2	100	6.6	0.048	-	12.4
S3	100	15.2	0.106	-	15
S4	100	8.2	0.105	-	13
S5	100	6.8	0.069	-	11.7
S6	100	3	0.106	-	15.4
S7	100	0.8	0.111	-	27.1
S8	50	12.1	0.115	-	21
S9	50	12.5	0.067	-	19.8
S10	50	6.9	0.112	-	13.8
S11	50	9.6	0.268	-	13.8
S12	50	15	0.118	有	13.7
S13	50	16.2	0.236	有	8.6
S14	50	12.9	0.411	有	11.5
S15	50	8.3	0.403	-	12.1
S16	50	25.6	0.111	-	12.8
S17	25	14.5	0.117	-	27.1

3. 廊下状空間の模型実験結果

3.1 温度、流速の鉛直分布と水平質量流量

目視による流れの各層の境界面高さを基準に、流速と温度測定値から換算した密度の積を高さ方向に積分することで各測定区間を通過する各層の水平方向の質量流量を算出した。流速は煙の流下方向を正として、目視境界高さまたは N%法(N=15)によって空気層と判断される流速は負の値に補正した。

図 3.1-1 は実験 S8 における各層の水平方向の質量流量である。隣り合う測定区間の各層の水平質量流量の差が、壁面下降流あるいは境界面での混合により鉛直方向に流出入した質量流量の和となる。

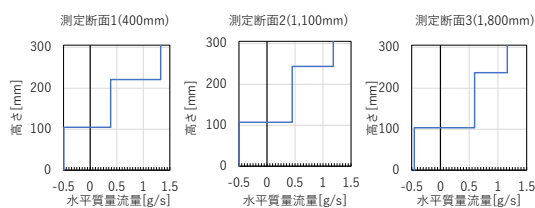


図 3.1-1 各層の水平質量流量の変化(実験 S8)

3.2 鉛直方向質量流量

以降では、壁面下降流の流量を実験映像から幅と流速を測定することで求め、水平質量流量の差からそれを差し引くことで界面混合量を推定する。

3.2.1 壁面下降流の分析

短手断面の実験映像を一定時間間隔で画像キャプチャーし、トレーサーで着色された煙の外形を記録した。その外形線(白線)を一つの画像にまとめたものを以下の図 3.2-1 に示す。実験 S3,S8,S9,S10,S17 の測定断面 1-2 間、3-4 間、4-5 間においてこの作業を行った。壁面

下降流は壁面からの失熱により天井流領域から、混合層、空気層へと下降するが、混合層への貫入直後に幅をほぼ一定に保ったまま下りていく部分と、下降せずに廊下中央に戻る部分に分かれた。静穏かつ一定温度の雰囲気環境下で垂直平板により冷却されて生じる自然対流の境界層内の温度分布は図 3.2-1 の左図となることが知られている。^[4] ここで壁面下降流の内部温度がこの分布のまま混合層に貫入し、周辺空気温度が下がったと考えれば混合層温度よりも温度の高い部分は下降できずに天井流に戻ることになる。

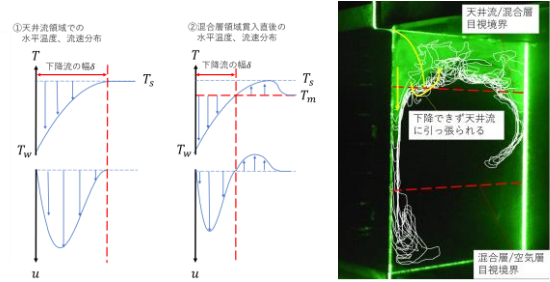


図 3.2-1 壁面下降流の流動性状(実験 S8、測定断面 1-2 間)

このことから、壁面下降流が混合層や空気層に貫入するのは壁面近傍の温度がほぼ壁面に等しい領域に限られ、本研究では、この部分の幅から流量を算出した。煙の外形線を記録した画像において、各高さでの下降流の幅を求め、連続的にして下降し続けている部分の平均幅を下降流幅とした。セラミックボード側ではすぐに壁面から下降流が離れていたため、壁面から離れ

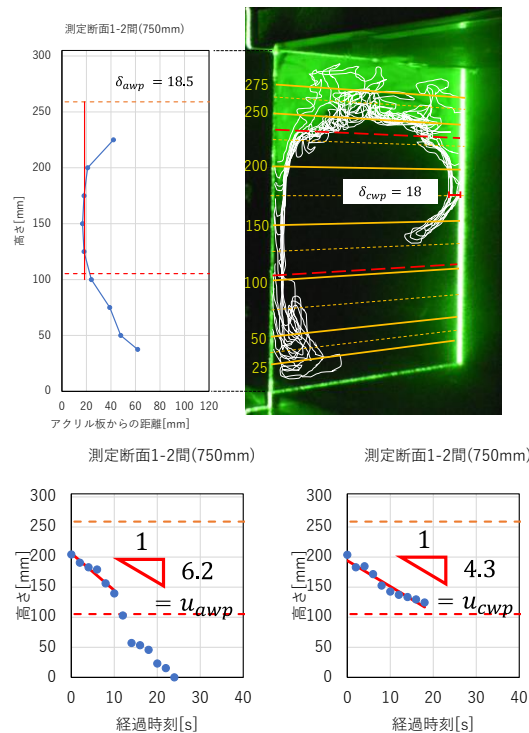


図 3.2-2 壁面下降流の幅(上)と流速(下)の測定
図中単位: mm

る直前の幅を測定した。壁面下降流の流速は、図 3.2-2 下側に示すように下降流の先端高さを時刻ごとに記録し、横軸に時間を取ったときの勾配を壁面下降流の流速とした。

3.2.2 界面混合量の推定

隣り合う測定断面間での各層の水平質量流量の差分と、測定した壁面下降流の流量から、各層の質量収支を考えて界面混合量を推定した。実験 S8 での結果を図 3.2-3 に示す。鉛直方向の直線の矢印は壁面下降流を、曲線の矢印は界面混合を表し、破線で囲まれた数値は推定値である界面混合量を表す。流入した煙は空気と混ざりあって混合層領域を形成する。天井流領域からは壁面下降流により煙が混合層領域や空気層に貫入し、逆に混合層領域から界面混合によって気体を連行する。さらに混合層領域も界面混合により空気層から空気を連行する。

3.3 実験結果の分析

3.3.1 温度と流速の鉛直分布

温度、流速の測定値の鉛直方向分布を無次元化してまとめたものが図 3.3-1 である。ただし、温度が極端に低い実験 S6, S7 や壁面の断熱性能が異なる実験 S12~S14 は分布が異なるため除外した。横軸は、温度、流速の各実験の各測定断面での最大値を用いて無次元温度 $\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_{max}$ 、無次元流速 $V^* = V / V_{max}$ とし、縦軸は煙層厚さを用いて無次元高さ $z^* = z / \delta_s$ とした。図中の横線は $z^* = 1$ すなわち煙層と空気層の境界面を表す。温度と流速の鉛直方向分布はどの実験のどの測定断面でも概ね同じ分布となり、以下の正規分布で近似できた。

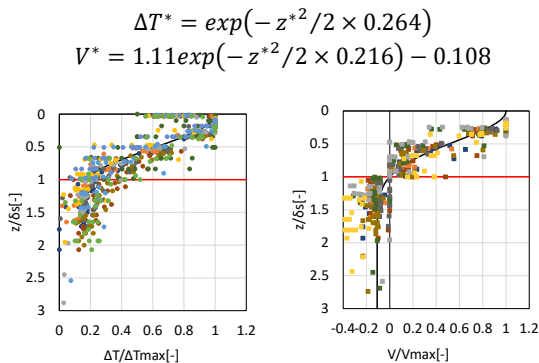


図 3.3-1 無次元温度、無次元流速と無次元高さ

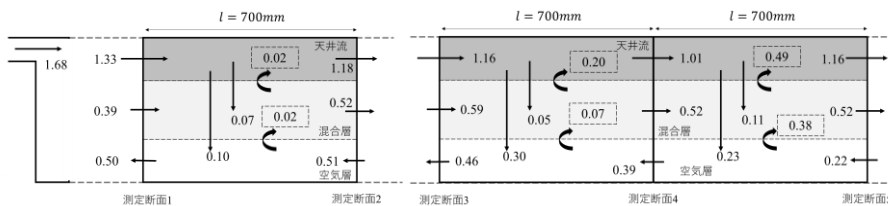


図 3.2-3 廊下空間内の質量流量(実験 S8)

3.3.2 壁面下降流の幅と流速

周囲空気が一定で垂直平板により加熱あるいは冷却されて生じる自然対流の境界層内の代表流速 u_1 と境界層幅 δ はそれぞれ $Gr^{1/2}$ 、 $Gr^{-1/4}$ の関数となる。^[4]

$$u_1 z / \nu = f(Pr, Gr^{1/2}), \quad \delta / z = f(Pr, Gr^{-1/4})$$

3.2.1 節で求めた壁面下降流の流速 u_{wp} を $u_{wp} / z \nu$ として縦軸にとり、横軸に $Gr^{1/2} = (g\beta(T_{smax} - T_w)z^3 / \nu^2)^{1/2}$ をとってプロットしたものが図 3.3-3 である。回帰線から以下の関係式を得た。

$$u_{wp} z / \nu = 0.0779 Gr^{1/2} \quad (3.3-1)$$

ここで、代表寸法 z は天井流領域の厚みである。

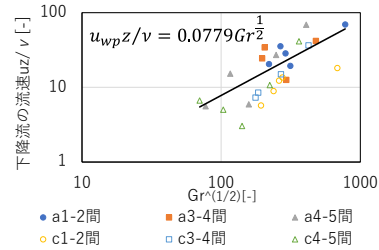


図 3.3-3 壁面下降流流速と $Gr^{1/2}$

壁面下降流の幅は煙流入口から離れるほど大きくなる傾向にあった。これは、水平方向に流れる煙が強制対流となり、壁面との摩擦により境界層厚さが増加した影響であると考えられる。従って、壁面下降流の幅は、自然対流、強制対流が複合して決定づけられ、 Gr 数だけでなく $Re = Vx / \nu$ にも依存すると考えるのが妥当である。ここで、代表寸法 x は煙流入口からの水平距離、 V は距離 x での天井流領域の水平流速である。そこで、 $Gr/Re^2 (= Ar)$ を横軸に、 δ_{wp} / z を縦軸にとってプロットしたものが図 3.3-4 である。回帰線から下降流幅 δ_{wp} / z は Gr/Re^2 の $-1/4$ 乗に比例していることがわかり以下の回帰式を得た。

$$\delta_{wp} / z = 0.0965 (Gr/Re^2)^{-1/4} \quad (3.3-2)$$

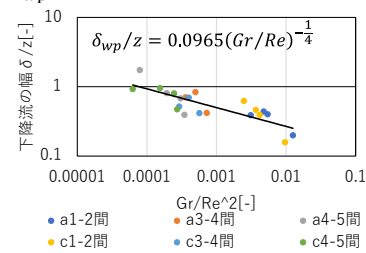


図 3.3-4 壁面下降流幅と Gr/Re^2

3.3.3 界面混合量

有年^[1] は単位面積当たりの境界面での混合体積流量を混合速度と呼び、空気から煙の混合速度 $u_{a,s}$ 及び煙から空気の混合速度 $u_{s,a}$ は、 $Ri = g\beta(\partial T / \partial z) / (\partial V / \partial z)^2$ を用いて

$$u_{a,s} = \alpha_{a,s} Ri^{-1} |V_s|, u_{a,s} = \alpha_{a,s} Ri^{-1} |V_s|$$

と表されるとして実験値から係数 $\alpha_{a,s}$ 、 $\alpha_{s,a}$ を決定した。

これから前節で推定した混合層と空気層の正味の界面混合量は混合速度を用いて

$$\Delta m = (\rho_a u_{a,s} - \rho_s u_{s,a}) l w$$

となる。上式を変形すると

$$(\Delta m / l w) / C_1 = \alpha_{a,s} - (C_2 / C_1) \alpha_{s,a}$$

となる。ここで、

$$C_1 = \rho_a Ri^{-1} |V_s|, C_2 = \rho_s Ri^{-1} |V_a|$$

であり、 Ri 数は煙層と空気層の境界面での勾配を用いた。3.2.2 節で推定した界面混合量 Δm から $(\Delta m / l w) / C_1$ を縦軸に、 (C_2 / C_1) を横軸にプロットして回帰直線を引くと以下の図3.3-5のとなり、回帰式の傾きと切片からそれぞれ以下の混合係数 $\alpha_{s,a}$ 、 $\alpha_{a,s}$ を得た。

$$\alpha_{s,a} = 1.00, \alpha_{a,s} = 0.49$$

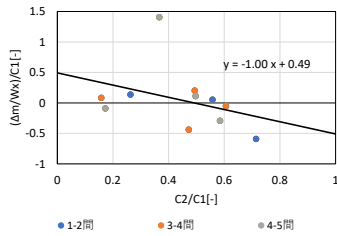


図 3.3-5 混合係数 $\alpha_{s,a}$ 、 $\alpha_{a,s}$ の決定

4. 廊下状空間の予測モデル

4.1 モデルの概要

流入する煙の温度と流速、煙流入口厚みを入力条件とし、廊下空間を煙層と空気層の二層に近似して図4.1-1のような水平方向の微小区間の質量収支、運動量収支、熱収支を解いて各層の温度、流速、層の厚み、および床面での圧力差を計算するモデルを作成した。

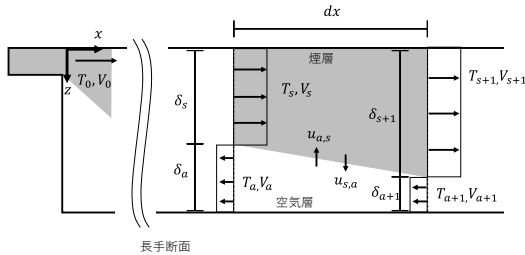


図 4.1-1 廊下の水平方向微小空間と物理量

微小区間での保存式は以下の通りとなる。ここで、壁面下降流の幅 δ_{wp} と流速 u_{wp} 、混合速度 $u_{a,s}$ 、 $u_{s,a}$ は3.3.2 節と 3.3.3 節で得られた回帰式を用いて計算を行った。ただし、各層の温度、流速は鉛直方向に一様とし、空気層の温度上昇は無視し、床面での圧力差は一定と仮定した。

質量収支

$$\text{煙層: } \rho_s \frac{d}{dx} (V_s \delta_s) = \frac{W - \sum \delta_{wp}}{W} (\rho_a u_{a,s} - \rho_s u_{s,a}) - \sum \frac{\delta_{wp}}{W} \rho_s u_{wp}$$

$$\text{空気層: } \rho_a \frac{d}{dx} (V_a \delta_a) = \frac{W - \sum \delta_{wp}}{W} (-\rho_a u_{a,s} + \rho_s u_{s,a}) + \sum \frac{\delta_{wp}}{W} \rho_s u_{wp}$$

運動量収支

$$\text{煙層: } \rho_s \frac{d}{dx} (V_s^2 \delta_s) = \frac{W - \sum \delta_{wp}}{W} (V_a \rho_a u_{a,s} - V_s \rho_s u_{s,a}) - \frac{d}{dx} \int_{\delta_a}^H (\Delta \rho g z + \Delta P_a) dz - \Delta P_{ws} - \sum \frac{\delta_{wp}}{W} V_s \rho_s u_{wp}$$

$$\text{空気層: } \rho_a \frac{d}{dx} (V_a^2 \delta_a) = \frac{W - \sum \delta_{wp}}{W} (-V_a \rho_a u_{a,s} + V_s \rho_s u_{s,a}) - \Delta P_{wa} - \frac{d}{dx} \int_0^{\delta_a} \Delta P_a dz + \sum \frac{\delta_{wp}}{W} V_s \rho_s u_{wp}$$

熱収支

$$\text{煙層: } \frac{d}{dx} (C_p \rho_s V_s \delta_s \Delta T_s) = - \frac{W - \sum \delta_{wp}}{W} C_p \rho_s u_{s,a} \Delta T_s - q_c - \sum \frac{\delta_{wp}}{W} C_p \rho_s u_{wp} \Delta T_{wp} - \frac{\delta_s}{W} q_w$$

4.2 計算モデルの予測結果と実験値との比較

実験 S8 の実験条件を入力条件として煙層温度と空気層の厚みすなわち煙層下端高さの水平方向変化を予測した。結果を図 4.2-1、4.2-2 に示す。いずれの予測も、壁面下降流と床面での圧力差を考慮していない有年のモデルよりも精度が向上したといえる。

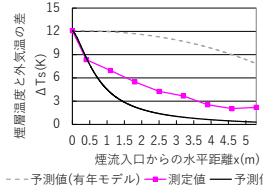


図 4.2-1 煙層温度上昇値の変化

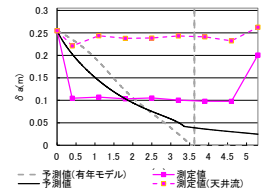


図 4.2-2 空気層厚み(煙層下端高さ)の変化

5. 結論

廊下空間の模型実験の結果をもとに煙と空気の混合性状の定量的分析を行った。壁面下降流の幅と流速から算出される流量は Gr 数と Re 数の関係式で、壁面近傍を除いた廊下中央での混合量は Ri 数の関数で表されることを示した。また、これらの関係式を組みこんだ予測モデルを作成し、煙温度と煙層下端高さの変化を予測すると既存のモデルより精度が向上した。

記号： T ：温度[$^{\circ}C$]、 V ：水平流速[m/s]、 ρ ：密度[kg/m³]、 $W=0.24$ ：廊下幅[m]、 z ：高さ[m]、 x ：水平距離[m]、 m_h ：水平質量流量[kg/s]、 ν ：動粘性係数[m²/s]、 u ：鉛直流速[m/s]、 δ ：層の厚みまたは幅、 m_v ：鉛直質量流量[kg/s]、 ΔP ：圧力差[Pa]、 ΔP_w ：摩擦損失[Pa]、 C_p ：比熱[J/kgK]、 $l=0.7$ ：測定断面間距離[m]

添え字：0：煙流入口、s：煙層、a：空気層、c：天井流、m：混合層、wp：壁面下降流、w：壁面

参考文献

- [1]有年秀介：長大な廊下における火災時の煙の成層化限界の条件に関する研究，京都大学工学部建築学科卒業論文，2018
- [2]張諾莎：廊下空間における煙流動に関する研究，京都大学工学研究科修士論文，2010
- [3]森口友寿：火災時の廊下状空間における煙の下部層混合性状に関する実験的研究，京都大学工学研究科修士論文，2021
- [4]甲藤好郎：伝熱概論、p86-p88、養賢堂発行、1969年