

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

An Experimental Study on mixing Behavior of Smoke and lower Layer in Corridor at the time of Fire

建築学専攻 原田研究室 森口友寿

1. 研究の背景と目的

廊下状空間や近年増えてきている大規模空間では、火災時に煙が長距離にわたり流動することで、周壁への失熱や乱流混合により浮力を失って次第に降下すると予想される。しかし、このような煙流動性状についての既往研究は少なく、設計実務では二層ゾーンモデルによる予想に頼らざるを得ない現状がある。

そこで本研究では、廊下状空間での煙流動性状の解明と、避難安全性への影響の検討を目的とする。

2. 相似則

既往研究¹⁾より、一部に開口のある空間における煙流動は以下の支配方程式で表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots(2.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i \beta (\bar{T} - T_0) + \nu_t \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots(2.2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \rho c_p \alpha_t \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_i \partial x_i} + q \quad \dots(2.3)$$

また、煙降下を扱っているものの、失熱の大きい範囲では成層化すると扱うと、壁面付近の失熱の境界条件は以下の式で示される。

$$-u_l c_p \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = l_s c_p \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \frac{1}{R} (T_s - T_a) \quad \dots(2.4)$$

式(2.1)~(2.4)を7つの代表値 $L_0, u_0, Q_0, t_0, \Delta T_0, \Delta p_0, R_0$ を用いて無次元化すると5つの π ナンバーを得る。

$$\begin{aligned} \pi_1 &= L_0 / t_0 u_0 \\ \pi_2 &= \Delta p_0 / \rho u_0^2 \\ \pi_3 &= g_i \beta \Delta T_0 L_0 / u_0^2 = Ar \\ \pi_4 &= Q_0 / \rho c_p u_0 \Delta T_0 L_0^2 \\ \pi_5 &= 1 / u_0 c_p \rho_s R_0 = St \end{aligned} \quad \dots(2.5)$$

これらの π ナンバーより、以下の相似則を得る。

$$\begin{aligned} n(t) &= n(L) n(R) \\ n(\Delta p) &= n(R)^{-2} \\ n(Q) &= n(L) n(R)^{-3} \\ n(u) &= n(R)^{-1} \\ n(\Delta T) &= n(L)^{-1} n(R)^{-2} \end{aligned} \quad \dots(2.6)$$

p : 圧力[Pa] g_i : 重力加速度ベクトル[m/s²] β : 体膨張率[K⁻¹] ρ : 密度[kg/m³] T : 温度[K] c_p : 定圧比熱[J/kgK] q : 発生熱[W] \bar{u}_i, \bar{u}_j : 速度ベクトル[m/s] ν_t : 渦動粘性係数[m²/s] α_t : 渦温度拡散係数[m²/s] λ_s : 煙の熱伝達率[W/mK] ρ_s : 煙の密度[kg/m³] T_s : 煙の温度[K] T_w : 壁体の温度[K] l_s : 煙層の厚さ[m] R : 壁体から外気への熱貫流抵抗[m²K/W] L : 代表長さ[m] ΔT : 代表温度上昇値[K] t : 代表時間[s] Δp : 代表圧力上昇値[Pa] Q : 発熱量[W] u : 代表速さ[m/s] R : 代表熱伝導抵抗[m²K/W]
 ※ $n(f) = f_{s1} / f_{s2}$ f は任意の物理量
 ※添え字 i, j は $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$ で各方向成分の微分で用いる場合は総和を示す。

3. 小規模模型実験

3.1. 模型概要

図3.1に、小規模模型(1/10スケール)の断面図、平面図を示す。装置は長さ方向に300mmの火災室と長さ方向に5,300mmの廊下空間が、100mmか50mmの煙流入口で接続された構造をしており、廊下末端は外気に開放した。火災室ではヒーターを用いて空気を温め、煙に見立てて流入口から廊下に流出させた。温度上昇値はヒーターで、流速は送風機、オリフィス流量計、微差圧計を用いてコントロールする。

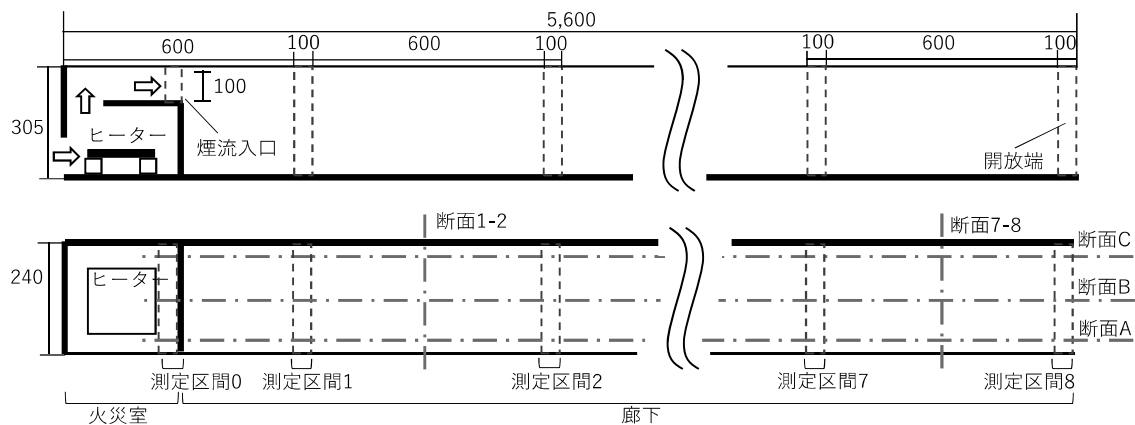


図3.1 実験装置全体 (上: 断面図、下: 平面図)

3.2. 測定概要

図 3.1 に測定を行った区間(0~8)を示す。各測定区間の幅方向中央では、図 3.2 に示すように、鉛直方向 50mm 間隔を基本に温度と流速を測定した。熱流計は測定区間 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 の間の天井で、その位置での天井表裏の温度と共に測定した。測定値は定常状態に達したと判断した後の 30 個のデータの平均とした。

また、本実験ではシートレーザーとスモークジェネレーターを用いて煙の可視化を行った。可視化する断面は、図 3.1 に示すように、長手方向(断面 A-C)、短手断面(断面 1-2, 4-5, 7-8/ 4-5 は図中省略)で行った。そのため、模型部材は図 3.2 に図示したものに加え、片側面をセラミックボード、他方をアクリル板とした。

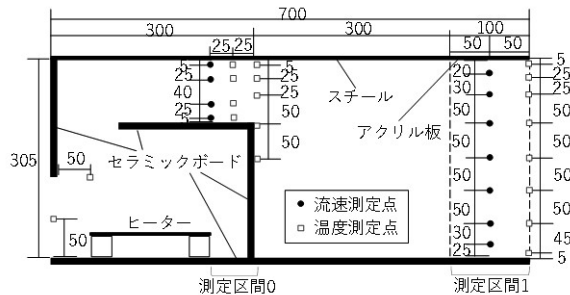


図 3.2 火災室付近の測定点

3.3. 実験条件

表 3.1 に小規模模型の実験条件を示す。実験条件には流入口での温度上昇値 ΔT [K]、平均流速 V [m/s]、流入口の厚み L [mm]、追加での断熱の有無を用いる。追加の断熱は、セラミックファイバブランケット(25mm)を天井と両壁面に貼り付けることで行った。

表 3.1 小規模模型の実験条件

実験 No	L[mm]	ΔT [K]	V [m/s]	断熱	Ar 数
S1	100	15.0	0.063	-	12.6
S2	100	6.6	0.048	-	9.55
S3	100	15.2	0.106	-	4.40
S4	100	8.2	0.105	-	2.48
S5	100	6.8	0.069	-	4.76
S6	100	3.0	0.106	-	2.10
S7	100	0.8	0.111	-	0.216
S8	50	14.2	0.115	-	1.54
S9	50	15.8	0.067	-	4.63
S10	50	7.7	0.112	-	0.918
S11	50	9.6	0.268	-	0.222
S12	50	15.0	0.118	有	1.80
S13	50	16.2	0.236	有	0.487

3.4. 基本的な煙流動性状

本節では、実験 S8 の可視化の結果を示す。煙流入口

から廊下内に流れた煙は浮力によって天井に沿って廊下空間を進む(図 3.3)。この時、壁面付近では失熱によって下降流が生じていた(図 3.7)。天井に沿って進む煙はそのまま廊下空間を進み開放端から排出される。この時、下端高さが上昇し、流速が大きくなっていた(図 3.6)。下降流は低断熱側の壁面でもより下方に降りており(図 3.6)。下降流によって着色された床面付近の層は開放端側から火災室に向けて進み、火災室の壁面にぶつかり向きを変えた(図 3.5、3.6)。結果、長手方向断面では火災室から開放端に向けて進む上層と、開放端側から火災室に向けて進む下層と、その間を上層と同じ方向に進む中層に分けられた。また、壁面付近では下降流が発生しており、失熱に応じて降下する速さや高さが異なっていることが分かった。

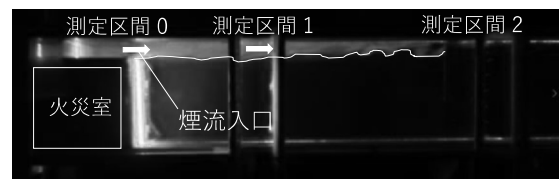


図 3.3 長手方向 B(中央)断面(測定区間 0-2,流入直後)

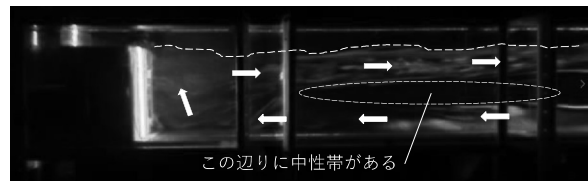


図 3.4 長手方向 B 断面(測定区間 0-2, 数分後)

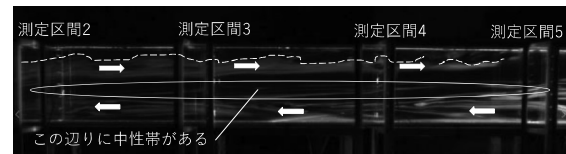


図 3.5 長手方向 B 断面(測定区間 2-5, 数分後)

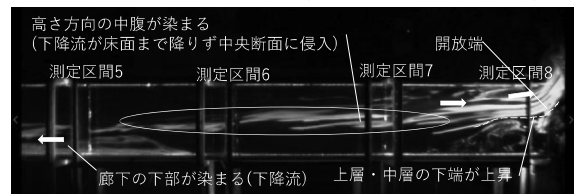


図 3.6 長手方向 B 断面(測定区間 5-8, 数分後)

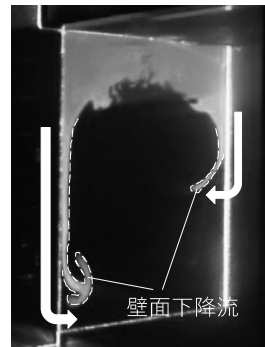


図 3.8 短手方向 1-2 断面
(流入直後)

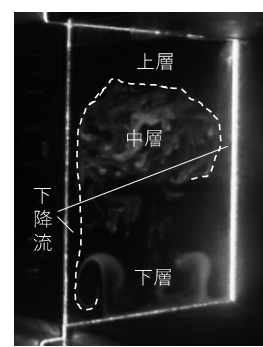


図 3.9 短手方向 1-2 断面
(数分後)

4. 中規模模型実験と相似則の妥当性

4.1. 模型概要

表 3.1 に、小規模模型(1/10 スケール)実験、中規模模型(1/5 スケール)実験、実大の対応を示す。中規模模型は、小規模模型と相似な形状で、三辺がそれぞれ約 1.8 倍となるように作成した。

表 4.1 3 スケールの対応

	スケール	高さ [mm]	幅[mm]	長さ [m]
実大	1/1	3,000	2,400	53.0
中規模	1/5.4	565	450	9.8
小規模	1/10	305	240	5.3

4.2 測定概要

図 4.1 に、中規模模型の測定点を示す。1/10 スケール同様に測定区間を 0-8 まで設け(約 1,300mm 間隔)、各区間での定常時の鉛直分布を求めた。ただし、流速の測定点は鉛直 3 か、5 点とした。シートレーザーによる可視化も一部の条件で実施した。

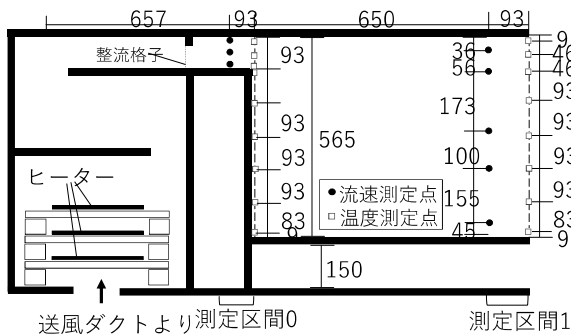


図 4.1 火災室付近の測定点

4.3 実験条件

表 4.2 に中規模模型の実験条件を示す。実験条件は流入口での温度上昇値 ΔT [K]、平均流速 V [m/s]、追加での断熱の有無の 3 項目とし、式(2.6)の相似則による縮率に従って温度上昇値と流速を定めた。ただし、 $n(R)$ の算出時には、主に文献値²⁾の物性と、1/10 スケール実験時の内側熱伝達率(2.78[W/m²K])、外側熱伝達率(6.58[W/m²K])を用いた。

表 4.2 中規模模型の実験条件

実験 No	L[mm]	ΔT [K]	V [m/s]	断熱	Ar 数
M1	93	6.3	0.077	-	3.26
M2	93	13.3	0.089	-	5.26
M3	93	7.1	0.157	-	0.884
M4	93	15.9	0.199	-	1.25
M5	93	14.2	0.262	有	0.829
M6	93	12.6	0.203	有	1.19

4.4 相似則の妥当性

図 4.2、4.3 に実験 M1 と S9 の無次元温度上昇値分布を示す。横軸に天井高で無次元化した流入口からの距離を取り、縦軸に天井高で無次元化した高さを取った。そして各測定点での温度上昇値を実験条件の温度上昇値で無次元化している。これらの実験はそれぞれ式(2.6)で導出した縮率に対応しており、Ar 数も近い。2 実験の温度の高温域の広がり方、開放端に向けての温度減衰、下層の温度の上がり方等が一致したため、相似則は妥当であると考えられる。

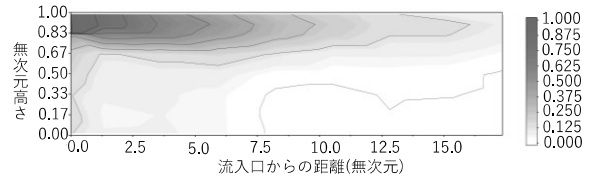


図 4.2 無次元温度上昇値分布(M1)

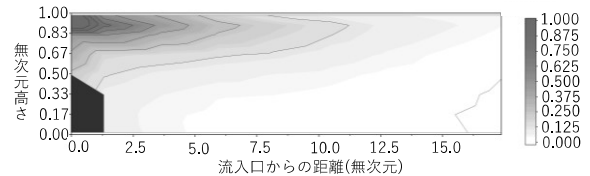


図 4.3 無次元温度上昇値分布(S9)

5. 煙降下の要因と実大規模の煙流動の考察

5.1 各条件が廊下内の煙流動性状に及ぼす影響

図 5.1~5 に、図 4.3 と同様に作図した実験 S6、S8、S10、S11、S12 の無次元温度上昇値分布を示す。図中には $N\%$ 法($N=20$)で算出した煙層下端をプロットした。

S10 と S11 は流入口の温度上昇値が等しく、流速が約 2 倍となる条件である。流速が大きくなる(Ar 数が小さくなる)と、温度の高い煙の範囲が大きく下方に広がっていることがわかる。さらに、煙が速いためその流動距離が長くなっても比較的溫度をよく保っていることが分かった。

S8 と S10 は流入口の流速が等しく、温度上昇値が約 2 倍となる条件である。温度上昇値が大きくなると成層化が進み、煙の厚みに影響が出るのではないかと予想していたが、この 2 条件では温度上昇値分布に大きな差は見られなかった。ただし、流入口厚さが異なるものの、温度上昇値の小さい S6 などでは下方に大きく広がっていることがわかる。

S8 と S12 は流入口の温度上昇値と流速が等しく、壁面の断熱性能が異なる条件である。断熱性能を大きくすると、煙の流動距離に対する温度低下が小さくなった。また、断熱することで下降流が起りにくくなっていると考えられるが、下層温度は S12 の方が高くなった。これは界面での乱流混合を無視できないことを示している。

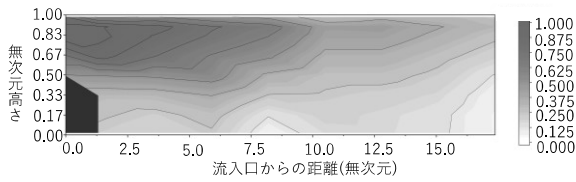


図 5.1 無次元温度上昇値分布(S6)

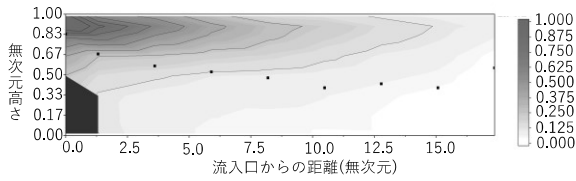


図 5.2 無次元温度上昇値分布(S8)

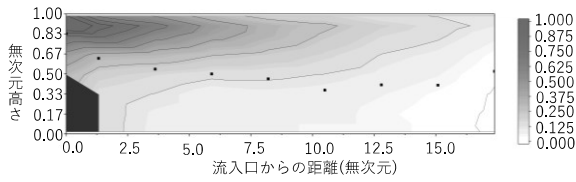


図 5.3 無次元温度上昇値分布(S10)

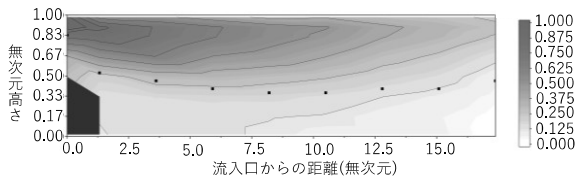


図 5.4 無次元温度上昇値分布(S11)

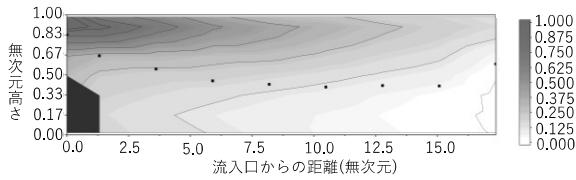


図 5.5 無次元温度上昇値分布(S12)

5.2 Ar 数と降下に必要な距離の関係

Ar 数の近い条件で、異なるスケールでも温度上昇値分布が相似形になったこと、下方への煙の広がり方には温度より流速が効くことから、煙の降下と Ar 数の関係性を検討した。煙の温度が低く、その精度には疑問が残るものの、温度上昇値分布を比較する際の指標として、本比較では N%法(N=20)を使用した。

行った全実験での結果を図 5.7 に示す。温度上昇値のかなり小さい S6, S7 と、天井高の半分不到達しない計算結果となった M2 は除外した。結果、各群において、Ar 数が大きくなると降下に必要な距離が大きくなるという結果となった。ただし、S1~S5 は判定基準とした天井高の半分に対して流入口の厚みが厚すぎるため、計算上の誤差が大きく出て相関関係から外れてしまったのではないと思われる。

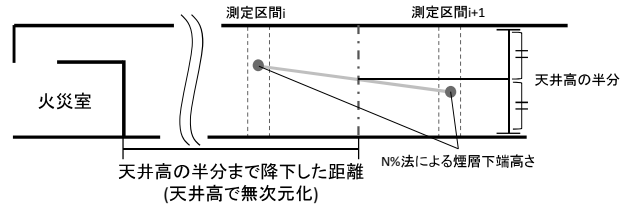


図 5.6 天井高の半分まで煙層下端が降下するのに要した距離(無次元)の算出方法

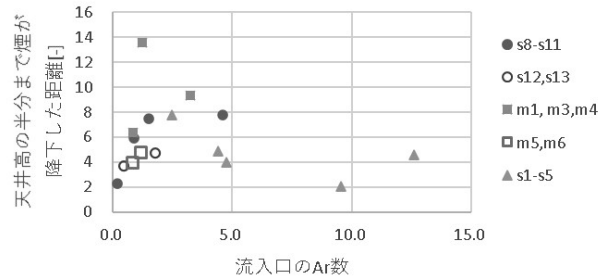


図 5.7 Ar 数と天井高の半分まで煙層下端が降下するのに要した距離(無次元)の関係

6. 結論

本研究は、火災時の廊下状空間での煙流動性状の解明を目的とした。結論を以下に示す。

- ・ 既往研究を参考に相似則を導出し、温度上昇値、流速がその縮率に対応する(Ar 数が同程度の)条件の異なるスケールの実験結果を比較したところ、廊下内の温度上昇値分布、流速分布が良好に一致した。そのため、相似則は妥当であると考えられる。
- ・ 廊下状区間での煙流動性状は、長手方向断面では三層状となっていた。また、壁面付近では壁面に冷やされて下降流が発生しており、その降下速度や降りる高さは位置(失熱量)によって異なっていた。
- ・ 実験条件の流速を大きくするか、温度上昇値を小さくする、つまり Ar 数を小さくすると、煙は下方に広がった。そこで天井高の半分まで煙が降下するまでにかかる距離と Ar 数の関係について整理すると、断熱性能や流入口の厚みが同じグループ間では、Ar 数が小さくなるほど下方に広がるまでに必要とする距離が短くなる傾向があることがわかった。

参考文献

- 1) 辻本誠 他：一部に開口のある空間での煙流動に関する模型実験 大規模空間での初期火災時における煙流動に関する研究 第一報、日本建築学会構造系論文集 第 488 号 p153-160, 1996 年
- 2) 田中喙義：建築火災安全工学 第 3 版、p483、日本建築センター