

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」 研究成果概要報告書

研究課題		廊下空間における煙流動性状に関する 実験的研究	実施年度
			2020年度
研究代表者	所属	京都大学大学院工学研究科・助教	
	氏名	仁井 大策	
	問合せ先メールアドレス	nii@archi.kyoto-u.ac.jp	
共同研究者	氏名・所属・職	原田 和典・京都大学大学院工学研究科・教授	
		森口 友寿・京都大学大学院工学研究科・大学院生	
		畠山 侑己・京都大学大学院工学研究科・大学院生	
受入担当責任者	氏名	松山 賢 教授	

1. 研究の背景および目的

廊下は火災時の重要な避難経路であるが、火災初期の比較的低温な煙が流入すると、天井および壁面への失熱等により煙に働く浮力が減少し、煙が降下する。これにより、避難者が煙に曝されるほか、視認性の悪化により適切な避難経路の選択ができず、パニックを起すといった心理的障害も起こりうる。このような廊下空間での煙降下についてはいくつか既往研究があるが、その要因や定量的分析は十分ではなく、設計実務では二層ゾーンモデルに頼らざるを得ないのが現状である。

申請者らは、このような廊下空間での煙流動性状の予測手法の開発に資するため、小規模断面の模型実験を実施してきた。その中で、煙の下降の要因として、廊下上部を流れる煙と下部の空気との乱れによる混合のほかに、壁面で冷却されることによる下降流があることが判明している（右写真1参照）。しかし、これら二つの要因が煙降下に及ぼす影響の度合いは模型スケールに依存するとも考えられ、実験結果を実規模廊下へ適用するためには相似性を検討する必要がある。そこで、本研究では、縮率の異なる実験模型を用いて廊下空間での煙流動性状を測定し、煙降下に大きく影響を及ぼす物理パラメータを特定するとともに、相似則の構築を目指した。

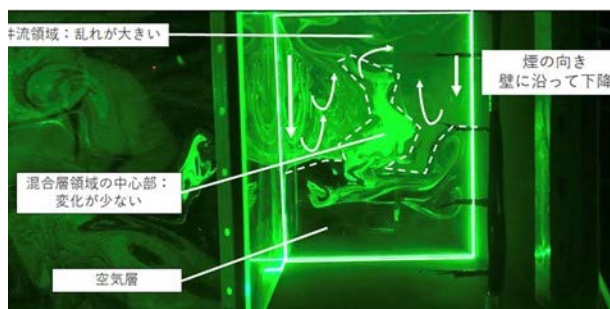


写真1 廊下断面での煙流動

2. 利用施設及び利用日

- 廊下空間模型 (2020年11月16日～11月20日および12月7日～12月11日)

- ・ PIV システム (2020 年 12 月 7 日 ~ 12 月 11 日)

3. 実験方法・研究成果、および考察 (申請時の計画に対する達成度合いも含む)

3. 1 実験装置

東京理科大学が所有する廊下空間模型を利用して、図 1 および写真 2 に示す中規模実験装置を製作した。廊下空間の寸法は幅 450mm×高さ 565mm×長さ 9,800mm であり、これは京都大学で使用している小規模実験模型の 1.85 倍のスケールに相当する。廊下空間の一側面は石膏ボード、天井面は主にケイカル板でもとより構成されており、面材が貼られていなかった壁面 (写真 2 手前側面) 材料には内部の目視観察のためアクリル板を用いた。また、一部の条件では、断熱としてセラミックファイバブランケット(厚み 25mm)を天井と両壁面に貼り付けた。

廊下空間の一方の端部に発煙チャンバーを接続し、この内部にシート状ヒーターを設置することで熱気流を生じさせた。以降では、この熱気流を煙と呼ぶ。発煙チャンバーと廊下空間は高さ 93mm の開口(以下、煙流入口)で接続されている。もう一方の廊下端部は外気に開放した。

廊下空間内には、煙流入口およびそこから 650mm の位置を基点に 1,300mm ごとに熱電対ツリーを合計 9 本設置し、鉛直温度分布を測定した。各熱電対ツリーの煙流入口側で熱線風速計による鉛直流速分布を測定した。また、アクリル板壁面および天井面には熱流センサーを設置し失熱量を測定するとともに、シート状レーザー光を照射することで廊下空間内部の流れを目視観察した。

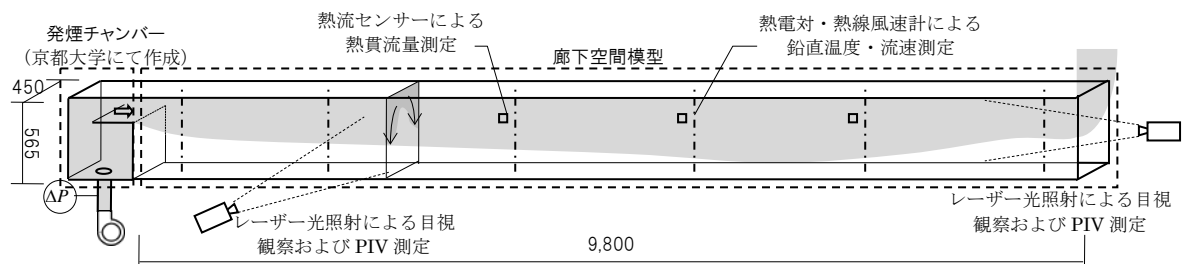


図 1 中規模模型実験概要

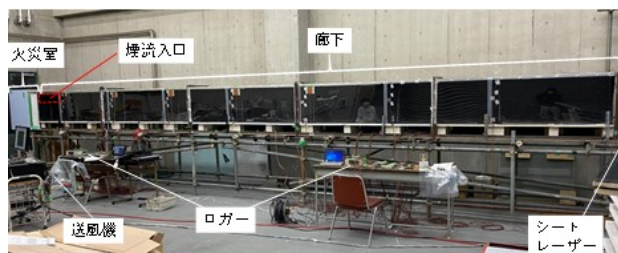


写真 2 中規模模型

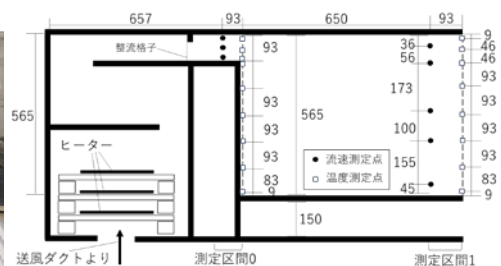


図 2 発煙チャンバー周りの測定点

3. 2 実験条件

(1) 相似則の理論的導出

小規模模型実験との比較を行うことを鑑みると、実験条件を検討する上で、理論的に相似則を導出しておく必要がある。

勝田らは粘性流体の連続方程式、エネルギー方程式、運動方程式より次の4つの π ナンバーが等しければ、流れが相似であるとしている。

$$\pi_1 = \frac{L_0}{t_0 V_0}, \pi_2 = \frac{\Delta p_0}{\rho V_0^2}, \pi_3 = g\beta \frac{\Delta T_0 L_0}{V_0^2}, \pi_4 = \frac{Q_0}{\rho c_p V_0 \Delta T_0 L_0^2} \quad (1)$$

ここで、 L :長さ[m]、 t :時間[sec]、 V :流速[m/s]、 Δp :基準からの圧力差[Pa]、 ρ :流体密度[kg/m³]、 g :重力加速度[m/s²]、 β :体積膨張率[1/K]、 Q :発熱量[W]、 ΔT :温度差[K]である。また、流体温度と壁面温度の縮率を長さスケールによらず1としつつ、定常状態における壁面を通じた熱貫流量の相似性を保つためには、壁面での境界条件として

$$\pi_5 = \frac{1/R_0}{\rho c_p V_0} \quad (2)$$

が等しくなければならない。ここで、 π_3 は Ar 数、 π_5 は St 数に相当する。以上より、物理量 f の縮率を $n(f)$ と表すと、各物理量の縮率は長さの縮率 $n(L)$ と周壁熱抵抗 R [m²K/W]の縮率 $n(R)$ を用いて

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

と表すことができる。

(2) 実験条件

小規模、中規模それぞれの模型の壁面構成材料の熱伝導率を文献あるいは事前測定から求め、また、壁面と周辺流体との熱伝達率には小規模模型実験から求めた値（模型内部：3.6W/m²K、模型外部：6.6W/m²K）を用いることで、熱抵抗の縮率 $n(R)$ を算出し、中規模模型実験の実験条件を次の表1に示すように設定した。

表1 実験条件

実験 No	煙流入口			壁面断熱材	Ar 数
	高さ[mm]	煙温度上昇[K]	流入流速[m/s]		
M1	93	6.3	0.094	-	2.19
M2	93	13.3	0.108	-	3.54
M3	93	7.1	0.192	-	0.594
M4	93	15.9	0.242	-	0.842
M5	93	14.2	0.319	有	0.557
M6	93	12.6	0.247	有	0.802

3. 3 実験結果

(1) 流れの性状

目視観察の結果の一例として、実験 No.M1 の廊下空間中央部での流れの様子を写真 2 に示す。小規模模型実験と同様に、廊下空間へ流入した煙は開放端に向かって廊下上部を流れる煙層と逆向きに床面に沿って流れる空気層に大別され、さらに煙層は流速の速い天井流領域と遅い混合層領域に分けられることが確認できた。また、壁面で冷却された煙が下降流となり、空気層や混合層へ混入していた。

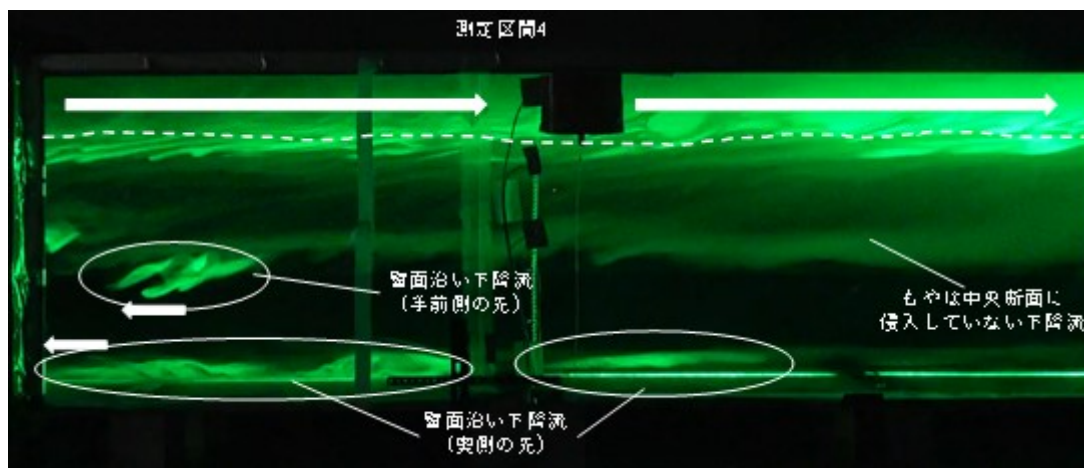


写真 2 廊下中央部での流れ (No.M1)

(2) 温度分布、流速分布

表 2 に示す 2 組の実験ごとに温度分布、流速分布を比較し、前節で示した相似則の妥当性を検討する。ここで、実験 No.S8、S13 はともに小規模模型実験であり、式(3)の関係を満たす温度、流速が煙流入口から流入している、かつ、 Ar 数が比較的近い条件を選んだ。

表 2 比較条件

	実験 No.	流入煙温度 ΔT [K]	流入流速 V [m/s]	Ar 数	壁面追加断熱
①	M1	6.3	0.094	2.19	無
	S8	14.2	0.115	1.54	無
②	M6	12.6	0.247	0.802	有
	S13	16.2	0.236	0.487	有

図 3 に中規模模型実験 M1 および小規模模型実験 S8 における煙流入口での煙の温度、流速で無次元化した廊下中央断面での温度分布、流速分布を示す。また、縦軸、横軸ともに廊下高さで無次元化した座標上に表示している。なお、M1 の流速分布はデータ欠損のため天井流領域のみの表示とした。

図 3 左の温度分布をみると、比較的高温な煙層の厚さやその温度減衰過程はスケールに依らずほぼ同じであり、温度場のみではあるが、流れの相似性が確認できた。

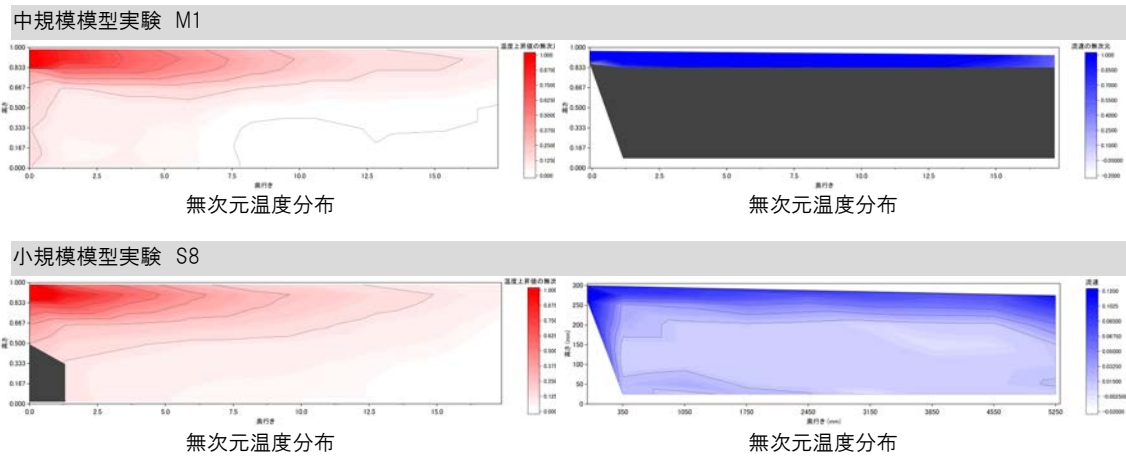


図3 温度分布、流速分布の比較 (M1 vs S8)

図4は中規模実験M6、小規模実験S13での温度、流速の無次元分布であり、ともに壁面、天井面に断熱材を追加で貼付した条件である。図4左の温度分布をみると、流入直後に煙の厚さが増大し、温度減衰しながら開放端側へ流れていることがわかる。また、開放端側下方から空気が流入し、温度が上昇しながら煙流入口側へ流れる過程もスケールに依らずよく一致している。図4右の流速分布をみると、無次元高さ0.3~0.4付近に流速が小さい領域が帯状に表れており、廊下空間内での中性帯高さも一致している。以上より、これらの条件でも相似則が妥当であったことが確認できた。

壁面に断熱材を貼付していない条件と比べて、煙層が厚いことが温度分布、流速分布双方から読み取れる。壁面の断熱性が向上したことで空気層へ混入する壁面下降流は減少したと推測されるため、中性帯付近での界面混合が天井流厚さを増大させた主要因ではないかと推察される。断熱材を貼付していたため、内部の目視確認ができていないが、今後検討を続けて界面での混合量や天井流の流量予測を試みる予定である。

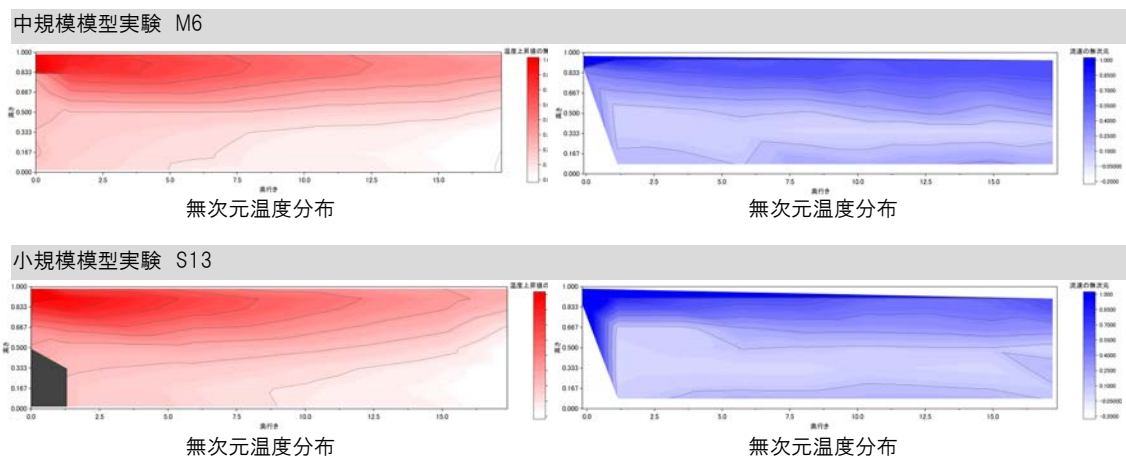


図4 温度分布、流速分布の比較 (M6 vs S13)

(3) 煙層下端高さの変化

煙層下端高さはすべての条件で目視観察できていない。そこで、目視観察した結果からN%法におけるN値を求め、すべての条件でN%法が適用できるものとして、廊下空間での煙流動距離に対する煙層下端高さを求めた。その結果、図5に示すように、天井流領域の厚さはN=80、多少バラつきがあるものの煙層下端高さ（混合層と空気層との境界面）はN=15とすれば、概ね推測できることを確認した。

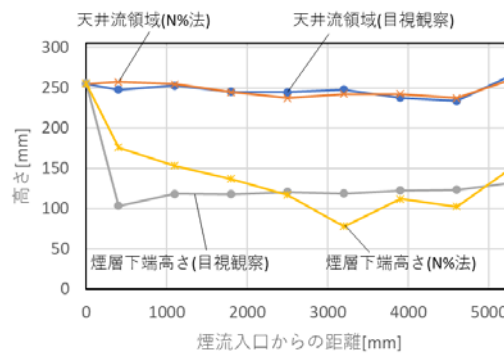


図5 界面高さの変化(S8)

一般に成層化した流体の境界安定性は勾配リチャードソン数 $Ri = g\beta(\partial\Delta T/\partial z)/(\partial v/\partial z)^2$ に依存することが知られているが、これは局所的な量であり、流れ全体を対象とするため、煙流入口での温度と流速の勾配の比を表す Ar 数 ($=g\beta\Delta Th/V^2$) を用いて煙降下距離を分析した。ここで、 h : 煙流入口高さ[m]、 V : 流速[m/s]、 g : 重力加速度[m/s²]、 β : 体積膨張率[1/K]、 ΔT : 温度差[K]である。ここで、煙降下距離とは、図6に示すように煙流入口下端から煙層厚さが Δd 増加するのに要した水平方向距離 y であり、 Δd および y を廊下天井高さ H で除した無次元距離をそれぞれ Δd^* , y^* とすると、

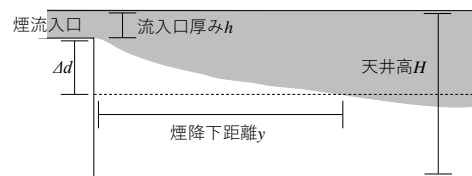


図6 煙降下距離の定義

$$y^* \propto (\Delta d^*)^m Ar^n \quad (4)$$

なる関係が成立すると考えられる。

小規模および中規模の模型実験で得られたデータを整理・分析した結果、図7に示すように、式(4)におけるべき乗数を $m=3/2$ 、 $n=1/2$ とすれば、模型スケールによらず煙の流動距離に対する煙層下端高さを相関良く回帰できることがわかった。

$$y^* = 20(\Delta d^*)^{3/2} Ar^{1/2} \quad (5)$$

ただし、 Δd^* が大きくなるにつれ、データのばらつきが大きくなっている。これは、図4でも示したように、煙の下流側での中性帯高さが廊下高さの1/3程度であることから、床面付

近を流れる空気層の流速が比較的大きく、煙層下端での乱れが大きかったためだと考えられる。

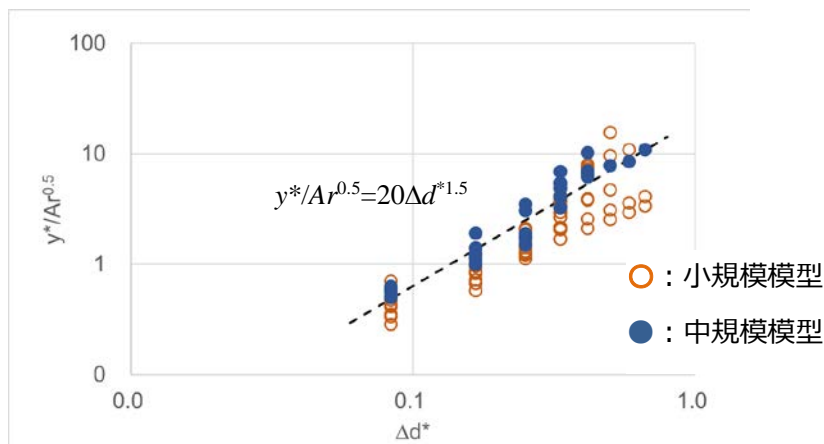


図7 Ar数と無次元煙降下距離の関係

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

今回の共同研究で模型実験における相似則が確認できたとともに、廊下への煙流入後の煙層下端高さの推移を定量的に表現できた。

今後は、煙層と空気層との混合量や壁面での下降流をモデル化するとともに、廊下両端の開放性や空気の流入条件も考慮した予測モデルを構築を目指す。そのため、当面は小規模模型実験を継続的に実施し、詳細な測定と分析を行う予定である。それらの成果をもとに、必要に応じて再度共同利用・共同研究に応募し、中規模模型を利用した実験が実施できればと考えている。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

- [1] 畠山、仁井、原田、松山，“火災時の廊下状空間における煙層下端の降下性状に関する実験的研究”，日本建築学会近畿支部研究発表会，2021.6（発表予定）
- [2] 畠山、仁井、原田、松山，“火災時の廊下状空間における煙層下端の降下性状に関する実験的研究”，日本建築学会学術講演発表会，2021.9（発表予定）

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事項	金額(円)	事項	金額(円)	事項	金額(円)
BSSR1200 ボード (送料含む)	47,080	旅費・宿泊費 (11/16-20)	118,482		
アクリル板	39,268	旅費・宿泊費	118,482		

T 型熱電対	191,730	(12/7-11)			
塗装用品一式	17,638				
SD カード	10,437				
小計	306,153	小計	236,964	小計	
東京理科大学 負担分 総計 543,117 円					

上記以外 京都大学 負担分 総計 66,348 円

以上

※ページは適宜増やしてください。

※上記 5 に記載された成果公表については、別刷 1 部をご提出願います。PDF ファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告として Web 等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。(フォーマットは問いません。)

※後日開催予定の成果発表会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。