

微小な圧力差における水平開口の流れ性状の測定

正会員 ○宮本拓幸*1 同 原田和典*2

4 環境工学 13 空気流動応用 ○煙流動

二方向流、煙層厚さ、フルード数、無次元圧力

1. 研究の目的

天井面に設置された排煙口は、下部は煙層、上部は常温の空気に接触する。煙層の温度が十分に高ければ煙が上部へ排出されるが、火災初期で煙温度が低い場合や火災室の圧力が低い場合には、開口の一部で煙が上昇し、残りの部分で空気が下降する二方向流や、煙の上昇と空気の下降が時間的に入れ替わる振動流が発生する。

二方向流あるいは振動流が発生すると煙層が乱れ、避難および消火活動への支障が懸念される。そのため、二方向流あるいは振動流が発生する条件とその程度を定量化しておくことが望まれる。この問題に対して田中ら¹⁾は模型実験を行い、煙層の浮力と開口部の圧力差の組み合わせを変えて二方向流あるいは振動流を発生させて、煙と空気の質量流量を測定している（以下、先行研究と呼ぶ）。本研究では、煙層温度が先行研究よりも高い条件で測定を行い、温度に関する相似性について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究は先行研究と同じ実験装置を使用した。図 1 に実験装置の概要を示す。外気が自由に出入りできる下部空間（火災室）と、密閉された上部空間の 2 つで構成され、両空間の間の天井板には 100mm×100mm の正方形開口を設けている。

上部空間には 2 系統のファンを取り付け、給排気量を調節することによって開口部に加わる圧力差を設定した。火災室にはガスバーナーを設置し、天井下に煙を蓄積させる。開口部を通過した煙は上部空間の集煙フードにためられ、排気ファンによって装置外へ排出される。

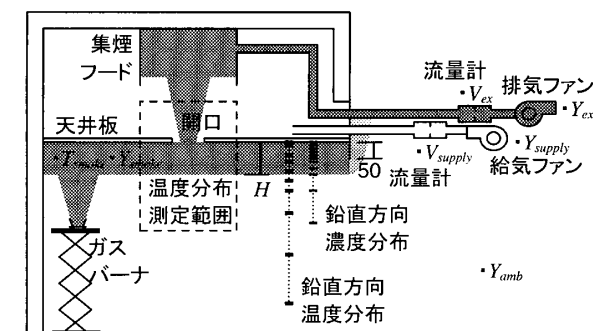


図 1 実験装置の概要

2.2 測定項目

実験での設定条件は、煙層の浮力と開口部に加わる圧力差である。煙層の浮力を求めるため、火災室内の鉛直温度分布を測定し、最高温度と外気の差が 20% となる位置を煙層下端として煙層厚さ H を求めた。煙層温度 (T_{smoke}) は、煙層内に含まれる測定点の温度を平均して求め、次式で密度差を求めた。

$$\Delta\rho = 353/T_{smoke} - 353/T_{amb} \quad (1)$$

圧力差は、天井板上端高さにおいて上部空間内部と外部との圧力差を測定し、煙層浮力に相当する圧力を補正して求めた。

開口を通過する煙と空気の質量流量は、上部空間における全気体および炭酸ガスの質量収支から求めた。そのため、外気 (Y_{amb})、煙層 (Y_{smoke})、上部空間への給気口 (Y_{supply}) と排気口 (Y_{ex}) において炭酸ガス濃度を測定した。ただし、煙層の炭酸ガス濃度は開口中心から水平方向に 350mm 離れた 4 点のガスをサンプリングして鉛直方向の分布を求め、煙層に含まれる測定点の値を平均した。

また、流れのパターンを把握するため、開口部近傍の温度分布を図 1 の点線で囲んだ部分(幅 300mm、開口上方向 300mm、開口下方向 240mm)

Measurements of smoke and air exchange flow through horizontal opening under small pressure differences

MIYAMOTO Hiroyoki and HARADA Kazunori

で測定するとともに、白煙噴出器により流線を目視観察した。

温度分布はガスバーナーに点火後 25 分間放置し、温度が一定になった後に 2 秒間隔で 5 分間計測した値の平均とした。炭酸ガス濃度は、温度分布測定後にサンプリングチューブを各高さに設置し、測定値が安定した後の値とした。

2.3 実験条件

先行研究では、煙層温度上昇を 5℃または 10℃に設定して流れのパターンを観察して流量を測定し、煙層温度上昇 15, 20℃において流れのパターンの観察のみを行っていた。そこで、本研究では煙層温度上昇を 20℃に設定し、流量測定を行った。表 1 に設定した条件を示す。

表 1 実験条件

実験 No		1	2	3	4	5
煙層温度上昇(℃)		23.0	20.2	19.3	20.3	11.9
煙層厚さ(m)		0.119	0.117	0.118	0.118	0.118
開口の圧力差(Pa)		0.196	0.147	0.118	0.103	0.039
給気量 $\times 10^{-3}$ (m ³ /s)		11.8	10.4	9.35	9.69	9.19
排気量 $\times 10^{-3}$ (m ³ /s)		10.9	10.9	10.9	11.0	11.0
炭酸ガス濃度(%)	煙層	0.229	0.216	0.218	0.220	0.170
	給気	0.080	0.092	0.070	0.068	0.064
	排気	0.087	0.105	0.097	0.093	0.092
	外気	0.091	0.096	0.085	0.082	0.068

3 実験結果

3.1 各実験における煙性状の分類

天井開口部における煙流出性状は、下向き 1 方向流、2 方向流または振動流、上向き 1 方向流の 3 種類が確認された。以下ではそれぞれの実験における煙性状を述べる。

(1) 実験 1：下向き 1 方向流

実験 1 の開口付近の温度分布を図 2 に示す。温度の凡例は、図 2～6 で共通である。ガスバーナーは図の右側に配置しているため、左側と比べると右側の方が温度が高い。上部空間から空気が下降しているが下降した空気は煙層下端には到達せず煙層内で混合した。

(2) 実験 2：振動流

実験 2 の開口付近の温度分布を図 3 に示す。温度分布では上向きのみに煙が流れているように見えるが、気流性状の目視観察では振動流が観察された。

(3) 実験 3：上向き 1 方向流

実験 3 の開口付近の温度分布を図 4 に示す。開口上部の温度が上昇し、上向きの流れが確認される。また、煙層下部に着目すると、火災室の空気を少し持ち上げている。

(4) 実験 4：2 方向流

実験 4 の開口付近の温度分布を図 5 に示す。開口上部の温度が上昇し、上向きの流れが確認される。また、目視観察においては、開口の左側で振動流が発生し、開口下部の煙層に低温部分が生じている。

(5) 実験 5：上向き 1 方向流

実験 5 の開口付近の温度分布を図 6 に示す。実験 1～4 より煙層温度が少し低いものの、開口部上方の温度が上がり、上向きの流れが生じている。しかし、煙層下部の空気を吸い上げるほどの流れではなく静穏な空気層が煙層下部に滞留していた。

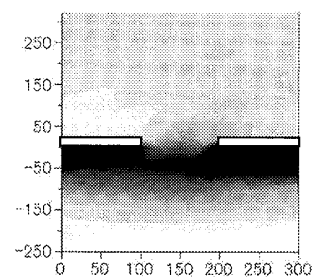


図 2 実験 1 の温度分布

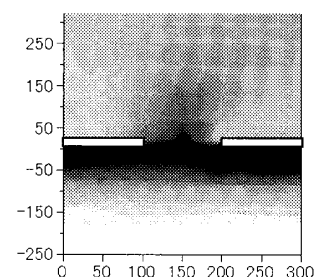


図 3 実験 2 の温度分布

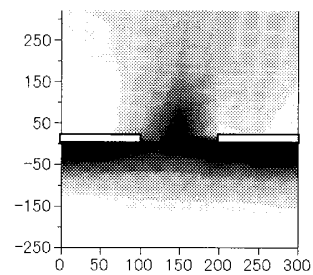


図 4 実験 3 の温度分布

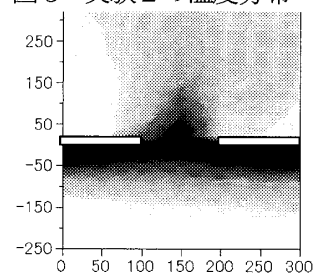


図 5 実験 4 の温度分布

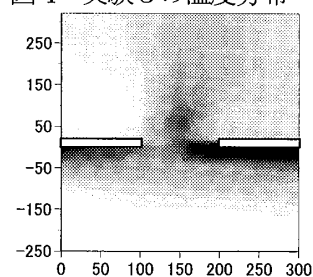


図 6 実験 5 の温度分布

3.2 開口の質量流量

質量流量の測定結果を図 7 に示す。横軸は上部空間を基準とした圧力差、縦軸は開口を通過する煙流量、

空気流量、煙と空気を合わせた正味流量であり上向きに流れる場合を正としている。

煙流量はすべて正となっており、実験1～4では圧力差が負であるにもかかわらず煙は上向きに流れている。空気流量は圧力差が0から-0.06Paではほぼ0となっており、それ以外の圧力差では空気は下向きに流れている。正味流量は実験1以外において正の値をとる。圧力差が正の場合ではオリフィス流れよりも大きな値となる。圧力差が負の場合ではオリフィス流れでは負の値になるが、実験2～4では正の値、実験1では僅かに負の値となった。

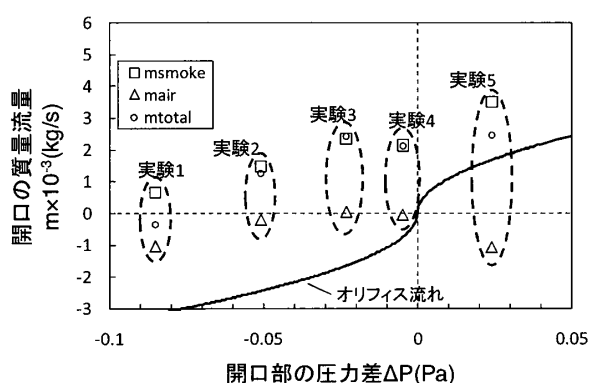


図7 開口を通過する質量流量

4. 考察

4.1 無次元数の定義

温度条件の異なる各実験を比較して考察するため、無次元数であるフルード数 Fr と無次元圧力 Π を導入する。フルード数 Fr は開口を通過する質量流量を無次元化したものであり、無次元圧力 Π は開口部の圧力を無次元化したものである。各無次元数の定義を次式に示す。

$$Fr = (m / \rho D^2) / \sqrt{2gH\varepsilon} \quad (2)$$

$$\Pi = \Delta P / 4\rho\varepsilon gH \quad (3)$$

ここで、 m は開口を通過する質量流量(kg/s)、 ρ は開口を通過する流体の密度(kg/m³)、 D は開口寸法(m)、 g は重力加速度(m/s²)、 H は煙層厚さ(m)、 ΔP は開口部の圧力差(Pa)、 ε は無次元温度上昇(-)であり、次式で定義する。

$$\varepsilon = 2(T_{smoke} - T_{amb}) / (T_{smoke} + T_{amb}) \quad (4)$$

ただし、 T_{smoke} は煙層温度(K)、 T_{amb} は基準温度 (=外気温度) (K)である。

4.2 限界圧力差と煙層浮力の関係

本実験と先行研究の実験により求められた限界圧力差を煙層浮力に対してプロットすると図8となる^{文末街}。各実験シリーズでの限界圧力差と原点を結ぶ傾きが無次元限界圧力 Π_{flood} となる。各実験における傾きを平均すると次の値を得る。

$$\Pi_{flood}^+ = \Delta P_{flood}^+ / 4\rho\varepsilon gH = 0.03 \quad (5)$$

$$\Pi_{flood}^- = \Delta P_{flood}^- / 4\rho\varepsilon gH = -0.26 \quad (6)$$

上向き1方向流の限界圧力差についてはおおよそ0付近にある。また下向き1方向の限界圧力については、煙層浮力($4\rho\varepsilon gH$)が大きくなると、一定値に収束しているようにも見える。これが誤差なのか物理的必然があるのかは現時点では不明である。

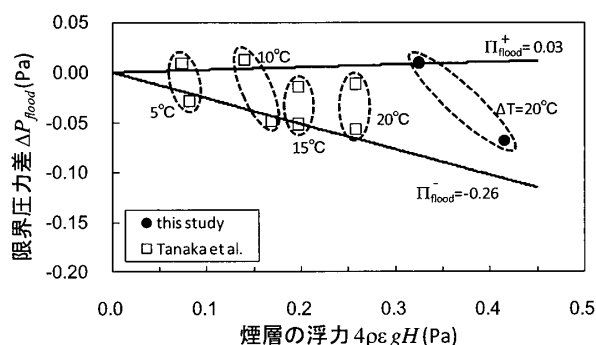


図8 一方向流となるための限界圧力差

4.3 無次元圧力と無次元質量流量の関係

本実験と先行研究の実験結果から導出された各フルード数と無次元圧力の関係を図9～11に示す。図中の曲線は、先行研究と同じ仮定を用いて作成した予測式である。関数形を式(7),(8)に示す。煙については、下向き1方向流では煙の移動がなく、これ以外ではオリフィス流れと類似の関係になると予想して圧力の原点を下向きの無次元限界圧力まで移動した。

空気についても同様に、上向き1方向流では空気の移動が無く、下向き1方向流ではオリフィス流れと類似の関係が成り立つとして、下向き方向の限界圧力差において無次元空気流量の測定値と一致するように原点を移動した。また、2方向流もしくは振動流の領域

では、直線的に変化すると仮定した。正味流量は、煙と空気の質量流量の和である。

$$Fr_{smoke} = \begin{cases} \sqrt{\Pi - \Pi_{flood}^-} & (\Pi_{flood}^- \leq \Pi) \\ 0 & (\Pi < \Pi_{flood}^-) \end{cases} \quad (7)$$

$$Fr_{air} = \begin{cases} -\sqrt{0.022 - \Pi} & (\Pi_{flood}^+ < \Pi) \\ 1.83(\Pi - \Pi_{flood}^+) & (\Pi_{flood}^- \leq \Pi < \Pi_{flood}^+) \\ 0 & (\Pi < \Pi_{flood}^-) \end{cases} \quad (8)$$

測定値と予測式を比較すると、図9に示す煙流量では、本研究の実験値と良く一致するが、先行研究の実験値よりも予測式は小さい。空気流量では、図10に示すように、上向き1方向流以外の領域では予測値に近い。しかし、上向き1方向流領域では実験値が負値となることを表現していない。図11に示す正味流量では、正負の誤差が打ち消されて全体的な傾向は一致しているが、下向きの無次元限界圧力差を超えたあたりでの不一致が残る。

以上より、無次元流量の計算式(7),(8)の適用性可能性については再考の余地が残った。無次元限界圧力を一定とする仮定の善し悪しとも併せて再検討する必要がある。

5. 結論

模型実験を行い、開口部の煙および空気の流れ性状を、下向き1方向流、2方向流または振動流、上向き1方向流の3つに分類し、温度差20Kにおける限界圧力差と煙および空気の質量流量を測定した。

先行研究の実験値と併せて結果を考察し、限界圧力差と煙層浮力の関係を考察した。先行研究では無次元限界圧力差を一定としていたが、本研究の結果によると限界圧力差そのものが一定である可能性も示唆される。

煙層温度が異なる条件で開口を通過する質量流量と圧力差の関係を比較したところ、圧力差が正の時でも下向きの空気流量があり、これを適切に表現する必要性を示した。

注：先行研究では煙層厚さ H をたれ壁深さで代用していたが、本報では煙層温度上昇が20%となる高さで煙層厚さを再定義してデータを示している。

*1 京都大学工学研究科 修士課程

*2 京都大学工学研究科 教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto University
Prof., Graduate School of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

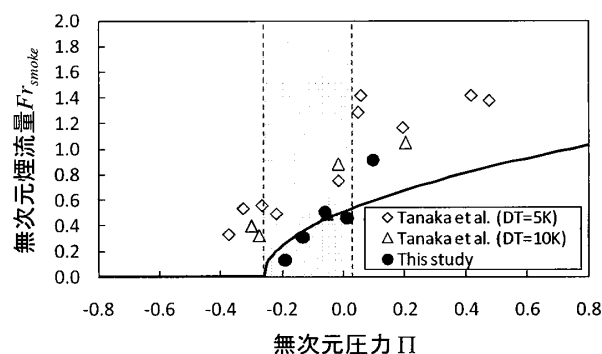


図9 無次元圧力 Π と無次元煙流量 Fr_{smoke} の関係

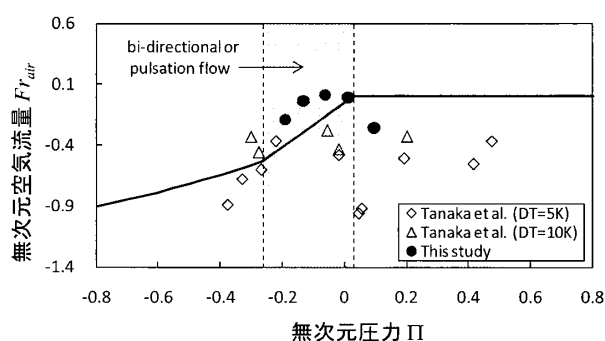


図10 無次元圧力 Π と無次元空気流量 Fr_{air} の関係

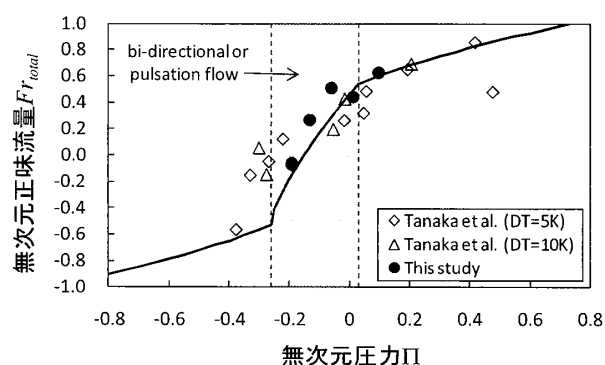


図11 無次元圧力 Π と無次元正味流量 Fr_{total} の関係

参考文献

- 1) 田中荘太郎, 原田和典, 「火災時における天井開口部の煙流出性状」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第50号環境系, pp.297-300, 2010

謝辞：本研究の一部は、平成22年度京都大学防災研究所一般共同研究「巨大空間における火災時の煙流動シミュレーション技術の開発」による補助を受けた。