

ダウンプルームによる煙の巻き込み量の測定方法の検討と予測式の提案

Development of measurement method of smoke entrainment by down plume and proposal of a prediction formula

建築学専攻 原田研究室 市川修暉

1. 研究の背景と目的

産業用施設では、外界と隔離するために躯体の気密性が高く、常時機械換気が行われる空間がある。特に、汚染物を扱う空間では火災発生後も換気を継続して内部を負圧に保つことが必要となる。

給気口が天井面にある室で火災が発生し、室上部に蓄積した煙層中に新鮮空気が供給されると、給気がダウンプルームとなって煙を巻き込みながら下部層へ向かう。煙の一部が下部層に運搬されて下部層を汚染する危険がある。

室上部での機械換気を継続させた状態での火災を想定した実規模実験^{[1][2]}がいくつか行われており、火災性状の把握と予測が試みられているが、煙層への給気が巻き込んだ煙による下部層の汚染の程度を把握するためには、給気による煙の巻き込み量を定式化する必要がある。本研究の目的は、給気から生じたダウンプルーム（鉛直下向き自由噴流）による煙の巻き込み量を模型実験で測定し、給気量及び煙と給気の温度差を固定した場合に煙層厚さと煙の巻き込み量との関係を明らかにすることである。

2. 模型実験の方法

2.1. 実験装置の概要

実験装置の概要を図1に、火災室の内観を図2に示す。実験装置は一つの大きなチャンバーになっており、天井板によって上部空間と火災室（1.8m(W)×1.8m(D)×1.2m(H)）に分割されている。上部空間に供給された空気は正方形吹出し口(100×100mm)を通して火災室に吹き出される。

火災室にはガスバーナー火源を設置し、都市ガス13Aを燃焼させて煙を発生させた。開口部に取り付けた垂れ壁によって煙を蓄積させ、火源の高さ、発熱速度、垂れ壁の深さ、排気量を調節して煙層厚さと温度を制御した。煙の冷却を防ぐため、表壁面と天井面にはセラミックボードを貼付けて断熱した。

ダウンプルームの広がりや煙層の境界面を通過する質量流量を測定するため、吹出し口下方で温度、炭酸ガス濃度および下向き風速の分布をトラバース装置に設置したセンサーで測定した。

また、噴流の外形と流れ性状を調べるため、吹き出し口の下方に水引糸により座標確認装置を設置し、白煙噴出器にて気流方向を目視で観察した。

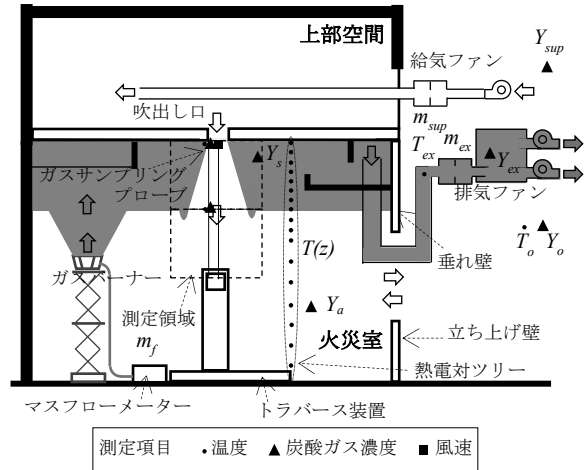


図1 実験装置の概要

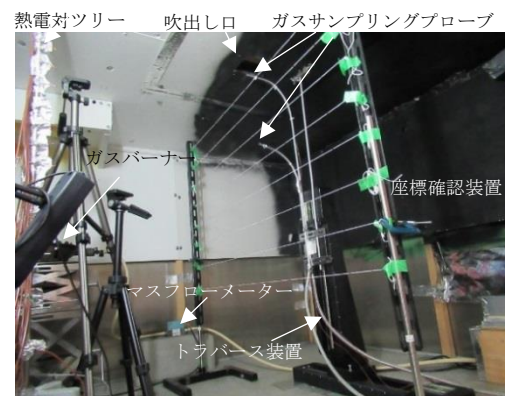


図2 火災室の内観

2.2. 測定値の整理方法

ダウンプルームが巻き込む煙量を二つの方法で測定した。測定方法を以下に示す。

2.2.1. 直接測定法

直接測定法は、煙層境界面において温度および風速の水平分布を測定して積分するものである。ダウンプルーム流量の算出では、質量流束が隣接する測定点との間は線形であることを仮定して、測定区間 $i \sim i+1$ での質量流束を式(1)で求めた。

$$\rho v_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1} v_{i+1} - \rho_i v_i}{\tau_{i+1} - \tau_i} \tau + \frac{\rho_i v_i \tau_{i+1} - \rho_{i+1} v_{i+1} \tau_i}{\tau_{i+1} - \tau_i} \quad (1)$$

図3に示すように、噴流の断面が円形であることを仮定して、式(1)で求めた質量流束分布を中心軸にて回転させた回転体の体積をダウンプルームの質量流量とする。ダウンプルーム流量と測定した給気質量流量の

差を採り、ダウンプルームが巻き込む煙量 $m_{e,dp}$ を次式で求める。

$$m_{e,dp} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{r_{i+1}} \int_{r_i}^{r_{i+1}} 2\pi r \left\{ \frac{\rho_{i+1} v_{i+1} - \rho_i v_i}{r_{i+1} - r_i} + \frac{\rho_i v_i r_{i+1} - \rho_{i+1} v_{i+1} r_i}{r_{i+1} - r_i} \right\} dr - \hat{m}_{sup} \quad (2)$$

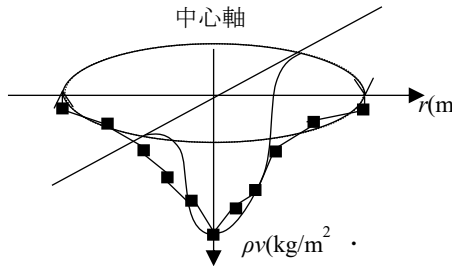


図3 ダウンプルーム流量の直接測定

2.2.2. ガス分析法

ガス分析法は、火災室の煙層と下部層、外部での炭酸ガス濃度を測定し、各層の質量収支式に代入してダウンプルームによる巻き込み流量を求める方法である。火災室内の質量保存と炭酸ガス質量保存に係る基本式を以下に示す。

・質量収支

$$D.P.: \quad m_{dp} = \hat{m}_{sup} + m_{e,dp} \quad (3)$$

$$\text{火災P.}: \quad m_p = \hat{m}_f + m_{e,p} \quad (4)$$

$$\text{煙層}: \quad m_p = m_{e,dp} + m_{ex,s} \quad (5)$$

$$\text{下部層}: \quad m_{dp} + m_{in} = m_{e,p} + m_{out} + m_{ex,a} \quad (6)$$

$$\text{排気}: \quad m_{ex,s} + m_{ex,a} = \hat{m}_{ex} \quad (7)$$

・炭酸ガス収支

$$D.P.: \quad m_{dp} Y_{dp} = \hat{m}_{sup} \hat{Y}_{sup} + m_{e,dp} \hat{Y}_s \quad (8)$$

$$\text{火災P.}: \quad m_p Y_p = \hat{m}_f \hat{F} + m_{e,p} \hat{Y}_{a,p} \quad (9)$$

$$\text{煙層}: \quad m_p Y_p = m_{e,dp} \hat{Y}_s + m_{ex,s} \hat{Y}_s \quad (10)$$

$$\text{下部層}: \quad m_{dp} Y_{dp} + m_{in} \hat{Y}_o = m_{e,p} \hat{Y}_{a,p} + m_{out} \hat{Y}_a + m_{ex,a} \hat{Y}_a \quad (11)$$

$$\text{排気}: \quad m_{ex,s} \hat{Y}_s + m_{ex,a} \hat{Y}_a = \hat{m}_{ex} \hat{Y}_{ex} \quad (12)$$

これらの収支式を連立し、ダウンプルームが巻き込む煙量 $m_{e,dp}$ について解くと次式となる。

$$m_{e,dp} = \frac{\hat{F} - \hat{Y}_{a,p}}{\hat{Y}_s - \hat{Y}_{a,p}} \hat{m}_f - \frac{\hat{Y}_{ex} - \hat{Y}_a}{\hat{Y}_s - \hat{Y}_a} \hat{m}_{ex} \quad (13)$$

3. ダウンプルームによる煙の巻き込み量の測定実験

3.1. 実験条件

表1に実験条件の一覧を示す。全ての実験で吹出し口は100×100mmの正方形開口とし、給気流量をほぼ一定(6.58~6.88×10⁻³ m³/s)とした。発熱速度、垂れ壁深さ、火源高さ、排気流量を調節して、煙層厚さを195~434mmの範囲で9条件に設定した。このとき、煙と外気の温度差は14.1~18.5℃であった。

測定はガス分析法で7条件、直接測定法で4条件で行った。

3.2. 実験結果

3.2.1. ダウンプルームの流れ性状

実験No.2-9においては、吹出し口から0, 90, 225, 360mmの高さにて風速、温度、炭酸ガス濃度の測定を行った。

(1)風速分布

図4に断面風速分布と流れ性状を示す。吹出し口から出た直後の0mmの断面風速分布はトップハット分布であった。煙層中で下向きに加速されて、煙層の中央断面で風速が最大となった。煙層の境界面では風速は三角形分布になった。

煙層に吹き出した給気は周辺の煙を巻き込みながら下方に向かっていく流れになった。ただし、煙層の境界面付近では下部層まで連行された煙の一部が浮力により煙層に戻った。

(2)温度分布

図5に温度分布を示す。吹出し口の直下では吹き出した噴流の影響によって温度の低い領域が形成された。煙層の中央断面ではダウンプルームが吹き出し直後に巻き込んだ高温の煙の影響でダウンプルームの中心軸と煙層の間に高温領域が形成された。

(3)炭酸ガス濃度分布

図6に炭酸ガス濃度分布を示す。炭酸ガス濃度分布は温度分布と概ね相似形で、ダウンプルームの外周部には高濃度領域が形成された。

表1 実験条件

実験 No.	煙層 厚さ	煙と外気 の温度差	垂れ壁 深さ	発熱 速度	火源 高さ	吹出 し口	給気 流量	排気 流量	外気 温度	ガス分 析法	直接測 定法
単位	mm	℃	mm	kW	mm	m ²	m ³ /s	m ³ /s	℃		
2-4	224	16.3	490	0.538	870	0.01	0.00677	0.0175	20.0	○	○
2-5*	434	16.9	730	0.605	630	0.01	0.00671	N.A.*	15.5	—	○
2-6	307	15.4	730	0.605	630	0.01	0.00684	0.0146	15.5	○	—
2-7**	361	16.0	730	0.605	630	0.01	0.00688	0.00951	15.7	—	—
2-8	399	18.5	730	0.605	630	0.01	0.00675	0.00727	15.6	○	—
2-9	379	17.0	730	0.605	630	0.01	0.00665	0.00951	16.2	○	○
2-10	195	14.6	490	0.470	900	0.01	0.00676	0.0174	16.5	○	○
2-11	246	16.7	490	0.538	800	0.01	0.00658	0.0174	16.1	○	—
2-12	374	14.1	730	0.605	630	0.01	0.00669	0.00168	16.2	○	—

*排気ダクトの吸引口が装置の下方にずれており、下部層からの空気が排気に混入した。**定常状態での炭酸ガス濃度の欠測があった。

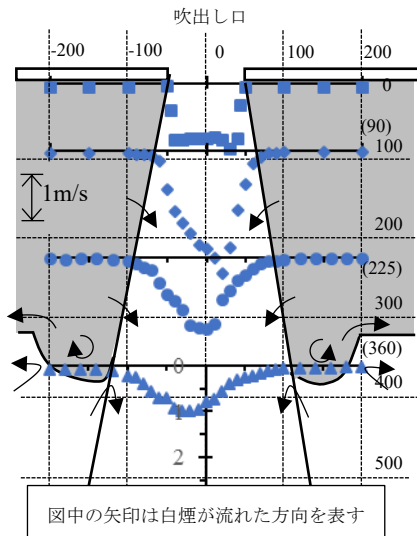


図4 風速分布とスケッチ(No.2-9)

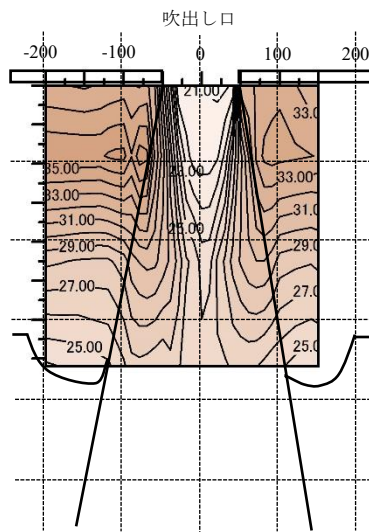


図5 温度分布(No.2-9)

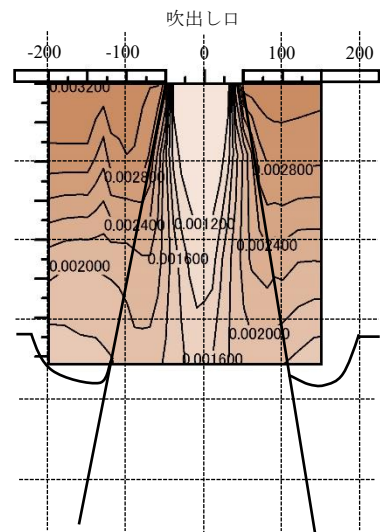


図6 炭酸ガス濃度分布(No.2-9)

3.2.2. 中心軸風速分布、及び中心軸温度分布

実験 No.2-9 では、ダウンプルームの中心軸上の風速と温度分布を吹出し面から 10mm 間隔で測定した。図 7 に中心軸上風速分布、給気と中心軸上の温度差分布、及び、給気口から離れた部分での鉛直方向の温度差分布を示す。ここで、給気温度は吹出し口から 0mm での測定値である。

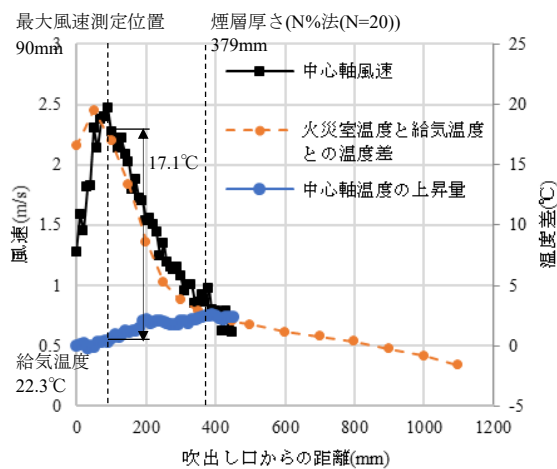


図7 中心軸風速分布、給気と中心軸の温度差分布、及び、給気と鉛直方向の温度差分布(No.2-9)

給気口から離れた部分での鉛直方向の温度差分布から N%法(N=20)で求めた煙層の厚さは 379mm であった。吹出し風速は 1.28m/s、最大風速は 2.47m/s であり、最大風速となる測定点と吹出し口からの距離は 90mm であった。中心軸風速は煙層の中央部にかけて増加し、その後吹出し口から離れるにつれて風速は減少した。給気温度は 22.3°C、煙層境界面における中心軸温度の上昇温度は 2.54°C、中心軸上の最大風速が得られた断面における火災室温度と中心軸上の温度との温度差は

17.1°Cであった。

中心軸上風速はダウンプルームの内部と周辺の温度差の影響で、吹出し面から煙層の中央までは下向きの浮力を受けて上昇し、煙層の中央よりも下方では上向きの浮力を受けて減少した。

3.2.3. 煙層厚さと煙の巻き込み量の関係

図 8 に各実験で得られたダウンプルームが巻き込む煙量を煙層厚さに対して示す。ガス分析法で測定した煙の巻き込み量は 0.00942kg/s~0.0258kg/s の間であった。直接測定法で求めた煙の巻き込み量は 0.0143kg/s~0.0194kg/s の間であった。

測定結果にはばらつきが大きいのが、煙層が厚くなると煙の巻き込み量が増加する傾向がみられる。また、煙層が 195mm、379mm のとき、二つの方法で測定した煙の巻き込み量は概ね一致した。

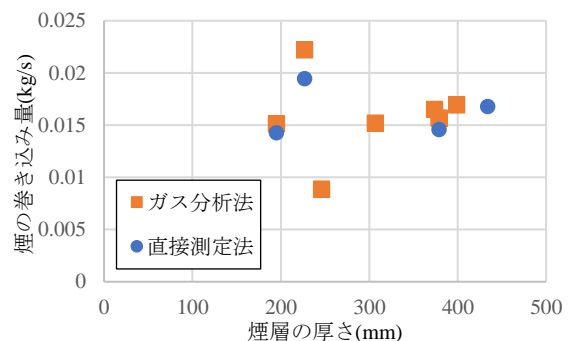


図8 煙層の厚さと噴流が巻き込む煙量の関係

4. ダウンプルームによる煙の巻き込み量の予測式

4.1. プルームの質量流量

自由空間中の火源から生じる浮力プルームの流量は次式で与えられる^[3]

$$m_{p,z} = 0.076Q^{1/3}(z + z_0)^{5/3} \quad (14)$$

図9に示すように、ダウンブルームでは、浮カブルームを上下反転させて考える。煙層よりも低い温度の吹き出し気流が持つエンタルピー差が浮カブルームの発熱速度に相当すると考えると、ダウンブルームの質量流量は次式となる。

$$m_{dp,z} = 0.076 \{c_p m_{sup} (T_s - T_o)\}^{\frac{1}{3}} (z + z_0)^{\frac{5}{3}} \quad (15)$$

4.2.2. 仮想点源高さ

吹き出し口からの給気によるダウンブルームは吹き出し口が有限の大きさを持っているために、仮想的な点源が吹き出し口よりも上部にあると考える。

Thomas^[4]の仮想火源高さの予測式を参考にすると、仮想点源高さは吹き出し口の寸法を用いて式(16)となる。

$$z_0 = 1.5\sqrt{A} \quad (16)$$

一方、吹き出し口における流量が給気質量流量に一致すると考えると、仮想点源高さは式(17)となる。

$$z_0 = \left\{ \frac{m_{sup}^2}{(0.076)^3 c_p (T_s - T_o)} \right\}^{\frac{1}{5}} \quad (17)$$

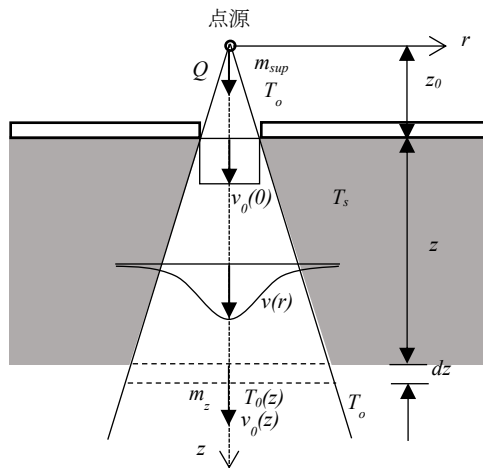


図9 ダウンブルームの概念図

4.3. 実験値との比較

ダウンブルーム流量の予測式(15)は、給気流量、煙層と給気の温度差、煙層厚さがパラメーターとなっている。表1に示すように実験では給気流量、及び煙層と外気の温度差を固定したため、煙層厚さのみをパラメーターとして計算を行った。図10にダウンブルーム流量の計算値と測定値との比較結果を示す。

Thomasの式(14)から求めた仮想点源高さは150mmであった。計算値はすべての測定値よりも小さくなった。煙層が0~230mmの間でダウンブルーム流量の計算値は給気質量流量よりも小さくなった。

吹き出し口における流量が給気質量流量に一致するように式(15)で求めた仮想点源高さは388mmであった。煙層が300mmよりも厚いときに計算値と測定値は概ね

一致した。

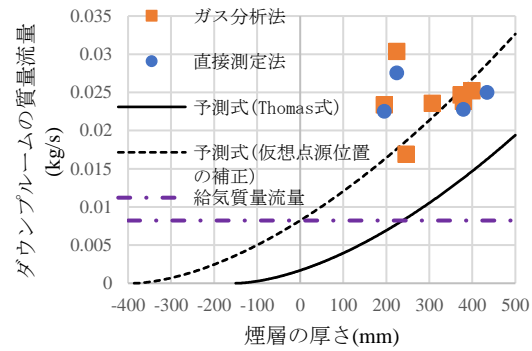


図10 ダウンブルーム流量の比較

5. 結論

煙層の中に供給された給気によって生じるダウンブルームが巻き込む煙量と煙層の厚さとの関係を定量的に把握するために模型実験を行い、以下の結果を得た。

- ダウンブルーム流量を直接測定法とガス分析法の二つの方法で測定した。
- 煙層温度、給気量がほぼ一定の条件で煙層厚さを変化させて実験を行った。ダウンブルームが巻き込む煙量はばらつきが大きいですが、煙層が厚くなると増加する傾向があった。
- 浮カブルーム流量の予測式を上下反転させてダウンブルームに適用し、実験と比較した。吹き出し口における流量が給気量と等しくなるように仮想点源高さを距離の5/3乗に応じて設定すると測定と比較的一致した。

記号: ρ :密度(kg/m³)、 v :風速(m/s)、 r :中心軸からの水平距離(m)、 m :質量流量(kg/s)、 Y :炭酸ガス濃度(kg/kg)、 F :可燃ガスの燃焼で生成する炭酸ガスの生成率(kg/kg)、 A :吹き出し口の面積(m²)、 c_p :定圧比熱(kJ/kg·K)、 T :温度(°C)、 z :点源からの距離(m)、 z_0 :仮想点源高さ(m)

(添字): Δ :測定値、 i :任意の点に隣接する中心軸に近い測定点、 j :任意の点に隣接する中心軸から遠い測定点、 dp :ダウンブルーム、 sup :給気、 ex :排気、 p :火災ブルーム、 f :可燃ガス、 in :開口流入、 out :開口流出、 e :巻き込み、 s :煙層、 a :空気層、 o :外気

参考文献

- [1] 日立GEニュークリア・エナジー株式会社、HLR-115訂1 補機火災を模擬した実規模燃焼試験、H26年1月
- [2] Audouin L, Rigollet L, Prêtre H, Le Saux W and Röwekamp M (2013) OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments—Overview and main experimental results. Fire Safety Journal,
- [3] Cetegen, B.M., Zukoski, E.E. and Kubota, T. : Entrainment in the Near and far Field of Fire Plumes, Combustion Science and Technology, Vol. 39, 305-331, 1982
- [4] Thomas, P.H. et al : Investigations into the Flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper, No.7, HMSO, 1963