

1. 研究の背景と目的

原子力発電施設やクリーンルームなど、躯体の気密性が高く、常時機械給排気が行われる空間がある。多くの場合、給気口は室上部にあり、火災発生後も給排気を継続することが必要な場合もある。そのような状況では、火災により室上部に形成された煙層を貫通するように給気が流れてダウンブルームが生じ、煙の一部はダウンブルームにより連行されて下部層を汚染する危険がある。

市川ら^[1]は、ダウンブルームによる煙の巻き込み量を模型実験によって測定する方法を提案し、煙層厚さと煙の巻き込み量との関係を求めた。

本研究では、市川^[1]の実験模型を改良し、ダウンブルームの風速、温度、および質量流量を測定した。また、実験値と既往の予測式を比較し、煙層に吹出すダウンブルームの質量流量の予測式を求めた。

2. ダウンブルームの流量予測式

2.1 既往の流量予測式

- (1) 等温噴流^[2]：空調吹出し気流の予測で使われている、開口から自由空間に吹き出す等温ブルームの流量予測式。
- (2) 浮力ブルーム(Zukoski 式)^[3]：静穏な環境で発生する火災ブルームの鉛直上向きの流量予測式。吹出し気流の周辺空気とのエンタルピー差が発熱速度に相当するとして、ダウンブルームに応用する。
- (3) 非等温噴流(日野式)^[4]：鉛直密度勾配が一定である空間に開口から鉛直方向に吹出すブルームの質量流量予測式。

2.2 プロファイル法による流量予測

2.2.1 基礎方程式

プロファイル法によると、ダウンブルームの質量、運動量、エンタルピーの保存式は以下の式(1)~(3)で表される。^[3]

$$\frac{d}{dz} \left[2\pi \int_0^{\infty} \rho_{dp} w_{dp} r_{dp} dr_{dp} \right] = -2\pi \rho_{e(z)} (r_{dp} v_{dp})_{r_{dp} \rightarrow \infty} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \left[2\pi \int_0^{\infty} \rho_{dp} w_{dp}^2 r_{dp} dr_{dp} \right] = 2\pi g \int_0^{\infty} (\rho_{dp} - \rho_{e(z)}) r_{dp} dr_{dp} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} \left[2\pi \int_0^{\infty} \rho_{dp} c_p (T_{dp} - T_{\infty}) w_{dp} r_{dp} dr_{dp} \right] = -2\pi \rho_{e(z)} (r_{dp} v_{dp})_{r_{dp} \rightarrow \infty} c_p (T_{e(z)} - T_{\infty}) \quad (3)$$

ここで、以下の仮定(i)(ii)を用いる。

- (i) ダウンブルームの風速および周辺空気との温度差の断面分布はガウス分布である。
- (ii) ダウンブルームによる周辺空気の巻き込み速度は中心軸上速度に比例する。

式(1)~(3)および仮定(i)(ii)より、ダウンブルーム性状に関する連立微分方程式(4)(5)(6)を得る。

$$\frac{db(z)}{dz} = 2\alpha - \frac{gb(z)}{\lambda^2 w_{dp,0(z)}^2} \frac{T_{e(z)} - T_{dp,0(z)}}{T_{e(z)}} \quad (4)$$

$$\frac{dw_{dp,0(z)}}{dz} = \frac{2g}{\lambda^2 w_{dp,0(z)}} \frac{T_{e(z)} - T_{dp,0(z)}}{T_{e(z)}} - \frac{2\alpha w_{dp,0(z)}}{b(z)} \quad (5)$$

$$\frac{dT_{dp,0(z)}}{dz} = \frac{2\alpha}{b(z)} (T_{e(z)} - T_{dp,0(z)}) - \lambda^2 \frac{dT_{e(z)}}{dz} \quad (6)$$

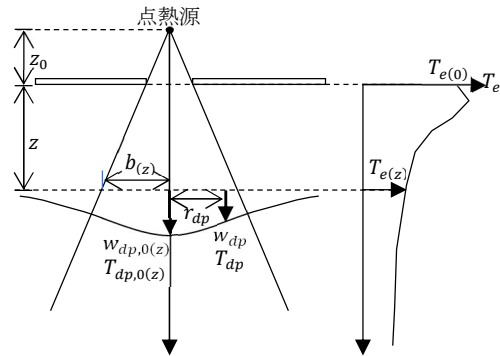


図1 ダウンブルームの概念図

2.2.2 ダウンブルーム流量

仮定(i)(ii)を用いると、ダウンブルームの質量流量は式(7)で表される。

$$m_{dp(z)} = \pi \rho_{e(z)} w_{dp,0(z)} b(z)^2 \quad (7)$$

2.2.3 境界条件

開口から吹き出すブルームの風速および温度差の断面分布はトップハット分布であるが、これを質量、運動量、エンタルピー流量が等しいガウス分布に近似すると、等価なガウス分布の特性幅、中心軸上風速、中心軸上温度は、以下の式(8)(9)(10)となる。

$$b_{(0)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{T_{e(0)}}{\hat{T}_{dp,0(0)}} \hat{w}_{dp,0(0)} A_0} \quad (8)$$

$$w_{dp,0(0)} = 2\hat{w}_{dp,0(0)} \quad (9)$$

$$T_{dp,0(0)} = (1 + \lambda^2) \hat{T}_{dp,0(0)} - \lambda^2 T_{e(0)} \quad (10)$$

2.2.4 適用範囲

この方法の適用範囲は周辺空気温度が一定の場合に限られることを検討した。

3. ダウンブルームによる煙の巻き込み実験

3.1 実験の目的

模型実験にて煙層に吹出すダウンブルームの質量流量を測定し、吹き出し口からの距離との関係を求める。

3.2 実験装置概要

図2に実験装置断面図を、図3に実験装置の内観を示す。実験装置は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。給気ファンによって上部空間に供給された空気を天井

板中央に設けた正方形吹き出し口から火災室に下向きに吹き出した。

火災室では、ガスバーナーを火源とし、都市ガス 13A を燃焼させて煙を発生させた。開口部には垂れ壁を設置して煙を火災室内に蓄積し、発熱速度、排気量を調節して煙層厚さと煙層温度を制御した。壁面および天井板からの煙の失熱を防ぐために、セラミックボードを用いて断熱した。

吹き出し口下方の鉛直面の風速分布及び温度分布を測定するためのセンサーと、煙層の炭酸ガス濃度を測定するためのガスサンプリングチューブを、それぞれトラバース装置に取り付けた。

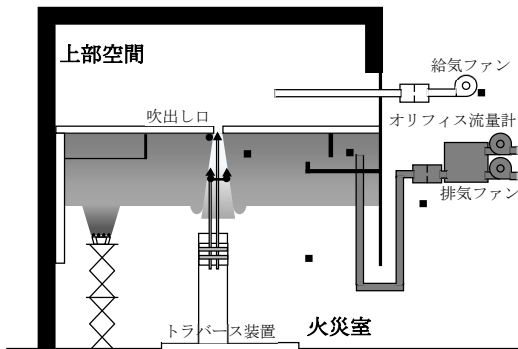


図2 実験装置断面図

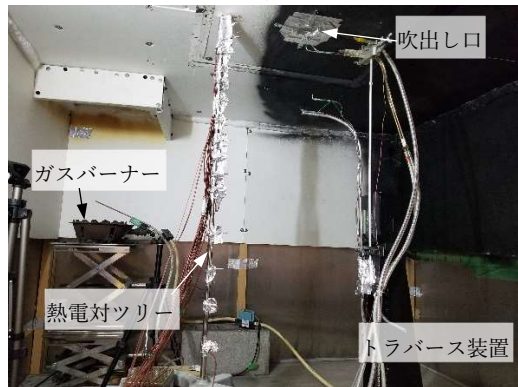


図3 実験装置内観

3.3 測定値の整理方法

3.3.1 直接測定法

ダウンプルームの質量流束分布を中心軸周りに回転積分し、式(11)を用いて断面を通過するダウンプルームの質量流量を求めた。

$$m_{dp} = \frac{1}{2} \sum \int_{r_i}^{r_{i+1}} 2\pi r \left\{ \frac{\rho_{i+1} w_{i+1} - \rho_i w_i}{r_{i+1} - r_i} r + \frac{\rho_i w_i r_{i+1} - \rho_{i+1} w_{i+1} r_i}{r_{i+1} - r_i} \right\} dr \quad (11)$$

3.3.2 ガス分析法

実験装置内の炭酸ガス濃度を測定した結果を質量流量の保存式に用いることにより、下部層に貫入した後そのまま下部層に残留する質量流量を式(12)で求めた。^[5]

$$m_{dp} = \hat{m}_{sup} + \frac{\hat{F} - \hat{Y}_{a,p}}{\hat{Y}_s - \hat{Y}_{a,p}} \hat{m}_f - \frac{\hat{Y}_{ex} - \hat{Y}_a}{\hat{Y}_s - \hat{Y}_a} \hat{m}_{ex} \quad (12)$$

3.4 実験条件

表1に実験条件を示す。吹き出し口は50mm×50mmの正方形開口とし、火源高さは630mm、垂れ壁深さは730mmで固定した。

実験 No.3-5,6,7,11 では煙層と外気の温度差を20°Cに設定し、吹き出し風速がそれぞれ2.8,1.6,2.2,1.2m/sとなるように給気流量を調節した。質量流量の測定は、実験 No.3-5 では直接測定法のみで、実験 No.3-6,7,11 では直接測定法とガス分析法で行った。

実験 No.3-8,9,10,12 は煙層と外気の温度差を40°Cに設定した。実験 No.3-8,9,10 では、吹き出し風速がそれぞれ2.8, 1.6, 2.2m/sとなるように給気流量を調節し、直接測定法とガス分析法で測定した。

実験 No.3-12 では、吹き出し風速を0.5~2.6m/sとし、白煙粒子を用いて流れの目視観察のみを行った。

3.5 実験結果

3.5.1 中心軸上分布および質量流量の測定例

図4に実験 No.3-10 ($\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$, $w_{dp(0)} = 2.2 \text{ m/s}$)における吹き出し口からの距離と中心軸上風速および中心軸上温度との関係を示す。中心軸上風速は単調に減速し、浮力によって途中で加速する様子は見られなかった。中心軸上温度は吹き出し口から約300mmの高さで周辺空気温度より高くなった。

表1 実験条件

実験条件	煙層の条件				給気・排気の条件			質量流量測定	
	煙層厚さ (N%法)	煙層と外気の温度差	外気温度	発熱速度	給気流量	吹き出し風速	排気流量	直接測定法	ガス分析法
単位	mm	°C	°C	kW	m ³ /s	m/s	m ³ /s		
No.3-5	332	21.0	21.2	1.075	0.00525	2.86	0.00673	○	×
No.3-6	528	22.1	17.0	0.941	0.00282	1.65	0.00801	○	○
No.3-7	437	24.3	18.1	1.075	0.00394	2.20	0.00866	○	○
No.3-8	439	38.9	18.0	1.882	0.00526	2.76	0.00971	○	○
No.3-9	541	38.3	16.1	1.815	0.00282	1.56	0.01122	○	○
No.3-10	590	36.0	17.2	1.815	0.00398	2.09	0.00979	○	○
No.3-11	536	22.5	14.1	0.941	0.00199	1.16	0.00808	○	○
No.3-12	416	36.2	13.7	1.748	0.00077 ~ 0.00477	0.44 ~ 2.60	0.01056 ~ 0.01193	×	×

□ : $\Delta T_s = 20^\circ\text{C}$ 設定 □ : $\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$ 設定

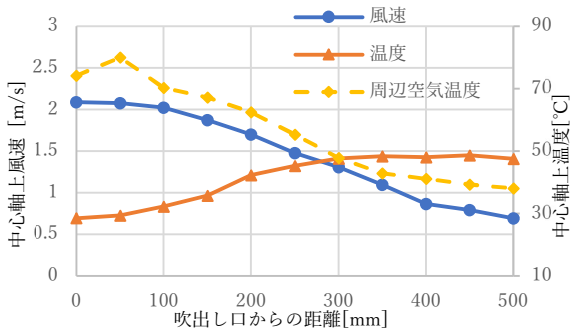


図4 中心軸上風速及び温度分布

図5に実験 No.3-10 ($\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$, $w_{dp(0)} = 2.2 \text{ m/s}$)における吹き出し口からの距離とダウンブルームの質量流量との関係を示す。質量流量は、中心軸上温度が周辺空気温度を上回った高さ(吹き出し口から300mm)以降で急激に増加しており、周辺空気とダウンブルームの温度差が小さくなると空気の巻き込みが増加する。

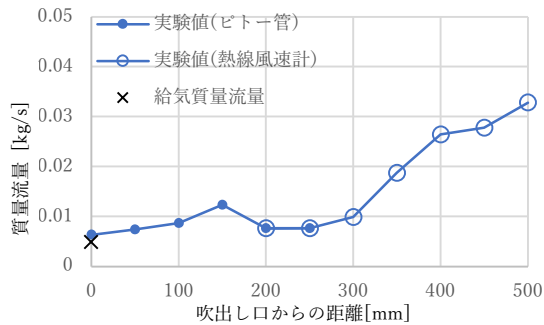


図5 質量流量

3.5.2 下部層に残留する質量流量

図6にガス分析法で求めた下部層に残留した質量流量を示す。吹き出し風速が増加すると、下部層に残留したダウンブルームの質量流量は増加した。

吹き出し風速が 2.8 m/s の場合の下部層に残留した煙の質量流量は、吹き出し風速が 2.2 m/s の場合よりも小さくなった。これは他の2条件よりも煙層厚さが薄く、煙の巻き込み量が減少したためであると考えられる。

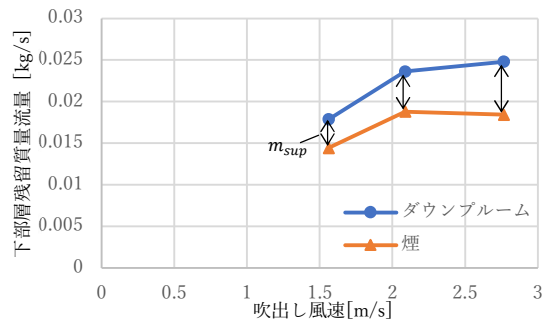


図6 下部層残留質量流量

3.5.3 ダウンブルームの到達限界距離

図7に実験 No.3-12における吹き出し風速と煙層下端からのダウンブルームの到達限界距離との関係を示す。吹き出し風速が 0.7 m/s 以下ではダウンブルームは煙層を貫通しなかった。それ以上の吹き出し風速ではダウンブルームは煙層を貫通し、吹き出し風速が 2.6 m/s で火

災室の床面に到達した。

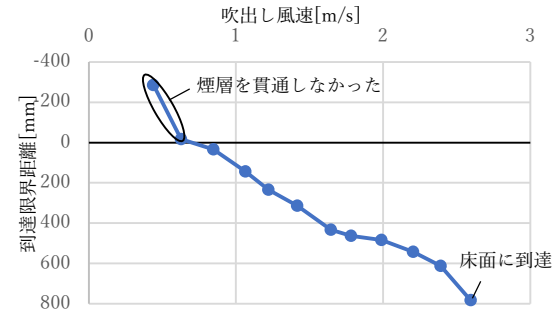


図7 ダウンブルームの到達限界距離

4. ダウンブルームの流量予測式の検討

4.1.1 実験値と予測式の比較

図8に実験 No.3-10 ($\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$, $w_{dp(0)} = 2.2 \text{ m/s}$)における吹き出し口からの距離と中心軸上風速との関係を既往の予測式と比較して示す。等温噴流の式が最も実験値の風速分布をよく表現した。

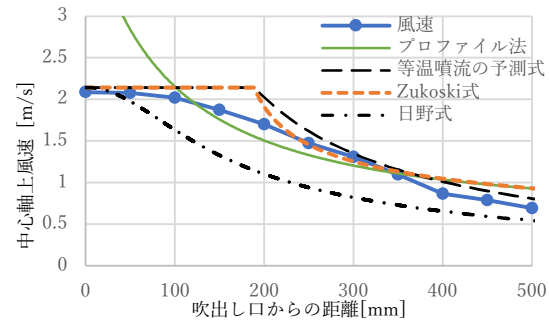


図8 無次元中心軸上風速

図9に実験 No.3-10 ($\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$, $w_{dp(0)} = 2.2 \text{ m/s}$)における吹き出し口からの距離と中心軸上温度との関係を示す。いずれの予測式も実験値との一致は良くない。

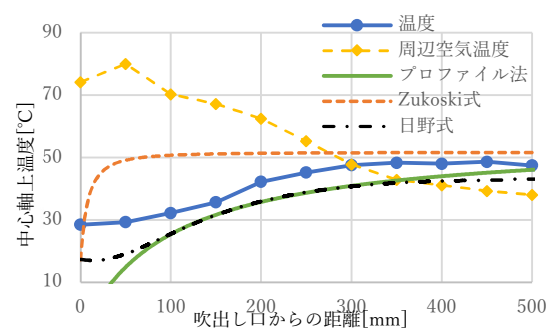


図9 中心軸上温度

図10に実験 No.3-10 ($\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$, $w_{dp(0)} = 2.2 \text{ m/s}$)における吹き出し口からの距離と質量流量との関係を示す。質量流量の増加の傾向は、Zukoski 式およびプロファイル法による流量予測値がよく一致した。

図11に質量流量に関する予測式の計算値と実験値との関係を示す。実験値と最もよく一致した予測式はZukoski 式であり、次にプロファイル法がよく一致した。等温噴流式および日野式は実験値よりも小さくなる傾向を示した。

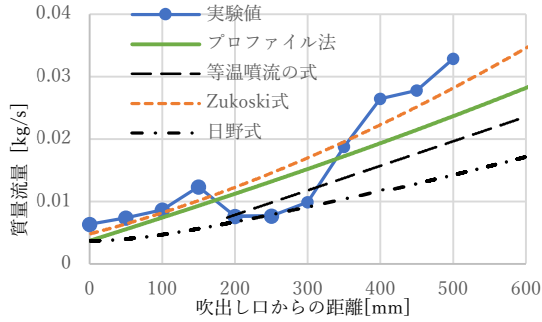


図10 質量流量

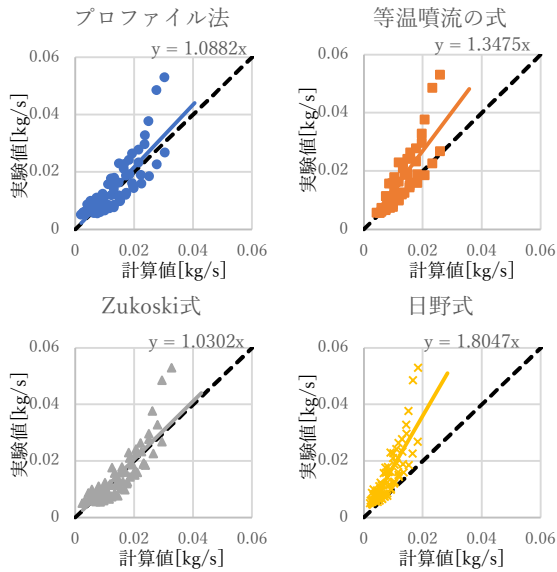


図11 予測式の計算値と実験値との関係

4.2 下部層残存率

図12に吹出し風速と下部層残存率との関係を示す。下部層残存率は下部層に残留するダウンプルームの質量流量を下部層に貫入するダウンプルームの質量流量で除した値として定義した。煙層と給気の温度差 ΔT_s が増加すると下部層残存率は小さくなった。これは、 ΔT_s が大きくなると下部層で受ける浮力が増加し、煙層に戻る量が増加するためである。

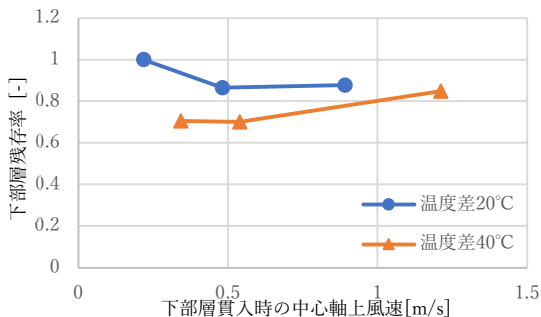


図12 吹出し風速と下部層残存率との関係

ここで、下部層に貫入するダウンプルームのフルード数を以下の式(13)で求める。

$$Fr = \frac{w_{dp,0}(z_s)}{\sqrt{\beta\{T_{dp,0}(z_s) - T_a\}gh}} \quad (13)$$

$\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$ に設定した実験 No.3-12 でのみダウンプ

ームの到達限界距離を測定したため、同じく $\Delta T_s = 40^\circ\text{C}$ に設定した実験 No.3-8,9,10 の条件について、到達限界距離を推定してフルード数を求めた。結果を図13に示す。フルード数 $Fr(-)$ と下部層残存率 $R(-)$ との関係から式(14)の関係を得た。

$$R = 0.664Fr^{0.266} \quad (14)$$

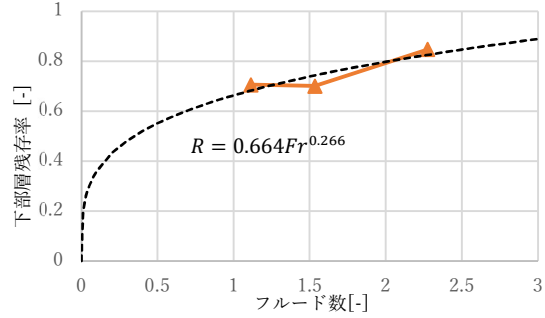


図13 フルード数と下部層残存率との関係

5. 結論

中心軸上風速は等温噴流の式が実験値とよく一致した。中心軸上温度はいずれの既往の式も実験値との一致は良くなかった。質量流量はダウンプルームと周辺空気との温度差が小さくなると急激に増加し、本研究の実験条件の範囲ではZukoski式とよく一致した。

煙層下端でのフルード数が増加すると下部層残存率は増加する関係にあり、煙層と給気の温度差が 40°C の場合についてその関係式を求めた。

[記号]

z :吹出し口からの距離(m)、 z_0 :仮想点熱源距離(m)、 z_s :煙層厚さ(m)、 r :中心軸からの距離(m)、 b :特性幅(m)、 h :煙層下端からの到達限界距離(m)、 η :変換特性幅(-)、 w :軸方向風速(m/s)、 v :半径方向風速(m/s)、 T :温度($^\circ\text{C}$)、 ρ :密度(kg/m^3)、 m :質量流量(kg/s)、 A_0 :有効開口面積(m^2)、 Y :炭酸ガス質量分率(kg/kg)、 F :燃料の燃焼による炭酸ガス生成率(kg/kg)、 g :重力加速度(m/s^2)、 c_p :気体の定圧比熱($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)、 α :巻き込み係数(-)、 β :空気の体積膨張率($1/\text{K}$)、 ΔT_s :煙層と外気(給気)の温度差($^\circ\text{C}$)、 λ :温度差と風速の特性幅の比(-)

[添え字等]

dp :ダウンプルーム、 e :周辺空気、 sup :給気、 ex :排気、 s :煙層、 a :下部層、 a,p :火災プルームに巻き込まれる下部層空気、 f :可燃ガス、 ∞ :基準、 0 :中心軸上、 i :測定位置、 \wedge :測定値

参考文献

- [1] 市川修暉、ダウンプルームによる煙の巻き込み量の測定方法と予測式の提案、京都大学工学研究科修士論文、2020年2月
- [2] 空気調和・衛生工学会(2001)、空気調和衛生工学便覧、3 空気調和設備設計編、第14版、空気調和・衛生工学会
- [3] Zukoski, E.E., Kubota, T. and Cetegen, B. Entrainment in Fire Plume, Fire Safety Journal, Vol. 3, pp.107-121, 1981
- [4] 日野幹雄, Forced Plumes in A Stratified Fluid, 土木学会論文集, 86-10, pp.29-37, 1962
- [5] Haruki Ichikawa, Hiroyuki Tsuji, Kazunori Harada, Daisaku Nii, Measurement of Smoke Entrainment Rate by a Downward Plume, AOSFST 2021 - 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Brisbane, Australia, 7-9 December 2021