

4.3 ダクト付きフードを用いた制御風速等に関する実験

4.3.1 実験目的

屋内排気型フードに内蔵するファンを選定するため、2章で調べたフィルターの圧力損失に加え、発生した煙をフードで十分に捕捉するために必要となる排風量を求める必要がある。そこで、本実験では2種類のダクト付きフードを用いて、模擬的に発生させた煙を周囲に拡散せずフードで十分に捕集できる排風量を測定した。また、制御風速を満たさなくても発生した煙を捕捉できる場合があると考えられている¹⁾。このため、各排風量時の捕捉点風速も同時に測定し、制御風速より遅い吸引風速であっても発生した煙を捕捉できるか否かを検証した。

さらに、制御風速は作業者がいない状態の捕捉点風速を表しているため、作業者がフード開口面に向かって作業をしている時の実際の状況とは異なる。このため、作業者がいない状態で制御風速を満たす場合であっても、作業者がフード前方で作業をする場合にはその制御風速が保たれない可能性がある。つまり、フード前方の作業者の有無で捕捉点風速の大きさに変化があると考えられる。そこで、本実験では発散源に発煙ノズルを用いた場合において、マネキンを作業者に見立て、フード前方にマネキンが無い時と有る時で捕捉点風速に変化があるかを併せて検証した。

4.3.2 実験方法

本実験では縦 300mm × 横 500mm のフード（以下、フード1）と縦 500mm × 横 500mm のフード（以下、フード2）を用いた。実験の概観を図 4.19 に示す。



図 4.19 実験の概観

作業台上にフードと煙発散源（煙発生量：30L/min）作業者に見立てたマネキンを設置した。煙発生装置にホースでつなげた煙発散源から煙を発生し、30秒後に作業台周囲の漏洩濃度およびばく露濃度の測定を10分間行った。

(1) 発煙方法

煙発生装置から30L/minで煙を発生し、図 4.20 に示す2種類の発散源（発煙ノズル、発煙BOX）から煙を発生させた。2種類の発散源の寸法を表 4.1 に示す。

表 4.1 発散源の寸法

発散源の種類	発散源の寸法
発煙ノズル	高さ：130mm、内径：35mm
発煙 BOX	上面： 2.0mm × ピッチ 3.5mm のパンチング板 縦：200mm、横：300mm、高さ：100mm

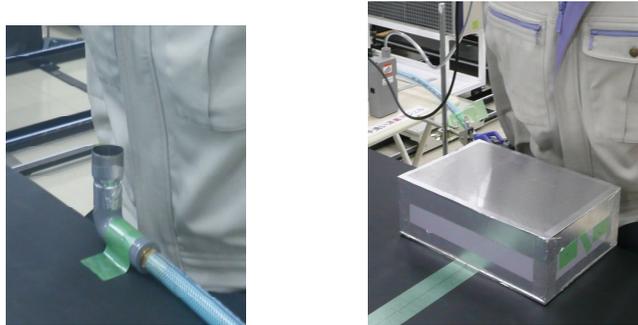


図 4.20 煙の発散源（左：発煙ノズル、右：発煙 BOX）

(2) 発散源の位置

発煙ノズルは、フード開口面から中心線上(図 4.21 の A-Line 上)をフード高さの 1 倍、1.5 倍、2 倍離れた位置とその位置からフード端にずれた位置(B-Line 上)とした。ただし、フード 2 を用いた時にはファンの性能上限を超えたため、開口面からフード高さの 1 倍、1.5 倍離れた位置のみの測定とした。発煙ノズルの位置を図 4.21 に青色の丸印で示す。

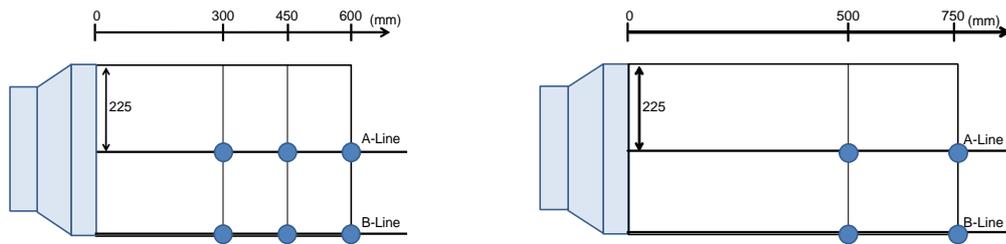


図 4.21 発散源の位置（左：フード 1、右：フード 2）

発煙 BOX は図 4.21 の A-Line 上でのみの測定とし、発煙 BOX のフード開口面から遠い方の縁の中心が、フード開口面からフード高さの 1 倍、1.5 倍、2 倍離れた A-Line 上の点になるよう設置した。フード 1 を用い、フード開口面から 300mm 離れた位置に設置した時の様子を図 4.22 に示す。

(3) 捕捉点風速の測定

捕捉点風速は微風速計を用い、30 秒間の平均値を測定結果として用いた。なお、捕捉点の高さは発煙ノズル（高さ 13cm）の上部から高さ 2cm 離れた点とした。捕捉点風速の測定点を図 4.23 に示す。

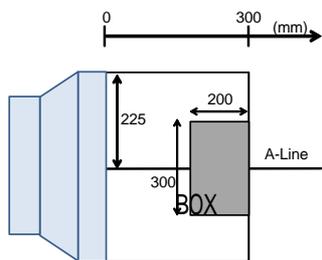


図 4.22 発煙 BOX の位置

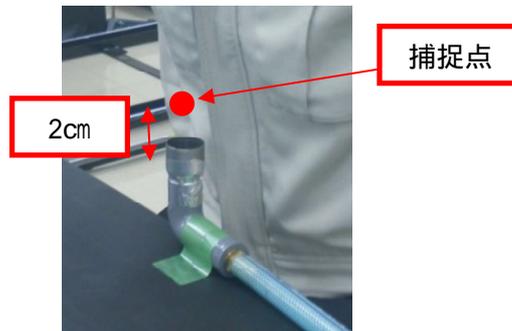


図 4.23 捕捉点風速の測定点

(4) 漏洩およびばく露濃度の測定点

煙発生装置で煙を発生した時にフードで捕集しきれず周囲へ拡散した漏洩濃度およびマネキンの呼吸域にあたるばく露濃度の測定をした。濃度測定点を図 4.24 および図 4.25 にそれぞれ示す。フードからの漏洩濃度測定を目的としてデジタル粉じん計 LD-5 をフード周囲の 3 点（測定点 ~ ）に設置し、フードに吸引されずにマネキン周囲に漏洩した濃度測定を目的としてデジタル粉じん計 LD-6N を作業台横（測定点 ）に 1 点、マネキンの腰の位置に左右 1 点ずつ（測定点 、 ）呼吸域（作業台上から高さ 500mm）に 1 点（測定点 ）設置した。

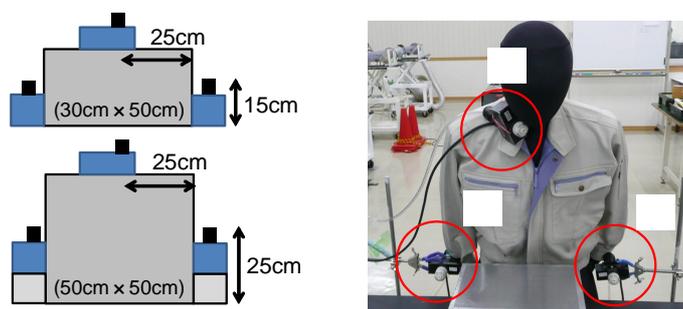


図 4.24 濃度測定点

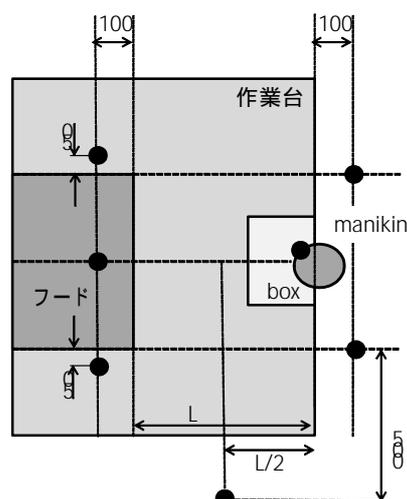


図 4.25 測定点の位置

なお、デジタル粉じん計で測定したカウント値を質量濃度に変換するための質量濃度変換係数(K 値)を事前に求めた結果、平均 (n=3) で $1.64 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3/\text{cpm}$ であった。

4.3.3 漏えい濃度の判定基準値¹⁾²⁾

作業環境管理では環境測定を行う際に管理濃度を基準として評価を行なっている。粉じんの管理濃度 $E(\text{mg/m}^3)$ は式(4.1)の算出式を用いて求める。ただし、 Q は遊離ケイ酸含有率 (%) である。

$$E(\text{mg/m}^3) = \frac{3.0}{1.19Q + 1} \quad (4.1)$$

本実験で用いた煙の遊離ケイ酸の含有率は 0% であるため、管理濃度は 3.0 mg/m^3 である。

ここで、管理濃度の 1/10 以下にまで濃度が薄まれば有害物質の作業員への健康影響は非常に少なくなると一般に言われており、本実験では管理濃度の 1/10 の濃度である 0.3 mg/m^3 以下に濃度を抑えればよいと考えられる。しかし、本実験においてはこの基準値よりも厳しい、 0.15 mg/m^3 を漏えい判定の基準値とした。この値は、たばこの煙に対して定められた基準値であり、職場の受動喫煙防止対策に係る技術的留意事項に関する専門家検討会の報告書²⁾において、喫煙場所における分煙効果の判定基準として、デジタル粉じん計を用いて測定した時間平均浮遊粉じんの濃度が 0.15 mg/m^3 以下に保たれていることが定められてい

る。本実験ではこの基準値の濃度を超えていなければ、十分に発生した煙を捕捉できていると考えた。

4.3.4 発煙ノズルを用いた時の実験結果

まず、各フードからの各排風量における捕捉点風速（マネキンが無い時と有る時）の測定結果を表 4.2（フード 1）及び表 4.3（フード 2）にそれぞれ示す。

ここで、理論値は Dalla Valle の式(4.2) に各測定時の排風量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ 、発煙ノズルの開口面からの距離 $X(\text{m})$ 、フードの開口面の面積 $A(\text{m}^2)$ を代入して算出した。

$$Q=60 \times V \times (5X^2+W \times L) \quad \text{式(4.2)}$$

Q:排風量(m^3/min)、V:捕捉点風速(m/s)、X:開口面からの距離(m)

W:フード開口面の幅(m)、L:フード開口面の高さ(m)

表 4.2 捕捉点風速（フード 1）

フード開口面からの距離 m	排風量 m^3/min	理論値 m/s	風速 m/s (マネキン無し)	風速 m/s (マネキン有り)
0.30	1.0	0.03	0.03	0.01
	2.0	0.06	0.06	0.04
	3.2	0.09	0.21	0.04
0.45	7.0	0.10	0.13	0.05
	10	0.14	0.14	0.10
	15	0.21	0.24	0.11
0.60	10	0.09	0.13	0.04
	15	0.13	0.15	0.10
	20	0.17	0.20	0.17

表 4.3 捕捉点風速（フード 2）

フード開口面からの距離 m	排風量 m^3/min	理論値 m/s	風速 m/s (マネキン無し)	風速 m/s (マネキン有り)
0.50	10	0.11	0.07	0.13
	15	0.17	0.12	0.21
	20	0.22	0.18	0.28
0.75	25	0.14	0.13	0.16
	30	0.16	0.15	0.22
	35	0.19	0.20	0.28
	40	0.22	0.21	0.28

表 4.2 及び表 4.3 の結果を図 4.26 に示す。図 4.26 中の青線は実測値が理論値と一致する時を表す。図 4.26 の横軸は理論値を表し縦軸は実測値を表している。

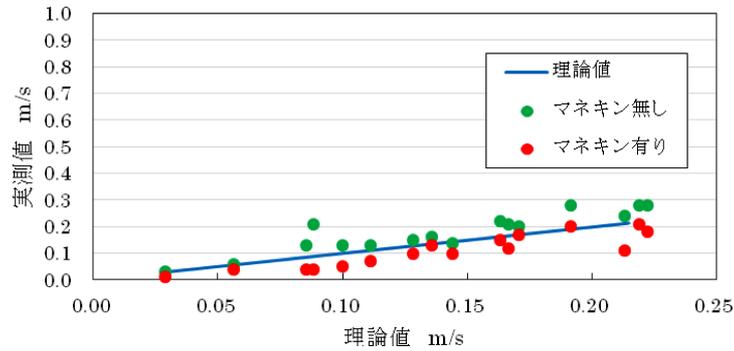


図 4.26 捕捉点風速の実測値と理論値

図 4.26 のように、マネキンが無い時には理論値よりも速くなる傾向があり、マネキンがある時は理論値より遅くなる傾向にあった。これは、マネキンが有ることで、直接フードに向かっていったマネキン背後からの気流がマネキンの胴体に衝突し、胴体を沿ってフードに方向に向かう流れに変わったためと考えられる。

この結果から、制御風速を満たすようにファンを稼働しても、実際にフード前方で作業者が作業をする時には捕捉点風速は制御風速より下がる傾向にあると考えられた。このため、作業場で制御風速を満たしているか否かを測定する際には、作業者がフード前方にいる状態の捕捉点風速も同時に測定することは重要である。

次に、発煙ノズルから煙を発生した時の漏洩濃度およびばく露濃度の結果を表 4.4 および表 4.5 に示す。

表 4.4 質量濃度結果 (フード1)

位置 m		排风量 (m ³ /min)	測定点						
0.3	A-Line	1.00	0.003	0.009	0.215	0.000	0.004	2.014	2.744
		2.00	0.002	0.002	0.002	0.000	0.004	0.003	0.388
		3.20	0.002	0.002	0.002	0.000	0.004	0.003	0.017
	B-Line	1.00	0.066	0.679	0.194	0.000	0.004	1.396	15.979
		2.00	0.002	0.165	0.002	0.000	0.004	0.003	4.716
		3.20	0.002	0.002	0.002	0.000	0.004	0.003	0.000
0.45	A-Line	6.96	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	6.958
		10.04	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.271
		14.88	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000
	B-Line	6.96	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.099
		10.04	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.000
		14.88	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.000
0.6	A-Line	9.69	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003	18.159
		15.27	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003	7.477
		20.04	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003	0.128
	B-Line	9.69	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.256
		15.27	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000
		20.04	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000

表 4.5 質量濃度結果 (フード 2)

位置 m		排風量 (m ³ /min)	測定点						
0.5	A-Line	9.20	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	14.217
		14.09	0.002	0.002	0.002	0.004	0.003	0.002	4.463
		19.13	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.028
	B-Line	9.20	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.614
		14.09	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.336
		19.13	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.001
0.75	A-Line	24.99	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	14.233
		30.02	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	16.006
		35.23	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	12.667
		40.24	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	3.173
	B-line	24.99	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.004
		30.02	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000
		35.23	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003	0.002	0.000
		40.24	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000

表 4.4 及び表 4.5 より、A-Line 上で発煙ノズルから煙を発生した時にはフード周囲の漏洩は見られず、主にマネキンの呼吸域にあたる点(測定点)においてばく露がみられた。また、B-Line 上で発煙ノズルから煙を発生した時にも、フード 1、フード 2 とともに主にばく露濃度が高くなった。

フード 1 を用いて A-Line 上(フード開口面から 0.6m)で発煙ノズルから発煙させた時の様子を図 4.27 ~ 図 4.29 にそれぞれ示す。

発煙ノズルからは約 0.5m/s で煙を発生させており、排風量が小さい時には煙の発生方向(上方)への慣性力が優勢となり、図 4.27 のように煙はマネキンの呼吸域の高さまで達していた。排風量を徐々に大きくすると、煙粒子に働く上方への慣性力よりもフードで吸引する力が強くなり、煙がマネキンの呼吸域まで達することなくフードで捕集されたため、ばく露濃度が低くなった。

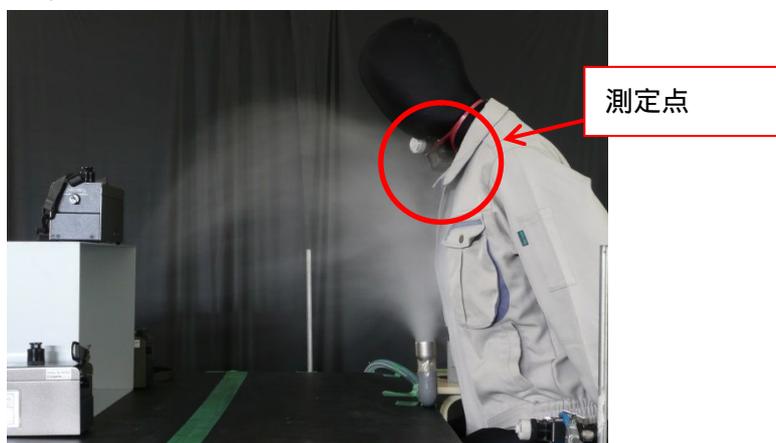


図 4.27 実験の様子 (フード 1、排風量 10m³/min、位置 0.6m)



図 4.28 実験の様子（フード 1、排風量 $15\text{m}^3/\text{min}$ 、位置 0.6m ）



図 4.29 実験の様子（フード 1、排風量 $20\text{m}^3/\text{min}$ 、位置 0.6m ）

表 4.4 及び表 4.5 より、測定点 において主に漏洩が見られた。ここで、作業環境を良好に保つためには、フードで発生した粉じんを周囲に拡散することなく捕集する必要がある。そこで、本測定結果から、ばく露濃度が $0\text{ mg}/\text{m}^3$ になる時の捕捉点風速および排風量を求める。まず、捕捉点風速の実測値と測定点 で測定した質量濃度の関係を図 4.30 に示す。図 4.30 では、開口面からの距離ごとに結果のプロットを色分けし、それぞれの結果から最小二乗法により上に凸となる 2 次関数の近似式を算出した。

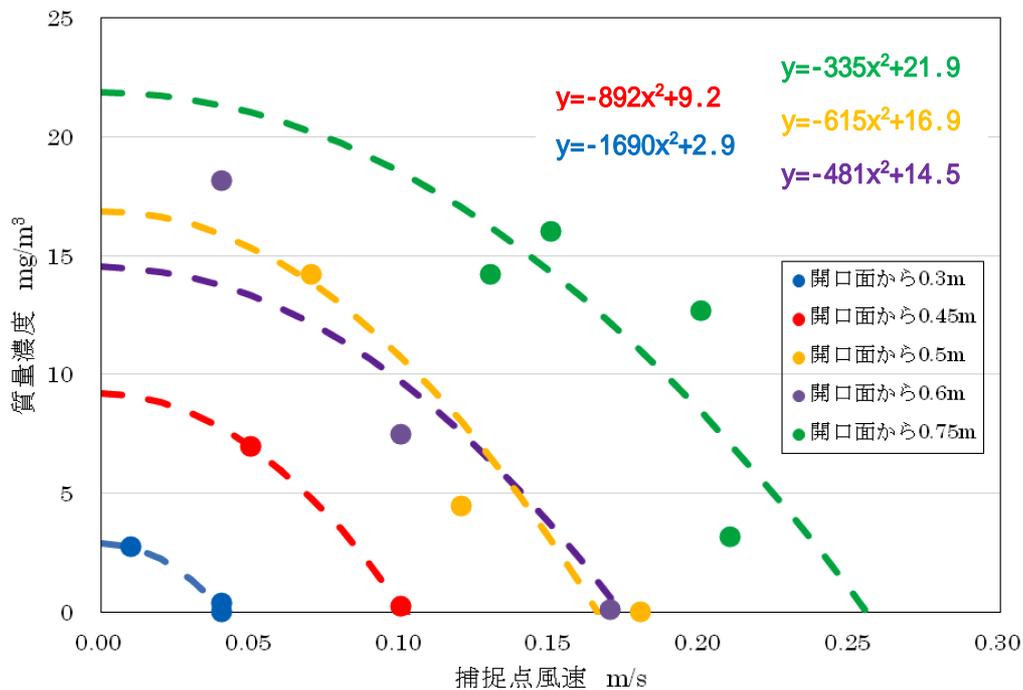


図 4.30 補足点風速と質量濃度の関係

図 4.30 のグラフの近似式より、ばく露濃度が 0 mg/m^3 となる捕捉点風速（各グラフの x 軸との交点）と開口面からの距離との関係について図 4.31 に示す。

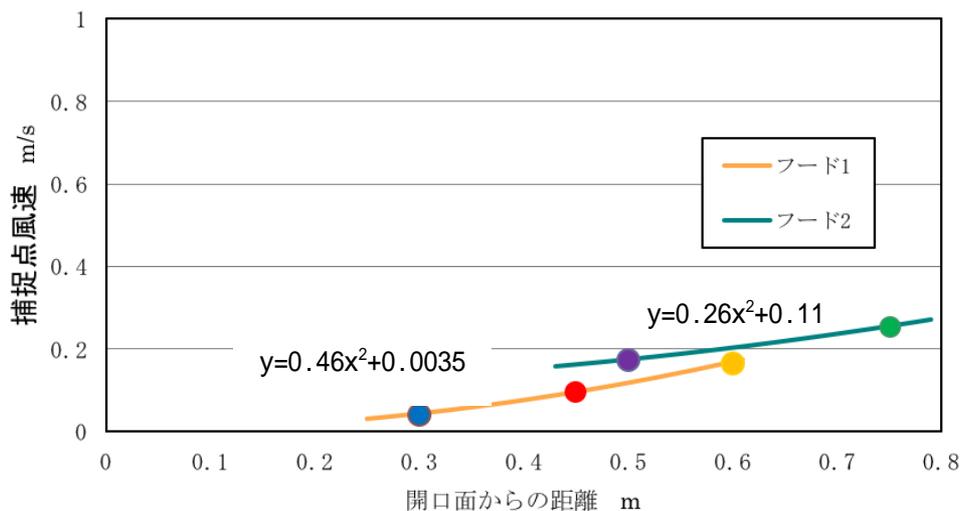


図 4.31 開口面からの距離と捕捉点風速との関係

本実験条件では、捕捉点風速は制御風速 1.0 m/s より遅くしても、発生した煙を周囲に拡散することなくフードで十分捕集できることが分かった。

また、開口面からの距離 (x) と捕捉点風速 (y) との関係式はフード 1 の場合は $y=0.46x^2+0.0035$ 、フード 2 の場合は $y=0.26x^2+0.11$ と近似式で表された。これらの式から、

フードの形状や発生源の距離によって捕捉点に必要となる吸引風速は異なり、制御風速という1つの値だけでフードの捕集性能を評価するのは妥当とは言えない。

次に、測定点で測定した質量濃度とその時の排風量の関係を図 4.32 に示す。図 4.32 でも、フード開口面からの距離ごとに結果を色分けし、それぞれの結果から最小二乗法により上に凸となる2次関数の近似式を算出した。

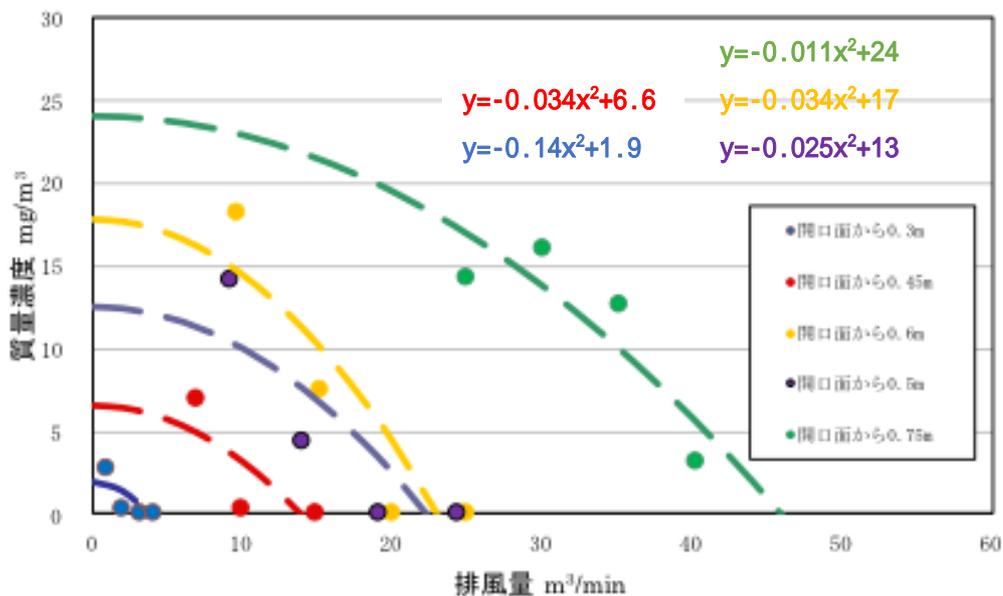


図 4.32 流量と周囲への漏洩濃度の関係

図 4.32 の各開口面からの距離ごとの近似式を用いて周囲に漏洩する煙の質量濃度が $0(\text{mg}/\text{m}^3)$ となる時の排風量 (各グラフの x 軸との交点) を求め、開口面からの距離と必要排風量の関係を図 4.33 に示す。

また、制御風速 ($1.0\text{m}/\text{s}$) を満たす時の開口面からの距離と必要排風量の関係式を Dalla Valle の式 (4.3) を用いて、フード 1 とフード 2 のそれぞれで求めると、式 (4.4) と式 (4.5) が得られる。得られた開口面からの距離と排風量の関係式を併せて図 4.33 に示す。

$$Q=60 \times 1.0 \times (5X^2+0.3 \times 0.5) =300 X^2+9 \quad \text{式(4.3)}$$

$$Q=60 \times 1.0 \times (5X^2+0.5 \times 0.5) =300 X^2+15 \quad \text{式(4.4)}$$

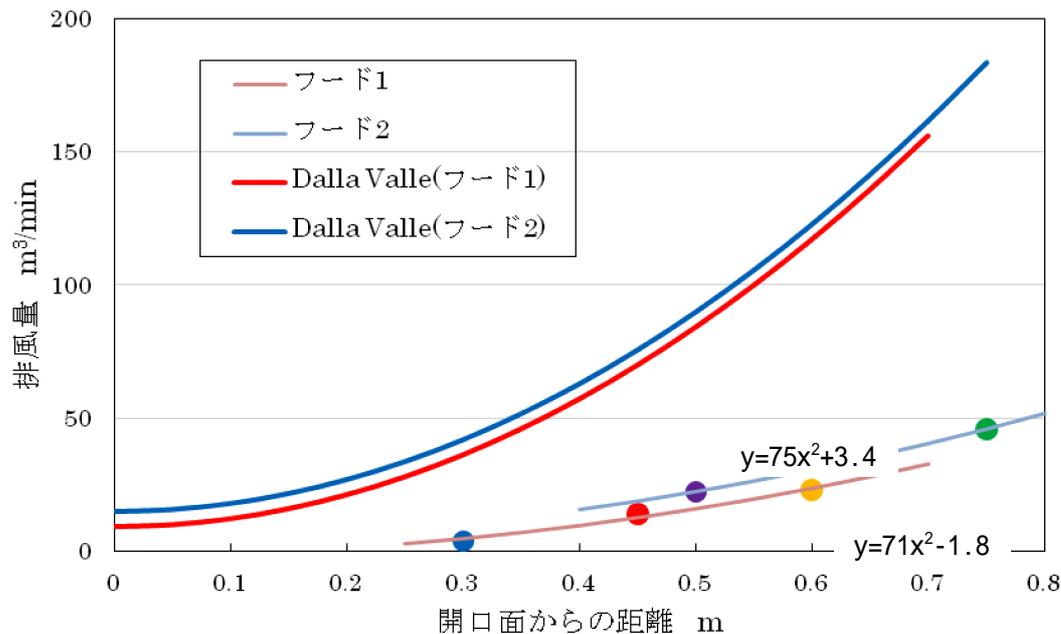


図 4.33 開口面からの距離と排風量の関係

図 4.33 より制御風速を満たす時の排風量は、本実験で必要となった排風量よりも極めて大きいことが分かる。これは図 4.31 で実験結果から求めた、捕捉点風速と制御風速 (1.0m/s) との速さの差が排風量の大きさに影響しているためである。

例えば、捕捉点風速が 1.0m/s の時と 0.9m/s の時のフード 1 に必要となる排風量を式 (4.5) を用いて算出してみる。発散源の位置が開口面から 0.45m の場合には、式 (4.6) 及び式 (4.7) のように必要排風量はそれぞれ 70m³/min、63m³/min となり、捕捉点風速を 0.1m/s 下げただけで約 7m³/min の排風量を削減できることが分かる。

$$Q=60 \times 1.0 \times \{5 \times (0.45)^2 + 0.3 \times 0.5\} = 70 \quad \text{式(4.5)}$$

$$Q=60 \times 0.9 \times \{5 \times (0.45)^2 + 0.3 \times 0.5\} = 63 \quad \text{式(4.6)}$$

ここで、式 (4.1) において発散源の開口面との距離を 0.45m とし、フード 1 (L:0.3m、W:0.5m) を用いた時の排風量 (Q m³/min) と捕捉点風速 (V m/s) との関係式は式 (4.7) のようになる。

$$Q = 60 \times V \times \{5 \times (0.45)^2 + 0.3 \times 0.5\} = 69.75V \quad \text{式(4.7)}$$

ここで、捕捉点風速を制御風速 (1.0 m/s) にした時には排風量は 70 m³/min 必要となるが、制御風速から V だけ遅くした場合に削減される排風量 (Q) は式 (4.7) を用いて、式

(4.8)で表される。

$$Q = 69.75 - V \quad \text{式(4.8)}$$

式(4.8)を図4.34に示す。

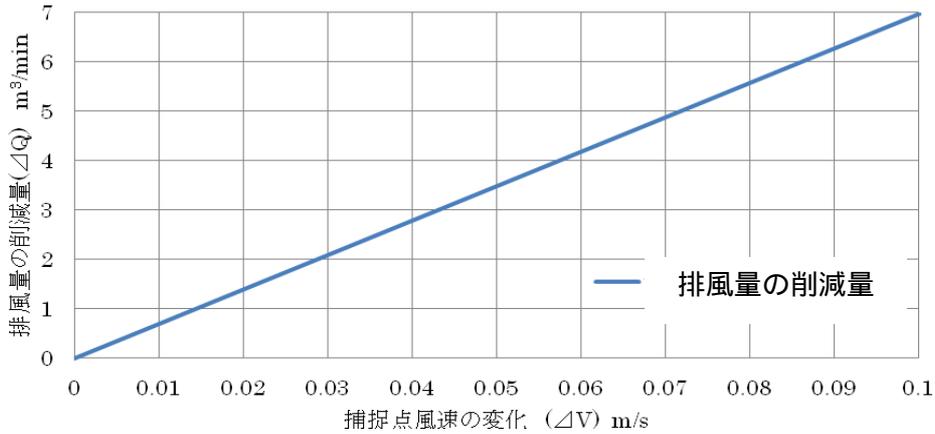


図4.34 風速変化とそれに伴う排風量の削減量の関係

Dalla Valle の式をもとにして考えると、上記の図のように捕捉点風速を 0.01m/s 遅くするごとに必要排風量は約 0.7m³/min ずつ削減できることが分かる。ここで、さらに一般的な場合について考える。フードの捕集できる有効範囲はフード高さ(L)の 1.5 倍以内であることから、X=1.5L の場合において考える。

捕捉点風速 V を制御風速(1.0 m/s)から V だけ遅くした時に削減される排風量 Q は式(4.9)で表される。

$$\begin{aligned} Q &= 60 \times V \times \{5 \times (1.5L)^2 + L \times W\} \\ &= 60 \times V \times \{11.25L^2 + L \times W\} \end{aligned} \quad \text{式(4.9)}$$

開口面からの距離 : X=1.5L (m)、フード高さ : L(m)、フード幅 : W(m)

ここで、長方形型フードの場合、短辺は長辺の 0.2 倍より大きいことが定められているため、Lは式(4.10)の範囲となる。

$$L > 0.2W \quad \text{式(4.10)}$$

さらに、一般的なフードは横長に設置することを考慮し、フードの高さ(L)は幅の長さ(W)よりも短い条件(L < W)を加えるとLの範囲として式(4.11)が得られる。

$$W > L > 0.2W \quad \text{式(4.11)}$$

式(4.11)のLの範囲で排風量の削減量(ΔQ)の範囲を求めると、その範囲は式(4.12)のようになる。

$$\begin{aligned}
& 60 \times V \times \{11.25W^2 + W \times W\} \\
& Q > 60 \times V \times \{11.25 \times (0.2W)^2 + 0.2 W^2\} \\
& 60 \times V \times 12.25W^2 \quad Q > 60 \times V \times 0.65W^2 \\
& 735W^2 \quad V \quad Q > 39W^2 \quad V \quad \text{式(4.12)}
\end{aligned}$$

式(4.12)を用いて、 $W=0.5$ 、 $W=1.0$ の時に削減できる排風量の範囲は式(4.13)、式(4.14)となり、図 4.35 に示す。

$$184 \quad V \quad Q > 9.75 \quad V \quad \text{式(4.13)}$$

$$735 \quad V \quad Q > 39 \quad V \quad \text{式(4.14)}$$

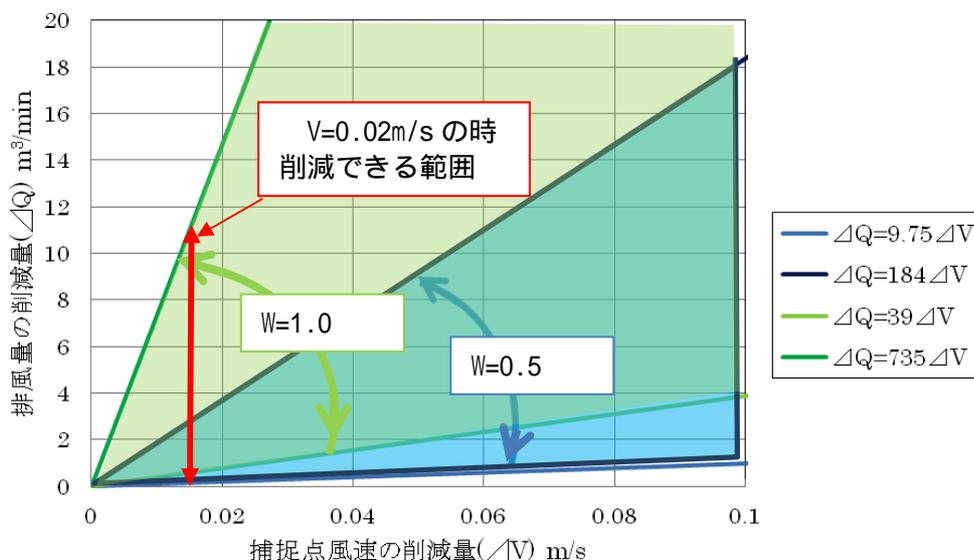


図 4.35 風速変化とそれに伴う排風量の削減量の範囲

捕捉点風速が制御風速から V だけ遅くした時には図 4.35 のグラフの範囲で排風量を削減できることが分かる。

例えば、図 4.35 において、 $W=1.0$ の時、捕捉点風速を 1.0 m/s からわずか 0.02 m/s 下げ、 0.98 m/s にするだけでも排風量はフード開口面の寸法にもよるが、緑色で色付けした範囲から、最小で $0.78 \text{ m}^3/\text{min}$ 、最大で $14.7 \text{ m}^3/\text{min}$ の削減ができることが分かる。



図 4.36 実験の様子（左：全体図、右：測定点 に漏洩している時の様子、フード 1、排風量 $3\text{m}^3/\text{min}$ 、位置 450mm ）

ここで、表の結果から測定点 で主に漏洩が見られたため、測定点 で測定した質量濃度と排風量の関係を図 4.37 に示す。

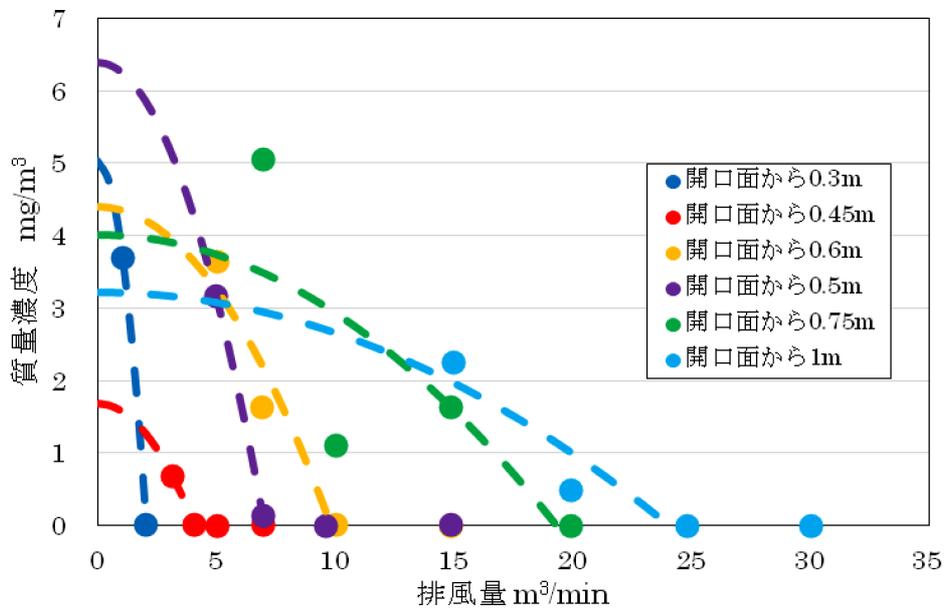


図 4.37 排風量と質量濃度の関係

図 4.37 の各開口面からの距離ごとの近似式に周囲に漏洩する煙の質量濃度が $0\text{ mg}/\text{m}^3$ となる時の排風量を求め、開口面からの距離と必要排風量の関係を図 4.38 に示す。

また、式(4.3)と式(4.4)で得られたフード 1 とフード 2 の制御風速を満たす時の開口面からの距離と排風量の関係式を併せて図 4.38 に示す。

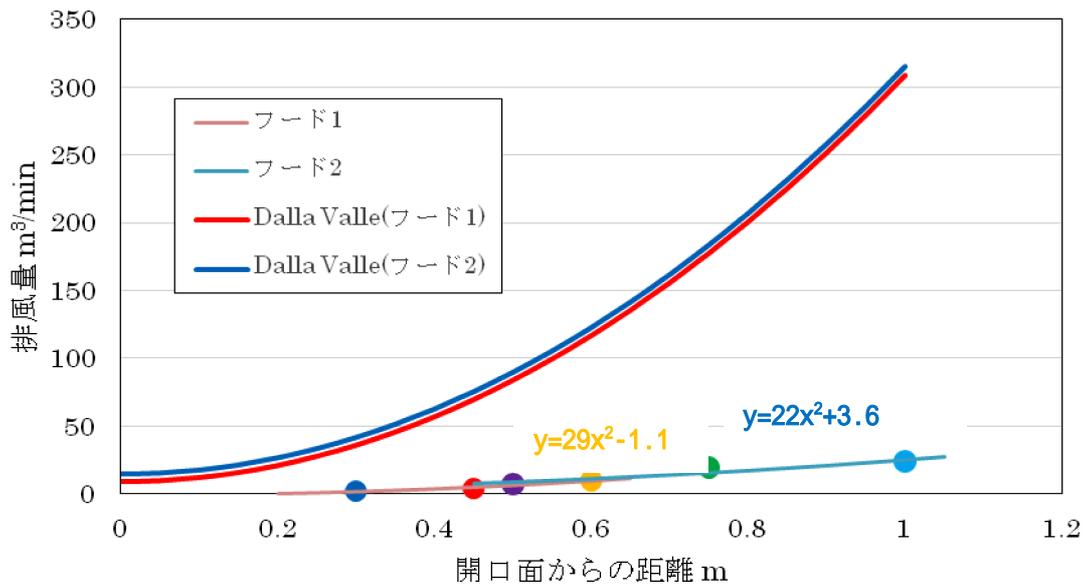


図 4.38 開口面からの距離とは必要排風量

図 4.38 より、発煙ノズルを用いた時と同様に制御風速から求めた排風量は本実験で求めた排風量よりも大きかった。また、発煙ノズルと比べて緩やかに煙を発生させた時には必要排風量は発煙ノズルの時より少なくとも漏洩およびばく露を防げた。

4.3.6 総括

(1) マネキンの有無による捕捉点風速について

捕捉点風速はマネキンが無い時と有る時で差が生じ、マネキンがある方が捕捉点風速は遅くなった。また Dalla Valle の式により算出した理論値よりもマネキンが無い時は風速が速くなり、有る場合は風速が遅くなる傾向にあることが明らかになった。

この結果から、実際にフード前方で作業者が作業をする時には捕捉点風速は下がる傾向にあると考えられる。このため、作業場で制御風速を満たしているか否かを測定する際には、作業者がフード前方にいる状態の捕捉点風速も同時に測定することは重要であると考えた。

(2) 必要排風量について

発煙ノズルを用いた場合には、主にばく露濃度が高くなった。また、制御風速よりも遅い風速で発生した煙を捕集でき、開口面からの距離 x (m) と必要排風量 y (m³/min) の関係はフード 1 の場合は $y=70x^2-1.8$ 、フード 2 の場合は $y=75x^2+3.4$ と近似式で表された。

発煙 BOX を用いた場合には、発煙ノズルよりも発生速度が緩やかであったため、ばく露は見られず、作業者に見立てたマネキンの腰の部分の方で主に漏洩が見られた。また、フード周囲では漏洩は見られなかった。発煙ノズルの時と同様に、捕捉点風速は制御風速よ

り遅い場合であっても発生した煙を十分に捕集でき、開口面からの距離 x (m) と必要排風量 y (m^3/min) の関係式はフード 1 の場合は $y=29x^2-1.1$ フード 2 の場合は $y=22x^2+3.6$ と近似式で表された。

このように、フードの形状や煙の発生速度によって必要排風量は異なることが分かった。

(3) 制御風速について

本実験条件では、制御風速以下で発散源を捕捉できた。また、発散源の発生量、フードの開口面積、発散源のフード開口面からの距離によって、漏洩およびばく露を防ぐために必要となる捕捉点風速は異なることが分かった。これらのことから、現在はフードの吸引性能を制御風速(外付け式フードの場合は 1.0 m/s) で評価しているが、作業環境が良好で、発散源の発生量および発生速度が小さければ、制御風速より遅くても十分に発生した煙を捕捉できる。

さらに、捕捉点風速を 0.1 m/s 下げるだけで排風量は大きく削減できることが Dalla Valle の式より明らかになった。これは、少ないエネルギーで発散源を速やかに捕捉することが作業環境を良好に保つ上で必要とされる中、制御風速より遅い風速であっても作業環境を良好に保つことができる作業場では、エネルギーコスト、 CO_2 排出量の削減も期待できる。

参考文献

- 1) 職場の受動喫煙防止対策に係る技術的留意事項に関する専門家検討会の報告書
- 2) 社団法人 日本作業環境測定協会：作業環境測定ガイドブック 鉱物性粉じん関係、2005、p48 ~ p61、p72