集塵用 汙布性能の基礎実験

森 康 維・久 堀 保
石 塚 昌 義・牧 野 和 孝
井 伊 谷 鋼 一

京都大学工学部 化学工学科†

汙布集塵は、代表的な高性能乾式集塵の一つであるが、その基礎的な研究は少ない。本報では、9種類の汙布と3種類の炭酸カルシウム粉塵を用いて、織汙布とフェルト汙布の集塵性能の比較、および未使用汙布と使用済み汙布の性能の比較を実験的に検討し、次の結論が得られた。

- 1) 圧力損失は、フェルト汙布では粉塵負荷にほぼ比例するが、織汙布では低粉塵負荷で急上昇した後、中高粉塵負荷で粉塵負荷に比例する。
- 2) 圧力損失は汙過速度の1より大きいべき乗に比例する。
- 3) 同一粉塵負荷での圧力損失と汙過速度とは、粉塵層の圧密や崩壊現象のため、ヒステリシス関係を示すことは、従来の結果と同様である。
- 4) 比較的低い汙過速度では、汙布の種類によらず、中高粉塵負荷域ではほぼ完全捕集となるが、汙過速度が速くなるほど、積算および瞬間通過率は大きくなる。
- 5) $3\mu\text{m}$ 以上の通過粒子は、きわめて短時間の集塵で激減するが、 $2\mu\text{m}$ 以下は、局所的な粉塵層の崩壊のため、比較的長期間通過する。
- 6) 使用済み汙布と未使用汙布の圧力損失特性は、ほとんど変わらないが、集塵率は使用済み汙布の方がよい。

緒 言

汙布集塵は、広く産業界で用いられている高性能乾式集塵の一種であり、実用機の現場性能報告¹⁾などはあるが、圧力損失と集塵率に注目した系統だった研究は少ない。さらに織汙布⁷⁻⁹⁾やガラス繊維汙布¹⁰⁾に関する基礎実験の報告は若干あるが、近年発展したパルス・ジェット式などに用いられているフェルト汙布に関する報告はほとんどみられない^{2,5)}。

本報では、特に織汙布とフェルト汙布の集塵性能を、汙過速度、および通過粒子の粒径分布について比較検討し、さらに使用済み汙布の性能も実験的に検討した。また、汙布上に堆積した粉塵層には、ある圧力損失以上でピンホールや吹きもれの生じることが知られている^{3,4,6)}が、一定粉塵負荷において粉塵層の崩壊が生じる場合の汙過速度に対するヒステリシス現象をも合わせて検討したので報告する。

1. 実験装置および方法

1・1 実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。粉塵を小型テーブル・フィーダーによって定量供給し、ミキサー型分散機

を経て、イオン中和機を備えた混合箱に送る。粉塵の一部をテスト部に吸引し、汙布で捕集する*。入口粉塵濃度は、 $0.5\sim 7\text{g/m}^3$ で、実験中はほぼ一定である。テスト部は、直径約 6.4cm の円形で、汙布面はほぼ鉛直である。汙布で捕集されずに通過した粉塵の一部は、等速サンプリングされ、積算質量濃度計(ピエゾバランス形式)と、粒径別個数濃度計(ボッシュロム光散乱形式)に送られる。積算質量濃度計は捕集能力が約 $600\mu\text{g}$ と非常に小さいため、サンプリングした気流をその数倍の清浄空気で希釈して必要量を吸引する。一方、残りの通過粉塵は、ミリポア・フィルターで完全に捕集し、実験終了後秤量する。ガス流量を一定に保つため、オリフィスで流量を測定し、PI 調節計によってバルブ開度を自動制御する。汙布の圧力損失、ガス流量、および積算質量濃度計で測定される積算通過粉塵量を、おのおの連続的に記録する。

1・2 供試粉塵および汙材

実験には3種類の軽質炭酸カルシウムを用い、その粒径分布をテスト部入口でカスケード・インパクターによって求めた。その結果を Fig. 2 に示す。

供試汙布としては、織汙布4種、フェルト汙布5種を用い、Tables 1, 2 にそれらの特性を示す。また使用済み汙布は、3年間電気炉建屋集塵に用いた短繊維織汙布(PT 5203)で、その使用条件を Table 3 に示す。

† 〒606 京都市左京区吉田本町

* 粉塵を必要以上に発塵するのは、粉塵発生系を一定条件で運転し、粉塵の分散程度を一定に保つためである。

Table 1 Characteristics of woven fabrics tested

Woven fabric	PT 5101	PT 5111	PT 5201	PT 5203
Material	Tetron	Tetron	Tetron	Tetron
Weight [g/m ²]	253.7	184.3	429.3	314.4
Thickness [mm]	0.41	0.31	0.70	0.62
Apparent density [g/cm ³]	0.619	0.595	0.613	0.507
Void [%]	55.1	56.9	55.6	63.3
Air permeability [cm/sec]	31.3	34.5	9.8	29.0
Specific resistance [l/m]	2.2×10^7	2.0×10^7	7.0×10^7	2.4×10^7
Warp	filament	filament	filament	spun staple
Yarn construction			+ spun staple	
Filling	filament	filament	spun staple	spun staple
Yarn count [/10 cm]				
Warp	556	300	284	288
Filling	252	270	229	204
Weave	3/2 Twill	3/1 Twill	Sateen	Sateen

Table 2 Characteristics of felt fabrics tested

Felt fabric	B 1400S	B 9400M	B 9500S	B 9640SF	Wool felt
Material	Polypropylene	Tetron	Tetron	Tetron	Wool
Weight [g/m ²]	420	406	523	640	560
Thickness [mm]	1.4	1.2	1.8	2.0	1.7
Apparent density [g/cm ³]	0.300	0.338	0.291	0.320	0.329
Void [%]	67.0	75.4	79.0	76.8	—
Air permeability [cm/sec]	22.9	23.9	23.2	15.0	16.5
Specific resistance [l/m]	3.1×10^7	2.9×10^7	3.0×10^7	4.6×10^7	4.2×10^7

Table 3 Conditions of the used woven fabric

Code number	PT 5203
Location where fabric is used	Factory housing with steelmaking electric furnace
Total years operated [years]	3
dust	Mainly iron oxides
Filtering velocity [m/min]	1.1
Average inlet dust concentration [mg/Nm ³]	91
Average outlet dust concentration [mg/Nm ³]	0.035
Type of dust cleaning	Reverse air
Partial period of cleaning cycle [min]	20
Total period of cleaning cycle [min]	240
Residue dust load [g/m ²]	100-150

2. 実験結果および考察

2・1 圧力損失

粉塵負荷と圧力損失の関係を Fig. 3 に示す。縦軸は圧力損失を汭過速度で割った、いわゆる drag である。フェルト汭布では、drag は粉塵負荷に比例しており、粉塵はフェルト汭布の内部ではなく、汭布表面に堆積し、ほとんど集塵初期の過程から粉塵層が形成されるものと推定できる。これに対し、織汭布では低粉塵負荷で drag は急上昇し、その後の中高粉塵負荷で drag と粉塵負荷とは直線関係を示す。すなわち集塵開始時は汭布の織目内に粉塵が捕集され、汭布内の流路の急激なせばまりによって圧力損失は急上昇するが、汭布表面上に一樣に粉塵層の形成される中高粉塵負荷になれば、圧力損失は粉塵層の厚さに比例するようになる。このように drag と粉

Fig. 1 Experimental apparatus for fundamental performance of a filter fabric

Fig. 2 Particle size distributions of test dusts measured by cascade impactor

塵負荷とが直線関係である時、直線の傾きを圧力損失の比抵抗係数 K_2 と呼ぶ。

粉塵負荷のない汭布の圧力損失と汭過速度の関係を Fig. 4 に示す。フェルト汭布 (B 9500 S, B 9640 SF) や短繊維織汭布 (PT 5203) の圧力損失は汭過速度にほぼ比

Fig. 3 Relations between drag and dust load for a woven and a felt fabrics

Fig. 4 Relations between pressure loss and filtering velocity for woven and felt fabrics without dust load

例しているのに対して、長繊維織汙布 (PT 5111) では汙過速度の増加と共に圧力損失が急に大きくなる。この理由として、汙布を通過する流量が増すことで流れが乱流となることと、汙布の変形によって流路が狭まることが挙げられる。今、汙布の織目のみしか気流が流れないと仮定しても、本実験範囲では層流域となり、後者が主な原因と推定される。また PT 5111 汙布にだけ現れるのは、他の汙布より糸の打ち込み本数が少なく、織目の変形を受けやすいためと考えられる。

Fig. 5 は汙過速度の相違によって、堆積粉塵層の構造がどのように変化するかを検討したものである。汙過速

Fig. 5 Relations between pressure loss and filtering velocity at two dust loads on a filament woven fabric

度約 1.8 m/min で所定の粉塵負荷まで集塵した後、粉塵を供給せず、汙過速度を上昇し、次に下降する操作を繰り返した場合の圧力損失特性を示してある。低粉塵負荷の場合、速度を上昇させると圧力損失は汙過速度に比例せず、圧力損失の増加はゆるやかになる。次に速度を減少させると、わずかではあるが逆に下に凸の曲線が得られ、その後は汙過速度の増減に対して同一の曲線を描く。このように最初にだけヒステリシス曲線が得られる原因について、定性的に考察してみよう。すなわち低粉塵負荷では、織目に堆積した粉塵層はまだ不安定で汙過速度を増大させると、堆積層が安定した状態に移動し、気流が流れやすくなり、圧力損失の上昇がにぶると考えられる。実際汙過速度を上昇させ、ある速度でしばらく一定にしておくと、いったん上昇した圧力損失はしだいに減少し、数 mmH₂O 低下する現象がしばしばみられる。5.2 m/min の高汙過速度に対応した粉塵堆積構造が形成された後は、この値より小さな汙過速度域では、圧力損失に応じて粉塵層が弾性的に圧密されるため、下に凸の曲線になると推定されるが、今後の検討を必要とする。

一方、中粉塵負荷 (41.8 g/m²) においては、ヒステリシス現象がみられないことより、すでに安定な堆積層が形成されているとみなされる。なお、このようなヒステリシス曲線は他の汙布でも一般にみられ、特に低粉塵負荷の方がその傾向が大きいことから、上述の定性的考察は広く適用できるものと思われる。

次に比抵抗係数 K_2 に及ぼす汙過速度の影響を **Fig. 6** に示す。 K_2 と汙過速度 u の積は、汙過速度の 1.2~1.5 乗に比例する。もし汙過速度によらず、粉塵層内の粒子充填率が一定ならば、圧力損失は汙過速度に比例するはずであるから、堆積粉塵層の充填率が汙過速度の増加とともに

Fig. 6 Relations between specific resistance and filtering velocity for woven and felt fabrics

に大きくなることを示している。

2.2 集塵率

ミリポア・フィルターで捕集した通過粉塵量より求めた積算通過率と粉塵負荷の関係を Fig. 7 に示す。Tables 1, 2 の汙布の特性を参照すると、積算通過率は通気度が小さいほど小さくなる。すなわち、集塵率は通気度 34.5 cm/sec の長繊維織汙布 (PT 5111) が最も低く、9.8 cm/sec の長、短繊維混紡の交織汙布 (PT 5201) が最も高い。また、積算通過率と粉塵負荷の関係は、傾き -1 の直線関係となり、次式で表現できる。

$$1-E = m_0/m_i \approx km^{-1} \quad (1)$$

ここで、 m_0 は積算通過粉塵量であり、 m_i は積算供給粉塵量である。いま粉塵負荷 m が m_0 に比較して十分大きければ、 $m_i \approx m$ が成立し、Eq. (1) は次式になる。

$$m_0 = k \quad (2)$$

すなわち、積算通過粉塵量は一定であるから、完全捕集となることを示している (Appendix)。また完全捕集域における汙布の種類による積算通過率の差は、集塵初期における集塵性能の差だけを示す。

汙過速度が積算通過率に及ぼす影響を Fig. 8 に示すが、汙過速度が速くなると積算通過率は大きくなると共に、直線の傾きが小さくなっている。このことは、粉塵負荷が大きくなっても完全捕集に達しないことを示している。

低粉塵負荷での通過率を Fig. 9 に示す。これによれば低粉塵負荷 (この場合約 7 g/m² 以下) では瞬間通過率も大きく、その結果積算通過率曲線の各点の接線の傾きが -1 よりゆるやかな曲線になる。これに対して約 10 g/m² 以上の粉塵負荷では瞬間通過率は非常に小さな

* この測定には汙布直後約 5 cm の点で、口径約 9 mm のプローブで等速サンプリングした気流を用いているため、汙布のごく狭い範囲の通過状態を検討していることになる。そこで、汙布全体の通過状態と区別するため、「局所」という言葉を用いる。

Fig. 7 Relations between cumulative penetration and dust load for various woven and felt fabrics

Fig. 8 Relations between cumulative penetration and dust load at various filtering velocities

り、積算通過率曲線の接線も -1 に近づき、完全捕集の状態になる。

さて通過粉塵の粒径および個数濃度に及ぼす粉塵負荷の影響を調べた結果の代表例を Fig. 10 に示す*。これによれば、いずれの実験においても、1 μm 以上の局所通過粉塵濃度は粉塵負荷が増すと急速に減少する。しかしある点を過ぎると、再び通過粒子個数が増加する。この図では 2 種類の増加の形態が示されており、この現象は一般に実験ごとに相違し、全汙布面のごく一部分の不規則なピンホールによるものと推定される。すなわち汙布の局所的な組織構造の違いに基づく、粉塵層の堆積構造の相違によるものである。なお、本現象は 5 μm 以下の粒子に対して観測され、圧力損失の減少が伴わないことによっても局所的なものと考えられる。

入口供給粉塵の個数濃度は非常に高いため、粒径別個数濃度計で直接測定することはできないが、Fig. 2 の

Fig. 9 Difference between cumulative penetration and instantaneous one for dust load on a felt fabric

Fig. 11 Relations between local penetration and dust load for various particle size ranges

供給粉塵の重量基準粒径分布が対数正規分布であることに注目して、個数基準粒径分布に換算し、これを用いて個数基準の通過率を求めた結果の一例を Fig. 11 に示す。個数基準の局所瞬間通過率は粉塵負荷を増すと急速に小さくなるが、小粒子（粒径 $2\mu\text{m}$ 以下）は粉塵層崩壊のために一時通過率が大きくなる。しかしこのようなピンホール現象は粉塵負荷が約 100g/m^2 以下の場合である。

さらに通過粉塵の粒径分布の変化例を Fig. 12 に示す。すなわち $2\sim 3\mu\text{m}$ 以上の粒子をほぼ完全に捕集するには、ごくわずかな粉塵負荷でよいが、 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子は高粉塵負荷になるまで通過する。なお、各粉塵負荷における通過粒子径ごとの濃度には著しい差がみられ、粉塵層での粒子捕集にはかなり強い分級作用の存在

Fig. 10 Relations between local penetration and dust load on a felt fabric

Fig. 12 Relations between local penetration and particle size at various dust load on a felt fabric

がみられる。

2・3 新汙布と使用済み汙布の比較

数年間使用した汙布は、一般に目づまりや払い落としによる疲労を生じているが、新汙布と性能上相違があるかどうかを同一条件下で比較した例はない。ここでは、Table 3 に示した短繊維織汙布について検討を行ったが、実機における残留粉塵量 $100\sim 150\text{g/m}^2$ に一定の振動を与え、安定な固着粉塵負荷を約 50g/m^2 とした。なお、この比較には使用済み汙布の固着粉塵量を粉塵負荷として考慮しない。

まず圧力損失の比較を Fig. 13 に示すが、汙布間には

とんど差のないことがわかる。このことは、使用済み汙布の安定な固着粉塵は、汙布内の流路外（汙布組織内の流れに対する死空間）に存在して、圧力損失にほとんど影響しないものと推定される。

次に Fig. 14 に示すごとく、使用済み汙布の集塵率は、かなりばらついているが、新汙布より優れている。使用済み汙布のばらつきは、汙布の疲労度や固着粉塵量の状態が場所によって異なっているためであろう。なお集塵率の向上は、汙布表面および内部の固着粉塵の影響、および長期間の使用によって生じた汙布表面の繊維の毛羽立ちなどによるものと推定される。

結 言

小型汙布集塵実験装置を用いて、織汙布とフェルト汙布、ならびに使用済み汙布の集塵性能を実験的に検討した結果、次のような知見が得られた。

1) 粉塵負荷に対する圧力損失の変化は、フェルト汙布では比例するが、織汙布では初期において急増し、その後比例する。

2) 汙布だけの drag（圧力損失/汙過速度）は一般に一定であるが、長繊維織汙布の場合だけ、drag が汙過速度とともに増大する。

3) 同一の低粉塵負荷における圧力損失と汙過速度の関係は、履歴現象を示す。

4) 粉塵層の圧力損失の比抵抗係数 K_2 は、汙過速度とともに大きくなり、本実験条件下では圧力損失は汙過速度の 1.2~1.5 乗に比例する。

5) 低汙過速度 (1.7 m/min) における集塵は、汙布の種類によらず、中高粉塵負荷領域ではほとんど完全捕集となる。

6) 一般に汙過速度が速くなるほど積算および瞬間通過率は大きくなる。

7) $3\mu\text{m}$ 以上の通過粒子は低粉塵負荷で激減するが、 $2\mu\text{m}$ 以下は局所的な吹き抜けなどのため、完全捕集に達するには比較的長時間を要する。

8) 使用済み汙布と新汙布の性能を比較したところ、圧力損失特性はほとんど変わらないが、集塵率は使用済み汙布の方が若干高い。

Appendix

Fig. 7 において、積算通過率 $(1-E)$ を縦軸に、粉塵負荷 m の代わりに積算供給粉塵量 m_i を横軸にとっても、傾き β の直線関係を得るならば、次式が成立する。

$$(1-E) = m_0/m_i \div k m_i^\beta, \quad k > 0 \quad (\text{A-1})$$

すなわち、

$$m_0 = k m_i^{(\beta+1)} \quad (\text{A-2})$$

Eq. (A-2) を積算供給粉塵量 m_i で微分すると瞬間通過率 $(1-\eta)$ が得られる。

Fig. 13 Comparison of drags against dust load between a virgin woven fabric and the used one

Fig. 14 Comparison of particle penetration against dust load between a virgin woven fabric and the used one

$$(1-\eta) = dm_0/dm_i = k(\beta+1)m_i^\beta \quad (\text{A-3})$$

さて、 $(1-\eta)$ は正もしくは零であるから、上式から

$$(\beta+1) \geq 0 \quad (\text{A-4})$$

すなわち、 $\beta \geq -1$ となり、 $\beta = -1$ の時、Eq. (A-3) から瞬間通過率は零となり、完全捕集の状態である。

さて、一般に m_0 は m に比較して無視できるので、上述の議論において m_i を m に置換してもよいと考えられ、Fig. 7 で $(1-E)$ が m の -1 乗で表現できる範囲は、完全捕集となる。

【謝 辞】 汙布を提供して下さった市川毛織(株)および(株)クリーン・フィルターに謝意を表します。

Nomenclature

c	= inlet dust concentration by weight	[kg/m³]
D_p	= particle diameter	[m]
E	= cumulative collection efficiency	[-]

K_2	= specific resistance coefficient of pressure loss across fabric filter = $d(\Delta p/u)/dm$ [mmH ₂ O · m · sec/kg]
m	= dust load on filter fabric [kg/m ²]
m_i	= cumulative inlet dust load [kg/m ²]
m_o	= cumulative outlet dust load [kg/m ²]
Δp	= pressure loss across filter fabric with dust load [mmH ₂ O]
Δp_o	= pressure loss across filter fabric without dust load [mmH ₂ O]
u	= average filtering velocity [m/sec]
η	= instantaneous collection efficiency [—]

Literature cited

- 1) Billings, C. E.: *Powder Technology*, **18**, 79 (1977)

- 2) Dennis, R.: *J. Air Poll. Control Assoc.*, **24**, 1156 (1974)
- 3) Holland, C. R. and E. Rothwell: *Filtration & Separation*, **14**, 30 (1977)
- 4) Holland, C. R. and E. Rothwell: *ibid.*, **14**, 224 (1977)
- 5) Ikemori, K. and Y. Kosakai: *J. Japan Air Cleaning Assoc.*, **16**, (3), 1 (1978)
- 6) Kano, T. and H. Hirano: *J. Res. Assoc. Powder Tech.*, **12**, 76 (1975)
- 7) Kimura, N. and K. Iinoya: *Kagaku Kōgaku*, **29**, 166 (1965)
- 8) Kimura, N. and K. Iinoya: *J. Res. Assoc. Powder Tech.*, **7**, 124 (1970)
- 9) Kimura, N. and M. Shirato: *Kagaku Kōgaku*, **34**, 984 (1970)
- 10) Nakai, A. and K. Iinoya: *J. Res. Assoc. Powder Tech.*, **9**, 399 (1972)

(1978 年 10 月 31 日受理; 化学工学協会第 12 回秋季大会 (岡山, 1978 年 10 月) にて発表)

Fundamental Experiments on the Performance of Dust Filter Fabrics

Yasushige Mori, Tamotsu Kubori, Masayoshi Ishizuka,
Kazutaka Makino and Koichi Iinoya

Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ., Kyoto 606

A fabric dust filter is one of the dry dust collectors having the highest performance. However, there have been only a few fundamental studies of the fabric. In this paper, filter performance is experimentally studied for combinations of nine kinds of woven or felt fabrics and three kinds of fine calcium carbonates, including a fabric which has been used for three years in a steel foundry. The following conclusions are obtained:

- 1) Pressure loss of a felt fabric is proportional to dust load, while that of a woven fabric increases sharply with initial dust load and has a linear relationship with larger dust load.
- 2) Pressure loss is proportional to a greater than first power of filtering velocity.
- 3) The relationship between pressure loss and filtering velocity shows hysteresis at a constant dust load because of pinholes or compression in the dust layer.
- 4) All fabrics have 100% collection efficiency at a relatively low filtering velocity for larger dust loads. The collection performance deteriorates at higher filtering velocities.
- 5) Particles greater than 3 μm demonstrate a rapid decrease in penetration at lower dust loads. However, particles under 2 μm penetrate at a fairly large dust load due to the occurrence of pinholes.
- 6) There is no significant difference in drag between a virgin woven fabric and the used one. On the other hand, the collection performance of the used fabric is better than that of the virgin one.