

帯電防止フィルタの安全性評価

Safety Evaluation of Anti-static Filter

飯島 伸介* 堀江 永有太* 藤井 沙也加*
Shinsuke Iijima Nayuta Horie Sayaka Fujii

天野 寛之** 高柳 圭佑**
Hiroyuki Amano Keisuke Takayanagi

In order to evaluate the safety regarding the electrostatic discharge of the antistatic filters that are generally used in our company, the surface potential, the number of discharges, and the leakage current when collecting charged resin particles are measured. The corona discharge energy measured under this study conditions is less than 0.1 mJ per discharge. Moreover, it is confirmed that all three types of filter cloth generally meet not only Japan but also foreign standards. In addition, it is found that the occurrence of discharge is more affected by relative humidity than the difference in the fabric.

KEY WORDS: antistatic, filter, discharge, safety evaluation, relative humidity

1. はじめに

集じん機において、火災・爆発事故が依然として発生しており、着火源が静電気放電であると特定または推定されている事例が多い¹⁾。当社では、静電気放電による火災・爆発災害防止対策の一つとして、帯電防止フィルタ（導電性繊維：ECFを織り込んだ織布やフェルト、あるいは表面にステンレスをスパッタリングしたスパンボンドなど）を使用している。

帯電防止フィルタについては、1999年に発行された集じん機及び関連機器における粉じん爆発防止技術指針（NIIS-TR-No.36、以下指針）に構造要件が記載されているが、その後約20年間にわたり改訂されていない。また、爆発の危険性がある場所で使用する機器及び防護システムに関するISO（ISO 60079-0, ISO 80079-36）やJIS（JIS C 60079-0）は発行されているものの、帯電防止フィルタに特化した規格類は、2019年現在まで発行されていない。更には、帯電した粒子をフィルタで捕集・払落した際の放電による危険性について検討された研究はほとんどみられない。

そこで、着火性の静電気放電の発生に対するリスク・安全性を評価する為、集じんを模擬し

た実験を行い、捕集した粉じん層の表面電位や、帯電防止フィルタを経由して漏洩する電流をもとに除電量や放電エネルギーを試算し、帯電防止フィルタの除電効果を比較した。また、粉じんの最小着火エネルギーと比較して、放電の着火性についても確認した。更に、湿度の影響についても検討した。

2. 実験装置

2.1 実験装置

Fig. 1は、実験に使用したテスト装置図を示す。サンプル粉じんとしてポリエチレン粒子（三井化学製XM-221U）をフィーダ（アルファ製）を使用して、ナイロンチューブ（内径2mm、長さ10m）に定量供給した。粉じんはチューブ内を通過する間、摩擦帯電によりマイナスに帯電される。別途チューブ出口に吸引式ファラデーゲージ（IMP製IF-02）を接続して帯電量を測定したところ、平均 $-0.2 \sim -1.5 \mu\text{C/g}$ であった。尚、この帯電量は空気輸送における典型的な帯電量の10～100倍であり、静電粉体塗装における塗料の帯電量と同レベルの値である。

ろ過面積は 0.01m^2 、ろ過速度は 1m/min であ

* 開発本部 開発グループ

** エコテックカンパニー 技術グループ 開発チーム

る。フィルタ上に堆積した粉じん層の表面電位を表面電位計（キーエンス製SK-1000）で測定した。

また、帯電防止フィルタの導電部（導電性繊維末端など）を10kΩの無誘導巻線抵抗（DALE製NS-10）を介してアースに接続した。オシロスコープ（横河製DLM2024）で抵抗の端子間電位差を測定し、帯電防止フィルタの導電部を通じてアースに流れる漏洩電流を求めた。

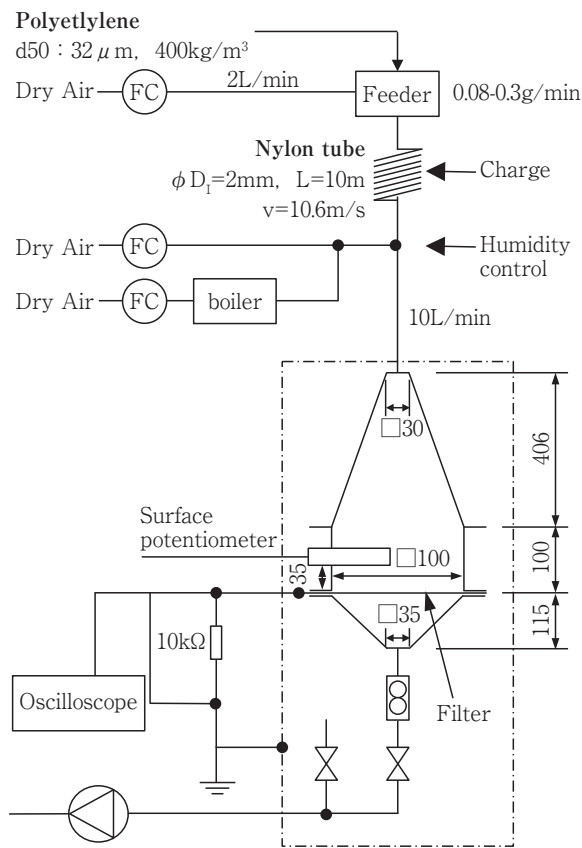


Fig. 1 Experimental equipment.

2.2 帯電防止フィルタ

Table 1に、今回対象とした帯電防止フィルタの生地仕様を示す。いずれのフィルタも材質はポリエステルであり、フィルタAとBは、基布に所定の間隔で導電性繊維が編み込まれたものである。一方、フィルタCは集じん面のみ全面ステンレスでスパッタリングしたものである。尚、Table 1に示すように、JIS L 1094のC法に基づいて測定した摩擦帯電電荷量は、3種類の生地全

てが指針の基準値（ $4\mu\text{C}/\text{m}^2$ 以下）をクリアしている。

Table 1 Specification of filter.

Filter	A	B	C
Type	woven cloth	felt	spunbond
Material	Polyester	Polyester	Polyester
Weight	340 g/m ²	600 g/m ²	260 g/m ²
Conductivity	ECF 25mm pitch	ECF □ 17mm	SUS Sputtering
Triboelectric Charge (max)	1.8 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	1.1 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	1.4 $\mu\text{C}/\text{m}^2$

また、比較対象として各々導電性繊維を含まないものや、スパッタリング処理されていないものについても同様の実験を行った。

3. 結果と考察

3.1 表面電位・放電頻度・放電エネルギー

Fig. 2に25℃、相対湿度（RH）5%の条件において、捕集した粉じん層の表面電位の経時変化を示す。尚、帯電防止加工していない生地の結果についてはそれぞれA*、B*、C*とした。また、実際に計測された表面電位はマイナスであるが、以下の文及びFig. 2の中ではわかりやすいように絶対値（プラス値）で表記している。

帯電防止加工をしていないフィルタでは、粉じん供給開始後30分以内にすべて表面電位が30kVを超えた。一方、フィルタA、B、Cでは、粉じんの供給に伴って表面電位が上昇し、3時間後には20～25kVとなった。粉じん供給初期における表面電位の増加割合は、帯電防止加工していないものと比較して約1/10となった。帯電防止加工を施し、アースに接続することで表面電位の上昇を著しく抑制できることを確認した。

また、フィルタA、B、Cでは、表面電位が高くなるとフィルタ導電部に接続した無誘導巻線抵抗の両端間に断続的に電位差が計測されるようになった。

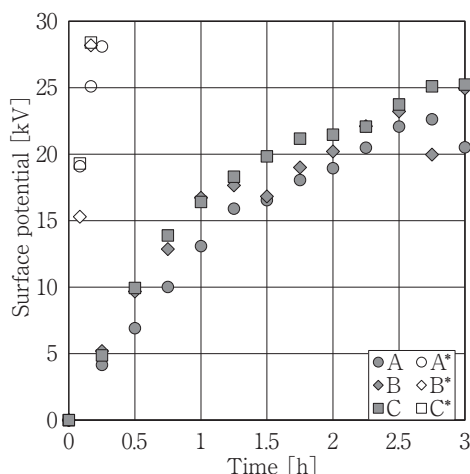


Fig. 2 Change over time of surface potential.

Fig. 3 に一例として、フィルタCを使用した結果、計測された抵抗両端の電位差をもとに算出した放電電流の経時変化を示す。更に、平均放電開始電位、電流ピーク面積から式 (1), (2) により算出した放電一回当たりの放電エネルギーと、放電開始から粉じん供給開始3時間後までの平均放電回数を Table 2 に示す。

Table 2 Result of discharge experiment.

Filter	A	B	C
Discharge start voltage	8kV	10kV	14kV
Number	1340	430	300
Discharge Energy	0.2-50μJ	0.15-30μJ	0.15-20μJ
Leakage resistance	V $<1 \times 10^3 \Omega$	$<1 \times 10^3 \Omega$	$3 \times 10^4 \Omega$
	H $4 \times 10^{11} \Omega$	$<1 \times 10^3 \Omega$	$7 \times 10^4 \Omega$

$$\text{電荷 [C]} = \text{電流 [A]} \times \text{時間 [s]} \quad (1)$$

$$\text{放電エネルギー [J]} = 1/2 \times \text{電荷 [C]} \times \text{電位 [V]} \quad (2)$$

上記の結果から、放電開始電位の低さ、放電エネルギーの大きさ、放電回数の多さから、帯電防止フィルタの除電効果は以下の順で高いと考えられる。

フィルタA > フィルタB > フィルタC

今回観測された放電は、帯電した絶縁体粒子から帯電防止フィルタの導電性繊維などの曲率半径が小さい金属部分への放電であることから、コロナ放電と考えられる。

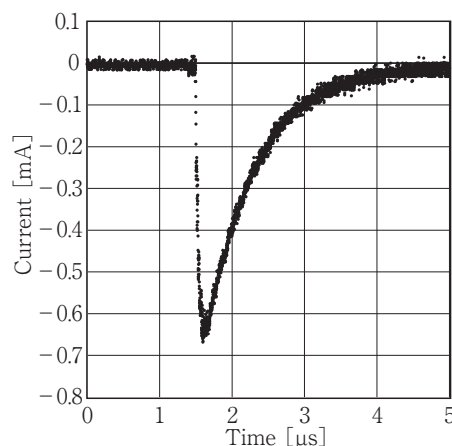


Fig. 3 Example of discharge current.

コロナ放電の開始電圧は、曲率半径 0.1mm の場合 2kV 程度、1mm の場合は 6kV 程度とされている²⁾ ことから、今回測定された値は生地繊維を考慮すると大きめの値ではあるものの、同レベルの値であると考えられる。

また、フィルタA、B、Cにおいて、放電開始直後の放電エネルギーは 0.1-0.2μJ であり、時間の経過とともに大きなピークも観測される結果となったが、今回の実験条件では最大でも 60μJ であり 0.1mJ を超えるピークは観測されなかった。コロナ放電における放電エネルギー(等価エネルギー)は最大数十μJ とされており³⁾、今回の実験結果も妥当な値と考える。

尚、帯電防止フィルタの使用要件・適用基準について、国内の指針では明記されていないが、ドイツ連邦労働安全衛生研究所が策定している技術規則 TRGS 727 : 2016 では、以下 1) ~ 3) の条件に適合する場合、ストリップ抵抗が $10^8 \Omega$ 以下の導電性フィルタを使用することと明記されている。

- 1) MIE $\leq 3\text{mJ}$ の粉じん
- 2) 導電性の粉じん
- 3) 可燃性の粉じんとガスの混合物

更に、全米防火協会が策定している NFPA 77 : 2019 でも、MIE < 4mJ のガスまたは、溶剤蒸気と粉じんのハイブリッド可燃物が存在する場合、もしくは可燃性の導電性粉じんを処理する場合には、導電性フィルタの使用を考慮する必要があると記載されている。

フィルタの導電性については、指針に導電性繊維を縞状または格子状に、かつ等間隔に織り込むなどの加工を施した導電性の布地を用いると記載されており、今回実験に使用したフィルタA、B、Cの生地は3種類とも基準をクリアしている。

更に、JIS L1094：2014 附属書Aに従って表面漏洩抵抗を測定した結果をTable 2に併記する。試料片のサイズや測定条件がストリップ抵抗の測定方法とは若干異なるものの、フィルタBとCはTRGS 727の基準も十分クリアしていると考えられる。一方、フィルタAについては導電性繊維が一方方向（便宜上縦方向）にしか織り込まれていない為、横方向の表面抵抗値はTRGS 727の基準を満たさない。

よって、上記の結果から、今回テストしたフィルタ生地は国内の指針のみならず欧米の基準にも概ね準拠した導電性を有するフィルタといえ、上記1)～3)に記載した集じん条件でも使用可能と考える。

但し、導電性の粉じんについてはNFPA 484：2019において、アルミニウムとマグネシウムに関連した工程では、 $K_{St} > 150 \text{bar}\cdot\text{m/s}$ の金属粉じんには乾式バグフィルタを使用してはならないと規定されている。日本国内でも、2000年前後に発生した爆発災害の発生をうけて発行されたマグネシウム合金粉じんによる爆発火災災害の防止に関する厚生労働省の通達（基安発第0329001号、2002/3/29）において、湿式集じん機の使用が推奨されており、やむをえず乾式バグフィルタを使用する場合には導電性の生地を使用することなどが記載されている。

更に、ISO 80079-36：2016では、これまでの知見の結果として可燃性の粉じんやガスはコロナ放電により着火する可能性はないと記述されているが、爆発危険特性データが公表されている可燃性粉じんに限られていること、MIEが1mJ未満に分類される粉じんも10種類以上報告されていること⁴⁾、水素やアセチレンなど、爆発グループIICに分類される可燃性ガスのMIEが20 μJ 以下であることなどから、実績のない集じん対象に対

して、今回テストしたフィルタの適用可否を判断する為には十分な検討が必要である。

3.2 湿度の影響

静電気放電は湿度が低いときに発生しやすいこと、更にClevesら⁵⁾によれば、生地の表面抵抗はRHの対数に比例することから、RHの影響についても検討した。Fig. 4に25 $^{\circ}\text{C}$ 、RH5～80%の条件において、粉じんを3時間供給した後の表面電位と放電開始電位を示す。

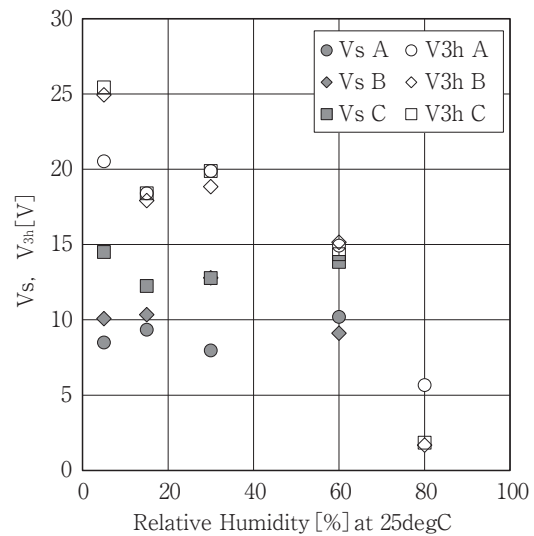


Fig. 4 Surface potential at each RH condition.

粉じん供給開始3時間後の粉じん層表面電位はRHの増加に伴って減少するが、放電開始電位はRHによらずフィルタ毎にほぼ一定の値をとることがわかった。また、放電回数もRHの増加に伴って減少した。尚、RH60%を超える条件では表面電位が放電開始電圧を超えなかった為、放電が発生しなかったと考える。

今回の実験では、ポリエチレン粒子を帯電した後に湿度調整を行っているので、空気中の水分により除電が促進したと考えられる。そこで、まず25 $^{\circ}\text{C}$ 、RH5%の条件で帯電した粉じんを20分間供給した後、粉じんの供給を停止し、所定のRHに調湿した空気のみを供給する実験を行った。

Fig. 5に一例としてフィルタCを使用した場合における調湿空気供給開始後の表面電位の経時変化を示す。

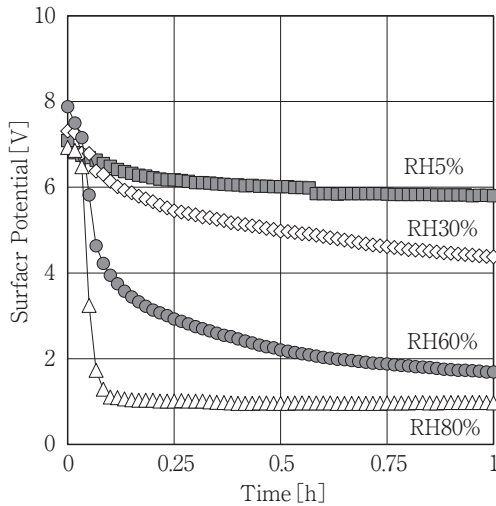


Fig. 5 Effect of moisture on surface potential.

帯電している粉じん層に調湿空気を供給するだけで表面電位が減少したことから、空気中の水分のみでも帯電した粉じんの除電が促進されることを確認した。更に、調湿空気供給開始時における表面電位を V_0 としたとき、 V_0 から V_0 の36.8%の表面電位まで低下する為にかかった時間(減衰緩和時間 τ)をFig. 6に示す。

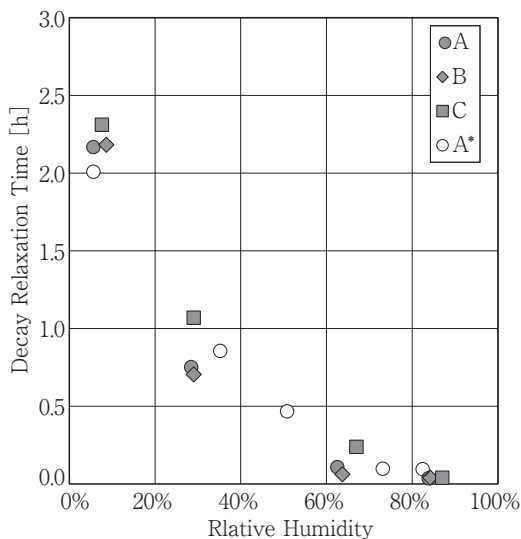


Fig. 6 Decay relaxation time.

減衰緩和時間の曲線がフィルタ生地によらずおおむね一致したことから、生地の違いや帯電防止加工の有無よりもRHの方に大きく依存しており、RH60%を超えると減衰緩和時間が著しく短くなることがわかった。この結果は、Fig. 4に示

した連続集じん条件においてRH60%以上の条件では表面電位の上昇が抑制され、放電が確認されなかったこととも一致する。

更に、これまでの実験では、供給する空気の温度を25℃に固定していたが、冬季を模擬する為に25℃, RH5%及び25℃, RH30%と絶対湿度が等しい5℃, RH20%と10℃, RH70%の条件でも実験を行い、表面電位を測定して比較した。

Fig. 7はフィルタCにおける結果を示しており、10℃, RH70%の条件では、3時間経過しても表面電位は5kVまでしか上昇せず、同じ絶対湿度条件でも温度は低く、相対湿度が高くなると除電効果も高くなった。よって、冬季でもRH70%以上に保持できれば帯電を抑制できることを確認した。但し、加湿の効果が期待できない粉じんが存在することや、絶縁物上に結露した水が放電の原因となるリスクがある為、静電気リスクアセスメントEd.2では、加湿は補助的な対策であり、加湿のみでの対策は行わないことと記載されているので、相対湿度を上げすぎないように注意する必要がある。

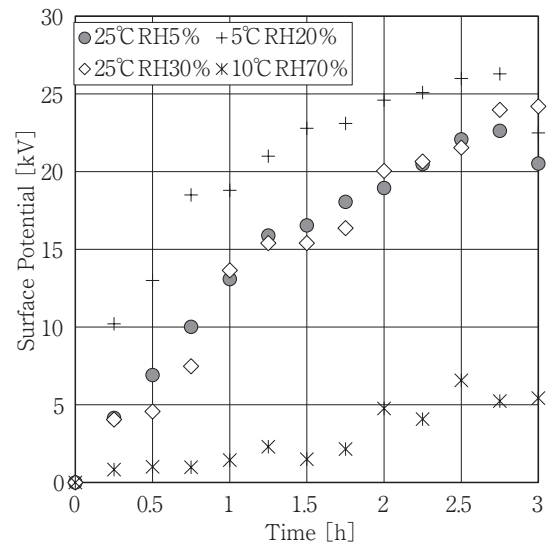


Fig. 7 Surface potential at low temperature.

4. おわりに

帯電防止フィルタについては、現状国際的に統一された規格はないものの、各国で類似の基準や指針が示されている。今回の実験で、帯電した粉じんの連続捕集においてコロナ放電による放電現

象を確認するとともに、実験に使用したフィルタ生地が日本国内の指針のみならず、欧米の基準もおおむね満たすことを確認した。更に、冬季でもRH70%程度の調湿により高い除電効果が得られることも確認した。但し、過去の爆発災害事例からわかるように、今後産業の発展に伴い、安全性が十分確認されていない粉じんが集じん対象となる事例や、予期されない可燃性ガスが混入する事例も想定される。その為、今後もこれまで同様、未知の集じん対象に対して粉じん爆発試験などを事前に行った上で、適切なフィルタを選定し、さらに帯電防止フィルタが確実に接地された状態を保ちながら適切に使用していくことが重要である。

謝辞

本実験は、中部大学工学部応用化学科二宮善彦教授ならびに山田直臣教授との共同研究において得られた成果であり、心より感謝申し上げます。更に、中部大学工学部電気システム工学科角紳一教授には、放電実験に関して多大なるご協力とアドバイスをいただきましたこと感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 労働安全衛生総合研究所爆発火災データベース：https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/houkoku_2018_02.html
- 2) 大澤 敦：静電気リスクアセスメントEd.2 (2018) 135
- 3) 大澤 敦：静電気リスクアセスメントEd.2 (2018) 40
- 4) 日本粉体工業技術協会粉じん爆発委員会編：粉じん爆発・火災対策 (2006) 217-234
- 5) A.C. Cleves, J. F. Sumner, R. M. H. Wyatt：ERDE Offprint 24 (1972)