

バグフィルタでの粉じん剥離帯電特性と金属粉じんの放電現象*

山隈瑞樹**, 児玉勉**

Electrostatic Properties of Dust Blown from Bag-Filters and Static Discharge from Layers of Metal Dust on Filter*

by Mizuki YAMAGUMA** and Tsutomu KODAMA**

Abstract: In recent years, there have been many serious industrial accidents resulting in severe injuries and deaths as a result of metal dust explosions in bag-filter dust collecting devices. According to the investigation reports, some cases seemed to be caused by electrostatic sparks as devices were manipulated by the workers, although the mechanisms of the charge generation and the ignition of dust by a electrostatic spark were unknown. For making these mechanisms clear, we proposed an explanation that frequent mechanical interaction between the dust and the bag-filter during the manipulation could generate a great deal of static-charges both on the dust and the filter, which ultimately discharged in an incendiary form. To prove this hypothesis, electrostatic charges on dust detached from the surface of a bag-filter by a high pressure blast of air were measured, and then the discharge phenomena from electrically isolated bag filters with charged dust were observed. The results are summarized as follows :

- (1) By removing the coarse and/or round dust particles from the fuzzy filter surface, larger charges were obtained than those of fine and/or irregularly shaped particles. This was probably made possible because the friction was more vigorous after the dust was removed. A roundish aluminum dust, for example, got as high as 70 $\mu\text{C}/\text{kg}$ of static charge.
- (2) No relationship between the resistivity of the filter and the bulk resistivity of the dust was found when a fuzzy surface was used; however, a relationship was identified when a flat, smooth surface was used.
- (3) Two types of antistatic filters containing conductive fibers mitigated the charge generation by the process of dust removal probably because of the corona discharges. One of the filters, where the conductive fibers are sparsely dispersed throughout its fabric, greatly decreased the charge.
- (4) The charge density on the dust was also dependent on the number of sequential removal of the dust by the blasting of air. In general, a larger charge density was obtained as the cycle progressed.
- (5) If aluminum dust were to accumulate densely on a filter that was electrically isolated and highly charged, it could produce an incendiary electrostatic discharge.

Keywords; Bag filter, Blow-off electrification, Dust explosion, Static discharge

* 平成13年11月30日アジア・大洋州安全シンポジウム (APSS2001) および平成15年 9 月11日第27回静電気学会全国大会において一部口頭発表した。また, 静電気学会誌Vol.28, No.1 (2004) において一部誌上発表した。

** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

1. 緒言

1985年頃以前、バグフィルタ式集じん機において粉じんと摩擦によってフィルタに大量の静電荷が蓄積し、そのスパークによって粉じん爆発が発生して甚大な損害を及ぼすという災害が多発した時期があった。これを契機として帯電防止型フィルタが開発され、一般的に採用されるに至ったこと、並びにこの種工程の危険性に関する啓発活動が活発に行われたことにより、以後目立った災害事例はなかった¹⁻³⁾。

ところが、'90年代終盤から'01年頃までにかけて、帯電防止型フィルタを使用していたにもかかわらず、静電気が原因と考えられる粉じん爆発が再び目立つようになってきた。そのほとんどはタンタルやマグネシウム・アルミニウム合金（マグナリウム）等の金属粉を回収する集じん機に集中した⁴⁾。Fig. 1 に、実際に筆者等が調査した集じん機爆発の一事例を示す。

これらの金属粉じんは極めて小さな放電最小着火エネルギーを有することから⁵⁾、集じん機の帯電防止対策が新たな段階へ入りつつあることを示すものである。従来のバグフィルタの帯電防止対策は、フィルタの導電性を高めこれを接地することにより電位上昇を抑制するという手法であったが⁶⁾、上記の災害事例を踏まえ、今後は粉じんの帯電をも抑制する機能が必要になると考えられる。我々は、その端緒として、小型の実験用集じん機を用いて、一般的なフィルタと粉体の組合せにおいて、主として高圧パルスエアによる粉体の払い落とし実験を行い、粉じんの帯電及び除電に関する一般的な知見を得るとともに、特に金属粉じん取扱い時の爆発災害の発生に関する重要な事項について、示唆に富む結果を得たので報告する。



Fig. 1 A dust explosion in a bag-filter device during retrieving collected magnarium dust.
マグナリウム粉じん回収中に爆発した集じん機

2. 実験

2.1 装置及び方法

実験装置は、Fig. 2 に示すように、小型の集じん機、乾燥空気又は窒素ボンベ、圧力容器並びに配管系で構成されている。集じん機 (Fig. 3) は、本研究用に特注製作したものである。本体の中央天井部分には、Fig. 4 に示す構造を有する円筒型の金属製リテーナ (フィルタを保持する金枠) を配置し、これに模擬バグフィルタを取り付ける。リテーナの内側からは最大 1 MPa の高圧ガスをパルス的に供給することにより、フィルタ表面に付着した粉じんを吹き飛ばす (以下、「逆洗」という) ことができる。

実験の標準的な手順は次の通りであった。

(1) リテーナにバグフィルタを取り付け、集じん機のドアを閉めて気密を保った後、リテーナ内部の配管を通じて空気を吸引し、集じん機内部を減圧する。その後、側壁の供給口を開き、計量容器を用いて適当量の粉体試料を内部へ導入する。

(2) フィルタ表面に十分な量の粉体試料が堆積したことを確認後、吸引を停止し、ドアを開けてダストフィルタ下部にアルミ製ダスト回収用容器を絶縁して置き、これにリード線を取り付けエレクトロメータ等の測定装置へ接続する。その後、再びドアを閉めて密閉状態とし、圧力容器の電磁弁を開き、逆洗を行う。落下した粉体はほぼ全量が回収容器に収まるので、電荷量及び粉体重量を測定する。

なお、実験中の偶発的な粉じん爆発を防止するため、金属粉じんの逆洗時のみ窒素を用いた。実験環境は、気温 22 ~ 25 °C、相対湿度 38 ~ 42 % であった。

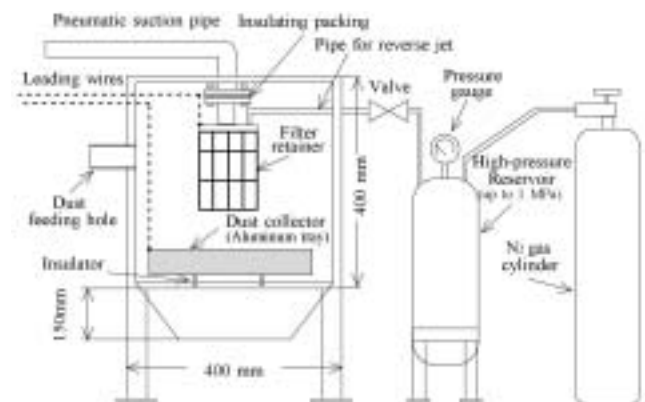


Fig. 2 Experimental apparatus.
実験装置の構成

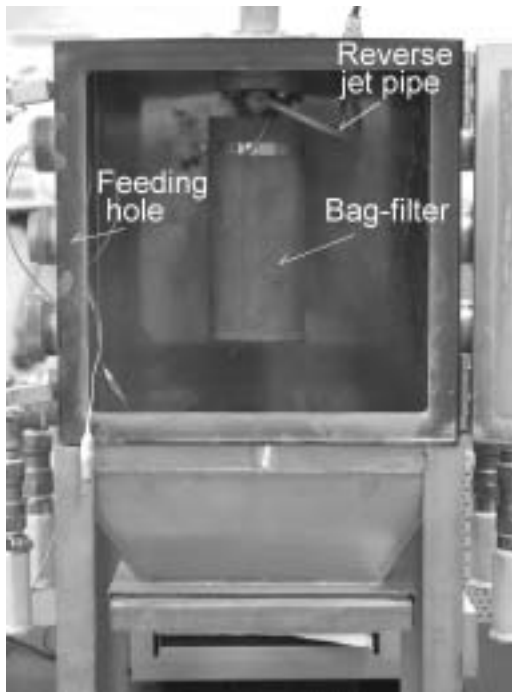


Fig. 3 Experimental dust collecting device.
実験用小型集じん機

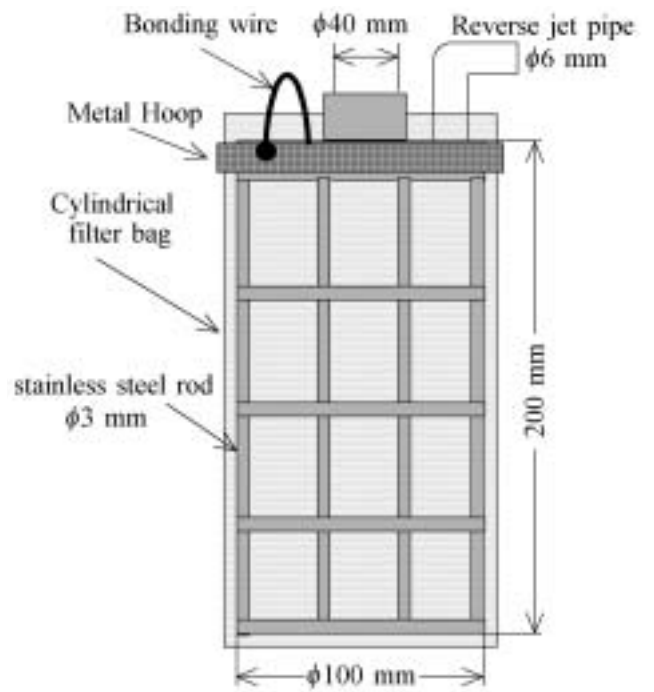


Fig. 4 Structure of filter retainer.
バグフィルタ用リテーナの構造

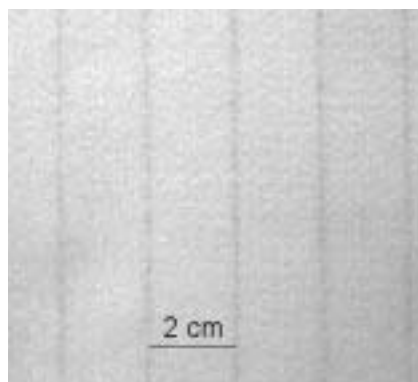
Table 1 Resistivities of filter samples (measured value)
フィルタ材料の抵抗率 (実測値)

Filter	HV Surface	Surface Resistivity [Ω] (Voltage [V])	Volume Resistivity [Ω·m] (Voltage [V])
Standard type	nap side	1.8×10^{11} (10) 1.4×10^{11} (1000)	4.4×10^8 (10) 1.5×10^8 (1000)
	iron side	4.1×10^{12} (10) 1.1×10^{12} (1000)	4.5×10^8 (10) 1.3×10^8 (1000)
Mix type	nap side	2.1×10^{14} (10) 6.7×10^{11} (1000)	4.2×10^{10} (10) 4.1×10^8 (1000)
	iron side	2.1×10^{13} (10) 2.7×10^{11} (1000)	6.9×10^8 (10) 2.7×10^8 (1000)
Stripe type	nap side	3.0×10^{11} (10) 2.1×10^{11} (1000)	6.9×10^8 (1) na* (5)
	iron side	3.3×10^{11} (10) 2.4×10^{11} (1000)	8.5×10^8 (1) na* (5)

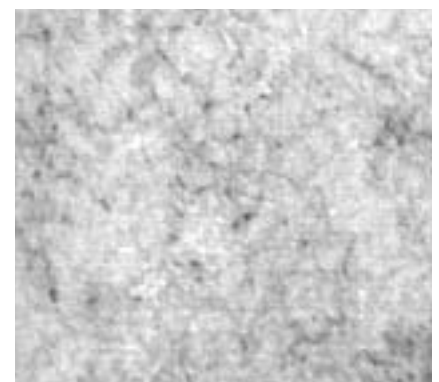
*na: not available due to range over by excess current



(a) Standard type



(b) Stripe type (antistatic)



(c) Mix type (antistatic)

Fig. 5 Photographs of filter cloths.
フィルタ材料の外観写真 ((a) 標準型, (b) 縞型, (c) 混合型)

2.2 バグフィルタ試料

フィルタの材質は、厚さ 1 mm のポリエステル不織布（商品名テトロン）1 種類、並びにこれに導電性繊維（金属メッキ繊維）を配合して帯電防止機能を持たせたもの 2 種類（繊維を筋状に集めたもの及び基布に均等に分散させたもの）の計 3 種類であり、いずれも市販品である。帯電防止型素材の外観を Fig. 5 に、また、円形電極⁷⁾を用いて実測した表面及び体積抵抗率

の実測値を Table 1 に示す。以後、これらのフィルタを、通常型（Standard type）、縞型（Stripe type）及び混合型（Mix type）と称する。

フィルタ材はフェルトであり、一方の面は無処理（起毛面：nap side）であるが、他方の面は高熱処理で平滑（アイロン面：iron side）となっており、どちらを粉じんの捕集面にするかは用途によって決められる。本実験においては、入手した粉体試料の量が限られていたため、繊維の状態と粉体電荷量の関連がより鮮明に現れることを見込んで、起毛面を捕集面とした

Table 2 List of dust samples used in the experiments.
実験に使用した粉体試料

Name of dust samples	Abbreviation	Apparent volume resistivity [$\Omega\cdot m$]	Median particle diameter [μm]	Particle shape
Polystyrene(black)(*waste)	PS-BW	1.3×10^{14} (**500V)	59.4	irregular
Polystyrene (waste)	PS-W	1.2×10^{16} (1000V)	87.7	irregular
High-density Polyethylene	PE	3.0×10^{14} (100V)	145	round
High-density Polyethylene(waste)	PE-W	1.5×10^{15} (1000V)	87.7	irregular
Methacrylic Resin	PMMA	6.0×10^{14} (1000V)	345	round
Aluminum (P2000)	AL-P2	2.5×10^{12} (10V)	8.8	irregular
Aluminum (atomized)	AL-A	1.2×10^9 (10V)	32.8	mostly round
Aluminum flake (waste)	AL-W	1.3×10^6 (10V)	288	irregular

*waste: samples taken from industrial sites, **: voltage used in the measurement.

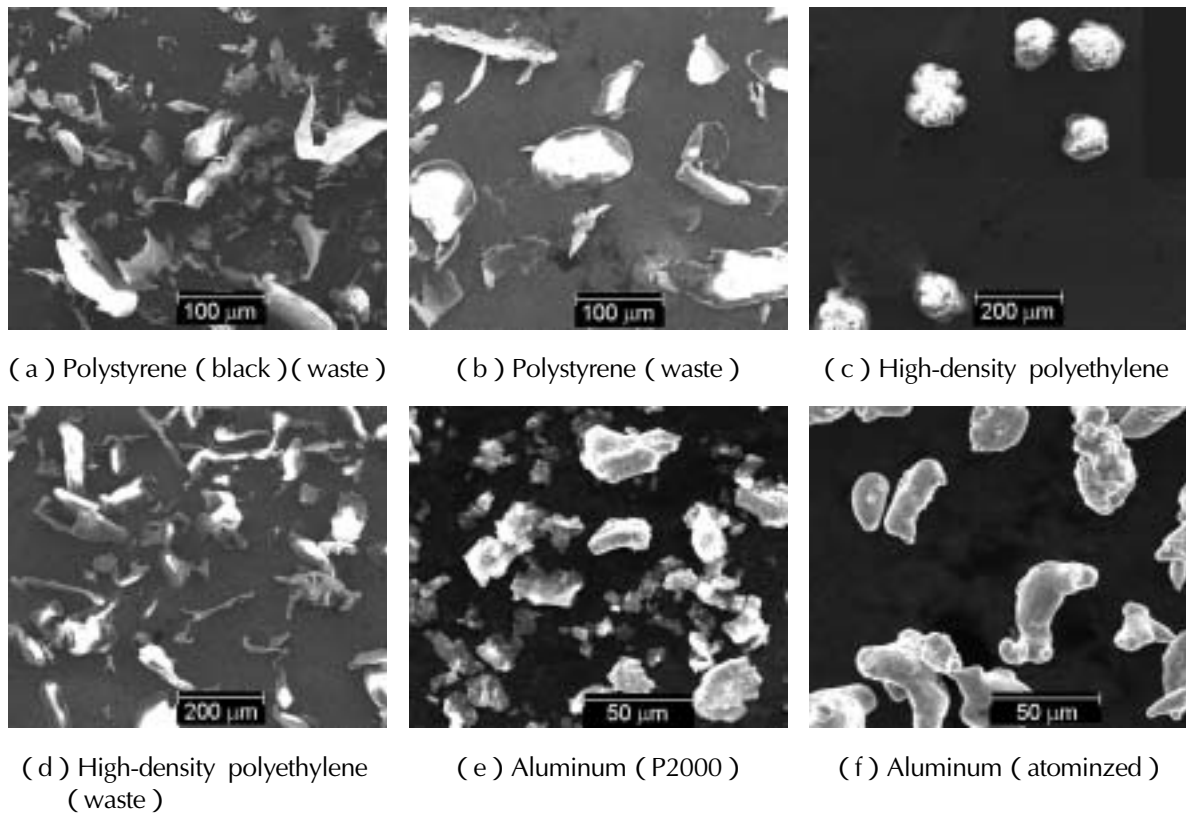


Fig. 6 SEM images of dust samples.
粉体試料のSEM写真

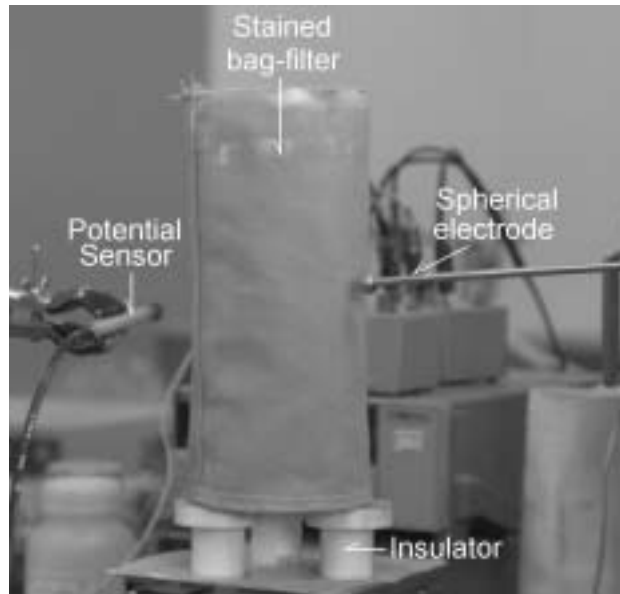


Fig. 7 Set-up for discharging from stained bag-filter.
金属粉じんを付着したバグフィルタの放電実験

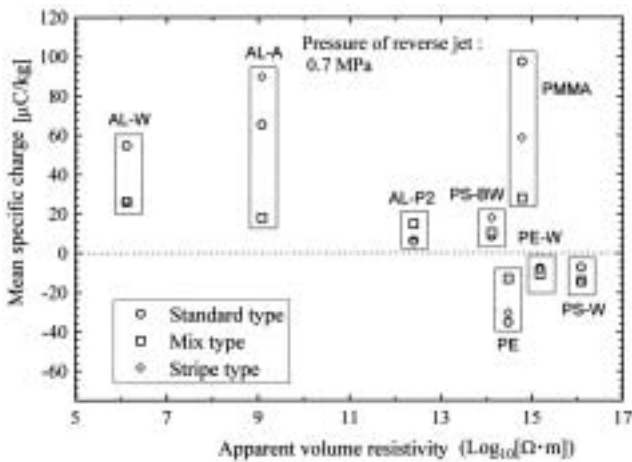


Fig. 8 Specific charge of dusts by de-dusting
(nap side)
逆洗により剥離した粉体の電荷密度(起毛面)

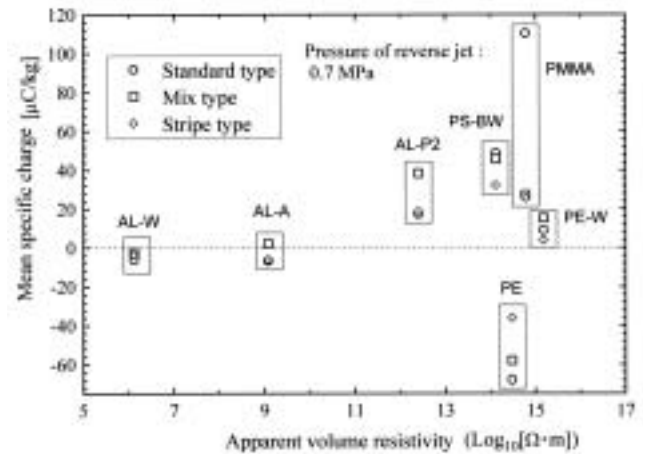


Fig. 9 Specific charge of dusts by de-dusting
(iron side)
逆洗により剥離した粉体の電荷密度(アイロ
ン面)

場合を中心に実験を行った。ただし、比較・対照上必要な場合にはアイロン面での実験も実施した。

2.3 粉体試料

試験用粉体は、合成樹脂 5 種類、アルミニウム粉 3 種類であり、その特徴(見掛けの体積抵抗率(以下、抵抗率)、メディアン粒径、形状)をTable 2 に示す。表中、名称の後にwasteの表記があるものは、産業現場の集じん機から採取したものであり、それ以外のもは試薬又は原料として用いられていたものである。以後、これらの粉体は同表第 2 カラムの略号を用いて

表す。PMMA及びAL-Wを除いた試料のSEM写真をFig. 6 に示す。

2.4 放電実験

帯電防止型フィルタ及び金属粉じんを付着したフィルタは導電性があるので、絶縁状態で帯電すると着火性放電を起こす可能性がある。この放電の発生条件を求めるためにFig. 7 に示すように、フィルタを電気的に絶縁し、これをコロナ放電装置または直接高圧端子を接続することにより所定の電位に帯電させ、これに接地した球電極を接近して放電させた。

3. 実験結果及び考察

3.1 粉体の抵抗率と帯電量の関係

0.7MPaで逆洗を1秒間行った場合の粉体試料の帯電電荷密度を粉体の抵抗率に従ってプロットしたグラフをFig. 8及びFig. 9に示す。前者は起毛面、後者はアイロン面を捕集面とした場合である。個々のデータはばらつきが大きいものであったので、同じ条件において3回～5回の試験を行い、その平均値を用いた(以後の図においても同様)。逆洗によって剥離した粉体の量は粉体の種類毎に異なり、約0.1～10gであった。また、本実験では、実際の産業現場での運用時に見られるようなフィルタ表面に形成される厚く堅い堆積層(ダストケーキ)は技術的に再現することができなかつたので、フィルタ表面に「緩く」付着した粉体層を対象にした。

一般に、二つの物体間の摩擦帯電においては一方または両方の体積抵抗率がオーダーとして $10^9 \cdot m$ を超える場合には帯電性が高まる⁷⁾。Table 1によれば、フィルタの抵抗率はこの基準値前後であると判断できるので、粉体の抵抗率によってその帯電電荷密度は影響を受けることが予想される。このような観点から実験結果をみれば、アイロン面を捕集面とした場合(Fig. 9)では粉体の抵抗率と帯電電荷密度(絶対値)の間に相関関係が認められるが、起毛面の場合(Fig. 8)には、相関がなかった。これは、前者では表面が均一に圧縮され滑らかであるためにTable 1の抵抗率をその値に従って評価してよいが、後者では一本一本の繊維に粉体が付着するので、繊維自体の抵抗率を考慮しなければならぬためと考えられる。データ集⁸⁾によれば、ポリエステル⁹⁾の体積抵抗率は $10^{12} \cdot m$ と高いので接触相手の抵抗率に関係なく帯電性がある。一方、帯電性に与えるもう一つの要因として、物体の表面の仕事関数によって決まる帯電列を考慮しなければならないが、本研究では金属粉体の酸化膜や不純物の存在等不確定な要素が多いこと、並びに測定機器の特性により詳細なデータを得ることができなかつたので、考察の対象からは外した。ただし、例えば、PE-Wについては抵抗率が大きいにもかかわらず比較的小さな帯電量を示していることから、フィルタの帯電列と近い関係にあると予想される。

3.2 粉体の脱着性と帯電量の関係

Fig. 8において、標準型フィルタで比較すると、帯

電電荷密度が $\pm 20 \sim 90 \mu C/kg$ 程度と大きい「高帯電グループ」(AL-W, AL-A, PMMA及びPE)と $\pm 5 \sim 20 \mu C/kg$ 程度と小さい「低帯電グループ」(AL-P2, PS-BW, PE-W及びPS-W)に区分することができる。電荷密度が異なる要因として、粉体のフィルタからの脱着性に着目した。即ち、高帯電グループに属する粉体は比較的大きなメディアン粒径と角の取れた丸い形状(AL-Wは角張った形状であるが粒径は最も大きい)を有しており、起毛面に付着しても、逆洗等の物理的衝撃によって簡単に払い落とすことができる。一方、低帯電グループに属する粉体は、いずれも形状が不規則かつ粒径が小さく起毛面に付着ししやすい性質を持つ。脱着性の違いを、二種類のアルミニウム粉AL-A及びAL-P2をほぼ同量(14g)を標準型フィルタに付着させて連続4回の逆洗(0.7MPa, 1s)を行い比較したところ、AL-Aでは各回毎に50%, 3.7%, 1.2%, 0.7%が剥離するが、AL-P2では30%, 6.3%, 3.6%, 2.4%であった。AL-Aは角の取れた丸い形状かつ大きな粒径であるので剥離しやすく、一方、AL-P2は角張った形状かつ小さな粒径であるので剥離しにくかつた。このように高帯電グループでは、繊維と粉体の界面での接触と分離が効率よく行われるので発生電荷量は大きい。低帯電グループでは、剥離されるのは主として付着した粉体層の外側にあつて繊維と直接接触しにくい位置のものであるので、発生電荷量が小さくなるものと推定される。なお、アイロン面は表面が滑らかであるため、粉体の種類に関係なく1回目の逆洗でフィルタに付着していた粉じんはほとんどが剥離した。つまり、脱着性に大差がないので、Fig. 9のように抵抗率または帯電列に影響を受ける結果となつたと考えられる。

3.3 帯電防止型フィルタによる粉体の除電特性

Fig. 8において、同じ粉体同士で比較すると、一部例外はあるが、標準型の方が帯電防止型(混合型及び縞型)よりも剥離時の電荷密度が大きい。また、混合型よりも縞型の電荷密度が大きいという傾向が見られる。この点を更に明確にするために、PEを対象に、逆洗圧力を変化させて電荷密度を測定したところ、Fig. 10に示すように、標準型及び縞型では逆洗圧力が大きくなるにつれて電荷密度も増加したが、混合型では逆に小さくなつた。また、縞型は標準型よりも若干低い値であつた。元々、フィルタ素材としては同じものであり、導電性繊維が含まれていてもその捕集面の表面積に占める割合は小さいので帯電列の変化によるものとは考え難い。むしろ、導電性繊維で発生する微弱

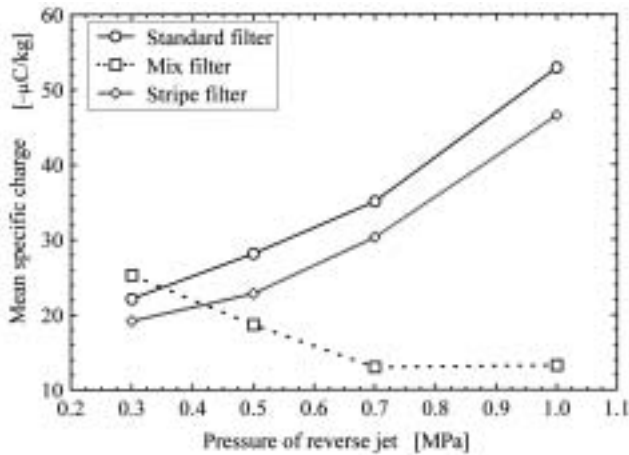


Fig. 10 Effect of reverse jet pressure on specific charge (PE)
逆洗圧力に対するPE粉体の電荷密度の変化

なコロナ放電によって生成されたイオンによる中和作用の結果と推測される。絶縁性生地に導電性繊維を織り込んだ場合の放電特性及び除電性能については過去に研究例があり⁸⁾、また、帯電防止型フレキシブルコンテナへの応用例でも粉体の内容物に対する除電効果が報告されている⁹⁾。本研究では、逆洗による粉体の剥離時にコロナ放電が発生するという直接的な根拠は得られなかったが、過去の報告並びに、Table 1 に示すように、混合型では特に起毛面において、高電圧(1,000V)印加時に表面及び体積抵抗率が顕著に低下することから、まばらに分布した導電性繊維からのコロナ放電によってフィルタが導通性を得ていると考えられること、また、リテーナを絶縁した状態で標準型では逆洗後に容易に5kV程度以上の電位に達したのでコロナ放電発生に必要な電位は得られること等の間接的根拠によって、コロナ放電による中和作用と考えられる。同じ帯電防止型の場合でも混合型と縞型ではかなり特性が異なっていたが、これは混合型では各導電性繊維がほぼ単独で存在するためにキャパシタンスが小さく、そのため小さな帯電量でも繊維近傍の電界が高くなり容易に放電を開始することができたためと考えられる。また、低帯電グループでは、各フィルタ間で帯電電荷密度に際だった変化はなかったが、これは、低い電荷量ではコロナ放電に必要な高電界の発生が望めないこと、並びに逆洗後も粉体が導電性繊維を覆い隠すように付着しているために、導電性繊維でのコロナ放電の発生を妨げていたためと推測される。

3.4 逆洗回数の影響

前述のように、新たな粉体の捕集がなければ、逆洗

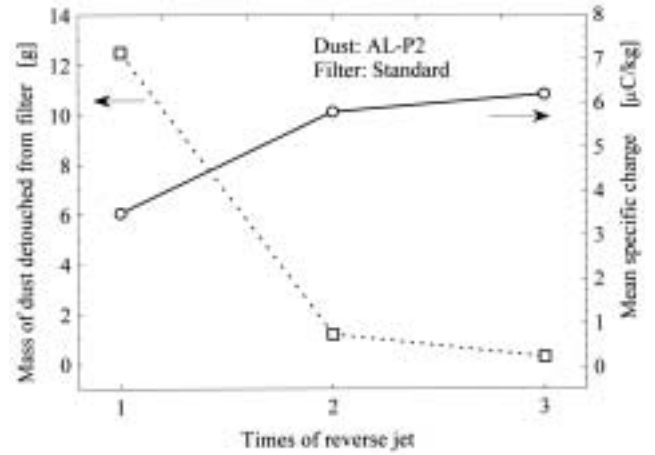


Fig. 11 Weight and specific charge of dust with respect to reverse jet cycle.
逆洗回数毎の剥離粉体の重量及び電荷密度の変化

回数が増えるたびに剥離する粉体の量は減少し、粉体の電荷密度は大きくなる傾向にある。例えば、AL-P2を例に挙げればFig. 11に示す如くである。この理由としては、初回の逆洗では繊維付近を含め比較的弱く付着している粉体が剥離するが、2回目以降は、フィルタ繊維により強く密着した粉体が剥離するので、剥離帯電する粉体粒子の割合が増加するためと考えられる。これは、払い落としを連続的に行う際に、フィルタに付着している粉体量が少ない状態で剥離を続けたときには、帯電量がより大きくなり、危険性が増すことがあることを示唆するものである。

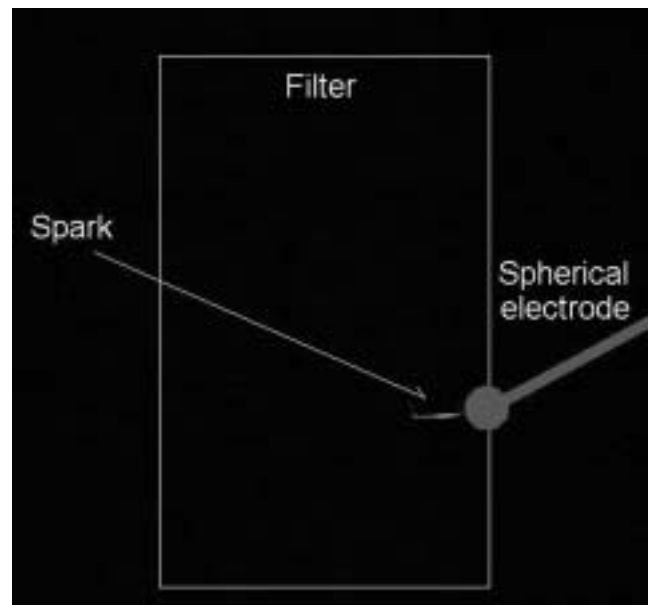


Fig. 12 A spark from charged stained bag-filter (AL-A, 16kV, 0.2 μC)
帯電したフィルタからの放電発光の例

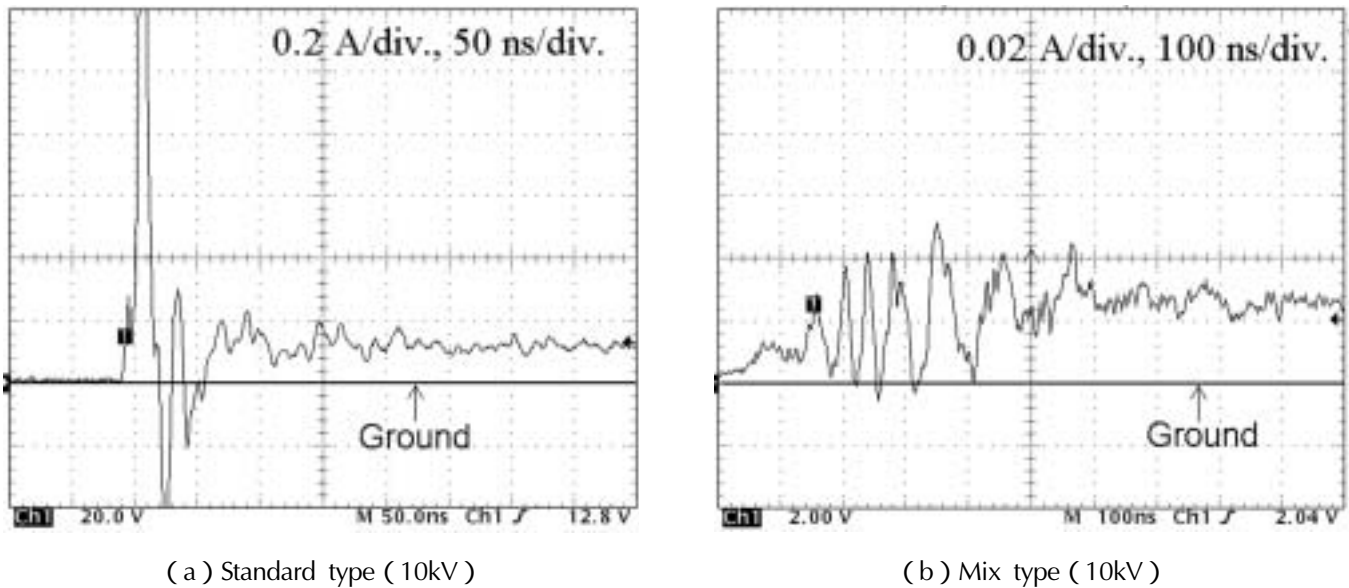


Fig. 13 Wave profile of discharge current from charged filter with aluminum dust.
アルミニウム粉を付着したフィルタからの放電電流波形 ((a) 標準型, (b) 混合型)

3.5 バグフィルタの放電危険性

Table 2 に示したようにアルミニウム粉の抵抗率は大きいですが、これは粒子の表面に絶縁性の酸化膜が形成されているためである（一般に金属粉じんは空气中で自然に酸化することが多い）。しかし、一般にこの絶縁膜は数ボルトの電位差で破壊されるので、粉体層に絶縁破壊を引き起こすほどの高電界が加われば急激に抵抗が低下する。したがって、金属粉じんが付着したフィルタは、接地不良であると、帯電した場合に絶縁された金属物体と同様に火花放電等の着火性放電を発生する可能性がある。この点を調べるため、新品フィルタ、及びアルミニウム粉 (AL-P2, AL-A) の払い落とし実験に使用し、表面に薄く粉体が残留している状態のフィルタをリテナから取り外してテフロン製治具で空間に保持して絶縁し、所定の電位に帯電させて放電実験を行った (Fig. 7)。

まず、新品フィルタの場合、絶縁抵抗計 (メガ、印加電圧1,000V、測定可能範囲 0 ~ 2 G) による抵抗測定では、標準型、混合型は無限大 (2 G 超) を示した。縞型のみ導電性繊維筋上ではいかなる二点間においても 0 (導通) を示した。これらを最高16kV に帯電させた場合、標準型、混合型ともに放電は発生しなかったが、縞型は導電性繊維筋に接地した球電極 (直径10mm) を接近させた場合に 3 kV以上では金属物体からのものと同等の火花放電を生じた。導電性繊維筋が一つの太い導線として作用したので、コロナ放電を経ずに火花に至ったものと考えられる。

次に、払い落とし実験に使用後のフィルタを用いた場合について述べる。AL-Aが付着したものの場合、抵抗は、標準型では無限大、混合型では 2 cm離れた 2 点間で平均約20M を示した。最大16kVまで帯電させたが、いずれのフィルタでも放電は発生しなかった。AL-Aは飛散しやすかったために、球電極が接近するとクーロン力によって粉体が電極に引きつけられて電極表面を覆い、同時にフィルタの電位が低下するという現象が生じた。このことが、放電に至らなかった理由と推定される。縞型については、導電性繊維筋上で前述と同様の放電が生じた。

最後に、AL-P2が付着したものの場合、抵抗は、標準型では無限大、混合型では 2 cm離れた 2 点間で平均約20M を示した。これはAL-Aの場合とほぼ同様であった。しかし、電極の接近によって粉体が飛散する現象はほとんど見られなかった。そして、8 kV以上に帯電させたところ、標準型、混合型ともに放電が認められた。標準型での放電発光例をFig. 12に示す。これらの放電電流波形はFig. 13(a)及び(b)に示すように、標準型では単発の大パルス後にほぼ一定の電流が流れたのに対し、混合型は複数の小パルスが連続しその後一定電流が持続した。これらの電流波形の違いの理由は現時点では明確ではないが、導電性繊維近傍のコロナ放電の影響があるものと考えられる。放電前後の電荷量をファラデーケージで測定したところ、放電によってほぼ全量の電荷が消失していた。金属と同等と仮定すると静電エネルギーは、例えば16kVのとき $0.2 \mu\text{C}$ であったので、 $1/2 QV$ を用いて計算すれば1.6mJとなる。金属粉じんに対しては、特に放電回路に数M の

抵抗が含まれてグロー放電状態となった場合には着火性が著しく高まることが指摘されており¹⁰⁾、これまでに災害事例として報告されているマグネシウム・アルミニウム合金粉じんについて実験した結果、1 M の抵抗が含まれる場合には3 mJ程度以下で着火することを確認している⁴⁾。したがって、本実験で観測された各種の放電についても、更に調査を要するが、現時点においては着火性があると認識すべきである。

4. 結言

高圧ガスによる逆洗によって粉体がバグフィルタから剥離する際の帯電現象、並びに金属粉じんを付着したバグフィルタの放電現象を実験的に調査し、以下の結果を得た。

- (1) フィルタのフェルト起毛面からの剥離時には、粉体は、その抵抗率とは相関のない帯電特性となり、形状が丸みを帯びているか、粗大なために剥離しやすい粉体ほど高い電荷密度となった。特に、アルミニウム粉 (AL-A) は標準型フィルタから剥離する際には約70 $\mu\text{C}/\text{kg}$ の電荷密度を示した。一方、アイロン処理によりフェルトが平滑な面から剥離する際には、抵抗率が大きいほど帯電量が増加する傾向があった。
- (2) 帯電防止型フィルタには、粉体に対して剥離時のコロナ放電の影響と考えられる除電作用が認められた。その作用は、導電性繊維を分散させたものの方が筋状に集めたものよりも顕著に大きかった。
- (3) 逆洗の回数が増えるにつれて、剥離する粉体の電荷密度が大きくなった。
- (4) 飛散しにくいアルミニウム粉じんが付着したフィルタは、絶縁状態で帯電すると着火性のある放電を発生することがあった。

謝辞

実験に当たり、崔光石 (現東京理科大学)、金子龍一 (現マツダ自動車株式会社) 両氏に多大の尽力をいただいた。また、多くの企業から実験用資材の提供を

いただいた。以上に対し、謝意を表する。また、本研究の一部は厚生労働科学研究補助金の支援を得て実施されたものである。

参考文献

- 1) 榎本兵治, 荷福正治, 出口衛, 山尾信一郎: 微粉炭用集じん機での火災の火源に関する一考察, 安全工学誌, Vol.26, pp.153-159 (1987)
- 2) 中込誠, 原達朗, 河口良広, 正木光男, 上田耕一郎: フィルタバグの静電気対策について, 静電気学会誌, Vol.13, pp.37-44 (1989)
- 3) 坂本浩: 粉体取扱い時の静電気障災害と対策, 静電気学会誌, Vol.10, pp.315-318 (1986)
- 4) 山隈瑞樹: 軽金属粉じん爆発災害の動向とケーススタディ, 2002年度第1回静電気学会研究会講演資料集, pp.15-24 (2002)
- 5) Matsuda T., Yamaguma M.: Tantalum dust deflagration in a bag filter dust-collecting device, J. of Hazardous Materials, A77, pp.33-42 (2000)
- 6) 労働省産業安全研究所: 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 (1999)
- 7) 労働省産業安全研究所: 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1 (1988)
- 8) Tabata Y.: Electrostatic properties of antistatic cloth woven partly with electrically conductive fibers, Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Conf., Vol. 21, pp.1370-1374 (1986)
- 9) Kodama T., Yamaguma M., Tabata Y., Kamachi S.: Safety evaluation of anti-static flexible intermediate bulk container having non-conductive inner bag., J. of Electrostatics, Vol. 40 & 41, pp.541-546 (1997)
- 10) 黒田英司: 東京大学博士論文 (反応性物質の静電気感度に関する研究), 東京大学 (1997)

(平成15年12月26日受理)