

論 文

バグフィルタでの粉じんの剥離帶電特性

山 限 瑞 樹*, 児 玉 勉*

(2003年9月11日受付; 2003年12月1日受理)

Electrostatic Properties of Dust Blown from Bag Filters

Mizuki YAMAGUMA*, Tsutomu KODAMA*

(Received September 11, 2003; Accepted December 1, 2003)

Electrostatic charges on dust detached from the surface of a bag filter were measured to investigate the mechanism of a dust explosion occurred in a dust collecting device due to electrostatic sparks. Both highly insulating polymeric dusts and intrinsically low-resistance aluminum dusts were greatly charged by the de-dusting process using high-pressure reverse jets. The specific charge of a dust was larger when it was more easily detached from a bag filter. Some antistatic bag filters containing conductive fibers effectively mitigated the electrification of dust particles probably through the neutralization process due to corona discharges. The resistivities of the aluminum dust decreased under high electric fields. It is possible that incendiary discharges could occur if significant amounts of dust remained on a bag filter that was electrically isolated.

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の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蒙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合金等の金属粉体を回収する集じん機に集中した⁴⁾。これらの粉体は極めて小さな放電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ると、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との関係で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。

2. 実験

2.1 装置及び方法

実験装置は、図1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。本集じん機は、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、図2に示す構造を有する円筒型の金属製リテーナ（保持筐体）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。

標準的な実験の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、集じん機のドアを開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、

キーワード: バグフィルタ、粉じん爆発、剥離帶電

* 独立行政法人産業安全研究所 物理工学安全研究

グループ (204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

Physical Engineering Safety Research Groupe / National Institute of Industrial Safety, 1-4-6 Umezono, Kiyose-shi, Tokyo 204-0024, Japan

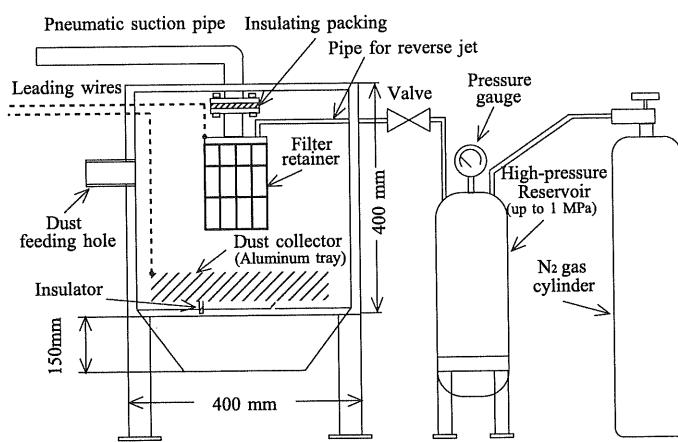


図1 実験装置

Fig.1 Experimental apparatus

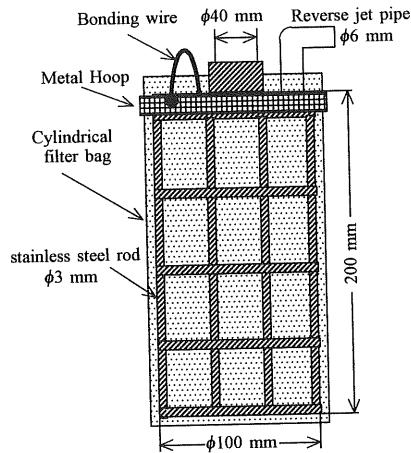


図2 バグフィルタ用リテーナの構造

Fig.2 Structure of filter retainer

表1 フィルタ材の抵抗率

Table 1 Resistivity of filter samples

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)	4.4×10^9 (10) 1.5×10^9 (1000)
	iron side	4.1×10^{12} (10) 1.1×10^{12} (1000)	4.5×10^9 (10) 1.3×10^9 (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)	6.9×10^9 (1) na* (5)
	iron side	3.3×10^{11} (10) 2.4×10^{11} (1000)	8.5×10^9 (1) na* (5)

*range over by excess current

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。

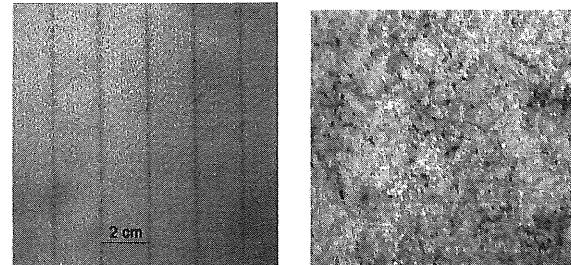


図3 帯電防止型フィルタの外観写真

((a) 純型, (b) 混合型)

Fig.3 Appearance of the anti-static filter cloths
(Photograph)

2.2 バグフィルタ試料

フィルタの材質は、厚さ 1 mm のポリエチレン不織布（商品名テトロン）1種類、並びにこれに導電性纖維（金属メッシュ纖維）を配合して帯電防止機能を持たせたもの2種類（纖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種類である。いずれも市販品である。帯電防止型素材の外観を図3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表1に示す。以後、これらのフィルタを、通常型（Standard type）、純型（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）だが、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

表2 実験に使用した粉体試料

Table 2 List of dust samples used in the experiments

Name of dust	Abbreviation	Apparent volume resistivity [Ωm]	Median particle diameter [μm]	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 processes., **: voltage used in the measurement.

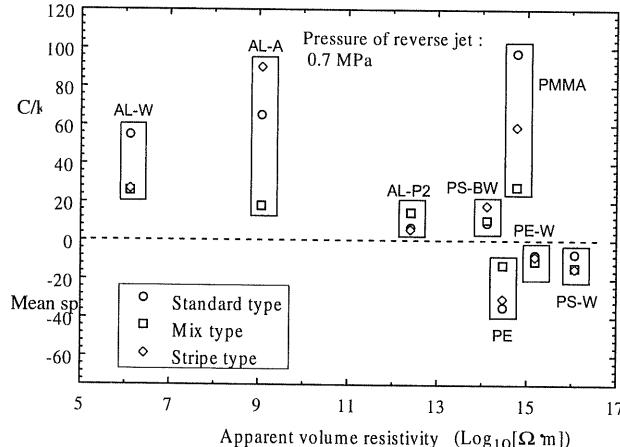


図4 逆洗により剥離した粉体の電荷密度（起毛面）
Fig.4 Specific charge of dusts by de-dusting (nap side)

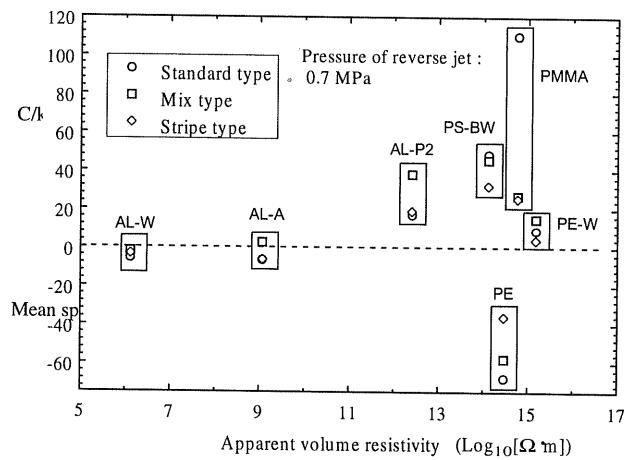


図5 逆洗により剥離した粉体の電荷密度（アイロン面）
Fig.5 Specific charge of dusts by de-dusting (iron side)

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、纖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場合を中心で実験を行った。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）、メティアン粒径、形状）を表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、それ以外のもの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。

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フィルタを電気的に絶縁し、これをコロナ放電裝

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

0.7 MPa 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図4 及び5 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 0.1~10 g 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ったので、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 $10^9 \Omega \text{m}$ を超える場合には帯電性が高まる⁷⁾。表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帶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（図5）では粉体の抵抗率と帶電電荷密度（絶対値）の間に相関関係が認められるが、起毛面の場合（図4）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表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纖維に粉体が付着するので、纖維自体の抵抗率を考慮しなければならないためと考えられる。データ集⁶⁾によれば、ポリエステルの体積抵抗率は $10^{12} \Omega \cdot m$ と高いので摩擦相手の抵抗率に関係なく帶電性がある。一方、帶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帶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、並びに測定機器の不備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帶電量を示していることから、フィルタと帶電列が近い関係にあると予想される。

3.2 粉体の脱着性と帶電量の関係

図4において、標準型フィルタで比較すると、帶電電荷密度が $\geq 20 \sim 90 \mu C/kg$ 程度と大きい「高帶電グループ」（AL-W, AL-A, PMMA 及び PE）と $\leq 5 \sim 20 \mu C/kg$ 程度と小さい「低帶電グループ」（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、高帶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丸い形状（AL-Wは不規則な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、低帶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（14 g）を標準型フィルタに付着させて連続4回の逆洗（0.7 MPa, 1 s）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 は不規則な形状かつ小さな粒径であるので剥離しにくかった。このように高帶電グループでは、纖維と粉体の界面での接触と分離が高頻度で行われるので発生電荷量は大きいが、低帶電グループでは、剥離されるのは主として粉体層の外側にあり、纖

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、脱着性が等しいので、図5のように抵抗率または帶電列に影響を受ける結果となったと考えられる。

3.3 帯電防止型フィルタによる粉体の除電特性

図4において、同じ粉体同士で比較すると、一部例外はあるが、標準型の方が帶電防止型（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、図6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った。元々、フィルタ素材としては同じものであり、導電性纖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帶電列の変化によるものとは考え難い。むしろ、導電性纖維で発生する微弱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纖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、帶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証拠は得られなかつたが、過去の報告並びに、表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纖維がコロナ放電によって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証拠によって、コロナ放電による中和作用と考えられる。同じ帶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つていたが、これは混合型では各導電性纖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、そのため小さな帶電量でも電位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、低帶電グループでは、各フィルタ間で帶電電荷密度に際だった変化はなかつたが、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纖維を覆い隠すように付着しているために、導電性纖維でのコロナ放電の発生を妨げ

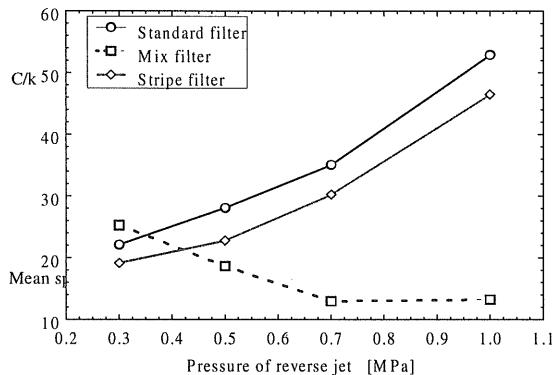


図 6 逆洗圧力に対する PE 粉体の電荷密度の変化
Fig.6 Effect of reverse jet pressure on specific charge (PE)

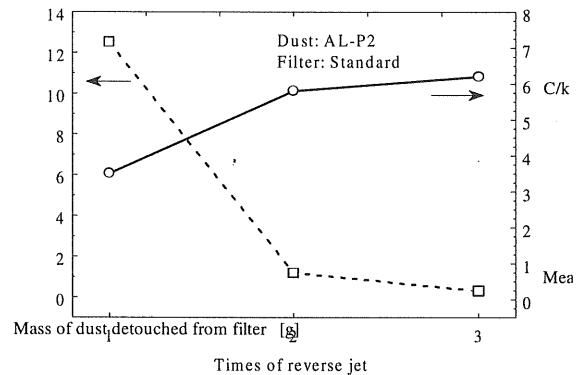
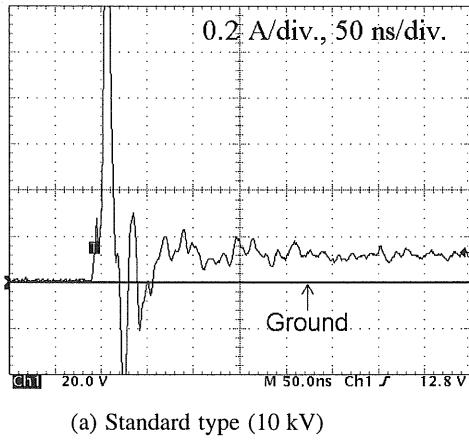
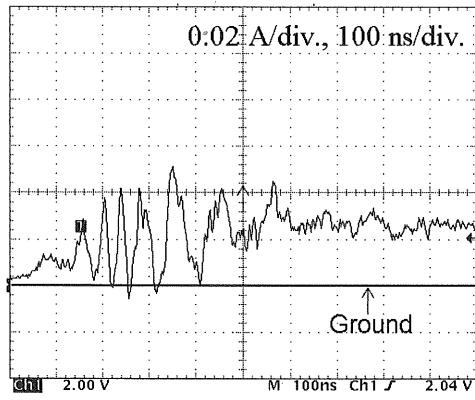


図 7 逆洗回数毎の剥離粉体の重量及び電荷密度の変化
Fig.7 Weight and specific charge of dust with respect to reverse-jet cycle



(a) Standard type (10 kV)



(b) Mix type (10 kV)

図 8 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)
Fig.8 Wave profile of discharge current from charged filter with aluminum dust

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 を例に挙げれば図 7 に示す如くである。この理由としては、初回の逆洗では纖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、フィルタ纖維により強く密着した粉体が剥離するので、摩擦帶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場合に、フィルタに付着している粉体量が少なくなったときには、帶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。

3.5 バグフィルタの放電危険性

表 2 に示したようにアルミニウム粉の抵抗率は大きいが、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気中で自然に酸化することが多い）。しかし、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。

まず、新品フィルタの場合、絶縁抵抗計（メガー、印加電圧 1,000V、測定可能範囲 0 ~ 2 GΩ）による抵抗測定では、標準型、混合型は無限大 (2 GΩ 超) を示した。縞型のみ導電性纖維筋上ではいかなる二点間においても 0 Ω (導通) を示した。これらを最高 16 kV に帯電させた場合、標準型、混合型とともに放電は発生しなかったが、縞型は導電性纖維筋に球電極（直径 10 mm）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。導電性纖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 $20 \text{ M}\Omega$ を示した。最大 16 kV 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。繊維型については、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 $20 \text{ M}\Omega$ 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。その波形は図 8(a) 及び(b) に示すように、標準型では単発の大パルスの後には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 16 kV のとき $0.2 \mu\text{C}$ であったので、 $1/2QV$ を用いて計算すれば 1.6 mJ となる。金属粉じんに対しては、特に放電回路に数 $\text{M}\Omega$ 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⁾、我々も災害事例のあるマグネシウム・アルミニウム合金粉じんについて実験した結果、 $1 \text{ M}\Omega$ 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約 $70 \mu\text{C/kg}$ 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、粉体の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つた。
- (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。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：安全工学誌, **26** (1987) 153
- 2) 中込誠、原達朗、河口良広、正木光男、上田耕一郎：静電気学会誌, **13** (1989) 37
- 3) 坂本浩：静電気学会誌, **10** (1986) 315
- 4) 山隈瑞樹：2002 年度第 1 回静電気学会研究会講演資料集, p.15, 静電気学会 (2002)
- 5) T. Matsuda, M. Yamaguma: J. of Hazardous Materials, **A77** (2000) 33
- 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), p.11, 産業安全研究所 (1999)
- 7) 労働省産業安全研究所：静電気安全指針(RIIS-TR-87-1, 産業安全技術協会 (1988)
- 8) Y. Tabata: Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Conf., **21** (1986) 1370
- 9) T. Kodama, M. Yamaguma, Y. Tabata, S. Kamachi: J. of Electrostatics, **40 & 41**, (1997) 541
- 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)