

6. フレキシブルコンテナの静電気帯電測定*

児玉 勉**, 山隈瑞樹**, 蒲池正之介***

6. Measurement of Electrostatic Properties of Flexible Intermediate Bulk Containers*

by Tsutomu KODAMA**, Mizuki YAMAGUMA** and Shonosuke KAMACHI***

Abstract : Because of their reasonable price and usefulness, flexible intermediate bulk containers (FIBCs) are commonly used in industry for handling bulky stuffs such as powders and pellets. They, however, often cause serious accidents such as fire and explosion due to the electrostatic discharges during emptying process. In order to collect scientific data for future regulations or standards for anti-static FIBCs, an intensive research on the electrostatic properties of FIBCs using a life-size apparatus was carried out. The noticeable results obtained from the experiments are as follows :

(1) An antistatic FIBC made of rubberized or plasticized textile, which are dominantly used in Japan, if not electrically grounded, generated so much electric charge on its body that it was possible to bring about an energetic discharge incendiary even to a dust cloud. When it was properly grounded, the content was given more electric charge than when it was not grounded.

(2) Another type of antistatic FIBC, which is made up of insulating plastic textile with thin conductive threads, sufficiently reduced static electricity on both the container body and the content when it was grounded. This was probably because of the ions produced by the feeble corona discharges occurring along the conductive threads during emptying process.

Keywords ; Dust explosion, Flexible intermediate bulk container (FIBC), Electrostatic discharge

1. 緒 言

フレキシブルコンテナバッグ (以下, フレコン) は廉価でかつ取り扱いが容易であるため, 粉体, ペレット等不定形原材料の大量保管・輸送に用いられている。目的地の化学工場等へ搬入された後は, 内容物を直接フレコンから反応容器等へ移し替える操作を労働者が手作業で行うことが多い。このとき内容物とフレコン内側が強く摩擦して静電気が発生し, 労働者が電撃を受けたり, 周囲の電氣的条件によってはエネルギーの大きな静電気放電を誘発し, 付近の爆発性混合気に着火して爆発・火災を引き起こすこともある¹⁾。このよ

うな静電気対策として帯電防止機能を有するフレコンが開発・市販されているが, 性能が不十分であったり, エンドユーザーが使用方法を誤ったためにかえって着火性放電を引き起こしたと推定される災害事例²⁾も見受けられる。

フレコンに関わるこのような問題は従前より国内外で指摘され, 帯電防止品に関する国際規格を制定しようという動きはあるものの, 現時点では各国の意見の調整がつかずに合意には至っていないのみならず, 日本国内においても何ら規制・規格がない状況にある。この要因のひとつとして科学的データの不足が挙げられる。フレコンの安全性評価に関する海外の既往研

*平成 8 年10月28日, 第20回静電気学会全国大会において一部発表。

**物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

***社団法人産業安全技術協会 Technology Institution of Industrial Safety

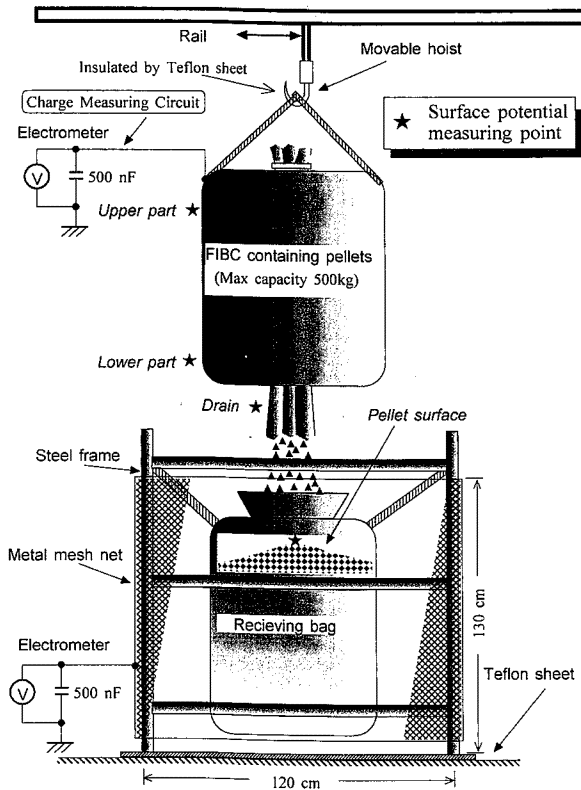


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for emptying an FIBC.
フレコン排出実験装置の構成

究³⁻⁴⁾は多いが、例えば日本で一般的である導電性素材を使用したランニング型フレコン*の性能評価や帯電防止品と内袋の併用時の安全評価がない等必ずしも十分とはいえない。この種労働災害が少なからず発生している現状に鑑み、公的規制及び規格の制定は焦眉の急であると考えられることから、将来の規格等整備に向けての根拠とするために、著者らは国内外で市販されているフレコン（帯電防止品を含む）及び関連用品を入手し、使用条件と静電気帯電の関係を実験的に調査し、性能評価を試みることにした。その結果、安全上極めて重要な数々の知見が得られたので以下に詳細を報告する。

2. 実験装置及び方法

本研究においては、労働災害の実情に即し、主としてフレコンの内容物を排出する工程における静電気特性を調査対象とすることとした。また、安全上の配慮から、内容物として微粉体ではなく爆発の危険性のない平均粒径約 3 mm のポリプロピレンペレット（以下、ペレット）を使用した。

*フレコンは耐久性により、何度も使用可能なランニング型と原則一回限りのワンウェイ型に分類される。

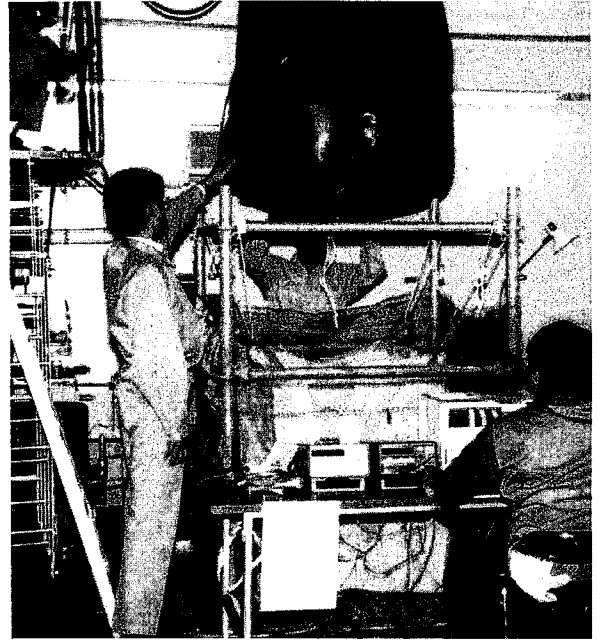


Fig. 2 A typical scene of experiment.
フレコン排出実験の様相

実験装置を Fig. 1 に示す。排出実験用のフレコンには、約 500 kg のペレットを充填し、ホイストにより吊り上げた。排出されたペレットを受け止めるために、スチールパイプで立方体に組み上げたフレーム内に別のフレコンを配置した。ペレットの帯電電荷を測定するために、同フレームの脚部をテフロンシートで絶縁し、かつ、真鍮製のメッシュネットで周囲を包み込んでファラデーケージとしても機能するようにした。

表面電位の測定には振動容量型携帯表面電位計を用い、フレコン本体の上部、下部及び排出口並びに排出完了後のペレット表面（図中★印の場所）の電位を測定した。フレコンは内容物の量的変化とともに変形するので、Fig. 2 に示すように実験担当者が電位計を手に持ち、被測定部位との間隔を一定に保つよう心がけた。排出開始直後から完了までの各位置での電位変化はペンレコーダで記録した。

本実験で使用したフレコンの種類、材質及び電気的特性等を Table 1 に示す。同表中の摩擦帯電特性 (Tribo-charge density) は、静電気用品構造基準の帯電防止織編物・不織布の性能評価試験方法⁵⁾に準拠して測定したものである。

実験対象フレコンとして、国産の絶縁織布製品 2 種 (略称 IT (A) 及び IT (B)。以下同様。)、導電性ゴム引き製品 1 種 (CR)、導電性樹脂ラミネート製品 1 種 (CP) および絶縁性ゴム引き製品 1 種 (IR)、並

Table 1 List of FIBCs and inner bags used in experiment.
実験に使用したフレコンと内袋の特徴

Type of FIBC	Abbreviation	Base material	Shape/ Use	Thick- ness [mm]	Electrical properties				Remarks
					Resistivity		Tribo-charge density [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]		
					Volume [$\Omega \cdot \text{m}$]	Surface [Ω]	with Nylon	with Acrylic	
Conducting rubberized textile	CR	PVC Polyester- tarpaulin	cylinder/ running	0.75	8.5×10^6	1.2×10^8	-1.1	-0.91	Carbon- black added
Conducting plasticized textile	CP	Polyethylene	cylinder/ one-way	0.65	7.1×10^6	2.8×10^6	-0.86	-0.52	Carbon- black added
Conducting thread mixed textile (A)	CT (A)	Polypropylene	square/ one-way	0.40	5.5×10^{10}	4.4×10^{13}	-1.1	0.42	Stripe threads
Conducting thread mixed textile (B)	CT (B)	Polypropylene	square/ one-way	0.50	1.7×10^{12}	4.0×10^{12}	-1.8	-2.1	Cross threads
Insulating textile (A)	IT (A)	Polypropylene	square/ one-way	0.65	1.2×10^{15}	5.6×10^{14}	-1.8	-2.7	
Insulating textile (B)	IT (B)	Polypropylene	square/ one-way	NM	NM	NM	NM	NM	
Insulating rubberized textile	IR	PVC Polyester- tarpaulin	cylinder/ running	NM	NM	NM	NM	NM	
Inner bag (A)	IB (A)	Polyethylene	square	0.10	2.0×10^{16}	3.2×10^{14}	-0.79	-5.0	Insulating
Inner bag (B)	IB (B)	Polyethylene	square	0.07	2.0×10^{15}	2.0×10^{13}	0.40	0.29	Anti-static

*NM : not measured

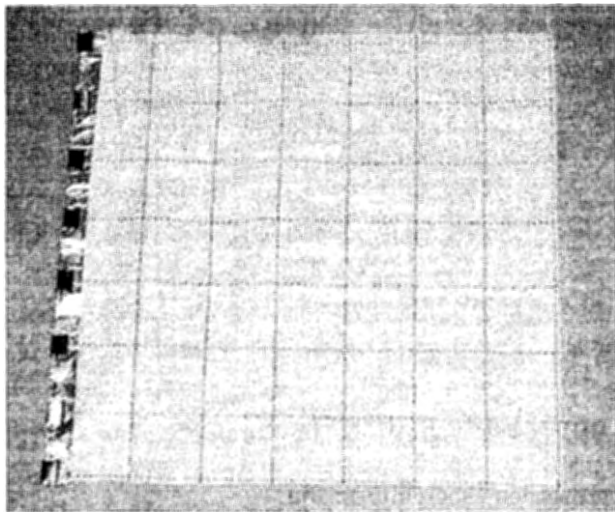


Fig. 3 Appearance of CT (B) type FIBC fabric.
CT (B) 型フレコン生地の外観

びにドイツ製の導電性繊維混織製品2種（導電性繊維がストライプ状に配置されている物 (CT (A)) 及び格子状に配置されている物 (CT (B))) を選択した*。

*欧米ではこのような方式の帯電防止品が主流である。

参考のために CT (B) の生地の外観を Fig. 3 に示す。また、現場での使用形態を考慮して、ポリエチレン製内袋2種 (IB (A) 及び IB (B)) を適宜併用した。さらに、1 回限りであるが、試験的に、両極性電圧印加式除電器を排出口付近に設置し、排出中のペレットの除電を試みた。有効な実験回数は 14 回であり、実験番号及び実験条件は Table 2 左カラムに示すとおりである。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレコンとペレットの帯電特性

本実験で得られた表面電位及び電荷量の値を Table 2 にまとめた。これらデータをもとにフレコン上部の最大帯電電位とペレットの電荷量の関係を整理したものが Fig. 4 である。この図をもとに、帯電特性により以下の4つのグループに分類を試みた。

(1) フレコン本体、ペレットともに帯電量が小さいグループ (Fig. 4 の左下の枠内)

すべて導電性繊維混織製品を用いた場合であり、接

Table 2 Surface potential and charge amount obtained by experiment.
実験で得られた各部の電位とペレットの電荷量

Trial No.	Type of FIBC and innerbag	Grounding	Emptying time [s]	Surface potential [kV]										Charge of pellet	
				Upper part			Lower part			Drain			Pellet	Total	per kg
				Init.	Max.	Final	Init.	Max.	Final	Init.	Max.	Final	Final	[μ C]	[nC]
1	IT(A)+IB(A)	No	5.6	-10	-52	-38	-2	-20	-18	-0.5	-35	-16	34	13	26
2	CR	No	7.5	0	-53	-37	0	-50	-30	0	-42	-25	15	3.8	7.6
3	CT(A)	No	12	0	-12	-11	0	-9	-8	0	-8.5	-7.5	3.3	3.2	6.4
4	IT(A)+IB(B)	No	5.1	-2	-64	-37	-0.5	-35	-30	0	-32	-17	66	13	26
5	CT(A)	Yes	12	0	-1	-0.6	0	0	0	0	-0.3	0	12	7.1	14
6	CR	Yes	6.3	0	0	0	0	0	0	0	1.5	1.2	45	16	32
7	IT(B)+IB(A)	No	30	5.8	-55	-52	16	-23	-20	4.7	-50	-39	38	13	26
8	CP	Yes	4.9	0	-0.1	0	0	2	0	0.2	1.8	0.7	61	17	34
9	CT(A)+IB(A)	Yes	24	0	-1.2	-5	0	-4	4	-1	5	4	53	8.9	18
10	CT(B)+IB(A)	Yes	3.1	0	0	0	0	-5	-4	-0.4	7.9	-0.2	53	5.5	11
11	IR	No	2.7	-0.3	-52	-38	-0.1	-28	-28	ng**	-62	-23	63	12	24
12	IT(A)+IB(B)+ST*	No	5.5	0	-52	-41	ng**	ng**	-16	ng**	ng**	-16	56	5.5	11
13	IR	No	27	-0.7	-52	-32	-0.5	-36	-16	ng**	-37	-11	25	16	32
14	IR	No	52	-0.8	-53	-52	-0.5	-42	-42	ng**	ng**	-52	30	14	28

ST* : Static eliminator, ng** : failed or unable to measure

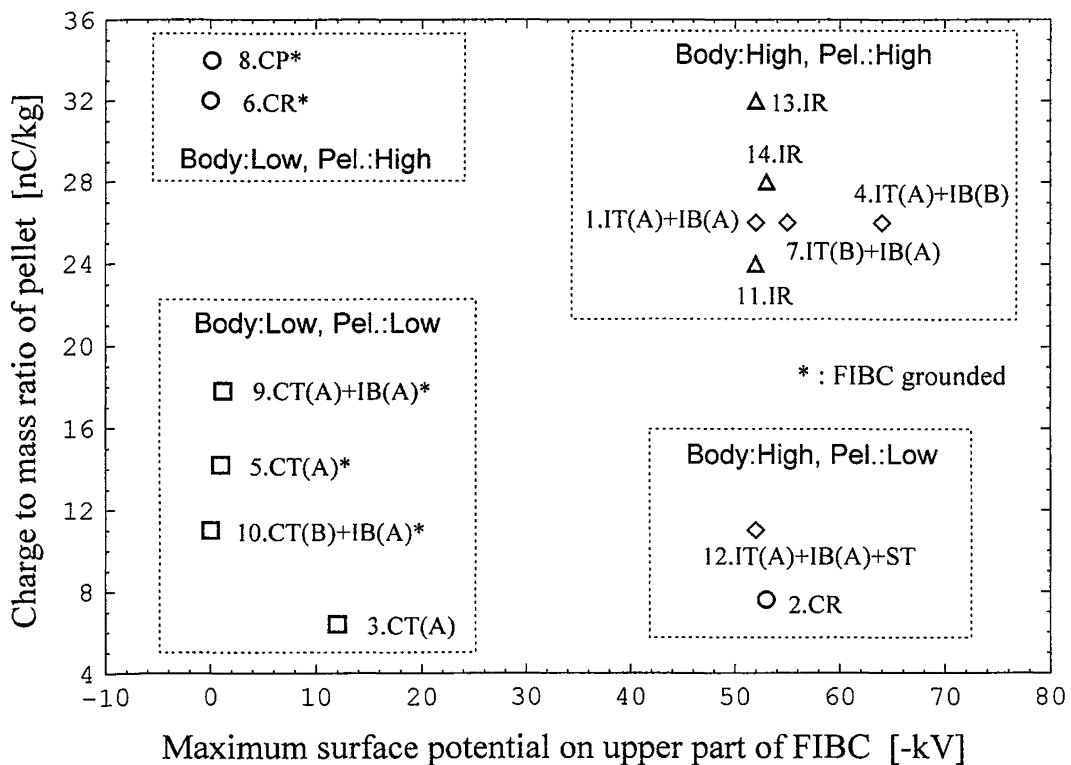


Fig. 4 Categorization of electrostatic properties according to the FIBC potentials and pellet charges.
フレコンの帯電電位とペレットの電荷による静電気特性の分類

地を行っている場合には本体の帯電電位はほぼゼロである。接地を行っていない場合でも、他の非帯電防止品と比較して低レベルの帯電に抑えられている。導電性繊維混織製品におけるこのような特性は、導電性繊維からの微弱なコロナ放電による中和作用が効果的に

作用しているためと考えられる⁹⁾。非接地での使用でも比較的低い電位であるとはいえ、10 kV を超えるレベルであるので⁷⁾、少なくとも可燃性ガス・蒸気の雰囲気下でこのような使用方法を採用すべきではない。実験番号 5 及び 9 を比較する限りでは、内袋はコロナ

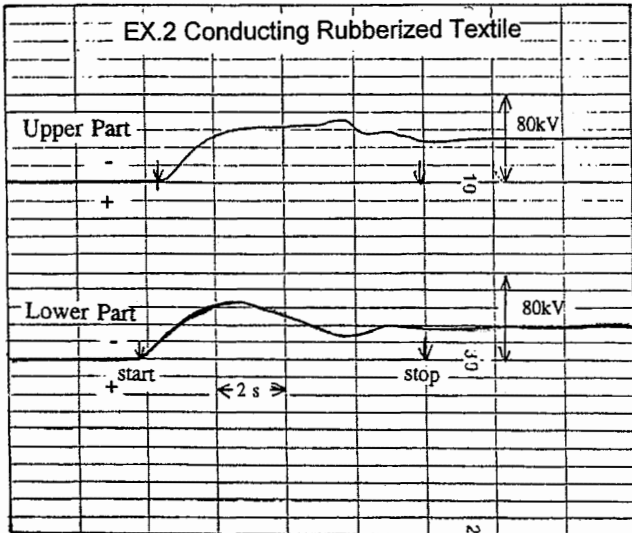


Fig. 5 Typical potential change pattern for an isolated conducting FIBC during emptying.
粉体排出中の非接地導電性フレコンの電位変化

放電の効果を若干抑制するようである。内袋の内側（粉体側）でのイオン生成が減少したことが原因と考えられる。

(2) フレコン本体は帯電小、ペレットは帯電大のグループ (Fig. 4 の左上の枠内)

導電性ゴム引き製品および導電性樹脂ラミネート製品を接地して使用した場合である。接地しているので本体の電位は常時ゼロ付近に保たれるが、内容物の帯電を防止することはできない。これは、前述の導電性繊維混織製品のような中和機構がないためと考えられる。言い換えれば、この種のフレコンの使用にあたっては、内容物の種類によっては内容物自体は除電されないことを念頭に置いて使用すべきである。

(3) フレコン本体は帯電大、ペレットは帯電小のグループ (Fig. 4 の右下の枠内)

絶縁性織布製フレコン（内袋使用）に除電器を使用した場合及び導電性ゴム引き製フレコンを非接地で使用した場合である。前者については、除電器による中和作用の効果と考えられる。また、後者については、フレコンの電位が上昇するにつれて、フレコン側の帯電極性に影響されてペレットの発生電荷量が減少するためと考えられる。この場合、特に注意すべきことは、導電性ゴム引き製品の場合、放電時に瞬時に大半の電荷が放出されるので放電エネルギーが非常に大きくなり得る点である。例えば、今回使用したフレコン本体の静電容量は約 200 pF であるので、帯電電位を 50 kV とすると、最大 250 mJ の放電エネルギーとなる

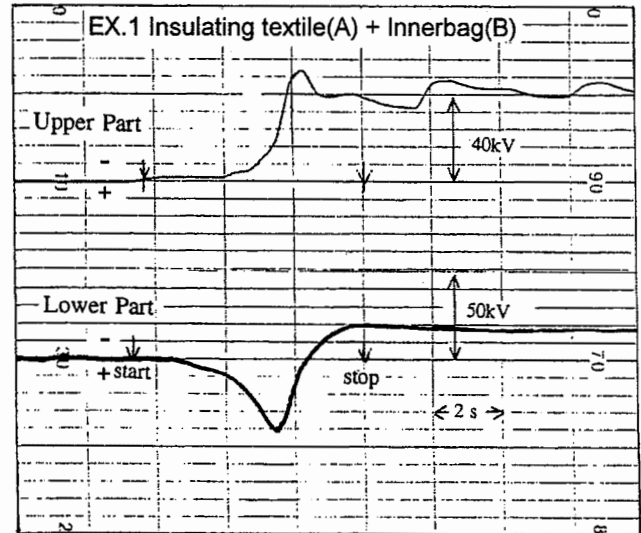


Fig. 6 Typical potential change pattern for an insulating FIBC during emptying.
粉体排出中の絶縁性フレコンの電位変化

可能性があり*、これは可燃性蒸気・ガスのみならず、プラスチックや穀物等の可燃性粉じんに着火するに十分な大きさである。

(4) フレコン本体、ペレットともに帯電量大きいグループ (Fig. 4 の右上の枠内)

絶縁性のフレコン（ゴム引き製品、織布製品とも）を用いた場合である。帯電を防止または制限する機構が全くないので大きな静電気を発生する。フレコン本体からの着火性ブラシ放電はもちろん、作業等者の非接地導体への静電誘導があれば火花放電を誘発する可能性が高い。当然、可燃性雰囲気の下で使用することはできない。

3.2 排出速度が帯電量に与える影響

絶縁ゴム引きフレコンを用いて排出速度を 2.7, 27 及び 52 sec と変化したときの結果（実験番号 11, 13 及び 14）からは、排出速度がフレコン本体及びペレットの帯電量に大きな影響を及ぼすとはいえない。さらに他の実験において、排出速度の比較的大きいものと小さいものを比較しても帯電レベルに大きな差は認められない。データ数が限られているので断定はできないが、帯電量はフレコン内壁とペレットの接触距離によってほぼ決定されるものと推定される。このことは、排出速度の調節によって帯電防止をすることは不可能であることを示唆している。

*実際にはフレコン生地に抵抗があるので放電エネルギーは若干減少すると考えられる。

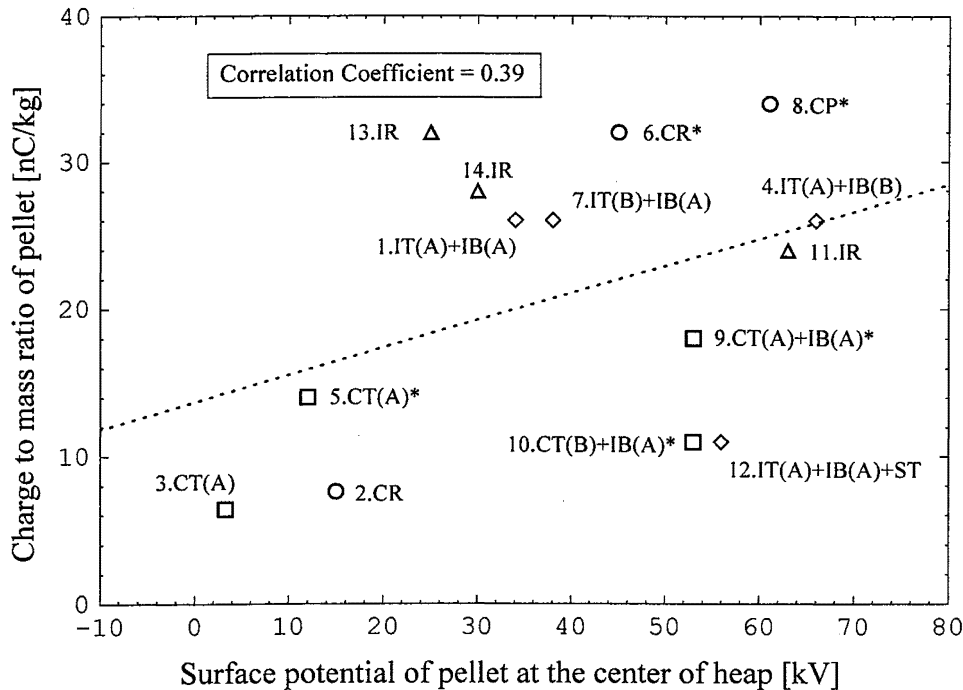


Fig. 7 Correlation between pellet charges and surface potentials at the center of the heap.

ペレットの比電荷と受入れ FIBC 内ペレット中央の表面電位の相関関係

3.3 フレコン本体の位置と電位変化

フレコン本体の表面電位が大きくなったグループについて、これらの表面電位の時間変化チャートから、次のように、素材の違いによってフレコン上部と下部の電位変化に違いが見られることが分かった。

(1) 上部、下部ともにほぼ同じ電位変化をするもの
導電性ゴム引き製品を非接地で使用した場合（実験番号 2）であり、Fig. 5 に示すように上下ともにほぼ同じ曲線を描いた。これは、本体が導電性であるため、電位差が発生しても直ちに電荷が移動して電位を均一に保つためと考えられる。

(2) 上部、下部で異なった電位変化をするもの
絶縁性織布、絶縁性ゴム引き製にほぼ共通して見られる電位変化であり、典型的には Fig. 6 に示すように、フレコン下部では、排出直後正極性を示した後、しばらくして負極性に転じる。また、フレコン上部では、このような極性変化は生じない。これは、フレコン下部では排出直後には、内壁の電荷密度よりも、落下してくるペレットの電荷密度の方が大きいのでペレットと同じ極性の電位が観測されるが、摩擦が増加するにつれて内壁の電荷密度は大きくなり、一方、ペレットの量は徐々に少なくなるので、やがて極性が転じるものと考えられる。このグループについては、さらに、上部、下部及び排出口での電位の大きさを比較

すると、概して、上部が最も高く、下部、排出口の順に下がっていく。この原因については、静電容量の差、内壁・ペレット間の電界による電荷分離の制限、微小なペレットの付着等が考えられるが確認はできていない。いずれにせよ、電位測定結果を評価する場合には、どの位置で測定されたものであるかを考慮する必要がある。

3.4 内袋の影響

実際の作業工程、特に医薬品及び食品の製造工程においては内容物の汚染を防止するため薄いポリエチレン製の内袋をフレコン内側に入れて使用することが多い。今回の実験に限っては、導電性繊維混織製フレコンと内袋の併用は、フレコンを接地する限り、安全上特に問題となることはないと考えられる。ただし、内袋そのものがどの程度帯電するか、及び放電の可能性については不明であるので、今後更に究明すべきと考えられる。少なくとも現時点では、可燃性ガス蒸気が存在する場合には絶縁性内袋を使用せず、また粒径が数 10 mm 以下の粉体を取り扱う場合には沿面放電の発生を防止するために内袋材料の絶縁破壊電圧が 4 kV 以下のものを使用すべきである³⁾。

3.5 除電器の効果

両極性イオンを発生する電圧印加式除電器を用いて

排出中のペレットの除電を試みた（実験番号 12）ところ、若干の効果が認められた。したがって、内容物の除電が必要な場合には、このような除電器の使用も考慮されるべきであるが、除電器自体が着火源とならないよう注意深く選定及び設置すべきである。

3.6 ペレットの発生電荷量と表面電位の関係

一般的には電荷量が大きければ表面電位も高くなると予想されるが、今回の実験では、Fig. 7 に示すように、ペレットの電荷量と受入れ FIBC 内のペレット中央部分で測定した表面電位との間には大きな相関関係はなかった（相関係数 0.39）。これは、ペレットの電荷分布が一様ではないことを示唆するものであり、特定位置での表面電位の観測や、部分的なサンプリングのみでは全体の帯電量を誤評価するおそれがある。

4. 結 言

市販されている 7 種類のフレコンおよび 2 種類のポリエチレン製内袋を用いて、ポリプロピレンペレットの排出実験を実施したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 導電性繊維混織フレコンは、接地を行っている限り、本体、ペレットともに帯電を防止できる。一方、国内で主流となっている導電性ゴム引きおよび樹脂ラミネートフレコンは、接地すればフレコン本体の帯電は防止できるが、内容物を帯電防止することはできず、帯電量もしばしば大きくなり得る。
- (2) 導電性ゴム引きおよび樹脂ラミネートフレコンを非接地で使用すると、未対策品と同様に大きく帯電する。更にこの場合、放電が発生するとそのエネルギーは可燃性ガス・蒸気及び一部の粉じんへ着火するほど大きくなり得るので、使用中は接地を確実に行う必要がある。一方、導電性繊維混織タイプは、万一接地が不十分であった場合でも、静電気の帯電をかなり抑制すること可能である。ただし、この場合でもフレコン本体の帯電電位は場所によっては 10 kV 以上になりうるため、安全なレベルとはいえない。
- (3) 導電性繊維混織フレコンに絶縁性内袋を使用した場合でも、フレコンを接地しておけば本体は安全である。また、内容物に関しても若干の除電効果が認められる。
- (4) 排出時間と帯電レベルに関しては、明確な相関関係は認められないので、排出速度の調節によって帯電をコントロールすることは現実的ではない。

- (5) 電圧印加式除電器により排出中の内容物を除電することは可能であるが、どのレベルまで低減することが可能かについては今後更に究明する必要がある。
- (6) 内容物がプラスチックのように導電率が低い場合には、発生電荷量と表面電位の間には明確な相関関係は得られない。平均電荷量は少なくても、部分的には高い電荷密度となっている可能性があるため注意が必要である。

謝 辞

実験に使用するためのフレコンの調達ならびに実験装置の準備および実行に際し、(株)三井サイテック・川合正光氏にはひとかたならず尽力いただいた。また、フレコン素材の電気的特性の測定に当たっては(社)産業安全技術協会・泉房男氏、及び実験装置の製作と測定に当たっては研究生の春日電機(株)・西村浩次郎氏のご協力を得た。その他、実験に当たり御協力いただいた各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば, L.G. Britton, Static Hazards Using Flexible Intermediate Bulk Containers for Powder Handling, Process Safety Prog., Vol.12, No.4, pp.240-250 (1993)
- 2) 例えば, 静電気学会編, 静電気ハンドブック, オーム社, pp.346-348 (1998)
- 3) B. Maurer, M. Glor, G. Lüttgens and L. Post, Hazards associated with propagating brush discharges on flexible intermediate bulk containers, compounds and coated materials, Inst. Phys. Conf. Ser. No.85: Electrostatics '87, pp.217-222 (1987)
- 4) M.A. Nelson, R.L. Rogers and B.P. Gilmartin, Antistatic Mechanisms Associated with FIBC Fabrics Containing Conductive Fibres, Journal of Electrostatics, Vol.30, pp.135-148 (1993)
- 5) 労働省産業安全研究所, 静電気用品構造基準, RIIS-TR-84-1, pp.8-13 (1984)
- 6) N. Wilson, The Electrostatic Spark Discharge Behaviour of Some Flexible Intermediate Bulk Containers, British Textile Technology Group (1989)
- 7) 労働省産業安全研究所, 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1, pp.51 (1987)

(平成 10 年 11 月 16 日受理)