

静電気災害防止フレキシブルコンテナの帯電特性

津田 信之^{*1}, 小篠 亮三^{*2}, 西川 信二郎^{*3}, 泉 房男^{**4}

(2011年9月12日受付; 2011年12月10日受理)

Chargeability of Protective Flexible Intermediate Bulk Containers (FIBC) from Static Electricity Hazards

Nobuyuki TSUDA,^{*1} Ryouzou OZASA,^{*2} Shinjiro NISHIKAWA^{*3} and Fusao IZUMI^{**4}

(Received September 12, 2011; Accepted December 10, 2011)

Flexible intermediate bulk containers (FIBCs) are widely used for the storage and transportation of powders. During filling or discharging of FIBCs, charges accumulated on the powders and FIBCs can lead to electrostatic discharges that occasionally resulted in ignitions and serious explosion accidents. At present, there are several types of FIBCs with measures against the static electricity to prevent such hazards. In this paper, we discuss the safe use of different types of FIBCs by measuring their chargeability in practically experiments.

1. はじめに

大量輸送に使用する容器であるフレキシブルコンテナ (以下, FIBC) は, 充填物である粉粒体の充填, 排出の際に静電気が発生・帯電し, 着火性放電によって爆発事故を起こす危険性がある. その対策として静電気災害防止フレキシブルコンテナ (以下, 静電気対策コンテナ) に対し, 国際規格 (IEC 61340-4-4) および JIS 規格 (JIS C 61340-4-4), さらに欧州規格 (CENELEC CLC/TR 50404) などが制定されており, 特に IEC, JIS 規格^{1,2)}では, ラベル表示で, “コンテナ操作中は, 1 m 以内の範囲にあるいかなる導体も接地すること.” という表示が帯電防止形 (Type C, D), 沿面放電防止形 (Type B) に必要となっている (Type の説明は 2.1 FIBC にて後述する). その理由として, 注記に “操作中のコンテナから 1 m 以内の範囲にある非接地導体は, コンテナからの静電誘導または, コロナ放電によって帯電することがある” と明記されている. すでに, 確立された規格記載の文ではあるが, 調べた限りにおいて “1 m 以内” の根拠となる論文を確認できないことから, 実際に Type C, D, B のコンテナすべてが同様に静電誘

導源やコロナ放電源となり 1 m 以内の範囲にある非接地導体が帯電するかを確認するため, 静電気対策コンテナの充填, 排出による帯電特性の測定 (一般的な FIBC の表面電位測定) および, 充填時の静電誘導もしくはコロナ放電により帯電する絶縁された導体の測定 (新たに考案した評価方法) を行ったので, その結果について報告する. さらに, Type C については, “コンテナ全体が導電性材料であるかまたは, 少なくとも相互に接続された導電性糸もしくはテープ (ストライプパターンでは 20 mm 以下, グリッドパターンでは 50 mm 以下の間隔で配置したもの) を持つものでなければならない.” という要求事項における構造の違いによる静電気対策コンテナの優位性の確認として, それぞれの材料に対して, 帯電した充填物の電界を閉じこめる性能 (以下, シールド性能) を測定する実験を行ったので, その結果についても報告する.

2. 試料

2.1 FIBC

参考までに静電気対策コンテナのタイプ別概要を表 1 に示す. なお, IEC, JIS 規格では Type A-Type D の名称を用いていないが, 規定された静電気対策コンテナが CENELEC のタイプ別の呼び方に相当する物であることから, 本論文では CENELEC³⁾の呼び方にならって使用した. 帯電を測定する実験に使用した静電気対策コンテナは Type C (全面導電性ゴム), Type C (導電性テープ: ストライプパターン 10 mm ピッチ), Type D, Type B (ラミネーション付), Type B (ラミネーション無し), を用いた. その概要を表 2 に示す.

2.2 充填物

充填物であるペレットは, Type C (全面導電性ゴム) を除

* シバタ工業株式会社 (674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

Shibata Industrial CO.,LTD. 1058, Nakao, Uozumi-cho, Akashi, Hyogo 674-0082, Japan

** 公益社団法人 産業安全技術協会 (350-1328 埼玉県狭山市 広瀬台 2-16-26)

Technology Institution of Industrial Safety (TIIS), 2-16-26 Hirose-dai, Sayama-shi, Saitama 350-1328, Japan

¹ Nobuyuki_Tsuda@sbt.co.jp

² Ryoza_Ozasa@sbt.co.jp

³ Shinjiro_Nishikawa@sbt.co.jp

⁴ izumi@ankyo.or.jp

表1 フレキシブルコンテナのタイプ概要

Table 1 Outline of different types of FIBCs.

Type of FIBCs	Necessary condition	Environment that can be used	Necessity of earth
Type A	Non-countermeasure against static Electricity	It is not possible to use it in a countermeasure against static electricity necessary district	No
Type B	Breakdown voltage ≤ 6 kV	$> \text{MIE}^* 3$ mJ	No
Type C	Resistance to groundable point $< 1 \times 10^8 \Omega$	$\geq \text{MIE}^* 0.14$ mJ	Yes
Type D	The ignition test pass Breakdown voltage ≤ 6 kV	$\geq \text{MIE}^* 0.14$ mJ	No

*Minimum ignition energy.

表2 実験に使用したフレキシブルコンテナ

Table 2 FIBCs used in the experiment.

Type of FIBCs	Material	Size (mm)	Spacing of conductive tapes	Rg* (Ω)
Type C (All conductive)	Rubber	$\phi 1100 \times H 1000$	—	$< 1 \times 10^8$
Type C (Conductive stripe tape)	Polypropylene	$\phi 1100 \times H 1060$	10 mm (Stripe)	$< 1 \times 10^8$
Type D	Polypropylene	W915 \times D 915 \times H 1020	—	—
Type B (with lamination)	Polypropylene	$\phi 1100 \times H 1060$	—	—
Type B (no lamination)	Polypropylene	$\phi 1100 \times H 1060$	—	—

*Resistance to groundable point.

表3 シールド性能実験に使用したフレキシブルコンテナの基布

Table 3 The base-cloths of FIBCs used in the experiment of shield performance.

Type of sample	Pitch of conductive tape (cm)						
	—	—	—	—	—	—	—
All conductive sample	—	—	—	—	—	—	—
Conductive one side sample	—	—	—	—	—	—	—
Conductive stripe tape sample	1.0	2.1	3.2	4.4	5.5	7.7	—
Conductive grid tape sample	—	—	—	4.4	5.5	7.7	9.9

く FIBC 本体素材であるポリプロピレン (PP) との帯電列を考慮してポリエチレン (PE) ペレットを用いた。その形状は直径 3.5 mm, 長さ 1.5 mm の円盤状で, 静電気安全指針⁴⁾に記載の体積抵抗率測定方法により $6 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 超過であった。

2.3 FIBC 主材料

シールド性能を測定する実験に使用した FIBC の原反は, 全体が導電性材料の試料として, 全面導電配合ゴム引布 (合成繊維の両面に導電性ゴム配合を厚み 0.25 mm でコーティングした物: 総厚約 0.8 mm) と片面導電配合ゴム引布 (合成繊維の片面に非導電性ゴム配合を厚み 0.25 mm でコーティングし, もう一方の面には導電性ゴム配合を厚み 0.25 mm でコーティングした物: 総厚約 0.8 mm) を用いた。導電性テープ (ストライプパターン) の試料として, ポリプロピレン (PP) 製一般クロスに導電性テープを 1.0, 2.1, 3.2, 4.4, 5.5, 7.7 cm ピッチで配置した原反を用いた。導電性テープ (グリッドパターン) の試料には, 導電性テープを 4.4, 5.5, 7.7, 9.9 cm ピッチに配置したストライプ

パターン原反を, 導電性テープが直交するよう 2 枚の原反を重ね, その導電性テープが相互に接続するようにして用いた。その概要を表 3 に示す。

3. 実験方法

3.1 帯電測定

静電気対策コンテナの帯電測定の方法として各 Type の FIBC に対し, 表面電位計による電位測定の実規模実験を行った。試験手順は次の通りとした。

3.1.1 充填時の表面電位測定

①実験用 FIBC を大地から絶縁するため, 樹脂製パレット 3 枚 (合計 45 cm 高さ) を重ね, その上にテフロンシートを敷いた上に固定する。②圧縮空気を用いた空気輸送で FIBC にペレットを充填した。このとき PVC ホース (クラレプラスチック (株), ループホース DS-3 65A) により, ペレットの質

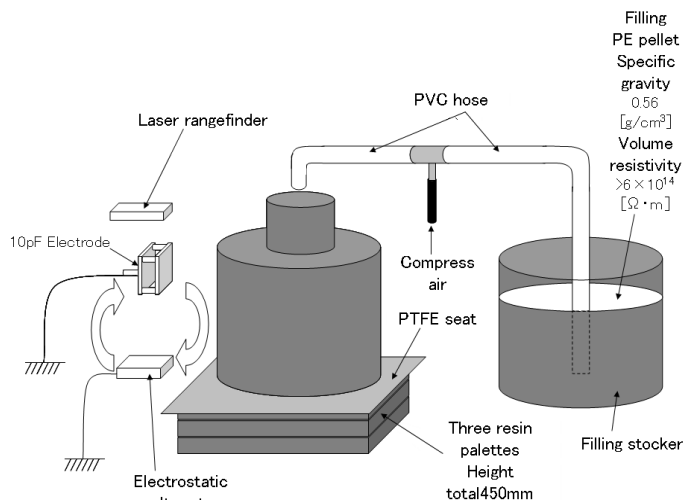


図1 充填時の表面電位測定及び 10 pF 電極の帯電測定概要
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

量比電荷は $4.46 \mu\text{C}/\text{kg}$ であった。③帯電した充填物の充填量が 25, 50, 75, 100% (= 500 kg) 時に FIBC の表面電位を測定する。なお、表面電位計と試験袋との距離を非接触型レーザー距離計で測定し、補正をかけて測定値を求める。測定時の概要を図 1 に示す。

3.1.2 排出時の表面電位測定

①実験用 FIBC に表面電位計を、取付け用アクリル製枠組みに、予想帯電電位から測定距離を変えて固定する。②充填後の静置による時間緩和を想定し、ペレットを送風型電圧印加式除電器 3 台で除電しながら充填する。③充填が完了した実験用 FIBC は実際の輸送時の振動を想定し、フォークリフトで吊り、上下レバーをすばやく操作し、機械の最大応答速度 (速度約 63 cm/s) で上下 (振動距離約 7 cm) に 5 回振動させる。④排出後の充填物からの静電誘導を抑制するため、排出の受け皿として接地した Type C FIBC を用いる。⑤表面電位計に接続したレコーダーをスタートさせた後、実験用 FIBC の排出口を開放する。⑥排出中の最大値をレコーダーから読み取り記録する。⑦Type C FIBC 実験時には、実験用 FIBC の接地用端子に電流測定器を取付け、表面電位計および電流測定器を接続したレコーダーをスタートさせ、実験用 FIBC の排出口を開放する。⑧排出中の両方の最大値をレコーダーから読み取り記録する。なお、実験用 FIBC と表面電位計の距離による補正をかけて測定値を求める。充填準備時の概要を図 2、排出測定時の概要を図 3 に示す。

3.2 絶縁された導体の帯電測定

絶縁された導体の静電エネルギーが 0.14 mJ となる FIBC からの距離を測定する実験を行った。具体的には、絶縁された導体として 10 pF 電極を用い、非接触型の距離計を用いて、 10 pF 電極の絶縁された導体部の静電エネルギーが 0.14 mJ となる充填中の FIBC からの距離を測定した。静電エネルギーを 0.14 mJ としたのは、IEC, JIS 規格^{1,2)}の適用範囲に“着火エネルギーが 0.14 mJ 以上の可燃性または爆発性の環境において、静電気の発生電流が $3.0 \mu\text{A}$ 以下である場合に、内装袋を用いることなく使用されることを意図しているすべての形式のコンテナに適用する。”から決めた。また、絶縁された導体の静電容量を 10 pF としたのは、CENELEC CLC/TR50404:2003 4.4.2³⁾の規定を参考にした。試験手順は充填時の表面電位測定の表面電位計を 10 pF 電極に変えるだけであり、測定時の概要は図 1 に示した。なお、 10 pF 電極について、電極に使用した金属板のサイズは、 25 cm 角の物で厚みを 4 mm とし、コロナ放電防止のため、角を丸くして使用した。これは静電気安全指針⁴⁾の静電容量 10 pF の物体例として、“小さな金属物：小道具”とあり、金属製ピーカーなどを想定した表面積にしている。また、使用した電位計 (春日電機 (株), KSD-1000) は、センサーが接地した金属板の

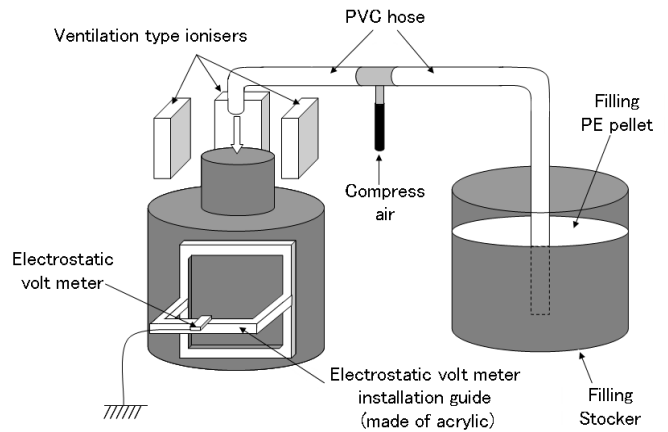


図 2 排出前の充填作業概要
Fig. 2 The outline of filling operation.

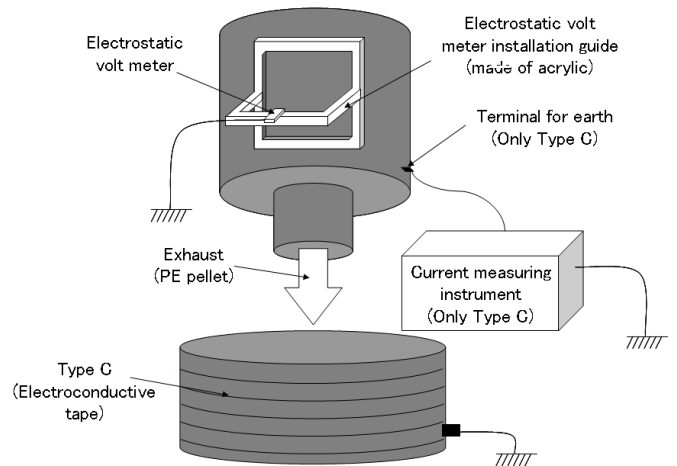


図 3 排出時の表面電位測定概要
Fig. 3 Surface potential measurement during discharging.

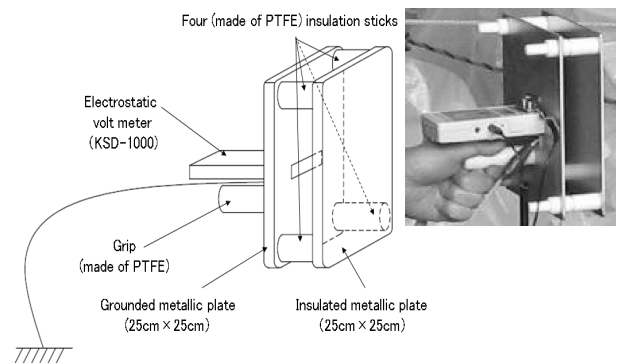


図 4 10 pF 電極概要と写真
Fig. 4 Electrode of 10 pF .

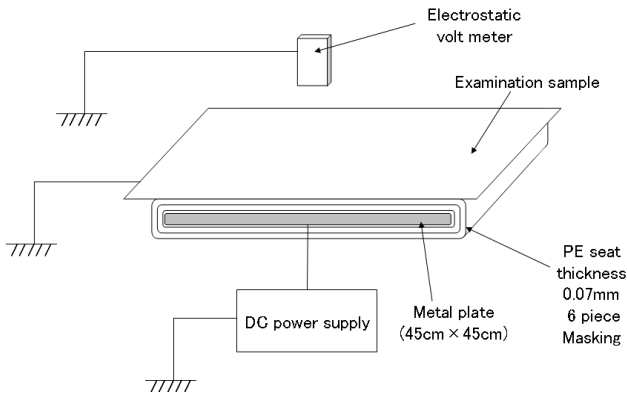


図5 シールド性能測定概要
Fig. 5 Measurement of shield performance.

面と同位置となるように、金属板に電位計サイズの穴を空け埋め込むように固定した。電位計の補正は絶縁した金属板に既知の電圧を印加し、その電圧を変化させながらその電位の表示値を記録し、校正直線によって行った。概要は図4に示す。

3.3 シールド性能の測定

充填時に Type C FIBC の表面電位が測定されたことおよび、全体が導電材料の物と導電性テープの物で測定結果に差があったことから、シールド性能を測定する実験を行った。試験手順は次の通りとした。①実験用試料 [Type C の全面導電性材料 (全面導電配合ゴム引布, 片面導電配合ゴム引布), 導電性テープ (ストライプパターン) 原反, 導電性テープ (グリッドパターン) 原反, 各 60cm×60cm] を接地する。このとき試料の導電性部はすべて接地する。②絶縁フィルムで被覆した金属板の上に実験用試料をかぶせる。③金属板に正極または負極の直流電圧を印加し、1 kV ずつ上昇させ、その時の試料表面の電位を測定・記録する。このとき電圧印加直後の瞬間的に上昇した電位と数秒後の安定した電位を記録した。④記録後次の試料の測定を行う前に金属板を被覆した絶縁フィルムの除電を行った。装置の概要は図5に示す。

4. 実験結果

4.1 帯電測定結果

充填時の各 FIBC の表面電位測定結果を表4に、排出時の結果を表5に示す。ここで、表面電位はいずれも距離による補正をおこなった値 (以下、同じ) である。この結果から次のことがいえる。①充填時の Type C FIBC は、ほとんど表面電位が上昇しない。ただし Type C (導電性テープ) の充填中は 0.0 kV から 1.0 kV の間で数値が不安定に上下し読み取ることができなかった。(表4では“-”表示とした) ②充填時の Type B, D FIBC は、表面電位が大きく上昇する。

表4 充填時の表面電位測定結果
Table 4 Surface potential during filling.

	Maximum potential (kV)	Filling quantity			
		25%	50%	75%	100%
Type C (All conductive)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Type C (Conductive striped tape)	1.0	—	—	—	1.0
Type D	119.7	118.6	119.7	112.9	74.1
Type B	152.5	81.5	137.5	152.5	131.1

Measurement environment
Temperature: 8.7~12.2°C
Relative humidity: 34.1~48.2%

表5 排出時の表面電位測定結果
Table 5 Surface potential during discharging.

	Maximum potential (kV)	Occurrence electric current (μA)
Type C (All conductive)	0.8	-3.22
Type C (Conductive striped tape)	1.4	-2.48
Type D	-23.4	—
Type B (With lamination)	119	—
Type B (No lamination)	150	—

Measurement environment
Temperature: 9.3~13.8°C
Relative humidity: 35.8~64%

表6 充填時の 10 pF 電極距離測定結果
Table 6 Critical separation of 10pF electrode during filling.

	Distance(cm)				
	Maximum	Filling quantity			
		25%	50%	75%	100%
Type C (All conductive)	—	—	—	—	—
Type C (Conductive striped tape)	—	—	—	—	—
Type D	78	68	78	78	39
Type B	104	68	93	104	65

Measurement environment
Temperature: 8.7~12.2°C
Relative humidity: 34.1~48.2%

③排出時の Type C FIBC は、ほとんど表面電位が上昇しない。④排出時の Type B FIBC は、表面電位が大きく上昇する。⑤排出時の Type D FIBC は、表面電位が他の FIBC とは逆極性に上昇した。⑥排出時の Type C FIBC の発生電流の最大値は、全面導電性ゴムで-3.22 μA, 導電性テープで-2.48 μA が測定された。

4.2 絶縁された導体の帯電測定結果

充填時に 10 pF 電極が静電エネルギー0.14 mJ に達する FIBC までの距離を表6に示す。この結果から次のことがいえる。①Type C FIBC は接触寸前まで近接させても 10 pF 電極の静電エネルギーが 0.14 mJ に達することはない。(表6では“-”表示とした) ②Type D FIBC は 78 cm の距離で 10 pF 電極の静電エネルギーが 0.14 mJ に達した。③ Type B FIBC

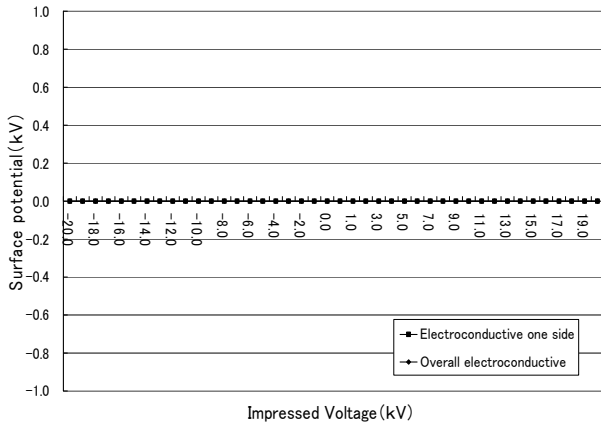


図 6 全面、片面導電性材料のシールド性能の測定結果
Fig. 6 Shield performances by overall and one-side conductive materials.

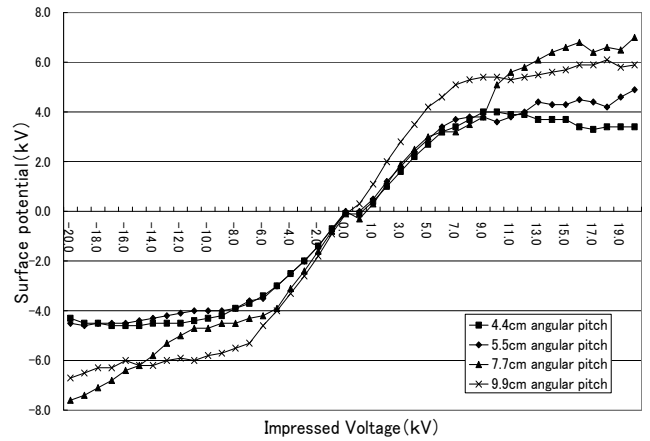


図 9 導電性テープ (グリッドパターン) のシールド性能の測定結果
Fig.9 Shield performance by grid-patterned conductive tape.

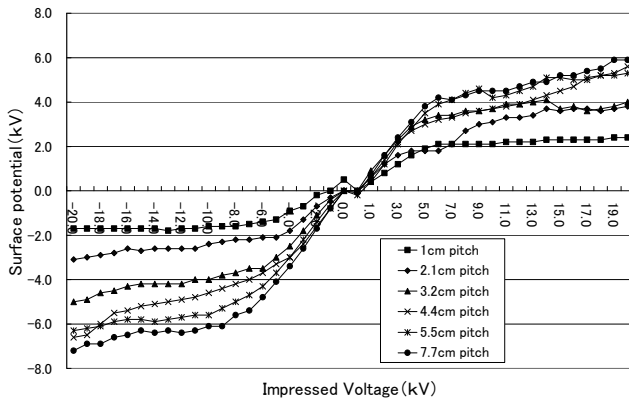


図 7 導電性テープ (ストライプパターン) のシールド性能の測定結果
Fig. 7 Shield performance by strip-patterned conductive tape .

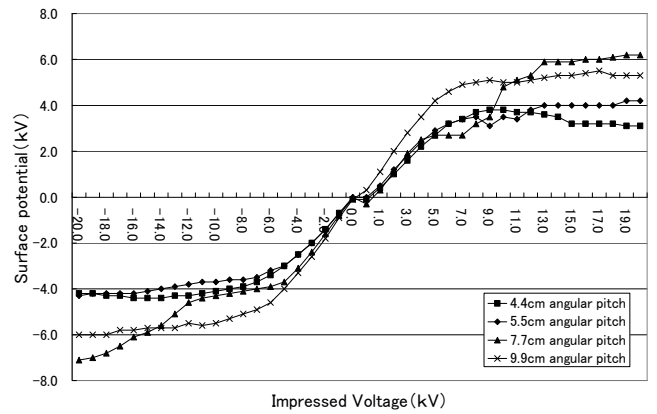


図 10 導電性テープ (グリッドパターン) 安定後のシールド性能の測定結果
Fig. 10 Steady-state surface potential shielded by grid-patterned conductive tape.

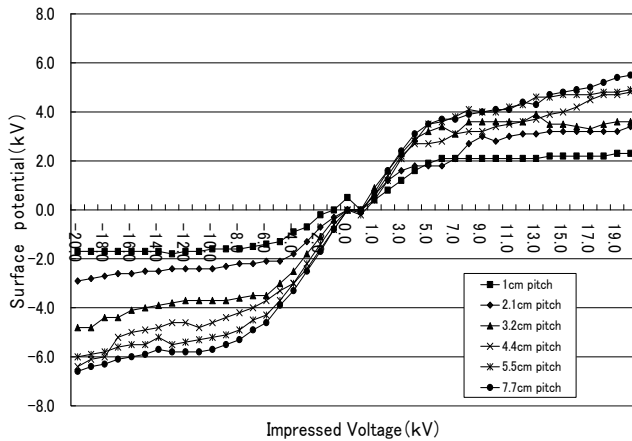


図 8 導電性テープ (ストライプパターン) 安定後のシールド性能の測定結果
Fig. 8 Steady-state surface potential shielded by strip-patterned conductive tape.

は 1.04 m の距離で 10 pF 電極の静電エネルギーが 0.14 mJ に達した。

4.3 シールド性能の測定結果

シールド性能の測定結果として、全体が導電材料 (全面導電配合ゴム引布, 片面導電配合ゴム引布) の表面電位測定結果を図 6 に、導電性テープ (ストライプパターン, グリッドパターン) 原反による表面電位測定結果を図 7-図 10 に示した。この結果から次のことがいえる。①全面導電配合ゴム引布と片面導電配合ゴム引布の表面電位は測定値 0 kV で電位の上昇を測定することはなかった。②導電性テープ (ストライプパターン, グリッドパターン) 原反では表面電位の上昇が測定された。

5. 考察

5.1 帯電特性

接地を行った Type C FIBC は、充填、排出時に表面電位の上昇がほとんど無く、絶縁された導体への静電誘導も測定できなかった (接触寸前でも静電エネルギーが 0.14 mJ に到達

しなかった) ことから, 現在の IEC, JIS 規格^{1,2)}に記載されている“コンテナ操作中は, 1 m 以内の範囲にあるいかなる導体も接地すること.”の表示は FIBC としては必要ないと考える. ただし Type C (全面導電) の排出時に 0.8 kV の表面電位が測定されているが, 発生電流と極性が逆であることから, 排出後の帯電したペレットの誘導電位を測定していると考えられ, 実際の表面電位は 0 kV であったと考えられる. また, 3 日間の静置によって緩和させた発生電流の測定実験結果では, 予想していた値より低く 0.1 μ A 程度であった. そのため, 測定器のレンジ設定から, 明確な値を得ることができなかった. ただし, 十分な時間緩和された充填物であれば発生電流は非常に小さい値となることが確認されたため, 得られている発生電流値 3.22 μ A の原因は, 使用した送風型電圧印加式除電器 3 台では能力が不足していたためと考えられる. IEC, JIS 規格^{1,2)}の要求事項にある“静電気の発生電流が 3.0 μ A 以下である場合”の 3.0 μ A を超えているが, 近い値が得られており, 以上のことから一般的な運用での排出作業では十分に低い発生電流になると考えられる.

Type D FIBC は充填, 排出時に表面電位が大きく上昇した. Type D FIBC は, 帯電し放電する際に, 非着火性放電であるコロナ放電へ放電形態を変えることで, FIBC からの着火爆発を防止する構造のためである. Type D FIBC は大きく帯電するため, 静電誘導およびコロナ放電によって近くの絶縁された導体が帯電し, 着火性放電を起こす危険性がある. IEC, JIS 規格^{1,2)}では 1 m 以内の絶縁された導体を禁じているのはそのためであり, 今回の試験結果で 10 pF 電極の静電エネルギーが 0.14 mJ となる距離が 78 cm であったことから, その距離 1 m は妥当な距離と考える. 排出時は, 排出後の逆極性に帯電したペレットとの間のコロナ放電により, 逆極性になったと考えられる.

Type B FIBC は片面が帯電することで表面電位が大きく上昇している. これはブラシ放電の発生条件となり得る. IEC, JIS 規格^{1,2)}では Type B FIBC の運用が“最小着火エネルギーが 3 mJ を超える粉じん環境下での要求事項”として制限されており, ブラシ放電による着火の危険はない. 今回の試験では, 10 pF 電極の静電エネルギーが 0.14 mJ になった距離は, 1.04 m であるが, その静電エネルギーを 3 mJ とすると, 測定距離はもっと近くになる. このことから Type B FIBC に表示する“コンテナ操作中は, 1 m 以内の範囲にあるいかな

る導体も接地すること.”の表示も妥当と考えられる.

5.2 シールド性能

Type C FIBC の全面導電材料に対し, 絶縁部が存在する材料では, 導電性テープを定められた規格^{1,2)} (ストライプパターンで 2 cm 以内, グリッドパターンで 5 cm 以内) で配置しても, 絶縁部から漏れる電界による電位が測定され, 全面導電材料と比較すると, 完全なシールド性能が得られていない. これは, 導電性テープ部のみは, 全面導電材料と同じ効果であるが, 一般クロス部にはその効果が無いためである. ただし, 規格に規定された寸法で導電性繊維を混入することにより, 着火性放電が発生しない静電気対策が達成されていることは, 5.1 帯電特性から明らかである.

6. まとめ

静電気対策コンテナは, Type の違いによる静電気対策のメカニズムが全く異なっており, その違いをよく理解した上で, 使用環境, 状況に応じて選定することが必要である. 特に今回の実験により Type B, D FIBC の充填, 排出といった運用時に大きく帯電することをよく認識したうえで選定することが重要である.

本論文作成するにあたり, 静電気学会静電気障害研究委員会メンバーの方々から貴重な御意見をいただいたことに対し, ここに謝意を表す. また, 本実験を行うにあたり, シバタ工業株式会社 吉川真史の協力をいただいたことも, ここに謝意を表す.

参考文献

- 1) 日本工業標準調査会: JIS C61340-4-4 静電気—第 4-4 部: 特定応用のための標準的試験方法—フレキシブルコンテナの静電的分類 (2009)
- 2) IEC: IEC 61340-4-4 Electrostatics Part 4-4: Standard test methods for specific applications - Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC) (2005)
- 3) CENELEC: CENELEC PD CLC/TR 50404: Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity (2003)
- 4) 労働安全衛生総合研究所: 労働安全衛生総合研究所技術指針, 静電気安全指針 2007 (2007)