

# 初期放電の検出による静電気火災・爆発災害の予防技術の開発に関する研究

A study on the development of preventive methods for fire and explosion due to static electricity by detecting early-stage discharges

富田 一<sup>\*1</sup> 山隈瑞樹<sup>\*1</sup> 大澤 敦<sup>\*1</sup> 崔 光石<sup>\*1</sup> 市川紀充<sup>\*2</sup> 最上智史<sup>\*3</sup> 鈴木輝夫<sup>\*3</sup>

電気安全研究グループ<sup>\*1</sup> 工学院大学<sup>\*2</sup> 春日電機株式会社<sup>\*3</sup>

■TOMITA Hajime, YAMAGUMA Mizuki, OHSAWA Atsushi, CHOI Kwang Seok, ICHIKAWA Norimitsu, MOGAMI Satoshi, SUZUKI Teruo

粉体の空気輸送・貯蔵等において発生する静電気放電はしばしば爆発・火災の原因となる。このような災害を防止するためには対象となる工程における静電気の帯電量を直接的に測定してこれを制御することが重要であるが、現実には装置が狭隘であったり密閉されているため、測定器の設置が困難である場合が多い。一方、静電気放電が生ずると、それに伴って光、音、電磁波等が輻射され、これらの強度、持続時間等は静電気放電の形態によって異なることがわかっている。本研究では、粉体の空気輸送・貯蔵等、可燃性の物質を取り扱う工程で発生する静電気放電の現象を検出して放電形態を判別し、これをもとに除電器等を用いて静電気の帯電量を制御することによって爆発・火災の発生確率を低減する技術を開発することを目的とする。

## 1 研究の背景と目的

総務省消防庁の火災年報によると、我が国の静電気起因する火災は平成5～22年の18年間に1,623件発生している。その中で粉体の摩擦による火災は209件で、全体の約13%を占めている(図1の「粉体摩擦」参照)。

また静電気を着火源とする爆発・火災の事例を平成元年から平成17年までの17年間について当所で調査した結果、112件にのぼった。そのうち29件が粉じん爆発災害で全体の1/4を占めていた。内訳をみると、ろ布式の集じん機を用いた集じん工程が13件と最も多く、爆発した物質はMg-Al合金とアルミニウムが大半を占めていた(図2)。また、フレキシブルコンテナ及びポリ袋を用いた投入工程は合わせて6件であった。この具体例には、アルミニウムチップの研磨機で発生したアルミニウム粉じんをろ布式の集じん機で捕集していたところ、ダクト内で静電気放電に起因したと推定される粉じん爆発が発生して、作業者が火傷を負った事例が報告されてい

る。このように粉体を取り扱う集じんや投入の工程では、粉体の摩擦や破砕にともなって静電気が発生しており、静電気の放電を着火源とした災害も発生している。

本研究では、貯蔵槽、ダクト内など静電気の帯電状況を直接に測定することが困難な場合に、静電気放電を早期に検出し、必要な対策を行うことによって、静電気放電を着火源とした静電気災害の発生を抑制することを目

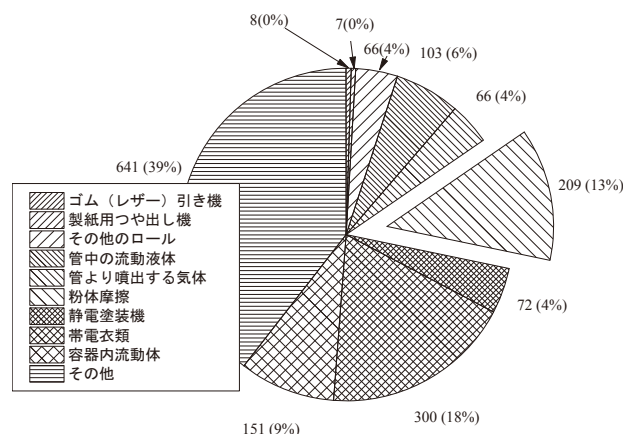


図1 平成5～22年の静電気火災の分類  
(出典:平成5年第50号～平成22年第67号の総務省消防庁「火災年報」)

\*1 Electrical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health

\*2 Faculty of Engineering, Kogakuin University

\*3 Kasuga Denki Co.Ltd.

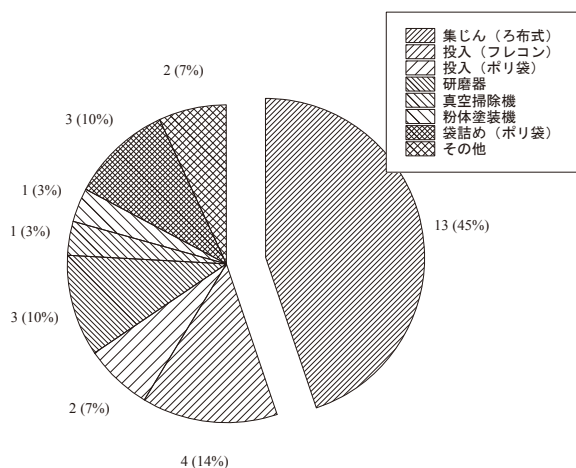


図2 工程別の粉じん爆発件数 (平成元～17年)

的とする。

## 2 研究概要

本研究は、貯蔵槽、ダクト内等で発生する静電気放電の中でも、特に着火性の強いバルク表面放電を捉えて、そのときに除電器を稼働させるなど適切な対策を行うことによって、貯蔵槽等で発生する粉じん爆発災害の発生確率を低減することを目的とする。具体的には、次の3つのサブテーマについて研究を行った。

### 1)初期放電検出手法に関する研究

粉体取り扱い工程などにおいては、稼働に伴って発生する静電気放電として、可燃性粉体に対して着火性の低いブラシ放電 (表1参照) と可燃性粉体に対して着火性をもつバルク表面放電 (コーン放電) (表1参照) とが主に発生している。

静電気放電による爆発・火災災害の発生確率を低減するためには、静電気放電が発生する可能性のある環境で静電気放電を常時監視するとともに、万一着火性の強いバルク表面放電が発生したならば、直ちに帯電防止を目的とした除電器を稼働させるなどの有効な対策を施すことである。本サブテーマでは、静電気放電を検出するための手法として、外被電極法、電磁界と接地電流による検出、接地過渡電圧による検出特性を実験的に比較検討した。

その結果、電磁ノイズが存在しない理想的な条件下では、いずれの手法でも静電気放電を検出可能なことが確認された。これに対し、生産工程を模擬した実規模の粉体空気輸送実験装置を用いた実験では、外被電極法、接地過渡電圧による方法では、伝導性の電磁ノイズも測定されてしまうために、静電気放電を確実に検出することは不可能であった。一方、静電気放電によってループアンテナに誘導される電圧を測定する方法では、静電気放電を検出できるとともに、着火性の強いバルク表面放電 (推定) も捉えられた。

また、静電気放電に伴っては光も発生することから、放電光による静電気放電の検出を目的に静電気放電検出器を開発した。

静電気放電検出器は、光センサーと光増幅装置とを主装置として、石英ガラス (直径: 30 mm, 厚さ: 3 mm)、干渉フィルター (波長λ: 330 nm, 直径: 30 mm, 厚さ: 3 mm)、オシロスコープなどから構成されている。本研究では、粉体の貯蔵槽の天井に静電気放電検出器を取り付けて静電気放電の検出を試みた。この実験では、静電気放電検出器から得られた信号の有効性を確認するため、当該検出器による放電検出と同時にイメージインテンシファイア付き CCD カメラ (CCD 前面のイメージインテンシファイアによって入力光を増倍し、増倍された光を CCD で検出する装置) によって静電気放電の撮影を行った。その結果、静電気放電検出器からの信号と CCD カメラで撮影された静電気放電による発光現象とは信号検出の時刻がよく一致した。

また、干渉フィルターの波長λ (240 nm～600 nm) が静電気放電の検出性能に及ぼす影響についても調べた。その結果、波長が 270 nm～400nm の場合、静電気放電を検出することが可能であった。以上より、ノイズの影響を考慮すると、静電気放電の検出に最適な干渉フィルターの波長は 330 nm であると結論付けることができた。

さらに、複数の静電気放電検出器を粉体の貯蔵槽の天井や下部側壁に取り付けて実験を行い、静電気放電を同時に検出することができた。このとき、静電気放電の検出レベルは、粉面に近い下部側壁の方が相対的に高めであった。

### 2)放電条件が着火性に及ぼす影響

静電気放電による可燃性粉体の爆発災害を防止する適切で効果的な対策を実施するには、取り扱う可燃性粉体の着火危険性を評価する必要がある。静電気放電の特性は帯電物体、接地体の電気的な特性に依存することから、放電回路条件と着火危険性の指標である最小着火エネルギーとの関係を実験的に調べた。具体的には、10種類以上の可燃性の粉体及びガス・蒸気を用いて、静電気放電回路の条件が着火危険性に及ぼす影響を実験的に調べるとともに、理論的な考察を試みた。

三種類の放電回路条件 (コンデンサのみの回路、コンデンサとインダクタンスの回路、コンデンサと抵抗の回路) において、金属、天然物、合成樹脂等の浮遊粉じんの最小着火エネルギーを測定し、回路条件の影響を検討した。また、浮遊粉じんの爆発の高速カメラによる光学的観測を行い、回路条件の影響の要因を調べた。その結果、約 10mJ の最小着火エネルギーを境界として、それを超えるものは回路条件の影響を受けやすいが、それを下回るものは回路条件の影響を受けにくいことが判明した。また、高速カメラの観測により、最小着火エネルギーの大きな物質は、放電によって発生する気流の影響を受けていることが確認された。

### 3)着火防止技術の開発

帯電した静電気を電氣的に中和することによって、着火源となる危険性を有する着火性静電気放電を抑制して、静電気に起因する爆発・火災災害の発生確率を低減することを試みた。そのために防爆型除電器を開発し、従来対策が困難であった粉体の貯蔵槽及び流動層へ適用した。具体的には、次の項目を実施した。

#### (1)防爆型除電器による静電気放電の抑制

印加電圧を約±4kVとしたノズルタイプ除電器2個で構成される新型の小型・高性能の防爆性能を有する除電器を開発した。当該除電器4台を使用することで、帯電粉体の70%程度を除電でき、可燃性粉体への着火性の強いバルク表面放電の発生を抑制する効果のあることも確認できた。なお、新型の除電器は小型・高性能で防爆性能を有することから、多くの生産現場に適用可能な特徴をもつ。

### 3 今後の展望

本研究では、実規模の粉体空気輸送実験装置を用いて、貯蔵槽内での静電気放電の検出と開発した防爆型除電器による除電性能の実証実験を行った。当該装置は産業現場で実際に使用されている典型的な装置に比較して小規模であることから、実証実験で使用した装置に比較して規模の大きな事業場に設置された装置を用いて、実証実験を今後行いたいと考えている。

表1 静電気放電の種類と特性<sup>1)</sup>

放電の種類	特性
コロナ放電	針やワイヤーなどの先鋭な導電性物体が帯電物体に接近した場合に、先端部付近でのみ発生する放電であり、通常は着火源となりにくい。
火花放電	一般的に数kVに帯電した導体に接地導体が数mmまで接近したときに発生する放電である。帯電物体に蓄積された静電エネルギーのほぼすべてが放電に費やされるため、着火能力が高い。
ブラシ放電	一般的には10kV程度以上の帯電物体に曲率半径が3~50mmの接地導体が10cm程度まで接近したときに、帯電電荷の一部が費やされる放電である。等価エネルギーは最大で4mJ程度と報告されている。
バルク表面放電(コーン放電)	粉体、ペレットなどをサイロに空気輸送するときに、サイロに堆積した粉体の表面に沿って間欠的に発生する強い放電で、放電エネルギーが10mJ程度である。

#### 文 献

- 1) 梅崎重夫, 崔光石ほか. よくわかる! 管理・監督者のための職場における安全工学. 東京: 日科技連; 2013: 22-23.

### 研究業績リスト

課題名: 初期放電の検出による静電気火災・爆発災害の予防技術の開発に関する研究

平成25年度(2013年)		
1	国内外の研究集会発表	富田一(2013), 粉体の空気輸送中の貯蔵槽での静電気放電による電圧の測定, 安全工学シンポジウム講演予稿集.2013, pp.344-347.
平成24年度(2012年)		
1	原著論文	Kwangseok CHOI,Sungchul KIM and Jaehee CHUNG(2013), Experimental Study on Electrostatic Field of Polymer Powders in Freeboard Region of Fluidized Bed Reactor, advanced science letter,Vol.19, pp.113-117.
2	原著論文	A. Ohsawa and N. Ichikawa(2012), ESD detection by transient earth voltage, Journal of Physics: Conference Series 418 (2013) 012054
3	原著論文	Kwangseok CHOI, Tomofumi Mogami, Teruo Suzuki, Sungchul KIM and Mizuki Yamaguma(2013), Charge Reduction on Polypropylene Granules and Suppression of Incendiary Electrostatic Discharges by Using a Novel AC Electrostatic Ionizer, Journal of loss prevention in the process industries, Vol. 26. No.1, pp. 255-260.
4	研究所出版物	富田一(2012), 粉体の空気輸送中の貯蔵槽での静電気放電による電圧の測定, 労働安全衛生研究,Vol.6,.,No.1,pp.15-20.
5	国内外の研究集会発表	Kwang Seok CHOI,Tomofumi MOGAMI, Teruo SUZUKI,Sung Chul KIM and Mizuki YAMAGUMA(2012), Charge reduction on polypropylene granules and suppression of incendiary electrostatic discharges by using a novel AC electrostatic ionizer. Proc. of the 5th Asian Particle Technology Symposium, No. USB, PP. 179 - 187.
6	国内外の研究集会発表	Kwangseok CHOI, Sungchul KIM and Jaehee CHUNG(2012), Experimental Study on Electrostatic Field of Polymer Powders in Freeboard Region of Fluidized Bed Reactor, 2012 International conference on advances in materials science and engineering (AMSE2012) p.15.
7	国内外の研究集会発表	A. Ohsawa and N. Ichikawa(2012), ESD detection by transient earth voltage, Proc. ICAES 2012, ICAES-4-040
8	国内外の研究集会発表	崔光石(2012), 粉体貯蔵槽(サイロ)内の静電気放電現象とその防止対策, 粉体工業会関東談話会
9	国内外の研究集会発表	崔光石(2012), Novel AC Corona Electrostatic Ionizer for Powders, 第73回応用物理学関係連合会, 講演予稿集2012秋, No. CD, p. 7.
10	国内外の研究集会発表	最上智史, 崔光石, 鈴木輝夫(2012), サイロ内で発生する静電気放電と粉体帯電量の関係(II). 第73回応用物理学関係連合会, 講演予稿集2012秋, No. CD, p. 6.
11	国内外の研究集会発表	最上智史, 崔光石, 鈴木輝夫, 山隈瑞樹(2012), 直流式防爆構造除電器の開発, 静電気学会全国大会2012, pp.249-250.
12	国内外の研究集会発表	中渡瀬圭吾, 市川紀充, 大澤敦 (2012), 静電気放電の過渡接地電圧測定, 平成24年電気学会産業応用部門大会, 抄録集, V-155~V-156.
13	国内外の研究集会発表	富田一(2012), 粉体の空気輸送中の貯蔵槽内での静電気放電による誘導電圧の測定, 第45回安全工学研究発表会, 抄録集, pp. 181 -184.
14	国内外の研究集会発表	富田一(2012), ループアンテナを用いた静電気放電による誘導電圧の測定, 安全工学シンポジウム講演予稿集.2012, pp.344-347.
15	国内外の研究集会発表	山隈瑞樹(2012), 絶縁物からの静電気放電による着火性の検討, 第45回安全工学研究発表会, pp.189 - 190.
16	著書・単行本	崔光石(2013), よくわかる! 管理・監督者のための職場における安全工学, 日科技連, pp.17-46
17	総説ほか(査読有無問わず)	山隈瑞樹(2012), 最近の静電気による爆発・火災事例, 静電気学会誌, Vol.36, No.3, pp.116-122.
18	総説ほか(査読有無問わず)	児玉 勉, 山隈 瑞樹 (2012), フレキシブルコンテナによる静電気災害およびその防止対策, 静電気学会誌, Vol.36, No.3, pp.122-127.
19	総説ほか(査読有無問わず)	崔 光石, 最上 智史(2012), 粉体空気輸送・貯蔵の際に発生する静電気帯電および放電とその防止対策. 静電気学会誌, Vol.36, No.3, pp.133-137.
20	その他の専門家向け出版物	山隈瑞樹(2012), 静電気による爆発・火災のメカニズムと対策. 高圧ガス, Vol. 49, No. 11, pp. 964 - 972.
21	その他の専門家向け出版物	山隈瑞樹(2012), 静電気による災害事例と対策. セイフティエンジニアリング, No. 169, pp. 26 - 31.
22	その他の専門家向け出版物	山隈瑞樹(2013), 爆発事故はなぜ起きる～爆発発生メカニズムと対策, 安全と健康, Vol. 14, No. 2, pp. 17 - 22.
23	その他の専門家向け出版物	山隈瑞樹(2013), 静電気帯電防止靴の性能と正しい使い方, セイフティダイジェスト, Vol.59, No.2.
24	その他の専門家向け出版物	崔 光石 (2012), 静電気放電による爆発・火災の危険性と防止対策, 安全衛生コンサルタント, No.103, pp.32-37.
25	国内外規格等	山隈瑞樹(2013), JIS C 61340-2-2: 静電気 - 第2-2部: 測定方法 - 帯電特性の測定
26	国内外規格等	山隈瑞樹 (2012), IEC 61340-4-4 Ed. 2.0:2012 (b), Electrostatics - Part 4-4: Standard test methods for specific applications - Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC)

初期放電の検出による静電気火災・爆発災害の予防技術の開発に関する研究

平成23年度(2011年)		
1	原著論文	Mizuki Yamaguma, Kyoon Tae Moon, Kwang Seok Choi and Jae Hee Chung (2011), Influence of discharge circuit parameters on the measurement of the minimum ignition energy of dust-air mixtures, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol, No.3, pp.78-85.
2	研究所出版物	富田一(2011), コロナ放電と火花放電による接地線の電流の比較, 労働安全衛生研究, Vol.4, No.2, pp.79-82.
3	研究所出版物	崔光石, 文均太 (2011), 静電界センサによる流動層における静電気帯電評価の検討, 労働安全衛生研究, Vol.4, No.1, pp.43-46.
4	研究所出版物	富田一(2012), ループアンテナを用いた静電気放電による誘導電圧の測定, 労働安全衛生研究, Vol.5, No.1, pp.17-21.
5	国内外の研究集会発表	Kwang Seok CHOI, Kyoon Tae MOON and Jae Hee CHUNG (2011), Electrostatic charges for suspended polypropylene powder, Asia Pacific Symposium on Safety (APSS), pp.153-155.
6	国内外の研究集会発表	Kwang Seok CHOI, Kyoon Tae MOON, Jae Hee CHUNG, Xiaotao BI and John R. GRACE(2011), Electrostatic hazards of polypropylene powders in the fluidized bed reactor, IEEE International conference on industrial engineering management, pp.995-999.
7	国内外の研究集会発表	崔光石, 文均太, 鄭載喜(2011), 流動層内のポリプロピレン粉体の静電気帯電特性, 第58回応用物理学関係連合発表会(CD-ROM), p.18.
8	国内外の研究集会発表	崔光石(2011), 流動層のフリーボード領域における粉体の静電気危険性, 第72回応用物理学学会学術講演会, CD-ROM, p.13.
9	国内外の研究集会発表	崔光石(2011), 流動層のフリーボード領域における粉体の静電気危険性, 静電気学会全国大会2011, pp.11-14.
10	国内外の研究集会発表	最上智史, 鈴木輝夫, 崔光石, 山隈瑞樹(2011), フランジ型除電器の除電能力の印加電圧周波数依存性, 静電気学会全国大会2011, pp.37-42.
11	国内外の研究集会発表	崔光石, 最上智史, 鈴木輝夫, 山隈瑞樹 (2011), 小型防爆構造除電器の開発, 静電気学会全国大会2011, pp.43-46.
12	国内外の研究集会発表	Kwangseok CHOI, Tomofumi MOGAMI, Teruo SUZUKI, Sungchul KIM and Mizuki YAMAGUMA(2012), Electrostatic Discharges on Polypropylene Granules inside Metal Silo, 第59回応用物理学関係連合発表会(CD-ROM), p.20.
13	国内外の研究集会発表	最上智史, 崔光石, 鈴木輝夫(2012), サイロ内で発生する静電気放電と粉体帯電量の関係, 第59回応用物理学関係連合発表会(CD-ROM), p.21
14	国内外の研究集会発表	崔光石(2011), 流動層における粉体の静電気特性, 静電気学会放電基礎研究会
15	国内外の研究集会発表	富田一(2011), ループアンテナを用いたコロナと火花放電による誘導電圧の比較, 安全工学シンポジウム2011講演予稿集, pp.435-438.
16	国内外の研究集会発表	富田一 (2011), コロナ放電と火花放電による誘導電圧と接地電流の測定, 第44回安全工学研究発表会抄録集, pp.97-100.
17	著書・単行本	山隈瑞樹(2011), 化学工学便覧(改訂7版), 第14章粉じん爆発, 丸善出版
18	その他の専門家向け出版物	山隈瑞樹(2011), 協会規格「粉じん爆発可燃性粉じんの空気混合気の最小着火エネルギー測定法」, 粉体技術, Vol.3. No.2, pp.62-68.
19	特許の出願取得	崔光石(2012), 電荷量測定装置, 実案第2011-156588号
平成22年度(2010年)		
1	原著論文	Kwang Seok CHOI, Muammar OMAR and Xiaotao BI and John R. GRACE (2010), Experimental Study on Electrostatic Charging of Polymer Powders in Mixing Processes, Vol.23, Issue 5, pp. 594-600.
2	原著論文	Kyoontae Moon, Jaehee Chung and Kwangseok Choi (2010), Experimental Study on Electrostatic Hazards of Powder in Fluidized Bed, Journal of the Korean Society of Safety (in Korean), 8, Vol.25, No.4, pp.19-24.
3	原著論文	Kyoontae moon, Jaehee Chung, Mizuki Yamaguma and Kwangseok Choi(2010), Influence of electrostatic discharge circuit parameters on the minimum ignition energy of suspended dust clouds, Journal of the Korean Society of Safety (in Korean), Vol 25, No.5, pp.22-26.
4	国内外の研究集会発表	Muammar Omar, KwangSeok Choi, Xiaotao T. Bi and John R. Grace (2010), Effects of particle size and fluidizing velocity on the charge density of entrained fines. Fluidization XIII, Engineering Conferences International, New York, pp.225-232.
5	国内外の研究集会発表	Mizuki Yamaguma, Kyoontae Moon, Kwangseok Choi and Jaehee Chung (2010), Influence of discharge circuit parameters on the measurement of minimum ignition energy of dust-air mixtures, 8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, CD-ROM
6	国内外の研究集会発表	最上智史, 崔光石, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 池畑隆(2010), ノズル型防爆構造除電器の多孔板が除電能力に及ぼす影響, 静電気学会誌, Vol.34, No.4, pp.193-198.
7	国内外の研究集会発表	最上智史, 崔光石, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 池畑隆(2010), 粉体用除電器の印加電圧周波数の依存性に関して, 安全工学シンポジウム2010, pp.434-435.
8	国内外の研究集会発表	最上智史, 山隈瑞樹, 崔光石, 鈴木輝夫, 池畑隆(2010), フランジ型除電器の除電能力の印加電圧周波数依存性, 静電気学会全国大会2010, pp.97-99.
9	国内外の研究集会発表	富田一 (2010), 磁界プローブを用いた火花放電による誘導電圧の測定, 第43回安全工学研究発表会抄録集, pp.147-150.
10	特許の出願取得	崔光石(2010), 送風式除電電極および送風型除電電極装置, 特許第4615029号