

粉体貯蔵槽での光センサによる静電気放電の検出†

崔 光 石*1 最 上 智 史*2 鈴 木 輝 夫*2

粉体空気輸送、貯蔵など大量の粉体を扱う工程の装置においては、帯電した粉体に起因した静電気放電を着火源とする爆発や火災を誘発するおそれがある。このような静電気放電による災害を防止するためには、静電気放電を早期に検出し、安全対策を実施する必要がある。本研究では、粉体貯蔵槽で発生する静電気放電を、簡便、かつ的確に検出可能な光センサを利用した静電気放電検出器を開発した。光センサ型静電気放電検出器は、光センサと光増幅装置を主構成装置とし、光センサ保護用石英ガラス（直径：30 mm, 厚み：3 mm）、測定環境の外部光を除去するための干渉フィルタ（中心波長λが異なる9種類：240 nm～600 nm, 直径：30 mm, 厚み：3 mm）を具備したもので、光信号はオシロスコープなどの表示装置に表示する。実規模粉体空気輸送実験設備の貯蔵槽に本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結果、適切な干渉フィルタを用いることで太陽光や蛍光灯などのノイズ光の存在する環境下でも、静電気放電を的確に検出できることが確認された。また、本研究では、静電気放電の検出に最適な干渉フィルタの波長は330 nmであると結論付けた。

キーワード: 静電気放電, 光センサ, 干渉フィルタ, 粉体, 粉体貯蔵槽

1 はじめに

粉体プロセスにおいては、自動化、省力化、クリーン化が求められ、粉体空気輸送がよく用いられている。しかし、空気輸送時に粉体と配管との摩擦・衝突により発生する大量の静電気は、生産障害や災害につながる可能性がある。特に、帯電した粉体を貯蔵槽に充填する工程では、着火性静電気放電が発生し、粉じん濃度が爆発下限界以上である場合、粉じん爆発を引き起こす危険性がある^{1,2)}。このような災害を防止するためには、まず、工程内で発生する着火性静電気放電を早期に検出することが最も重要であり、引き続いて、窒素ガスでの置換・シール、粉体用除電器の使用などの災害防止対策を施す必要がある。このような背景から、本報では、粉体貯蔵槽で発生する着火性静電気放電の発光の検出を目的として、実際に現場で適用可能な光センサを用いた静電気放電検出器（以下、光センサ型静電気放電検出器という）を開発し、その性能評価を行ったので報告する。

2 実験

1) 光センサ型静電気放電検出器

光センサ型静電気放電検出器は、主に現場での適用のし易さおよび高精度を考慮して開発したものである。図1に光センサ型静電気放電検出器の概略を示す。光センサ型静電気放電検出器は、主に光センサ検出部、光電子増倍管モジュール用電源、フォトセンサアンプ、オシロスコープから構成されている。光センサ検出部（図2）は、金属製外側円筒（ ϕ : 31 mm）内に光センサ（Hamamatsu Photonics, Ltd.: H10721-210; max. gain, 2,000,000）を取り付けたものであり、光センサ保護用石英ガラス（直径：30 mm, 厚み：3 mm）、および干渉フィルタ（直径：30 mm,

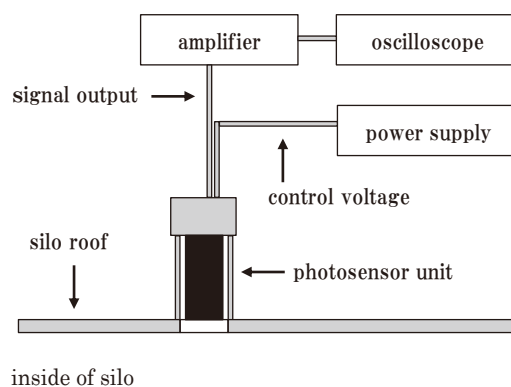


図1 光センサ型静電気放電検出器

厚み：3.5 mm）を円筒内に配置している。なお、金属製外側円筒は電磁ノイズを防止するため接地している。

光センサは光電子増倍管と高圧電源回路を内蔵したものである。感度波長範囲は230 nm～700 nm, 最大入力電圧は5.5 Vである。光電子増倍管モジュール用電源（Hamamatsu Photonics, Ltd.: C-10709）の可変電圧範囲 V_a は0.25～1.8 Vである。フォトセンサアンプ（Hamamatsu Photonics, Ltd.: C-9329）は微弱な光電流を検出できる電流-電圧変換アンプであり、今回の実験での光電流検出感度は 1×10^9 V/Aとした。

今回の実験で使用した干渉フィルタは、中心波長λが異なる9種類である。干渉フィルタの中心波長および半値幅は、後述の表1に示すとおりである。なお、光センサ検出部からの信号はオシロスコープ（Textronix, DPO 7254, 周波数帯域：最大2.5 GHz（本実験では500MHz）、入力インピーダンス：1 M Ω 、サンプリング速度：最大40GS/s（本実験では10kS/s）、サンプル数：100k）に入力し、表示させた。

†本報は Review of Scientific Instruments に投稿中である。

*1 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

*2 春日電機株式会社

光センサ型静電気放電検出器を粉体貯蔵槽上部屋根の穴（直径：50 mm）に設置して貯蔵槽内部で発生する静電気放電の検出を試みた。

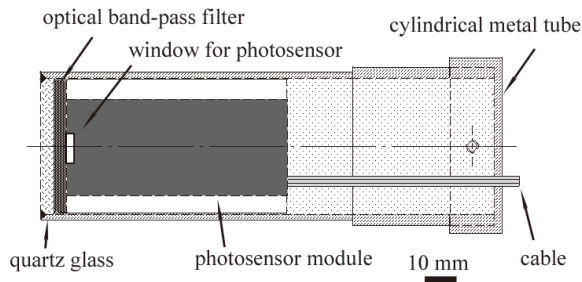


図2 光センサ検出部の構成図

2) 粉体空気輸送設備及び粉体試料

実際の光センサ型静電気放電検出器の現場への適用を考慮して、実規模粉体空気輸送実験設備を使用し、その性能を評価した。粉体空気輸送実験設備は図3のように、貯蔵槽（SUS製円筒型、直径：1.5 m、胴長：3.3 m、容量：3.8 m³）、配管（材質：SUS、直径：0.1 m、全長：約30 m）、輸送空気の制御盤（最大風量：11 m³/min、インバータ制御型）、空調ユニット（輸送空気の温度 30 °C、相対湿度 30 %に設定）等から構成されている。実験は、まず、貯蔵槽内に粉体試料を充填し、貯蔵槽底部に設置したロータリーバルブを稼働させ、粉体を貯蔵槽底部から排出し空気輸送配管へ供給する。その後、貯蔵槽から配管へ供給された粉体を空気輸送し、貯蔵槽上部から再び貯蔵槽内に投入する方法で行った。実験時の粉体の単位時間あたりの供給量は、0.38 kg/sとした。

なお、試料粉体は化学工場で広く使用されているポリプロピレン(PP)ペレット（平均粒径：約2 mm）で約300 kgを使用した。

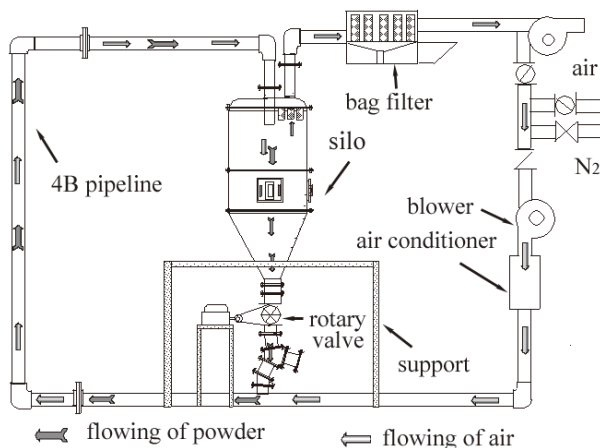


図3 実規模粉体空気輸送実験設備

3) イメージインテンシファイア付き CCD カメラ

光センサ型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、イメージインテンシファイア付き

CCD カメラ（以下、高感度カメラという）で静電気放電の撮影を同時に行った。このカメラは、貯蔵槽上部屋根のガラス窓に設置して貯蔵槽内部で発生する静電気放電を撮影した。イメージインテンシファイアには、暗視装置（浜松ホトニクス製、ナイトビュー C9016-02、感度波長範囲：280 nm～780 nm）を使用した。

3 実験結果および考察

1) 高感度カメラによる粉体貯蔵槽内部で発生する静電気放電の観察

高感度カメラを使用し、粉体貯蔵槽で発生する静電気放電を撮影・観測した一例を図4(a,b)に示す。これらの結果によると、粉体貯蔵槽内の粉体表面で発生する静電気放電としては、ブラシ放電とバルク表面放電の2種類が確認された。ブラシ放電は、粉体貯蔵槽側壁に発生する放電で、一般的には10 kV程度以上の帯電物体に、曲率半径が3～50 mmの導体が10 cm程度まで接近したときに起こるブラシ状の発光を伴う放電である。ブラシ放電は放電エネルギーが最大4 mJ程度であると報告されている³⁾。一般の可燃性のガス、溶剤蒸気のほかに、粒径が数十 μm以下の一部の可燃性粉体の着火源になり得るが、特に着火危険性が高い可燃性粉体以外には可燃性粉体の着火源にはならない。

一方、バルク表面放電は、主に貯蔵槽内に堆積した粉体の表面に沿って発生する強い発光を伴う放電である。バルク表面放電の放電エネルギーは、貯蔵槽の直径 D [m]と粉体粒径 d [mm]に依存する。例えば、 $0.5 \text{ m} < D < 3 \text{ m}$ 、 $0.8 \text{ mm} < d < 3.0 \text{ mm}$ であれば、放電エネルギー W [mJ]の上限に関して次の実験式が与えられている³⁾。

$$W = 5.22 D^{3.36} d^{1.46} \quad (1)$$

今回、使用した粉体貯蔵槽の直径 D は1.5 m、粉体試料の粒径 d (PPペレット) は2 mmであり、上記式(1)より W は56 mJとなる。この値は、粉体貯蔵槽内に微粉体が多量に含まれる場合は粉じん爆発を引き起こす可能性が高く危険である。

このように、粉体貯蔵槽内で静電気放電を検出し、その危険性を評価する際に、高感度カメラはかなり有効である。しかし、高感度カメラを使用する方式には以下のような一部改善すべき点が含まれている。

- (1) 静電気放電によって発生する光の強度は、外部からの光、例えば、太陽光、蛍光灯（以下、ノイズ光という）と比べて弱いため、それを正確に撮影するために高感度カメラや粉体貯蔵槽全体を暗幕で覆う必要がある。
- (2) 静電気放電による発光を撮影するためには、発光部位に正確にピントを合わせなければならない。特に、粉体貯蔵槽が大型化し、あるいは、粉体貯蔵槽内の粉体の堆積レベルに変化がある場合には、ピントを合わせる事が不可能な場合もある。
- (3) 暗視装置、広角レンズ、カメラなどが必要であること等で一般的にコストが高価である。

上記の事項から、産業現場において、高感度カメラを使用し、静電気放電を撮影・検出することは、困難であるのが現状である。

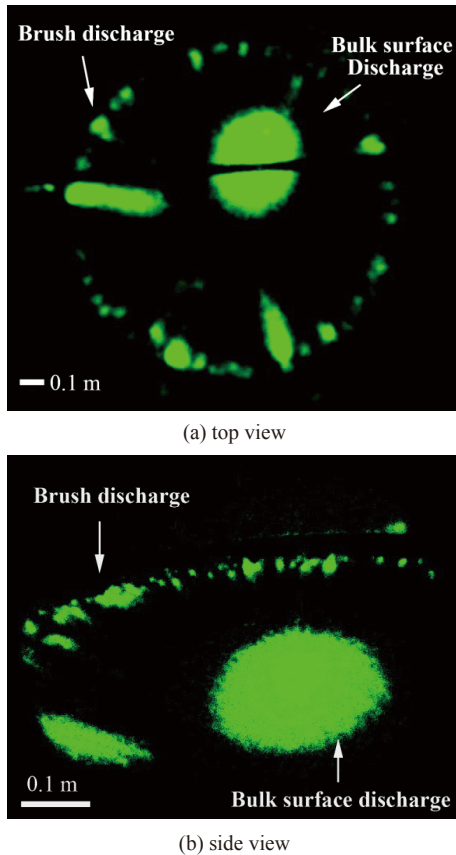


図 4 粉体貯蔵槽で観測されたブラシ放電とバルク表面放電 (露出: 2 s)

2) 光センサ型静電気放電検出器による粉体貯蔵槽内部で発生する静電気放電の検出

粉体の貯蔵槽内に外部からノイズ光が入射する状況下で、この貯蔵槽の天井に光センサ型静電気放電検出器を取り付けて着火性バルク表面放電の検出を試みた。この光センサには、ノイズ光をカットするために干渉フィルタが取り付けられている。今回の実験で使用した干渉フィルタは中心波長 λ が 330 nm である (λ に 330 nm の干渉フィルタを選定した理由は、後節で述べる)。また、検出した放電光の信号を増幅する光電子増倍管モジュール用電源の印加電圧 V_a は 0.35 V である。実験は、空気輸送した PP ペレットを貯蔵槽内に投入して、堆積粉体表面でバルク表面放電を発生させて、この放電光を光センサ型静電気放電検出器で検出する方法で行った。実験結果の一例を図 5 (a, b) に示す。結果によると、貯蔵槽に PP ペレットを投入すると図 5 (a) のような 4 本のパルス状の信号が観測された。また、PP ペレットの貯蔵槽への投入を停止すると、図 5 (b) に示すようにパルス状の信号は消えた。

次に、貯蔵槽を暗幕で覆いノイズ光が入らない状態にして、再度、着火性バルク表面放電の検出を行った。この

結果を図 6 に示す。この図 6 の結果は、図 5 (a) のパルス状の信号 (以下、パルス状の信号という) と同様であったため、検出器の放電光検出性能にはノイズ光の影響が少ないことがわかった。また、このとき、光センサ型静電気放電検出器から得られたパルス信号が、バルク表面放電に対応していることを確認するため、当該検出器による放電検出と同時に高感度カメラによってバルク表面放電の撮影も行い、両者の結果を比較した。その結果、光センサ型静電気放電検出器からの検出信号 (図 6) と CCD カメラで撮影された静電気放電 (図 7) とは、検出信号の検出時刻とバルク表面放電の発生観測時刻がよく一致した。したがって、光センサ型静電気放電検出器からのパルス信号がバルク表面放電であることが確認された。

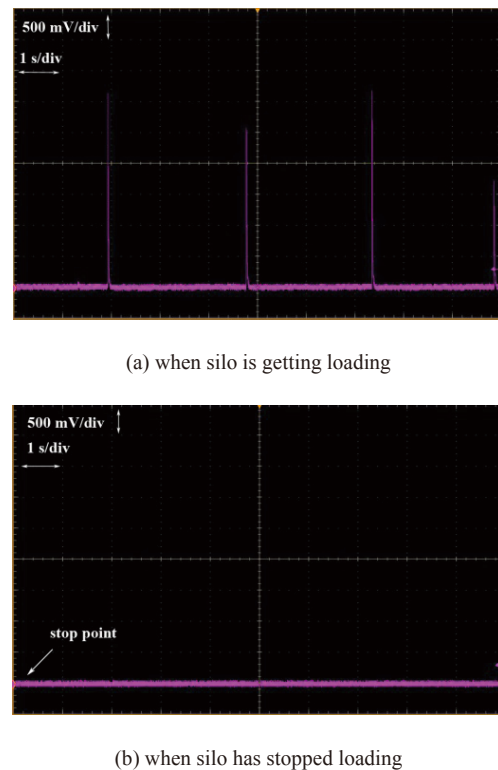


図 5 光センサ型静電気放電検出器を用いたバルク表面放電静電気放電の検出 (ノイズ光あり)

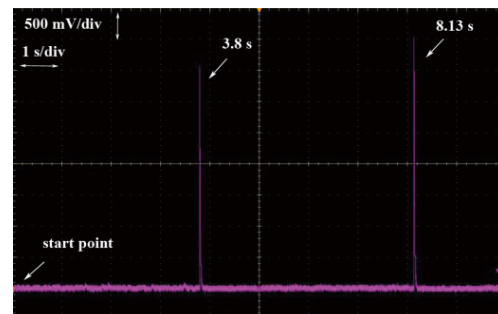
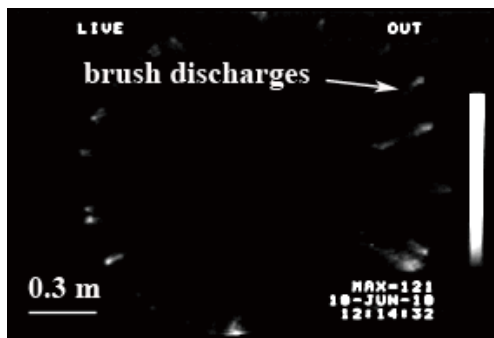
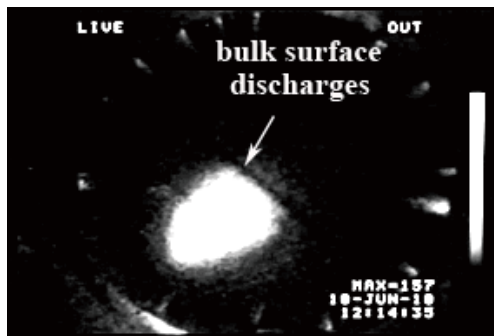


図 6 光センサ型静電気放電検出器を用いたバルク表面放電の検出 (ノイズ光なし)



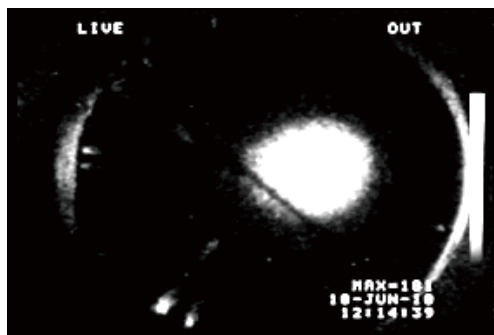
(a) 1.5 s



(b) 3.8 s



(c) 5.5 s



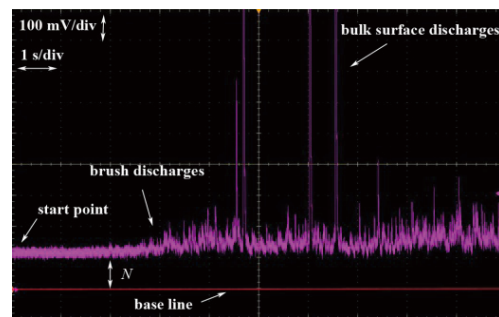
(d) 8.1 s

図7 高感度カメラを用いた静電気放電の検出

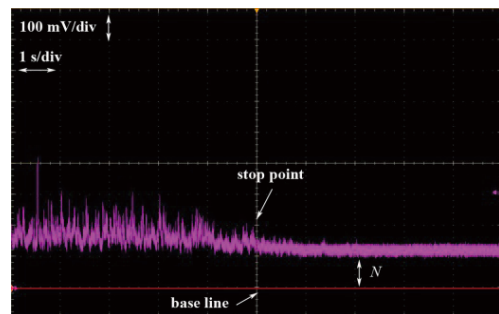
最後に、ノイズ光の下で光センサ型静電気放電検出器によりブラシ放電を検出した結果を図8(a, b)に示す。今回は V_a を 0.35 V を 0.4 V に上げて、放電検出器の検出感度を高くし、オシロスコープの感度も上げて観測した結果である。この結果によると、放電光の検出を開始すると外部光のノイズ値 N が 100 mV あるため、検出信号はベースラインより 100 mV シフトした位置で推移してい

る。粉体試料の投入を開始すると、3秒程度後から小さなパルス信号が発生するのが観測された。これについても、バルク表面放電の観側実験と同様に映像で確認した結果、小さなパルス信号がブラシ放電であることがわかった。一方、バルク表面放電の大きなパルス信号は、ブラシ放電が発生した後に発生し、ブラシ放電とバルク放電が混在して発生する状態が観測された。また、粉体の供給を停止すると両放電のパルス信号共に消滅することも確認された。

以上のことから、光センサ型静電気放電検出器は粉体の貯蔵槽の中で発生するバルク表面放電やブラシ放電の検出に有効である。さらに、光センサ型静電気放電検出器の感度を調整し、着火性バルク表面放電の発生前にブラシ放電を検出、即座に粉体用除電器を使用するなど災害防止対策を施し、爆発・火災を未然に防止することが可能になる。粉体用除電器については、本報告書の「小型防爆構造除電器の開発」を参照のこと。



(a) when silo is getting loading



(b) when silo has stopped loading

図8 光センサ型静電気放電検出器を用いたブラシ放電の検出(ノイズ光あり)

3) 光センサ型静電気放電検出器の検出特性に干渉フィルタの波長が及ぼす影響

光センサ型静電気放電検出器の干渉フィルタの波長が検出特性に及ぼす影響について定量的に調べた。実験は、前述した着火性静電気放電(バルク表面放電)の検出を試みた実験と同じ方法で、干渉フィルタを変えて放電光の検出信号とノイズ信号を観測した。この実験の目的は、

検出信号とノイズ光の信号の差が大きくなる波長域の干渉フィルタを選定することである。実験で使用した干渉フィルタは、実験の目的から半値幅は 20 nm ～ 30 nm 程度で十分と考え、通過波長が重ならないものを選定した。今回、使用した 9 種類の干渉フィルタの通過波長の中心波長 λ と半値幅波長 $\lambda_{1/2}$ を表 1 に示す。

表 1 今回使用した干渉フィルタの通過波長

Optical band-pass filter [nm]	
center wavelength, λ	FWHM, $\lambda_{1/2}$ *
240 ± 3	230 to 250
270 ± 3	257 to 282
300 ± 3	287 to 312
330 ± 3	315 to 345
360 ± 3	345 to 375
400 ± 3	390 to 410
450 ± 3	440 to 460
500 ± 3	492 to 508
600 ± 3	590 to 610

*: $\lambda_{1/2}$, or full width at half maximum (FWHM)

粉体試料を投入したときに、オシロスコープで観測されたパルスのピーク電圧値をバルク表面放電によるパルス検出信号とし、粉体投入を停止したときにベースラインよりシフトした電圧値をノイズ信号として計測した。実験結果を図 9 に示す。同図の中で、バルク表面放電の検出信号を●で示し、ノイズ信号を□で示した。ただし、パルス検出信号の値は、検出した 3 つパルス信号のピーク電圧値の平均値である。この結果によると、 λ が 270 nm ～ 400 nm の範囲では、検出信号とノイズ信号に差があり、バルク表面放電の検出が可能であった。また、この波長範囲は、窒素分子 (N_2) の第 2 正帯 (Second Positive System; SPS) の遷移で観測される波長域 (300 nm ～ 420 nm)⁴⁾ とほぼ一致している。したがって、バルク表面放電の発光は N_2 によるものが主であると考えられる。

一方、上記の波長範囲外、例えば、 λ が 240 nm や 450 nm ～ 600 nm の場合はノイズ信号が高くバルク表面放電の検出ができなかった。ノイズ信号の波長に対する変化は、太陽光のスペクトル⁵⁾ に類似しているので、ノイズの主なものは太陽光であると思われる。また、バルク表面放電のパルス信号が検出された波長域 (300 nm ～ 420 nm) で、パルス検出信号 (S) とノイズ信号 (N) の S/N 比を調べた。この S/N 比の値が大きいほど、パルス信号とノイズ信号との差が大きく、静電気放電によるパルス信号を検出しやすいといえる。その結果、270 nm の干渉フィルタの場合、S/N 比は 10、300 nm では 33、330 nm

では 48、360 nm では 28、400 nm では 3.2 であった。ノイズ光の影響を S/N 比で考慮すると、バルク表面放電の検出に最適な干渉フィルタの波長は 330 nm であると結論できる。

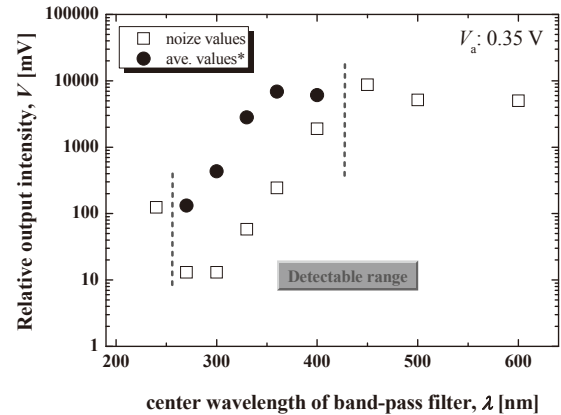


図 9 干渉フィルタの中心波長と検出信号との関係 (*: 3 つの検出信号 (ピーク電圧値) の平均値) (ノイズ光あり)

4 まとめ

粉体を取り扱う工程での静電気放電による爆発・火災の防止を目的とし、光センサ型静電気放電検出器を開発した。本研究では、実規模粉体空気輸送実験設備の貯蔵槽に静電気放電検出器を取り付けてその有効性を調べた。実験結果によると、適切な波長 (270 nm ～ 400 nm) の干渉フィルタを用いることで、太陽光などのノイズ光のある環境下でも静電気放電を的確に検出できることがわかった。また、放電光とノイズ光の信号出力の差が一番大きくなり、静電気放電の検出に最適な干渉フィルタの波長は 330 nm であった。さらに、着火性が強いバルク表面放電の発生前の発光の弱いブラシ放電を検出できたことから、本検出器は粉じん爆発・火災の防止に役に立つものであることが確認された。

文 献

1. M.Glor: conditions for the appearance of discharges during the gravitational compaction of powders, *J. electrostatics*, 15, pp.223-235(1984).
2. R. Siwek, C. Cesana: Ignition behavior of dusts, *Process Safety Progress*, 14, 2, pp.107-119, (1995).
3. IEC50404:Electrostatic -Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity (2003).
4. R.W.B. Pearse: The identification of molecular spectra, London : Chapman and Hall, p.217 (1976).
5. JIS-C8911:Secondary reference crystalline solar cells, p.1310 (1988).