

粉体用サイロ内における静電気(コーン)放電の発生と その危険性

令和7年 4月21日 (月)

労働安全衛生総合研究所
崔 光石

choiks@s.jniosh.johas.go.jp
042-491-4512 (内線630)

今回のターゲット！

(1) コーン放電とは何か

- ・ 粉体用サイロ内で発生する静電気放電の概要

(2) コーン放電の可視化と分類

- ・ 実験による放電現象の観察とその特徴的な分類

(3) 金属製突起物からの放電と電荷量

- ・ 突起物の有無や形状による放電特性の変化

(4) コーン放電のエネルギー(推定)

- ・ 放電エネルギーの定量化と危険性の考察

(5) コーン放電に関する誤解とよくある質問

- ・ 現場で誤認されやすい点とその正しい理解

(1) 粉体用サイロ内での静電気(コーン)放電*とは？

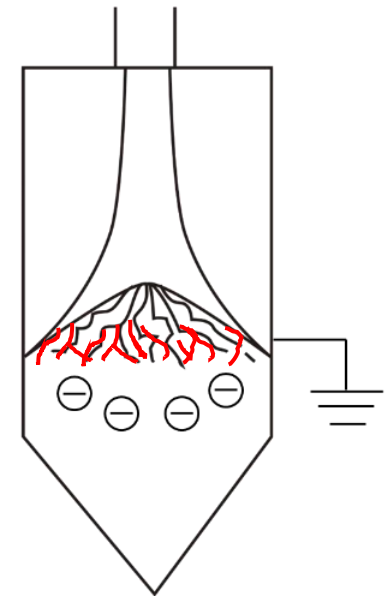
(一般論:コーン放電)

① 帯電した粉体が堆積して形成されるコーン状のヒープ(heap)の表面で発生する静電気放電を指す。

② 体積抵抗率の高い粉体に電荷が継続的に蓄積され、表面電界が臨界値に達した際に、粉体表面から間欠的に発生する放電現象である。

③ 正確な条件は明らかになっていないが、以下のような条件を満たす場合に発生しやすい。

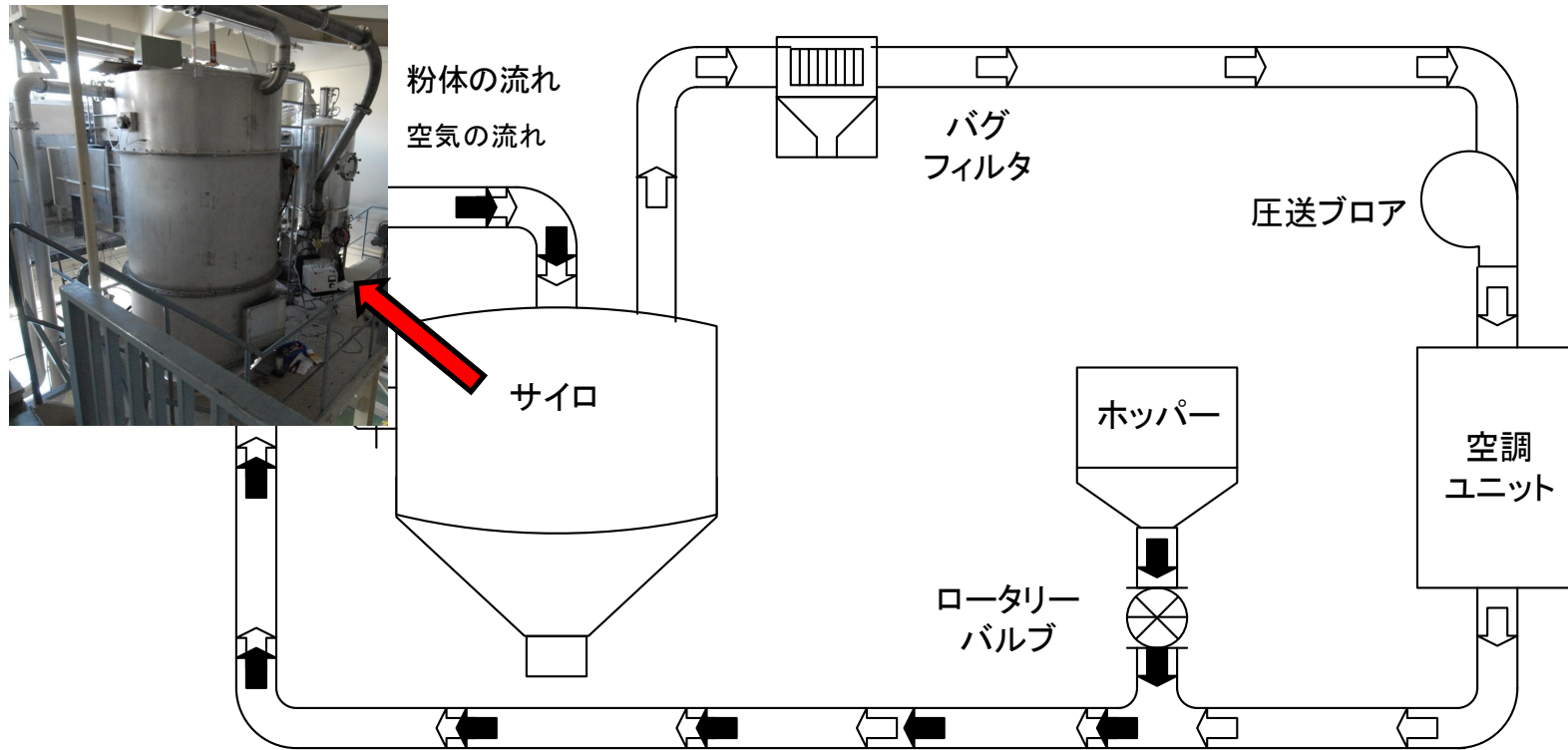
- ・粒径が大きいこと: 粒径が1 mm以上
- ・体積抵抗率が高いこと: 体積抵抗率が $10^{10} \Omega \cdot m$ 以上
- ・質量比電荷が大きいこと: 質量比電荷が $1 \mu C/kg$ 以上
- ・充填流量が多いこと: 数千kg/h以上



.....
*静電気安全指針(2007)p.26

(2) サイロ内での静電気(コーン)放電の観察とその分類*?

実規模粉体空気輸送実験設備



- ・空気温度: 30 °C ・空気湿度: 30 % ・空気風量: 11.5 m³/min
- ・粉体の供給量: 約0.68 kg/s
- ・粉体を投入ホッパーに入れ、ロータリーバルブを回転させて配管内に流す。その後、圧送ブロアによって、配管内に粉体を空気輸送し、サイロに連続投入する。

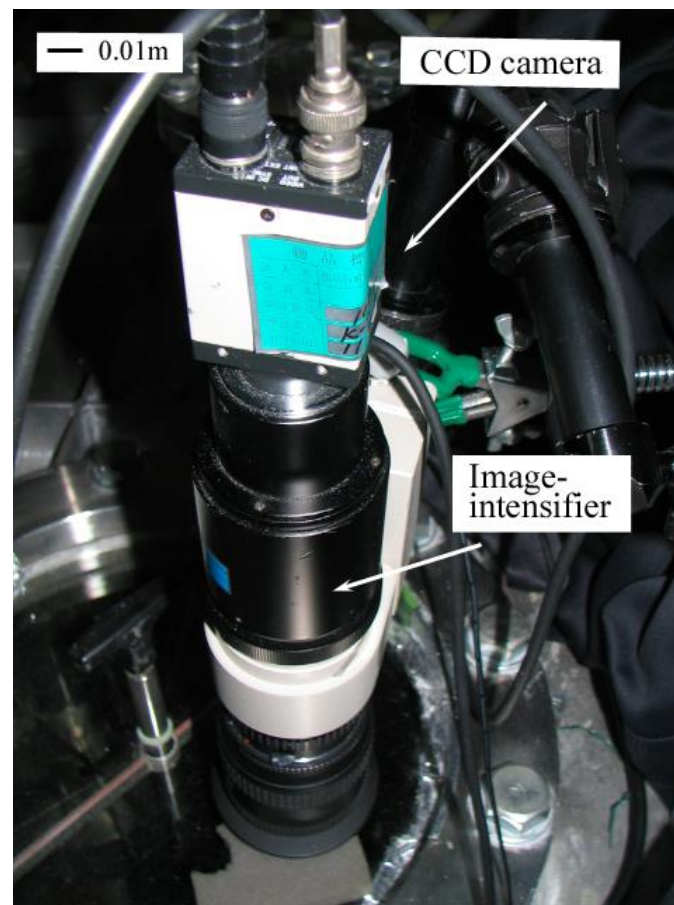
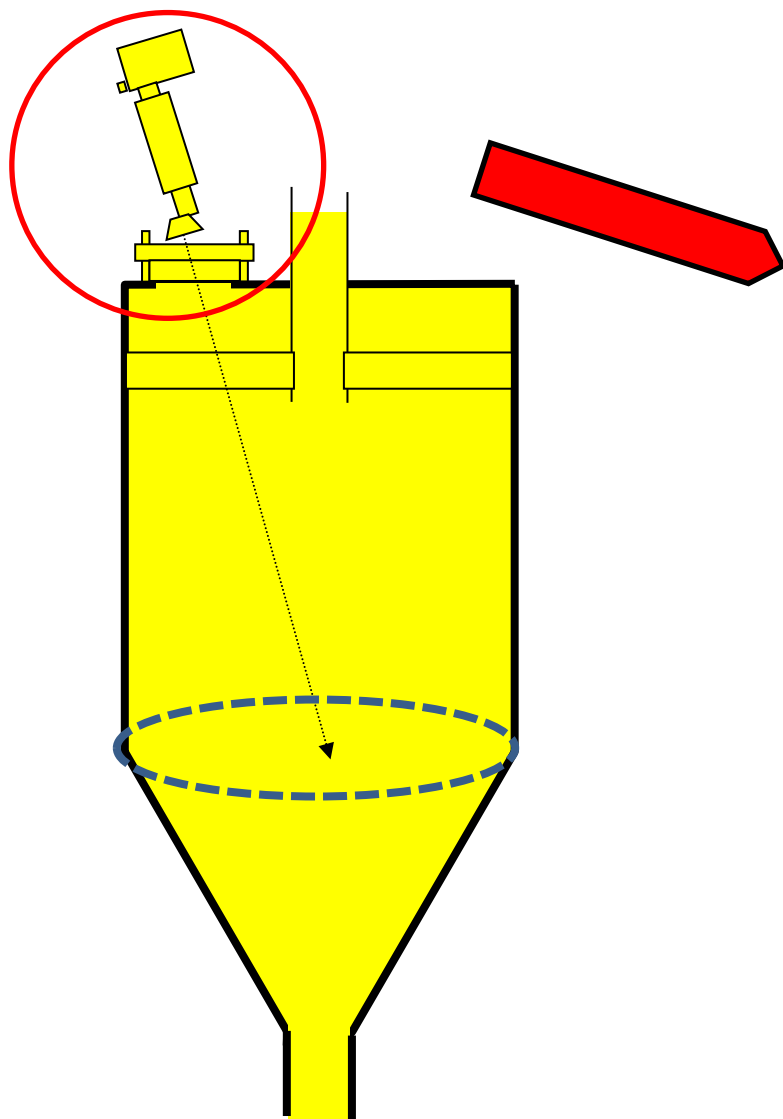


ポリプロピレン(PP)粉体

3 mm, 約850 kg

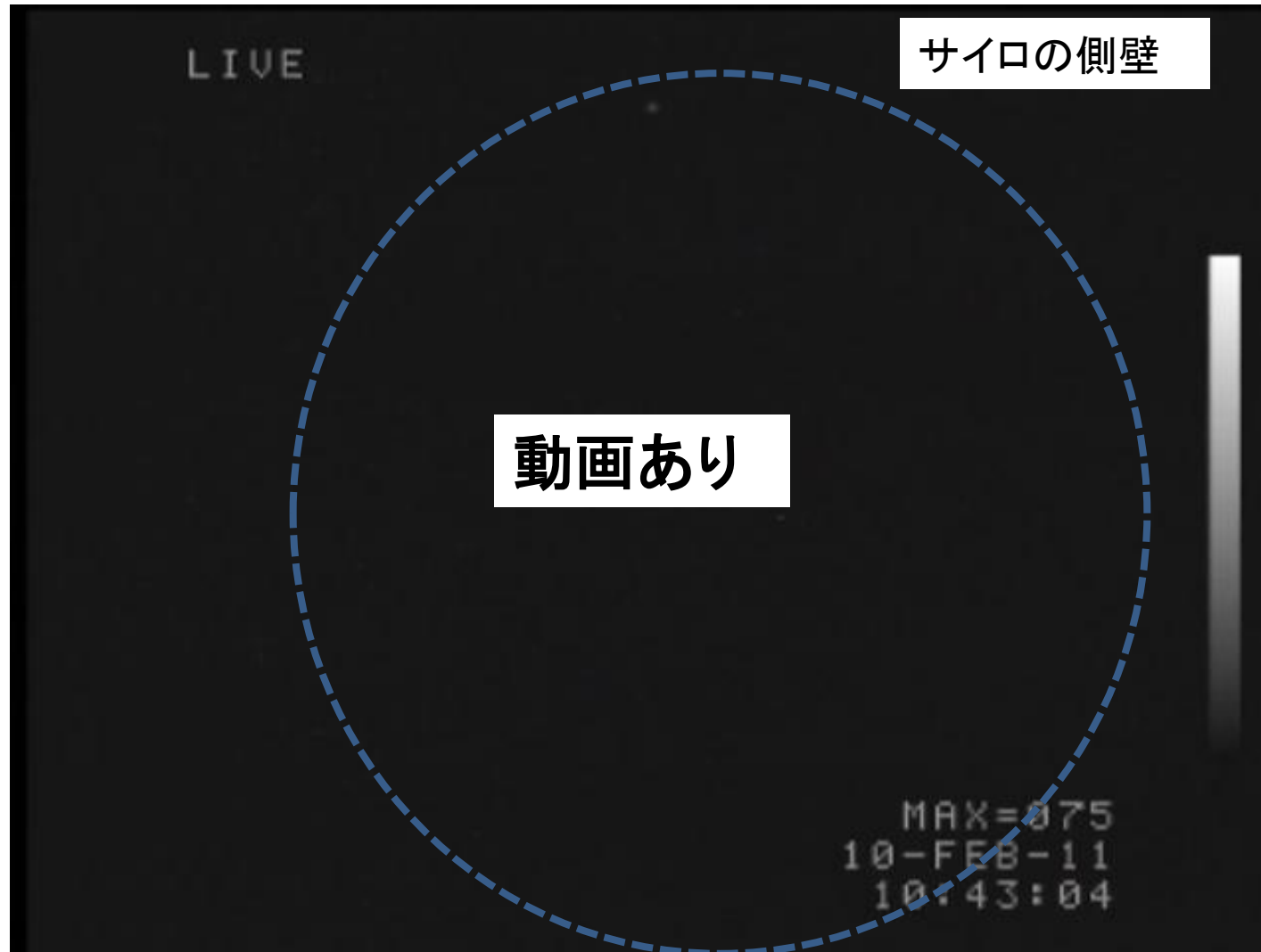
*Choi et al : Experimental study on electrostatic charges and discharges inside storage silo during loading of polypropylene powders (2018) Powder Technology, Volume 331, pp. 68–73.

サイロ内での静電気放電の可視化



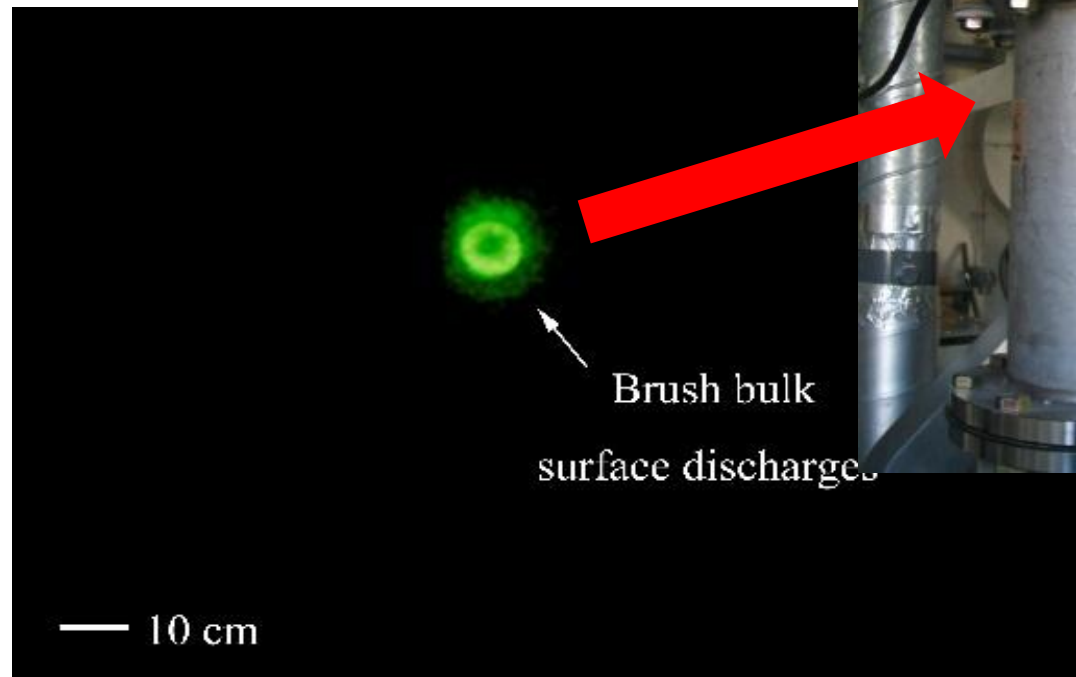
サイロ内での静電気放電(動画)

8 times fast forwarded video



- PPを毎分40 kgの流量でサイロに連続投入し、総量が850 kgに達するまで投入
- 今回の実験での投入粉体の q は、約 $-12 \mu\text{C}/\text{kg}$ であり、充填時間にはよらず一定

Gain 7, 露出時間 2s

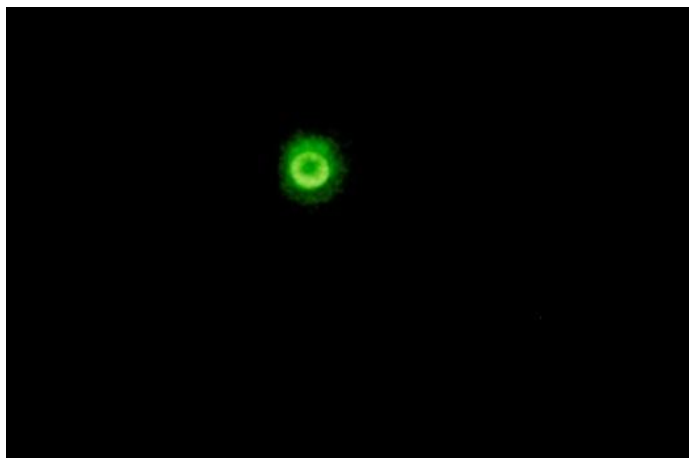


ポイント1

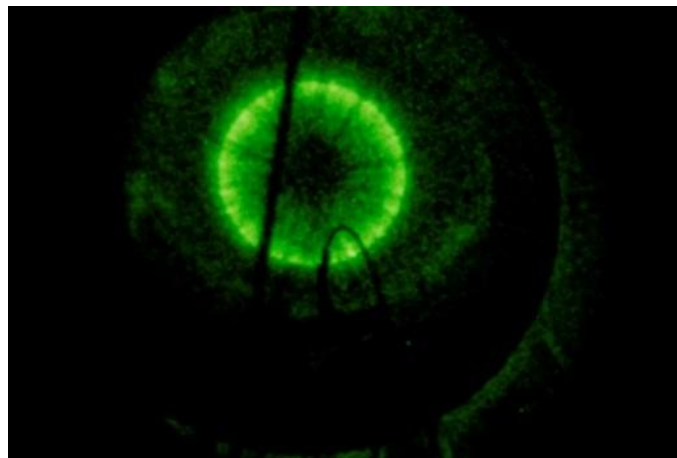
5 kg, 約7 s*

粉体をサイロ内に投入直後、明らかな静電気放電が観測された。

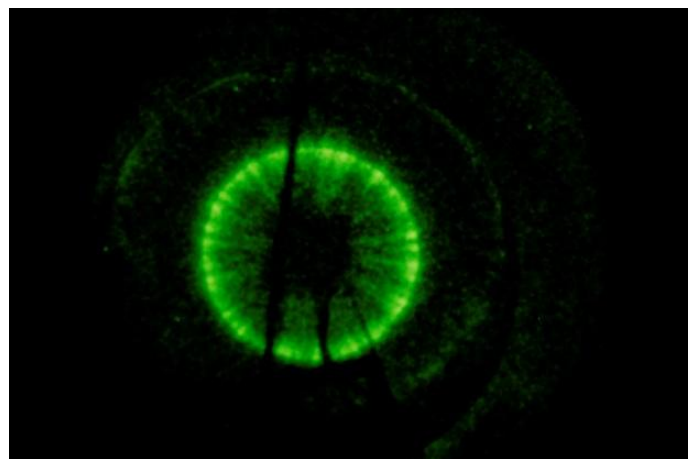
*サイロに粉体投入からの経過時間を示す。



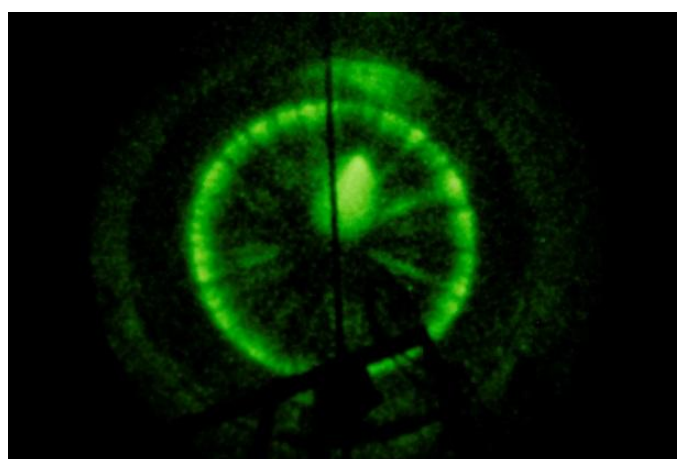
5 kg, 約7 s



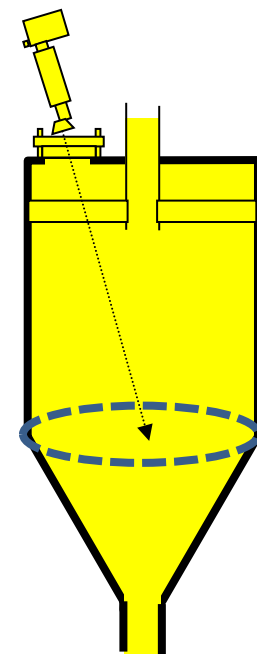
50 kg, 約80 s



50～100 kg, 約150 s



100～200 kg, 約310 s



ポイント2

- ・ 発光の直径は、堆積時間と共に変化しているが、これは粉体が堆積していく過程で堆積粉体の直径が変化しているからである。

ポイント3

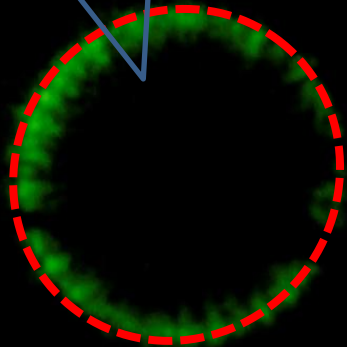
静電気放電の分類

① ブラシバルク表面放電

=ブラシ放電

It occurred conspicuously between the grounded metal silo wall and settled PP powders.

粉体をサイロ内に投入している間はずっと発生する(特に、投入初期と終了間際)。

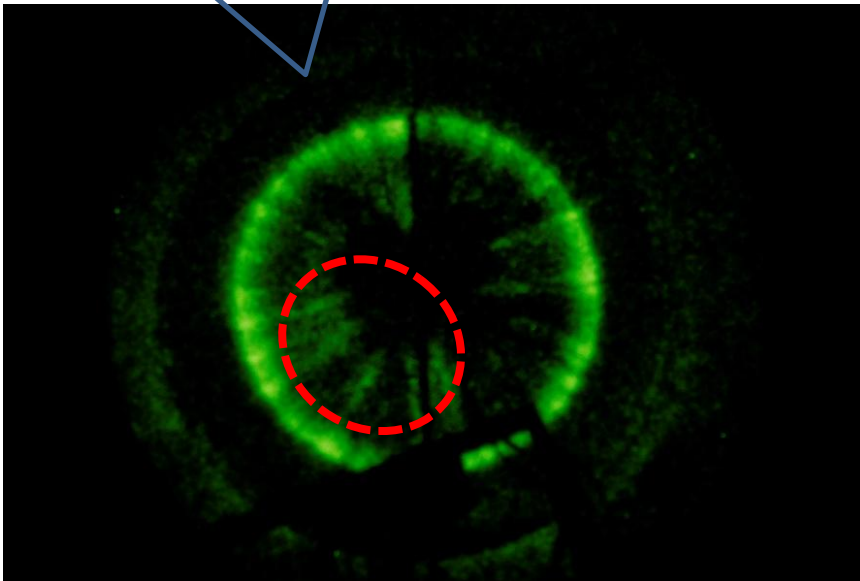


- 接地されたサイロの側壁と堆積した帯電粉体の接触部分で集中的に発生する。
- 放電エネルギーは最大4 mJ程度である。一般の可燃性のガス、溶剤蒸気の他に、粒径が数十 μm 以下の一部の可燃性粉体の着火源になり得るが、特に着火危険性が高い可燃性粉体以外には可燃性粉体の着火源にはならない。

② 線状バルク表面放電

=線状放電

Linear bulk surface discharges occurred between the wall and the center of silo.



投入初期と終了間際を除き、いつでも発生する。

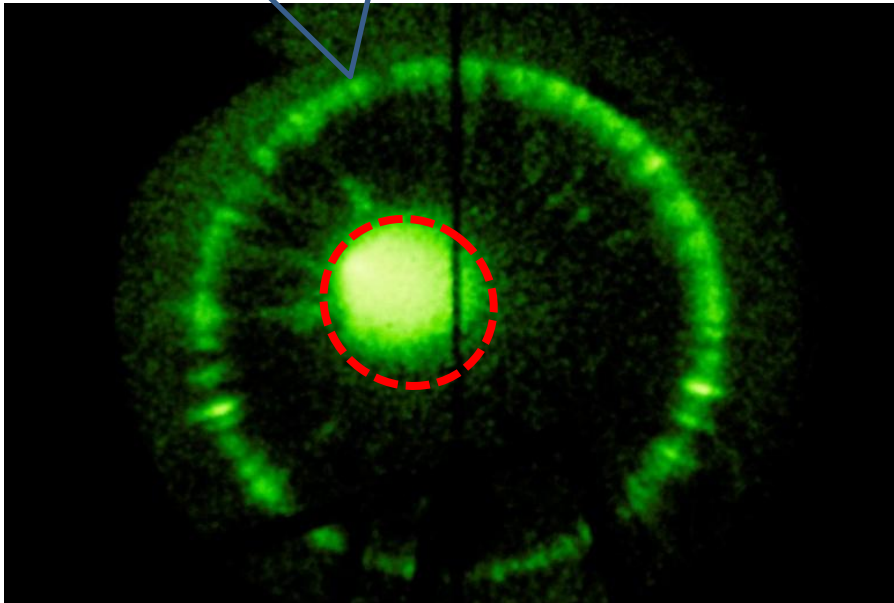
- ブラシ放電が強くなり伸展したもの。
- 堆積粉体の中央部と側壁との電位勾配が大きくなって、サイロ側壁で発生したブラシ放電がストリーマ状に直線的に堆積粉体の中央部に向かって延びたものである。

③ 面状バルク表面放電

=面状放電

Almost all broad bulk surface discharges occur around the center of the silo, only occasionally.

投入中期以降に発生する
(約170s, 堆積粉体の直径: 約0.98 m)



- 主に、線状放電の先端部から放電が発生していない堆積粉体の表面に広がる。
- 線状放電の先端部で毎回発生するものではなく、先端部近傍の堆積粉体の帯電量が十分大きい時にだけ発生するものである。

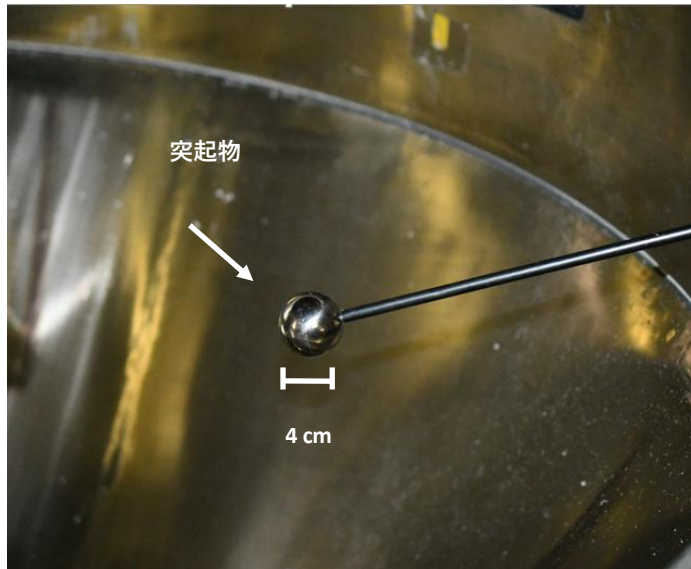
(2) サイロ内でのコーン放電の観察(可視化)とその分類？

まとめ

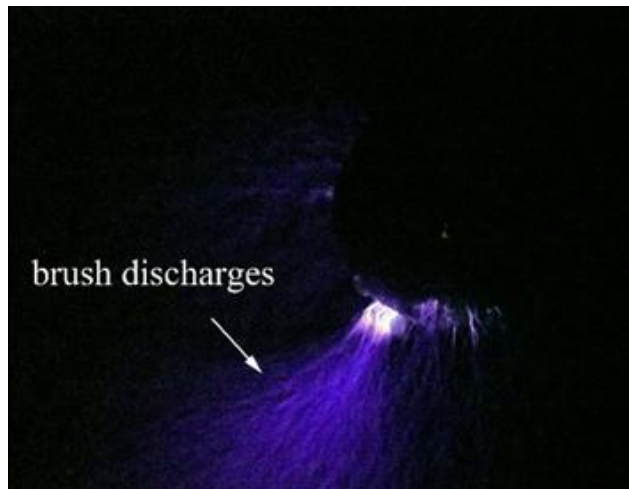
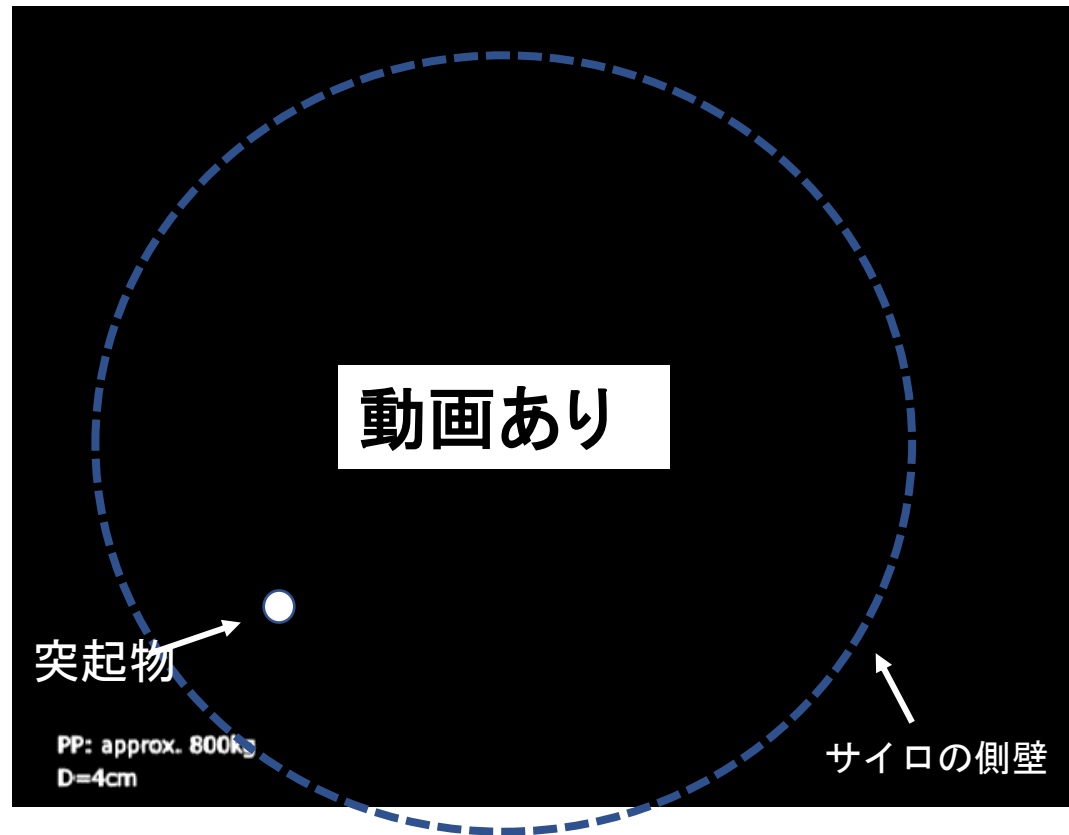
- ① 粉体をサイロに投入した直後から、静電気放電が発生し始める。
- ② その後、粉体がサイロ内に投入・堆積していく過程において、サイロ内で発生する静電気放電は大きく2種類、「ブラシ放電」と「バルク表面放電」に分類される。
- ③ さらに、バルク表面放電(コーン放電)はその形態により、「線状放電」と「面状放電」の2種類に分類される。

(3) サイロ内に金属製突起物からの静電気放電*？

金属製突起物

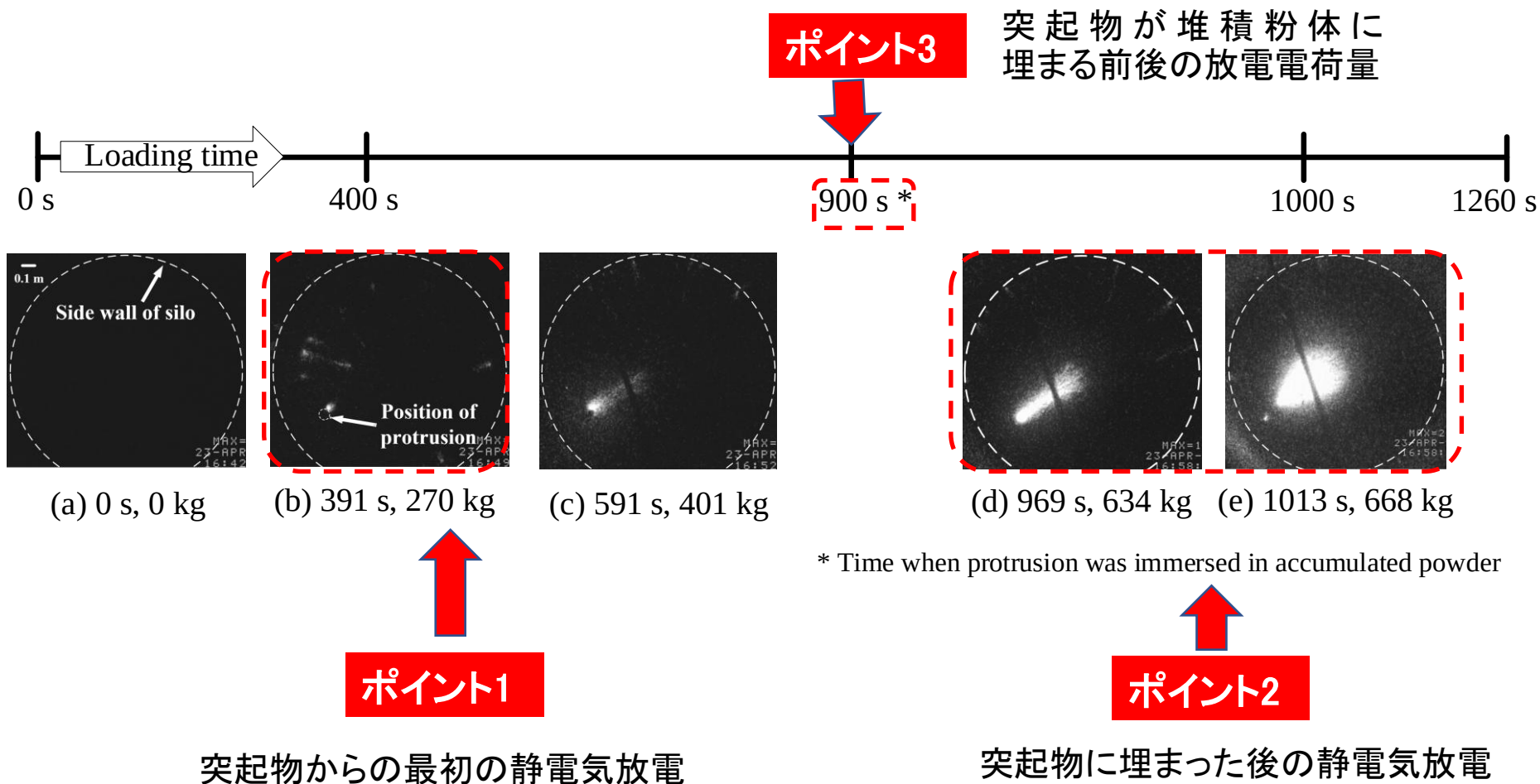


サイロ内の突起物からの静電気放電(動画)



.....
*Choi et al (2021) Experimental study on electrostatic discharges from metal protrusion inside a silo during continuous loading of polypropylene powder. Powder Technology, Vol. 391, pp. 362-368.

粉体連続投入時間における突起物からの静電気放電



粉体連続投入における突起物の放電電荷量 Q の経時変化

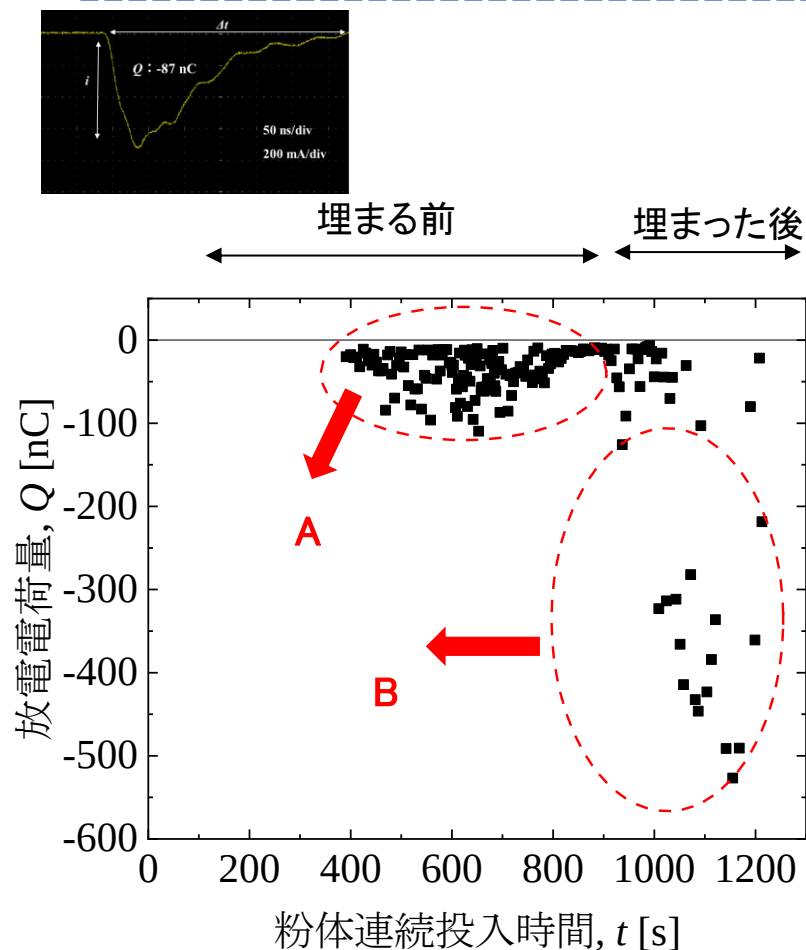


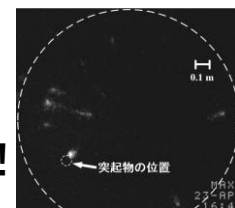
図 粉体連続投入における突起物からの Q

最初の静電気放電発生時間:

391秒



動画での時間と一致!



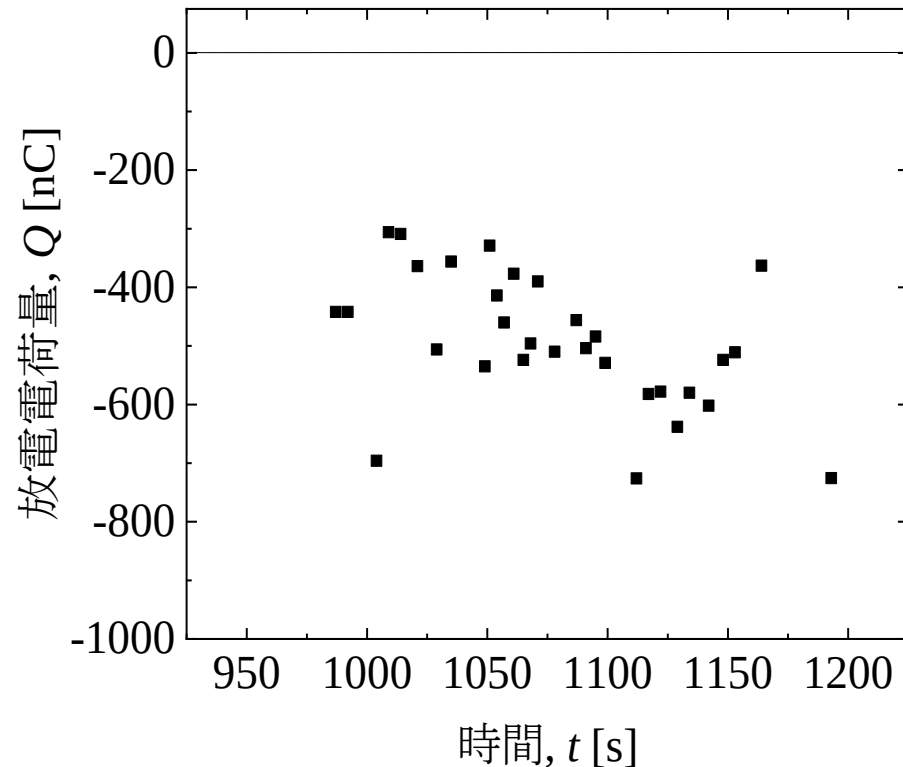
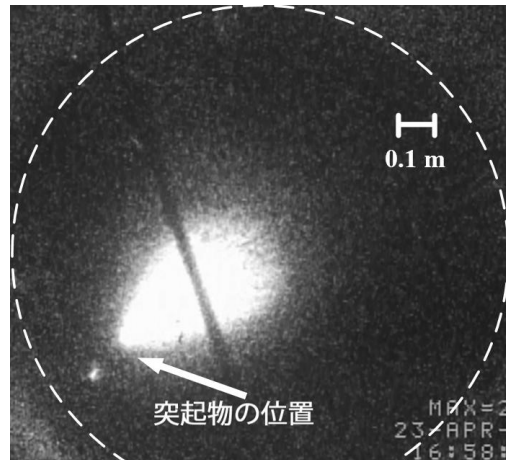
Aゾーン: 埋まる前の突起物からの Q

- ・粉体投入の経過と共にその Q は徐々に大きくなり、やがて小さくなる傾向!
- ・以前の研究成果*と同様

Bゾーン: 埋まった後の突起物からの Q

- ・埋まる前に発生した放電の Q より遥かに大きくなる傾向 (**レンジオーバー**: 正確な測定不可)

B領域における再実験時のQ



- 突起物が埋まった後の Q は、突起物の埋没距離が増えるとともに増加する傾向で、今回の実験で最大値は-726 nCであった。
- ブラシ放電から沿面放電に移行(スーパーブラシ放電?)。
- 静電塗装機を使用した作業現場における静電気リスク評価をする際の、粉体への着火リスク管理値の200 nC(絶対値)*を3倍も超えているため、安全なレベルではないことが示唆された。

* EN50050-2 (2013)

(3) サイロ内に金属製突起物からの静電気放電？

まとめ

- ① 突起物から非常に強い静電気(ブラシ)放電が発生することが確認された。
- ② 突起物からの最初のブラシ放電は、粉体表面からの高さ26 cm付近で、ブラシ放電の発生閾値である電界強度を超えた時点で発生し、時間の経過とともに多様な強い放電が観察された。
- ③ 突起物から発生するブラシ放電の強度および電荷量は、突起物が粉体に埋没する前と後で明確に異なり、埋没後の方がいずれも大きくなる傾向がみられた。

(4) サイロ内で発生するコーン放電のエネルギーは？

- ・コーン放電の放電エネルギー W [mJ]は、数十mJ程度以下であり、ガス・蒸気や粉体の着火源となる可能性がある。
- ・なお、直径 D が0.5～3.0 mの接地されたサイロで、粉体の質量中位径 d が0.1～3 mmに対して、コーン放電の最大エネルギーは次の実験式によって見積もることができる*。

放電エネルギー W [mJ]

$$W = 5.22 D^{3.36} d^{1.46} \quad \text{——— 式1}$$

ただし、 $0.5 \text{ m} < D < 3 \text{ m}$, $0.8 \text{ mm} < d < 3.0 \text{ mm}$).

- ・ 今回、使用したサイロ D は1.5 m、粉体 d は 3 mmであり、式(1)より W は約100mJとなる。

.....
*静電気安全指針(2007)p.26

(5) コーン放電に関するよくある誤解と質問

誤解1:

コーン放電は、名前のとおり、粉体がコーン状(円錐)に堆積したときにしか発生しない。

A: 投入される粉体の比電荷や粒径などの条件により、サイロ内に堆積する粉体の形状は多様に変化する。実際の現場では、粉体の帯電性が高くなると、投入過程で同じ極性を帯びた粒子同士が反発するため、堆積形状は典型的なコーン状(山)ではなく、谷のような形になることが多い。このように、堆積形状がコーン状でない場合でも、コーン放電が発生する可能性は十分にある。

誤解2:

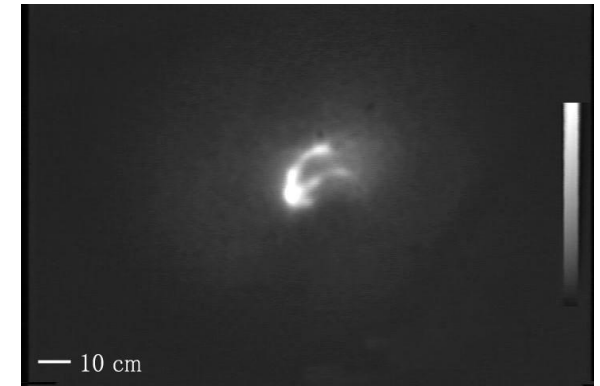
サイロに投入する粉体のうち、主成分の粒径が1 mm以上であり、添加剤として加えられる粉体が μ mサイズの場合には、たとえコーン放電が発生したとしても、着火の危険性はない。

A: 主成分として粒径1 mm以上の粉体が使用されている場合でも、添加剤として μ mサイズの微粉末が含まれている場合には、十分な注意が必要である。粒径1 mm以上の粉体は強いコーン放電を引き起こす可能性が高く、また μ mサイズの微粉末は最小着火エネルギー(MIE)が小さいため、わずかな放電エネルギーでも着火しやすい傾向にある。したがって、これらが共存する環境下では、コーン放電による着火リスクが顕著に高まると考えられる。

誤解3:

コーン放電は、粒径が1 mm以下、特に数十 μm ～100 μm 程度の微粉体においては発生しない。

A: 微粉末を取り扱う場合、強いコーン放電が頻繁に発生する可能性は低いですが、コーン放電そのものは発生する可能性はある。ただし、その放電の発生形態には変化が見られる。微粉末は帯電するとサイロ内壁に付着しやすく、堆積粉体と内壁との間ではブラシ放電が発生しにくくなる。一方、堆積粉体の中心部では、面状のコーン放電が生じる可能性が高いと考えられる。

**誤解4:**

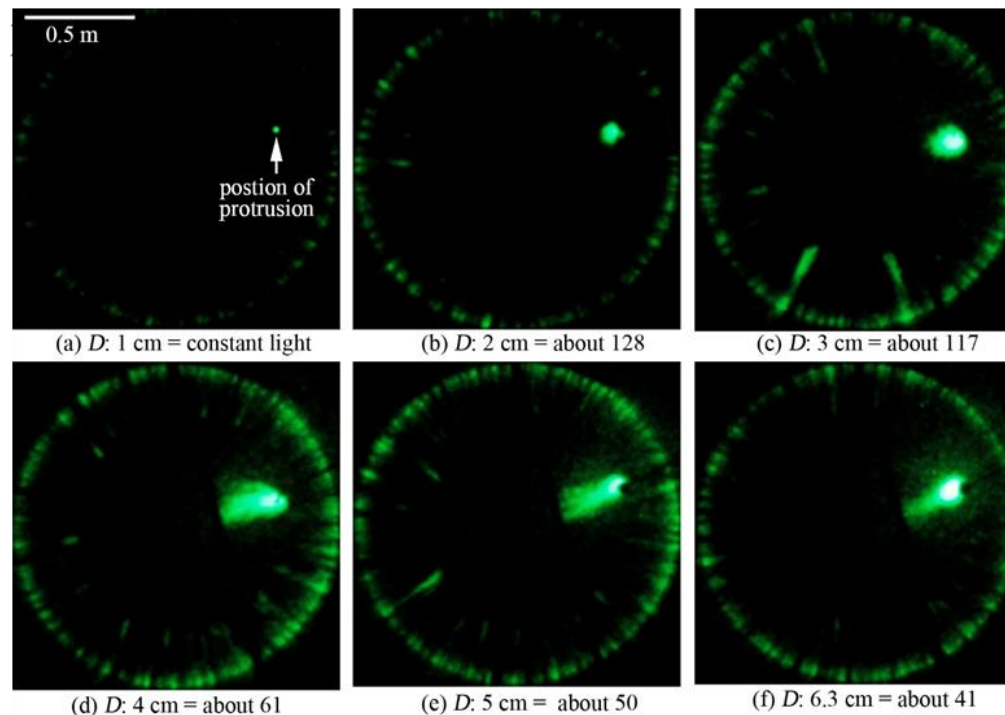
コーン放電の防止策として、金属製サイロの接地を外すことは有効である。

A: 金属製サイロの接地を外すことは、コーン放電の防止にはつながらない。むしろ、帯電した粉体による静電誘導などの影響で、接地されていないサイロから周囲の接地された金属に向かって、着火性の高い火花放電が発生する可能性が高まる。

質問1

サイロ内にある金属製の突起物の大きさ(直径)は、静電気放電(ブラシ放電)の発生に影響しますか？

A: 突起物の直径は放電特性に影響を与える要因であり、以下の図に示すとおり、直径が大きくなるにつれて、発生するブラシ放電は一般的に強くなる傾向がある。実験条件によって異なるものの、直径4 cmの突起物で最も強い放電が観測されたとの報告もある。一方、直径1 cm程度の小さな突起物では、突起部から連続的に光が発せられ、典型的なコロナ放電が生じる。このようなコロナ放電が発生している場合、周囲のコーン放電が抑制されることがある。



質問2

コーン放電を防止するために、最も重要なポイントは何でしょうか？

A: 粉体の体積抵抗率を低下させることが最も有効である。比電荷の値で管理を行っている企業もあるが、比電荷が小さい場合であっても、粉体の体積抵抗率が高ければ、いずれコーン放電が発生する可能性がある。逆に、比電荷が大きくても、体積抵抗率が低い場合には電荷が速やかに放散されるため、コーン放電が発生するリスクは低下する。

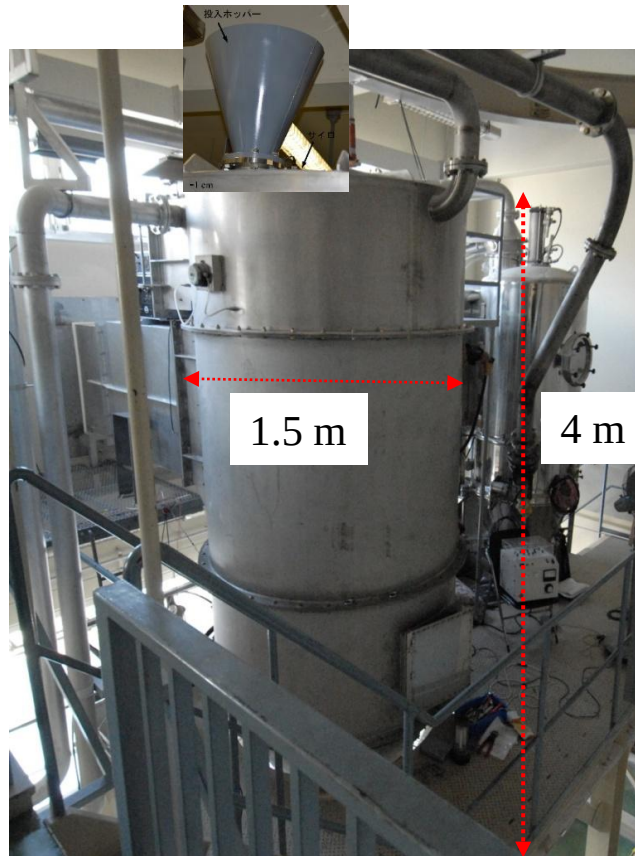
(庄山研究員より、粉体の体積抵抗率とコーン放電との関係に関する一部の研究事例が紹介される予定！)

質問3

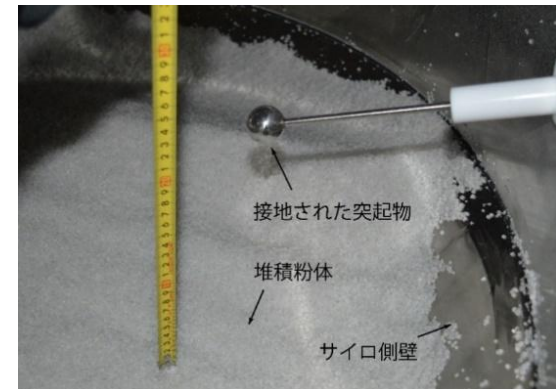
コーン放電は、粉体を空気輸送ではなく作業者が手作業で投入する場合には発生しないのでしょうか？

A: 作業者が手作業で投入する場合にもコーン放電が発生する可能性は否定できない。実際、金属製突起物がある状態で、作業者が手作業で粉体を投入しコーン放電の有無を観察した結果、放電の強さは空気輸送時に比べて弱かったものの、コーン放電は確認された。

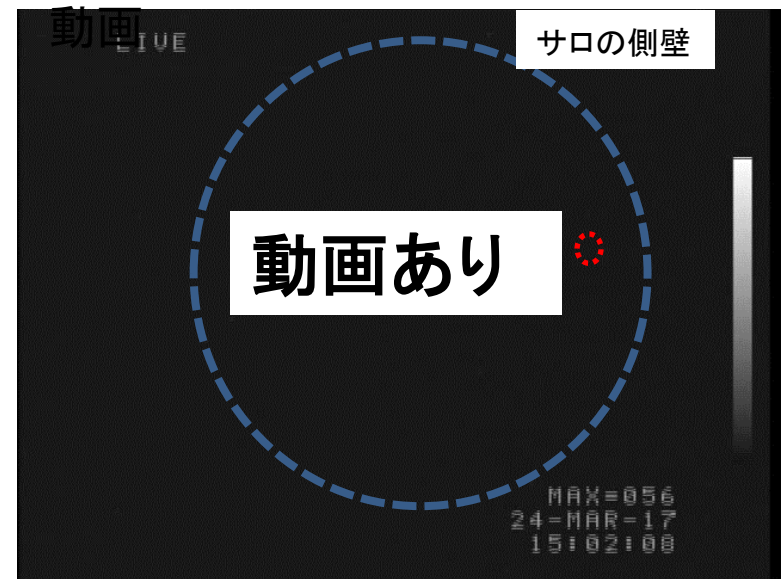
ホッパー



実規模粉体用サイロ



模擬突起物(先端の直径:3 cm)



- ・粉体の供給量:約2.5kg/s
- ・粉体サイロ内に模擬突起物を堆積粉体(約400 kg)から約30 cm上、側壁面から約30 cm離れた位置に設置。絶縁性容器(20 L、複数)を使用し、粉体(約50 kg)をホッパーからサイロへ投入。
- ・実験環境:20 °C、30 %