

4. 粉じんの最小着火エネルギー測定における放電条件の影響*

山隈瑞樹**, 児玉 勉**, 汪 佩蘭***

4. Effect of Discharge Conditions on Measuring Minimum Ignition Energy for Dusts*

by Mizuki YAMAGUMA**, Tsutomu KODAMA** and Pei-Lan WANG***

Abstract : Minimum Ignition Energies (MIEs) for dusts have long been measured using the Hartmann test tube apparatus. In the apparatus, the static energy stored in a capacitor is supplied to the air-gap to cause an incendiary spark discharge. In accordance with the IEC standard, an inductor of 1-2 mH should be serially connected in the circuit to prolong the duration of a discharge in order to facilitate the ignition of dust. In the light of actual conditions where combustible dusts are handled, however, another passive element like a resistor should be taken into account. In this context, resistors of 25 k Ω - 500 k Ω were connected to the electric circuit of an apparatus in place of the inductor, and then the measurements of ignition energies for sugar powder were carried out. The minimum ignition energy was 6.8 mJ, much smaller than the value of 27 mJ taken with the inductor. Discharges resembled glow discharges, which have longer duration and higher gap voltage than arc discharges. About two to twelve percent of the static energy stored in the capacitor, depending on the resistances, was released as a discharge. Generally, higher resistances caused more energetic discharges, contrary to our prediction.

Keywords ; Hartmann tube, Minimum ignition energy, Dust explosion, Glow discharge

1. 緒言

可燃性粉体の静電気放電による着火エネルギーの測定には、圧縮空気を利用して円筒内に供試粉じんを分散させた後、同円筒内の電極間で放電を起こし着火させる方式（ハルトマン式）が従来から一般的に用いられている。この場合、着火エネルギー測定回路の回路素子としては電荷を蓄積するキャパシタの他にインダクタンスを放電路に直列に挿入して、放電波形を振動的かつ放電持続時間を長くすることにより放電時の衝撃波を弱め、粉体に放電エネルギーが有効に伝わるように工夫している¹⁾。

一方、産業現場では、設備、作業員、原材料等の帯電に伴う放電が粉じんへの着火源となり、爆発・火災

等の災害を引き起こしたと考えられる事例が数多くある。このような場合、静電気放電は、前述の着火エネルギー測定回路によるものとは若干異なった様相を呈するものと考えられる。たとえば、帯電物体として人体、塗装された金属製粉体容器等を想定した場合には、放電回路には数 k Ω ～数 M Ω の抵抗が含まれることになるので、インダクタンス成分よりも抵抗成分の影響を考慮すべきである。このような観点から、ハルトマン式最小着火エネルギー試験装置の放電回路に抵抗を挿入し、抵抗値、電極間隔等の放電条件が最小着火エネルギー（Minimum Ignition Energy.以下、MIE という。）にどのような影響を及ぼすかについて実験し、検討を行った。

*平成9年11月28日、第30回安全工学研究発表会において一部発表。

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

***北京理工大学 Beijing Institute of Technology

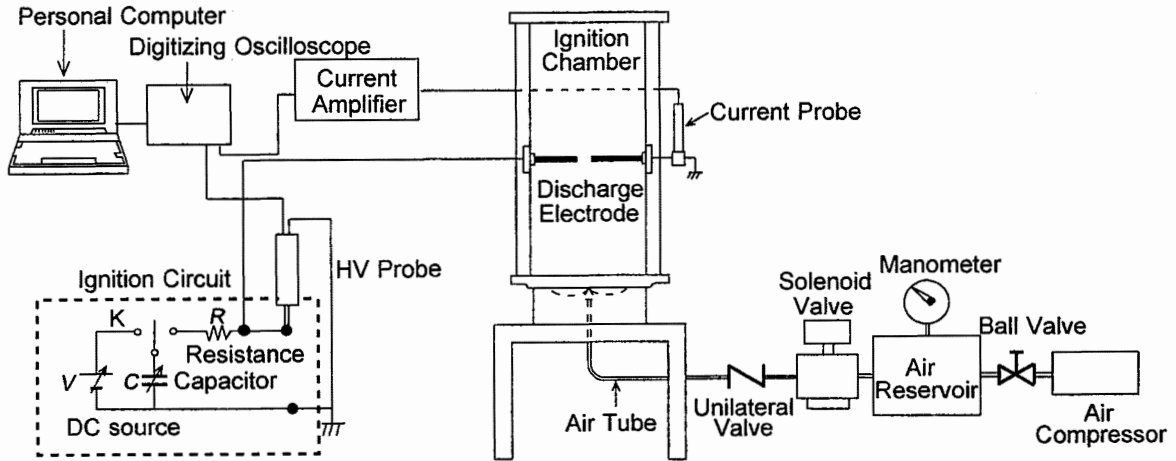


Fig. 1 Apparatus for measuring Minimum Ignition Energy of dust (Hartmann tube).

粉じん最小着火エネルギー試験装置（ハルトマン式）

2. 実験装置及び方法

本研究で使用した実験装置を Fig. 1 に示す。試験装置本体は、吹き上げ式粉じん爆発性試験装置（アマノ株式会社製）を用いた。着火エネルギー供給回路の抵抗値及び静電容量値、並びに爆発筒内の放電電極間隙を変化させることにより放電エネルギー及び放電の持続時間を調整した。放電時の電極間電圧並びに電流波形は、それぞれ高電圧プローブ（Tektronix 社製，P 6015 A）並びに電流プローブ及び増幅器（同社製，AM 503 S）を介してデジタルオシロスコープ（同社製，TDS 620）に取り込み、観測した。さらに、そのデータをパーソナルコンピュータに転送し、放電電力、放電エネルギー、放電持続時間等の計算を行った。

試験粉体として、毒性、分散性、取扱い性等を考慮して、市販の砂糖粉（砂糖 98%，でんぷん加水分解糖 2%，粒径中央値 $D_{50}=80 \mu\text{m}$ ）を選定した。これをシリカゲル入りのデシケータに一日以上放置して乾燥させた後、着火試験に供した。

所定の量の供試粉体を爆発筒内にセットした後、電磁バルブを開いて圧縮空気（0.07 MPa）を送り込み、筒内に分散させ、バルブ開放から 0.2 s 後にスイッチ K を閉じ放電を行った。

着火・非着火の判定に際しては、放電により明らかに爆発した場合に着火とし、爆発に至らない場合にはこれを最大 10 回繰り返した。10 回以内で爆発しない場合には非着火と判定した。

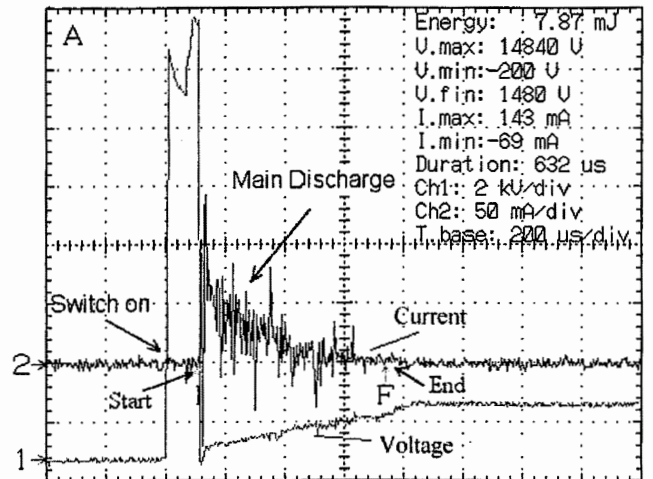


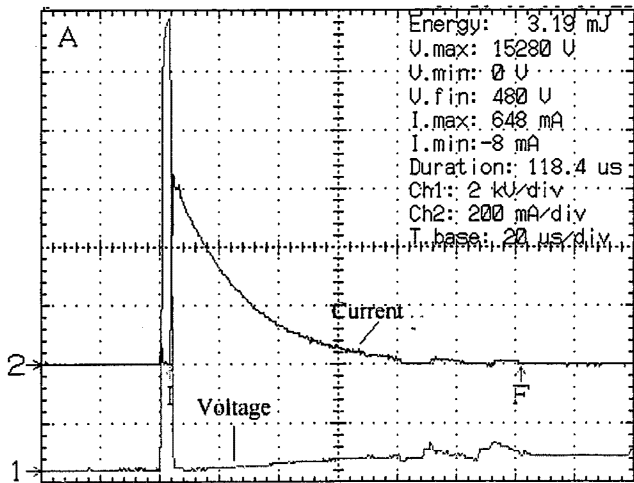
Fig. 2 Typical waveforms of discharge current and voltage acquired by "sample mode". ($R=200 \text{ k}\Omega$, $\text{gap}=4 \text{ mm}$, $C=1000 \text{ pF}$, $V=15 \text{ kV}$)
放電電流及びギャップ間電圧波形

3. 実験結果

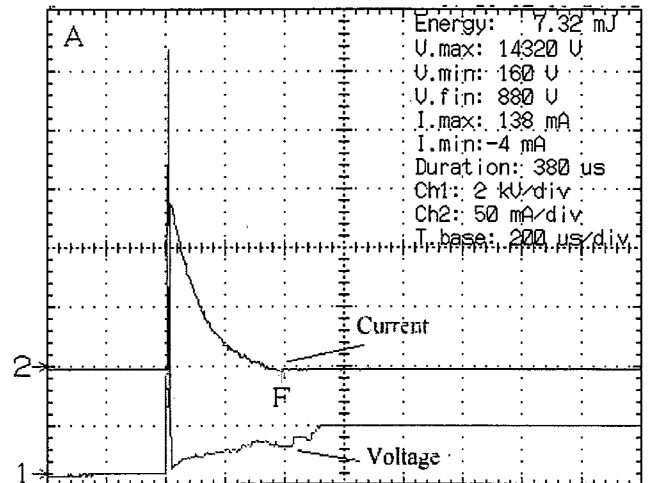
3.1 放電波形の特徴

Fig. 1 の放電回路のスイッチ K を閉じて電極間に放電を発生させ、そのときの放電波形を観測した。放電回路に抵抗を挿入した場合の放電波形の一例を Fig. 2 に示す。これは、抵抗、放電ギャップ、キャパシタの静電容量及び充電電圧をそれぞれ、 $200 \text{ k}\Omega$ 、 4 mm 、 1000 pF 及び 15 kV としたときに得られた放電ギャップ間の電圧及び電流波形である。

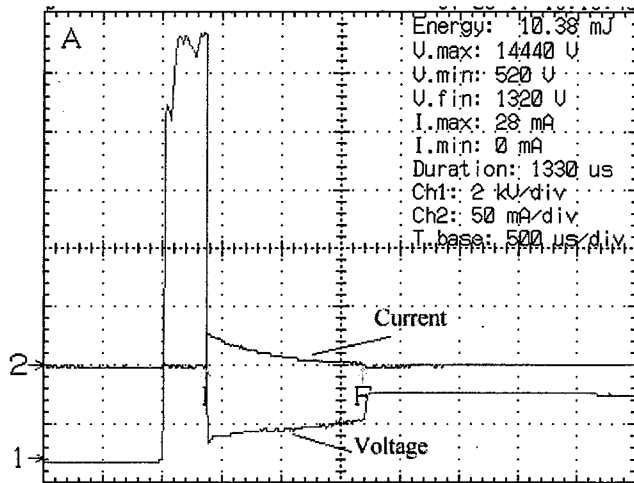
同図からわかるように、電圧印加直後 (Switch on)、波高値の小さい衝撃コロナ放電が極く短時間生じた後、若干の時間的遅れ（火花遅延時間）を伴い主



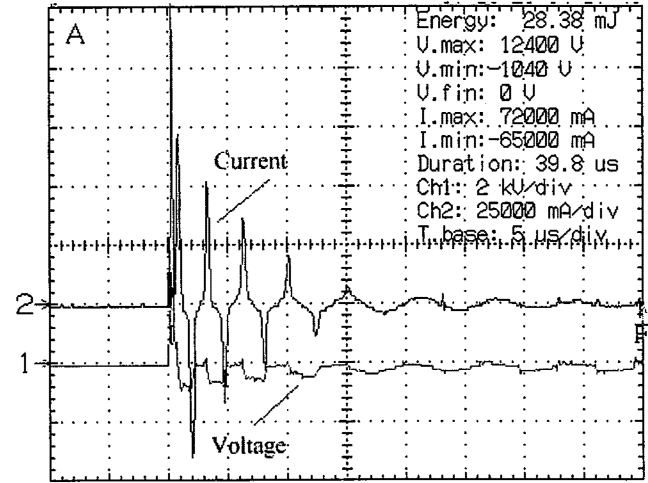
(a) $R=25\text{ k}\Omega$, gap= 4 mm, $C=1000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$



(b) $R=100\text{ k}\Omega$, gap= 4 mm, $C=1000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$



(c) $R=500\text{ k}\Omega$, gap= 4 mm, $C=1000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$



(d) $L=0.94\text{ mH}$, gap= 4 mm, $C=1000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$

Fig. 3 Discharge current and gap voltage waveforms acquired by “high resolution mode”.
放電電流及びギャップ間電圧波形の例 (平均化波形)

放電 (Main discharge) が始まる。主放電の放電電流は放電開始 (Start) 直後に最大値に達し、以後指数関数的な減少をする。電流の変化は滑らかではなく、パルス的な変動を伴っている。これは主放電が、大きさの異なる多数のチャンネルで構成されていることに起因するものと考えられる。また、電圧波形は、放電開始直後に最低値 (-200 V) となり、以後時間とともに徐々に上昇していき、電流の終息 (End) とともに最大値に達する。電圧の変化は電流と比較して滑らかであり、目立ったパルス的な変動は見られない。Fig. 2 はデジタルオシロスコープの sample mode²⁾ で記録されたものであるため放電波形をほぼ忠実に再現しているが、電流がランダムなパルス的な変動を含む場合には、放電エネルギーの計算に際して誤差が生じる。そこで、デジタルオシロスコープに内蔵されている波形平均化処理機能 (high resolution mode.以下特に明記しない限り、このモードで記録した波形を対象にす

る。)を利用してこの変動を減少させ波形の観測及び放電エネルギー等の数値処理を行った。その例を Fig. 3 (a)~(d) に示す。

Fig. 3 (a), (b) 及び (c) は、抵抗をそれぞれ 25 k Ω , 100 k Ω 及び 500 k Ω とした場合であり、(d) は、抵抗の代わりにチョークコイル (公称インダクタンス 0.94 mH, 抵抗 0.2 Ω 以下) を挿入した場合である。他の条件は Fig. 2 のものと同じである。

まず (a)~(c) を見ると、電流は Fig. 1 の電気回路 (RC 直列回路) の過渡現象解析から推測できるような変化となっている。すなわち、最大電流は充電電圧を抵抗で除したものとほぼ等しく、電流の変化を示す曲線は、減衰項 $\exp(-t/RC)$ にほぼ則っている。一方、電圧は、前述の通り、放電開始直後及び放電終了直後を除き、比較的滑らかな変化をしており、これはグローまたはアーク放電にみられるのと同様の定電圧特性である。抵抗が大きいほど放電時の電圧は高く

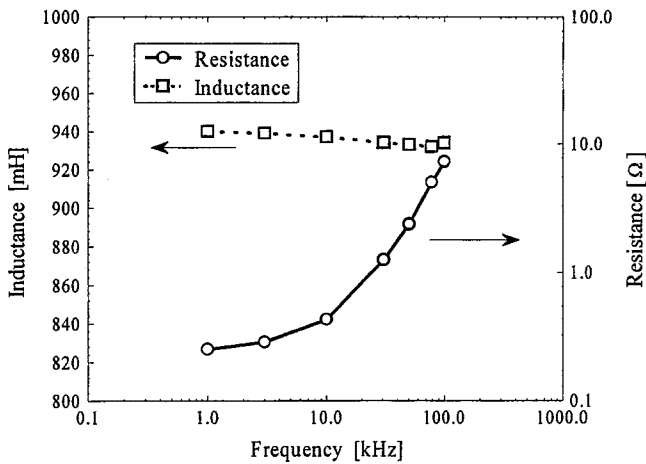


Fig. 4 Frequency characteristics of choking coil.
 チョークコイルの周波数特性

維持され、放電終了後の電圧も同様の傾向である。放電後も電極間に電圧が印加されているということは、充電電荷のうち、一部は放電後もキャパシタに残っていることを意味する。このような場合に、キャパシタに充電されたエネルギーがどの程度回路で消費されたかを最も残留電圧の高い (c) を例に計算すると、97%以上となる。^{*} このように抵抗が大きい場合でも、放電現象が起きれば、充電エネルギーは回路の抵抗と放電ギャップでほぼ消費されてしまうことがわかる。

放電開始及び終了直後を除いた、比較的直線的に変化している部分の電圧変化率を比較すると、25 kΩ、100 kΩ 及び 500 kΩ の順に 6 kV/ms、2 kV/ms 及び 0.4 kV/ms となる。すなわち、抵抗が大きいほど、放電中の電極間電圧はより一定に維持されるということであり、抵抗値が放電電圧の安定度に大きく影響していることがわかる。

Fig. 3 (a), (b) 及び (c) は、キャパシタの充電エネルギーが等しい (113 mJ) にもかかわらず、放電エネルギーはそれぞれ、3.19 mJ、7.32 mJ 及び 10.4 mJ となっており、抵抗が大きいほど放電エネルギーも大きくなっている。これは、前述の通り、抵抗が大きいほど放電電流は小さくなるが、逆に放電ギャップ間の電圧は高く維持されるためである。グロー放電におけるこのような特性は、以下のように説明されている³⁾。

『電流が減少すると放電路が細くなり、電子の横方向への拡散による損失が無視できなくなる。この損失分を補充するためには、陰極暗部（負電極近傍の非発光領域）内の電離を促進させる必要があり、このため同部分での電界強度は上昇する。』

この陰極暗部での電界強度の増加が、放電電極間の電圧上昇をもたらすと考えられる。

Fig. 3 (d) は、抵抗に代えてチョークコイルを回路に挿入した場合の放電波形の例である。電流は、回路中のキャパシタンスとインダクタンスが共振を引き起こすために振動波形となっている。もし、チョークコイルが理想的な特性であればキャパシタに蓄えられた静電エネルギーはすべて放電ギャップ間で消費されるはずであるが、実際に消費されたのは30%程度である。この原因としてチョークコイルにおけるヒステリシス損失（鉄損）とジュール損失（銅損）が考えられる。たとえば Fig. 3 (d) の電気的條件（LC 直列回路）においては、電流の最大値は理論的には 15 A となるべきであるが、実測値は 72 A である。また、振動の周波数も 160 kHz 程度であるべきところ、実波形の最初の周期では約 500 kHz である。このことから、電流が増加するにつれて鉄心の磁束密度が飽和傾向を示し、インダクタンスが低下していくものと考えられる。たとえば、周波数が理論値の約 3 倍であることを考慮すると、少なくとも公称インダクタンスの 1/10 程度にまで低下すると見積もられる。この磁気飽和現象は、当然、鉄心でヒステリシス損失が生じることを意味している。また、一般に周波数が高くなると表皮効果により導線の抵抗が大きくなる。

Fig. 4 はチョークコイルのインダクタンス及び抵抗の周波数特性を実測したものであり、これから導線の抵抗が周波数依存性が高いことがわかる。測定器の性能上、100 kHz を超える値は測定できなかったが、図の傾向から判断すると 500 kHz では 100 Ω 程度になると予測できる。この値はギャップの放電路の等価抵抗が数十～数百 Ω 程度にまで減少することを考慮すると無視できる大きさではなく、チョークコイルの巻線で大きなジュール損失が生じると考えられる。

このように、今回の実験で使用したチョークコイルではエネルギーの損失が大きすぎるので、IEC に定める試験方法で要求されている性能を満足しているとは言い難い。しかしながら、この場合でも、後述するように、ギャップ間の放電エネルギーの実測値を使用することにより、IEC 準拠の試験方法で得られたデータとの整合性はほぼ確保されているので、参照用としての役目を果たしていると考えられる。

3.2 粉じん濃度の影響

放電条件を一定（電極間隙 6 mm, 抵抗 100 kΩ）とし、試験粉体の濃度を変化させたときの MIE の変

^{*}放電前後のキャパシタの端子電圧を V_1 および V_2 とすると、消費エネルギーの割合は $(V_1^2 - V_2^2) / V_1^2$ となる。これに $V_1 = 15 \text{ kV}$ および $V_2 = 2.4 \text{ kV}$ を代入すると、97.4% となる。

化を Fig. 5 に示す。同図に見られるような下に凸の傾向は、この種の試験装置による測定では一般的に見られるものであり、低濃度域では可燃性物質の不足、高濃度域では助燃剤である酸素の不足により粉じんの燃焼が制限されるためであると考えられる。

この放電条件では、粉体濃度約 1.5 kg/m^3 において最低値 (6.8 mJ) が得られており、この値は、抵抗の代わりに前述のチョークコイルを挿入した場合に得られた値 (27 mJ) 及び文献値 (30 mJ)⁴⁾ よりもかなり小さなものである。このことから、粉体の着火性がエネルギーの与え方に大きく依存するものであることがわかる。

3.3 電極間隙の影響

粉じん濃度及び抵抗を一定 (1.67 kg/m^3 , $100 \text{ k}\Omega$) とし、電極間隙を $1.2, 3, 4, 6$ 及び 8 mm と変化させて MIE を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。ただし、ギャップ長 1.2 mm においては今回の実験において可能なすべてのエネルギーレベルで着火しなかったため、Fig. 6 には描かれていない。

同図から明らかなように、最低の MIE を与える電極間隙 (この条件では 4 mm) が存在している。

粉じんが燃焼を開始するためには、放電ギャップがある一定温度以上に加熱され、また、その加熱した領域が十分に大きくかつ長い時間にわたって存在する必要があると考えられる。ギャップが短いときには加熱領域が小さすぎ、かつ、放電電極での冷却効果のため火炎伝搬が阻止されやすいと想像できる。また、ギャップが長い場合には、加熱しなければならない範囲が広くなり、かつ、対流や輻射による熱の損失量も大きくなるので、一定の温度以上とするためにより多くのエネルギーを必要とするであろう。このような理由から、最適なギャップ長が存在するものと考えられる。

ギャップ長が放電電流及びギャップ間電圧波形に与える影響として、以下の点が指摘できる。

- (1) ギャップ長が小さいほど放電開始直後の電流のピーク値は高くなるが、これはその後はほぼ回路の C 及び L で規定される変化をたどる。すなわち、ピーク値を除き、ギャップ長の影響は小さい。
- (2) ギャップ長が小さいほど、放電中のギャップ間電圧はピーク値が小さく、かつ、放電期間中も低く維持される。放電終了後の電圧もギャップ長が短いほど小さい。
- (3) 放電エネルギーは、ギャップ長が長いほど大きい。

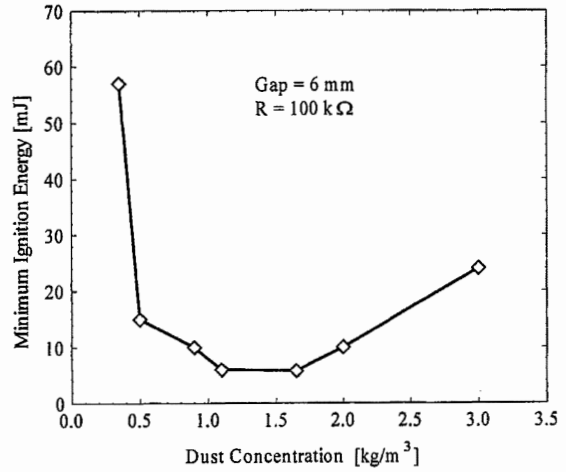


Fig. 5 Effect of dust concentration on MIE.
粉じん濃度が MIE に及ぼす影響

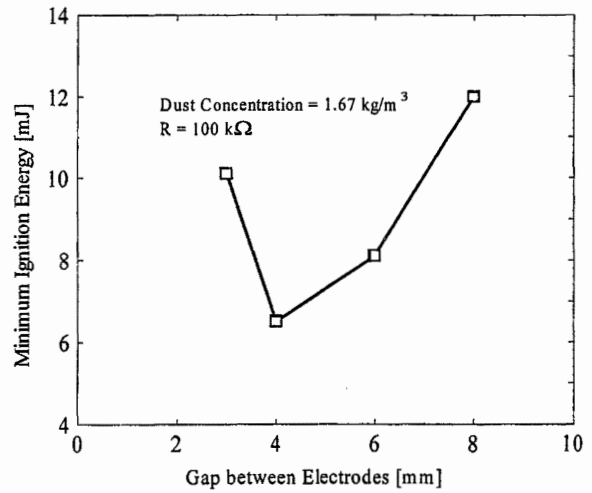


Fig. 6 Effect of electrode gap on MIE.
放電電極間ギャップ長が MIE に及ぼす影響

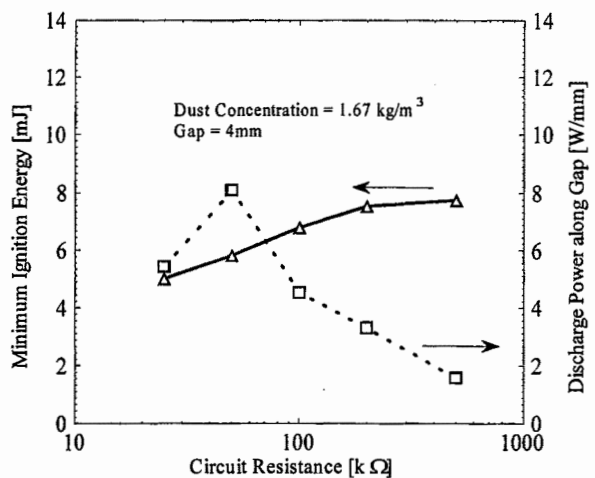


Fig. 7 Effect of resistance on MIE.
放電回路の抵抗が MIE に及ぼす影響

Table 1 Equivalent resistance of discharge channel and discharge energy ratio to stored energy.
放電路の等価抵抗及び充放電エネルギー比

gap=4mm

C[pF]	V[kV]	Ec[mJ]	25kΩ			50kΩ			100kΩ			200kΩ		
			Wd[mJ]	Er[%]	Re[kΩ]	Wd[mJ]	Er[%]	Re[kΩ]	Wd[mJ]	Er[%]	Re[kΩ]	Wd[mJ]	Er[%]	Re[kΩ]
5000	15	563	22.80	4.1	1.1	29.97	5.3	2.8	45.06	8.0	8.7	45.89	8.2	17.8
5000	12	360	22.71	6.3	1.7	27.69	7.7	4.2	33.78	9.4	10.4	36.83	10.2	22.8
5000	10	250	18.83	7.5	2.0	18.24	7.3	3.9	30.56	12.2	13.9	30.87	12.3	28.2
5000	8	160	15.89	9.9	2.8	14.69	9.2	5.1	16.58	10.4	11.6	23.43	14.6	34.3
2500	15	281	10.30	3.7	1.0	12.84	4.6	2.4	15.75	5.6	5.9	26.82	9.5	21.1
2500	12	180	7.37	4.1	1.1	12.96	7.2	3.9	13.73	7.6	8.3	18.24	10.1	22.6
2500	10	125	8.47	6.8	1.8	11.09	8.9	4.9	11.15	8.9	9.8	16.94	13.6	31.4
2500	8	80	-	-	-	5.47	6.8	3.7	9.76	12.2	13.9	10.52	13.2	30.3
1000	15	113	2.84	2.5	0.6	4.61	4.1	2.1	8.18	7.3	7.8	8.65	7.7	16.7
1000	12	72	3.76	5.2	1.4	4.59	6.4	3.4	5.75	8.0	8.7	7.13	9.9	22.0
1000	10	50	2.74	5.5	1.4	3.42	6.8	3.7	4.63	9.3	10.2	4.51	9.0	19.8
1000	8	32	-	-	-	2.42	7.6	4.1	3.81	11.9	13.5	4.23	13.2	30.5
300	15	34	-	-	-	0.69	2.0	1.0	1.02	3.0	3.1	3.07	9.1	20.0
300	12	22	-	-	-	0.77	3.6	1.8	0.99	4.6	4.8	2.25	10.4	23.3
300	10	15	-	-	-	0.46	3.1	1.6	0.74	4.9	5.2	1.57	10.5	23.4
300	8	9.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.44	15.0	35.3
100	15	11	-	-	-	0.27	2.4	1.2	0.31	2.8	2.8	0.84	7.5	16.1
100	12	7.2	-	-	-	0.41	5.7	3.0	0.34	4.7	5.0	0.67	9.3	20.5
100	10	5.0	-	-	-	-	-	-	0.32	6.4	6.8	0.49	9.8	21.7
100	8	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	13.1	30.2

C : Capacitance, V : Charging voltage, Ec : Stored energy, Wd : Discharge energy, Er = Wd/Ec, Re : Equivalent resistance

以上を要約すれば、ギャップ長は、放電電流よりもギャップ間の電圧に大きな影響を与えると結論できる。

3.4 抵抗の影響

粉じん濃度及びギャップ長を一定 (1.67 kg/m³, 4 mm) とし、25 kΩ~500 kΩ の範囲で抵抗を変化させたときの MIE を Fig. 7 に示す。これによると、MIE は 25 kΩ のときに最低値となった。残念ながら、今回は実験データがないので具体的な値を示すことはできないが、抵抗が存在しない場合の MIE は、インダクタンス挿入時の値 (27 mJ) よりも大きいと推定できるから、25 kΩ 以下に MIE の極小値が存在することは間違いない。このような特性は、放電回路の時定数 (抵抗と静電容量の積) が放電の持続時間をほぼ決定するために、抵抗が小さい場合には放電時間が短すぎて粉じんを効果的に加熱することができないこと、また、抵抗が大きすぎる場合には、同図のギャップ 1 mm 当たりの平均放電電力のカーブ (右側縦軸目盛) に示されているように、パワーが不足して十分に温度が上がらないためと考えられる。さらに、抵抗がある程度まで小さくなれば、放電時の衝撃波が周辺の粉じんを吹き飛ばし、加熱領域の粉じん濃度を低下させてしまうことも MIE 増大の一因と指摘できる。

3.5 抵抗と放電状態

放電回路に抵抗を挿入した場合、その値によって放電のモードは、アーク放電からグロー放電まで時々刻々変化することが既に指摘されている⁵⁾。ただし、今回の実験条件においては、アークとグローの区別は明瞭とはいえないので、特に区別しないこととする。

さて、抵抗によって放電ギャップの電圧及び電流が様々に変化するが、これらの変化を代表する物理量としてギャップの等価抵抗 Re [Ω] を採用することとする。この Re は次式を用いて計算したものであり、放電期間中の平均的な電気抵抗を意味する。

$$R_e = R W_d / (E_c - W_d) \quad (1)$$

ただし、R [Ω] : 抵抗, Wd [J] : 放電エネルギー, Ec [J] : 充電時の静電エネルギーである。

また、既に述べたように、充電エネルギー Ec のうち実際に放電として空間に放出されるエネルギー Wd の割合は放電条件に依存する。したがって、これを定量的に比較するために、充放電エネルギー比 Er を用いることとする。Er は次式で定義される値である。

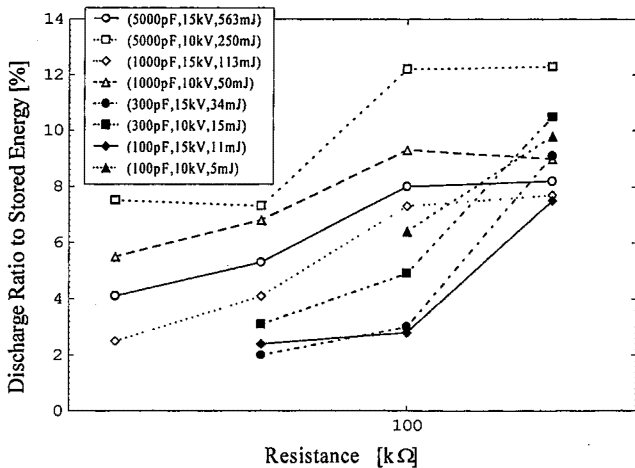


Fig. 8 Effect of resistance on discharge ratio to stored energy.

放電回路の抵抗が充放電エネルギー比及ぼす影響

$$E_r = W_d / E_c \quad (2)$$

R_e と E_r は次式で相互に変換できる。したがって、本質的な差はない。

$$R_e / R = E_r / (1 - E_r) \quad (3)$$

代表的な放電条件について R_e 及び E_r をまとめるとTable 1及びFig. 8のようになる。

まず、 R_e 及び E_r の一般的傾向として次の点が挙げられる。

- (1) 静電容量及び充電電圧が一定（すなわち、静電エネルギーが一定）であるとき、抵抗が大きくなるほど R_e 及び E_r は増加する。
- (2) 静電容量及び抵抗が一定（すなわち、放電時定数が一定）であるとき、充電電圧が大きくなるほど、 R_e 及び E_r は減少する。
- (3) 抵抗及び充電電圧が一定であるとき、静電容量が大きくなるほど、 R_e 及び E_r は漸増する。

以上の傾向は、換言すれば、放電電流の大きさと R_e または E_r に相関があることを示している。すなわち、放電電流が低いほど、放電を維持するためにギャップ間の電圧が高くならなければならないのだが、そのためにより多くのエネルギーの供給を必要とすると考えられる。

4. 考察

4.1 抵抗と放電エネルギー及び着火能力

直感的には、キャパシタに充電されている静電エネルギーを抵抗を介して放電させる場合、抵抗が小さい

ほど放電エネルギーが大きく、したがって、着火しやすくなるというのが大方の予想するところであろう。特に、放電ギャップの等価抵抗を放電条件に関わらず一定と仮定すると簡単な計算によりそのような結論が得られる。しかし、実際には、放電ギャップの等価抵抗は放電条件により様々な値をとり、しかも放電期間中も一定ではない。そのため、ある抵抗範囲では、逆に抵抗が大きいほど放電エネルギーも大きく、かつ、着火もしやすいという状況が生じる。このことは、安全上のみならず粉体の着火機構を知る上でも極めて重要であろう。なお、本論文で紹介したデータでは、抵抗は最大500 kΩとなっているが、これを超えると放電が間欠的になる等、放電を安定的に維持することが困難になる。したがって、安全上、放電を防止するためにある程度（たとえば数MΩ）以上の抵抗を与えるのは良策であるが、放電が可能なレベル（例えば数十kΩ）にまで下げると逆に粉じんへの着火性が高い放電を生じかねないと予測できる。

4.2 抵抗とインダクタンスの粉体着火性

放電空間で費やされるエネルギーで比較する限り、安定的に放電が発生する条件においては、抵抗を用いた場合の方がインダクタンスの場合よりもMIEが大幅に低くなることが実験的に確認された。放電領域のエネルギー密度はLC回路の方が圧倒的に高いにもかかわらず着火性は低いという意外な結果である。

この要因としては、主として放電持続時間の効果を指摘しておきたい。

例えば、MIEを得たときのLC回路（0.94 mH, 1000 pF）の放電持続時間は33 msであったのに対し、RC回路（50 kΩ, 1000 pF）では185 msであった。このようにRC回路の方が放電持続時間は圧倒的に長い。放電持続時間が長いほど、衝撃波による粉じんの吹き飛ばしの影響が小さいことと相まって、加熱領域に存在する粉体粒子の個数が多いと考えられるから「火種」が形成される確率も高くなるであろう。また、粉じんの着火には、まず、可燃性ガスの生成が不可欠であるから、加熱によるガスの発生及びこれへの燃焼反応の開始という機構上、一定の時間、温度の維持または電子の供給が必要と考えられる。

なお、粉じん爆発において、放電持続時間がMIEに大きな影響を及ぼすことについての実験例が報告されている⁹⁾。

4.3 火花遅れ時間の影響

一般に、固定ギャップ長の放電電極にその火花発生電圧を超える電圧を瞬時に印加しても直ちに火花には

Table 2 Variation of mean spark delay time, T_d (μ s) with respect to charge voltage and resistance.
 充電電圧及び抵抗に対する平均火花遅れ時間の変化

C		1000 [pF]				2500 [pF]				5000 [pF]			
		R[k Ω]	25	50	100	200	25	50	100	200	25	50	100
V	15kV	21	8	89	28	50	31	40	52	2	0	0	23
	12kV	780	313	303	298	105	42	105	208	259	780	142	660
	10kV	206	548	190	773	24	270	1355	1041	220	112	790	2214
	8kV	-	-	648	252	-	42	624	60	346	580	570	770

移行せず、ある程度の時間遅れが生じる。これは火花遅れという現象である。通常、火花放電の後、グローまたはアークという自続放電に転じる。既に知られているように、この火花遅れは放電開始に必要な初期電子がギャップ間に不足していることが原因であり、紫外線の照射や補助電極の使用等によりコントロールすることが可能である。ただし、今回は、粉体の着火性に与える影響を考慮して、そのような対策は講じなかった。

火花遅れは確率的な現象であるので、その特徴を正確に分析するためには多数のサンプルを用いて統計的処理を行わなければならないが、これは本研究の趣旨ではないので、大まかな傾向と着火試験の妥当性について検討することとした。

各放電条件における平均火花遅れ時間 T_d に関して、今回の実験で得られた値を Table 2 に示す。ただし、サンプル数が 3~10 個と少ないので、ばらつきが大きく、信頼性は保証できない。それでも、以下のような傾向を読みとることは可能であろう。

- (1) T_d はほぼ 0 から数 ms の範囲である。(T_d の最大値は 2.2 ms (5000 pF, 200 k Ω , 10 kV) であった。)
- (2) キャパシタの充電電圧が高いほど、 T_d は小さい。
- (3) 抵抗が大きくなるほど T_d も大きくなる。ただし、充電電圧が高いほど、各抵抗間の T_d の差は小さい。

上記 (2), (3) は、電子の加速及び電子雪崩によるキャリアの生成のために電界が重要な役割をするという放電のメカニズムを考慮すれば妥当なものといえよう。なお、キャパシタの静電容量の影響に関しては、今回の結果からは何ら判断を下すことはできない。

さて、ハルトマン式試験装置では、圧縮空気による粉体の吹き上げから放電電極への電圧の印加まで一定の遅延時間を設ける必要がある。これは、粉じんの分散状態が着火性に影響を与えるためである。今回は、予備試験の結果から、一律に 0.2 s とした。試験装置は 0.01 s (=10 ms) のステップで時間設定が可能であるが、火花遅れは最大級でも数 ms であるから 1 ステップにも満たないことになり、試験結果に大きな影

響を与えるとは考えにくい。実際に、実験データから火花遅延時間と着火性の関係を調べたが、特に相関は認められなかった。

しかしながら、比重の大きい粉体や粒子径の大きな粉体は吹き上げ後に急速に沈降するので、わずかに数 ms の時間差でも放電電極付近の濃度は著しく変化する可能性がある。したがって、このような粉体を試験対象とする場合には、補助電極等を用いて火花遅れ時間のばらつきを抑える必要があるだろう。

4.5 放電波形による着火判定

実験で得られたすべての放電電流・電圧波形を精査して着火及び非着火時の波形にそれぞれ固有な特徴があるか否か調べたが、両者に明瞭な差は見られなかった。粉じんの着火の機構として、まず、粉じんを気化させるという段階が必要であり、気化した可燃性ガスが発火する前に放電が終了するために、着火後の放電空間の電気的な性質の変化をとらえることができなかったものと考えられる。

5. まとめ

吹き上げ式粉じん爆発性試験装置を用いて、砂糖粉を対象に放電条件が最小着火エネルギー (MIE) に与える影響を調べたところ、以下の結果が得られた。

- (1) 一般に、MIE は粉じん濃度または電極間隙によって変化し、可燃性粉じんの特性及び電極の消炎特性に依存する最適粉じん濃度または電極間隙が存在する。砂糖粉の濃度と電極間隙の最適条件は、それぞれ 1.5~1.6 kg/m³ 及び 4 mm であった。
- (2) 抵抗により MIE が変化する。物質によって最適となる抵抗及び静電容量が存在すると考えられる。砂糖粉の場合には、1000 pF のとき MIE の極小値を与える抵抗は 25 k Ω 以下である。
- (3) RC 回路では、LC 回路の場合よりも低い MIE が得られる。RC 回路の方が放電の持続時間が長いために、熱が効果的に粉じんに伝えられるためと考えられる。
- (4) キャパシタに充電された静電エネルギーが、放

電ギャップで消費される割合は2～12%であり、抵抗が高くなるほど増加する傾向がある。これは、放電電流が小さいほどギャップ電圧が高く維持されるためである。

謝 辞

実験を遂行するに当たり、STA フェローの Dr. Wai Lam Cheung 氏（現在香港在住）及び研究生の春日電機株式会社・西村浩次郎氏にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) IEC Standard 124-2-3, Electrical apparatus for use

- in the presence of combustible dust (1994)
- 2) TDS 520&540 Digitizing Oscilloscopes User Manual, Tektronix (1992)
 - 3) 本田侃士, 大学講座気体放電現象, 東京電機大学出版局, pp.125 (1964)
 - 4) 労働省産業安全研究所, 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1 (1988)
 - 5) 黒田英司, 反応性物質の静電気感度に関する研究, 東京大学博士学位論文
 - 6) J. Cross and D. Farrer, Dust Explosion, Prentice Hall Press, pp.147 (1982)

(平成10年11月5日受理)