# 可燃性粉じん・空気混合気の最小着火エネルギー測定における放電回路条件の影響

山隈瑞樹*1　文均太*2　崔光石*1　鄭載喜*2

可燃性粉じん・空気混合気の最小着火エネルギー(MIE)の測定において，着火用のスパークはコンデンサに蓄えた静電エネルギーを電極対で放電させることによって生成する．通常，スパークの着火性を向上させるために 1 mH のインダクタンスを付加することが多い．一方，日本では従来からインダクタンスの代わりに抵抗(100 kΩ)を付加することも行われている．本研究では，放電回路の着火性への影響を調べるため，コンデンサのみ（付加なし），インダクタンス付加および抵抗付加の三つの回路条件で，15 種類の試験粉体の最小着火エネルギーを測定した．その結果，1 mH 付加回路での測定値約 10 mJ を閾値として，これよりも小さい MIE の粉体では，付加回路なしとインダクタンス付加での MIE はほぼ等しく，抵抗付加ではいくぶん大きくなった．また，10 mJ を超える粉体では，付加回路なし，インダクタンス付加，抵抗付加の順に小さい値となった。高速度カメラによる観測では，スパークによって発生する気流が着火機構に大きな影響を与えていることが確認された．

*キーワード:* 粉じん爆発，静電気，最小着火エネルギー，静電スパーク，放電回路

## 1　はじめに

粉じん・空気混合気の最小着火エネルギーはハートマン式吹き上げ試験装置を用いて測定される．最小着火エネルギー測定に関する国際規格[1]には，着火用の放電は，基本的にはコンデンサのみ，またはインダクタンス（1～2 mH）を追加的に付加して発生させることが規定されている．インダクタンスを付加することによって放電時間が長くなり，これによって着火性が向上することがあることが経験的に知られており，したがって，通常の着火試験ではインダクタンスを付加する．同規格では，純粋に静電気放電による着火性を調査する目的ではインダクタンスを付加しないで試験するように定めている．

一方，国内では，いくつかの試験機関ではインダクタンスに代えて抵抗(通常，100 kΩ)を付加して最小着火エネルギーを測定している．抵抗はインダクタンスと同様に，放電時間を延ばす効果があり着火性が高まることが主な理由であるが，産業現場で発生する静電気放電の中には抵抗を含む事例（たとえば，人体[2),3)]，酸化が進んだ金属粉[4),5)]，接地不良の工具[6)]等からの放電）もあることから，実用的にも重要な試験方法である．このような背景から，国内の民間規格[7)]では，インダクタンスに代えて抵抗を付加する試験方法も正式な方法として規定している．

粉じんに限らず，放電条件が可燃性雰囲気の着火特性に影響することはよく知られているが[8)]，粉じんの最小着火エネルギーに与える影響は必ずしも十分に調べられているとは言い難い．最小着火エネルギーは，産業現場において静電気による粉じん爆発対策を講じる上で必須の指標とされていることから，測定方法によって数値がどのように影響されるかを知ることは，対策の質を向上するためにも重要である．

このような背景から，本研究では，市販の粉じん着火試験装置を改造し，種々の回路条件で着火エネルギーを測定することによって，それぞれの影響を調べるとともにその原因を探ることとした．

## 2　実験方法

### 1) 実験装置

ベースとなる試験装置として，国内外で広く使用されている最小着火エネルギー試験装置(Kühner AG, MIKE-3)を採用した．この装置は，爆発容器（ハートマンチューブ）に一対の針状電極からなる放電ギャップを設け，容量性放電を発生するものである．1 mH のコイルを付加するかしないかの選択が可能であるが，脱着不可の 10 μH のコイルを内蔵しているので，1 mH のコイルを選択しない場合であっても 10 μH が含まれる（したがって，純粋な容量性放電ではないが，国際規格では 10 μH までのインダクタンスの付加が認められている.）.

この研究においては，1 mH のコイルに代えて抵抗が選択できるように改造を加えた．放電に関係する回路図は**図 1** となる．放電電流は，電流プローブ(Tektronix, TCP0030，帯域 DC~120 MHz)で電流・電圧変換し，デジタルオシロスコープ(Tektronix，DPO3032，帯域 DC~500 MHz)で波形を観測した．放電電荷は，コンピュータで放電電流を時間積分することによって求めた．放電の発光および粉じん着火後の火炎伝播を観測するために，高速ビデオカメラシステム(Photron，FASTCAM-Ultima-RGB)を使用した．

放電エネルギー $W$ (J)は，回路条件によって次式で計算した．

(a) コンデンサのみ，またはインダクタンス付加の場合

$$W = W_0 = \frac{1}{2}CV^2 \qquad (1)$$

*1 労働安全衛生総合研究所　電気安全研究グループ

*2 ソウル科学技術大学

(b) 抵抗を付加した場合の有効放電エネルギー

$$W = W_0 - W_r - W_z$$
$$W_r = \int_0^T Ri^2 dt$$
$$W_z = \frac{1}{2}\frac{Q_z^2}{C} \qquad (2)$$
$$Q_z = CV - \int_0^T i dt$$

ここで，$C$ (F)は，浮遊容量を含む回路の全静電容量，$V$(V)は放電直前の $C$ の電圧，$i$ (A)は放電電流，$R$ (Ω)は付加した抵抗，$Q_z$ (C)は放電後に $C$ に残留している電荷，$T$(s)は放電時間である．

なお，本論文では抵抗を付加したときに実際に放電に費やされるエネルギーを有効放電エネルギーと定義する．後述するように，有効放電エネルギーはコンデンサに蓄えられた静電エネルギーと比べるとかなり小さくなる．

通常，着火試験装置は，発生できる放電エネルギーが段階的（本研究では 1, 3, 10, 30, 100, 300 および 1000 mJ の 7 段階）であるので，ある試料の最小着火エネルギーMIE は，一連の着火試験において，着火しなかった場合の最大のエネルギー$E_1$ と着火した場合の最小のエネルギー$E_2$ を用いて，$E_1$ < MIE < $E_2$ のように範囲で表現する．場合によっては，着火確率を用いて，次式で得られる統計的最小着火エネルギー$E_s$ (J)も使用される [9]．

$$E_s = 10^{\log E_2 - \frac{I[E_2](\log E_2 - \log E_1)}{(NI+I)[E_2]+1}} \qquad (3)$$

ここで，$I[E_2]$は $E_2$ での着火回数，$(NI+I)[E_2]$は総着火試験回数である．

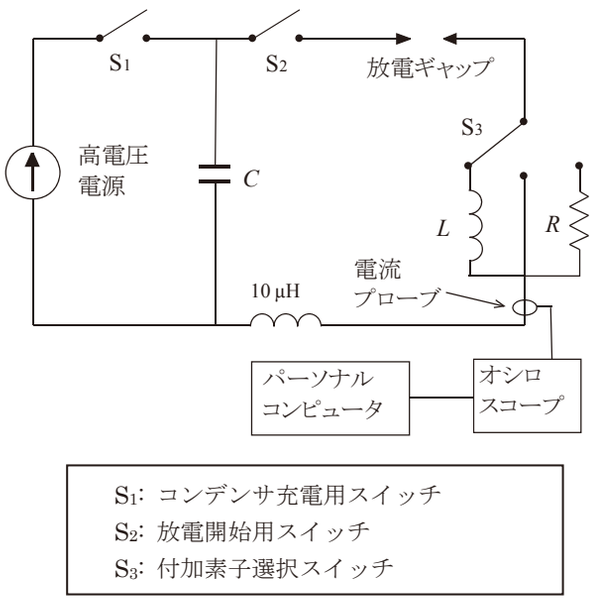



図 1 放電エネルギー発生回路

**2) 試験粉体**

粉体試料として，天然有機粉じん 5 種類，合成有機粉じん 5 種類，無機粉じん 1 種類，金属粉じん 2 種類を用いた．このうち小麦粉については，爆発容器内での分散性を良くするため酸化マグネシウム(MgO)を 2 wt%添加したものも用いた [10]．これらの主な物性値を表 1 に示す．すべての試料は，試験開始前 24 時間にわたって 50 °C で乾燥させた．試験環境は，およそ 25 °C および 60 %RH であった．

表 1　粉体試料とその主な物性値

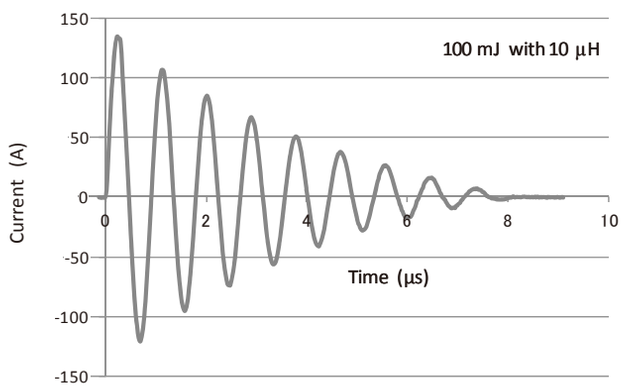
| 種類 | 粉体試料 | 中央径 (μm) | 見かけの質量密度 (g/cm³) | 安息角 (deg) | 崩壊角 (deg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 天然有機粉じん | 石松子 | 35.6 | 0.26 | 36.6 | 33.6 |
| | アントラキノン | 31.5 | 0.29 | 48.3 | 47.0 |
| | 砂糖（粉糖） | 43.9 | 0.47 | 52.0 | 47.3 |
| | 小麦粉 | 64.5 | 0.46 | 55.0 | 47.0 |
| | 小麦粉（+ MgO, 2 wt%） | 64.5 | 0.53 | 48.0 | 40.0 |
| | コーンスターチ | 29.9 | 0.55 | 48.0 | 37.6 |
| 合成有機粉じん | コエンザイム Q10 | 37.0 | 0.25 | 53.3 | 52.3 |
| | ポリアクリロニトリル | 40.2 | 0.45 | 38.6 | 33.0 |
| | ポリプロピレン | 76.5 | 0.30 | 38.0 | 35.6 |
| | トナー | 8.7 | 0.51 | 45.0 | 25.0 |
| | ビシクロヘキサノール | 45.6 | 0.41 | 50.0 | 47.3 |
| 無機粉じん | 硫黄 | 2.3 | 0.65 | 47.0 | 47.0 |
| 金属粉じん | チタン | 33.2 | 1.46 | 47.3 | 41.6 |
| | アルミニウム | 23.8 | 0.98 | 51.0 | 44.3 |

## 3　結果および考察

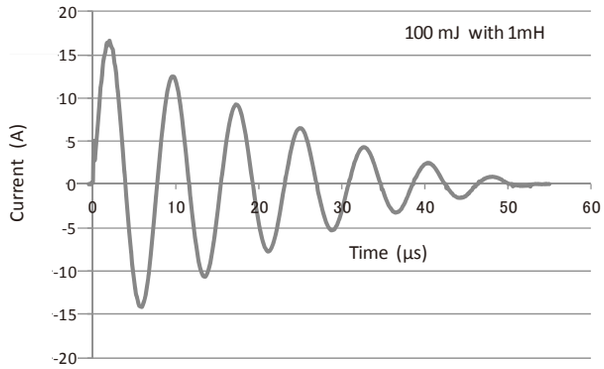
### 1）各回路条件での放電波形と抵抗付加時の有効放電エネルギー

試験装置の放電エネルギー設定を 100 mJ とし，コンデンサのみ，インダクタンス(1 mH)付加，および抵抗(100 kΩ)付加の三つのケースにおける典型的な放電波形を**図 2 (a) ~ (c)**に示す．(a)では，名目はコンデンサのみであるが，10 μH の内蔵コイルが存在するため振動減衰波形となる．抵抗付加の場合(c)には，単調減衰波形となる．(a), (b), (c)の順に，放電電流ピークが高く，かつ，放電時間が短いという特徴がある．これらは，等価回路の過渡特性から容易に推定されるものである．

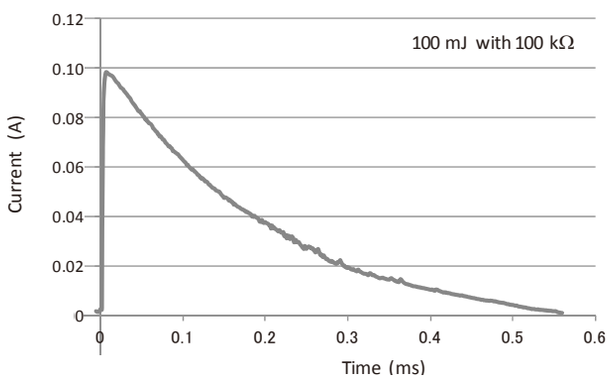
抵抗を 10 kΩ, 100 kΩ および 300 kΩ としたときの有効放電エネルギーの測定結果（5 回の放電の平均値）を**表 2** に示す．また，コンデンサのみ（または 1 mH 付加）の場合の放電エネルギーに対する有効放電エネルギーの割合を**表 3** に示す．この表からわかるように，有効放電エネルギーは，放電エネルギー設定に対して一定ではな




(a) コンデンサのみ（10μH あり）




(b) インダクタンス（1 mH）付加




(c) 抵抗（100 kΩ）付加

図 2　各放電条件における放電電流波形（100 mJ）

表 2　有効放電エネルギー（平均値）

| | 付加素子 | 放電エネルギー設定値　(mJ) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| 放電エネルギー (mJ) | なし，または 1 mH | 1.67 | 3.91 | 17.6 | 39.2 | 129 | 373 | 1200 |
| | 10 kΩ | 放電無し | 1.07 | 7.06 | 3.54 | 13.8 | 35.3 | 83.5 |
| | 100 kΩ | 0.86 | 1.86 | 5.94 | 6.62 | 24.4 | 69.6 | 202 |
| | 300 kΩ | 放電無し | 放電無し | 8.41 | 10 | 31.9 | 87.6 | 273 |

表 3 放電エネルギー設定値に対する有効放電エネルギーの比率（平均値）

| | 付加素子 | 放電エネルギー設定値　(mJ) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| エネルギー比率 (%) | なし，または 1 mH | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 10 kΩ | 放電無し | 27.7 | 40 | 9.03 | 10.7 | 9.45 | 6.96 |
| | 100 kΩ | 51.7 | 47.6 | 33.6 | 16.9 | 18.9 | 18.6 | 16.8 |
| | 300 kΩ | 放電無し | 放電無し | 47.7 | 25.6 | 24.9 | 23.5 | 22.8 |

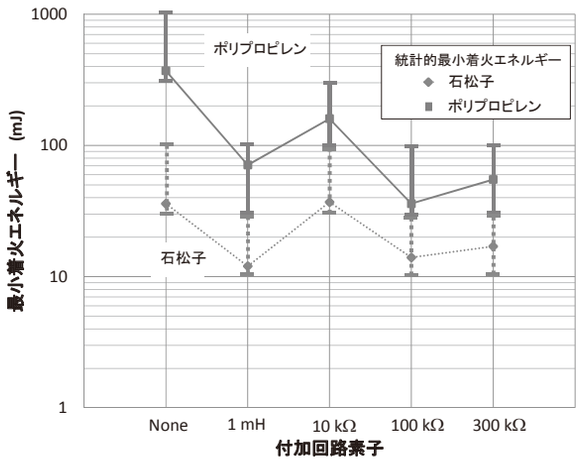



図 3　石松子とポリプロピレンの最小着火エネルギー

く，また，直線的比例関係が存在するわけでもない．ただし，同じ放電エネルギー設定においては抵抗が大きくなるほど比率が上昇する傾向がある．これは，放電ギャップの等価抵抗が付加抵抗が大きくなるほど累進的に増加することを意味する．なお，1 MΩ 以上の抵抗を付加すると放電が極めて不安定となり，着火試験には適さないことが分かったので，本研究では使用しなかった．

**2) 最小着火エネルギー**

**(1) 着火と火炎伝播の観測**

**① 石松子およびポリプロピレンの場合**

回路条件をコンデンサのみ，および 1 mH, 10 kΩ, 100 kΩ または 300 kΩ を付加した場合の石松子およびポリプロピレンについての最小着火エネルギーの測定結果を**図** 3 に示す．両試料については，1 mH, 100 kΩ または 300 kΩ がある場合の方がコンデンサのみ，または 10 kΩ がある場合よりも小さな最小着火エネルギーとなった．

放電の違いが着火・火炎伝播に与える影響を調べるため，石松子を試料として，放電直後の粉体の挙動を 4500 FPS で撮影した動画から，10 フレーム毎に抽出した画像（以下，450 FPS という．）を**図 4** に示す．粉じん濃度は 250 g/m$^3$ であり，放電エネルギー設定は 1200 mJ とした．図から次のような特徴が見られる．

(a)コンデンサのみの場合，放電によって形成された火炎核は直後に放電ギャップから吹き飛ばされ，13.3 ms 後に遠方で火炎が成長する．10 kΩ を用いた場合，火炎核は吹き飛ばされるが 8.9 ms 後には火炎伝播が確認される．放電時間および放電の平均電力をみるとコンデンサのみでは 32 μs および 37.5 kW, 10 kΩ では 620 μs および 135 W である．コンデンサのみの場合，短時間に放電エネルギーが放出されるため空気の加熱・膨張に伴う大きな衝撃波が形成され，これによって火炎核が放電ギャップの加熱空間から遠方に吹き飛ばされるために火炎の成長に要する時間も長くなると考えられる．

(b) 1 mH, 100 kΩ または 300 kΩ を付加した場合，放電開始直後から放電ギャップ近傍で火炎が生じて成長する．これは，放電ギャップで発生する衝撃波が非常に小さいために火炎核は放電ギャップの近傍に留まり，さらに，粉体に有効に熱が伝わるために火炎が急速に成長・伝播すると考えられる．放電時間および放電の平均電力は，それぞれ場合において，176 μs および 6.8 kW，4.3 ms および 47 W，12.5 ms および 22 W である．

**② ビシクロヘキサノールの場合**

ビシクロヘキサノールについて，着火後の火炎伝播を 450 FPS で撮影した様子を**図 5** に示す．粉じん濃度は 333 g/m$^3$ である．放電エネルギー設定はコンデンサのみのとき 3 mJ，1 mH のとき 1 mJ，100 kΩ のとき 10 mJ である．放電条件は異なっても粉じんの着火および火炎伝播のようすは極めて似通っており，いずれの場合にも放電の衝撃波の影響はほとんど見られない．

**(2) すべての試料の最小着火エネルギー**

すべての粉体試料について，三つの放電条件（コンデンサのみ，1 mH 使用および 100 kΩ 使用）で測定した最小着火エネルギーを表 4 に示す．統計的最小着火エネルギーを用いて，1 mH での最小着火エネルギーとその他の最小着火エネルギーを比較したものを**図 6 (a)~(c)**に示す．これら図中，左下角から右上角に直線が引かれているが，プロットがこの線上にあれば同値，左側にあれば比較対象の条件の方が最小着火エネルギーが大きいことを意味し，右側にあれば小さいことを意味する．

図から，次のような性質がうかがえる．

(a) **図** 6 (a)のように，1 mH とコンデンサのみとの比較では最小着火エネルギーが概ね 10 mJ 以下のグループ（アントラキノン，コエンザイム Q10，ビシクロヘキサノール，チタン，硫黄およびトナー．以下，グループ L という．）のものは大きな差がみられない．しかし，最小着火エネルギーが概ね 10 mJ を超えるグループ（石松子，コーンスターチ，ポリアクリロニトリル，砂糖，アルミニウム，小麦粉，小麦粉＋MgO およびポリプロピレン．以下，グループ H という．）のものは，アルミニウムを除き，コンデンサのみで測定した最小着火エネルギーの方がかなり大きい．このような違いは，放電によって生じる衝撃波の大きさ，およびこれに伴う粉体への熱の伝達によって説明が可能である．アルミニウムについては，表 1 からわかるように，比重が大きいことから衝撃波の影響がより小さくなったものと考えられる．

(b) 1 mH と 100 kΩ を比較すると，**図** 6 (b)に示すように，グループ L では 100 kΩ の方がより大きな最小着火エネルギーとなるが，グループ H では，ほとんど差が

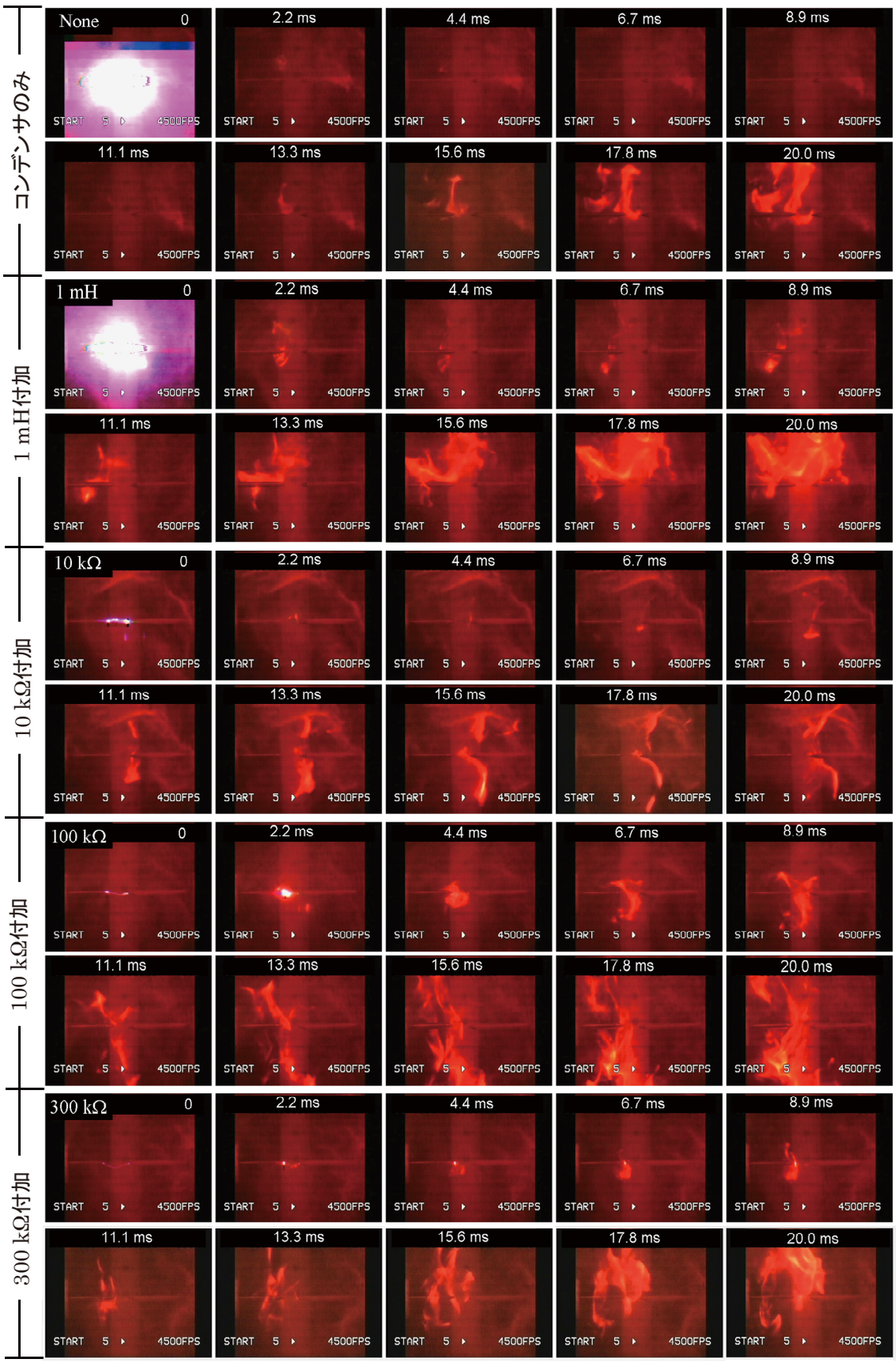



図 4　各放電条件における石松子の着火のようす（450 FPS）
（各フレーム上部の数値は経過時間を示す.）

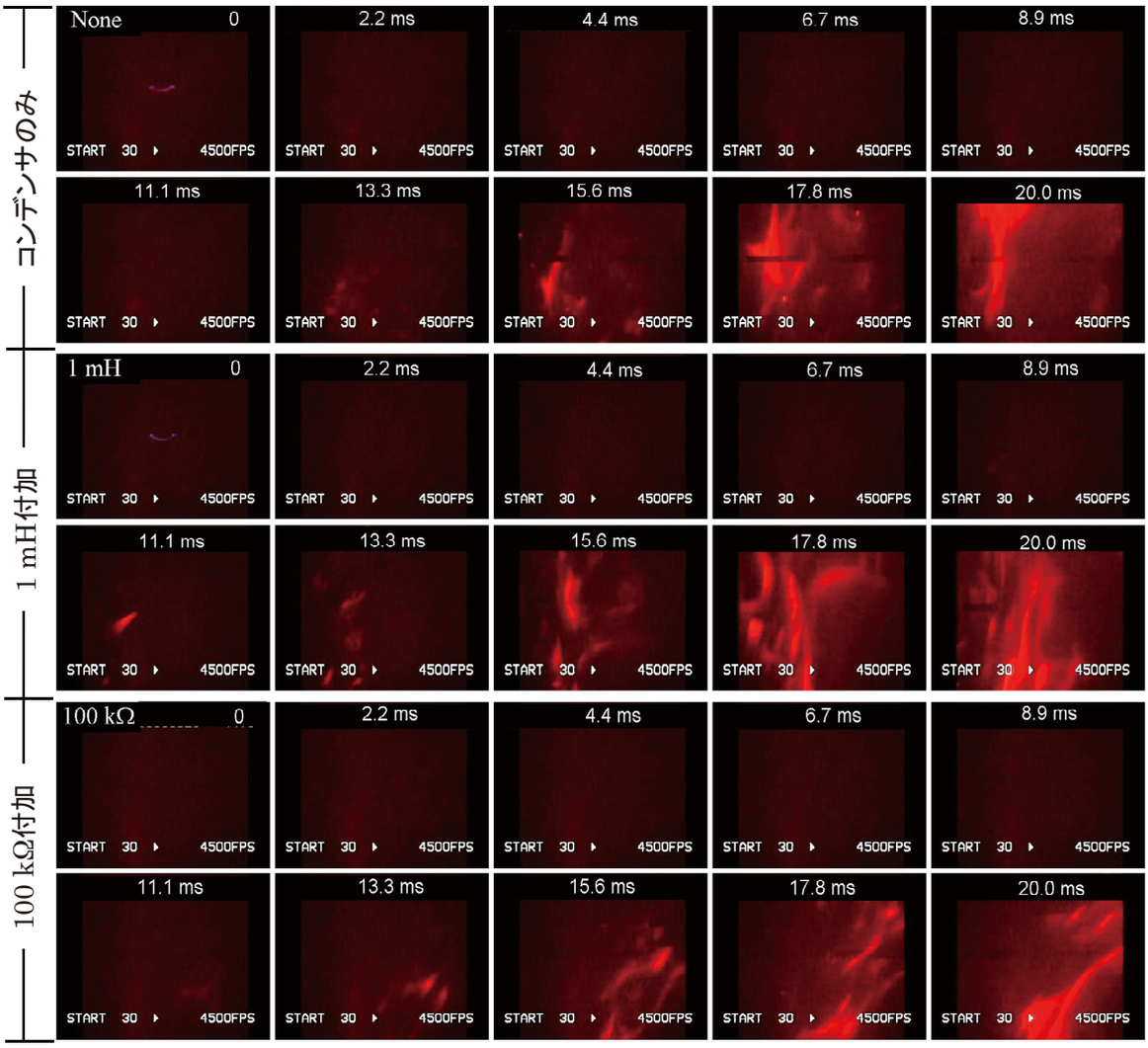



図 5　各放電条件におけるビシクロヘキサノールの着火のようす（450 FPS）
（各フレーム上部の数値は経過時間を示す.）

みられない．100 kΩ での有効放電エネルギーで比較すると，**図 6** (c)に示すように，グループ H では，100 kΩ の方が 1 mH よりも顕著に小さくなる．これは，グループ L では，**図 5** に示すように，放電による衝撃波が小さいため粉体は放電空間に留まるので，放電の持続時間よりも電力の方が着火性に影響を与えていること意味する．

## 4　まとめ

粉じん・空気混合気の着火性に及ぼす放電回路条件の影響は，粉体によって異なる．着火性に大きく影響する放電関連現象として，放電の際に発生する空気の衝撃波があり，これが大きいと火炎核を放電空間から遠ざけ，火炎伝播を妨害する．衝撃波は，放電時間が短くなるほど，また，放電エネルギーが大きくなるほど強くなる．したがって，概ね 10 mJ 程度を境に，これより最小着火エネルギーが大きな粉体には衝撃波の影響が顕著に現れる．インダクタンスまたは抵抗を回路に付加することによって放電時間が長くなり，衝撃波が軽減されるので着火性が向上する．一方，最小着火エネルギーが 10 mJ 未満の粉体は，放電電力が大きいほど着火性が高まる傾向がある．したがって，大きな抵抗を付加すると着火しにくくなりやすい．

以上のような実験的知見から，ある粉体で最小着火エネルギーを測定する際には，その粉体の取り扱い条件において発生しうる放電の種類を念頭に，適切な回路条件を選択することが望ましい．

## 謝　　辞

カネカ株式会社および岩谷瓦斯株式会社には粉体試料を無償提供いただいた．また，中島諄二氏（元理化学研究所）には実験助手として尽力いただいた．ここに記して謝意を表する．

--

表 4　全ての粉体試料の最小着火エネルギー

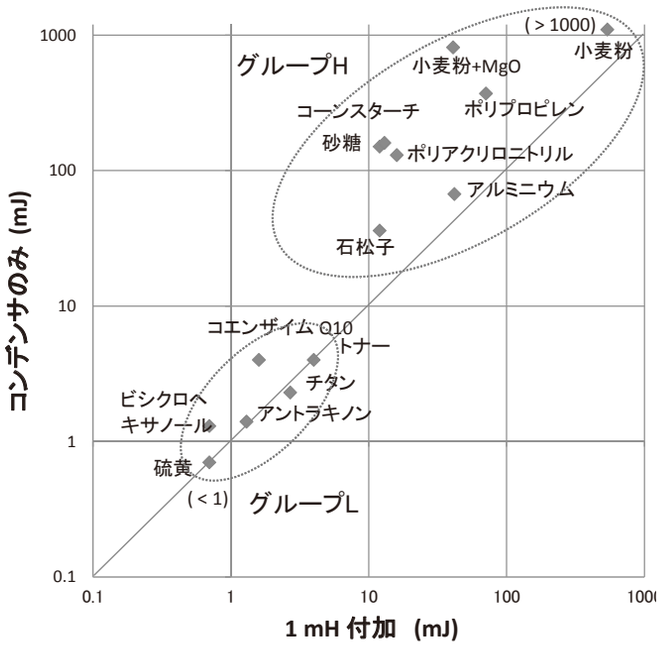
| 粉体試料 | 最小着火エネルギー(mJ, 統計的最小着火エネルギー (mJ)および粉じん濃度(g/m³) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | キャパシタンスのみ | 1 mH | 100 kΩ | 100 kΩ (有効放電エネルギー) |
| 石松子 | 30 < MIE < 100 (36), 1250 | 10 < MIE < 30 (12), 750 | 10 < MIE < 30 (14), 750 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| アントラキノン | 1 < MIE < 3 (1.4), 1250 | 1 < MIE < 3 (1.3), 1250 | 3 < MIE < 10 (4.0), 1250 | 1.9 < MIE < 5.9 |
| 砂糖 | 100 < MIE < 300 (150), 2000 | 10 < MIE < 30, (12), 1250 | 10 < MIE < 30, (24) 1250 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| 小麦粉 | MIE > 1000 | 300 < MIE < 1000 (540), 3000 | 300 < MIE < 1000 (510), 1500 | 70 < MIE < 202 |
| 小麦粉 (+ MgO 2%) | 300 < MIE < 1000 (810), 750 | 30 < MIE < 100 (41), 1250 | 30 < MIE < 100 (55), 2000 | 6.6 < MIE < 24.4 |
| コーンスターチ | 100 < MIE < 300 (160), 1250 | 10 < MIE < 30 (13), 1250 | 10 < MIE < 30 (13), 1000 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| コエンザイム Q10 | 3 < MIE < 10 (4.0), 1250 | 1 < MIE < 3 (1.6), 1000 | 3 < MIE < 10 (4.0), 1250 | 1.9 < MIE < 5.9 |
| ポリアクリロニトリル | 100 < MIE < 300 (130), 1500 | 10 < MIE < 30 (16), 1500 | 10 < MIE < 30 (19), 1250 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| ポリプロピレン | 300 < MIE < 1000 (370), 1250 | 30 < MIE < 100, (71), 1000 | 30 < MIE < 100 (36), 750 | 6.6 < MIE < 24.4 |
| トナー | 3 < MIE < 10 (4.0), 360 | 3 < MIE < 10 (4.0) , 360 | 10 < MIE < 30 (12), 360 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| ビシクロヘキサノール | 1 < MIE < 3 (1.3), 1250 | MIE < 1 1250 | 3 < MIE < 10 (4.0), 1250 | 1.9 < MIE < 5.9 |
| 硫黄 | MIE < 1 2500 | MIE < 1 2500 | 1 < MIE < 3 (1.7), 2500 | 0.9 < MIE < 1.9 |
| チタン | 1 < MIE < 3 (2.3), 3000 | 1 < MIE < 3 (2.7), 2500 | 10 < MIE < 30 (13), 3000 | 5.9 < MIE < 6.6 |
| アルミニウム | 30 < MIE < 100 (67), 1250 | 30 < MIE < 100, (42), 750 | 30 < MIE < 100 (38), 1250 | 6.6 < MIE < 24.4 |

() 内は統計的最小着火エネルギー,　アンダーライン付は最小着火エネルギーが得られる粉じん濃度

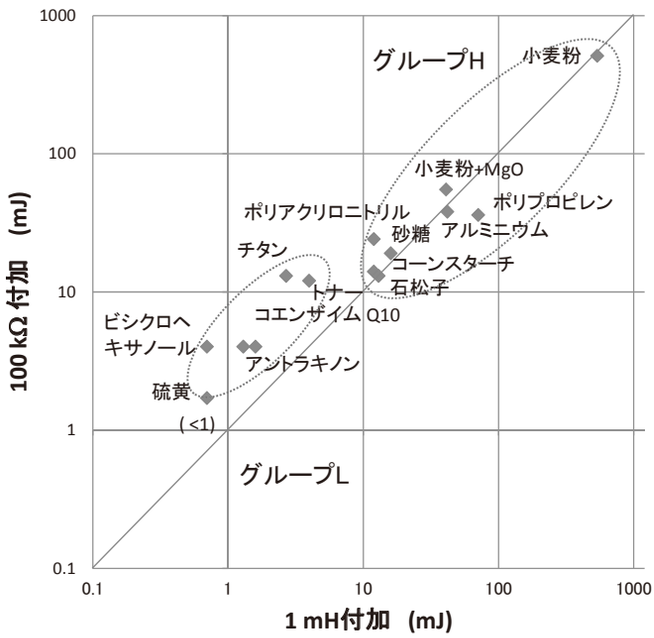
## 文　献


1) IEC 61241-2-3:1994. Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2: Test methods - Section 3: Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures (1994)
2) 吉田孝博，久保田啓吾，澤井丈徳，増井典明，帯電した人体からの放電電流波形の時間・周波数解析，静電気学会誌. 2007; 30; 113-118
3) 島村英生，山隈瑞樹，可燃性粉じんの最小着火エネルギー測定方法－国内規格((社)日本粉体工業技術協会 APPIE 規格)と IEC 規格等の海外規格，安全工学シンポジウム 2009. 346-349
4) T. Matsuda and M. Yamaguma, J. Hazardous Materials, A77, 33 (2000)
5) 山隈瑞樹，芝本秀文，東原千春，千田国夫，福田佳香，萩原利雄，細谷文夫，竹内学，ジルコニウム粉の静電気危険性，安全工学. 2006; 45; 146-153
6) 山隈瑞樹，圧縮空気駆動式研磨器の帯電危険性，安全工学. 2005; 44; 9-16
7) 日本粉体工業技術協会規格，可燃性粉じん・空気混合気の最小着火エネルギー測定法，SAP12-08 (2010)
8) R. K. Eckhoff, "Dust Explosions in the process

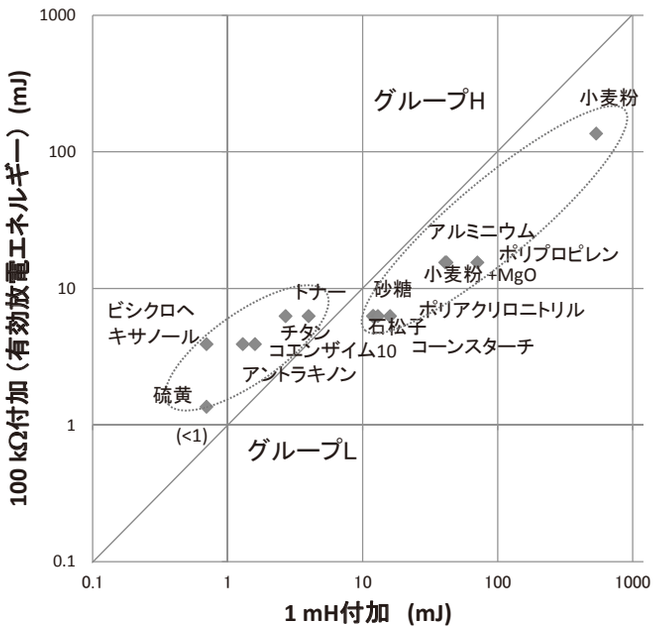
industries, SECOND EDITION", p. 420, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K. (1997)
9) BS EN 13821:2002. Potentially explosive atmosphere - Explosion prevention and protection - Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures (2002)
10) 石浜渉，榎本兵治，農産物粉末の爆発特性，安全工学. 1975; 14; 243-249




(a) 1 mH とコンデンサのみの比較




(b) 1 mH と 100 kΩ の比較




(c) 1 mH と 100 kΩ（有効放電エネルギー)の比較

図 6　各放電条件における統計的最小着火エネルギーの比較