

5 . 振動型粉体最小着火エネルギー試験装置の開発*

山隈瑞樹**, 児玉 勉**, 張 偉林**

5 . Development of the Vibrating Type Minimum Ignition Energy Measurement System*

by Mizuki YAMAGUMA**, Tsutomu KODAMA** and Wai-Lam CHEUNG**

Abstract : It is commonly recognized that the conventional methods for determining the minimum ignition energy (MIE) of a dust cloud are time-consuming and require operational skills. As a variety of new flammable powders have recently been developed and produced in industry, there is an urgent need for a quicker and more economical means to measure the MIEs for those powders. To meet this requirement, we have developed a measurement system which employs a novel method to create an air/dust mixture in a compact combustion chamber. In this system, the powder to be tested is put in a hopper made of a metallic mesh, and, with vibration, successively fed downward to form a dust cloud. With this new apparatus, three types of powders designated by an international standard for evaluation - lycopodium, anthraquinone, and polyacrylonitrile - were put to the test, and their MIE data were compared with those taken with a conventional testing apparatus (the Hartmann tube). The MIEs for two powders, lycopodium and polyacrylonitrile, agreed satisfactorily. For the other, anthraquinone, however, the MIEs were quite different with each other. We finally reached the possible reason - the agglomeration of particles which was observed in powders passing through the mesh. It is concluded that the agglomeration was caused by the static-charges generated on the particles by passing through the mesh, and also by the irregular shapes of the particles.

Keywords ; Vibrating mesh, Hartmann tube, Minimum ignition energy, Dust explosion

1. 緒 言

可燃性粉じんの最小着火エネルギー（以下 MIE）を測定する方法として、小型円筒容器内で圧縮空気の吹き上げによって粉じんを発生させ、これに火花放電により着火を行うハルトマン式¹⁾が長年一般的に用いられており、既に多くの粉体の MIE データが蓄積されている。一方、近年、粉体の製造技術の進歩に伴う微細化及び新原料の開発等から可燃性粉じんはますます多様化してきており、安全管理上、これらの MIE を迅速に測定する必要があるが、ハルトマン式は着火タイミングの調整等の操作上の熟練を要すること、着

火後の容器類の清掃等に手間がかかること、また、爆発に耐える堅牢な構造や圧縮空気システムが必要である等製造コストが高価であることから一部の試験研究機関に導入されるにとどまっているのが現状であり、市場のニーズに迅速に対応することが困難である。

このような従来型試験装置の欠点を解消し、特別な知識や熟練した技能がなくとも精度の高い試験結果が得られる装置の普及を目的として、著者らは新たな発想に基づく振動型粉体着火エネルギー測定装置の開発を行い基礎的な特性を報告した^{2,3)}。本研究では実用化を視野に入れ、更に操作性を向上した改良型を試作し、これを用いて代表的な粉体について MIE の測定

*平成10年6月25日ESA-IEJ Joint Symposium on Electrostatics 1998及び同年9月28日第22回静電気学会全国大会において一部発表。

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

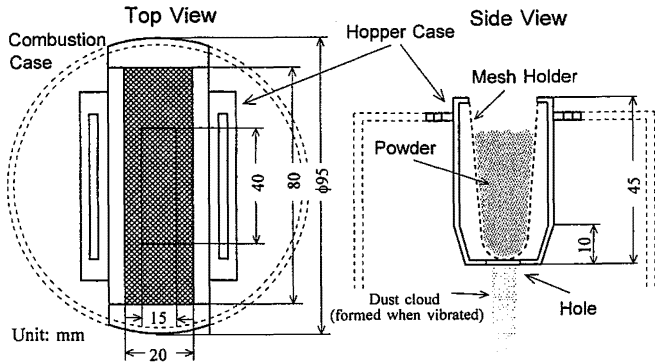


Fig. 1 Structure of the powder hopper of the vibrating type MIE testing device.
振動型 MIE 試験装置の粉体用ホッパーの構造

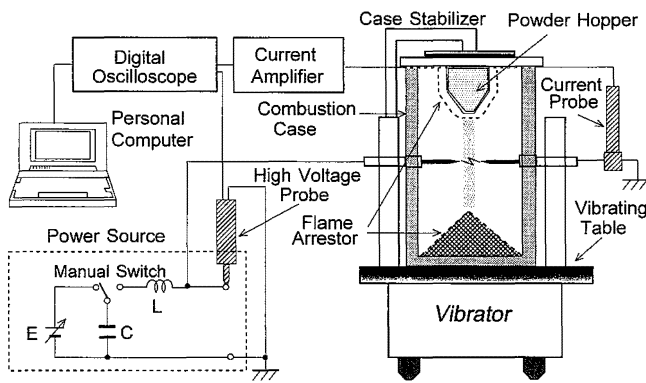


Fig. 2 Schematic diagram of the vibrating type MIE measuring system.
振動型 MIE 試験装置の構成

を行い、従来型との整合性の評価を行った。

2. 振動型粉体 MIE 試験装置

振動型粉体 MIE 試験装置（以下、振動型）が従来型のハルトマン型と大きく異なる点は粉じんの形成方式である。ハルトマン型では密閉した円筒内に下方から圧縮空気を用いて粉体を吹き上げて粉じんとするが、振動型はメッシュ型容器に粉体を入れ、容器を振動させることによって自然落下する粉体を利用する。Fig. 1 に、本研究で試作した試験粉体用メッシュ容器（ホッパー）を示す。メッシュは側面から見ると U 字型となっており、振動によりメッシュを通過した粉体が薄いカーテン状の粉じんを形成するように工夫されている。粉じんをこのような形状とすることにより、放電電極のギャップ間のみを粉じんを通過させることが可能になり、ひいては粉体の節約と爆発時の圧力上昇及び発熱の抑制が期待できる。このホッパーは Fig. 2 に示すように、アクリル製の円筒型爆発容器の

上部に配置される。爆発容器には側面に放電用電極（高圧側及び接地側の 2 本）が配置されており、スタビライザーを用いてホッパー及び爆発容器が振動台に固定される。この振動台の振動数は電源周波数（50 Hz）と同じであり、振動強度（振幅）は 10 段階に調節可能となっており、通常、振動強度とともに粉じん濃度が変化する。粉じんが着火すると火炎が瞬時に粉じん全体に拡がるので、場合によってはホッパー内の残留粉体や爆発容器底部に溜まった粉体が発火するおそれがあり、また、メッシュに直接火炎が接することにより目詰まりを起こすこともあり得る。このような弊害から試験装置を守るために、ホッパー下部及び爆発容器底部に粗い金属製メッシュを配置し、フレームアRESTA（消炎器）として機能させている。

以上のような構造により、ハルトマン型に比べて少ない粉体量で効率的な着火試験が可能となる。

3. 実験方法

上記の振動型に対して、放電回路系及び測定系を加えることにより実験装置を組み立てた。放電回路は、キャパシタ（100 pF～5000 pF）と付加インピーダンス（インダクタンス 0.94 mH*）から構成されており、まず、直流高電圧電源によりキャパシタのみを所定の電圧まで充電し、その後高電圧スイッチ（ガス封入）で放電回路へ切換え、放電を発生させた。測定系には、放電時の電圧及び電流観測用として高電圧プローブ（Tektronix 社製 P 6015 A）及びカレントプローブ・同アンプ（同社製 AM 503 S）を用い、これらの信号をデジタルオシロスコープ（同社製 TDS 620）で数値化並びに波形表示をした。さらに、数値データをパーソナルコンピュータへ転送し、データを保存するとともに各種の数値処理を行った。

放電電極は、先端を約 60 度の円錐状に加工したステンレス棒（直径 2 mm）であり、高圧・接地電極間の間隙（ギャップ）は 4 mm とした。

メッシュはステンレス製であり、サイズは 50 または 100 である。また、フレームアRESTA は真鍮製でメッシュ間隔 1 mm のものを使用した。

今回の実験に使用した粉体は、石松子（Lycopodium）、アントラキノン（Anthraquinone）及びポリアクリロニトリル（Polyacrylonitrile）の 3 種類である。これらは IEC 規格³⁾に校正試験用の粉体として指定されているものである。すなわち、同規格にはこれら粉体の標準的な MIE 値が提示されており、その値に合致するか否かで試験装置を評価すべきと記されており、

*ハルトマン式 (MIKE-3) では 1.0mH を使用しているが、本研究では調達上の問題で 0.94mH を採用した。違いは僅少であるので、影響は少ないと思われる。

今回の実験はこれに則したものである。

基本的な実験の手順は以下の通りである。

- (1) 粉体ホッパーに試験粉体を入れ、爆発容器に固定する。
- (2) キャパシタを所定の電圧に充電する。
- (3) 振動台を起動させ、所定の振動強度に合わせる。
- (4) スイッチを放電回路側に切換え、電極間に火花放電を発生させる。
- (5) 粉じんの着火または不着火の判定を行う。また、放電波形（電圧及び電流）の観測及び放電エネルギーの計算を行う。
- (6) 必要に応じ、条件を変えて(1)～(5)の操作を継続する。

粉じんの着火性の判定にあたっては、放電によって粉じんが発火し、火炎がフレームアレスタに達した場合に「着火」と、同一エネルギーでの試行20回以内にそのような状態にならなかった場合には「不着火」とした。

放電エネルギー W [J] は、放電前のキャパシタ C [F] の充電電圧 V [V] を測定し、 $W = 1/2 CV^2$ を用いて計算した。

さらに、参照用として市販のハルトマン式試験装置 (Adolf Kuhner AG 製 MIKE-3) を用いて同じ試験粉体の MIE を求めた。

4. 実験結果及び考察

4.1 振動型の操作性

着火試験は前述の実験手順に従い、ほぼ順調に遂行することができ、従来型に比べて大幅に短時間で MIE を得ることができた。ただし、今後解決すべき問題として以下の点が指摘できる。

- (1) 粉じんの爆発時の圧力上昇は従来型と比較すれば小さいが、それでも若干スタビライザーのスプリングに逆らってホッパーを押し上げる程度の力が発生する。したがって、爆発容器から圧力を放散させる仕組みを設ける必要がある。
- (2) 粉じんの爆発後、燃焼生成物として各種の固体物質（灰、煤、融解凝固物等）が生成される。これらのうち微細なものは下部フレームアレスタを通過して未燃焼粉体に混入することがある。このことは粉体の再利用を困難にするので、未燃焼の試験粉体のみを速やかに回収する機構を設けることが望ましい。
- (3) 粉体の粒径分布によっては、メッシュホルダーが篩分器として作用するために、粉じん粒径分

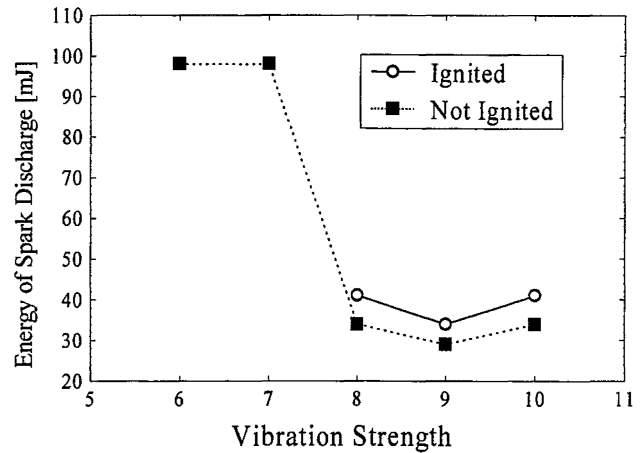


Fig. 3 Ignition energies for anthraquinone.
アントラキノン粉じんの着火エネルギー

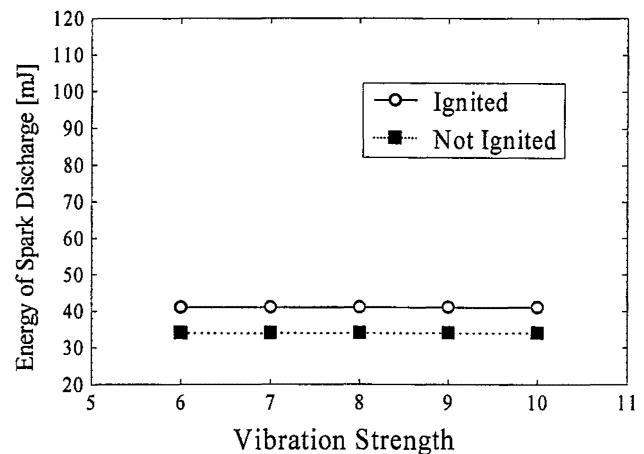


Fig. 4 Ignition energies for polyacrylonitrile.
ポリアクリロニトリル粉じんの着火エネルギー

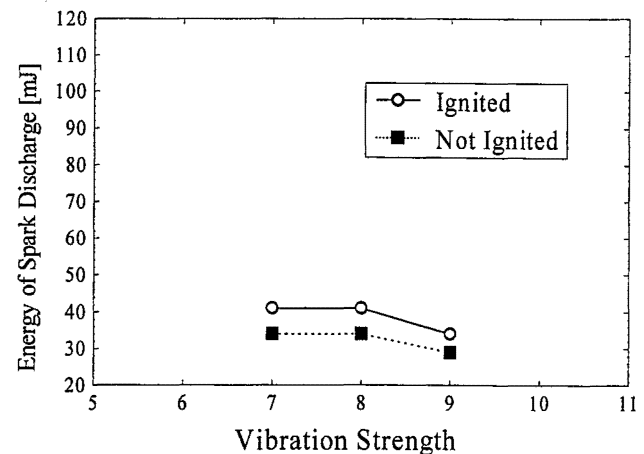


Fig. 5 Ignition energies for lycopodium.
石松子粉じんの着火エネルギー

布が本来のものと異なることが予想される。試験に当たっては、予め、粒径分布に影響を与えないようメッシュのサイズを注意深く選択する必要がある。

Table 1 Sizes and MIEs measured by the new (vibrating mesh) and the conventional (Hartmann tube) methods.

試験粉体の粒径並びに振動型及び従来型で得られた最小着火エネルギー

Substance	Median Diameter [mm]	MIE [mJ]		
		Vibrating Mesh	Hartmann Tube (MIKE-3)	Target Value Recommended by IEC (mean diameter) ¹⁾
Lycopodium	38	23-29	10-30	5-10 (31 μm)
Anthraquinone	178	29-34	1- 3	2- 6 (18 μm)
Polyacrylonitrile	73	34-41	10-30	2- 6 (27 μm)

Table 2 Charge of powder passing through the vibrating mesh.

メッシュ通過後の粉体の帯電量

Substance	Charge amount [$\mu\text{C}/\text{kg}$]		
	Minimum	Maximum	Mean
Lycopodium	-1.5	-2.4	-1.9
Anthraquinone	-2.3	-11	-6.1
Polyacrylonitrile	-0.13	-0.54	-0.23

(4) ホッパー内の粉体の残留量に応じて粉じん濃度が増減しやすい。これは、粉体の量が増減することにより粉体の振動状態も変化するために、それによってメッシュを通過する粉体量が影響を受けるためと考えられる。メッシュと粉体の接触関係を常に一定に保つために、粉体容器とメッシュをそれぞれ独立構造とする等の工夫が必要と考えられる。

4.2 振動型によって得られた MIE の評価

振動型での着火エネルギー測定結果を Fig. 3~5 に示す。これらの図において、○印は着火した最小の放電エネルギーを、■印は不着火時の最大の放電エネルギーを意味する。したがって、ある振動強度における着火エネルギーは○と■の間に存在すると結論できる。これら着火エネルギーの中で最低の値（例えば、Fig. 3 では 29~34 mJ）が MIE である。なお、Fig. 3~5 中の横軸は振動台に目盛りされた振動の強度を示す数字であり、この数値と粉じんの落下量の間には相関関係があることは確認済み（ただし、相関係数は粉体の種類、粉体ホッパー内の残量、粒度分布、メッシュの大きさ等によって異なる）であるが、現時点では、測定手段がないため、粉じん濃度を直接知ることはできない。したがって、ハルトマン式で得られるような粉じん濃度と着火エネルギーの関係を示すデータは得られていない。

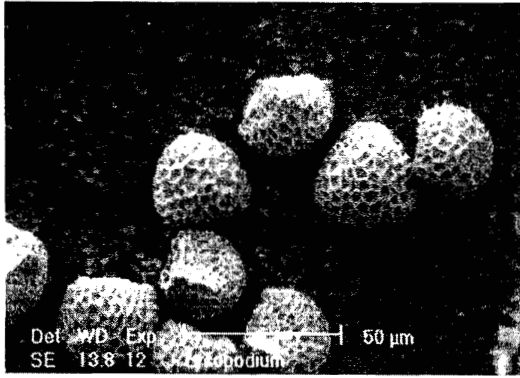
今回の実験に用いた 3 種類の粉体の MIE をまとめると Table 1 のようになる。同表によると、石松子及

びポリアクリロニトリルについては、振動型とハルトマン式はほぼ同様の MIE 値となっているが、アントラキノンについてはかなりの差異がある。この差異については、アントラキノンの粒度分布が重要な役割を有していると考えられる。なぜなら、一般に、粉じん爆発においては同じ質量に対して表面積が大きいほど粉体への熱伝達が促進されるので、粒度分布は着火性及び爆発性に多大の影響を及ぼすからである。

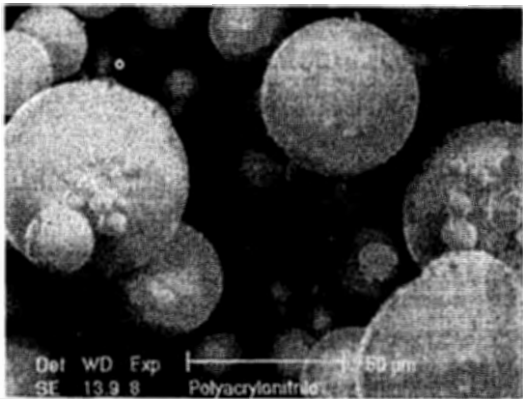
Table 1 にメッシュを通過した粉体の粒度分布（レーザ式粒度分布測定装置を用いて実測）から得られたメディアン粒径が示されているが、アントラキノンのみが 178 μm と他の物質よりもかなり大きな値となっている。今回、アントラキノンの試験粉体を作成する際には、予め 100 メッシュ（隙間 150 μm ）の篩分器を使用して粒径を調整しているため、もっと小さな値となるはずである。したがって、アントラキノンの場合には、メッシュ通過時に粉体の凝集が起こっていると考えられる。著者らは、この凝集現象の原因として粉体の帯電性と形状に着目し、(1) メッシュを通過する際の粉体の帯電量、及び(2) 顕微鏡による形状及び凝集の観測を実施した。

まず帯電性についての測定結果を Table 2 に示す。アントラキノン以外の物質と比較して極めて大きな帯電量を示した。電荷量は各粉体粒子に均等に分布しているのではないと考えられるから、帯電量の大きな粒子に帯電量の小さな、または逆極性に帯電した粒子が電気力学的作用（クーロン力等）により付着しやすくなると考えられる。

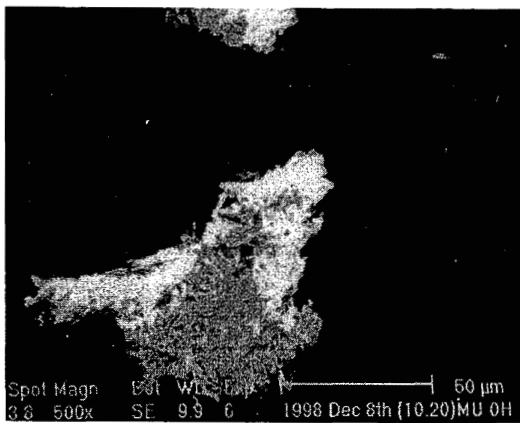
次に、走査型電子顕微鏡で観測した各粉体の形状を Fig. 6 に示す。石松子 (a) 及びポリアクリロニトリル (b) はほぼ球状であるが、アントラキノン (c) は形状が一定しておらず、かつ各粉体がさらに小さな針状の結晶体で構成されている。アントラキノンのこのような形状は、当然、粉体間の密着性を高めることとなり、凝集を促進することになると考えられる。例えば、Fig. 7 は着火試験後のメッシュの表面を顕微鏡 (CCD カメラ) で観測したものであるが、アントラキ



(a) Lycopodium



(b) Polyacrylonitrile



(c) Anthraquinone

Fig. 6 SEM photographs of tested powders.
供試粉体の電子顕微鏡写真

ノン粉体が網の周辺に凝集して付着していることが確認できる。この凝集現象は、やがてメッシュの目詰まりを引き起こすことになるので、MIE への影響のみならず、試験操作そのものを阻害することにもなる。帯電性と形状のどちらが凝集により多く寄与しているか現時点では不明であるが、粉体の種類によっては凝集を防ぐための何らかの手段（例えば、メッシュ素材

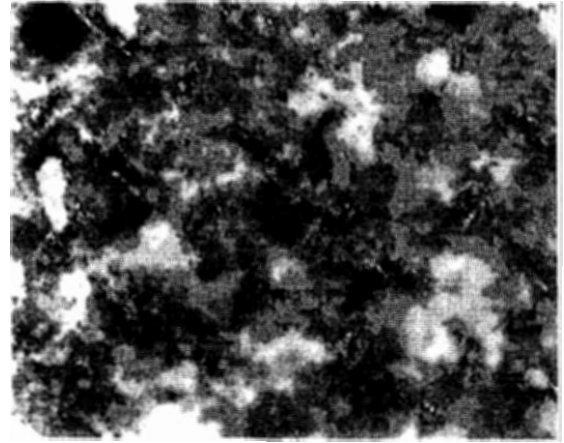


Fig. 7 Photograph showing the agglomeration of anthraquinone particles on the mesh.
メッシュ上でのアントラキノン粉体の凝集の様子

の吟味、振動方式の改良等)が必要であることが示唆される結果と言えよう。

5. 結 言

新たに開発した振動式粉体着火最小エネルギー測定装置（振動型）を用いて、三種類の試験用標準粉体（石松子、ポリアクリロニトリル、アントラキノン）の粉じん状態での最小着火エネルギー（MIE）を測定し、ハルトマン式（従来型）で得られた値と比較した。その結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 振動型は、従来型に比べて構造が簡単で取り扱いが容易であり、大幅な時間短縮が可能である。一方、燃焼生成物の処理方法、粉体の定量供給等解決すべき問題もある。
- (2) 石松子及びポリアクリロニトリルの場合、従来方式とほぼ同様の MIE 値となり、良い一致を示した。
- (3) アントラキノンの場合、従来方式で得られた MIE 値よりも 1 桁大きなものとなった。これは、粉じん形成用のメッシュホルダーとの摩擦によって発生した静電気による電気力学的作用、ならびに針状の結晶を有する不定型な形状が凝集を促進しているためと考えられる。

謝 辞

実験を遂行するに当たり、大韓民国ソウル産業大学校安全工学科修士課程学生崔光石 (Choi Kwang-Seok) 氏にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) IEC, International Standard 1241-2-3 (1994)

- 2) W.L. Cheung, T. Kodama and M. Yamaguma,
“Vibrating Minimum Ignition Energy Measurement
System”, 静電気学会講演論文集'97, pp.181-186
(1997)
- 3) W.L. Cheung, T. Kodama and M. Yamaguma.,
“Development of Vibrating Measurement Appara-
tus for Minimum Ignition Energy for Powder”, ESA-
IEJ Joint Symposium on Electrostatics Proc.,
pp.143-150 (1998)

(平成10年11月10日受理)