

超音波式粉じん雲生成機構を有する粉じん着火エネルギー試験装置の諸特性*

山隈瑞樹**, 崔 光石***, 児玉 勉****

Characteristics of a New Apparatus for Measuring Ignition Energy of Dust Clouds having a Dispersion Mechanism by Ultrasonic Vibration*

by Mizuki YAMAGUMA**, Kwang-Seok CHOI*** and Tsutomu KODAMA****

Abstract: This paper describes a novel apparatus for measuring the minimum electric spark ignition energies of combustible dust clouds. Instead of a transient suspended dust cloud by a blast of compressed air as in the conventional Hartmann tube apparatus, this one forms a curtain-like, constant downstream of dust in an explosion chamber by combining an ultrasonic vibrator, a sieve, and a specially designed dust hopper. While passing through the gap of two electrodes placed in the middle of an explosion chamber, sparks are given to the dust stream to determine its minimum ignition energy (MIE). The concentration of a dust cloud is widely controllable through the current to the vibrator. The apparatus is equipped with two pieces of coarse metal mesh functioning as flame arresters and are placed just below the sieve and over the base of the explosion chamber to protect the chamber and to enable the recycling of unburned dust. By comparing the MIE values of several samples of dust with those obtained by the conventional method, the new method was confirmed to give reliable data.

Keywords; Electrostatic spark, Minimum ignition energy, Dust explosion, Ultrasonic vibration

1. 緒言

浮遊粉じんの静電気放電に対する着火感度を表す最小着火エネルギー (Minimum Ignition Energy, 以下 MIE という。) はプロセスの安全上重要な指標であり, 既に多くの粉じんについてそのデータが公表されている¹⁾。しかし, 一般に粉じんの MIE は, 粒径分布, 形状, 混合物の成分等によってその値が大幅に異なるために, 実際のプロセスで使用される粉体の MIE を知るためには実測せざるを得ない場面が多々ある。現在, MIE の測定装置としてはガラス製の円筒形爆発容器内に圧縮空気を利用して試料の粉じん雲を作り, これに静電気スパークを与えて着火させるハートマン式が国内外で標準的に用いられている²⁾。しかしながら, ハ

ートマン式は浮遊粉じんの着火タイミングの影響を受けやすいこと, 吹き上げの際に試料粉体の一部が爆発容器の外に散逸するので連続的な試験を行う場合に粉体の定量性に問題がある等の特性があるために, オペレータの技能レベルによって異なったデータが得られやすいこと, また, 空気コンプレッサが必要なことや堅牢な筐体の採用等によって一般に非常に高価なものとなるので, 容易に導入できないという問題点がある。その他に, 篩に試験粉体を入れ, これに打撃振動を与えて粉じん雲を形成する落下式着火試験装置³⁾があるが, やはり複雑な構造と高価な価格のために広く普及するには至っていない。

上述のような従来型が抱える問題を解決するために, 我々は新たな電磁式振動型粉じん着火試験装置を考

* 安全工学 Vol.42, No.1 (2003) において一部発表

** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

*** 茨城大学大学院理工学研究科 Ibaraki University, Graduate School of Science and Engineering

**** 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

案・試作し、その特性を調べるとともに種々の改良を行ってきた^{4,7)}。同装置は、50Hzの交流電磁石の振動を利用するものであり、低コスト化が可能で、操作も簡単という長所があったが、一方で粉じん濃度の制御が正確にできないこと、一部の粉体についてはメッシュが目詰まりを起こしやすく十分な粉じん濃度が得られないこと等の未解決の問題もあった。そこで、新たに振動の発生源として超音波発振器を用い、かつ、各部の設計を大幅に見直すことにより、従来の問題点をほぼ解決した利便性の高い試験装置を開発した。以下に、同装置の特性を報告する。

2. 実験

2.1 超音波式粉じん着火試験装置

本研究で試作した超音波式粉じん着火試験装置（以下、超音波型という。）をFig. 1に示す。同装置は、機能毎に次の三つの部分に分けることができる。まず、上部（upper part）には、試験粉体用ホッパ、メッシュ及び超音波発振器等から成る粉じん発生機構が収められ、着火試験用の浮遊粉じん（実際には、シート状に自由落下する粉じん流）を発生する。次に、中間部（middle part）には、筐体の両側から一対の放電電極が配置されており、電極ギャップ間を通過する粉じんに放電エネルギーを与えて発火及び爆発を起こす。この部分の上端及び下端には粉じんの通過を妨げないほどの目開きを有する金属メッシュが取り付けられており、粉じんの爆発時にはフレームアレスタとして機能することにより、爆発時の熱及び圧力を低く抑えることが可能である。最後に、下部（lower part）には引き出し式の容器があり、着火せずに落下した粉じんを回収する。もし、回収した粉じんが燃焼灰等の不純物を含まない場合には再使用することが可能となる。

本装置の心臓部である粉じん発生機構の構成をFig. 2に示す。メッシュを長方形のフレームに取り付け、その上にホッパ及び超音波発振器（Phillip社製、振動周波数28kHz）が配置されている。発振器の振動は、小径の金属円板及びSUS製ホーン（vibration horn）を介してメッシュに伝えられ、ホッパ内の粉体を篩作用によって落下させ、浮遊粉じんを形成する。発振器の振動振幅は電流によって制御することが可能である。

2.2 実験方法

上述の着火試験装置に対して、Fig. 3に示すように、静電容量型高電圧電源回路及び測定機器（高電圧

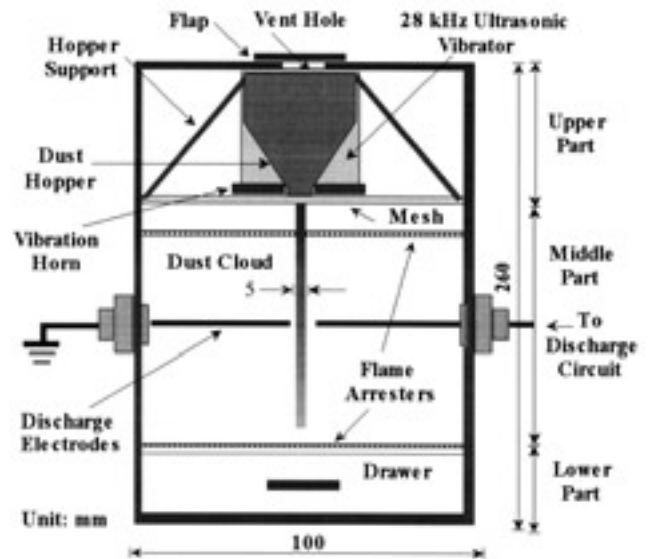


Fig. 1 Sideview of the ultrasonic-driven dust ignition measuring device.
超音波式粉じん着火試験装置の構造

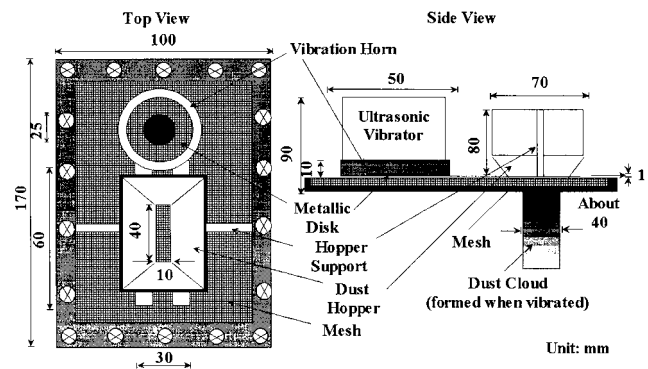


Fig. 2 Structure of the dust generating mechanism.
粉じん生成機構の構造

プローブ、CT型電流プローブ、デジタルオシロスコープ及びパーソナルコンピュータ）を取り付け、試験システムを構築した。

今回の試験では、放電電極に、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）を採用し、電極間の間隙（ギャップ）は4 mmとした。放電回路にはIEC規格に従い、着火性を高めるために1 mHのインダクタンスを直列に接続した。

装置を起動させ、浮遊粉じん濃度が安定したことを確認後、1秒間に1回の割合で放電を発生させ、最大20回までの放電のうち、一度でも発火し火炎が上方のフレームアレスタに到達した場合に着火と判定した。

MIEはキャパシタの静電容量 C 及び充電電圧 V を $1/2CV^2$ へ代入し計算した。

この装置を利用した粉じんの着火試験の一例をFig. 4に示す。浮遊粉じんの生成(1)、発火(2)、火炎伝播

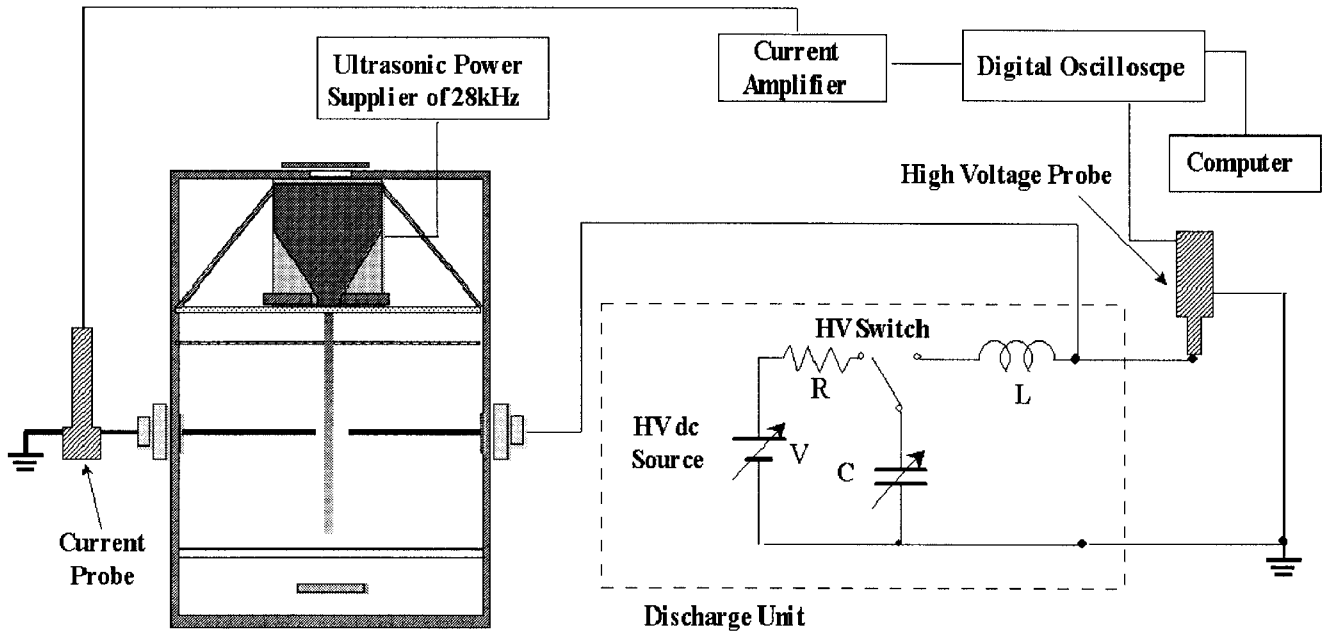


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up.
実験装置の構成

Table 1 Characteristics of sample dusts and optimum mesh sizes.
供試粉体の性状及び最適なメッシュサイズ

Sample Name	Particle Shape	Median Particle Size [μm]	Bulk Density [g/cm^3]	Mesh Size [μm] (Tyler-No)
Lycopodium	Round	30	0.34	124 (115)
Polyacrylonitrile	Round	24	0.65	104 (150)
Anthraquinone	Irregular	31	0.26	208 (65)
PMMA	Round	29	0.71	104 (150)
Nylon	Mostly Round	44	0.49	175 (80)

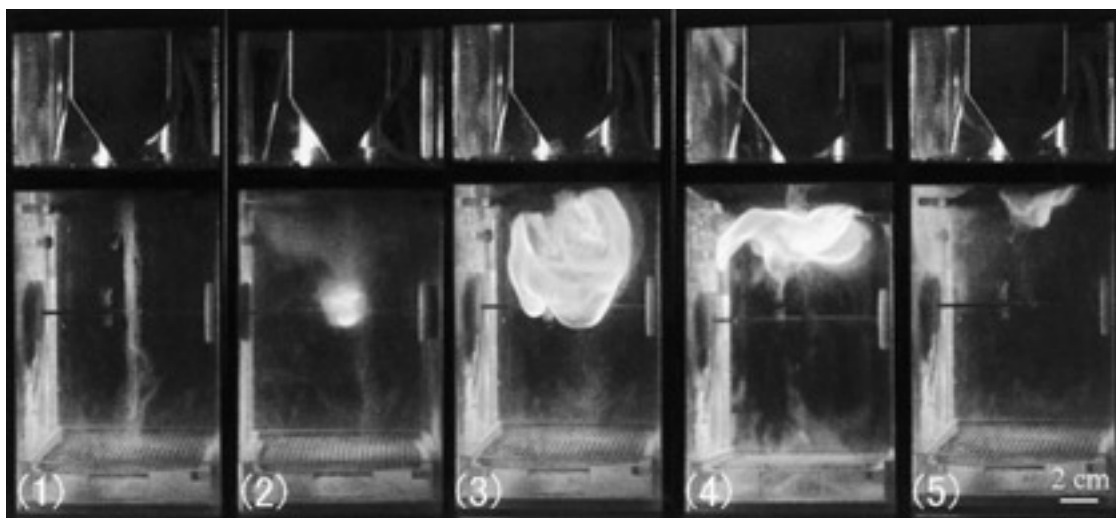


Fig. 4 Typical sequence of the ignition of a sample dust (from left to right).
標準的な着火パターン (左から右へ)

(3), 及び消炎(4-5)という一連の動作が示されている。

2.3 供試粉体

着火試験用試料粉体として、IEC規格²⁾に校正用として指定されている3種類の粉体(石松子, ポリアクリロニトリル, アントラキノン)並びにPMMA及びナイロンの計5種類を用いた。これらの主な性状をTable 1の第2~4列に示す。いずれの粉体も, 着火試験に先立って50のデシケータに24時間入れて十分乾燥させた。

3. 実験結果及び考察

3.1 超音波振動の特性

開発当初, 超音波発振器を直接メッシュに接触させてもメッシュは篩作用を生じるほどには振動しなかった。そこで, 振動の媒介物として金属円板を発振器とメッシュの間に挿入したところ, 振動がメッシュに良好に伝達されることが分かった。様々な形状及び材質で試行した結果, 直径25mm, 厚さ2mmの銅・ニッケル合金製の円板が最適であることが判明した。振動伝達の詳細なメカニズムは未だ説明できていないが, 円板が発振器の振動数とメッシュの固有振動数を整合させる作用を担っていると考えられる。

実際のメッシュの振動状態を観測するために歪ゲージをホッパ開口部(10mm×40mm)の中央付近のメッシュ上に貼り付けてその出力波形を観測した。波形

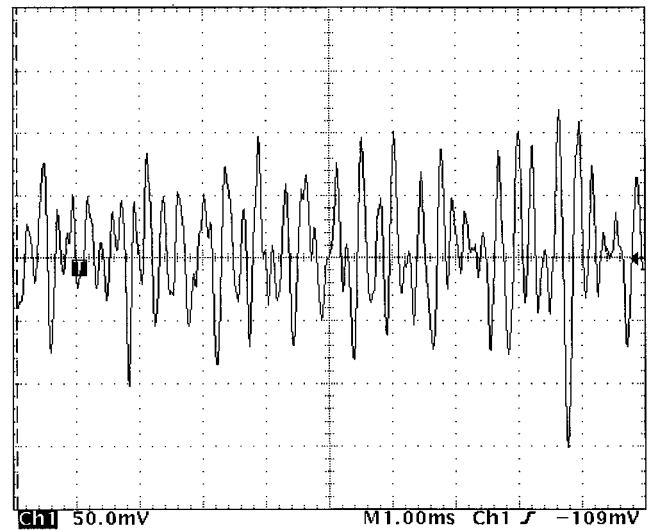
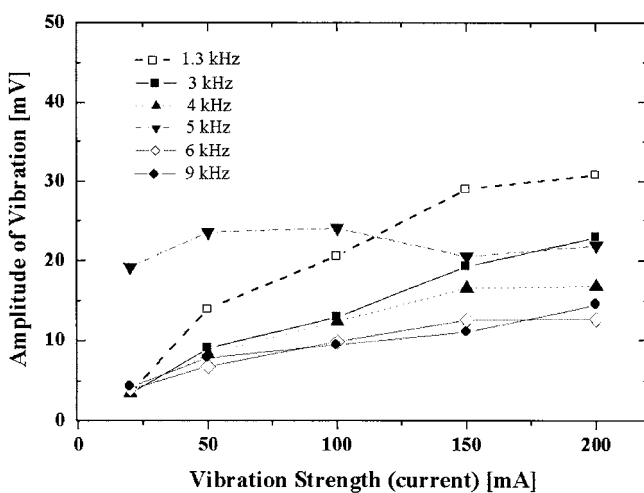


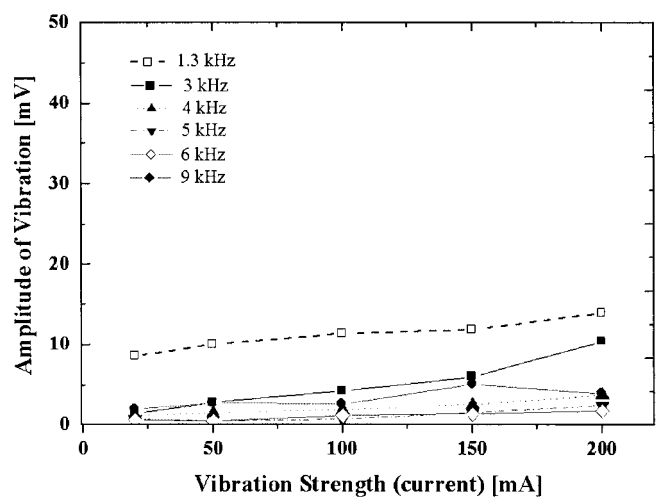
Fig. 5 Typical waveform of a vibration of the mesh taken with a strain gauge.

歪ゲージによるメッシュの振動波形の一例

は, その一例をFig. 5に示すように, 歪の多いものであった(供給電流50mA)。そこで, 主要な周波数成分について, 発振器供給電流に対する変化をホーンの長軸に平行な方向及び垂直な方向について調べたところ, それぞれFig. 6及びに示す結果が得られた。振動の全体的な比較をすると平行方向の方が垂直方向よりも顕著に大きい。これは, 主としてホーンの長軸方向に沿って振動が発生していることを意味するものであり, 形状から判断して妥当な結果である。両方向で最も主要な振動は1.3kHz成分であった。平行方向では, その他に3kHz, 4kHz及び5kHzが大きく, 垂直方向では3kHzがやや大きな成分であった。各振動は, 平行方向の5kHz成分を除き, 電流に対してリニアな



(a) direction parallel to the horn



(b) direction perpendicular to the horn

Fig. 6 Major components of the vibration of the mesh.

メッシュの主な振動成分(ホーンに平行方向, ホーンに垂直方向)

増加傾向を示した。

3.2 メッシュサイズの選定

粉体の中には、粒子の形状が不揃い、または粒径分布の幅が大きいものがある。このような場合でも、粒径分布を変化させることなく浮遊粉じんを形成するためには、最大粒径よりも大きな目開きのメッシュが必要となる。また、粉じんを着火試験に適する濃度内にコントロールするには、落下量が必要以上とならないよう目開きをある上限以下としなければならない。このような観点から、本実験の供試粉体について、最適なメッシュサイズを実験的に求めた。その結果をTable 1の第5列に示す。この結果から次のようなメッシュ選定の目安が得られた。

粒子が球状の形状の粉体（石松子、ポリアクリロニトリル、PMMA、ナイロン）では、メジアン粒径対メッシュサイズの比を1:3~1:4とする。

粒子が細長い形状の粉体（アントラキノン）では、その比を1:6~1:7とする。

細長い形状の粉体では、球形の場合の約二倍の目開きのメッシュを使用しなければならなかった理由として、粒径の測定法に起因する問題点が指摘できる。即ち、上記のメジアン粒径は一般的な粒径測定手法であるレーザー回折法（laser diffraction method）によって得られた値であるが、これは長径と短径の平均的な値を示すので、細長い形状の場合、長径よりもかなり小さいものとなる。実際に、顕微鏡観測によって長径（Ferre's diameter）を測定すると、そのメジアン値は65 μm であり、レーザー回折法の31 μm に比べて

約二倍の大きさであった。つまり、Ferre's diameterを用いれば、粉体の形状によらずほぼ1:3~1:4という比でメッシュを選択すればよいことになる。

3.3 粉じん濃度の調節と安定性

メッシュに与える振動の振幅を変化させたときの、単位時間当たりの粉じん落下量の変化を測定した。ただし、振幅の実測は困難であったので、代わりに発振器への供給電流値を用いた。その結果、Fig. 7に示すように、全ての供試粉体において、電流値に対して粉じん落下量はほぼリニアに変化した。これは、3.1節に述べたように、振動の主要な成分が電流に対してやはりリニアに変化したことに起因するものと考えられる。また、ばらつきの範囲に示されるように、一定の電流値における粉じん落下量の安定性も良好であった。

同様の特性を、本装置の原型である50Hz電磁振動型試験装置⁶⁾（以下、電磁型という。）を用いて測定したところ、Fig. 7のように、ある粉体では特定の振動の強さから粉体濃度が急激に増加したり、別の粉体では逆に減少したりと予測しがたい変化を示し、かつ、一定の振動レベルにおいても濃度が著しく変動し安定性に欠けていた。

超音波型では、振動の周波数が1.3kHz以上と電磁型の50Hzに比べて極めて高い。周波数が高くなるほど粉体の慣性によって粉体がメッシュに付着しずらくなり、メッシュと粉体の間に実質上の隙間ができやすくなるので、より効率的な篩作用が行われるものと考えられる。このことは、Fig. 8及びに示すように、比較的目詰まりを起こしやすい粉体であるアントラキノン

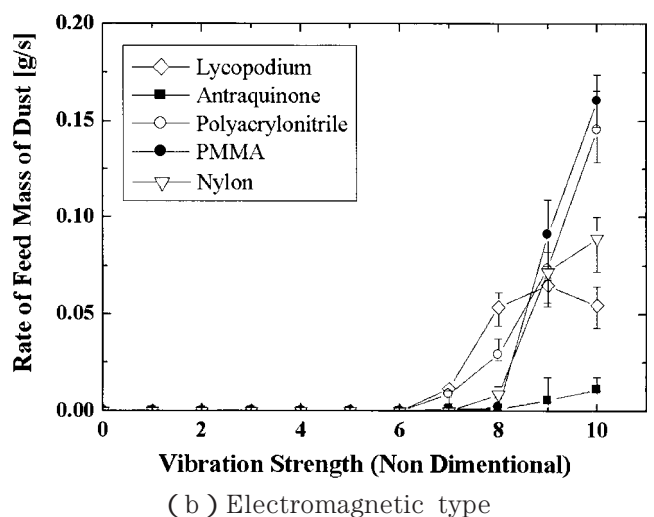
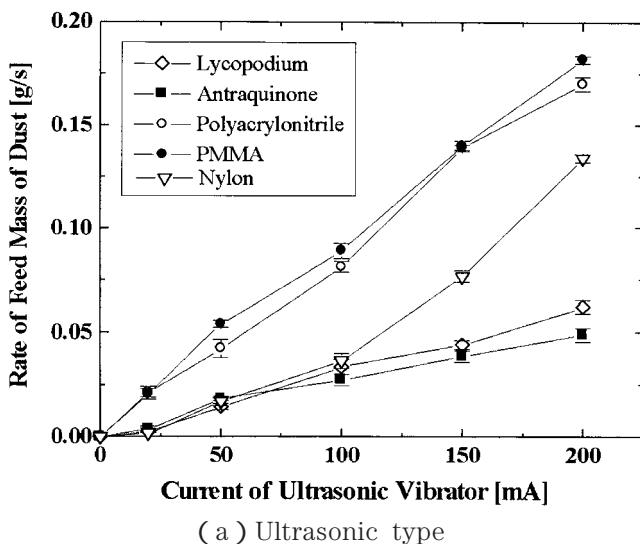
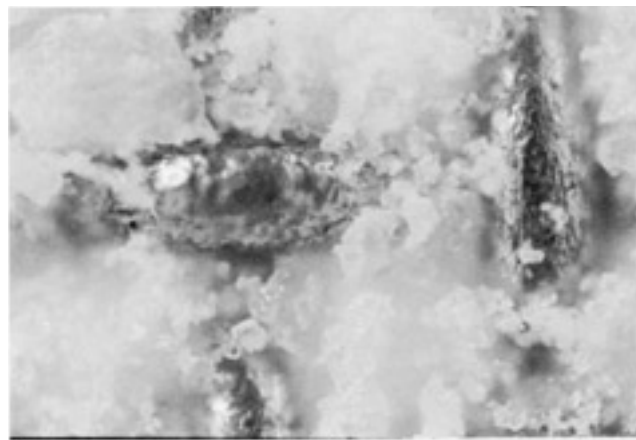


Fig. 7 Vibration strength vs. feeding rate of dust.
振動の強さと粉体落下量の関係



(a) Ultrasonic type

(b) Electromagnetic type

Fig. 8 Deposition of particles on the mesh after sieving anthraquinone dust.
アントラキノン篩分後のメッシュへの粒子の残留の様子

Table 2 MIEs of samples by new and conventional methods and agglomeration of particles.
供試粉体のMIEの測定値及び粒子の凝集

Sample Name	Minimum Ignition Energy [mJ] ($W_1' < \text{MIE} < W_2''$)		After Passing Through Mesh	
	New Apparatus (Ultrasonic)	Hartmann Apparatus (MIKE-3)	Median Particle size [μm]	Average Charge [$\mu\text{C}/\text{kg}$]
Lycopodium	25 ~ 32	10 ~ 30	33	-0.20
Polyacrylonitrile	29 ~ 34	10 ~ 30	36	-0.47
Anthraquinone	9 ~ 15	3 ~ 10	107	-5.51
PMMA	125 ~ 245	100 ~ 300	32	-0.51
Nylon	50 ~ 98	30 ~ 100	48	-0.57

W_1' : highest energy at which ignition fails to occur in 20 successive attempts. W_2'' : lowest energy at which ignition occurs within 20 successive attempts.

を用いて、振動後のメッシュへの粉体の粒子の付着の様子を観測した結果からも歴然である。

以上のように超音波振動を利用することにより、濃度の調節が広い範囲で可能となり、かつ、濃度の安定性も大幅に向上したことから、実用性が大幅に改善された。

3.4 着火試験データ及びその評価

本試験装置を用いて、5種類の供試粉体について、そのMIEを測定した。また、比較対照用としてIEC規格に準拠した市販のハルトマン型試験装置(Adolf Kühner AG社製 MIKE-3)を用いての測定も同時に行った。

まず、石松子の場合における着火特性をFig. 9に示す。同図中の粉じん濃度 N [kg/m^3]は、次式で計算した⁶⁾。

$$N = M/Sv \quad (1)$$

ただし、 M [kg/s]は単位時間当たりの粉体の落下重量、 S [m^2]は粉じん流の断面積、 v [m/s]は粉じんの平均落下速度である。(M及びvは、それぞれ電子重量計及び高速度カメラによって測定した。)

超音波型による石松子のMIEは25~32mJの間にあり、このときの発振器電流は約150mA、粉じん濃度は約 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ であった。一方、MIKE-3ではMIEは10~30mJの間にあり、粉じん濃度は約 $0.8\text{kg}/\text{m}^3$ であった。即ち、超音波型と従来型とではほぼ等しい着火特性が得られた。なお、装置によってMIEの範囲に違いがあるのは、放電用キャパシタ及びその充電電圧の選択可能な範囲が異なるためである。

同様にして、全ての供試粉体について測定した結果をTable 2に示す。同表の結果からほぼ全てのサンプルにおいてMIKE-3と同様のMIEが得られることが確認された。

ただし、アントラキノンに関しては、電磁型の場合

よりは大きく改善されたものの、依然としてハートマン式よりも若干高めのMIE値となった⁶⁾。これは、Table 2の第4列に示すように、メッシュ通過後の粉体が凝集して実質的な粒径増大を引き起こしてしまったためと考えられる。また、その理由としては、細長い形状であり互いに絡みやすいことに加え、Table 2の第5列に示すように、メッシュとの摩擦帯電によって粒子間に電気力が作用したためと考えられる。(この帯電性の問題は、次の改良の機会に対応する予定である。)

次に、上述のように、超音波型とハートマン式では浮遊粉じんの状態が異なるにもかかわらず、多くの粉体についてほぼ同等の着火特性が得られる理由を考察する。

一般に浮遊粉じんに動きがある場合には、その流速が大きいほどMIEも増加することが知られている^{8,9)}。したがって、ハートマン式では、圧縮空気を極く短時間吹き出して粉じんを舞い上げた後、粉じんの動きが沈静化するのを待ってスパークを発生させる。この待機時間を点火遅延時間 (ignition delay time) と呼ぶ。点火遅延時間は粉じんの粒径及び比重によって異なり、たとえば、供試粉体のうち石松子及びアントラキノン⁸⁾は120ms、ポリアクリロニトリル、PMMA及びナイロンは180msであった。一方、超音波型では粉じんは重力によって自由落下しており、その速度は、たとえば石松子では約0.4m/sであった。Smielow等の実験データ⁹⁾によれば、流速0.5m/sにおいてMIEの増加率は5%程度以下と推定されるが、粉じん着火試験の精度を考慮すれば、この程度の変化が直ちに測定値に反映されることは困難と考えられる。即ち、ハートマン式と超音波型では、厳密に言えば粉体の状態が異なるのでMIEにも違いがあると見込まれるが、測定の精度に限界があるためにこの違いを明瞭に弁別することはできないと考えられる。しかしそれでも、この種の試験は、精度よりもオーダーが重要であるので、実用上は差しつかえない程度の差異であろう。

3.5 回収粉体のリサイクル性

本装置のもう一つの利点は、一連の試験で着火に至らなかった供試粉体は、装置の下部の容器で回収した後、再度試験に使用することが可能となることである。もちろん、着火しなくてもスパークの熱にさらされた粒子はある程度は炭化することが予測されるが、高速カメラによる観測では、1秒間に1回のペースで放電を行い、粉じんの供給量が0.06g/sである場合には、スパークの影響を受けると推定される粉体の割合は、

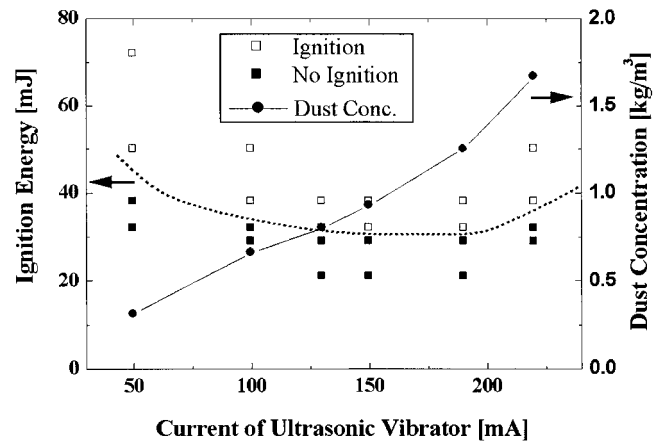


Fig. 9 Ignition energy of lycopodium spores taken with the ultrasonic-type apparatus.
超音波型による石松子の着火エネルギー測定結果

多く見積もっても0.1%であったので影響は軽微と考えられる。実際、石松子を用いて2~10回再使用したが、いずれも初回と等しいMIEが得られた。

このようなりサイクル性を有することで、サンプルの量が限られている場合にも対応可能と考えられる。この点を明確にするために、実際に、ナイロンの最小着火エネルギーを測定する場合に必要な粉体量を超音波型及びハートマン式 (MIKE-3) で比較した。その結果、超音波型では42g (12回着火, 11回非着火。粉体を3回再使用)、ハートマン式では80g (14回着火, 11回非着火)であった。ただし、前述の通り、ハートマン式では点火遅延時間によっても着火エネルギーが異なるので、もし、これを考慮して試験すれば、必要な粉体量は更に増える可能性がある。

4. 結言

超音波振動を利用して浮遊粉じんを生ずる機構を有する粉じん着火エネルギーの測定装置を開発し、その特性を調べた。結果をまとめると以下の通りである。

電流制御型の超音波発振器 (28kHz) の振動を金属円板及びホーンを介して篩用メッシュに効率よく伝達することができた。また、振動の強さ及び粉じん落下量を電流に対してリニアかつ少ない変動率で制御することが可能であった。

浮遊粉じんを形成するための供試粉体のメディアン粒径 (Ferre's diameter) とメッシュの目開きの最適な関係は1:3~1:4であった。

5種類の供試粉体を用いてMIEを測定したところ、従来型 (ハートマン式) とほぼ同様の値が得られた。粉体の回収が容易であり、かつ、再使用できるので試料粉体を大幅に節約することが可能であった。

謝辞

茨城大学工学部電気電子工学科・竹内学教授には，研究討論等を通じ有益な情報の提供及び実験上のアドバイスをいただいた。また，機械システム安全研究グループ佐々木哲也主任研究官には振動測定技術の指導をいただいた。以上，記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Eckoff, R.K.: Dust Explosions in the process industries - Second Edition, Butterworth Heinemann (1997)
- 2) IEC, International Standard: 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 (1241-2-3)(1994)
- 3) (社)日本粉体工業技術協会規格 APS002 (1991)
- 4) Cheung W.L., Kodama T. and Yamaguma M.: Vibrating minimum ignition energy measurement system, Proceedings of International Session of the Institute of Electrostatics Japan, pp.181-186 (1997)
- 5) Cheung W.L., Kodama T. and Yamaguma M.:

Development of vibrating minimum ignition energy for powder. Proc. ESA-EIJ Joint Symposium on Electrostatics, pp.143-150, Palo Alto (1998)

- 6) 山隈瑞樹，児玉勉，張偉林：振動型粉体最小着火エネルギー試験装置の開発，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.17, pp.29-34 (1999)
- 7) Choi K.S., Yamaguma M., Kodama T., Takeuchi M., and Joung J.H.: Characteristics of the vibrating-mesh ignition energy testing apparatus for dust clouds. J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.14, pp.443-447 (2001)
- 8) Smielow, G.I. and Rutkowski, J. D.: Dadania Zjawiska Zaplonu Miesmanin Pylowopowietrznych wywolanego wyladonaniem iskrowymi. Chemia Stosowana XV 3, pp.283-292 (1971)
- 9) 松田東栄：配管中における粉じん流の最小着火エネルギーに及ぼす空気速度の影響，産業安全研究所研究報告，RIIS-RR-86, pp. 93-107 (1986)

(平成15年1月31日受理)