

2. 可燃性微粉体の最小着火エネルギーの測定*

松田東栄**, 富田 一***, 児玉 勉***

2. Measurement of Minimum Ignition Energies for Combustible Fine Powders*

by Toei MATSUDA**, Hajime TOMITA*** and Tsutomu KODAMA***

Abstract : Minimum ignition energy (MIE) is used to assess the ignition risk of combustible dusts. It can be conveniently measured using spark discharges, but the MIEs for dust suspensions depend on a number of variables such as particle characteristics, electric circuits and dust-dispersion system. It is then quite troublesome to seek an absolute MIE value for a given material. Recently, International Electrotechnical Commission (IEC) has published a standard test procedure for MIE of dust and a test apparatus (known as MIKE 3) which complies with the IEC procedure has been developed in Europe. Using this test apparatus, approximately 40 sample dusts were tested to compensate for the very limited published data. In the tests, some of samples, additive powders to plastics and bis-phenol A dust, showed the MIEs lower than 1 mJ. Considering the ignition mechanism of a dust-air mixture, it will be not necessarily remarkable that some organic dusts have the MIEs of the same rank as that for gaseous mixtures. The existence of these combustible dusts, however, will require the more severe measure for safety in these dust handling facilities than to attempt to eliminate a system of low energy ignition sources. MIE is strongly dependent on particle sizes, but it doesn't always seem to follow that the smaller particle sizes take the lower MIEs. Some dusts with smaller average particle sizes showed the higher MIEs in the tests, maybe due to particle agglomeration. Since the number of practical test variables is limited, this simple apparatus and method could be used for practical MIE rankings of combustible dusts, provided the selection of dust samples would be made to represent the particle size distributions in the industrial use.

Keywords ; Minimum ignition energy, Ignition, Dust-air mixture, Dust explosion

1. はじめに

粉じん爆発の予防対策として、着火源の排除は極めて重要である。その対策の基準あるいは選択の判断の拠り所となるのは、可燃性粉じんの着火のし易さを表す最小着火エネルギーや発火温度である。特に、可燃性粉体を扱うプラントなどにおいて静電気の放電による着火危険性を予防する上で、どのような対策を取る

べきかを示す指標の一つは、当該粉体の最小着火エネルギーの大小となることは、広く認められているところである¹⁻⁵⁾。しかしながら、粉じんの最小着火エネルギーの測定は、通常、浮遊粉じんを着火させ得るコンデンサーに蓄えた電気エネルギーの最小値として求められるが、影響因子が多すぎて精密に測定することはすこぶる煩雑で困難である⁶⁻⁸⁾。爆発下限濃度から粉じん濃度を次第に増すと、通常、着火エネルギーは

*本報の内容を第28回安全工学研究発表会(1995.12)で発表した。

**化学安全研究部 Chemical Safety Research Division

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

急激に低下して、ある濃度（化学量論組成濃度の数倍の濃度）において最小着火エネルギーに到達するが、さらに粉じん濃度を増すと着火エネルギーは次第に上昇するという変化を示す。したがって、最小着火エネルギーの測定にあたっては、粉じん濃度を順次変化させて最適粉じん濃度を見いだしてそれに対応する値を求める必要がある。また、通常、使用される対向電極において電極間に存在する粉じん粒子は試料の粒径分布を反映して、粒子径がまちまちで、たまたま試料中の微粒子が電極間で着火すれば小さい値となり、粗大粒子が着火すれば大きい値となるであろうし、粉じん濃度も実際には均一ではありえない。このような状況で着火エネルギーの最小値を求めるためには、同一条件で繰り返し試験を行うことが必須であり、その場合の着火は多分に確率的なものとなる⁹⁾。以上のような要因の他にも、電極（材質、電極棒の太さ、先端形状、電極間隙、腐食状態）、環境（温度、圧力、層流、乱流、共存物質）、粒子（粒径分布、平均粒子径、粒子形状、凝集性、安定性）などの影響は当然として、放電回路や放電エネルギーの表し方なども考慮しなければ、正確な測定は成し難いであろう。しかしながら、可燃性粉じんの最小着火エネルギーの測定において決定的に重要な要因は、放電に伴って発生する衝撃波によって粒子が蹴散らされることにある^{10,11)}。したがって、衝撃波の影響を抑制することが測定上のポイントになるが、そのためには通常、放電時間を比較的長く取るようにすることが必要になる^{12,13)}。かくして、最小着火エネルギーは最小値を与えるに最適な放電時間、最適電極間隙並びに最適粉じん濃度において求め、それは当該粉じん-空気混合気（粉じん雲）の最小火炎核を形成するのに必要な最小エネルギーに匹敵するものと考えられる^{7,8)}。

このように、浮遊粉じんの最小着火エネルギーの正確な測定は困難を極めるが、測定方法としては、CMI法¹⁴⁾、BS-5958¹⁵⁾、Kuhner/Chiba-Geigy法³⁾などが知られているだけで、これらの方法で測定されたデータで公表されたものは驚くほど少ない¹⁶⁾。このような事情から、最近、欧州（EU）グループによって可燃性粉じんの最小着火エネルギー測定装置及び方法の基準案がIEC（国際電気標準会議；粉じん防爆電気機器）に提案され、それらに準拠する操作が比較的簡易な測定装置が市販されるようになった¹⁷⁾。IEC基準案の測定装置では、

- 電極間隙：最低 6 mm，電極棒直径：2 mm
- 電極材質：タングステンまたはステンレス
- 放電回路中のインダクタンス： $L = 1 \sim 2$ mH
- インダクタンスを使用しない場合： $L \leq 0.025$ mH)

測定範囲：1 mJ ≤ 数 100 mJ の条件を満たすこととなっている¹⁸⁾。

本報では、このような装置を使用して、約 40 種の可燃性（有機）粉じんの最小着火エネルギーを測定したところ、従来報告例の少ない 1 mJ 以下の放電火花エネルギーでも着火する試料が若干見いだされたので、以下報告する。粒径分布は異なるが、重複する試料名も多いので、ここではその約半分の 20 数種について述べる。

2. 実験

2.1 最小着火エネルギー簡易測定装置¹⁹⁾

改良ハートマン式粉じん爆発試験装置の対向電極間に容量放電火花を飛ばし粉じん爆発が生起するかどうかを観察し、その場合の最小のエネルギーを求める装

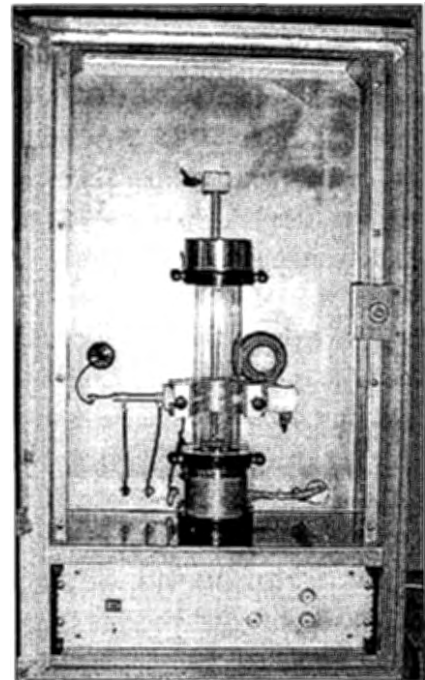


Fig. 1 Minimum ignition energy test apparatus (MIKE 3).
最小着火エネルギー測定装置の外観

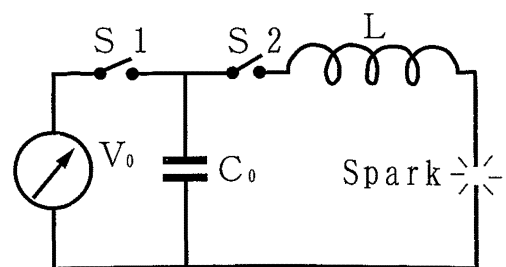


Fig. 2 Schematic discharge circuit of the apparatus.
放電回路の概略^{17,19)}

置 (MIKE 3.2, スイス, アドルフ・キューナー社製) である。爆発容器はガラス製でその容積は 1.2 L である。Fig. 1 に同装置の外観を, Fig. 2 に放電回路の概略を示す。当装置の放電火花エネルギーの表し方は, その電気特性 (放電電流並びに電圧) を実測して校正したもので, 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000 mJ の 7 段階で変化させることのできる簡易最小着火エネルギー測定装置である。電極は, 上記 IEC 案に適合して直径 2 mm の先端針状ステンレス棒で, 電極間隙を 6 mm に固定し, 1 及び 3 mJ の放電においては高圧リレーによって, 10 mJ 以上 1 J までの放電においては移動電極によって, それぞれ火花放電を開始する機構になっている。インダクタンスは 0 または 1 mH で, いずれかを選択することが可能になっているが, 一般にインダクタンスを使用したほうが振動放電となり, 結果的に衝撃波が緩和され, または放電持続時間が長くなって, より小さい最小着火エネルギーが得られるようである^{17,19)}。

最小着火エネルギー (MIE) は, 所定の粉じん量 (通常 300 mg~2,500 mg の間で変化させた) を空気圧 (700 kPa) で分散し, 着火に至らない場合は同一放電条件で 10 又は 5 回の繰り返し実験を行う方法で決定した。MIE は, 最も着火しやすい粉じん量で 5 回中一回でも着火した場合と, 粉じん量を変化させても 10 又は 5 回とも着火しなかった場合の最低または最大ステップのエネルギー値で挟む形で表示してある。この装置の最低及び最大ステップのエネルギー値は 1 mJ 及び 1 J で, これらの値で測定した場合は, いずれかの値でのみ示してある。

試料粉の設定以外の操作は, パソコンを通じて行うので簡易であり, 安全装置が完備しているので, 激しい爆発を起こす金属粉の MIE も測定できる。

2.2 粉じん試料

プラスチック添加用有機化合物粉体 (試料 No. A~Y) と炭じん (試料 No. a~c) などを粉じん試料として使用した。試料粉の名称等については, 測定結果とともに, Table 1 に示す。粒径分布は, レーザースカッター粒度分布測定器によって求めた体積粒径で, 表面積平均径 $d_{3,2}$ (μm) 及び体積中位径 d_{50} (μm) によって示した。 s は分布幅で, $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$ を表す。これらの試料粉を用いて, 前報²³⁾では爆発特性値を測定した結果について報告したが, 粒径分布については湿式によって測定したので本報での乾式測定結果と大きく異なっている。浮遊粉じんとしては, 乾式測定による粒径分布がより妥当と思われるので, 表にはこれを記した。

3. 実験結果及び考察

初めに, 粉じん爆発試験装置の校正用標準粉体として使用される石松子 ($d_{3,2}=31 \mu\text{m}$, $d_{50}=32 \mu\text{m}$, $s=0.33$) の粉じん濃度と着火エネルギーの測定例を, Fig. 3 に示す。同一濃度において 10 回の試験を行い, 10 回とも着火しない場合を□で, 一回でも着火した場合は■で示してある。後者の場合は, 2 回目以降何回目でも着火したかを, 記号■の上に付け加えた T 字の足の長さで概略分かるようになっている。これによると, 石松子の最小着火エネルギーは, 10 mJ <MIE <30 mJ となる。すなわち, 粉じん濃度を変化させ, 各濃度で 10 回の試験を行っても, 10 mJ では着火は認められなかったが, 30 mJ ではいずれかの濃度で着火したことを示す。

石松子の着火エネルギーの測定値として, CMI 法では 50 mJ (100%着火確率), 15~20 mJ (50%着火確率), 7 mJ (10%着火確率) などとなっているが¹⁰⁾, 文献には 25 mJ²⁰⁾, 5~15 mJ²¹⁾, 5~7 mJ¹⁴⁾, 2.8 mJ¹³⁾, 2 mJ^{3,6)}などの値も報告されている。データのばらつきは, 最適放電間隙や最適放電時間が考慮されずに測定された場合も含むためであろう。いずれにせよ, 同一試料でも, 測定装置や同方法などが異なれば, 大きな相違が生じることがあることを示しているが, これらの値と比較して, 上記の測定値は, 大きいほうであるがその範囲が一致するものもある。なお, 石松子には粒子表面が網目状, 毛織物状の 2 種類があり, 両者では着火エネルギーが異なることが報告されている²¹⁾。引用データは, より一般的な網目状表面の石松子に対するデータと考えられる。

次に, 化学工業原料として重要なビス・フェノール A (2,2-bis (4'-hydroxy phenyl) propane) ($d_{3,2}=6 \mu\text{m}$, $d_{50}=18 \mu\text{m}$, $s=4.2$) の測定結果を Fig. 4 に示す。この試料粉は機械的に脆いためか, その粒径分布も極めて広い。MIE <1 mJ という結果から, 着火には, そのなかの微粉状のものが寄与したと考えられる。また, 同粉じんは静電気放電による粉じん爆発事故を起こした物質としても知られているが²⁴⁾, 上記の結果は, これを支持するようである。

以上, 石松子やビス・フェノール A についての測定結果から, この装置の若干の性能を検討したが, 実用的には妥当なデータを与えるものと思われる。安全という観点からは, より小さい最小着火エネルギー値が重要な意味を持つであろうが, はたして小さい値を与える測定装置・方法がより良い装置であろうかという疑問も生じる。しかし, 少なくとも同一装置・方法を用いれば, 異なる粉じん試料の相対的危険値を簡便に

Table 1 Combustible dusts used and measured minimum ignition energy (MIE).
可燃性粉じん試料の特性と最小着火エネルギー測定結果

No	Combustible Dust	$d_{3,2}$ μm	d_{50} μm	s	MIE	C_0 g/m ³	K_{st}
A	1,3,5-tris (3,5-di-t-butyl-4-hydroxybenzyl) -s-triazine-2,4,6- (1H,3H,5H) trione	3.1	12.9	3.8	1mJ<MIE<3mJ	85	234
B	1,1,3-tris (2-methyl-4-hydroxy-5-t-butylphenyl) butane	2.2	11.7	2.5	MIE<1mJ	70	307
C	1,1'-bis (2-methyl-4-hydroxy-5-t-butylphenyl) butane	9.5	70.3	2.6	MIE<1mJ	80	263
D	octadecyl-3- (3,5-di-t-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate	8.2	18.6	2.2	3mJ<MIE<10mJ	70	137
E	pentaerythritol-tetrakis- [3- (3,5-di-t-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate]	7.6	24.3	4.0	MIE<1mJ	170	135
F	2,2-bis [3- (3,2-di-t-butyl-4-hydroxyphenyl) propionyloxy] diethylsulfide	10.7	30.2	2.5	10mJ<MIE<30mJ	140	156
G	3,9-bis { 2 { 3- (3,5-di-t-butyl-4-hydroxyphenyl) propionyloxy } 1,1-dimethylethyl } 2,4,8,10-tetraoxaspirodecane	1.3	3.7	2.0	1mJ<MIE<3mJ	120	143
H	1,3,5-trimethyl-2,4,6-tris (3,5-di-t-butyl-4-hydroxybenzyl) benzene	6.3	20.3	3.1	1mJ<MIE<3mJ	85	235
I	pentaerythritol-bis- [(2,6-di-t-butyl-4-methylphenyl) phosphite]	1.6	3.6	5.9	10mJ<MIE<30mJ	110	206
J	tris (2,4-di-t-butylphenyl) phosphite	2.7	9.9	3.3	10mJ<MIE<30mJ	80	269
K	N- (2,3,5-triazol) 2-hydroxybenzamide	2.3	9.5	3.0	1mJ<MIE<3mJ	130	271
L	N,N'- (2-hydroxybenzoyl) dodecandioxy-hydrazide	1.7	4.0	3.4	1mJ<MIE<3mJ	115	195
M	bis (p-t-butylphenyl) sodium phosphate	1.1	1.3	2.7	10mJ<MIE<30mJ	180	143
N	methylene bis (3,5-di-t-butyl-2-phenyl) sodium phosphate	1.3	2.3	7.9	100mJ<MIE<300mJ	95	192
O	2- (3-t-butyl-5-methyl-2-hydroxyphenyl) -5-chlorobenzotriazole	3.3	9.7	4.0	1mJ<MIE<3mJ	85	210
P	methylene bis (2-hydroxy-3- (2-benzo-triazyl) -5-octylphenyl)	3.5	15.3	2.8	1mJ<MIE<3mJ	75	263
Q	2-benzoyl-4-octanoxo-phenol	3.9	10.1	2.3	10mJ<MIE<30mJ	110	222
R	methylene bis (2-hydroxyl-3-benzil-6-methoxyphenyl)	2.5	8.3	2.7	1mJ<MIE<3mJ	85	—
S	tetrakis (2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidinyl) 1,2,3,4-butanetetracarboxylate	2.6	8.7	7.2	1mJ<MIE<3mJ	95	166
T	1,2,3,4-butane-t-carbonate/1,2,2,6,6-pentamethyl-4-piteridinol/b,b,b,b-tetr amethyl-3-9- (2,4,8,10-tetraoxasiro) [5,5]	5.2	23.4	3.1	1mJ<MIE<3mJ	100	226
U	bis (3,3,5,5-tetramethyl-1-4-piperidinyl) octandioate	4.3	15.1	2.8	3mJ<MIE<10mJ	90	206
V	2- (3,5-di-t-butyl-2-hydroxyphenyl) benzotiazole	2.2	7.5	2.3	1mJ<MIE<3mJ	—	292
W	2- (5-methyl-2-hydroxyphenyl) benzotiazole	16.3	37.2	3.6	3mJ<MIE<10mJ	—	234
X	2- (3,5-di-t-amyl-2-hydroxyphenyl) benzotiazole	3.0	6.9	2.1	1mJ<MIE<3mJ	—	223
Y	tris (2,4-di-t-butylphenyl) phosphite	1.9	7.4	4.3	1mJ<MIE<3mJ	—	211
a	coal (volatile 41.3%)	16.0	42.4	2.1	30mJ<MIE<100mJ	—	108
b	coal (volatile 37.93%)	19.8	49.2	1.9	300mJ<MIE<1J	—	95
c	coal (volatile 32.8%)	13.9	40.3	2.2	1J<MIE	—	82

測定できると考えて、Table 1 に示した試料粉等について測定した。

表によると、粒子径が小さい試料 (M,N) が、必ずしも小さい MIE を示すとは限らない。これには粉じんの凝集性が影響している場合もあるであろうが²²⁾、粒径分布の影響も考えられる。Fig. 5 は、表面積平均径と MIE のデータをプロットしたもので、この場合 MIE は範囲でしか示し得ないので極めて概略ながら、粒子径が小さいとかわって MIE が大きくなる傾向を示しているようだ。しかし、分布幅の大きい試料 (I, N, S) が特に着火しやすいとも限らない。1 mJ 以下の MIE を示す試料 (B,C,E) の粒子径はここでは比較的大きく、butane 誘導体や propionate である。こ

れに対して、sulfide (F) や sodium phosphate (M, N) はやや大きい MIE を示すようである。ここで測定した物質は系統的なものではなく、粉体特性も一定ではない。しかし、これらの有機化合物の着火機構を推定すると、放電プラズマ中における粒子の熱分解による可燃性分解ガスの放出とそれらの燃焼による着火と考えられるので、空気中におけるガスの最小着火エネルギー程度、あるいは 1 mJ 以下のそれを示す粉じんがあっても特筆すべきことではないかもしれない。実際上、このような MIE を示す可燃性粉じんが存在するということは、1 mJ を超える MIE を有する可燃性ガス・蒸気もあるので、通常のガス・蒸気と同等 (物質によってはそれ以上) の着火危険性があると考

Result with inductance L = 1 mH :
10 mJ < MIE < 30 mJ

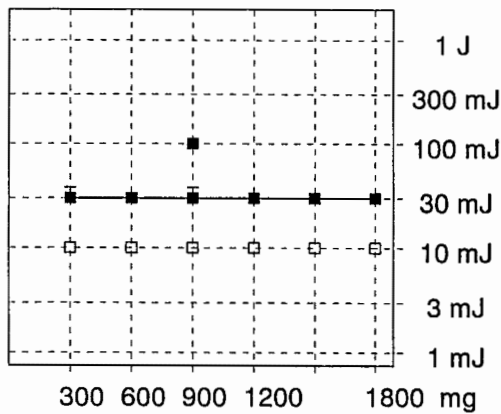


Fig. 3 Plots of ignition energies against dust quantities of lycopodium.
石松子の分散量と着火エネルギーの関係

Result with inductance L = 1 mH :
MIE < 1 mJ

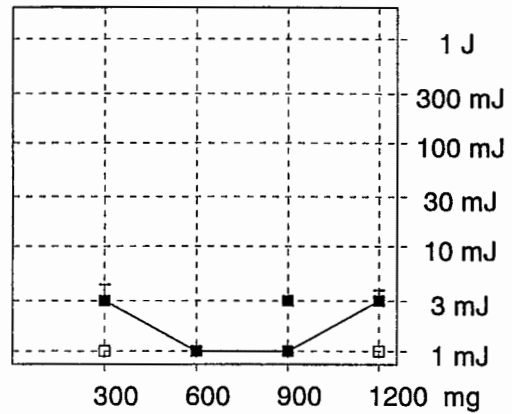


Fig. 4 Plots of ignition energies against dust quantities of bis-phenol A.
ビス・フェノール A の分散量と着火エネルギーの関係

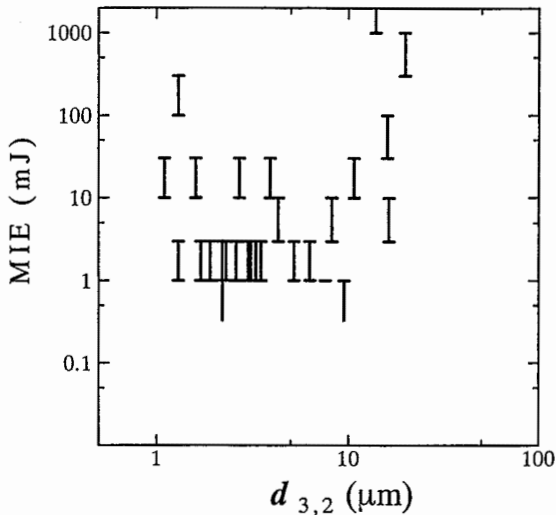


Fig. 5 Plots of ignition energies against average surface particle size ($d_{3,2}$).
平均粒子径と最小着火エネルギーとの関係

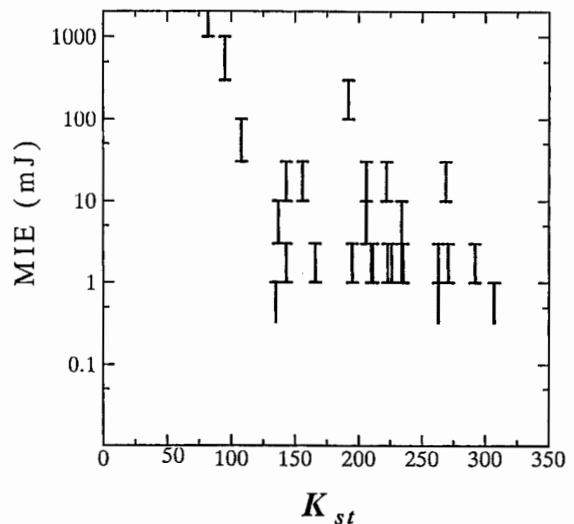


Fig. 6 Plots of ignition energies against K_{st} .
 K_{st} と最小着火エネルギーとの関係

えねばならないことになる (例えば, アセトン 1.15 mJ, n-ブチルクロライド 1.24 mJ, デイソプロピルエーテル 1.14 mJ, 2,2-デメチルプロパン 1.57 mJ, エチルアミン 2.4 mJ, イソオクタン 1.35 mJ, イソプロピルメルカプタン 2.0 mJ, 二塩化メタン > 1000 mJ などが, 1 mJ 以上の MIE を示す⁹⁾)。したがって, それらの粉じんの取扱上もはや着火源対策では不十分で, 可燃性ガスと同等の不活性化対策等が必要になることを示唆している。

一方, 試料 a~c は揮発分の異なる炭じん試料で, その最小着火エネルギーは揮発分の多寡に従って変化するが, データはこれまでの知見と一致する。

表中の C_0 は, 別に測定した爆発下限濃度 (g/m^3)

で²³⁾, 爆発の激しさを表す K_{st} ($= (dP/dt)_{\max} \cdot V^{1/3}$) とともに, ここでは参考のため併記した。Fig. 6 は, MIE と K_{st} との関係プロットしたものであるが, 概略, 爆発の激しさの大きいものは, MIE が小さくなる傾向が窺えるようである。

4. まとめ

IEC 基準案に準拠する簡易最小着火エネルギー測定装置 (MIKE 3) を用いて, 可燃性粉じんの最小着火エネルギーを測定したところ, 1 mJ 以下の値を示すものが若干見いだされた (ビスフェノール A 及びある種のプラスチック添加剤)。求めたデータは相対的着火危険性を示すものであるが, 実用的に妥当な値

と考えられる。1 mJ 以下の値を示す粉体の取扱いにあたっては、着火源の排除による対策では不十分で、ガス爆発防止対策と同様の不活性化等の対策が必要であろう。最小着火エネルギーは、粒子径（比表面積径）の累乗（2.5乗）に比例して変化するが¹⁷⁾、粒子径の小さい粉じんが、必ずしも小さい最小着火エネルギーを示すとは限らず、恐らく粒子の凝集によって、かえって大きい値を示す場合もある。また、当然ながら粒径分布の広い試料粉では、ふるい分けによって微粉試料を使用すべきであろう。粉体処理工程において摩耗、破碎などによって、もとの粉体試料よりも微細な粒径分布を示すようになる試料粉では、最小着火エネルギーの測定にあたっては、やはり微細試料を作成して測定に供することが必要であろう。同様のことは、重力分離を引き起こす可能性の高い粒径分布幅の大きい粉体についてもいえるであろう。これらの点に配慮して当簡易測定装置を使用するならば、1 mJ 以下の最小着火エネルギーを有する可燃性粉じんは、今後、測定を継続することによっていくつか摘出されるであろうと思われる。

謝 辞

実験に協力戴いた（社）産業安全技術協会・粕谷敏明氏に記して感謝致します。

参考文献

- 1) J. Cross and D. Farrer, "Dust Explosions", pp.115-164, Plenum Press (1982)
- 2) M. Glor, "Electrostatic Hazards in Powder Handling", pp.1-65, Research Studies Press, Letchworth (1988)
- 3) W. Bartknecht, "Dust Explosions", pp.93-115, Splinger Verlag (1989)
- 4) R.K. Eckhoff, "Dust Explosions in the Process Industries", pp.411-426, Butterworth-Heinemann (1991)
- 5) 浅野和俊, T.B. Jones, 松原美之, "産業における静電気災害", 安全工学, 35, p.298 (1996)
- 6) W. Berthold, "Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen", Fortschritt-Berichte VDI Nr.134, VDI Verlag (1987)
- 7) D.R. Ballal, "Ignition and Flame Quenching of Quiescent Dust Clouds of Solid Fuels", Proc. R. Soc. Lond. A, 369, pp.479-500 (1980)
- 8) D.R. Ballal, "Further Studies on the Ignition and Flame Quenching of Quiescent Dust Clouds", Proc. R. Soc. Lond. A, 385, pp.1-19 (1983)
- 9) L.G. Britton, "Using Material Data in Static Hazard Assessment", Plant/Operations Progress, 11(2), pp.56-70 (1992)
- 10) R.K. Eckhoff, "Towards Absolute Minimum Ignition Energies for Dust Clouds?", Combustion and Flame, 24, pp.53-64 (1975)
- 11) R.K. Eckhoff, "Why are 'Long' Electric Sparks More Effective Dust Explosion Initiators than 'Short' Ones?", Combustion and Flame, 27, pp.129-131 (1976)
- 12) 石浜 涉, 榎本兵治, 駒井 武, 梅津 実, 東 猛, 荷福正治, "粉じん雲の着火エネルギーに関する研究", 安全工学, 21(5), p.273 (1982)
- 13) T.Matsuda and M.Naito, "Effects of Spark Discharge Duration on Ignition Energy for Dust-Air Suspension", in Particulate Systems - Technology and Fundamentals (Beddow, J.K. ed.), p.189, Hemisphere Publ (1983)
- 14) K.P.Mathisen and R.K.Eckhoff, "Net Minimum Ignition Energies of Dust Clouds Obtained by Means of the CMI Electric Spark Generator", CMI Report- 790702-1, The Chr. Michelsen Institute, Norway (1979)
- 15) BS 5958 : Part 1, Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, British Standards Institution (1991)
- 16) BIA/BV/IES : "Brenn-und Explosionskenngrößen von Stauben", Erich Schmidt Verlag, pp.1-22, Bielefeld (1987)
- 17) R. Siwek and C. Cesana, "Ignition Behavior of Dusts : Meaning and Interpretation", Process Safety Progress, 14(2), p.107 (1995)
- 18) IEC, "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", Draft (1992)
- 19) Ch. Cesana and R. Siwek, "Minimum Ignition Energy Apparatus MIKE 3.2", Adolf Kuhner AG, pp.1-14, Switzerland (1994)
- 20) T.A. Kubara et. al., "Electric Ignition of Lycopodium Powder in a Modified Hartmann Apparatus", Bureau of Mines Report of Investigations RI 8600, U.S.A. (1981)
- 21) G.O. Thomas, G. Oakley and J. Breton, "Influence of the Morphology of Lycopodium Dust on Its Minimum Ignition Energy", Comb. and Flame, 85, p.526 (1991)

- 22) 向井博夫, 武藤泰明, 温田吉朗, セルロース誘導体の粉塵爆発性, 粉体工学会誌, 32(1), p.4 (1995)
- 23) 松田東栄, 林 年宏, 大型垂直管装置による粉じん爆発下限界の測定, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-90, p.51 (1990)
- 24) R.L. Yowell, "Bis-phenol A dust explosion", Chem. Engng. Prog., 64, p.58 (1968)

(平成 10 年 2 月 17 日受理)