

Fig. 1 Relations of 50% ignition energy to gap length (a) and series resistance (b) for Mg powder ( $C=29.4\text{nF}$ )

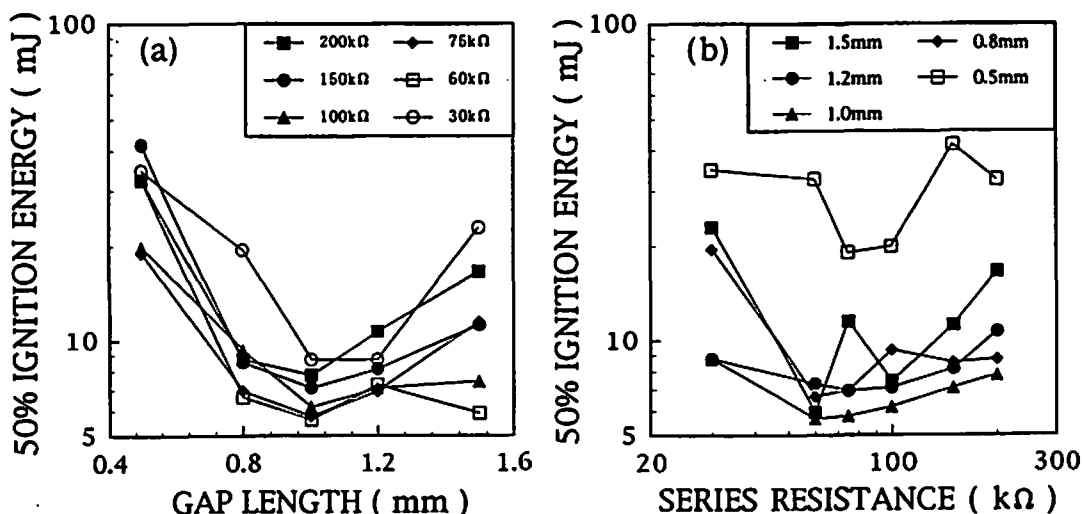


Fig. 2 Relations of 50% ignition energy to gap length (a) and series resistance (b) for Mg powder ( $C=4.2\text{nF}$ )

用した。酸化剤は片山化学工業(株)の試薬特級の四三酸化鉄 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、酸化第二銅 $\text{CuO}$ 及び過塩素酸カリウム $\text{KClO}_4$ を使用した。過塩素酸カリウムは塊りが含まれていたため、少し乳鉢粉砕して使用し、その他の酸化剤はそのまま使用した。

混合系は、化学量論比で混合し、重量混合比は次の通りである。

Mg: $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (30 : 70), Mg: $\text{CuO}$ (23 : 77), Ti: $\text{KClO}_4$  (50 : 50)

### 2.3 実験条件と統計処理方法

コンデンサ容量(以下容量と略記する)は約30nF, 20nF, 10nF及び4 nFの他、もっと大きい容量、またもっと小さい容量について試験した場合もある。直列抵抗は2 ~ 500k $\Omega$ 、電極間隙長は0.02 ~ 3 mmの範囲か

ら、それぞれ最小50%発火エネルギーが得られると考えられる条件近くの値をいくつか選んで試験した。

統計処理方法はできるだけ少ない試験数で50%発火エネルギーを決定するために、Langlie法<sup>10)</sup>を使用し、15回の試験を行った。エネルギーは $0.5CV^2$ ( $C$ はFarad単位の容量、 $V$ はVolt単位のコンデンサ充電電圧)で計算し、Langlie法での試験エネルギー水準はそのエネルギー(J)の常用対数値によって定めた。

### 3. 実験結果

マグネシウム単体については、最も広範囲の試験条件にわたって詳細な実験を行った。 $C=29.4\text{nF}$ で、直列抵抗を2 ~ 400k $\Omega$ 、電極間隙長を0.2 ~ 3 mmとした一連の実験で得られた50%発火エネルギーと電極間隙長及び直列抵抗の関係をFig. 1に示す。また $C=4.2$

Table 1 Dust ignition sensitivity by electrostatic discharges for Mg powder

Capacitance (nF)	Series Resistance (kΩ)	Time Constant (μs)	Gap Length (mm)	Minimum Energy of 50% Ignition	
				logE <sub>50</sub> (J)	(mJ)
29.4	7	206	0.4	-2.06	8.7
19.5	12	234	0.5	-2.08	8.3
10.5	20	210	0.8	-2.15	7.0
4.2	50	210	1.1	-2.31	4.9

Table 2 Dust ignition sensitivity by electrostatic discharges for Mg/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Capacitance (nF)	Series Resistance (kΩ)	Time Constant (μs)	Gap Length (mm)	Minimum Energy of 50% Ignition	
				logE <sub>50</sub> (J)	(mJ)
29.4	3.5	103	0.2	-2.56	2.8
10.7	10	107	0.4	-2.70	2.0
4.2	25	105	0.8	-2.75	1.8

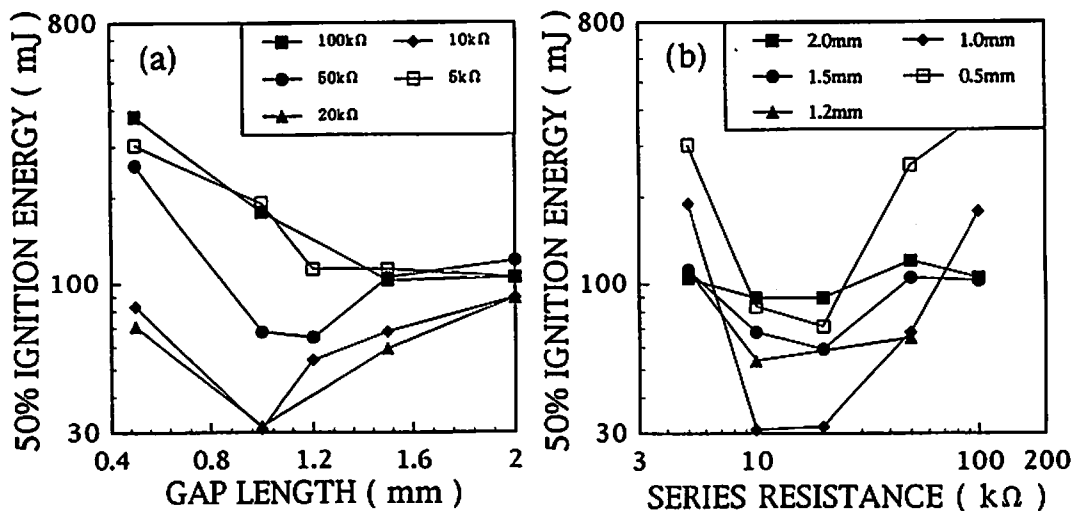


Fig. 3 Relations of 50% ignition energy to gap length (a) and series resistance (b) for Mg/CuO (C=31.6nF)

nFで、直列抵抗30~200kΩ、電極間隙長0.5~1.5mmとした実験で得られた50%発火エネルギーと電極間隙長及び直列抵抗の関係をFig. 2に示す。マグネシウム単体についてはこの他に19.5nFと10.5nFでも一連の実験を行った。

これらの実験結果から、各容量における最小50%発火エネルギーと、そのときの直列抵抗及び電極間隙長を求め、それらの値をTable 1に示す。その表には、用いた容量と最小50%発火エネルギーのときの直列抵抗の積、見掛けの時定数も示している。なおFig. 1及び2に示したような関係から直接に最小50%発火エネルギーを決定することが困難であるときは、低い50%発火エネルギーを示した近くの直列抵抗と電極間隙長

のいくつかの組合せについて追加実験を行い、最小50%発火エネルギー等を決定した。

マグネシウムと四三酸化鉄の混合系についても、ほぼ同じような条件で試験を行った。容量29.5nF、10.7nF及び4.2nFで得られた最小50%発火エネルギーと、そのときの直列抵抗、見掛けの時定数及び電極間隙長及び直列抵抗の関係をTable 2に示す。

マグネシウムと酸化第二銅混合系について31.6nFと4.2nFの容量の試験で得られた50%発火エネルギーと電極間隙長及び直列抵抗をそれぞれFig. 3と4に示す。この混合系については、この他に54.9、44.2、10.6、2及び1nFと広範囲の容量について試験を行った。各容量で得られた最小50%発火エネルギーと、そのと

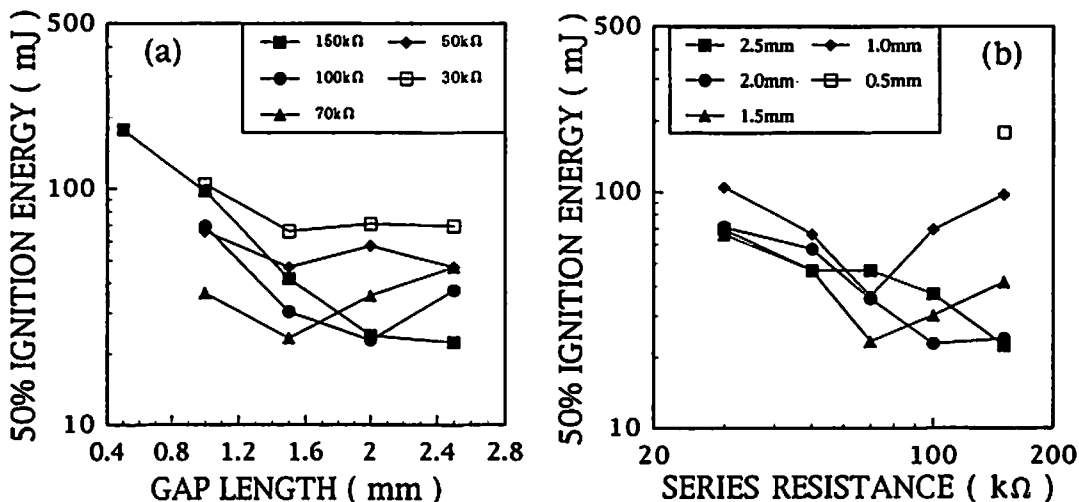


Fig. 4 Relations of 50% ignition energy to gap length(a) and series resistance(b) for Mg/CuO(C=4.2nF)

Table 3 Dust ignition sensitivity by electrostatic discharges for Mg/CuO

Capacitance (nF)	Series Resistance (kΩ)	Time Constant (μs)	Gap Length (mm)	Minimum Energy of 50% Ignition	
				logE <sub>50</sub> (J)	(mJ)
54.9	6	329	0.7	-1.25	56.2
44.2	7	309	1.0	-1.60	25.1
31.6	10	316	1.0	-1.59	25.7
10.6	30	318	1.0	-1.64	22.9
4.2	80	336	1.5	-1.65	22.5
2.0	160	320	1.5	-1.40	39.8
1.0	320	320	1.8	-0.87	134.9

Table 4 Dust ignition sensitivity characteristics by electrostatic discharges

	Capacitance (nF)	Series Resistance (kΩ)	Time Constant (μs)	Gap Length (mm)	Minimum Energy of 50% Ignition	
					logE <sub>50</sub> (J)	(mJ)
Ti	10.6	50	530	1.0	-2.04	9.1
	4.2	130	546	1.3	-2.26	5.5
Ti-KClO <sub>4</sub>	4.1	70	287	1.0	-2.37	4.3

きの直列抵抗、見掛けの時定数及び電極間隙長を Table 3 に示す。

チタニウム単体については容量10.6nFと4.2nFで、Ti-KClO<sub>4</sub>混合系では4.1nFで、同じように静電気粉塵点火感度試験を行った。各容量で得られた最小50%発火エネルギーとそのときの直列抵抗、見掛けの時定数及び電極間隙長をTable 4 に示す。

#### 4. 結果の検討

##### 4.1 マグネシウムの静電気粉塵点火感度

Fig. 1 に示した29.4nFのときの50%発火エネルギーと電極間隙長の関係において、全体的に規則的な

大きな感度変化が認められたが、直列抵抗に関しては全体的な規則性は明確ではない。電極間隙長1.5mm以上では、直列抵抗による50%発火エネルギーの変化が少ない。これは放電の発生確率がその値を決定しているからであり、放電が発生すれば必ず発火が生じると考えられる。なお、放電の発生確率に直列抵抗や容量がほとんど影響しないことは既に別実験で確認されている<sup>11)</sup>。

一方電極間隙長が非常に短いとき、例えばFig. 1 や 2 での0.2mmの電極間隙長のときに、50%発火エネルギーが非常に高くなり、かつ直列抵抗によってそれが

大きく変化する理由はまだ明らかになっていない。

電極間隙長0.5や1.0mmのように低い50%発火エネルギーが得られたところでは、そのエネルギーに直列抵抗の影響が強く認められた。この29.4nFの場合に、各直列抵抗における最小50%発火エネルギーを示す電極間隙長が、エネルギーが低くなるにつれて短い方に移る現象は、放電開始条件と試料の発火条件の競争過程によって生じたものであろう。つまり普通の試験条件のもとでは、放電を開始する電圧が試料の発火電圧よりも低い。ところが非常に鋭感な試料の場合は最も鋭感となる電極間隙長が短くなるが、容量が大きい場合は試験電圧が低くなるために、発火電圧が放電開始電圧に等しいかまたはそれよりも低くなって、上記の現象が生じたと考えられる。このような現象はMg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系の29.5nF、10.7nF及びチタニウム粉の10.6nFでの試験結果にも顕著に認められた。

Fig. 2の4.2nFのときは、容量が小さいのでその充電電圧が高くなり、放電発生の有無の影響がなくなり、29.4nFで認められた電極間隙長に関する規則性が認められない。

マグネシウム単体で、各容量で最小50%発火エネルギーを示した直列抵抗は、Table 1に示すようにAl-CuO混合系と同じように容量が小さくなるほど高くなった。そして容量とその直列抵抗の積、見掛けの時定数は容量によらず約210 $\mu$ sとほぼ一定の値となった。

この値はAl-CuO混合系の約600 $\mu$ sやアルミニウム単体の約1800 $\mu$ sよりも非常に短くなっている<sup>3)</sup>。そのときの各容量における最小50%発火エネルギーは、4.9~8.7mJとアルミニウムの約80mJやAl-CuO混合系の約25mJより著しく低い。またその値が得られたときの電極間隙長はアルミニウムやAl-CuO混合系の2.0~3.0mmよりも、0.4~1.1mmとかなり短くなっている。

#### 4.2 マグネシウム-酸化剤混合系の静電気粉塵点火感度

Mg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系においても、最小50%発火エネルギーを示すときの見掛けの時定数はTable 2に示すように容量によらずほぼ一定である。その値は約105 $\mu$ sで、マグネシウム単体の場合の約半分とかなり短くなっている。そして各容量における最小50%発火エネルギーは1.8~2.8mJ、そのときの電極間隙長は0.2~0.8mmと、マグネシウム単体の場合よりもさらに小さくなっている。

Mg-CuO混合系については、1.0~54.9nFと広範囲の容量について試験した。この場合とAl-CuO混合系について、最小50%発火エネルギーおよびそのときの電極間隙長と容量の関係をFig. 5に示す。電極間

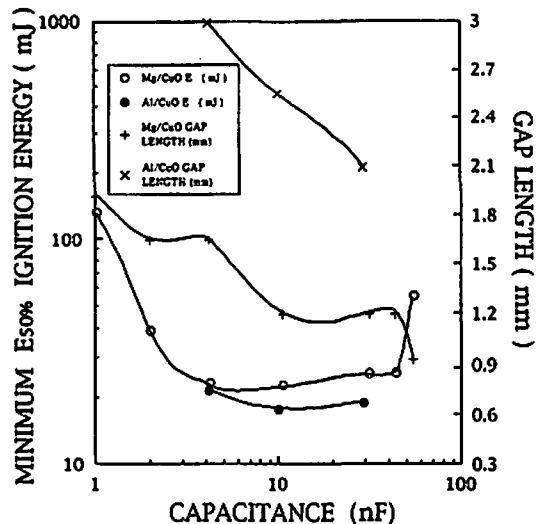


Fig. 5 Relations of minimum 50% ignition energy and gap length to capacitance

隙長と直列抵抗の値は、試験の都合上ある適当なとびとびの値をとらざるを得ないので、最小50%発火エネルギーと電極間隙長の容量による変化は滑らかにはなっていない。もっと詳細な実験を行えば、滑らかなつながりになると考えられる。ここに電極間隙長は両混合系とも、容量が大きくなるにつれてほぼ単調に低下していく傾向が認められ、かつMg-CuO混合系の方が約半分と短くなっている。

Mg-CuO混合系の最小50%発火エネルギーは、容量が2.0nFないしは1.0nFと非常に小さくなった場合、及び54.9nFと非常に大きくなった場合には、それら間のほぼ一定の低い最小50%発火エネルギーに比べて、急激に非常に高い値に変化している。このように、各容量における最小50%発火エネルギーは大きな違いがある場合があるが、最小50%発火エネルギーを示したときの見掛けの時定数は、容量にかかわらず約320 $\mu$ sとほぼ一定の値となった。

容量が非常に小さいときの最小50%発火エネルギーが得られる条件では、見掛けの時定数が一定であるために、直列抵抗は非常に大きくなる。その場合には放電電流が低くなり、安定な定常放電、ここでは高気圧グロー放電を維持することができなくなり、微小振動放電へと転移する場合が多くなる<sup>12)</sup>。微小振動放電は試料物質を発火させる能力がほとんどないために<sup>13)</sup>、この領域では、最小50%発火エネルギーが非常に高くなったものと考えられる。

一方、容量が非常に大きくなると、コンデンサ充電エネルギーが一定の場合には、その充電電圧は低くなり、また見掛けの時定数が一定であるので、直列抵抗

は低くなる。前者の場合には、電圧が低く放電を発生しなくなると、後者の場合には、放電電流が高くなり、高気圧グロー放電からアーク放電へと放電形態が転移して、電極間隙間で消費されるエネルギーの割合が低くなって<sup>12)</sup>、発火エネルギーが高くなったものと考えられる。その他放電の特性が異なることにより粉末の飛散状況が変わると考えられ、それも関係するであろう。

このように、最小50%発火エネルギーは、ある容量範囲外では、高容量の方でも低容量の方でも著しく高くなるが、その範囲内ではほぼ一定の値を示している。その間の最小50%発火エネルギーは、Mg-CuO混合系では22~26 mJである。この値は、酸化剤との混合系であるためにより発火しやすくなり、マグネシウム単体の場合の値よりも低くなることを予期していた。ところが予期に反して、マグネシウム単体の場合の約3倍と高い値となった。そして、この値はAl-CuO混合系の19~22 mJの値に近くなっている。

アルミニウムの場合には、酸化第二銅との混合系となると単体の場合よりも最小50%発火エネルギーは著しく低くなり、見掛けの時定数と電極間隙長は小さくなる。マグネシウムの場合には、酸化第二銅との混合系となると、最小50%発火エネルギーは逆に高くなり、また見掛けの時定数と電極間隙長は大きくなった。Mg-CuOとAl-CuO混合系を比較すると、最小50%発火エネルギーはほぼ近い値であるが、見掛けの時定数と電極間隙長はMg-CuO混合系の方が約半分と非常に小さい。このように、共通の酸化剤の混合系において、可燃剤によって、酸化剤の静電気粉塵点火感度への影響が大きく異なることがわかった。

Fig. 5で、中間容量域の最小50%発火エネルギーの容量による変化状況の詳細をみると、容量が低くなるにつれてわずかつつ低くなっていく傾向が認められる。Mg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系でも同様の傾向がある。ただAl-CuO混合系では逆の傾向となっているが、これは4 nFと10 nFでの実験が十分ではなくて、正確な最小50%発火エネルギーが得られなかったために生じた見掛け上のものと思われる。

#### 4.3 チタニウムとその混合系の静電気粉塵点火感度

チタニウム単体は約540 μsのときに最小50%発火エネルギーが得られ、容量の小さい方がその値は5.5~9.1 mJと低くなり、電極間隙長は1.0~1.3 mmと少し長くなっている。これはマグネシウム単体及びMg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系で得られた特性に同じである。

Ti-KClO<sub>4</sub>混合系は、電極間隙長1.0 mm、時定数約285 μsのときに最小50%発火エネルギーが得られた。

チタニウム単体からTi-KClO<sub>4</sub>混合系への各特性値の変化状況は、マグネシウム単体からMg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系への変化状況に類似している。

#### 5. まとめ

- 1) アルミニウム、マグネシウム、チタニウム及びそれらの酸化剤との混合系の静電気粉塵点火感度試験で、最小50%発火エネルギー、見掛けの時定数、電極間隙長等と容量間で、共通のいくつかの規則性が認められた。すなわち、いくつかの容量で最小50%発火エネルギーを示す直列抵抗と電極間隙長は、容量が大きくなると小さくなったが、見掛けの時定数は一定であった。
- 2) 金属粉と金属粉-酸化剤混合系の関係では、混合系の50%発火エネルギーが低くなれば、見掛けの時定数と電極間隙長は短くなった。金属粉と酸化剤の組合わせによっては混合系の方が高い50%発火エネルギーとなる場合があり、そのときは見掛けの時定数と電極間隙長は長くなった。
- 3) 静電気粉塵点火感度試験で得られた最小50%発火エネルギーは、最も鋭感なMg-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合系で1.8 mJ、次いでTi-KClO<sub>4</sub>系の4.3 mJ、マグネシウム単体の4.9 mJ、チタニウム単体の5.5 mJであった。

#### 文 献

- 1) E.Kuroda, T.Nagaishi, Proc. of the 2nd Symp. on Pyrotechnics and Explosives, P781 (1987)
- 2) 黒田英司, 永石俊幸, 工業火薬協会秋季研究発表講演会要旨, P29 (1978)
- 3) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 投稿中 (1994)
- 4) 内藤道夫, 梅津 実, 安全工学, 8, 107 (1969)
- 5) 静電気学会編, 「静電気ハンドブック」, P954 (1981) オーム社
- 6) K.N.Palmer, 日本化学会訳編, 「粉じんの爆発と火災」, P319 (1981) 丸善
- 7) J.Hartman, J.Nagy and M.Jacobson, US Bureau of mines RI4835 (1951)
- 8) H.G.Dorst, M.Jacobson, J.Nagy and H.P.Williams, US Bureau of mines RI5624 (1960)
- 9) 黒田英司, 工業火薬, 44, 250 (1983)
- 10) MIL-STD-331A, "Sample analysis by H.J.Langlie from Pub.No.U-1792"
- 11) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 214 (1994)
- 12) E.Kuroda, T.Nagaishi, Proc. of the 18th Int. Pyrotechnic Seminar, P511 (1992)
- 13) C.R.Westgate, M.R.Kirshenbaum and B.D.Pollock, PA-TR4737 (1975)

**Electrostatic discharge sensitivity of metal powders and their mixtures  
with oxidizers by dust ignition mechanism**

by Eishi KURODA\* and Toshiyuki NAGAISHI\*\*

The electrostatic sensitivity test for the dust ignition mechanism was carried out with aluminum, magnesium, titanium powders and their mixtures with several kind of oxidizers. For all materials used in this test, the series resistance and the gap length between the electrodes corresponding to the minimum energy of 50% ignition, decreased as the capacitance increased. The apparent time constants are nearly unchanged for each materials. For some metal powders and mixtures, the energy of 50% ignition may be related with the apparent time constant.

(\*Shirakawa R&D Center, Nippon Koki Co., Ltd., 2-1 Nagasaka,  
Nishigoh-mura, Nishishirakawa-gun, Fukushima 961, Japan

\*\*Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University, 2-1-3 Mat-  
suka-dai, Higashi-ku, Fukuoka 813, Japan)