

火工品原料用粉体の電気抵抗(第1報)

黒田英司*, 奈良崎宏**, 永石俊幸**

火工品組成物原料の還元剤, 特に金属粉, および酸化剤などの粉体の電気抵抗を直流法によって測定した。金属粉は約100Ω以下の電気抵抗を示すものが多いが, マグネシウムのように同じ金属粉がその粒子の表面状態によっては 10^9 Ωを超える場合もあった。また, アルミニウムのように 10^9 Ωを超える電気抵抗だけしか示さない金属粉もあった。酸化剤粉体は $10^6 \sim 10^9$ Ωの中間の電気抵抗を示すものが多く, それよりも高いまたは低い電気抵抗を示すものもあった。金属粉では, 個々の粒子の酸化被膜の状態が粉体の電気抵抗に関係する。すなわち酸化被膜が薄い場合には粒子間の接触抵抗が, 厚い場合には酸化被膜自体の電気抵抗が粉体の電気抵抗を決定すると考えられた。酸化剤では粒子の固有抵抗が粉体の電気抵抗の支配因子となる。

1. まえがき

火工品や火薬類の原材料である還元剤や酸化剤の固有抵抗は一部ハンドブックなどに記載されている¹⁾が, それらの粉体状態における電気抵抗データは見当らない。このような粉体の電気抵抗は静電気帯電と直接の関係がある²⁾。また, 我々は火工品原料とそれらの混合系について静電気感度に関する研究を行ってきたが, それらが導電性であるか絶縁性であるかは, 放電開始現象や放電特性に^{3)~5)}, また発火感度にも関係^{6)~8)}する場合があった。したがって, それらの現象は粉体の電気抵抗と関係があると考えられる。

粉体粒子の表面状態は電気抵抗の形成機構やいくつかの因子による電気抵抗の変化特性と関係^{3), 9)}し, それで, 電気抵抗の測定によって, 粉体粒子の表面状態を知ることができ, 電気抵抗の測定は原料粉体の品質管理技術の一方法としての応用が考えられる。

このようなことから, 静電気感度に関する研究で使用した還元剤や酸化剤などの粉体^{3)~15)}について, 堆積状態とそれを徐々に押さえつけた場合の電気抵抗を直流法¹⁶⁾によって測定した。

2. 実験

2.1 試料

還元剤および酸化剤とも試薬特級(一部だけ試薬一級)を使用した。実験では特に断らない限り購入品をそのまま使用した。マグネシウム(Mg)とアルミニウム(Al)を除くその他の金属粉はすべて不規則形状で, 細かい粒度のものが多い。チタニウム(Ti)はすべて325メッシュ通過のものである。酸化剤の物理的性状は購入先ごとに定まっているので説明を省略した。購入先は次のような略記号で示し, その物理的性状が電気抵抗に関係した試料については本文中で説明するか, 規格名の一部をとって物質名に付記した。

片山化学工業(Katayama), 和光純薬工業(Wakou), 半井化学薬品(Nakai), 高純度科学研究所(Jyundo), 大和金属粉工業(Yamato), 添川理化学(Soekawa), 日本タングステン(Tangusu), 山中半導体(Yamanaka), 東洋アルミニウム(Touyou), 三洋和化学薬品(Mitsuwa), 関東化学薬品(Kantou), キシダ科学(Kisida), 旭化成工業(Asahi), Oerlikon Contraves AG(Oerlikon), Hart Metals Inc.(HMI), Cerac Inc.(Cerac), Metallurg International Resources(MIR), Aldrich Chemical Company Inc.(Aldrich), Degussa AG(Degussa), Hermann C. Starck Berlin(Hermann)

2.2 電気抵抗の測定

10^9 Ωを超える電気抵抗の測定は, 川口電機製作所製MMA II-17A型ユニバーサルエレクトロメータ(以下, エレクトロメータと呼ぶ)を用い, 1V, 10Vおよ

1999年8月27日受理

*日本工機株式会社

〒961-8686 福島県西白河郡西郷村長坂2-1

TEL 0248(22)7226

FAX 0248(24)3981

**九州産業大学工学部

〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台2-3-1

TEL 092(673)5655

FAX 092(673)5699

び100Vを印加し、それぞれ試料中を流れた直流微小電流を測定して電気抵抗を求めた。測定下限界値は印加電圧1Vのときは $10^6 \Omega$ 、10Vのときは $10^7 \Omega$ 、100Vのときは $10^8 \Omega$ である。

$10^7 \Omega$ 以下の電気抵抗の測定はDP-100マルチメータ(Analogic Inc.製)を用いた。これは定電流を流し、試料端間の電位差を測定して電気抵抗を求める。測定電気抵抗範囲とそのときの電流は次の通りである。

200 Ω レンジ(測定抵抗範囲200 Ω ~2k Ω 、以下説明省略)および2k Ω レンジ(通電電流1mA); 20k Ω および200k Ω レンジ(10 μ A); 2M Ω レンジ(1 μ A); 20M Ω レンジ(0.1 μ A)

試料は、P-616型測定電極(川口電機製作所製)を使用し、その測定電極間に厚さ3mmのポリテトラフルオロエチレン(以下、PTFEと略記する)板をはさみ、その板の中心部にあけた直径13mmの孔部に設置した。P-616型測定電極は、その電極表面が導電ゴム(厚さ:1mm)から成る真鍮円盤で、その円盤と保持ネジで支持される支持板間の2個のコイルばねを介して、保持ネジ(M14、ピッチ2mm)を回転させることによって、電極間を圧縮できる構造となっている。電気的にはガード電極を設けた三端子法¹⁶⁾の構成である。この測定電極を川口電機製作所製P-618シールド箱内に設置した。

2.3 測定方法と測定結果の表示

下部測定電極面にPTFE板を密着させ、粉体試料は直径13mmの孔部に入れ、さらにその上部に高さ5~7mmの円錐状に盛って設置した。それから上部電極を取り付け、コイルばねを介して取付ネジを回転させ、試料面と上部電極面が接触し、電気抵抗が検知されたときから、試料を圧縮し、ネジの回転が困難になるまで、取付ネジの1回転毎に測定を行った。コイルばねは普通には4~6回の回転で密着してしまい、その後は取付ネジの回転によって直接電極が移動する。測定は $10^7 \Omega$ 以下のときはマルチメータで行い、 $10^6 \Omega$ を超える場合には、エレクトロメータによってまず印加電圧1Vで測定し、次いで10V、100Vの印加電圧で測定した。

粉体の電気抵抗は通電または電圧印加の直後から時間経過につれて変化する場合が多いので、通電または電圧印加の直後から1分後まで測定した。マルチメータによる測定値は第1回目と第2回目測定および最終測定値を表に示した。第1回目は試料面が上部電極面に軽く接触したときの値(初期値、表ではInitialと記す)、第2回目はネジ1回転後でほぼ十分に接触したと考えられるときの値(表ではContactと記す)、最終

測定値は取付ネジの回転が困難になり試料を電極面で十分に圧縮したときの値(表ではPressedと記す)である。また、エレクトロメータによる測定値は取付ネジの回転が困難になったときの各印加電圧における測定値を示した。

測定値が大きくばらつく場合があったので、同一試料について3回以上の測定を行い、中間に近い値を示したデータを選び、そのデータの各測定条件における1分後の値を示した。

3. 測定結果

3.1 還元剤の電気抵抗

金属粉のマルチメータによる測定結果をTable 1に示す。Mg(DIN40)、モリブデン(Mo)、珪素鉄(FeSi)、Mg(M15)、Mg(M45)およびTi(Katayama)の他、Wakou、Jyundoなどのような金属粉は、強く圧縮したときは約100 Ω 以下の電気抵抗を示し、次いでマグナリウム(MgAl(50/50))やマンガン(Mn)は数100 Ω 以下、タングステン(W)は約150k Ω 以下の電気抵抗を示した。これらの金属粉は軽く触れたときの値(初期値)は大きくばらつき、約 $10^7 \Omega$ までの電気抵抗を示す場合があった。

Fig. 1に、いくつかの還元剤の測定電極の取付ネジの回転数と電気抵抗の関係を示す。初期電気抵抗が約 $10^7 \Omega$ 以下のものは取付ネジの回転による試料の圧縮によって、電気抵抗が低下するものが多い。FeSi、MgAlおよびMoはMg(M45)やMg(M15)とともに数回の回転によって低い電気抵抗に変わった。Mn、Mg(DIN40)、水素化チタン(TiH_x、Wakou)、Ti(Katayama)などは、ネジの回転につれて徐々に電気抵抗が低下した。Wやボロン(B)は、Wの一回目のネジの回転による低下を除くと、それによる電気抵抗の大きな低下は示さなかった。

エレクトロメータによる測定結果をTable 2に示す。表1の空欄は測定器の測定範囲外の値となったことを示す。Ti(Yamanaka)は約 $10^7 \Omega$ 、Al(Jyundo、球状、平均粒子径20 μ m)は約 $10^9 \Omega$ 、Mg(Jyundo、平均粒子径80 μ m)は約 $10^{10} \Omega$ の電気抵抗、その他のMgとAlは $10^{11} \Omega$ 以上と非常に高い電気抵抗を示した。ここにMg(M15)およびMg(M45)は、Table 1に示すようにあるときには、圧縮されたときに100 Ω 以下と低い値を示した。

Fig. 2に、高い電気抵抗を示した還元剤の印加電圧による電気抵抗の変化を示した。 $10^{10} \Omega$ を超える電気抵抗の場合には、Al(Touyou、Alpaste)とAl(Asahi、H10)を除くと印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗が高くなるかまたはほとんど変わらない場合が多い。

Table 1 Resistance of metal powders measured with the multimeter and the dependence of resistance upon the compression (Unit: Ω)

Substance	Distributor	Initial	Contact	Pressed
Mg(DIN40)	Oerlikon	95,000	60,000	69
Mo	Katayama	13,300,000	20,200	79
FeSi	Nakai	4,000,000	291	81
Mg(M15)	HMI	512	120	95
Mg(M45)	Yamato	1,280	170	97
Ti	Katayama	2,230,000	380,000	100
MgAl	Jyundo	980,000	7,910	140
Mn	Soekawa	119,000	65,100	248
W	Tangusu	10,700,000	277,000	134,000
TiH ₂	Aldrich	1,210,000	8,910	86
	Mitsuwa	11,800,000	383,000	87
	Katayama	12,900,000	2,550,000	112
	Jyundo	6,880,000	2,550,000	157
	Carac	19,500,000	13,400,000	2,960,000

Initial: resistance when sample and upper electrode have slightly contact each other.

Contact: resistance when sample and upper electrode have sufficiently contacted each other.

Pressed: resistance when sample is sufficiently compressed between electrodes.

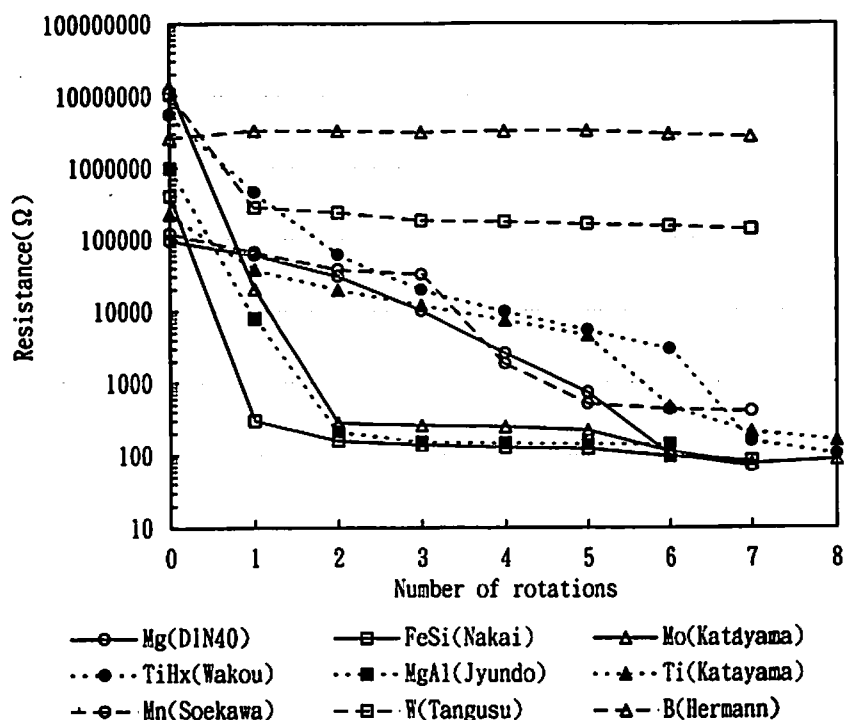


Fig. 1 Relationship between resistance and the number of rotations for reducers. Number of rotations is rotational number of holder screw for moving an electrode until it compresses the sample, after electrode contacts the sample.

Table 2 Resistance of metal powders measured with the electrometer and the dependence of the resistance upon the applied voltage (Unit: Ω)

Substance	Distributor	1 V	10V	100V
Ti	Yamanaka	4.0×10^7	1.1×10^7	
Al(9PA)	Jyundo	8.0×10^9	3.5×10^9	1.5×10^9
Mg(1PA)	Jyundo	1.3×10^{10}	3.7×10^{10}	7.0×10^{10}
Mg(M45)	Yamato	1.6×10^{11}	1.2×10^{12}	3.7×10^{12}
Mg(M15)	HMI	5.5×10^{11}	6.0×10^{11}	6.0×10^{12}
Mg(No.16)	MIR	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	1.5×10^{12}
Al(Alpaste)	Touyou	1.0×10^{14}	1.0×10^{13}	1.0×10^{13}
Al(H18)	Asahi	2.5×10^{14}	2.1×10^{13}	5.2×10^{12}
ZrH _x	Carac	4.6×10^6		
	Aldrich	1.5×10^7	1.5×10^7	
	Wakou	8.0×10^7	3.5×10^7	
	Degussa	1.0×10^{10}	1.4×10^{10}	9.0×10^9

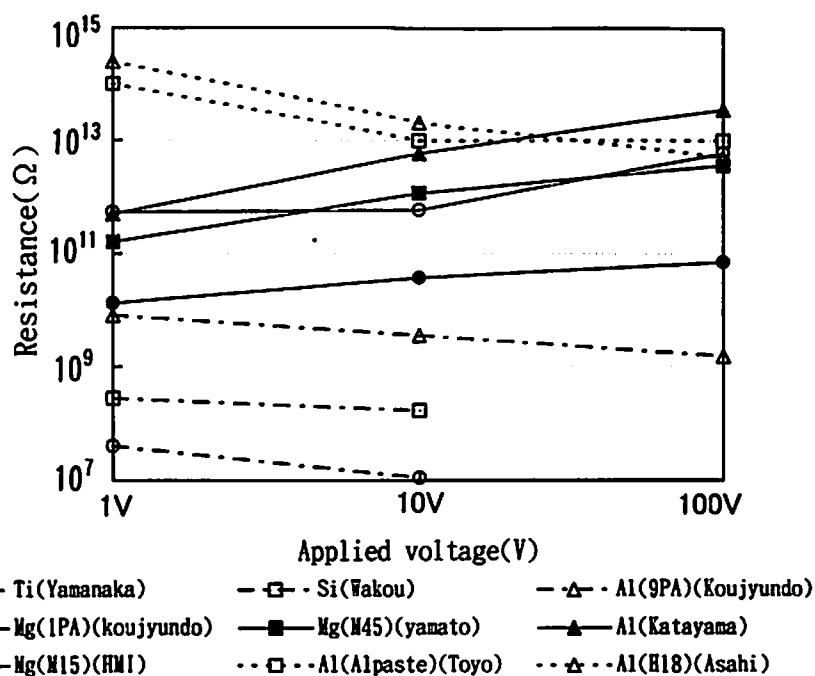


Fig. 2 Resistances as a function of applied voltage for reducers

一方、 $10^{10} \Omega$ 以下の電気抵抗を示すSi(Wakou), Ti(Yamanaka), Al(Jyundo)などは印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗が低下した。

3.2 水素化ジルコニウムと水素化チタンの電気抵抗

いくつかの水素化ジルコニウム(ZrH_x)の測定結果をTable 2に、水素化チタン(TiH_x)の測定結果をTable 1に追加した。ここに両化合物の水素含有量を示すxは、正確に決定することが困難であったために

単にxとして示した。両水素化物は飽和水素量を含まないものが多く¹⁰⁾、実測したところZrH_xではx=1.2~2.0, TiH_xではx=1.6~2.0の範囲であった。

ZrH_xはDegussaを除くAldrich, Mitsuwa, Katayama, Wakouなどは $10^6 \sim 10^8 \Omega$ の電気抵抗を示し、印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗は変わらないか低下する傾向がある。Degussaは約 $10^{10} \Omega$ の電気抵抗を示し、印加電圧による変化をほとんど示さなかった。TiH_xはCerac以外はネジの回転によって

Table 3 Resistance of oxidizers measured with the multimeter and the dependence of resistance upon the compression (Unit: Ω)

Substance	Distributer	Initial	Contact	Pressed
PbO ₂	Wakou	3,900	193	63
Pb ₂ O ₃	Wakou	122	160	101
MnO ₂	Jyundo	1.6×10^6	8.5×10^5	2.5×10^4
Fe ₃ O ₄	Katayama	1.7×10^7	3.9×10^6	1.4×10^4
NaNO ₃	Nakai	9.9×10^6	9.2×10^6	8.3×10^6
CuO	Wakou	2.0×10^7	1.9×10^7	9.7×10^6
PbCrO ₄	Kantou	1.1×10^7	1.6×10^7	1.8×10^7

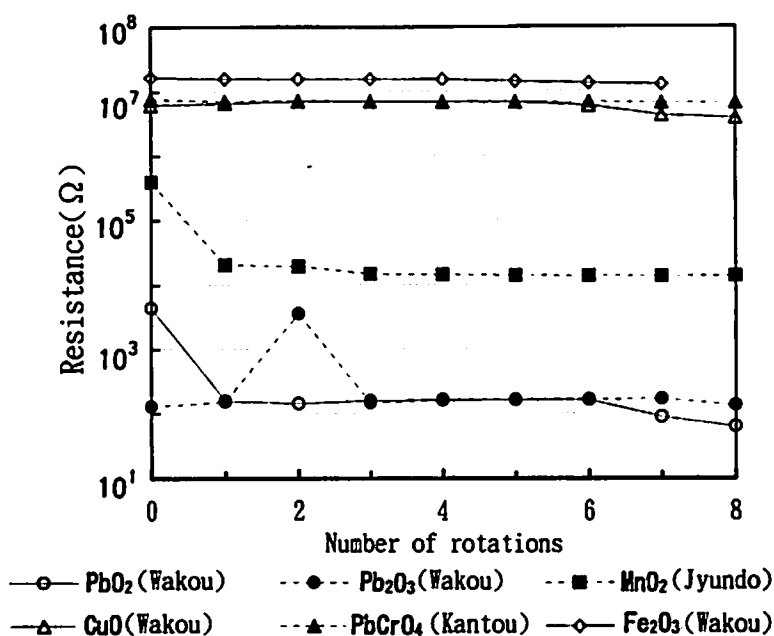


Fig. 3 Relationship between resistance and the number of rotations for oxidizers

電気抵抗が大きく低下し、Fig. 1 のMoと同じような低下を示したArdrich以外のMitsuwa, Wakou, Yamanaka, Katayama, JyundoなどのTiH₂は、TiH₂ (Katayama)と同じような電気抵抗の低下を示し、最終測定値は86~157 Ω になり、Tiよりも低いものもあった。

3. 3 酸化剤の電気抵抗

酸化剤のマルチメータによる測定結果をTable 3に示す。二酸化鉛(PbO₂)や三酸化二鉛(Pb₂O₃)は圧縮されたときに約100 Ω 以下の電気抵抗を示し、二酸化マンガン(MnO₂)、四酸化三鉄(Fe₃O₄)、過マンガン酸カリウム(KMnO₄, Wakou)、クロム酸バリウム(BaCrO₄, Kiseida)は10⁶ Ω 以下、クロム酸ナトリウ

ム(Na₂CrO₄, Wakou)、硝酸ナトリウム(NaNO₃)、酸化銅(CuO)、三酸化二鉄(Fe₂O₃, Wakou)、クロム酸鉛(PbCrO₄)などは10⁶~10⁸ Ω の電気抵抗を示した。これらは金属粉の場合とは異なって、Fig. 3に示すようにねじの回転による電気抵抗の低下は認められず、ほぼ一定か不規則な変化を示した。

エレクトロメータによる測定結果をTable 4に示す。10⁸ Ω 以下の電気抵抗を示したクロム酸カルシウム(CaCrO₄, Soekawa)、過酸化バリウム(BaO₂, Katayama)、硝酸カリウム(KNO₃, Wakou)および10¹⁰ Ω 以下の電気抵抗を示した四酸化三鉛(Pb₃O₄)、過塩素酸カリウム(KClO₄)などは印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗が低くなる傾向を示すものが多い。一方、クロム酸カリウム(K₂CrO₄)、酸化銅

Table 4 Resistance of oxidizers measured with the electrometer and the dependance of the resistance upon the applied voltage (Unit: Ω)

Substance	Distributer	1 V	10V	100V
Pb ₃ O ₄	Katayama	7.5×10^8	4.0×10^8	3.2×10^8
KClO ₄	Katayama	3.5×10^9	2.6×10^9	2.2×10^9
K ₂ CrO ₄	Wakou	5.0×10^{10}	2.6×10^{11}	1.3×10^{12}
Cu ₂ O	Wakou	1.4×10^{11}	1.5×10^{12}	5.0×10^{12}
KClO ₃	Katayama	1.5×10^{11}	1.6×10^{12}	4.5×10^{12}
PbO	Katayama	1.8×10^{12}	2.3×10^{12}	2.3×10^{12}

(Cu₂O), 塩素酸カリウム(KClO₃), 酸化鉛(PbO)などは $10^{10} \Omega$ を超える電気抵抗を示し, 印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗が高くなるものが多い。

4. 考 察

火工品原料粉体の電気抵抗を, ここでは静電的に見て, これ以下の電気抵抗では静電気帯電の可能性が少ないと考えられる $10^6 \Omega$ と, これ以上では静電気帯電の可能性のある $10^9 \Omega$ によって区分し, $10^6 \Omega$ 以下は低電気抵抗, $10^6 \sim 10^9 \Omega$ は中間電気抵抗, $10^9 \Omega$ 以上は高電気抵抗と分類した。なお, 静電気帯電からの電気抵抗の限界値区分は容器や接触している材料などの粉体の取扱条件や粉体の取扱量などによって変わる²⁾。

粉体の電気抵抗は, ここに取りあげた圧縮や印加電圧によるほか多くの因子によって変化した。通電や電圧印加からの経過時間や熱乾燥, デシケータ保管, 大気中への放置, 静電気帯電などの試料の状態によっても電気抵抗は変化した, ここでは指定した条件での測定データのみについて記述した。なお, 測定時の温度は $17 \sim 32^\circ\text{C}$, 相対湿度は $37 \sim 95\%$ の範囲であったが, 粉体の電気抵抗との相関関係が測定の範囲内では認められなかった, 温度と湿度の記述を省略した。

Mg粉は低い電気抵抗を示す場合と高い電気抵抗を示す場合があり, いずれも長い期間保管したものは全て高い電気抵抗を示した。Tiは長い期間保管したものでも低い電気抵抗を示すものが多く, Yamanakaだけが低い電気抵抗を示した。また, 低い電気抵抗を示したKatayamaは2年以上保管したものは高い電気抵抗を示した。

ZrH_x, TiH_xは水素含有量によってその金属の構造や粒子の形状が異なり, この水素含有量と電気抵抗間に規則的な関係があることが知られている^{17), 18)}。これらの水素化物は両方とも購入先によって粉体の電気抵

抗が異なった。今回の測定では, 水素含有量と粉体の電気抵抗間には規則的な関係は認められなかった。本実験での圧縮では粒子形状を変えるまでには至らず, 粉体の電気抵抗は水素化物の固有抵抗よりもその粒子形状や粒度および酸化被膜の影響の方が大きいと認められる。

前述のように, ZrH_xとTiH_xは高低両方の電気抵抗を示すものがあつた。ZrH_xはアルゴン封入缶入りのものの開缶直後のKatayamaだけは低い電気抵抗を示した。また, TiH_xは比較的長い期間保管したものでも低い電気抵抗を示した。ただ, 長い期間瓶に保管したもののうち, Katayamaは高い電気抵抗を示した。ZrH_xがTiH_xよりも粉体の電気抵抗が高い場合が多いが, これはZrH_xの方が固有抵抗が高い^{17), 18)}ことのほかに酸化被膜を生じやすいと推定される。

これらに対して, Alは全て $10^8 \Omega$ 以上の高い電気抵抗を示した。酸化物のAl₂O₃(西尾工業)の電気抵抗は約 $10^8 \Omega$ であり, JyundoやKatayamaのAl粉体の電気抵抗はそれによるものであろう。Al(Touyou)やAl(Asahi)は酸化被膜から予測されるよりも高い電気抵抗を示している。Al(Touyou)は, テフロンコーティングのため, Al(Asahi)は絶縁性溶剤の混入のために電気抵抗が高くなり, さらに印加電圧が高くなるにつれて電気抵抗が低下するという例外的な変化を示したと考えられる。

金属粉の電気抵抗は, 酸化皮膜が薄い場合は圧縮による電気抵抗値とその変化から, 接触抵抗によって形成されていると, つまり, 圧力を受けて接触面積が増加するために, 接触抵抗が低下し, 電気抵抗が低くなったと考えられる。酸化被膜が厚くなると圧縮によってもその酸化被膜は影響を受けず, 酸化被膜による高い電気抵抗を示すと考えられる。

Mg粉のうち, Mg(DIN40)は約 $220 \mu\text{m}$ の大きな楕円体粒子, Mg(M45)は板状, Mg(M15)は球状で広い粒度分布を持っている^{7), 8)}。それに対して, Mg(No.

16)は粒度の揃った球状粒子, Mg(M1002)は箔を丸めた形状, Mg(Jyundo)は不規則形状である。粒子径の大きいもの, 板状のもの, 広い粒度分布を持つものの方が, 粒子間接触面積が大きく, 接触抵抗が低くなり, 低い電気抵抗を示す場合が多いことがわかる。

これらのMg粉は粒子の接触面積と接点の数および主として酸化被膜の生長の程度によって, 接触抵抗による低い電気抵抗の場合と絶縁酸化被膜による高い電気抵抗の場合が決まっていると考えられる^{3), 9)}。

Alはその高い電気抵抗から, 新鮮な状態のときでも酸化被膜ができていていると考えられる。Mgの場合は新鮮な状態のときは酸化被膜はわずかであるが, 時間の経過につれてだんだんと酸化被膜は成長していくことがわかる。

Ti, ZrH₂, TiH₂, FeSiなどは不規則形状のものが多く, それらの形状や粒子径よりも主として酸化被膜の厚さと電気抵抗によって, 測定された粉体の電気抵抗が決まったと考えられる。TiやTiH₂はMgやZrH₂よりも酸化被膜が形成し難いと考えることができる。金属粉は導体としてよりも, 新鮮なとき以外は絶縁性粉体として考える必要があり, 静電気帯電に注意して扱う必要があることを示している。

酸化剤粉体はTable 3や4に示すように10⁶~10⁹ Ωの中間の電気抵抗を示すものが多く, 次いで10⁹ Ωを超える電気抵抗, そして10⁶ Ω以下の低い電気抵抗を示すものもあった。電気抵抗の低いものも高いものも, 取付ネジの回転による電気抵抗の変化をみると, Fig. 3に示すように規則的な電気抵抗の低下は認められず, ほぼ一定の場合が多い。

これらの電気抵抗は, 本実験程度の圧縮によってはほとんど変化せず, 温度や湿度による電気抵抗の変化はほとんど認められなかった。また, KClO₃やKNO₃を粉砕して粒度別に電気抵抗を測定したときに, 粒度が小さくなるにつれて電気抵抗はわずかに高くなっただけであった⁴⁾。これらの場合は粒子表面に絶縁皮膜がなくて, 粒子の固有抵抗または表面抵抗によって粉体の電気抵抗がほぼ決定されると考えることができる。

放電開始条件測定実験のときに, 粒子自体が導電性である還元剤や酸化剤が電極間にある場合には放電を発生しやすくなった^{3), 4)}。また, 静電気感度試験では導電性物質やそれを含む組成物を試料とした場合には, 放電を発生しやすくなることから最小発火エネルギーが低くなったり, また, そのときの電極間隙長が短くなったりする傾向が認められた^{6)~8)}。このようなことからこれらの現象に試料粉体の電気抵抗が関係していると考えられた。しかし, ここに測定された粉

体の電気抵抗の大きさや変化と放電開始条件や静電気感度との関係を見ると, 相関性は認められない。それらの現象は粉体の電気抵抗ではなく, 粉体粒子自体の電気伝導度と粒子の大きさが関係し, 絶縁酸化被膜の程度とその電気抵抗は関係が少ないと考えられる。

本文中では全て直接の測定値である電気抵抗R(Ω)で記述した。これを一般化するには体積抵抗率ρ(Ω・m)で表示する必要がある。ただ, 試料の高さが一定ではなく, 明確には定まらない。試料が強く圧縮されたときは試料高さはほぼ3 mmとみなせるので, そのときは次式を用いて電気抵抗を体積抵抗率に変換することができる。

$$\rho(\Omega \cdot m) = 0.044 \times R(\Omega)$$

5. まとめ

火工品組成物の原料用の還元剤と酸化剤粉体について, 電気抵抗の測定を行い, 各種粉体の電気抵抗データを得た。

- (1) 金属粉は圧縮したときに約100 Ω以下の電気抵抗を示すものが多いが, マグネシウムのように同じ金属粉がその粒子の表面状態によっては10⁹ Ωを超える電気抵抗を示す場合もあった。また, アルミニウムのように10⁹ Ωを超える高い電気抵抗だけしか示さない金属粉もあった。
- (2) 酸化剤粉体は10⁶~10⁹ Ωの中間の電気抵抗を示すものが多いが, 10⁹ Ω以上の高い電気抵抗および10⁶ Ω以下の低い電気抵抗を示すものもあった。
- (3) 金属粉では, 個々の粒子の酸化被膜の状態が粉体の電気抵抗に関係し, 酸化被膜が薄い場合には粒子間の接触抵抗が, 厚い場合には酸化被膜自体の電気抵抗が粉体の電気抵抗を決定する。酸化剤では粒子の固有抵抗や表面抵抗が粉体の電気抵抗の支配因子である。
- (4) 粉体の電気抵抗と放電開始現象および静電気感度との直接の関係は認められなかった。

文 献

- 1) 化学大辞典編集委員会, 化学大辞典, 共立出版(株)(各化合物について固有抵抗の記述あり)
- 2) C. T. Davey, PA-TR4981(1976)
- 3) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 60, 261(1999)
- 4) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 60, 124(1999)
- 5) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 77(1996)
- 6) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 84(1995)
- 7) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 71(1995)
- 8) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 41(1996)

- 9) 黒田英司, 工業火薬, 32, 269(1971)
- 10) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 36, 146(1997)
- 11) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 35, 124(1996)
- 12) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 36, 84(1997)
- 13) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 165(1995)
- 14) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 59, 137(1998)
- 15) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 85(1996)
- 16) 藤原幸雄, 静電気学会誌, 7, 308(1983)
- 17) K. White, J. W. Reed, C. M. Love, J. A. Holy and J. E. Glaub, MLM-2550(1978)
- 18) K. White, J. W. Reed, C. M. Love, J. E. Glaub and J. A. Holy, MLM-2589(1979)

Electric resistance of pyrotechnic raw materials (I)

Eishi KURODA*, Hiroshi NARASAKI**, and Toshiyuki NAGAISHI**

The electric resistances of oxidizer and reducing agent powders, especially metal powders used for pyrotechnic raw materials were measured with the direct current method. One metal powder with the electric resistance below $100\ \Omega$ showed the electric resistance above $10^9\ \Omega$, though most of metals had low electric resistance below $100\ \Omega$. It was also observed that some metal powders had only high resistance above $10^9\ \Omega$. Such large change of the electric resistance may be attributed to the thickness of oxide films formed on metal powder surfaces. It was suggested that if the films were thin, the electric resistance of metal powders were determined by the contact resistance among metal particles, and if they were thick, the electric resistance of metal powders were determined by the electric resistance of their oxide film. Most of oxidizers had electric resistance ranged from 10^6 to $10^9\ \Omega$. But some oxidizers showed the electric resistance above $10^9\ \Omega$ and others did below $10^9\ \Omega$. It was deduced that the electric resistance for oxidizers were determined by their own resistance.

(*Nippon Koki Co., Ltd., 2-1, Nagasaka, Nishigou-mura, Nishishirakawa-gun, Fukushima 961-8686, JAPAN)

**Faculty of Engineering, Kyushu Sangyou University, 2-1-3 Matsuka-dai, Higashi-ku, Fukuoka 813-8503, JAPAN)