

## Mg/TFパイロラントの着火遅れ時間特性

桑原卓雄<sup>\*</sup>, 芝本秀文<sup>\*</sup>, 東原千春<sup>\*</sup>, 瀧塚道則<sup>\*</sup>

高エネルギー物質であるMg/TFパイロラントの着火遅れ時間特性を求めた。着火温度はクルップ発火点試験装置で測定し、着火遅れ時間が4sのときの着火温度はMgの混合量により異なり、Mgの混合量が60~80wt%で906~921Kと900Kを超えている。Mg/TFパイロラントは着火温度が高く着火しにくいことから取り扱い上安全であることが得られた。ニクロム線にパイロラントを付着させ着火遅れ時間を測定した。電流を増加すると着火遅れ時間は短くなり、減少量は電流の-2乗に比例することが得られた。着火遅れ時間は線径の3.6乗に比例して増加し、供給エネルギーの1.8乗に反比例して減少することが得られた。

## 1. 緒言

Mg/TF(テフロン:商品名)パイロラントはMgの混合量が約30wt%, 圧力0.1MPaで理論断熱炎温度は極大値の3271Kに達する。高温の固体粒子を大量に発生することから着火薬として有望である。また、高エネルギー発光、発煙剤であることからフレア剤としても使われてきている。Mg/TFパイロラントをペレット状に成型して燃焼すると、Mgの混合量が50wt%以上でないと定常燃焼を維持できない<sup>1-3)</sup>。このことから、Mgの混合量は燃料リッチの領域で用いる。また、Mg/TFパイロラントは感度が低く安定な物質として知られている。Mg/TFパイロラントは感度が低いことから取り扱いやすいが、AP(過塩素酸アンモニウム)系コンポジット推進薬に比較して着火しにくいといわれている。このような特性をもつMg/TFパイロラントの着火特性に関しては研究が行われていない。そこで本研究ではMg/TFパイロラントを用いて着火温度、着火遅れ時間特性を求めた。

## 2. 実験

Mgの平均粒径が60 $\mu$ mで混合量はMg( $\xi$ Mg):70, TF:20, バイトン:10wt%のものを用いた。バイトンはバインダの役割をしておりMgとTFとを結合している。ニクロム線の線径( $\phi$ )を0.45, 0.32, 0.2mmと変え電流値をパラメータに着火遅れ時間を

測定した。ニクロム線の長さは50mmと一定にし直径約2mmのコイル状にして、Mg/TFパイロラントをコイル全面に付着させた。ニクロム線の両端は銅線に接続し一定の電流を流せるように定電流装置をセットし大気中で実験した。着火遅れ時間 $\tau_{ig}$ は通電してから白色光の発生するまでの時間と定義した。Mg/TFパイロラントは平均粒径が24 $\mu$ mのMgの混合量を60, 70, 80wt%と3種類変え、バイトンは10wt%と一定にした。線径0.2mmのニクロム線を用い電流を5Aにセットした。着火温度はクルップ発火点試験装置を用いて4s後に発火した温度を求めた。

## 3. 着火遅れ時間のモデル

ニクロム線に電流を流し温度が上昇することでMg/TFパイロラントにエネルギーが供給される。ニクロム線は加熱され温度が上昇すると同時に外部に熱が逃げていく。試料に流れるエネルギーは試料の温度上昇に使われるが、ニクロム線を伝わって銅線側に逃げる熱はニクロム線の温度上昇をさまたげる。ニクロム線を長くするとニクロム線の中央から銅線側に逃げる熱はなくなる。この効果を求めるためニクロム線の長さを10, 50, 100mmと変え着火遅れ時間を測定した。電流一定のときニクロム線を50mm以上にするると着火遅れ時間は一定となり、コイル状にした線の中央から逃げる熱量はニクロム線に接する試料側のみと考えてよい。よってニクロム線の中央部における単位長さ当たりの発熱量とニクロム線の温度上昇は次のエネルギー保存式で与えられる。

2000年1月11日受理  
<sup>\*</sup>細谷火工株式会社 技術開発センター  
 〒197-0801 東京都あきる野市菅生 1847  
 TEL 042-559-2578  
 FAX 042-559-2413

$$RI^2 t(1-\alpha) = Cp\rho A(T-T_0) \quad (1)$$

ここで  $R$  はニクロム線単位長さ当たりの抵抗,  $I$  は電流,  $t$  は電流を流している時間,  $\alpha$  は試料に流入する熱損失率,  $C_p$  はニクロム線の比熱,  $\rho$  はニクロム線の密度,  $A$  はニクロム線の断面積,  $T$  はニクロム線の温度,  $T_0$  はニクロム線の初期温度である。左辺はニクロム線で発熱するエネルギーで右辺はニクロム線の温度上昇に必要なエネルギーである。ニクロム線とMg/TFパイロラントは接していることから接触部のパイロラントの温度は  $T$  に等しいと仮定する。このニクロム線の温度が臨界温度  $T_{ig}$  に達すると着火する仮定を用いると,

$$RI^2 \tau_{ig}(1-\alpha) = Cp\rho A(T_{ig}-T_0) \quad (2)$$

となる。ここで  $\tau_{ig}$  は着火遅れ時間である。このように  $\tau_{ig}$  は供給されるエネルギー ( $RI^2$ ), 着火温度  $T_{ig}$  の関数として,

$$\tau_{ig} = \frac{C_p \rho A (T_{ig} - T_0)}{(1-\alpha) \times RI^2} \quad (3)$$

となる。着火遅れ時間  $\tau_{ig}$  は電流  $I$  の関数で表わされ

$$\tau_{ig} = \beta I^{-n} \quad (4)$$

となる。このとき  $\beta$ ,  $n$  は定数であり理論では  $n=2$  である。また, 発生エネルギー  $E=RI^2$  の関数として表わされ

$$\tau_{ig} = \beta' E^{-m} \quad (5)$$

となり,  $\beta'$ ,  $m$  は定数で理論では  $m=1$  である。実験的に  $n$ ,  $m$  の値を求め理論値と比較する。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 着火遅れ時間と電流の関係

電流 ( $I$ ) と着火遅れ時間 ( $\tau_{ig}$ ) の関係を Fig. 1 に示した。ニクロム線の長さは 50mm と一定にしてニクロム線の線径 ( $\phi$ ) を 0.45, 0.32, 0.2mm と変えた。Mg/TFパイロラントの組成はMg(平均粒径 60 $\mu$ m) : 70, TF: 20, バイトン: 10wt% である。電流を増加すると着火遅れ時間は減少し, 両者の関係は対数表示で直線関係にある。これはニクロム線の線径を変えても同様の関係を示している。この直線の傾斜を求め Table 1 に示した。この直線の傾斜は(4)

式の  $n$  に相当する。傾斜  $n$  は 1.8~2.2 と線径によって変化している。Table 1 に示した傾斜  $n$  は理論の 2 に近い値が得られ, 着火遅れ時間はMg/TFパイロラントが同一でニクロム線の線径が一定のとき(4)式で評価でき,  $\beta$  =一定であることが得られた。また, Fig. 1 に示したようにニクロム線の線径を大きくし抵抗を小さくすると着火遅れ時間は増加することが得られた。

ニクロム線の線径の効果を求めるため電流一定 ( $I=5$  A) のときの供給エネルギー  $E(RI^2)$  と着火遅れ時間  $\tau_{ig}$  の関係を求めて Fig. 2 に示した。  $\tau_{ig}$  は  $E$  を増加すると減少し, 両者の関係は対数表示で直線関係にある。傾斜  $m$  を求めると 1.8 となり, 着火遅れ時間  $\tau_{ig}$  はニクロム線で発生するエネルギー  $E$  の -1.8 乗に比例することが得られた。即ち(5)式の  $\beta'$  は定数ではなく  $E$  の関数である。そこでニクロム線の線径の効果を求めるためニクロム線の断面積

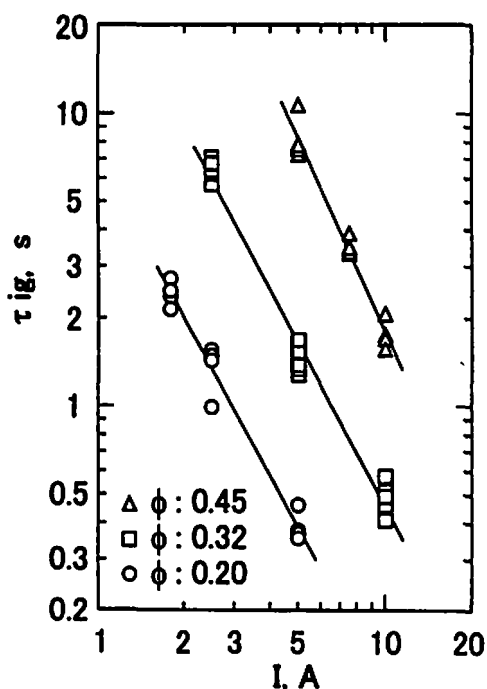


Fig. 1 Relationship between electric current ( $I$ ) and ignition delay time ( $\tau_{ig}$ )

Table 1 n of ignition delay time

Diameter of nichrome wire, mm	Resistant, $\Omega$ /m	n
0.2	31.7	1.8
0.32	13.7	1.9
0.45	6.0	2.2

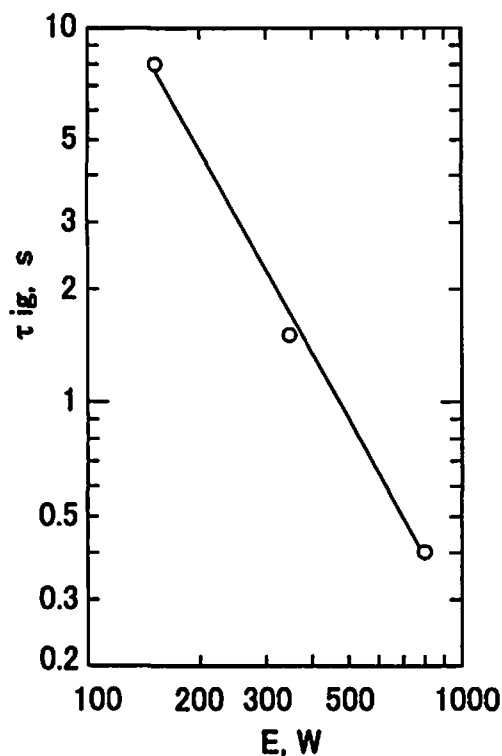


Fig. 2 Relationship between input energy ( $E$ ) and ignition delay time ( $\tau_{ig}$ )

$A$ と抵抗の関連を求めた。Table 1 より抵抗  $R$  はニクロム線の線径  $\phi$  と次の関係で与えられる。

$$R = 0.995 \times 10^{-6} A^{-1} = 1.268 \times 10^{-6} \phi^{-2} \quad (6)$$

ここで  $R$  の単位は  $\Omega/m$  で  $\phi$  は  $m$  である。電流  $I = 5 A$  のとき  $\tau_{ig}$  と  $\phi$  の関係を求めて Fig. 3 に示した。両者は対数表示で直線関係にあり、このときの傾斜は 3.6 で実験式で表わすと

$$\tau_{ig} = 8.9 \times 10^{12} \phi^{3.6} \quad (7)$$

となり、傾斜は理論の 4 にほぼ等しい。

#### 4. 2 着火遅れ時間とMg混合量との関係

Mg/TFパイロラントはMgの混合量を変えることで燃焼速度が変化することが得られている。そこでMgの混合量 ( $\xi Mg$ ) を 60, 70, 80wt% と変えて着火遅れ時間を、長さ 50mm, 線径 0.2mm のニクロム線を用いて測定し、結果を Fig. 4 に示した。Mgの平均粒径は  $24 \mu m$  で、電流は 5 A と一定にして測定した。着火遅れ時間は 5 回測定した平均値を示した。 $\xi Mg$  が 60wt% のとき着火遅れ時間は 0.51 s であったが  $\xi Mg$  が 80wt% になると着火遅れ時間は 0.3 s に

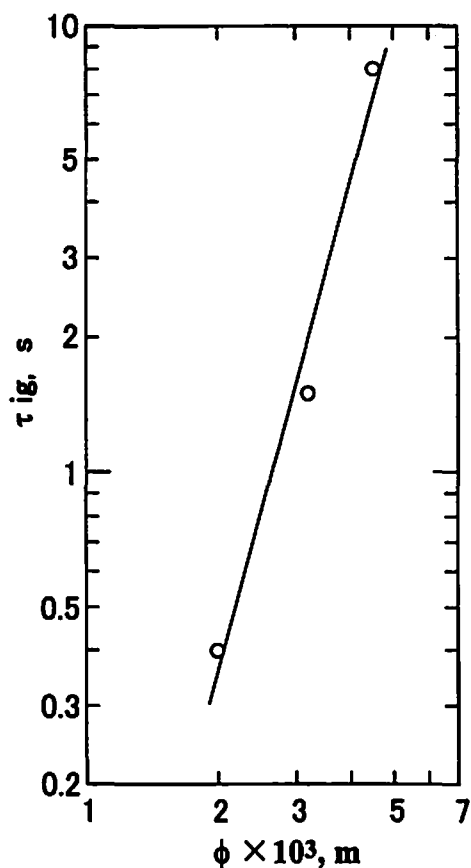


Fig. 3 Relationship between Nichrome wire diameter ( $\phi$ ) and ignition delay time ( $\tau_{ig}$ )

低下した。このようにMgの混合量を増加すると着火遅れ時間は減少することが得られた。

Mgの混合量の効果を求めるために着火温度を求めた。Mgの平均粒径  $24 \mu m$  のパイロラントを用いたクルップ発火点試験装置を用いた。Mgの混合量が 60wt% のときの着火温度 ( $T_{ig}$ ) と着火遅れ時間 ( $\tau_{ig}$ ) の関係を Fig. 5 に示した。Mg/TFパイロラントは 900K 以上でないとき着火しなかった。発火点試験装置の炉の温度が一定のとき着火遅れ時間は変動し、炉の温度を増加すると着火遅れ時間は減少する傾向を示した。着火遅れ時間が 4 s のときの、着火温度を Table 2 に示した。着火温度  $T_{ig}$  は Mg の混合量を増加するとともに低下し、Mg が 60wt% のとき 921K であったものが 80wt% で 906K に低下している。このように Mg の混合量が着火温度に影響を及ぼすことが得られた。そこでパイロラントの着火温度 ( $T_{ig}$ ) と着火遅れ時間 ( $\tau_{ig}$ ) の関係を求めて Fig. 6 に示した。電流は 5 A 一定で、ニクロム線の線径 0.2mm, Mg の混合量が 60, 70, 80wt% で Mg の平均粒径は  $24 \mu m$  である。Fig. 6 に示したように

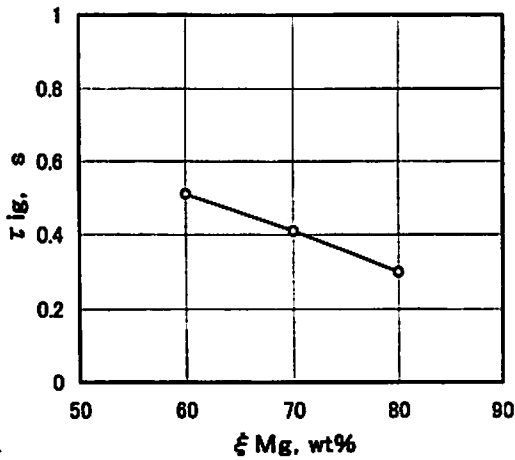


Fig. 4 Relationship between concentration of Mg ( $\xi M_g$ ) and ignition delay time ( $\tau_{ig}$ )

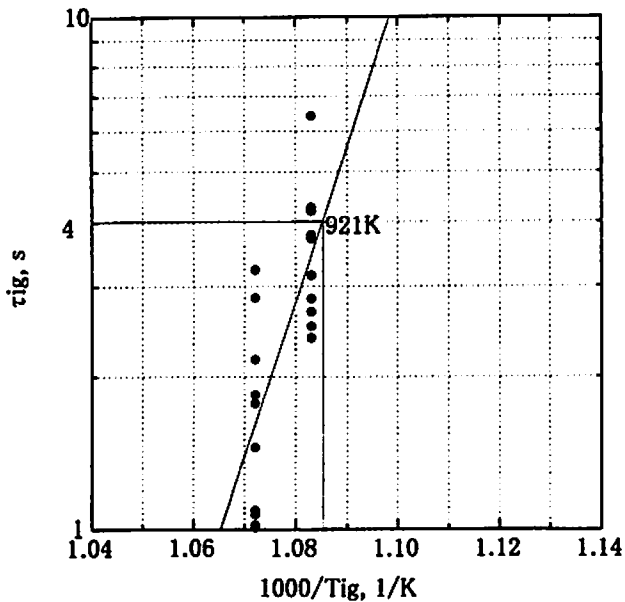


Fig. 5 Ignition temperature ( $T_{ig}$ ) of Mg/TF pyrolant

着火温度の増加によって着火遅れ時間が増加していることが得られた。このようにMg/TFパイロラントは着火温度が大きくなると着火しにくくなることが得られた。

#### 4.3 ニクロム線からパイロラントに流入する熱量

ニクロム線を加熱してMg/TFパイロラントに着火するときパイロラントへ流入する熱量を(3)式をもとに検討した。(3)式の $\alpha$ がパイロラントに流入する熱量である。ニクロム線の物理特性値は $C_p = 436 \text{ J/kg/K}$ ,  $\rho = 8.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。Table 2 より着火温度は着火遅れ時間4sのときの値が求まっている。また、Fig. 1 より着火遅れ時間が4sのとき

Table 2 Ignition temperature

$\xi M_g$ , wt%	Tig, K
60	921
70	915
80	906

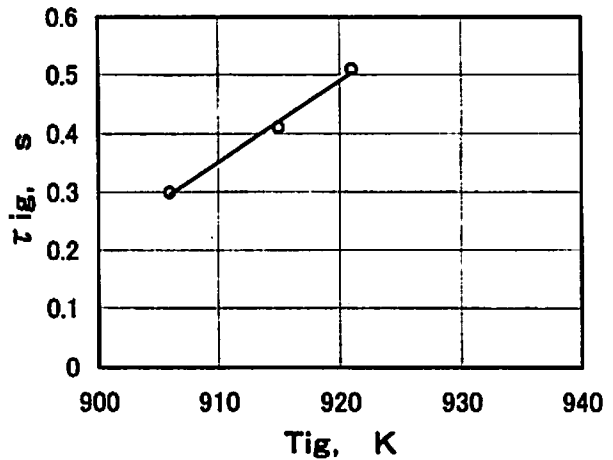


Fig. 6 Relationship between ignition temperature ( $T_{ig}$ ) and ignition delay time ( $\tau_{ig}$ )

の電流はニクロム線の線径が0.32mmのとき3A, 0.45mmのとき7.3Aである。パイロラントはMgの混合量が70wt%, 平均粒径 $60 \mu\text{m}$ である。着火温度 $T_{ig}$ はMgの混合量が70wt%のときの915Kを用いた。(3)式より $\alpha$ を求めると $\phi = 0.32\text{mm}$ のとき $\alpha = 0.6$ ,  $\phi = 0.45\text{mm}$ のとき $\alpha = 0.7$ であった。このことから、ニクロム線で発生する熱量の半分以上がパイロラントに供給されることが得られた。

#### 5. 結 論

Mg/TFパイロラントを用いて着火遅れ時間特性を求めたところ、ニクロム線の線径が一定のとき点火遅れ時間は供給する電流の $-1.8 \sim -2.2$ 乗に比例して減少し、この傾斜は理論の $-2$ 乗にほぼ等しい。電流一定のときニクロム線の線径を変えて抵抗を増加すると、着火遅れ時間は線径の $3.6$ 乗に比例して増加する。このようにパイロラントの組成を一定にしたときの着火遅れ時間は電流、ニクロム線の線径の関数として与えられる。また、発生するエネルギー $E$ の $1.8$ 乗に反比例して着火遅れ時間は減少している。パイロラントのMg混合量の効果を求めるために $\xi M_g$ を60, 70, 80wt%と増加すると、着火温度は減少しかつ着火遅れ時間も減少している。このよう

にパイロラントに供給するエネルギーが一定のとき、着火遅れ時間は着火温度が小さくなると減少することが得られた。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにおいて種々御指導をいただきました三菱電機(株)久保田浪之介博士に感謝いたします。

#### 文 献

1) Kubota, N. and Serizawa, C. "Combustion of Mag-

nesium/ Polytetrafluoroethylene," J. Propulsion and Power Vol.3, No.4, pp.303-307, 1987.

2) Kuwahara, T., Matuo, S. and Shinozaki, N. "Combustion and Sensitivity Characteristics of Mg/TF Pyrolants", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 22, pp. 198-202, 1997.

3) 桑原卓雄, 滝塚道則, "金属/テフロン(TF)パイロラントの燃焼および感度特性(Mg/Ti/Zr/TFパイロラント)," 火薬学会誌, Vol.59, No. 1, pp.18-23, 1998.

---

## Ignition delay time characteristics of Mg/TF pyrolants

Takuo KUWAHARA\*, Hidefumi SHIBAMOTO\*, Chiharu TOHARA\*  
and Michinori TAKIZUKA\*

Mg/TF pyrolant is one of the high energy materials and its ignition delay time characteristics were obtained. Ignition temperature ( $T_{ig}$ ) of Mg/TF pyrolants, the concentration of Mg ( $\xi Mg$ ) were 60, 70, and 80wt %, reached between 906 and 921K and over 900K when ignition delay time was 4 seconds. Mg/TF pyrolant is difficult to ignite, so it is easy and safe to handle. And ignition delay time was measured by heating them with Nichrome wires. Ignition delay time ( $\tau_{ig}$ ) is decreased with increasing electric current (I), and  $\tau_{ig}$  is proportion to  $I^{-2}$ . And also ignition delay time is increased with increasing the diameter of Nichrome wire ( $\phi$ ) on the constant electric current. So  $\tau_{ig}$  is proportion to  $\phi^{3.6}$ . And also  $\tau_{ig}$  is proportion to input energy  $E^{-1.8}$ .

(\*Hosoya Kako Co., Ltd., Research and development center, 1847 Sugao, Akiruno-City, Tokyo 197-0801, JAPAN)