

$$\begin{aligned} \rho_p C_p \partial T_p(t,x) / \partial t &= \lambda_p \partial^2 T_p(t,x) / \partial x^2 \\ \rho_g C_g \partial T_g(t,x) / \partial t &= \lambda_g \partial^2 T_g(t,x) / \partial x^2 \end{aligned} \quad (2)$$

境界条件と初期条件は次の通りである。

$$\begin{aligned} T_g(t,0) &= T_p(t,0) \\ T_g(t,-\infty) &= T_p(t,\infty) \\ T_g(0,x) &= T_p(0,x) = T_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $T_p(t,x)$ は固相内部の温度、 $T_g(t,x)$ は気相の温度、 $x>0$ は固相内部、 $x<0$ は気相である。境界条件及び初期条件を用いて解析すると固相の温度は次の式で表される。

$$T_p(t,x) = C(4t)^{1/2} [\exp\{-x/2\sqrt{a_p t}\} / \pi^{1/2} + x/2(a_p t)^{1/2} \operatorname{erfc}\{x/2(a_p t)^{1/2}\}] + T_0 \quad (4)$$

ここで $C = 1/\{\rho_p C_p (a_p)^{1/2} + \rho_g C_g (a_g)^{1/2}\}$ 、 $a_p = \lambda_p / C_p \rho_p$ 、 $a_g = \lambda_g / C_g \rho_g$ である。推進薬表面温度は $x=0$ のところの値に等しい。

$$T_p(t,0) = C(4t/\pi)^{1/2} + T_0 \quad (5)$$

$T_p(t,0) = T_{scr}$ で着火すると仮定すると $t \rightarrow \tau_{ig}$ で、 τ_{ig} は

$$\tau_{ig} = a/\Gamma^2 \quad (6)$$

と表され、ここで a は定数である。推進薬にレーザー光を照射して表面温度が上昇し、着火し定常燃焼に移行する場合、着火遅れ時間 τ_{ig} は照射エネルギー流束 I の2乗に反比例する。 I の実験結果の指数が2乗と異なり絶対値が小さくすることは物理的遅れ時間に対して化学的遅れ時間の占める割合が増加することを意味する。

3. 実験

試料はAP, AP/AN, AN系コンポジット推進薬の3種類を用いて着火遅れ時間を求めた。推進薬組成はHTPB(末端水酸基ポリブタジエン)20%, Al(アルミニウム)を20%混合しており残り60%が酸化剤である。着火特性は試料の大きさ $7 \times 7 \times 3 \sim 5$ mmのものを試料台にセットし、上方からCO₂レーザー光を照射して推進薬表面よりガスの発生状況を写真を用いて測定した。照射エネルギー流束 I は $4.5, 6 \times 10^4$ W/m²と変え、雰囲気圧力は1MPaである。燃焼器全体を恒温槽に入れて雰囲気温度を258(-15℃)~333K(60℃)の範囲で変えた。着火遅れ時間はgo/no-go法を用いて求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 推進薬の物理特性

AP, AN系コンポジット推進薬の物理特性、比熱、熱伝導率、密度を求めた。これらの物性値は式(5)のCに影響するパラメータである。比熱はAP, AP/AN, AN

系コンポジット推進薬の順に1.41, 1.68, 1.76kJ/kgKとANの混合量を増加することで大きくなっている。熱伝導率は同様に0.68, 0.72, 0.74W/mKとANの混合量を増加することで大きくなっている。AP単体の密度が 1.95×10^3 kg/m³とANの 1.73×10^3 kg/m³に比較して大きくこれに応じて推進薬の密度はANを混合することで1.66, 1.52, 1.47×10^3 kg/m³と減少している。熱応答性を表す $\Gamma = (\text{比熱})^{1/2} \times (\text{熱伝導率})^{1/2} \times (\text{密度})^{1/2}$ はAP系, AP/AN系, AN系コンポジット推進薬で39.9, 42.9, 43.7 (Ws^{1/2}/Km²)と三者ともほぼ等しく、(6)式の a は推進薬の種類によらず一定とみなすことができる。

4.2 着火遅れ時間

はじめにAN系コンポジット推進薬の着火特性に関して検討する。CO₂レーザーの照射エネルギー流束 I と着火遅れ時間(τ_{ig})の関係をFig.1に示す。雰囲気圧力は1MPaである。試料にAN系コンポジット推進薬を用いたときの値を示した。推進薬の初期温度は258K(-15℃)から333K(60℃)に変化させている。推進薬の初期温度を増加することで着火遅れ時間は短くなり、258Kの値に比較して333Kでは約1/2に低下している。着火遅れ時間の照射エネルギー流束 I に対する傾きは0~-0.4と推進薬の初期温度を増加すると傾きは大きくなり(6)式の理論値から大きくずれている。AN系コンポジット推進薬にAPを混合したときの照射エネルギー流束 I に対する着火遅れ時間の傾き n をTable1に示す。Prop1はAP, Prop2はAP/AN, Prop3はAN系コンポジット推進薬である。推進薬初期温度は293K, 圧力は1MPaである。AP系コンポジット推進薬の場合、傾きは比較的大

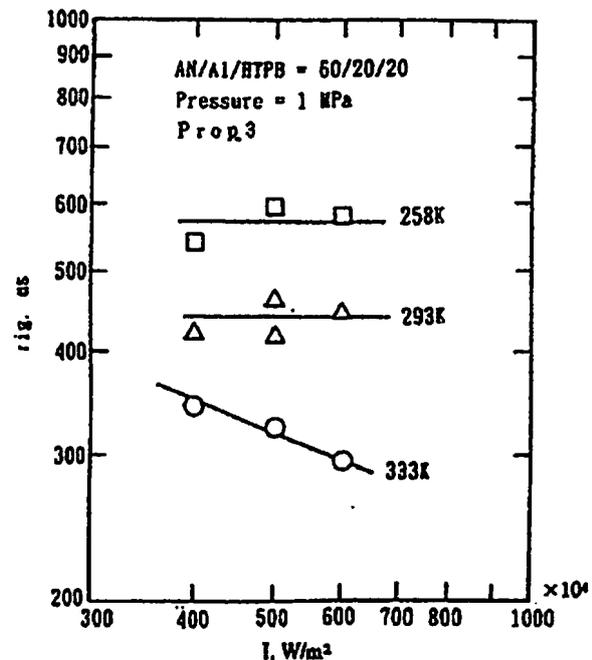


Fig. 1 The relationship between the ignition delay time and the radiant heat flux.

きく-1.2であり、AP/AN系コンポジット推進薬(AP/AN=20/40%)は-0.4である。このようにAP系コンポ

Table1 Radiant heat exponent n of ignition delay time.

Prop.	n
1	-1.2
2	-0.4
3	0

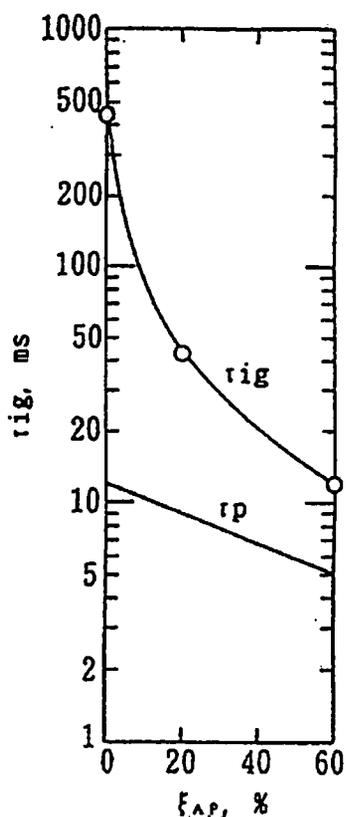


Fig. 2 Ignition delay time characteristics.

ジット推進薬にANを混合すると傾きは0に近づき理論値の-2と異なる。着火遅れ時間とガスが発生するまでの物理的な遅れ時間 τ_p とAPの混合量 x_{AP} の関係をFig.2に示す。推進薬の初期温度は293Kであり、照射エネルギー流束は $6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ である。AN系コンポジット推進薬の場合 τ_p は12~13msであるがAP系コンポジット推進薬の場合は5msと半分以下に低下している。一方着火遅れ時間は450msから13msと30分の1以下に低下している。このように、AN系コンポジット推進薬の着火遅れ時間が理論と大きくずれているのは、物理的遅れ時間に対して着火遅れ時間が大きく、物理的遅れ時間が律速していないためと考えられる。

4.3 着火特性

着火遅れ時間は物理的な遅れ時間 τ_p と化学的遅れ時間 τ_c に分けられる。実験は照射エネルギー流束 $I=6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、圧力 $P=1 \text{ MPa}$ の条件下で実施したものである。AP系コンポジット推進薬(Prop-1)の着火遅れ時間に占める化学的遅れ時間の割合 $\epsilon_c(\tau_c/\tau_{ig})$ と物理的な遅れ時間の占める割合 $\epsilon_p(\tau_p/\tau_{ig})$ と推進薬初期温度 T_0 との関係をFig.3に示す。推進薬の初期温度を増加することで ϵ_c は急激に低下している。258K(-15℃)の時 ϵ_c は66%であったが333K(60℃)のときには20%に低下している。このようにAP系コンポジット推進薬の場合には推進薬の初期温度によって着火特性は変化している。

AP/AN系コンポジット推進薬(AP/AN=20/40%)の ϵ と初期温度 T_0 との関係をFig.4に示す。ANをAP系コンポジット推進薬に混合することで着火特性は変化し

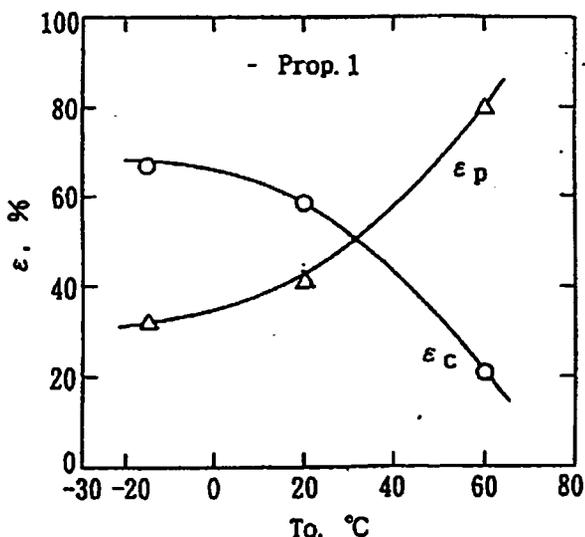


Fig. 3 Ignition delay time characteristics ϵ_p and ϵ_c of AP composite propellant.

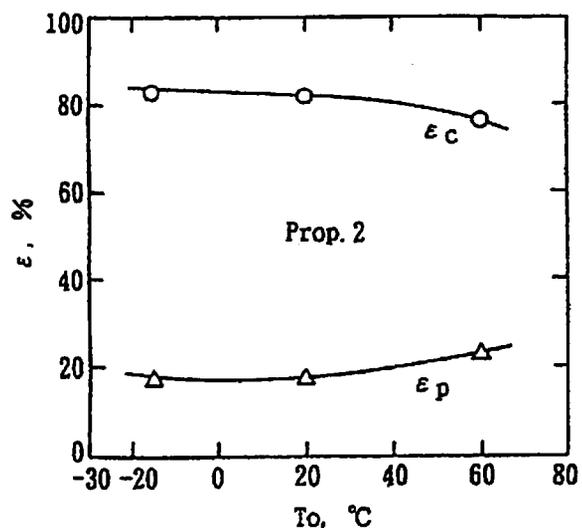


Fig. 4 Ignition delay time characteristics ϵ_p and ϵ_c of AN/AP composite propellant.

ている。即ち、化学的遅れ時間の占める割合 ϵ_c は約80%と一定の値をとり、着火遅れ時間に占める化学的遅れ時間が大きい。このことから、着火遅れ時間を律速しているものは主に化学的な遅れ時間であることが得られた。

AN系コンポジット推進薬の ϵ と初期温度 T_0 との関係を図5に示す。化学的な遅れ時間の占める割合 ϵ_c は95%以上と大きく、推進薬の初期温度を増加することによって幾分低下する傾向を示している。このようにAN系コンポジット推進薬の場合には分解ガスが発生して着火に至るまでの時間が大部分を占めている。AP/AN系コンポジット推進薬の着火特性はAPおよび

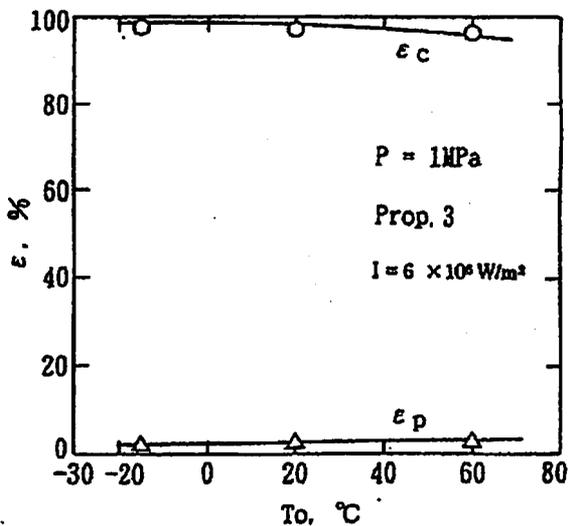


Fig. 5 Ignition delay time characteristics ϵ_p and ϵ_c of AN composite propellant.

AN系コンポジット推進薬の中間の値をとる。AN系コンポジット推進薬の着火遅れ時間が大きいのが化学的な要因に起因することから、着火を容易に行うためには、この化学的な遅れ時間を改良していく必要がある。

5. 結論

- 1) AN系コンポジット推進薬の着火遅れ時間は照射エネルギー流束の-2乗には比例せず、傾きは0~-0.4であり、理論値からのずれは化学的な遅れ時間が大きいためである。
- 2) AP系コンポジット推進薬の着火遅れ時間における化学的な遅れ時間の占める割合は初期温度の増加とともに急激に低下して、333Kのときには20%に達している。
- 3) AN/AP系コンポジット推進薬の着火遅れ時間に占める化学的な遅れ時間の割合は約80%と初期温度の影響を受けていない。
- 4) AN系コンポジット推進薬の着火遅れ時間は化学的な遅れ時間にほぼ等しく、 ϵ_c は95%以上である。

文献

- 1) 桑原 卓雄, 篠崎 昇; 工業火薬協会誌, Vol. 52, No.3, pp.131-136(1991).
- 2) 桑原 卓雄, 篠崎 昇; 火薬学会誌, Vol. 55, No.3, pp.108-131(1994).
- 3) 桑原 卓雄, 松尾 信二; 火薬学会誌, Vol. 56, No.3, pp.135-140(1995).
- 4) M. Brewster, T. Sheridan, and A. Ishihara, AIAA Paper 91-2195.

Ignition characteristics of ammonium nitrate/ammonium perchlorate composite propellants

Takuo KUWAHARA*

Ignition delay time of AN/AP composite propellants increases with increasing the concentration of AN. Effects of initial temperatures of propellants on physical and chemical delay time are obtained. The physical delay time fraction ϵ_p of AP composite propellant is more than 30% and it increases with increasing the initial temperature of the propellant. The ϵ_p of AN/AP composite propellant is about 20%. The ϵ_p of AN composite propellant is about 5%. The ϵ_p of propellants decreases with increasing the concentration of AN, but on the other hand the chemical delay time fraction ϵ_c increases.

(*NISSAN MOTOR CO. LTD. 900, Fujiki, Tomioka-city, Gunma-prefecture 370-2398, Japan)