

Fig. 1b Combustion characteristics of RDX/AP propellants

Table 1 Compositions of RDX/AP propellants (weight %)

Prop	ξ_{RDX}	HTPB	AP(C) ¹⁾	AP(F) ²⁾	RDX(C) ³⁾	RDX(F) ⁴⁾
1	0	14	43	43	—	—
2	43	14	43	—	—	43
3	64.5	14	21.5	—	21.5	43
4	75.25	14	10.75	—	32.25	43
5	81	14	5	—	38	43
6	83.5	14	2.5	—	40.5	43
7	86	14	—	—	43	43

1) AP(C) ; d=200 μ m, 2) AP(F) ; =40 μ m

3) RDX(C) ; d=200 μ m, 4) RDX(F) ; =40 μ m

2.2 実験装置

燃焼速度特性はチムニー型ストランドバーナを用いて実施し、試料形状は7×7×70mmのものを用いた。固相の熱分解特性は理学電機株式会社熱重量測定計(TG)を用い、固相の物性は理学電機株式会社熱定数測定装置を用いて測定した。固相の熱分解特性の試料は推進薬の一片の大きさが1mm以下になるように切断して用いた。実験は昇温速度0.33K/s、雰囲気ガス:Heで0.5MPaに加圧した状態で実施した。熱定数は真空雰囲気にて測定し、試料形状は10mm×10mm×2~3mmのものを用いた。着火遅れ時間はCO₂レーザを用い、窒素ガス雰囲気下0.5MPaに加圧した状態で測定し、試料の大きさは7×7×5mmのものを用いた。試料に照射されるレーザビーム径は10mmである。最大出力600Wで最小照射時間は1msである。推進薬の着火遅れ時間はgo-nogo法を用いて求めた。ts時間レーザ光を照射して着火しなければts+ Δ t時間に照射時間を伸ばして実験し、着火すれば Δ t時間、照射時間を短くし、10

回以上繰り返した。 Δ tは推進薬により異なり1~10msである。go-nogo法で求めた着火遅れ時間を統計処理し、50%の確率で着火する時間を着火遅れ時間 τ_{ig} と称した。影写真法を用い、レーザを照射してから、推進薬表面よりガスの発生する状況を求めた。撮影にコダックエクタプロ1000の高速ビデオカメラ(コマ数1000/秒)を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 燃焼速度特性

燃焼速度と圧力の関係をFig. 2に示す。燃焼速度はAP系コンジット推進薬、RDX/AP系コンジット推進薬($\xi_{RDX}=43$)とRDX系コンジット推進薬の値を代表値として示した。燃焼速度は圧力の増加とともに一様に増加する傾向にある。RDX/AP系コンジット推進薬の燃焼速度はAP系とRDX系コンジット推進薬の中間の値をとっている。燃焼速度の圧力指数はAP系コンジット推進薬が0.56、RDX/AP系コンジット推進薬($\xi_{RDX}=43$)が0.59、RDX系コン

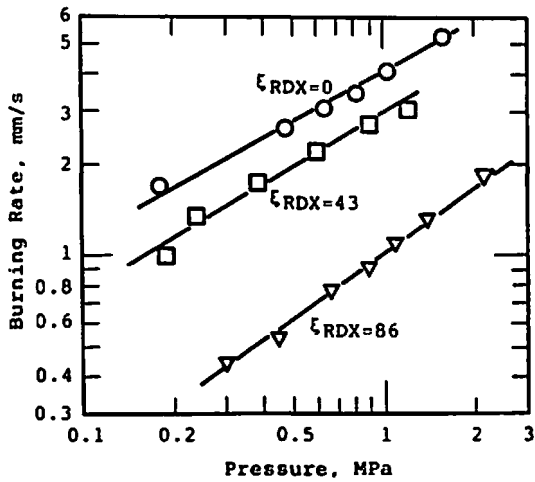


Fig. 2 Burning rate characteristics of RDX/AP propellants

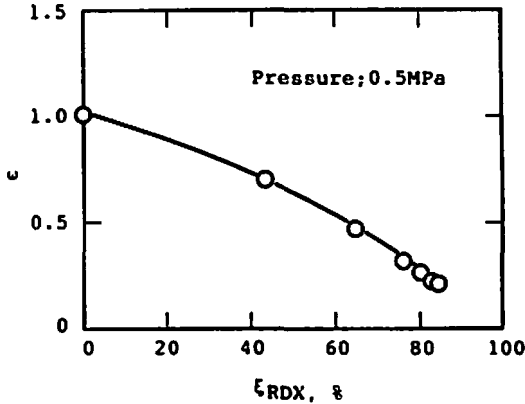


Fig. 3 Effect of the concentrations of RDX on burning rate ratio

ポジット推進薬が0.71とRDXの混合量を増加することにより、圧力指数も増加する傾向にある。

燃焼速度のRDXの混合量 ξ_{RDX} に対する効果を求めるため式(1)で定義するように、各推進薬の燃焼速度のAP系コンポジット推進薬の燃焼速度に対する割合 ϵ と ξ_{RDX} の関連を求めてFig.3に示した。

$$\epsilon = r/r_{AP} \quad (1)$$

ここで r :RDX/AP系コンポジット推進薬の燃焼速度,
 r_{AP} :AP系コンポジット推進薬の燃焼速度である。
RDXを混合することで、 ϵ は1より小さく、 ξ_{RDX} にはほぼ比例して一様に減少している。

3.2 固相熱分解特性

固相においてAPとRDXがどのように分解しているかを求めた。昇温速度:0.33K/s, 雰囲気圧力:0.5 MPaで熱重量測定を実施した。Fig.4は熱天秤TGの結果であり、AP系、RDX/AP系 ($\xi_{RDX}=43$), RDX

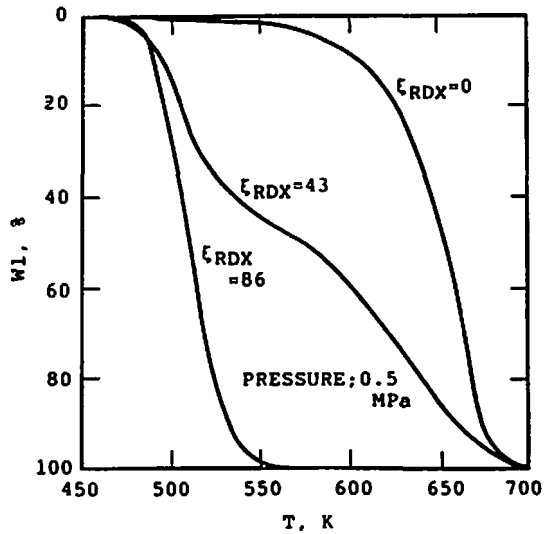


Fig. 4 Weight loss characteristics of RDX/AP propellant with TG

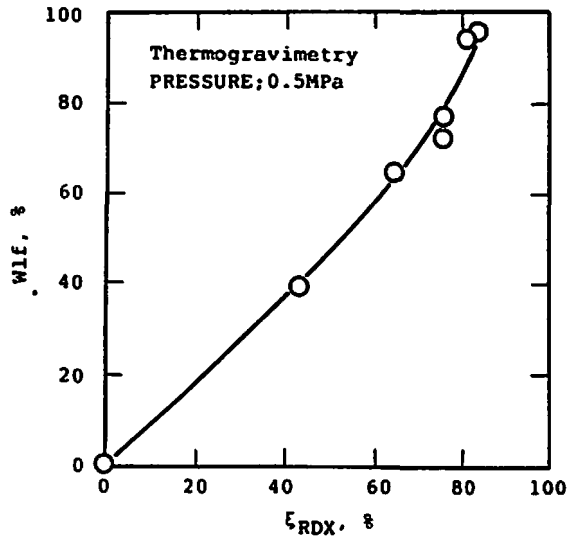


Fig. 5 Effect of the concentrations of RDX on weight loss

系コンポジット推進薬の重量減少量 Wl を代表値として示した。RDX/AP系コンポジット推進薬は2段に分かれて分解している。RDX系コンポジット推進薬の分解開始温度はAP系コンポジット推進薬に比較して低温側で発生しており、RDX/AP系コンポジット推進薬は両者の特性をかねそなえている。TG曲線で一段目の分解量 Wl_1 とRDXの混合量との関係を求めてFig.5に示す。一段目の分解量はRDXの混合量にほぼ比例して増加しAPの存在に関係していない。固相熱分解においてRDXとAPとはRDXの混合量によらず独立して分解していることが考えられる。

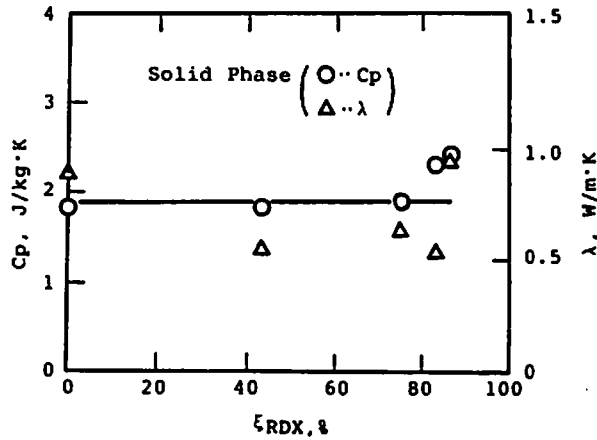


Fig. 6 Physical characteristics in solid phase as a function of the concentrations of RDX

3.3 固相の物性値

RDX/AP系コンポジット推進薬の物性値 C_p , λ とRDXの混合量の関連を求めてFig. 6に示す。ここで C_p は固相の比熱で λ は固相の熱伝導率である。 C_p , λ とも推進薬の着火遅れ時間に影響を及ぼす因子として考えられる値である。推進薬の表面温度 T_s が臨界温度 T_{sc} に達すると着火するモデルを用いた場合、着火遅れ時間 τ_{ig} は⁹⁾

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

で表される。 a は固相の C_p と λ の関数である。(2)式において固相の C_p , λ が大きくなると a が増加し、 τ_{ig} も増加する傾向にある。 ξ_{RDX} によらず C_p と λ はほぼ一定の値をとり、固相の物性値が着火遅れ時間 τ_{ig} に影響していない。また着火前の推進薬表面からガスが発生するまでの気相の状態は ξ_{RDX} に依存していない。

3.4 着火特性

推進薬表面に入射するエネルギー I と、着火遅れ時間 τ_{ig} との関連をFig. 7に示す。着火遅れ時間が、固相の温度を臨界温度 T_{sc} まで上昇すれば着火するモデルを用いれば(2)式より、 $\tau_{ig} \propto I^{-2}$ になるが、両対数グラフ上で τ_{ig} の I に関する傾斜はAP系コンポジット推進薬を除いて-2より絶対値は小さく-0.5~-1.0の間にある。AP系コンポジット推進薬は理論に近く傾斜は約-1.8である。(2)式は気相での反応を考慮していないため、実験値と理論値がずれてきており、固相の効果ばかりでなく気相の効果も大きく現れていることが考えられる。AP系コンポジット推進薬の着火遅れ時間はRDX系コンポジット推進薬に比較して小さく、 $I = 600W$ の時には、AP系コンポジット推進薬にRDXを混合すると τ_{ig} は増加する傾向にある。 $I < 600W$ の時には、AP系コンポジット推進薬の τ_{ig} に対してRDXを43%混合したものの τ_{ig} は一旦小さくなり、さ

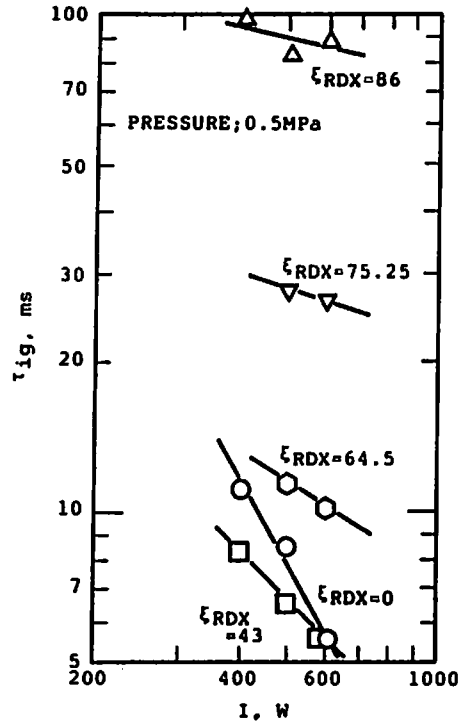


Fig. 7 Ignition delay time of RDX/AP propellants

らにRDXの混合量を増加すると、 τ_{ig} は増加する傾向にある。AP系コンポジット推進薬の τ_{ig} の I に対する傾斜はRDXを混合したものと異なり、 I によって特性が異なるが、AP系コンポジット推進薬を除いては、RDXの混合量を増加すると τ_{ig} が増加していること、及び固体ロケットモータではAP系に比較してRDX/AP系コンポジット推進薬は着火しにくいことから、 $I = 600W$ の値を代表値として用いた。いま、 ξ_{RDX} と τ_{ig} の関連とともに、 ξ_{RDX} と燃焼速度 γ の関係をFig. 8に示した。 τ_{ig} は雰囲気気圧力0.5MPaで、照射エネルギー

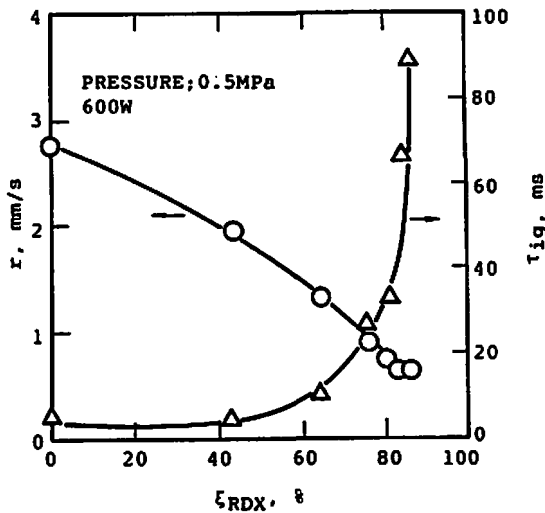


Fig. 8 Burning rate and ignition delay time as a function of concentrations of RDX

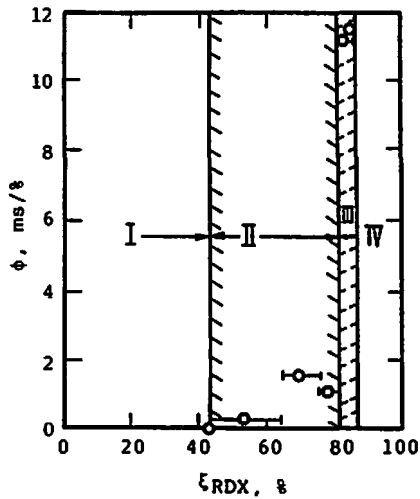


Fig. 10 Relationship between ϕ and the concentrations of RDX

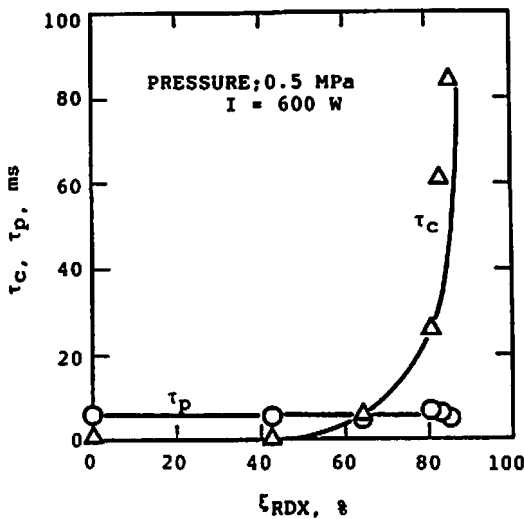


Fig. 9 Physical and chemical ignition delay time as a function of the concentrations of RDX

600Wの時の値である。燃焼速度 r は雰囲気圧力0.5 MPaの値である。 r は ξ_{RDX} の増加に対してほぼ一様に減少しているが、 τ_{ig} は ξ_{RDX} の増加に対して指数関数的に増加し、RDX系とAP系コンポジット推進薬間の特性が直線的ではない。 ξ_{RDX} を増加して、APの混合量が少量になると τ_{ig} は急激に増加し、RDX系コンポジット推進薬の値に近づいている。影写真を用い推進薬表面にレーザーを照射して表面からガスの発生するまでの時間 τ_p を求めた。 τ_p は固相が昇温して分解するまでの時間であり、物理的遅れ時間と定義する⁹⁾。 τ_p と ξ_{RDX} の関連をFig.9に示した。 τ_p は ξ_{RDX} によらず一定の

値を示している。即ちAP系コンポジット推進薬はRDXを混合しても物理的な遅れ時間に影響していないことが得られた。次に化学的遅れ時間 τ_c を(3)式のように定義した。

$$\tau_c = \tau_{\text{ig}} - \tau_p \quad (3)$$

τ_c は分解したガスが反応して定常燃焼に移行するまでの時間である。 τ_c と ξ_{RDX} の関連を求めて同じくFig.9に示した。 ξ_{RDX} の増加とともに τ_c は急激に増加しており、RDXは主に気相における反応時間に影響し、着火遅れ時間を大きくすることが得られた。

τ_{ig} の ξ_{RDX} の増加量に関する依存性を明確にするため、 $\phi = d\tau_{\text{ig}}/d\xi_{\text{RDX}}$ と ξ_{RDX} の関係を求めてFig.10に示した。RDXの混合量に応じて ϕ は大きく4つの領域に分類できることが得られた。Iは ξ_{RDX} の増加に対して $\phi=0$ のAP律速領域、IIは ξ_{RDX} の増加に対して $\phi=2$ のRDX希釈領域、IIIは ξ_{RDX} の増加で $\phi=10$ と ϕ が急激に大きくなるすなわち、APを少量RDX系コンポジット推進薬に混合すると τ_{ig} が低下するAP加速領域、IVはRDX律速領域である。IのAP律速領域はRDXの混合量の影響を受けず、AP系コンポジット推進薬とはほぼ同様の着火遅れ時間をとっている。AP分解ガスと周囲のバインダ分解ガスが着火することで、オーバールの着火遅れ時間が決定する領域である。IIのRDX希釈領域はRDXの混合量に応じて着火遅れ時間が増加しており、AP分解ガスとバインダ分解ガスが反応しただけでは定常燃焼に移行しない。RDXの混合量を増加すると化学的遅れ時間が増加していることから、AP分解ガスに対してRDX分解ガスが不活性なガスと同様な役割、すなわち、着火しやすいガスをしにくいも

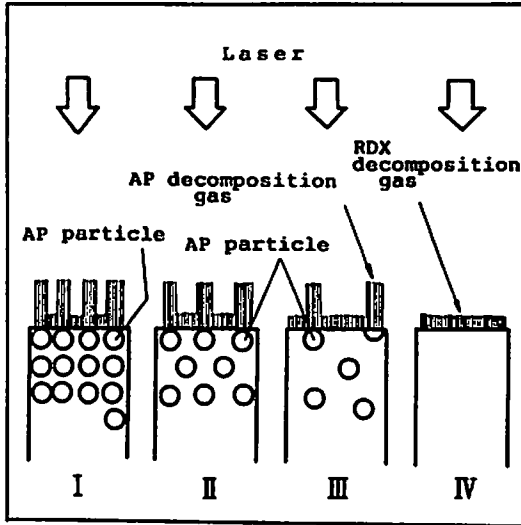


Fig. 11 Ignition of RDX/AP propellants

ので希釈している。ⅢのAP加速領域はRDXが燃焼表面の大部分を占めながらも、APを少量混合することでAPの分解ガスとバインダ分解ガスが反応することで高温部を形成し、オーバオール着火遅れ時間を短くしている。ⅣのRDX律速はRDXの着火遅れ時間を意味している。Ⅰ～Ⅳの領域の着火状況を模式的にFig. 11に示す。

Fig. 11において粒子は、APの大粒を示しており、APの小粒、RDXの粒子は省略した。RDXは燃焼表面で融解することから、着火前に融解してほぼ均質な状況をつくっていることが考えられ、粒子を省略している。RDX系コンポジット推進薬の分解温度が、AP系コンポジット推進薬よりも低く、かつ独立に分解していることから、RDXがまず融解し表面を覆い、次にその熱分解したガスが推進薬表面を覆っている所にAPの分解ガスが拡散、混合して反応をする。AP系コンポジット推進薬の燃焼速度がRDX系コンポジット推進薬より大きいことからAP粒子下流のガス噴出速度を大きくし、RDX分解ガスはAPの分解ガスに比較して、燃焼表面近傍に形成されているものとした。AP系コンポジット推進薬の着火遅れ時間がRDX系コンポジット推進薬に比較して短いこと、及びAP系とRDX系が独立して燃焼していることから、最初AP分解ガスが反応してRDXの分解ガスに着火しているものと考えられる。Ⅱの領域ではRDXの混合量が増加してくるため、APの分解量が減少し、RDXの占める領域が増加している。RDXの量が多いことから、RDXの分解ガスは希釈の役割をし、 t_{ig} は大きくなっている。Ⅲの領域ではAPの混合量は6%以下と小さくなるためAPの存在は少なくなる。APの分解ガスが

表面近傍に分散して反応することで高温部を形成し、オーバオールの着火遅れ時間を短くしているものと考えられる。Ⅳの領域はAPの混合量が非常に少量でAPが着火遅れ時間に影響しない領域及びRDX系コンポジット推進薬の領域で表面の全面をRDX/バインダの分解ガスがおおっていると考えられる。

4. 結 論

- 1) RDX/AP系コンポジット推進薬の燃焼速度はRDXの混合量を増加すると一様に減少する傾向がある。
- 2) RDX/AP系コンポジット推進薬の固相分解はRDXとAPがそれぞれ独立して行われている。
- 3) AP系コンポジット推進薬にRDXを混合していくと物理的な着火遅れ時間は変化しないが、化学的な着火遅れ時間が大きくなっている。
- 4) 着火遅れ時間はRDXの混合量を増加するにつれ、増加する傾向があり、 ϵ_{RDX} に応じて4つの領域に分かれていることが得られた。ⅠはAP律速、ⅡはRDX希釈、ⅢはAP加速、ⅣはRDX律速領域である。

文 献

- 1) Kubota, N., Takizuka, M., and Fukuda, T., AIAA Paper 81-1582, 1981.
- 2) McCarty, K. P., Isom, K. B., and Jacox, J. L., AIAA Paper 79-1132, 1979.
- 3) Kubota, N., Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 187-194, 1981.
- 4) Cohen, S. N. and Price, C. F., J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 12, No. 10, pp. 608-612, 1975.
- 5) Kubota, N., Masamoto, T., and Hazama, M., Proceedings of the Twelfth International Symposium on Space Technology and Science, AGNE Publishing, Inc., pp. 507-512, 1977.
- 6) Zimmer-Galler, R., AIAA J., Vol. 6, No. 11, pp. 2107-2110, 1968.
- 7) Beckstead, M. W., Derr, R. L., and Price, C. F., Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1047-1056, 1971.
- 8) BenReuven, M., Caveny, L. H., Vichnevetsky, R. J., and Summerfield, M., Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1223-1233, 1976.
- 9) 桑原卓雄, 久保田浪之介, 工業火薬協会誌, 第45巻, 第6冊, pp. 334-350, 1985.

Ignition and Combustion Characteristics of RDX/AP Composite Propellants

by Takuo KUWAHARA*

The mole fractions of HCl, CO₂, H₂O in the burning of an ammonium perchlorate composite propellant decrease with increasing concentrations of RDX, so RDX/AP composite propellants will be used for many rocket motors. The effects of concentrations of RDX on ignition characteristics of RDX/AP composite propellants were investigated in this study. The burning rates of RDX/AP composite propellants decreased with increasing concentrations of RDX, however the ignition delay time increased rapidly with increasing concentrations of RDX. The concentration of RDX effected the chemical ignition delay time, however it did not effect the physical one.

(*Research & Development Center Aerospace Division, Nissan Motor Company Ltd, 1990, Matobashinmachi, Kawagoe – City, Saitama – Prefecture, 350 Japan.)
