

Fig. 1 Schematic representation of combustion zones of a double-base propellant and HMX-CMDB propellant at the initial propellant temperatures T_0 and $T_0 + \Delta T_0$.

ゾーン、ダークゾーン、輝炎ゾーンからなることが知られている¹⁹⁻²¹⁾。これらの燃焼反応ゾーンの推進薬の初期温度 T_0 における温度分布と推進薬の初期温度 $T_0 + \Delta T_0$ における温度分布の概念図を Fig. 1 に示す⁸⁾。これまでのダブルベース推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の関係の研究や HMX-CMDB 推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の関係の研究において、燃焼火炎構造の検討により、物理特性量としての輝炎ゾーンの燃焼温度は燃焼速度に影響を及ぼさないことが明らかになっている。また、燃焼表面における熱エネルギーのバランスは次の (1) 式で表すことができる。

$$\rho_p r_b c_p (T_s - T_0) = \lambda_g (dT/dx)_g + \rho_p r_b Q_r \quad (1)$$

ここで、 ρ_p = 推進薬の密度、 r_b = 推進薬の燃焼速度、 c_p = 推進薬の比熱、 T_s = 表面温度、 T_0 = 推進薬の初期温度、 λ_g = 燃焼表面近傍の気相の熱伝導率、 $(dT/dx)_g$ = 燃焼表面近傍の気相の温度勾配、 Q_r = 燃焼表面における反応熱である。この式の中で、燃焼反応ゾーンの物理特性量として、推進薬の初期温度 T_0 の変化によって燃焼速度に影響を及ぼすものとして、(1) 式から T_s 、 $(dT/dx)_g$ 、 Q_r であることがわかる。このうち、 $(dT/dx)_g$ は、これまでのダブルベース推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の関係の研究や HMX-CMDB 推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の関係の研究における燃焼火炎構造の検討により、物理特性量としてのダークゾーン温度 T_d に直接的に影響を受けることが分かっている。また、 Q_r は (1) 式によって求めることができ、あまり変化しないことが知られている^{8, 10)}。そこで、ここでは、物理特性量としてダークゾーン温度 T_d と燃焼表面温度 T_s に着目して、燃焼波構造の検討を実施することにする。

3. 実験

推進薬初期温度の異なる燃焼速度の測定は 7 mm × 7 mm の断面を持ち、長さが約 70 mm のストランド試験片を N_2 ガスで加圧されたストランドバーナーで燃焼させることによって行われた。このストランドバーナーは調温槽内にセットされ、この調温槽の温度範囲は 203~373 K で、規定の温度に調温される。ストランドバーナーを加圧する N_2 ガスも調温槽内にセットされた熱交換器によって調温される。燃焼状況は観測窓付ストランドバーナーを用い、窒素ガスの加圧下で燃焼中の写真撮影により、また、ダークゾーン温度の測定には推進薬の中に埋め込んだ線径 50 μ m の Pt-PtRh 13% 熱電対が使用され、フィズゾーン内温度の測定にも同じように、推進薬の中に埋め込んだ線径 2.5 μ m の Pt-PtRh 10% の微細熱電対が使用された²²⁾。

4. ダブルベース推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の温度感度

4.1 供試推進薬とその特性

供試したダブルベース推進薬の組成を Table 1 に示す。ニトロセルロース (NC) とニトログリセリン (NG) の混合比を一定にして可塑剤としてのジエチルフタレート (DEP) の濃度を変えることによってエネルギー含有量を変化させた。すなわち、ECT-1 推進薬は高エネルギー、ECT-2 推進薬は低エネルギーのダブルベース推進薬となる。これらのダブルベース推進薬の 293 K における圧力と火炎温度の関係はすでに報告¹³⁾ し、Fig. 2 に示すとおりである。エネルギー含有量の多い高エネルギー推進薬ほど輝炎の温度は高くなる。約 0.9 MPa 以下の低圧で輝炎が発生しなくなった場合のダークゾーン温度は高エネルギー推進薬のほうが高くなる。しかし、高エネルギー推進薬 ECT-1 と低エネルギー推進薬

Table 1 Specification of double-base propellants and heat of explosion

Propellant	NC	NG	DEP	2NDPA	Hexp
ECT-1	53.0	40.5	4.0	2.5	4575×10^3
ECT-2	48.0	36.7	13.0	2.3	3453×10^3

NC=nitrocellulose (12.2N%), NG=nitroglycerine
 DEP=diethylphthalate, 2NDPA=2-nitrodiphenylamine
 Hexp=heat of explosion

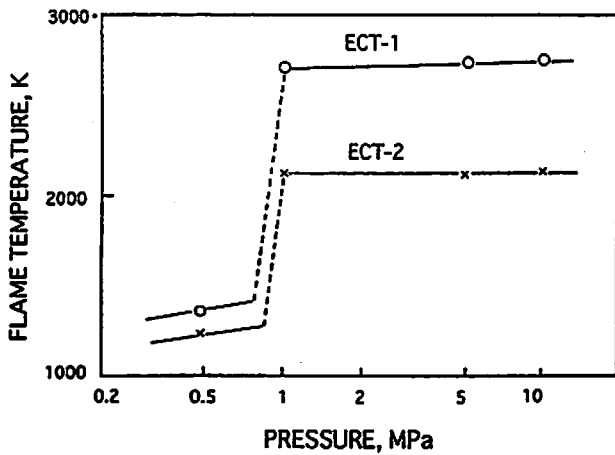


Fig. 2 Flame temperature vs. pressure of double-base propellants

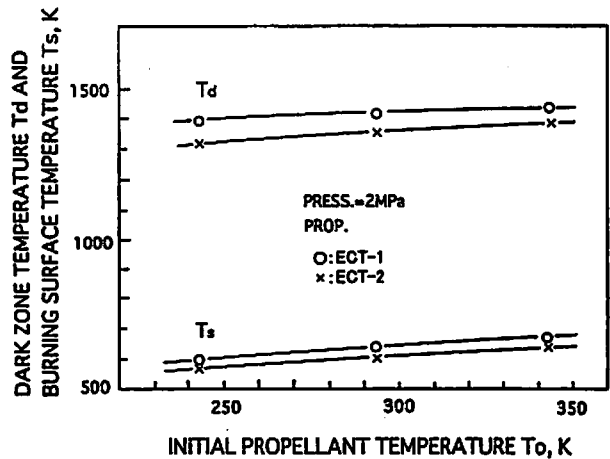


Fig. 4 Dark zone temperature and burning surface temperature of double-base propellant vs. initial propellant temperature

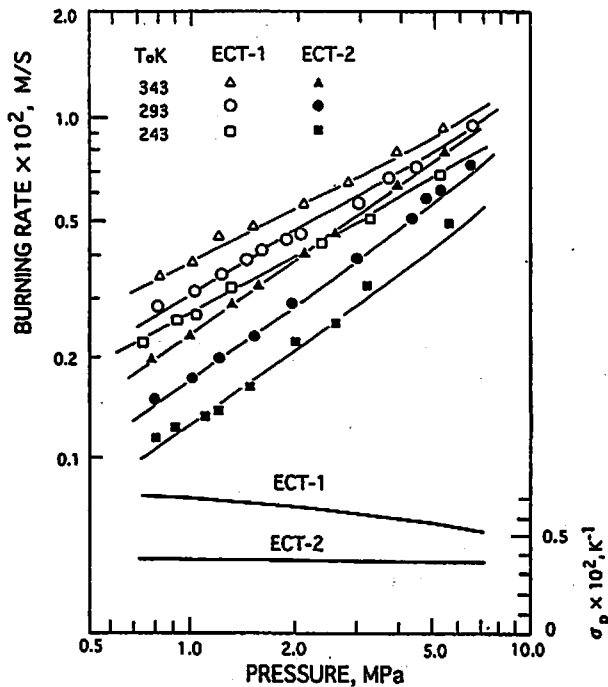


Fig. 3 Burning rate characteristics and temperature sensitivity

ECT-2 推進薬の輝炎の温度差に比べ、ダークゾーンの温度差は小さくなる。

4.2 実験結果と考察

供試したダブルベース推進薬の燃焼速度特性及び燃

焼速度の温度感度 σ_p を Fig. 3⁸⁾ に示す。この燃焼速度の温度感度 σ_p は次式で表すことができる。

$$\sigma_p = (\partial \ln r_b / \partial T_0)_p \quad (2)$$

この σ_p は圧力が一定の時、推進薬の初期温度が変化した時の燃焼速度の変動率を表している。燃焼速度の圧力指数 n は圧力と燃焼速度の両対数表示の図において、傾きに相当する。Fig. 3 より、高エネルギーの ECT-1 推進薬の場合、推進薬の初期温度に関わらず 0.58 である。また、低エネルギーの ECT-2 推進薬の場合も推進薬の初期温度に関わらず 0.78 となる。また、(2) 式で示された燃焼速度の温度感度 σ_p は高エネルギーの ECT-1 推進薬の場合、圧力を増してもあまり変化しない。他方、低エネルギーの ECT-2 推進薬の場合、圧力を増すと減小する傾向にある。高エネルギー推進薬の σ_p は低エネルギーの σ_p よりも実験の全圧力範囲において小さくなる。ちなみに、2 MPa では高エネルギー推進薬の ECT-1 推進薬の場合、0.0034/K となり、低エネルギー推進薬の ECT-2 推進薬の場合、0.0062/K となる。このような燃焼速度特性及び燃焼速度の温度感度を示すダブルベース推進薬の推進薬初期温度とダークゾーン温度及び燃焼表面温度の関係をエネルギー含有量をパラメータとして Fig. 4 に示す。推進薬の初期温度が増すと

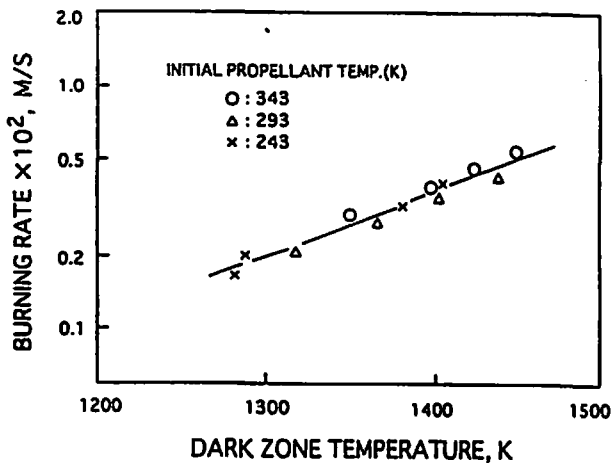


Fig. 5 Burning rate vs. dark zone temperature of double-base propellants

ダークゾーン温度及び燃焼表面温度とも増加する。高エネルギーのECT-1推進薬のダークゾーン温度及び燃焼表面温度は低エネルギーのECT-2推進薬のものよりも高くなる。また、ECT-1推進薬の T_d とECT-2推進薬の T_d との差はECT-1推進薬の T_d とECT-2推進薬の T_d との差よりも大きくなる。推進薬の初期温度が243 K, 293K, 343Kで、圧力が1.5MPa, 2.0MPaのダークゾーン温度と燃焼速度の関係を片対数表示でFig. 5に示す。ダークゾーン温度が増すと燃焼速度は増加する。また、推進薬の組成の違い、また、推進薬の初期温度及び圧力が変化してもデータが一直線上に載っていることが分かる。これはダークゾーン温度が燃焼速度に直接的に関係していることを示している。推進薬表面の気相フィズゾーンの温度上昇率 dT/dt (t : 時間)を微細な熱電対により計測した。フィズゾーンの温度勾配は $dT/dx = (1/r_p) dT/dt$ で表すことができる。推進薬の初期温度が243K, 293K, 343Kで、圧力が1.5 MPa, 2.0MPaのダークゾーン温度とフィズゾーンの温度勾配の関係を片対数表示でFig. 6に示す。ダークゾーン温度が増すとフィズゾーンの温度勾配が増加す

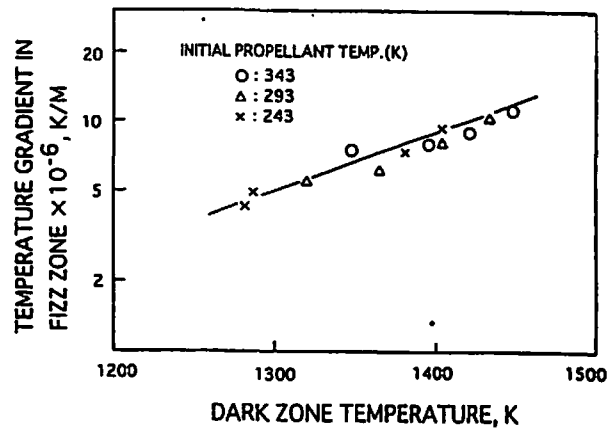


Fig. 6 Temperature gradient in fizz zone vs. dark zone temperature of double-base propellants

る。推進薬の組成の違い、また、推進薬の初期温度及び圧力が変化しても、データが一直線上に載っていることが分かる。推進薬燃焼表面への熱流束は、このフィズゾーンの温度勾配に比例する。したがって、推進薬のエネルギー含有量が増したり、推進薬の初期温度が増すと、推進薬の燃焼表面温度が増し、フィズゾーン内の反応が加速され、ダークゾーンの温度を押し上げ、フィズゾーンの温度勾配を大きくし、推進薬燃焼表面への熱流束を大きくするため、燃焼速度が速くなる。

5. HMX-CMDB推進薬のエネルギー含有量と燃焼速度の温度感度

5.1 供試推進薬とその特性

供試したHMX-CMDB推進薬の組成をTable 2に示す。基準の推進薬ECHT-1に平均粒径約 $20\mu\text{m}$ のHMXを外割の重量割合で20, 40, 60, 80%にしたもの、すなわち、内割りでは16.7, 28.6, 37.5, 44.4%がそれぞれECHT-2, ECHT-3, ECHT-4, ECHT-5となっている。添加するHMXの重量分率を増すことによって推進薬の単位重量当たりのエネルギー含有量を増加させた。HMXの添加量の多いECHT-5推進薬が最

Table 2 Specification of HMX-CMDB propellants and heat of explosion

Propellant	NC	NG	DEP	HMX	Hexp
ECHT-1	25.0	65.0	10.0	0.0	4763×10^3
ECHT-2	20.8	54.2	8.3	16.7	5007×10^3
ECHT-3	17.9	46.4	7.1	28.6	5178×10^3
ECHT-4	15.6	40.6	6.3	37.5	5294×10^3
ECHT-5	13.9	36.1	5.6	44.4	5394×10^3

NC=nitrocellulose(12.2N%), NG=nitroglycerine

DEP=diethylphthalate

HMX=cyclotetramethylene tetranitramine (mean particle diameter: $20\mu\text{m}$)

Hexp=heat of explosion

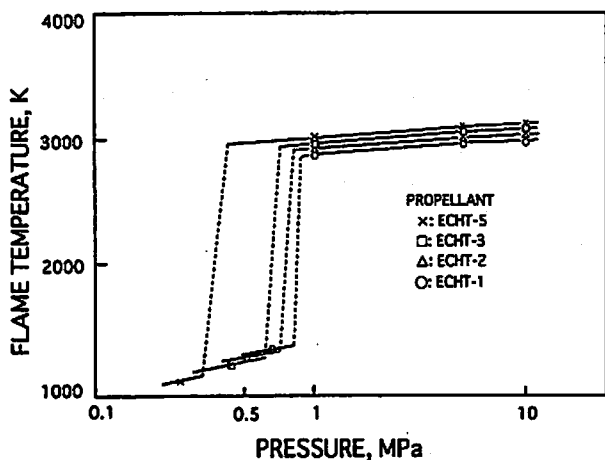


Fig. 7 Flame temperature vs. pressure of HMX-CMDB propellants

もエネルギー含有量の多い推進薬となる。ECHT-4のデータは無いが、その他のHMX-CMDB推進薬の293 Kにおける圧力と火炎温度の関係はすでに報告¹⁰⁾し、Fig. 7に示すとおりである。HMXの含有量の多い高エネルギー推進薬ほど輝炎の温度は高くなるが、低圧力において輝炎が発生しなくなると、ダークゾーン温度は低エネルギー推進薬のほうが高くなる。

5.2 実験結果と考察

供試したHMX-CMDB推進薬の初期温度343Kと243 Kの燃焼速度特性をFig. 8¹⁰⁾に示す。推進薬の初期温度が343K及び243Kにおいて、燃焼速度は推進薬中のHMXの重量分率が増すと減小し、圧力が増すと増加

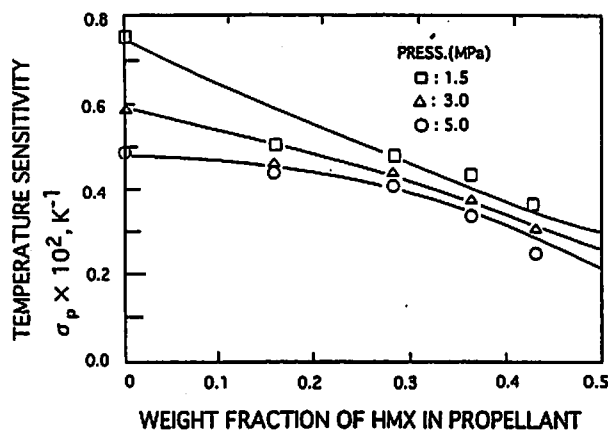


Fig. 9 Temperature sensitivity vs. weight fraction of HMX

する。このデータをもとに、推進薬中のHMXの重量分率と燃焼速度の温度感度 σ_p の関係をFig. 9¹⁰⁾に示す。燃焼速度の温度感度は推進薬中のHMXの重量分率が増すと減小し、圧力が増すと減小する。このような燃焼速度特性及び燃焼速度の温度感度を示すHMX-CMDB推進薬の推進薬初期温度とダークゾーン温度及び燃焼表面温度の関係をエネルギー含有量をパラメータとしてFig. 10に示す。推進薬の初期温度が増すとダークゾーン温度及び燃焼表面温度とも増加する。低エネルギーの推進薬になるほど、ダークゾーン温度及び燃焼表面温度は高くなる。また、ECHT-1推進薬の T_d とECHT-5推進薬の T_d との差はECHT-1推進薬の T_s とECHT-5推進薬の T_s との差よりも大きくなる。推進薬の初期温度が243K、343Kで、圧力が1.5MPaのダーク

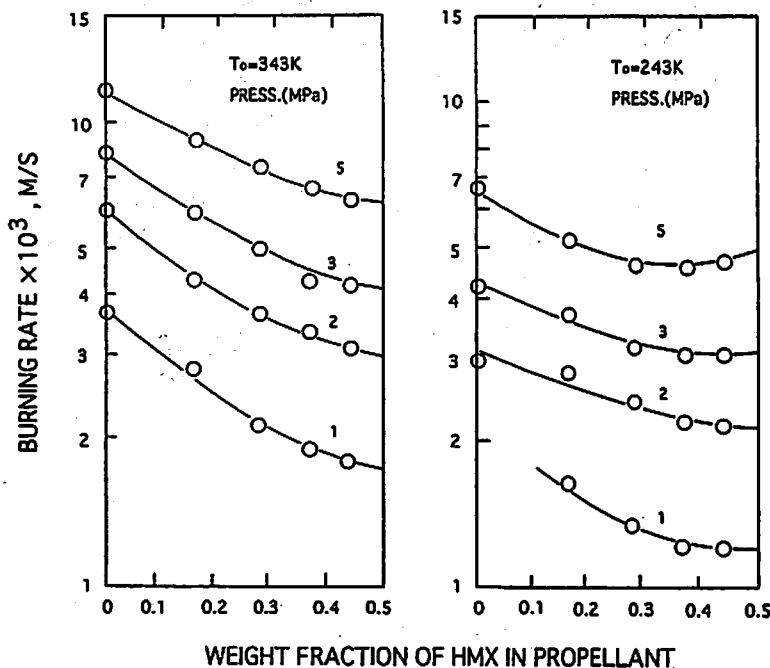


Fig. 8 Burning rate at 343K and 243K of initial propellant temperatures vs. weight fraction of HMX

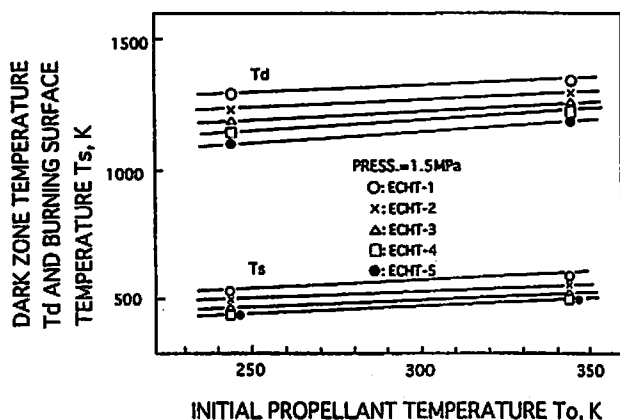


Fig. 10 Dark zone temperature and burning surface temperature of HMX-CMDB propellants vs. initial propellant temperature

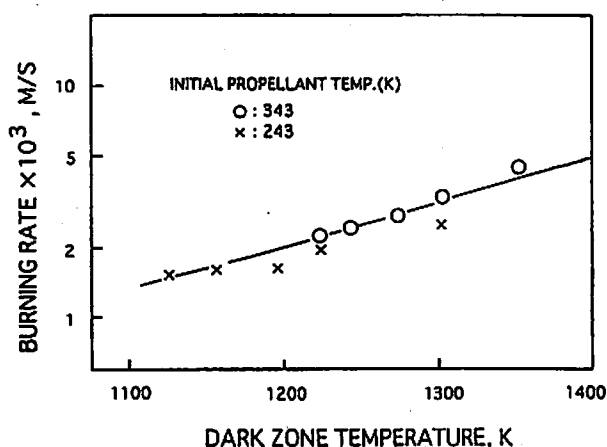


Fig. 11 Burning rate vs. dark zone temperature of HMX-CMDB propellants

ゾーン温度と燃焼速度の関係を片対数表示でFig.11に示す。ダークゾーン温度が増すと燃焼速度は増加する。また、推進薬の初期温度が変化してもデータが一直線上に載っていることが分かる。これはダークゾーン温度が燃焼速度に直接的に関係していることを示している。推進薬表面の気相フィズゾーンの温度上昇率 dT/dt (t : 時間) を微細な熱電対により計測した。フィズゾーンの温度勾配は、ダブルベース推進薬の場合と同様に、 $dT/dx = (1/r_p) dT/dt$ で表すことができる。推進薬の初期温度が243K, 343Kで、圧力が1.5MPaのダークゾーン温度とフィズゾーンの温度勾配の関係を片対数表示でFig.12に示す。ダークゾーン温度が増すとフィズゾーンの温度勾配が増加する。また、推進薬の初期温度が変化してもデータが一直線上に載っていることが分かる。推進薬燃焼表面への熱流束は、このフィズゾーンの温度勾配に比例する。したがって、HMX-CMDB推進薬のHMXの添加量を増してエネルギー含有量を増したり、推進薬の初期温度を低下する

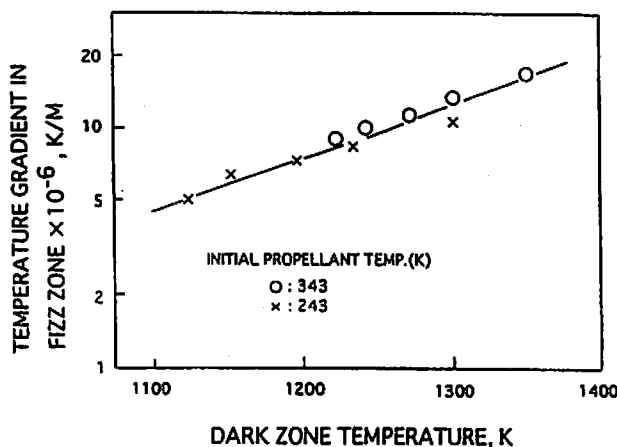


Fig. 12 Temperature gradient in fizz zone vs. dark zone temperature of HMX-CMDB propellants

と、推進薬の燃焼表面温度が低下し、フィズゾーン内の反応が減速し、ダークゾーンの温度を下げ、フィズゾーンの温度勾配を小さくし、推進薬燃焼表面への熱流束を小さくするため、燃焼速度が遅くなる。

6. 結 言

ダブルベース推進薬のエネルギー含有量を変化させた試料を用意し、火炎構造について調査検討を加え、ダブルベース推進薬の初期温度が燃焼速度に影響を与える物理特性量を明確にすることを試みた結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) エネルギー含有量の多い高エネルギーのダブルベース推進薬の方が燃焼速度の温度感度は小さくなる。
- (2) 推進薬の初期温度が増すと燃焼表面温度及びダークゾーン温度も増加する。また、エネルギー含有量の多い推進薬の方が燃焼表面温度及びダークゾーン温度とも高くなる。
- (3) 推進薬のエネルギー含有量が増したり、推進薬の初期温度が増すと、推進薬の燃焼表面温度が増し、フィズゾーン内の反応が加速され、ダークゾーンの温度を押し上げ、フィズゾーンの温度勾配を大きくし、推進薬燃焼表面への熱流束を大きくするため、燃焼速度が速くなる。

HMX-CMDB推進薬のエネルギー含有量を変化させた試料を用意し、火炎構造について調査検討を加え、HMX-CMDB推進薬の初期温度が燃焼速度に影響を与える物理特性量を明確にすることを試みた結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) HMXの添加量を増し、エネルギー含有量の多い高エネルギーのHMX-CMDB推進薬の方が燃焼速度の温度感度は小さくなる。
- (2) 推進薬の初期温度が増すと燃焼表面温度及びダークゾーン温度も増加する。また、エネルギー含有量の多い推進薬の方が燃焼表面温度及びダークゾー

ン温度とも低くなる。

- (3) HMX-CMDB推進薬のHMXの添加量を増してエネルギー含有量を増したり、推進薬の初期温度を低下すると、推進薬の燃焼表面温度が低下し、フィズゾーン内の反応が減速し、ダークゾーンの温度を下げ、フィズゾーンの温度勾配を小さくし、推進薬燃焼表面への熱流束を小さくするため、燃焼速度が遅くなる。

以上の結果、ダブルベース推進薬及びHMX-CMDB推進薬において、推進薬の初期温度が燃焼速度に影響を与える共通の物理特性量としての温度は燃焼表面温度とダークゾーン温度であることがわかった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、適切なご指導をいただいた防衛庁技術研究本部第3研究所久保田浪之介所長にお礼を申し上げます。

文 献

- 1) Grick, R. L., "Temperature Sensitivity of Solid Propellant Burning Rate," AIAA Journal, Vol. 5, 1967, pp. 586-587.
- 2) Kubota, N., Caveny, L. H., and Summerfield, M., "Temperature Sensitivity of Double-Base Propellants," Proceedings of 8th JANNAF Combustion Meeting, Vol. 1, CPIA Publication 200, 1971, p. 387.
- 3) Summerfield, M., Caveny, L. H., Battista, R. A., Kubota, N., Gostintsev, Yu. A., and Isoda, H., "Theory of Dynamic Extinguishment of Solid Propellants with Special Reference to Nonsteady Heat Feedback Law," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, March 1971, pp. 251-258.
- 4) Cohen-Nir, E., "Temperature Sensitivity of the Burning Rate of Composite Solid Propellants," Combustion Science and Technology, Vol. 9, 1974, pp. 183-194.
- 5) Caveny, L. H., Ohlemiller, T. J., and Summerfield, M., "Influence of Thermal Radiation on Solid Propellant Burning Rate," AIAA Journal, Vol. 13, 1975, p. 202.
- 6) Swaminathan, V. and Soosai, M., "On the Burning Rate Characteristics of CMDB Propellants," Propellants and Explosives, Vol. 4, 1979, pp. 107-111.
- 7) Renie, J. P. and Osborn, J. R., "Temperature and Pressure Sensitivity of Aluminized Propellants," AIAA Paper 80-1166, June 1980.
- 8) Kubota, N. and Ishihara, A., "Analysis of the Temperature Sensitivity of Double-Base Propellants," Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1984, pp. 2035-2041.
- 9) Cohen, N. S. and Flanigan, D. A., "Mechanisms and Models of Solid-Propellant Burn Rate Temperature Sensitivity: A Review," AIAA Journal, Vol. 23, 1985, pp. 1538-1547.
- 10) Kubota, N. and Okuhara, H., "Burning Rate Temperature Sensitivity of HMX Propellants," Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, No. 4, 1989, pp. 406-410.
- 11) Kubota, N., "Temperature Sensitivity of Solid Propellants and Affecting Factors: Experimental Results," Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants, Chapter 4, Edited by DeLuca, L., Price, E. W., and Summerfield, M., Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 143, 1992.
- 12) Aoki, I. and Kubota, N., "Combustion Wave Structure of High- and Low-Energy Double-Base Propellants," AIAA Journal, Vol. 20, No. 1, Jan. 1982, pp. 100-105.
- 13) 青木一郎; 高エネルギーCMDB推進薬の燃焼速度特性(I) —基本推進薬の効果—, 火薬学会誌, Vol. 58, No. 4, 1997.
- 14) 矢野裕, 久保田浪之介, "HMX-CMDB推進薬の燃焼波構造" 防衛庁技術研究本部技報 技報-859, 昭和58年7月。
- 15) 矢野裕, 久保田浪之介, "HMX-CMDB推進薬の燃焼" 防衛庁技術研究本部技報 技報-904, 昭和60年2月。
- 16) Yano, Y. and Kubota, N., "Combustion of HMX-CMDB Propellants (I)," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 10, pp. 192-196, 1985.
- 17) Yano, Y. and Kubota, N., "Combustion of HMX-CMDB Propellants (II)," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 11, pp. 1-5, 1986.
- 18) 青木一郎; 高エネルギーCMDB推進薬の燃焼速度特性(II) —HMX添加の効果—, 火薬学会誌, Vol. 58, No. 4, 1997.
- 19) Huggett, C., "Combustion Processes," High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion Series, Vol. 2, pp. 514-574, Princeton University Press, Princeton, 1956.
- 20) Kubota, N., "The Mechanism of Super-Rate Burning of Catalyzed Double Base Propellants, Report No. AMS 1087, Department of Aerospace and Mechanical Sciences, Princeton University, 1973. Kubota, N.,

- "The Mechanism of Super-Rate Burning of Catalyzed Double Base Propellants, Ph.D. Thesis, Princeton University, 1973, or AD-763786.
- 21) Heath, G. A. and Hirst, R., "Some Characteristics of the High Pressure Combustion of Double-Base Propellant," Eighth Symposium (International) on Combustion, pp. 711-720, Williams & Wilkins, Baltimore, 1962.
- 22) Sabadell, A. J., Wenograd, J., and Summerfield, M., "Measurement of Temperature Profiles through Solid Propellant Flames using Fine Thermocouples," AIAA Journal, Vol. 3, Sept. 1965, pp. 1580-1584.

Burning rate characteristics of energetic CMDB propellants (III)

— Effect of initial propellant temperature —

by Ichiro AOKI*

The combustion wave structure was studied to elucidate physical properties which had an effect of initial propellant temperatures on the burning rates of double base propellants, and HMX-CMDB propellants with various energy contents by using a chimney type strand burner. Physical properties which influenced the relationship between initial propellant temperatures and the burning rates of these propellants were clearly defined to be the burning surface temperature and the dark zone temperature. In case of double-base propellants, the temperature sensitivity of burning rate for this type of propellants having higher energy becomes smaller than that of propellants having lower energy. When the energy contained in propellants increases, or initial propellant temperatures increase, the burning surface temperature of propellant increases, therefore, the reaction in fizz zone is accelerated, the dark zone temperature increases, and the temperature gradient in fizz zone increases. This increase of temperature gradient increases the burning rate of propellant. In case of HMX-CMDB propellants, the temperature sensitivity of burning rate for this type of propellants having higher energy becomes smaller than that of propellant having lower energy. When the energy contained in propellants increases, or initial propellant temperatures decrease, the burning surface temperature of propellant decreases, therefore, the reaction in fizz zone is decelerated, the dark zone temperature decreases, and the temperature gradient in fizz zone decreases. This decrease of temperature gradient decreases the burning rate of propellant.

(*Research and Development Center, Aerospace Division, Nissan Motor Co., Ltd., 21
-1, Matobashinmachi, Kawagoe City, Saitama 350-1107, Japan)