

銀線入り固体推進薬の燃焼速度

市田 正人*, 久保田 浪之介*

高燃焼速度を得るため、ダブルベース系推進薬に銀線などの金属線を挿入した推進薬の燃焼速度特性について研究した。ベース推進薬の燃焼方向に銀線などの金属線を挿入した推進薬の燃焼速度は金属線の種類、線径あるいは推進薬組成によって大きく影響される。例えば、銀線とニッケル線では銀線に沿う燃焼速度のほうが大きい。また同じ銀線でも線径の小さいほうが燃焼速度は大きい。微細熱電対(線径 12.5 μm)で銀線近傍の推進薬の温度分布を測定した結果、未燃推進薬は銀線により温められており、燃焼面の upstream 側 cm の位置から温度が上昇している。これらの実験結果から、銀線などの金属線入り推進薬の燃焼速度を支配する因子はフィッシュゾーンからダークゾーンにおける燃焼火炎温度であることがわかった。

1. はじめに

固体推進薬に要求される重要な項目としては高比推力化、燃焼速度の圧力指数および温度感度の低下、噴出ガスの無塵化などがある。これらはコンポジット推進薬、鉛化合物添加のプラトー型ダブルベース推進薬、コンポジット化ダブルベース推進薬などの開発で一応達成されている。しかし、現有の固体推進薬では、推進薬の燃焼速度と燃焼面積の関係から、図1に示すように推力と燃焼時間の間で達成困難な領域が存在する¹⁾。このような領域を達成するには、推進薬の燃焼速度を極端に速くするかまたは遅くするかして、燃

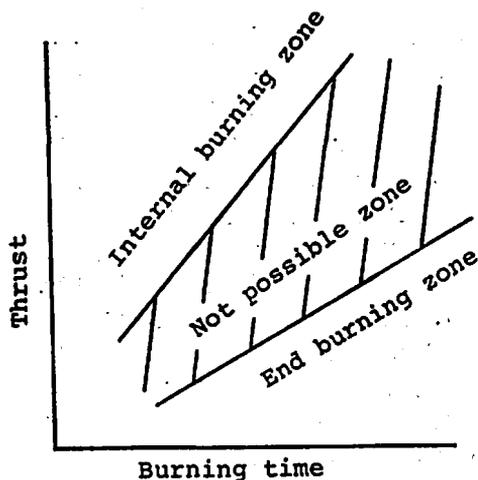


Fig. 1 Relation of thrust vs. burning time.

焼速度領域の拡大化を計る必要がある。

燃焼速度領域の拡大化には各種の方法があり、研究されている²⁾。またその一部についてはすでに実用化されている。本研究では、推進薬の燃焼速度を増大させるために「金属線入り推進薬」の方式に注目して研究を行なった。金属線を推進薬に挿入するには大別して2つの方法がある³⁾。第1は微小な金属線をランダムに推進薬内に分散させる方法で、いかなる形状の推進薬にも適用できる特徴がある。第2は長い金属線を推進薬の燃焼方向に挿入させる方法であり、主として端面燃焼型推進薬に適用できる。また後者の方が高燃焼速度を得られると言われている³⁻⁴⁾。本研究では後者の方法を選び、熱伝導および推進薬との適合性の観点から金属線として主に銀線を使用し、銀線との比較のため他の金属線も使用した。また銀線を推進薬の燃焼方向に挿入した「銀線入り固体推進薬」(以下、銀線入り推進薬と略す)の燃焼速度特性について検討し、燃焼速度を支配する因子について燃焼火炎の面より推定する。

2. 実験方法

本研究に用いた推進薬の組成を表1に示す。推進薬の点火は電気的に加熱した金属細線により行ない、燃焼器は空素ガスで所定の圧力に加圧した。また本研究に使用した各種金属線の物理的性質については表2に示す⁵⁾。

2.1 燃焼面形状の光学的観測

燃焼面の形状の観測には3種類の試料を使用した。第1は銀線を推進薬の真中に挿入した図2-aに示すような銀線入り推進薬である。第2は金属板を推進薬中

昭和55年4月7日 受理
*防衛庁技術研究本誌第三研究所
〒190 立川市栄町1-2-10

Table 1 Propellant composition
(weight percentage)

PROP.	NC	NG	DEP	EC	AP
NP-A-00	44.0	43.0	11.0	2.0	0
NP-A-05	42.0	41.0	10.1	1.9	5.0
NP-A-10	39.6	38.7	9.9	1.8	10.0
NP-A-20	35.2	34.4	8.8	1.6	20.0
N5(-)P _b	51.8	36.5	9.7	0	0
N5(-)P _b (+)Ni	50.7	35.8	9.5	0	Ni: 2.0

NC : Nitrocellulose
 NG : Nitroglycerin
 DEP : Diethylphthalate
 EC : Ethylcentralite
 AP : Ammonium perchlorate
 Ni : Nickel

Table 2 Physical property of metal wire

Metal wire	α	M. P.
Silver	0.595	960
Nickel	0.082	1455
Tungsten	0.275	3410
Brass	0.108	1205
Iron	0.064	1460
Aluminium	0.296	660

α : Thermal Diffusivity (m²/h)
 M.P. : Melting Point (°C)

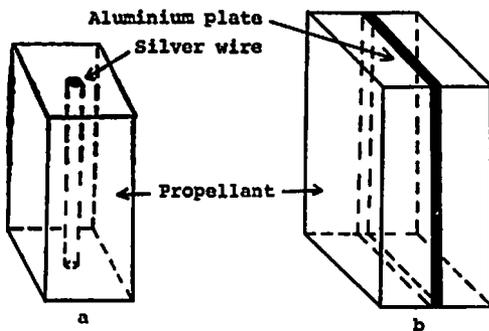


Fig.2 Strand samples for burning surface and burning gas flow measurements
 a : Sample with embedded silver wire
 b : Sample for making observation of burning gas flow

にサンドイッチ状に挟んだ試料で図2-bに示す。第3は金属線を推進薬の一側面に埋込んだ試料である。光学観測は窓付のチムニー型燃焼器により、光学系として接写レンズを付けた35ミリカメラを使用した。

2.2 推進薬の温度測定

線径が12.5 μ mのP₁-P₁-R₁₀10%熱電対を「銀線入り推進薬」の銀線近傍の推進薬内に埋込んで推進薬の温度分布を測定した。推進薬ストランド(7×7×50mm)を縦に二等分し、その一片に銀線を埋込み、その銀線の上に熱電対接点を置きもう一片の試料片と重ねてアセトンで接着する。最後に40°Cで約72時間恒温槽内で熱処理して試料とした。

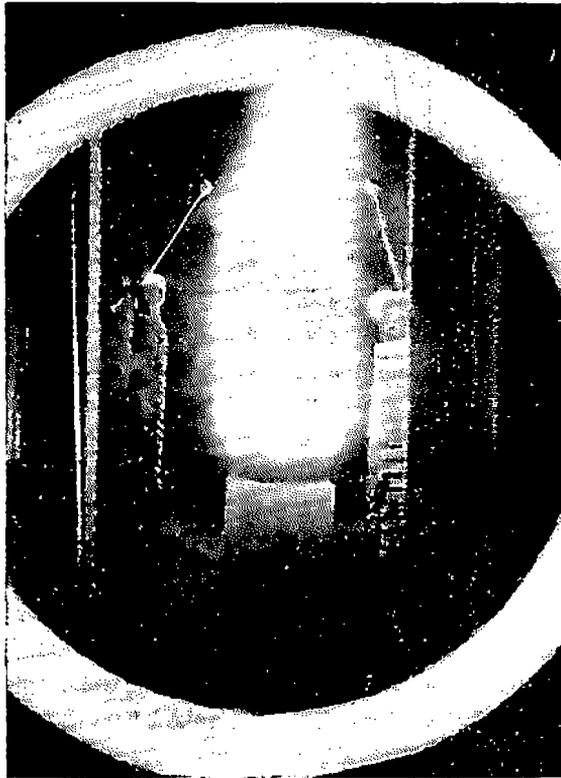
2.3 燃焼速度測定

燃焼速度は推進薬ストランド(7×7×80mm)をチムニー型ストランド燃焼器内で燃焼することによって測定した。燃焼速度測定用試料は、推進薬ストランドを縦に二等分し、銀線を前もって埋込んである一片の試料片の上にヒューズ線(線径0.25mm)を置き、次に他の一片と重ねてアセトンで接着し、40°Cで約72時間恒温槽内で熱処理して作成した。燃焼速度は等間隔に置いたヒューズ線の燃焼による溶断時間より求めた。

3. 実験結果および考察

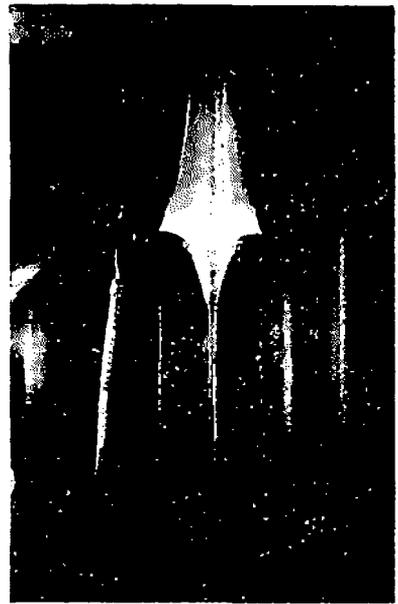
3.1 燃焼面形状

推進薬の燃焼面は、銀線などの金属線が推進薬の燃焼方向に挿入されていない場合、通常フラットな燃焼面(例えば図3)となる。しかし、図2-aのような銀線入り推進薬の燃焼面は図4に示すように銀線を中心軸とするほぼ円錐形となる。しかも、燃焼は銀線に沿って速く進行する。図4からは銀線付近の燃焼ガスの流れ状況が十分に観察できない。そこで図2-bに示すような試料を燃焼させた。その結果、燃焼ガスは燃焼面から垂直に流出し、金属板近くで流れの方向が変わり、金属板とはほぼ平行に下流の方へ流れて行くことがわかった。図5に各種金属線を推進薬ストランドの一側面に埋込んだ試料を燃焼させた場合の燃焼面の变化を示す。点火後、燃焼面が変化し始めるのは銀、黄銅、鉄の順である。また同じ銀線でも線径が小さい場合は早く燃焼面が変化し始めている。燃焼面の形状は図4と同じく金属線を中心としてほぼ円錐形である。また燃焼面に垂直な間隔はほぼ一定であるのに対し、金属線に沿った燃焼面の間隔は変化している。従って、金属線の影響は金属線近傍の推進薬にしか及ばないことがわかる。なお、図5の燃焼面は、時間間隔は0.26秒であり、変化開始した燃焼表面から示してある。Cavenyら⁹⁾は、燃焼面の变化は推進薬の燃焼火炎から金属線への熱伝達の結果起こるとして、燃焼モデルを提唱している。このモデルによると、図5に示す燃焼面の变化は、金属線が熱の良導体であり、金属線によって未燃推進薬に熱が伝達されるため、起こると考えられる。そこで、金属線のかわりに木棒を推進薬ストランドに挿入して燃焼面の变化を観測すると、燃焼面は変化がなく図3と同じフラットな燃焼面であった。従



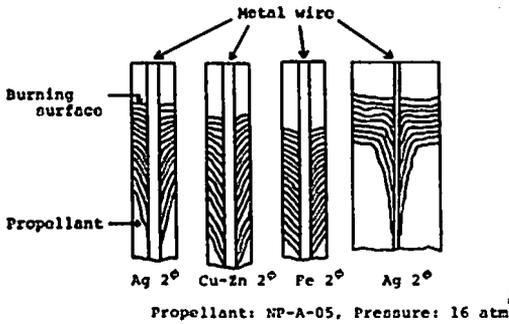
Propellant: NP-A-00
Pressure: 20 atm

Fig. 3 Burning surface of the solid propellant without silver wire.



Propellant: NP-A-00, Ag 0.8 $^\circ$
Pressure: 6 atm

Fig. 4 Burning surface of the solid propellant with embedded silver wire.



Propellant: NP-A-05, Pressure: 16 atm

Fig. 5 Change of burning surface of the solid propellants with embedded metal wires.

って、燃焼面の変化および金属線に沿った燃焼速度は熱拡散率 α ($\alpha = K/C_p \cdot \rho$, K : 金属線の熱伝導率, C_p : 金属線の比熱, ρ : 金属線の密度) の大きい順に大きくなっていることがわかる。

3.2 燃焼速度

燃焼面形状の観測結果より、金属線の影響は金属線近傍の推進薬にしかなく、しかも金属線近傍の推進薬の燃焼が早く進行していることがわかった。従って、

燃焼速度としては金属線に沿った燃焼速度（以下、 r_w と略す）に限定して測定した。

r_w は金属線による未燃推進薬部分への熱伝導の結果速くなると考えられるので、 r_w の測定条件を設定するために次のことを考慮した。第1はヒューズ線切断位置の確認である。第2は推進薬ストランドの大きさが異なることにより、 r_w が異なるかどうかである。第3は r_w が定常値（つまり、最高値）に達するに必要な推進薬ストランドの燃焼進行距離を求めることである。まず第1については、推進薬ストランドの一侧面に銀線を埋込み、その銀線に接触させるようにヒューズ線を置き、その上に透明なレストリクターを塗布した試料を燃焼させヒューズ線の切断を観測した。その結果、ヒューズ線は銀線からの熱ではなく推進薬の燃焼によって溶断されることを確認した。次に推進薬ストランドの大きさの違いによる r_w の測定結果を図6に示す。すなわち、推進薬ストランドの大きさの違いによる r_w には差は認められない。従って、実験では主として7×7×80mmの推進薬ストランドで r_w を測定した。推進薬ストランドが著しく小さい場合には、加圧窒素ガスがダークゾーンへ拡散して爆発熱量を低下させるということが久保田、木村⁹⁾によって報告されている。しかし、実験に用いた推進薬ストランドのサイズでは図6に示すように r_w の差が生じないことよ

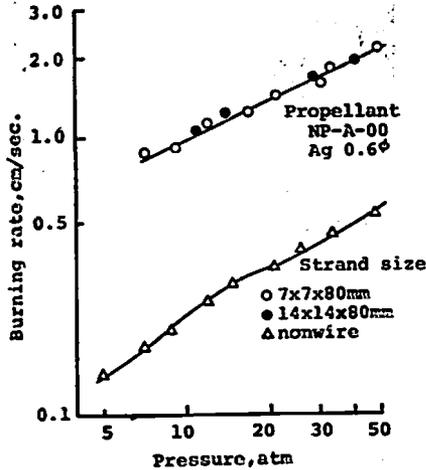


Fig. 6 Effect of strand size difference to the solid propellant with embedded silver wire on burning rate along silver wire.

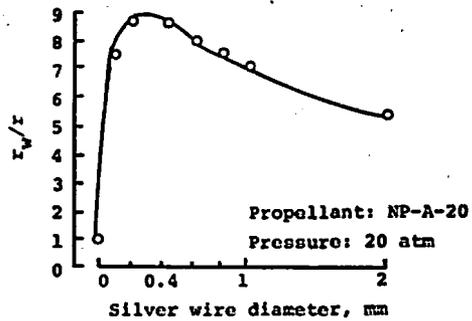
り、金属線に対する燃焼火炎の伝熱の主体は円錐形燃焼面の頂点付近にあり、加圧窒素ガスの拡散が影響しない範囲にあると考えられる。最後に、 r_w が定常な速度に達するに必要な推進薬ストランドの長さを求めるために、ヒューズ線の推進薬中にセットする位置を変化させて r_w を求めた。図5からわかるように、線径が大きく熱拡散率の小さい金属線では燃焼面の変化が遅い。つまり、 r_w が定常値に達するのが遅い。そこで、線径が2mmの銀線と使用した金属線の中では最も熱拡散率の小さい鉄についてそれぞれの r_w 定常値に達するのに必要な推進薬ストランドの燃焼進行距離を求めた。その結果、点火面から約2.5cmの位置で各々の r_w とも定常値に達した。従って、ヒューズ線は点火面より3cm以上離れた位置にセットして r_w を測定した。Caveny ら¹⁰⁾は、点火後 r_w がオーバーシュートして高くなり、その後定常値に落ちつくとしている。しかし、本実験における r_w は点火後燃焼進行距離に対し単調な増加を示し定常値に達している。

3.2.1 各種金属線による r_w の変化

金属線の種類によって r_w がどう変化するかを測定した。その結果、Rumbel ら¹¹⁾の結果と同様に r_w は熱拡散率の大きい順に速くなった。また Rumbel ら¹¹⁾は熱拡散率が小さくても金属線の融点が高いと r_w は速くなるとも報告しているが、本実験に使用した銀、タンダステン、ニッケルではそのような結果は得られなかった。

3.2.2 銀線の線径による r_w の変化

銀線の線径による r_w と燃焼圧力の関係は、線径が



r_w : Burning rate along the silver wire
 r : Burning rate (without silver wire)

Fig.7 Relation between silver wire diameter and r_w/r .

小さくなればなるほど r_w は大きくなる。そこで r_w に対する線径の影響を調べるため線径が25 μ mおよび50 μ mの銀線を挿入した試料を作り燃焼中遮させた。その結果、図4でみられたような円錐形の燃焼面は生成されなかった。すなわち、線径がある径以下になると r_w はむしろ小さくなり、50 μ m以下の線径では銀線挿入による燃焼速度増大の効果があまりないことがわかった。線径による r_w の変化の一例を図7に示す。すなわち、線径が小さくなるにつれて、 r_w/r (r : 銀線を挿入しない場合のベース推進薬の燃焼速度) は大きくなり、ある特定な線径で r_w/r は最大になる。さらに線径が小さくなると r_w/r が減少し、線径が零になると銀線が挿入されない場合と同じであるから $r_w/r=1$ になる。次に、金属線のかわりに石綿を推進薬に挿入した「石綿入り推進薬」の燃焼速度を測定するとベース推進薬の燃焼速度と一致し、燃焼速度の増大はなかった。従って、 r_w の増大は金属線の触媒的效果によるものと考え、線径の違いによる r_w の違いを説明できないし、「木燄入り推進薬」の燃焼面は変化がなく、しかも石綿のような熱伝導の悪い物質を使用すると燃焼速度の増大は起こらないことから、 r_w は金属線により推進薬が熱的影響を受けて速くなると結論できる。ただし、 r_w の増大は推進薬組成、金属線の種類によって異なると考えられる。

3.3 推進薬の温度

銀線によって銀線近傍の推進薬が温められているかどうかを調べるために銀線近傍の推進薬の温度分布を測定した。測定結果の一例を図8に示す。この推進薬ストランドの燃焼表面温度を300 $^{\circ}$ Cとすると、銀線近傍の推進薬は燃焼表面の上流約17mmの位置から温度上昇を開始している。銀線を挿入しない場合の推進薬温度は点線で示すように燃焼表面の上流約10~100 μ mの位置から温度上昇している。従って、銀線を推進薬

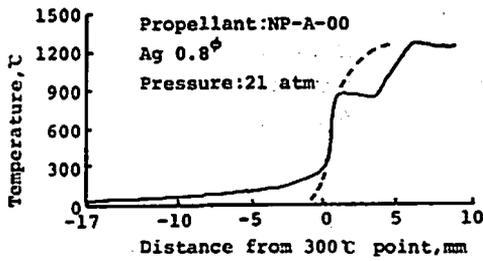


Fig. 8 Temperature profiles near the burning surface of the propellant with embedded silver wire and the propellant without silver wire.

に挿入することにより、銀線近傍の推進薬は早期に温められて温度が高くなることわかる。次に銀線から半径方向どれくらいの距離まで推進薬が銀線の熱的影響を受けるかを調べた。Cavenyら²⁾は銀線表面から半径方向約70~100 μ m離れたと推進薬は熱的影響を受けないと報告しているが、本実験では半径方向1.2mmまでは銀線による熱的影響がないことを確認できた。しかし、1.2mm以下どれくらいの距離になると推進薬の熱的影響がでてくるのか求められなかった。いずれにしても、銀線の推進薬に対する熱的影響は銀線のごく近傍にしかなく、しかも銀線近傍の燃焼速度のみが変化しているため、銀線近傍の推進薬はあたかも推進薬の初期温度(推進薬の保存温度)の上昇による燃焼速度の増大と同じ効果を受けているものと考えられる。

3.4 燃焼火炎による r_w

燃焼速度は気相から固相への熱移動の形態とその量および推進薬の初期温度などによって決定される。すなわち、推進薬に銀線挿入し気相より固相への熱移動量を増大させることにより燃焼速度を大きくすることが可能となる。従って、 r_w は銀線による未燃推進薬への熱移動量によって支配されると考えられる。銀線によって銀線近傍の推進薬の温度が上昇していることは図8より明らかであり、またこの推進薬温度を上げるのに必要な熱量は燃焼火炎中に突き出ている銀線によって未燃推進薬へ伝達されるはずである。そこで燃焼火炎の銀線に対する熱伝達の面から燃焼火炎のどの燃焼波(フィッゾーン、ダークゾーン、卸炎ゾーン)が銀線に対する伝熱を支配しているかを調べた。

図9にベースの燃焼速度は同じだが燃焼波特性の異なる2つの推進薬の r_w を示す。久保田、狭間³⁾によると N5(-)Pb(+)⁺Ni 推進薬は約2気圧以上では卸炎が燃焼表面にほとんど付着している。しかも、その位置は燃焼圧力によってあまり変化しない。一方 N5(-)Pb 推進薬は約10気圧以下では卸炎の発生がなく、10気

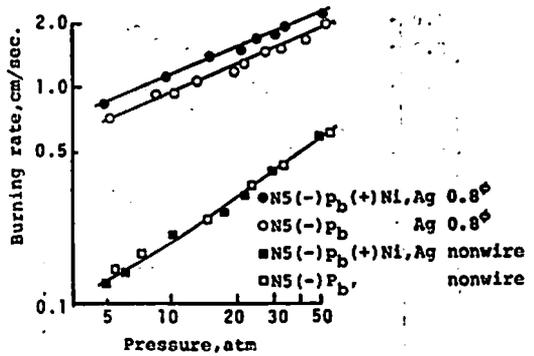


Fig. 9 Effect of Ni powder addition to N5(-)Pb propellant on burning rate along the silver wire.

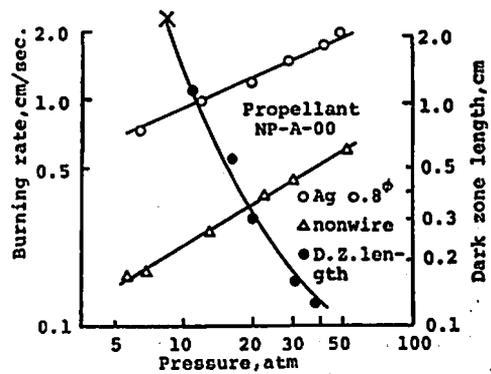


Fig. 10 Effect of flame zone position on burning rate along the silver wire.

圧以上になると卸炎が燃焼表面より離れた位置に発生しその位置は燃焼圧力が增大するにつれて燃焼表面に近づいてくる。卸炎が r_w に対して律速因子となっているならば、この2つの銀線入り推進薬の r_w の差は燃焼圧力が高くなればなるほど少なくなるはずである。しかし図9に示すように r_w はそのような傾向を示していない。また図10は r_w と卸炎の有無および位置との関係を示している。NP-A-00 推進薬のダークゾーン距離は燃焼圧力の増加とともに短くなり、約8気圧以下では卸炎が消滅しフィッバーニングを行なう。このような燃焼波特性を有する推進薬に銀線挿入した場合、卸炎が存在しない燃焼圧力範囲で r_w は r の約4倍となる。また卸炎が存在する燃焼圧力範囲での r_w も r の約4倍である。しかも卸炎が存在しない燃焼圧力範囲での r_w と卸炎が存在する燃焼圧力範囲での r_w は $\ln p$ と $\ln r_w$ (p : 燃焼圧力) の関係においてはほぼ直線となっている。すなわち、図9および図10は卸炎の位置、有無によって $\ln p$ と $\ln r_w$ の直線性は崩れることなく特異な傾向を示していない。従って、少なくとも本研究の実験範囲においては、卸炎は r_w

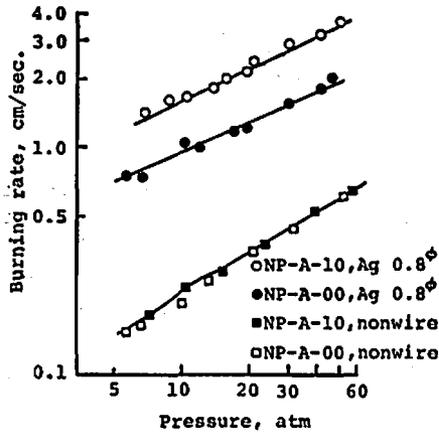


Fig.11 Effect of flame characteristics on burning rate along the silver wire.

に対する律速因子となっていないと考えられる。そこで、 r_0 を支配するのは輝炎よりもさらに燃焼表面に近い燃焼波であるフィツゾーン、ダークゾーンと考えられる。フィツゾーン温度傾斜はほとんど同じだがダークゾーン温度の異なる2つの推進薬について r_0 を測定した。その結果を図11に示す。ベースの燃焼速度は同じでも火炎特性が異なると r_0 は異なってくる。この2つの r_0 の差は、久保田、正本⁹⁾の燃焼火炎モデルにより、フィツゾーンからダークゾーンにかけて生成される AP/DB 拡散火炎の効果によるものと考えられる。従って、 r_0 を支配するのはフィツゾーンからダークゾーンにおける燃焼火炎温度であることがわかる。

4. おわりに

推進薬に金属線、特に熱拡散率の大きい銀線を押入することにより簡単に推進薬の燃焼速度を増大できる

ことがわかった。従って、現在まで達成困難であった推力-燃焼時間範囲は「銀線入り推進薬」により達成可能となる見通しを得た。本研究で行なった各種の実験により次のような結論を得た。

- 1) 金属線入り推進薬の燃焼面は金属線を中心としてほぼ円錐形である。
- 2) r_0 は、金属線の熱拡散率が大きく線径が小さくなるにつれて、速くなる。ただし、最大の r_0 を与える最小線径が存在する。
- 3) r_0 を支配するのはフィツゾーンからダークゾーンにおける燃焼火炎温度である。この温度が高いと r_0 は速くなる。 r_0 は輝炎の有無および位置によって影響されない。

文 献

- 1) 久保田浪之介：日本航空宇宙学会誌, Vol. 26, No 293, pp.308-317 (1978).
- 2) Rumbel, et al: Propellant Grains, U. S. Patent 3116692 (1964).
- 3) Caveny L. H. and Glick R. L. : J. Spacecraft, Vol. 4, No 1 (1967).
- 4) 岩間, 山崎, 祖父江, 青柳: 第5回燃焼シンポジウム前刷集, pp.69-70 (1976).
- 5) 伝熱工学資料: 日本機械学会 (1966).
- 6) 木村潤一, 久保田浪之介: 工業火薬協会誌, Vol. 37, No 1, pp.22-28 (1976).
- 7) 久保田浪之介, 狭間明三: 工業火薬協会誌, Vol. 38, No 6, pp.357-362 (1977).
- 8) Kubota, N. and Masamoto, T. : Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute(1976), pp. 1201-1209.

Burning Rate of Solid Propellant with Embedded Silver Wire

by Masato ICHIDA* and Naminosuke KUBOTA*

The measurements of the burning rate of solid propellants with embedded silver wire have been conducted at pressures from about 5 atm to 50 atm. The metal wire and propellants used for these measurements were mainly silver and CMDB, DB propellants, respectively. It is found that the burning surface of the solid propellants with embedded silver wire is almost conical shape and combustion process precedes along the silver wire. The burning rate characteristics along the silver wire appeared to be very dependent upon the diameter of the silver wire. The effects of flame zone, dark zone and fizz zone on the burning rate along the silver wire were measured by using the propellants of different combustion characteristics. The unburned portion of the propellant in the neighbourhood of the silver wire were measured by using fine thermocouples (diam. 12.5 μ m) embedded between the silver wire and propellants. From these experiments, it has been concluded that the rate determining factor of the burning rate along the silver wire is the fizz zone and the dark zone temperatures.

(*Third Research Center, Technical Research & Development Institute, Japan Defense Agency, 1-2-10 Sakae, Tachikawa, Tokyo 190, Japan.)

ニュース

第11回国際推薬爆薬試験法会議

首題の会議が西ドイツ、カールスルーヘで推薬爆薬フラウンホーヘル研究所の手で開かれます。毎年の例会です。同研究所は今回改名したもので、前は推薬爆薬化学研究所と称していました。

6月25～27日の間、講演題目43、夫人のための遠足会もあります。主なテーマを拾って見ますと、米軍試験統一化、安定度試験の新法、65℃試験の再検討、高温安定性の化学、DSC利用、密閉爆発器の利用、迅速法、オートメ法のサンプリング、液体クロマト法、化学ルミネッセンス利用、デフェルアミン火薬、X線テスト、燃焼安定性試験法、TGTA-

IR-RAMAN 法寿命と機械的性質、AI入火薬の試験法、プライマーの迅速試験法、分解機構、伝爆性試験、感度試験、電磁場に対する安全度、爆管の火薬伝火性、製品保証、導爆線の伝爆能力、火薬類の評価試験、加圧下の発火点、回転式磨擦試験器、ヘスの代替法、レオロジー、工場公害、黒色火薬燃焼圧と噴出オリフィス、テトリルの有用性、等であります。大きなテーマは昔から変わりませんが、新法の試み、より綿密な考えの採用が見えるようです。本稿がでる時には既にこの会議は終っているかも知れませんが題目だけでも参考になります。来年も同時期に開かれると思います。(水島容二郎)