

## 束にした金属線による推進薬の燃焼促進

田中雅文\*, 森崎賢治\*

金属線入りダブルベース推進薬において、挿入する金属線を1本1本の単独の線ではなく、多数の線の束にすることによる燃焼促進効果に関して研究した。ストランド燃焼実験の結果、高温の燃焼ガスにさらされる表面積を大きくし、線同士の熱的干渉をなくさないようにねじらず間隔をあけずに挿入するとき、燃焼速度の増加は大きいことがわかった。実験の範囲内では、単独の線を最適直径で入れたときの最大値よりもさらに約3~4割の燃焼速度の増大を達成でき、また圧力指数は細い線を単独に入れた場合に比べて変化しないことがわかった。ダブルベース推進薬の燃焼理論に基づき、この種の方法の最適な場合として、表面積が無限大の金属線が無数に入っているときの燃焼速度特性を検討した。その結果、金属線の推進薬に占める面積割合が小さくても大きな燃焼速度が期待でき、圧力5MPa下における最大値は約10cm/sになると見積られた。

### 1. はじめに

固体推進薬の燃焼進行方向にあらかじめ金属線を入れておく方法は、燃焼速度を高めるのに有効であり、これに関連したさまざまな研究開発がなされている<sup>1)~6)</sup>。円形断面を有する1本の金属線を挿入した推進薬の燃焼速度は、金属線の直径を変えていくと、ある直径に対して極大値をとることが知られている。このことは高温ガス中の金属線表面から流入し金属線内を伝導していく熱量と、燃焼面後退による相対的な対流で流出していく熱量との熱収支により推進薬未燃部への正味伝熱量が決定され、これがある直径のとき極大値をとることで説明される<sup>1)</sup>。流出する熱量は金属線の断面積に比例するので、断面積一定のまま、火炎にさらされる表面積を増大させることにより、金属線表面から流入する熱量のみを増加させることができよう。即ち金属線を、面積に対する周囲長が最小となる円形断面でなく、そのほかの形、例えばFig.1(a)のように周囲長の長い断面形状に変えれば燃焼速度は、円形断面の際よりもさらに高まると期待される。しかしながら、細い金属線にこのような変形を加えることは工作上困難であるので、本研究ではFig.1(b)のように細い金属線を束にして挿入することによって、同じ総断面積を持つ1本の金属線を挿入した場合よりも表面積を稼ぎ、燃焼速度の増大を図ることを試みた。

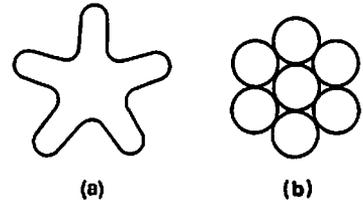


Fig. 1 (a) Cross section of an ideal embedded metal wire with long perimeter. (b) Cross section of embedded metal wires in a bundle.

束にした金属線を入れる方法としては1本1本の線をねじり合わせて太い1本の線にする方法とねじり合わせずに平行に入れる方法とが考えられる。ねじり合わせて1本の線にした方が推進薬に入れるのは容易であるが、強くねじり合わせると、線が燃焼面に対して斜めに挿入されることになるので熱伝達上の断面積が増大し、線同士の接触部分が増すため表面積は減少する。平行に入れる場合も線同士が離れてしまうと熱的干渉がなくなり、単独の線と同様になってしまうと考えられる。本研究ではこうした金属線の挿入方法についても検討した。

また本研究の方法によってどれだけ燃焼速度が高められる可能性があるか、ダブルベース推進薬の燃焼理論を基に考察を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試料と燃焼速度の測定

ニトロセルロース51%、ニトログリセリン38%、ジエチルフタレート11%の組成を持つダブルベース推進

1990年5月25日受理

\*防衛大学校航空宇宙工学教室  
〒239 横須賀市走水1-10-20  
TEL 0468-41-3810 内線2581

薬を $6 \times 6 \times 60$ mmのストランド状に成形したものを試料とした。試料はあらかじめ縦方向に2分割され、中心に金属線が挿入してある。再溶着にはアセトンを用いた<sup>4)</sup>-(6B)。

試料は窓付きのチムニー式燃焼ポンペに入れられ、圧力一定下で燃焼する。金属線を挿入したストランドは着火後しばらく金属線挿入方向の燃焼速度が増大していく非定常な燃焼進行を示し、その後定常状態となる<sup>5)</sup>。本研究ではこの定常段階にのみ注目し、燃焼速度をビデオ撮影を利用して測定した。撮影ではストランドと平行に0.5mm刻みのスケールを置き、0.1秒刻みの時間信号と共に録画する。燃焼終了後、再生画によって金属線挿入方向の燃焼面後退速度を算出し、燃焼速度とした。

## 2.2 挿入金属線

ストランドに入れる金属線は銀または銅の直径 $d$ の線同士を $N$ 本( $N=1\sim 8$ )束にしてある。束にする金属線の基本的組合せとして2本の金属線を考えた。ねじり合わせて束にする場合、このねじり合わせの度合をFig.2 上段のようにピッチ $P$ で定義し、これが燃焼速度に与える影響を調べる。また全くねじらずに挿入する際線同士の間隔が離れてしまうことがある。この影響をみるためにFig.2 下段のように2本の線を間隔 $S$ だけ離して挿入した試料も作製した。

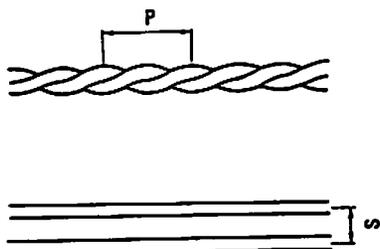


Fig. 2 Wire pitch and wire space.

## 3. 実験結果

### 3.1 ピッチと燃焼速度

2本の金属線(銅線)をねじり合わせて挿入した場合の圧力2MPa下での燃焼速度を横軸にピッチをとってFig.3 に示す。ピッチ無限大は2本を平行に入れることを意味し、ピッチが小さくなるにつれてねじり合わせの度合が強くなっていくことを表す。Fig.3 より平行にいた場合が燃焼速度は最大となり、ねじっていくと燃焼速度が減少することがわかる。

### 3.2 線間隔と燃焼速度

圧力2MPa下で2本の銅線を平行にいた場合、その2線の間隔が燃焼速度に与える影響をFig.4に示した。2線が接している場合が燃焼速度は最大で、離れ

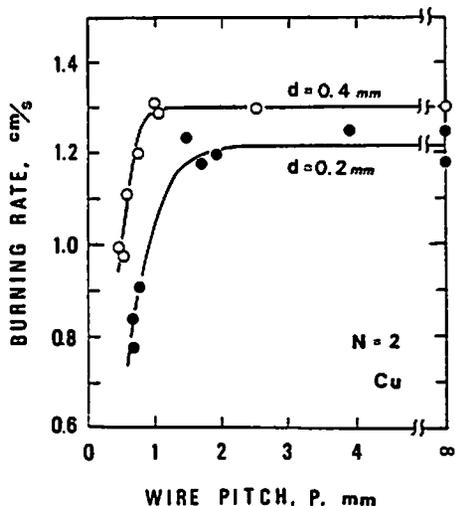


Fig. 3 Effect of wire pitch on burning rate.

るにしたがって燃焼速度は小さくなっていくことがわかる。金属線径が0.1mmのとき、間隔が約1mm以上離れると金属線同士の干渉はなくなり、単独の線を挿入した場合と同じになる。この傾向は線径が約0.4mm未満であれば同様に得られる。

### 3.3 束を構成する線数と燃焼速度

以上の結果から金属線を束にして挿入する際、ねじ

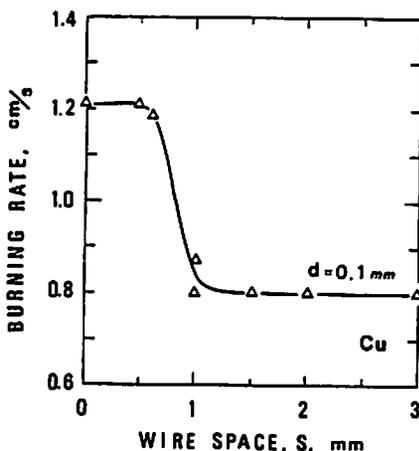


Fig. 4 Effect of wire space on burning rate.

らず、間隔を空けずに挿入した場合が燃焼速度を高めるのに効果的であることが示された。隙間を空けず平行に挿入した金属線を多数束にした際の圧力2MPa下における燃焼速度を、銀の場合と銅の場合についてそれぞれFig.5, 6 に示す。横軸に束を構成する1本1本の金属線の直径を、線の数 $N$ をパラメータにとってある。金属線の直径が0.4mm以下では束にした方が燃

焼速度が増大していくことがわかる。また線の数が増大するに従って燃焼速度を極大にする線径は小さくなっていく。

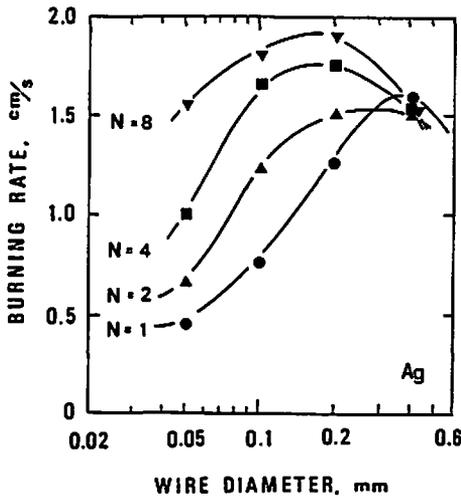


Fig. 5 Effect of embedded Ag wires in a bundle on burning rate.

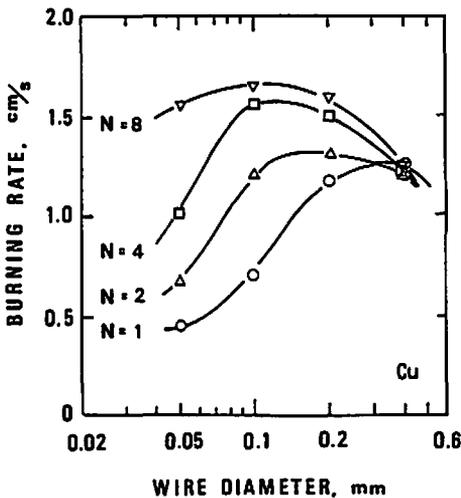


Fig. 6 Effect of embedded Cu wires in a bundle on burning rate.

#### 4. 考察

##### 4.1 火炎構造と燃焼速度

金属線入りのダブルベース推進薬の燃焼速度は火炎構造に依存し、特にフィッゾーン、ダークゾーンの温度分布に支配される<sup>4)6)</sup>。金属線を入れていない推進薬において、これらの反応層の温度分布を測定した研究によれば、温度勾配が最大となる点は燃焼表面のごく近傍にあるものの、燃焼表面からダークゾーン手前まで

温度勾配は単調に減少する<sup>9)</sup>。金属と燃焼ガスの熱伝導率を比較すると、金属の方がはるかに大きいので燃焼進行方向の温度勾配は、金属線内では燃焼ガス中よりもなだらかになるであろう。実験でもこの傾向は確かめられている<sup>4)6)</sup>。金属線は燃焼ガスからの熱を吸収しこれを伝導により推進薬未燃部へ伝える。熱伝導量は断面積と温度勾配に比例するので、未燃部への伝熱量は断面積が一定のとき燃焼表面での燃焼進行方向の温度勾配に支配される。燃焼ガスの温度勾配は金属線内の温度勾配より大きいことから、燃焼ガスにさらされ推進薬固層内に接する金属線の表面積を大きくし、金属線の温度勾配をできるだけ燃焼ガスのそれに近づけるのが燃焼速度の増大には効果的であると考えられる。

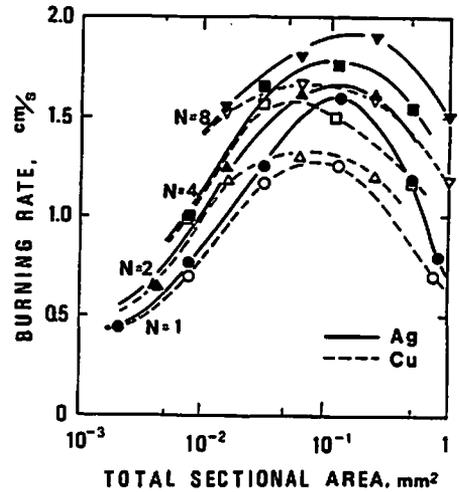


Fig. 7 Relation between total sectional area of bundled wires and burning rate.

Fig.7はFig.5, 6の横軸を、束にした金属線の総断面積に換算したものである。総断面積が同じであれば、線数  $N$ 、即ち表面積が増加するにつれて燃焼速度が単調に増大していくことがわかる。実験の範囲内では金属線を1本入れた場合の燃焼速度の最大値 ( $d$  が約  $0.4\text{mm}$  のとき) を細い線を束にすることによってさらに約3~4割増大させることができた。線をねじって挿入した場合は熱伝達上の断面積が増大し、線同士の接触により表面積は減少するのでFig.3のように燃焼速度は下がると考えられる。

推進薬の燃焼において圧力が高まると反応速度が大きくなり、温度勾配の増大と共に温度勾配の最大点はさらに燃焼表面に近づく<sup>9)</sup>。挿入金属線が一本の場合、圧力指数は金属線直径の小さい方が大きいことが報告されている<sup>7)</sup>。このことは、細い金属線は長さ当りの熱容量が小さく、温度分布が燃焼ガスの温度分布と近

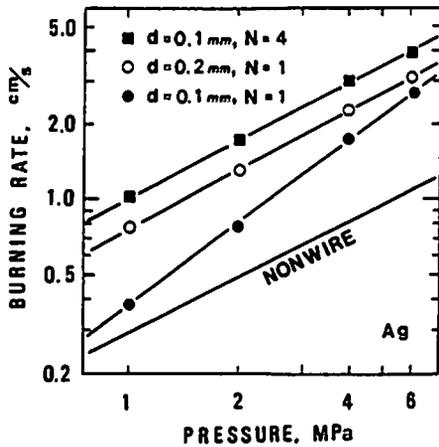


Fig. 8 Relation between pressure and burning rate of propellant with embedded Ag wires in a bundle.

いため、燃焼速度が火炎構造に大きく依存したとして理解される。従って金属線を束にし、細い金属線を多数用いて表面積を大きくすることは、圧力が高い場合にも燃焼促進に効果的であると考えられる。Fig. 8にストランド燃焼実験で得られた、束にした金属線の燃焼速度と圧力の関係を示した。単線の場合、本実験でも、金属線径が小さい方が圧力指数が大きいことがわかる。しかしながら、これを束にしたとき、圧力指数はさほど変化しない。これは燃焼速度の増大と、深いコーンの形成とによって、金属線に沿う流速が増したため、火炎距離が大きくなり温度勾配の上昇がある程度で打ち消されたことによると思われる。

挿入金属線が1本の場合の燃焼速度の温度感度は燃焼速度を大きくするような金属線の直径のとき高くなる<sup>3)</sup>。したがって束にすることによっても温度感度が高まると考えられ、圧力指数の増大はさほどではないにせよ、ロケットモータへの応用の際は温度による性能変化を充分検討する必要がある。

## 4.2 最高燃焼速度

### 4.2.1 計算モデル

金属線の表面積を大きくしていくことで燃焼速度がどこまで大きくなっていくかを知ることは興味深い。火炎から金属線への熱伝達は温度境界層を介した対流熱伝達で行われている。温度境界層は速度境界層の影響を受けるが、金属線表面の凹凸があまりに小さくなりすぎると、速度分布は粘性の影響で形状の変化に追従できなくなる。したがって、温度分布も変わらなくなっていくので、火炎から金属線への熱伝達量はあるところで飽和すると考えられる。本実験の場合、境界層の厚さ $\delta$ を平板における式 $\delta \sim \sqrt{\nu x/u}$ で概算すると、動粘性係数 $\nu \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、ガス速度 $u \sim 5 \text{ m/s}$  ( $r \sim 2$

cm/s)、長さ $x \sim 10^{-3} \text{ m}$ を代入すれば $\delta \sim 0.03 \text{ mm}$ となり、本実験の最小直径0.05mmをさらに小さくすることで燃焼速度が増大する可能性がある。本研究では入手できる最も細い金属線の直径がこの0.05mmであったため、実験的に燃焼速度の限界がどこにあるのか明らかにできなかった。

しかしながら、仮に挿入した金属線全ての表面が高温ガスにさらされ、粘性の影響もなく受熱するとした場合、燃焼速度の限界がどのくらいであるのか、ダブルベース推進薬燃焼モデル<sup>10)11)</sup>を基に簡単に算出できる。

前節で述べたように、金属線入りダブルベース推進薬の燃焼速度の決定因子はフィッゾーンの温度分布とダークゾーンの温度であり、卸炎層はほとんど関与していない。そこでここでもフィッゾーンの反応層のみについて考える。また、数学的取り扱いを簡単にするため次のような仮定を用いた。

- 1) 燃焼ガスの粘性の影響は考えない。
- 2) 挿入した金属線は限りなく薄く、表面積が無限大で周囲の燃焼ガス及び推進薬の温度と直ちに熱平衡状態に達する。
- 3) 金属線は多数入り、燃焼面は円錐状のくぼみを作らない。
- 4) 熱放射の影響は無視する。
- 5) 金属の融解の影響は無視する。

フィッゾーンでは、ホルムアルデヒドと二酸化窒素の二次反応のみを考え、オーバーオール反応を次のように仮定する。



### 4.2.2 基礎式

金属線が燃焼面に占める面積割合を $\alpha$ とする。金属線の表面積が無限大で、周囲とすぐに熱平衡状態に達するのであるから燃焼進行方向への平均熱伝導率 $\bar{\lambda}$ は燃焼ガス中で次式で表される<sup>12)</sup>。

$$\bar{\lambda} = (1-\alpha)\lambda_g + \alpha\lambda_M \quad (1)$$

ここで $\lambda_g$ 、 $\lambda_M$ はそれぞれ燃焼ガス、金属線の熱伝導率である。

気相での基礎方程式は以下の通りである。燃焼表面からの距離を $x$ とし、ガス密度、速度、圧力、温度をそれぞれ $\rho$ 、 $u$ 、 $p$ 、 $T$ として、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式が次のように成り立つ。

$$\frac{d(\rho u)}{dx} = 0 \quad (2)$$

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} \frac{d^2 T}{dx^2} - \left\{ (1-\alpha)\rho u C_{pg} + \alpha \rho_M C_{pM} \right\} \frac{dT}{dx} + (1-\alpha)\Sigma \omega_i Q_i = 0 \quad (4)$$

ここで  $r$  は燃焼速度で  $\rho_M$  は金属線の密度である。また、 $C_p$ 、 $C_M$  は燃焼ガス及び金属線の比熱であり、 $\omega_i$ 、 $Q_i$  はそれぞれ化学種  $i$  ( $i = \text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) の反応速度および反応熱である。化学種  $i$  の保存式として次式が満たされる。

$$\rho u \frac{dY_i}{dx} = \omega_i \quad (5)$$

ここで  $Y_i$  は  $i$  のモル濃度である。 $R$  を普遍ガス定数として、状態式は次式で表される。

$$p = \rho RT \sum Y_i \quad (6)$$

この他に化学種  $i$  について反応速度式を6個立てればよい。例えば  $\text{CH}_2\text{O}$  については、 $k_f$  を反応速度定数として、(5)式を次式で表せる。

$$\frac{dY_{\text{CH}_2\text{O}}}{dx} = -\frac{k_f}{\rho u} (\rho Y_{\text{CH}_2\text{O}}) (\rho Y_{\text{NO}_2}) \quad (7)$$

燃焼表面における熱平衡条件から、燃焼表面の温度勾配と燃焼速度の関係を次式のように求めることができる。

$$\lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0^+} = (1-\alpha) \rho_p r \{ C_c (T_s - T_0) - Q_i \} + \alpha \rho_M r C_M (T_s - T_0) \quad (8)$$

ここで  $\rho_p$  は推進薬の密度、 $Q_i$  は表面における反応熱である。また、 $C_c$  は推進薬の比熱であり、 $T_s$ 、 $T_0$  は推進薬の燃焼表面温度、初期温度である。燃焼速度と燃焼表面温度とのあいだにはアレニウスの式から

$$r = Z_s \exp \left( -\frac{E_s}{RT_s} \right) \quad (9)$$

の関係が成り立つ。

$x = 0^+$  (燃焼表面) で  $Y_i$ 、 $p$  が与えられているとすれば、燃焼表面温度  $T_s$  を仮定することにより、基礎式を解くことができる。この解のうち  $x = \infty$  において温度が一定となるように  $T_s$  を決定する。ここでは物理諸量として Table 1 及び JANAF Table<sup>13)</sup> の諸定数を用いた。

$C_c = 0.325 \text{ cal/g}\cdot\text{K}$
$P_p = 1.55 \text{ g/cm}^3$
$Q_s = 100 \text{ cal/g}$
$Z_s = 8 \times 10^5 \text{ cm/s}$
$E_s = 17.5 \times 10^3 \text{ cal/mole}$
$T_0 = 20^\circ\text{C}$
$\lambda_g = 0.0002 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$
$k_f = 10^9 \exp(-8000/RT) \text{ cm}^3/\text{mole}\cdot\text{s}$
$Y_{\text{CH}_2\text{O}} = 0.0183 \text{ moles/g at } x=0$
$Y_{\text{NO}_2} = 0.0098 \text{ moles/g at } x=0$

Table 1 Physical constants and parameters used in calculation.

#### 4.2.3 計算結果

計算結果の一例として推進薬初期温度  $20^\circ\text{C}$ 、圧力  $2 \text{ MPa}$  の場合、横軸に燃焼表面からの距離をとり、温度、各化学種のモル濃度、流速の分布を金属線を入れない場合 ( $\alpha = 0$ ) と入れた場合 (銀線で  $\alpha = 0.05$ ) についてそれぞれ Fig. 9, 10 に示した。金属線を入れない場合は反応が燃焼面より約  $0.4 \text{ mm}$  で完了するのに対し、金属線を  $5\%$  入れただけで反応が終了するのに

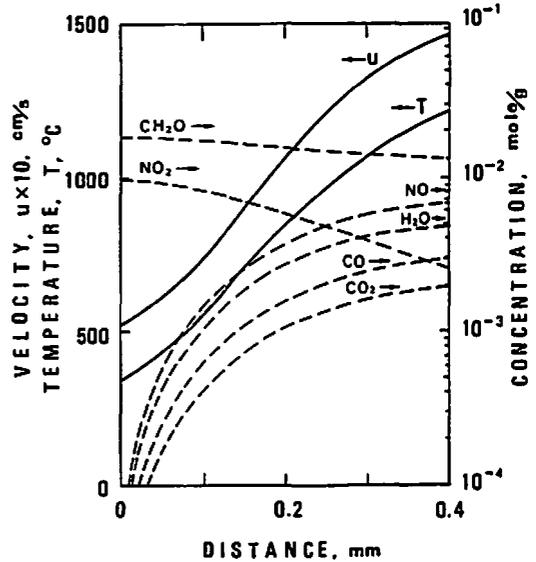


Fig. 9 Calculated profiles of temperature, mole concentrations and velocity in fizz zone without metal wire.

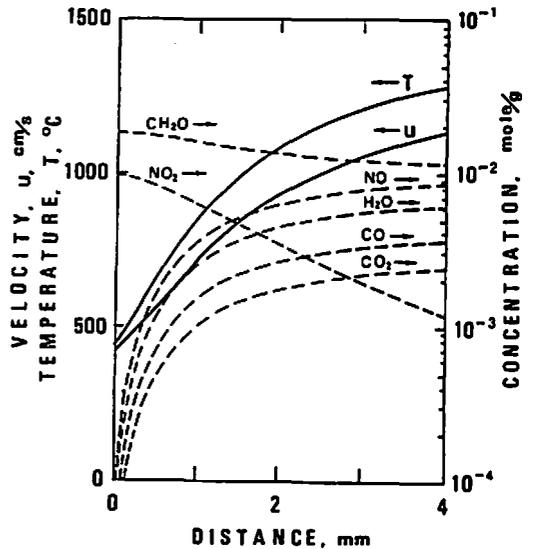


Fig. 10 Calculated profiles of temperature, mole concentrations and velocity in fizz zone with metal (Ag,  $\alpha = 0.05$ ).

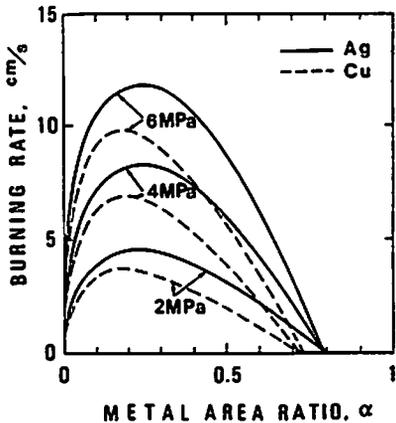


Fig. 11 Relation between metal area and calculated burning rate.

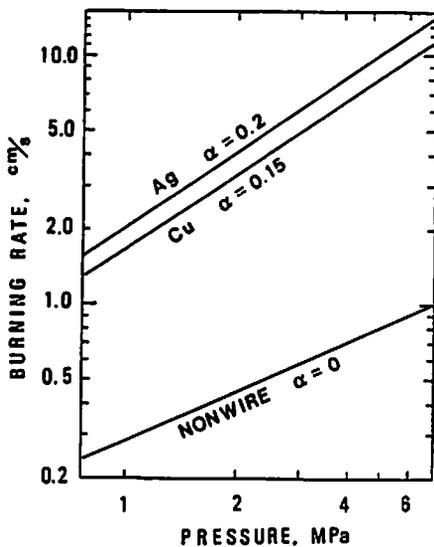


Fig. 12 Relation between pressure and calculated burning rate with and without embedded metal.

約10倍の距離を要していることがわかる。したがって温度勾配はFig. 10のほうが増加するが、他方、平均熱伝導率が $0.0002 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ から $0.05 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ に上昇するため、熱伝導量は増大する。この結果、燃焼表面温度が高まり、燃焼速度は大きく増大している。

Fig. 11は圧力2, 4, 6MPa下において横軸に $\alpha$ をとり、燃焼速度の変化を表したものである。金属線の面積割合 $\alpha$ を増大していくとある時点で燃焼速度は最大となり、その後減少していくことがわかる。これは、 $\alpha$ を増すにしたがって熱伝導率は増大していくが、 $\alpha$ があまりに大きくなると化学反応熱が金属線の温度上昇に費やされてしまうので、周囲温度が下がり温度勾配が減少していくためである。ちなみに $\alpha=0, 0.2, 0.5$

(銀の場合)に対してフィッソンの最高温度はそれぞれ $1400^\circ\text{C}$ ,  $960^\circ\text{C}$ ,  $790^\circ\text{C}$ となる。Fig. 11より最大値をとる $\alpha$ は圧力にほとんどよらず、銀の場合約0.2で、銅の場合約0.15であることがわかる。

Fig. 12は金属線を入れていない場合( $\alpha=0$ )と挿入金属線が銀( $\alpha=0.2$ )、銅( $\alpha=0.15$ )の場合の燃焼速度の圧力依存性を示す。これらがこのモデルで得られる、金属線を入れた場合の燃焼速度最大値の圧力特性である。圧力指数は金属線を入れていない場合よりも高くなっており、圧力5MPa下において得られる燃焼速度の最大値は約 $10 \text{ cm/s}$ であることがわかる。

実際の束にした金属線において、上のモデルを満足するにはいくらか無理があろう。例えば、金属線、推進薬とも燃焼進行方向の熱伝導のみならず、これと垂直方向の熱伝導があり、さらに束にしたため火災にさらされない金属線ができ、金属線とその周囲は仮定したようには熱平衡状態に達し得ないであろう。また金属線を多数入れない場合は、燃焼速度の違いから金属線を中心とする円錐面が形成される。二次元座標で行われた計算によると円錐中心の金属線に沿う燃焼ガスの流速は平面火災と仮定した場合の2倍以上となる<sup>2)</sup>。このため金属線の燃焼進行方向の温度勾配は上のモデルの場合よりも小さくなり、実際の燃焼速度は上記の見積りよりも低くなると考えられる。上のモデルは、金属線の加工、推進薬への入れ方の工夫等の全ての問題点が克服されたときの燃焼速度の達成できるひとつの目標値と見なすべきものであろう。

## 5. まとめ

本研究では束にした金属線を入れることによる推進薬の燃焼速度特性の変化に関して研究した。

ストランド燃焼実験から、以下のことがわかった。

- 1) 束にする際はねじらず、隙間を空けないようにすると燃焼促進効果は大きい。
- 2) 金属線の総断面積一定の場合、細い線のできるだけ線数を多くし、表面積を大きくすると燃焼速度は増大する。
- 3) 本実験の範囲内では一本の線を入れた際の最適直径で得られる最大燃焼速度よりもさらに約3~4割の高い燃焼速度が束にすることによって可能となる。

ダブルベース推進薬の燃焼理論により、表面積無限大で非常に薄い、仮想的な金属線挿入による燃焼促進効果について調べ、以下のことがわかった。

- 4) 金属線の推進薬に占める面積割合が小さくても大きな燃焼促進効果が現れ、圧力が変化しても燃焼速度を最大にする面積割合はほとんど変わらない。

- 5) 最大燃焼速度は圧力5MPa下において約10cm/sとなる。

#### 文 献

- 1) Summerfield, M., and Parker, K. H., "Interaction between Combustion Phenomena and Mechanical Properties in Solid Propellant Rocket Motors," *Mechanics and Chemistry of Solid Propellants*, edited by A. C. Eringen, H. Liebowitz, S. L. Koh and J. M. Crowley, Pergamon Press (1967), pp. 95-98.
- 2) Caveny, L. H., and Glick, R. L., "Influence of Embedded Metal Fibers on Solid-Propellant Burning Rate", *J. Spacecraft and Rockets*, Vol. 4, No. 1 (1967), pp. 79-85.
- 3) 岩間 彬, 青柳鐘一郎, 祖父江照雄, 山崎毅六, 「細い金属線を添加した固体推進剤の燃焼」, 第5回燃焼シンポジウム前刷集 (1967), pp. 69-70.
- 4) 市田正人, 久保田浪之介, 「銀線入り固体推進薬の燃焼速度」, *工業火薬*, 41 (1980), pp. 141-147.
- 5) 町田秀樹, 荒木郁男, 福田孝明, 「銀線入りダブルベース推進薬の燃焼挙動」, *工業火薬*, 42 (1981), pp. 378-383.
- 6) Kubota, N., Ichida, M., and Fujisawa, T., "Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires", *AIAAJ.*, Vol. 20, No. 1 (1982), pp. 116-121.
- 7) Shuling, C., and Fengsheng, L., "Influence of Long Metal Wires on Combustion of Double-Base Propellants", *Combustion and Flame*, Vol. 45 (1982), pp. 213-218.
- 8) 田中雅文, 森崎賢治, 「金属線を挿入した固体推進薬の燃焼率連続測定」, *工業火薬*, 50 (1989), pp. 436-441.
- 9) Kubota, N., Ohlemiller, T. J., Caveny, L. H., and Summerfield, M., "Site and Mode of Action of Platonizers in Double Base Propellants", *AIAA J.*, Vol. 12, No. 12 (1974), pp. 1709-1714.
- 10) 久保田浪之介, 桑原卓雄, 青木一郎, 「ダブルベース推進薬の燃焼速度モデル」, *工業火薬協会昭和56年度年会講演要旨集* (1981), pp. 63-64.
- 11) Kubota, N., "Survey of Rocket Propellants and Their Combustion Characteristics", *Fundamentals of Solid-Propellant Combustion*, edited by K. K. Kuo and M. Summerfield, *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 90 (1984), pp. 43-47.
- 12) Griggall, V., and Sandner, H., "Heat Conduction", Washington, Hemisphere Pub. (1984). pp. 15.
- 13) JANAF Thermochemical Data, Dow Chemical Co., 1967.

## Burning Rate Increment of Solid Propellant with Embedded Metal Wires in a Bundle

by Masafumi TANAKA\* and Kenji MORISAKI\*

The burning rate characteristics of double base propellant with embedded metal wires in a bundle, instead of with a single wire alone, were studied. As a result of the combustion experiments of strand samples, it was shown that the burning rate increment is large when each wire is embedded closely without twist and they interact thermally each other with their surface areas sufficiently exposed to combustion gas. In the range of this experiment the embedded metal wires in a bundle can augment 30–40% of the maximum burning rate obtained by a conventional single wire with optimum diameter. The pressure exponent of the propellant with wires in a bundle is not so large as that with a single thin wire. As an ultimate case of this method, based on the combustion theory of double base propellant, we discussed the burning rate characteristics of the propellant with innumerable embedded metal wires which have infinite surface areas. As a result of the calculation, it was shown that the high burning rate can be achieved even in a small area ratio of the metal to propellant surface and that the maximum burning rate is about 10 cm/s at the pressure of 5 MPa.

(\*Department of Aerospace Engineering, The National Defense Academy  
1–10–20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239, Japan)

---