

金属線を挿入した固体推進薬の燃焼率連続測定

田中 雅文* 森崎 賢治*

金属線を挿入した固体推進薬の非定常な燃焼進行の詳細を明らかにするため、金属線入りストランドの燃焼率を重量変化を利用して連続的に測定した。燃焼進行の様子はストランドが充分長ければほぼ4つの段階に分けられる。即ち、金属線の効果が現れるまでの準備段階、金属線の効果が現れ、金属線を中心軸とする円錐ができ始めてから完了するまでの移行段階、円錐形の燃焼面を持ち、高い燃焼速度を示す定常段階、金属線終端付近の急激な燃焼率増加を示す最終段階、である。始めの準備段階の継続時間は挿入金属線の直径に依存し、これを極小とするような金属線直径のとき第3番目の段階の燃焼速度は極大となる。また第2番目の移行段階の継続時間及び燃焼面積の変化は、金属線に沿った燃焼速度のみが、金属線を入れていないときの燃焼速度から高い燃焼速度へステップ状に上昇したとする簡単な燃焼進行モデルで近似できることがわかった。

1. はじめに

固体推進薬の燃焼速度を増大させる方法のひとつとして、燃焼進行方向にあらかじめ金属線を入れておく方法がある。これは金属の熱伝導率が推進薬に比較して大きいことにより、燃焼中の高温気相から推進薬未燃部分への熱のフィードバック量を増大させ、金属線周囲の燃焼速度を高めさせようとするものである。燃焼速度領域¹⁾を拡大させる有効な方法として、さまざまな開発及び研究がなされてきている²⁾⁻⁷⁾。

金属線を挿入した推進薬では、燃焼中、金属線近傍での燃焼速度が周りに比べ高められるので、燃焼表面積が変化していく非定常な燃焼進行を呈する。金属線を挿入した推進薬をロケットモータに組み込んだ際、推力-燃焼時間等の設計プログラムを得るうえで、金属線の種類、直径、配置間隔等の選択によって着火後の燃焼の様子がどのように変化していくか知るの重要である。本研究ではストランド試料燃焼中の推進薬の重量変化を利用し、燃焼率を連続的に測ることによってこうした非定常な燃焼進行の詳細を明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

2.1 ストランド試料

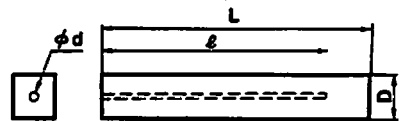


Fig. 1 Strand sample.

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薬を、Fig. 1のように、幅Dの正方形断面を持ち、長さLのストランド状に裁断したものを試料とした。この試料はあらかじめ長手方面に2分割され、中心に直径d、着火面からの長さlの金属線が挿入されている。2分割した試料の接着にはアセトンを用い、十分な加熱乾燥(60℃、48時間以上)を施した。なお、試料は縦置きにして着火される。

2.2 燃焼率連続測定装置

試料の燃焼率を連続的に測定するための装置をFig. 2に示す⁸⁾。装置はストランド試料の重量荷重を支えるコイルスプリングとその変位検出のための差動変圧器、燃焼中の過度の振動を除去するためのオイルダンパから成り立っている。差動変圧器出力が荷重に対して充分線形を保つように、コイルスプリングの強さはコイル径、巻数、ピッチ角、索線の径によって調節されている。試料の着火には25μm以下の細いニクロム線を使用し、着火の際の振動を極力除いた。

試料燃焼時は試料自重の他に燃焼ガス放出による推力も荷重として加わる。いまストランドに生ずる推力

昭和63年9月2日受理

*防衛大学校航空工学教室

〒239 神奈川県横浜須賀市走水 1-10-20

TEL 0468-41-3810 内線 2581

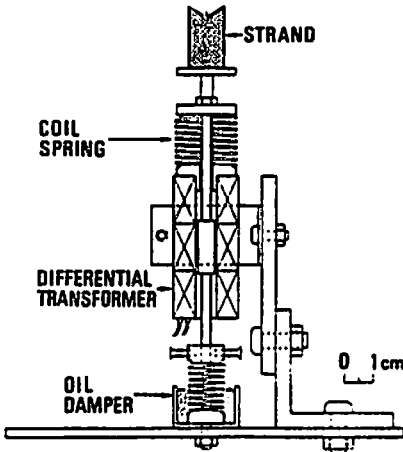


Fig. 2 Apparatus for continuous measurement of burning rate.

が運動量推力のみであるとすると、コイルスプリングに加わる荷重 W は次式で表される。

$$W = W_0 - \int_0^t mg dt + mv \quad (1)$$

ここで W_0 はストランド試料初期重量、 t は燃焼時間、 m は質量流率、 v はストランド燃焼表面上の長軸方向平均ガス流速、 g は重力加速度である。燃焼ガス、推進薬固相の密度をそれぞれ ρ_g 、 ρ_s とすると連続の式より、

$$\dot{m} = \rho_g v D^2 = \rho_s r D^2 \quad (2)$$

が成り立つ。ここで r は燃焼面で平均した長軸方向の線燃焼速度である。(1) 式は(2) 式を代入して次式となる。

$$W = W_0 - \rho_s g D^2 \int_0^t r dt + \frac{\rho_s^2}{\rho_g} D^2 r^2 \quad (3)$$

このとき右辺第3項の運動量推力は、2 MPa 以上の圧力下で $\rho_s/\rho_g \sim 10^2$ 、 $\rho_s D^2/W_0 L g$ より W_0 の約 $r^2/10L$ 倍 ($[r] = \text{cm/s}$ 、 $[L] = \text{cm}$) であり、後述の実験結果の値を代入すると通常は非常に小さい。

(3) 式の両辺を t で微分して

$$\frac{dW}{dt} = -\rho_s g D^2 r + 2 \frac{\rho_s^2}{\rho_g} D^2 r \frac{dr}{dt} \quad (4)$$

を得る。この式の左辺の値は差動変圧器出力の時間微分をとることで与えられるので、Runge-Kutta 法等により r の変化は一応解析可能である。しかしながら本研究では主として定常時の r と、 r が変化する遷移時における継続時間に注目したので詳しい解析には立ち入らなかった。定常状態においては線燃焼速度は次式で与えられる。

$$r = -\frac{dW/dt}{\rho_s g D^2} \quad (5)$$

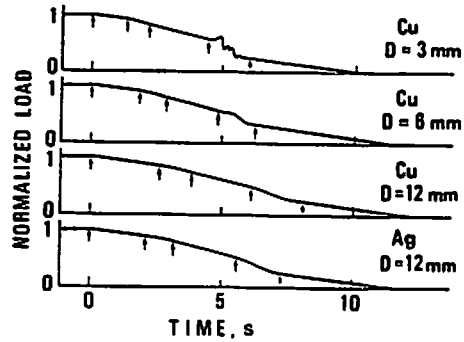


Fig. 3 Typical output records from the apparatus in Fig. 2.

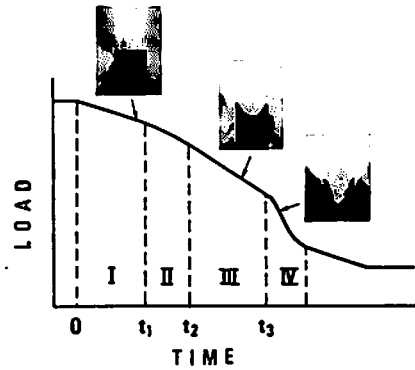


Fig. 4 Schematic output record and aspects of burning surface.

Fig. 2 の装置全体は窓付きのチムニー式ストランドバーナに入れられ、窒素加圧状態で実験は行われる。写真撮影、ビデオ撮影により、燃焼面の観察を行い、着火後斜めに燃焼進行するような場合のデータは以下の実験結果から除かれている。

3. 実験結果及び考察

3.1 燃焼率の時間的推移

燃焼率連続測定装置の出力例を Fig. 3 に示す。銅線 ($d = 0.4 \text{ mm}$ 、 $l = 7 \text{ cm}$) を、長さ $L = 10 \text{ cm}$ 、 $D = 3, 6, 12 \text{ mm}$ のストランドに挿入し、気圧 2 MPa で燃焼させた場合についての出力例である。また幅 12 mm のストランドに銀線を挿入した場合の出力結果も付け加えてある。横軸の経過時間は、荷重が変化を始めた点を 0 とし、また縦軸の荷重は試料初期重量によって正規化してある。図中の矢印は、正規化したために曲線の変化が分かりにくくなっているため、判別しづらい主な変曲点の位置を表している。

Fig. 4 は Fig. 3 の 4 本の曲線に共通する変化の特徴を強調し、併せて燃焼面の様子 ($d = 0.2 \text{ mm}$ の銀線を $D = 6 \text{ mm}$ のストランドに挿入した場合) を示したもの

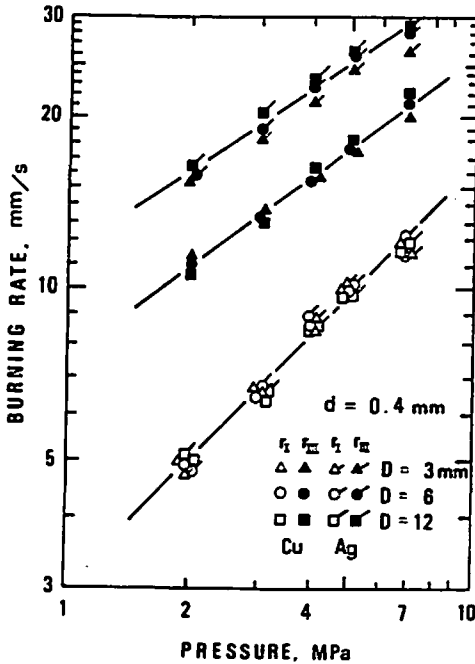


Fig. 5 Burning rate characteristics of phase I, III for various strand widths.

である。燃焼に対する金属線を挿入した効果は、以下述べるように、時間経過とともに変曲点の位置によって曲線の4つの段階的变化として表れている。はじめ $t=0$ で着火後しばらく曲線は傾き一定で直線的な減少を示す(第I段階)。この時燃焼面は進行方向に垂直で平のままである。その後 $t=t_1$ で曲線は曲がり始め(第II段階)、 $t=t_2$ で再び直線となる(第III段階)。この第III段階中、燃焼面は金属線を中心とした逆円錐形を保つ。 $t=t_3$ において、曲線は急激な変化を示す(第IV段階)。この時の燃焼面は位置的には金属線の終端付近に達している。ストランドの幅によっては荷重が増加することもあり、かなりの推力が発生していると思われる。その後曲線は徐々に着火直後と同じ傾きを示すようになり、燃焼面も平に戻っていく。

挿入金属線の長さを変えてみると l が短いとき ($d=0.4\text{mm}$ の銅を挿入した際には、 $D=6\text{mm}$ で l が約 3cm 以下のとき) では、こうした明確な段階的变化を示さなくなる。例えば第II段階から、直ちに第IV段階へ移行することもある。反対に l が充分長いときには各々の段階の曲線の傾きは変わらずに第III段階の継続時間が延びるのみである。このような段階的变化のうちI~IIIの段階は、応用上点火後のロケットモータの性能を決定する上で重要であると考えられる。本実験では特にこれらに注目して測定を行った。

3.2 定常時の燃焼速度と遷移時間

IとIIIの段階は曲線の傾きが一定であることと燃焼面の形状が時間経過によって変化しないことより、定常燃焼していると考えられる。(5)式によって線燃焼速度に換算したこれらの燃焼率 r_1 , r_0 の圧力依存性をストランド幅 D をパラメータとして Fig. 5 に示す。挿入金属線の径 d は 0.4mm である。図よりIとIIIの段階の燃焼速度はストランド幅に依存せず、 r_0 のみが金属線の種類によって変わることが判る。また、金属線を入れてない場合の燃焼速度を測定すると、 r_1 と一致していることが判った。

このように推進薬の燃焼速度は金属線を挿入することによって、始め r_1 から次第に r_0 へ上昇していく。次にこれに要する時間を考えてみる。第I段階は燃焼速度が金属線を入れていない場合と一致することから、この状態は金属線の効果が現れ始めるまでの準備期間とみなせる。この期間、即ち燃焼中の高温ガスによって金属線が加熱され、金属線内の伝導による未燃相への熱移動が推進薬表面の燃焼速度へ影響を及ぼし始めるまでの時間は、ストランド自身の熱伝導度が低いので、ストランド幅がある程度以上であればストランド幅に依らず一定と考えられる。しかしながら、Fig. 3の燃焼率連続測定装置より得た出力曲線においては第I段階の直線部分の継続時間 ($t=0$ の矢印より次の2番目の $t=t_1$ の矢印まで期間) はストランド幅によって変化している。これはストランド幅が大きい時、推進薬の時間当りの消費率が大きくなるので、金属線を中心とした円錐形成開始の際の微小な重量変化は相対的に小さくなり、装置出力としては感知されにくくなるためである。したがって Fig. 3 ではストランド幅が大きくなるにつれ、曲線上の変曲点として判別できる点(左から2番目の矢印の示す点)の現れる時間 t_1 は遅くなり、みかけ上第I段階の継続時間が長くなっていく。コイルスプリングのばね定数を小さくし、ストランド幅の小さな試料を用いることで測定装置の感度が高まるので、こうして得られる出力曲線の変曲点より第I段階の真の継続時間(以下 r_1 と呼ぶ)を求めることができる。しかしながら、ストランド製作上、寸法精度の限界から非常に小さな幅のストランドを作ることには困難であり、また実験上ストランド幅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った報告もなされている⁹⁾。そこで本研究ではストランド幅を製作上の最小限界となった 3mm にして r_1 を $r_1=t_1$ と求めた。この寸法においては 2MPa 以上の圧力下での燃焼速度は Fig. 5 に示したように窒素ガスの影響を受けていない。挿入金属線の直径を横軸にとって、 r_1 の変化を Fig. 6 に実

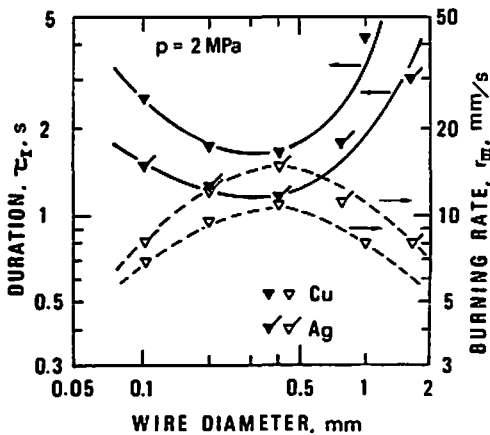


Fig. 6 Effect of varying the wire diameter on the duration of phase I (solid line) and the burning rate of phase III (broken line).

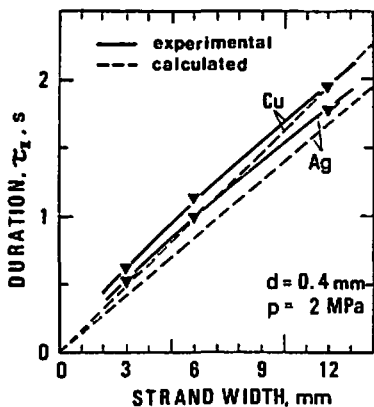


Fig. 7 Effect of varying the strand width on the duration of phase II.

線で示す。また同図には r_{III} の燃焼速度の変化も併せて破線で示した。 r_{III} を極大にする金属線の径付近で r_I が極小になっていることが判る。この直径の時、高温気相から金属線を通して推進薬に伝導される正味の熱伝達量が極大になっていると考えられる¹⁰⁾。

次にこの金属線の効果が現れ始めてから、試料の燃焼が定常になるのに要する時間を考えてみる。第II段階の真の継続時間(τ_{II} と呼ぶ)はFig. 4の出力曲線上に表れている第I段階と第II段階の継続時間の和からFig. 6に示した τ_I の差をとることにより求めることができる。すなわち $\tau_{II} = t_2 - \tau_I$ である。横軸にストランド幅をとり τ_{II} の変化をFig. 7に実線で示す。ストランド幅3~12mmの範囲では τ_{II} はほぼ D に比例していることが判る。また別に行った2本の25mm幅のストランド燃焼実験においても τ_{II} は直線上近傍にプロットできた。

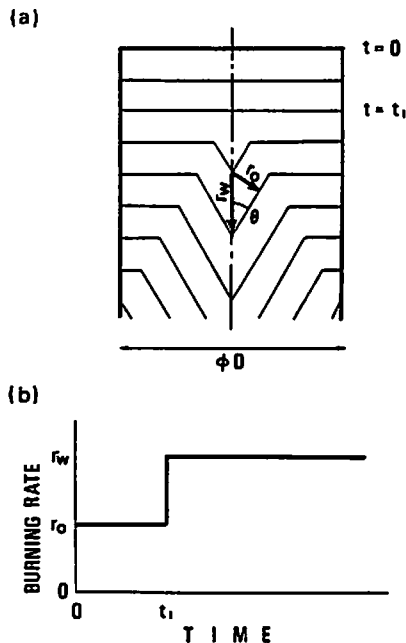


Fig. 8 Calculation model: (a) development of burning surface. (b) burning rate transition along the center axis of strand.

いまFig. 8(a)のようなストランド燃焼進行モデルを考える。ストランドは直径 D の円柱形で、 $t=0$ より r_0 で燃焼し始め、 $t=t_1$ よりストランド中心での燃焼速度のみがFig. 8(b)のようにステップ状に r_w に上昇したとする。この時ストランド中心にできる円錐の半頂角 θ は次式を満たす。

$$\sin\theta = \frac{r_0}{r_w} \quad (6)$$

$t > t_1$ における円錐底面の半径 R は次式で表される。

$$R = (r_w - r_0)(t - t_1) \tan\theta \quad (7)$$

したがって円錐ができ始めてから完了するまでに要する時間 τ_c (重量変化を感度良く促えた場合、Fig. 4では $t=t_1$ から $t=t_2$ までの時間に対応すると考えられる。)は

$$\tau_c = \frac{D}{2} \frac{\sqrt{r_w^2 - r_0^2}}{r_0(r_w - r_0)} \quad (8)$$

で求めることができる。この後モデルのストランドは燃焼速度 r_w で定常に燃焼進行していく。(8)式において $r_0 = r_I$ 、 $r_w = r_{III}$ と置き換えて τ_c の計算値を求めるとFig. 7の破線のようになり、実験値とほぼ一致する。ゆえに金属線を挿入した推進薬の金属線近傍での線燃焼速度は、銀や銅を挿入した場合、Fig. 8(b)のようなステップ状に近い変化をされると考えられる。

実験的に複数の金属線が推進薬に挿入された場合相互干渉を起こす距離は1mm程度以内で非常に短く¹¹⁾¹²⁾、

応用上は金属線の効果は独立していると考えてよい。したがって着火より燃焼速度がステップ状に立ち上がるまでに要する時間をFig. 6に示す τ_1 とすることにより、任意の金属線配置をもつロケットモータが、定常燃焼を行うまでの時間、それまでの燃焼面積の時間的変化等を(8)式をもとに計算できるであろう。またこれによつて逆にある推力—燃焼時間プログラムを満たすような金属線配置を求めることも可能と考えられる。

今後さらに実際のロケットモータを燃焼させて、圧力、推力の時間的推移を測り、ストランドの燃焼率連続測定で得たデータの設計に対する有効性や、上述の簡単な燃焼進行モデルの正当性などを検証していくことが必要である。

4. まとめ

金属線(銅線または銀線)を挿入したダブルベース推進薬のストランド試料の燃焼率を重量変化を利用して連続的に測定した。その結果次のことが判った。

- 1) 試料長さがある程度以上であれば試料の着火後の燃焼率の変化は段階的に分けられる。すなわち、
 - I. 金属線の効果が現れ始めるまでの燃焼率一定の準備段階
 - II. 効果が現れ始めてからストランド上に円錐が完了するまでの移行段階
 - III. 高い燃焼速度を示す定常段階
 - IV. 金属線終端付近の急激な燃焼率上昇段階である。
- 2) Iの段階の燃焼速度 r_1 は金属線を入れてない場合のものと一致し、IIIの段階の燃焼速度 r_0 はストランド幅に依らない。
- 3) 金属線の効果が現れ始めるまでの準備期間、すなわちIの継続時間は金属線径に依存し、 r_0 を極大とする金属線径で極小となる。
- 4) IIの段階の移行時間はストランド幅にほぼ比例し、金属線近傍での燃焼速度が r_1 から r_0 へステップ状に増加したとして近似できる。

文 献

- 1) 久保田浪之介:固体推進薬の燃焼速度領域, 日本航空宇宙学会誌, 26(1978), pp.308-317.
- 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) Kubota, N., Ichida, M. and Fujisawa, T.: Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires, AIAA J., Vol.20, No.1 (1982), pp.166-121.
- 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) 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.
- 7) 謝 玉立, 王 晰猷: 長い金属線を挿入したダブルベース推進薬の螺旋圧伸による製造工程, 工業火薬, 43 (1982), pp.15-21.
- 8) 山田恭介, 後藤正和, 林 一己: 固体推進薬燃焼率の連続測定, 工業火薬, 36(1975), pp.130-135.
- 9) 木村潤一, 久保田浪之介: 固体推進薬の爆発熱量測定における加圧ガス拡散の影響, 工業火薬, 37 (1976), pp.22-28.
- 10) Summerfield, M. and Parker K.H.: Interaction between Combustion Phenomena and Mechanical Properties in Solid Propellant Rocket Motors, Mechanics and Chemistry of Solid Propellants (Eringen, A.C., Liebowitz, H., Koh, S.L. and Crowley, J.M., Eds.) pp.95-98 (1967), Pergamon Press.
- 11) 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.
- 12) 森崎賢治, 田中雅文: 束にした金属線による推進薬の燃焼促進, 昭和63年度工業火薬協会秋期研究発表講演会要旨 (1988), pp.43-44.

Continuous Measurement of Burning Rate of Solid Propellant with Embedded Metal Wires

Masafumi TANAKA* and Kenji MORISAKI*

The burning rate of solid-propellant strand with embedded metal wires was continuously measured by the use of the time dependent decrease of the strand weight. There are four phases in the progress of the propellant combustion. In the first phase propellant burns steadily, holding flat surface, with the ordinary burning rate. In the second phase the conical burning surface begins to be formed from the periphery of the metal wire and the conical surface spreads toward the side surface of strand. Then in the third phase propellant burns with enhanced constant burning rate. At last, in the fourth phase instantaneously propellant burns more rapidly near the end of the wire. Some embedded metal wire diameter gives a minimum duration of the first phase and then the burning rate in the third phase takes a maximum value. It was shown that the duration of the second phase and its transient burning area can be calculated from a simple model in which the burning rate is increased step-wisely along the embedded metal wire.

(*Department of Aeronautical Engineering, The National Defense Academy,
1—10—20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239, Japan)
