

固体推進薬燃焼率の連続測定

山田 恭介*・後藤 正和*・林 一 巳*

連続的に変化する実験条件下で固体プロペラント・ストランドの瞬間的燃焼率を測定する新しい簡単な方法が述べられている。燃焼率は時間に対する重量減少率曲線の傾斜から求められる。コイルスプリングで支持されたストランドは重量変化によって変位し、それは差動トランスによって検出される。

測定は2種のポリサルファイド組成に対し、種々の条件下で、すなわち一定圧力、階段状または連続的に変化する圧力下で、また数片を接合したストランドを用いてなされた。

この方法によると燃焼率を従来のものより容易に、かつより精度よく求める事ができる。燃焼ガス放出による推力荷重および高圧下における浮力の燃焼率に及ぼす影響が詳細に論じられ、通常は補正は不必要であり、たとえ必要なときでも簡単であることが結論された。

1. 緒言

固体ロケット用推進薬の燃焼率は、通常空素ガスにより所望の圧力に加圧したボンベ内でプロペラントストランドを燃焼させ、ストランドに挿入したフューズとかイオンプローブにより、ある長さの間を燃焼面が通過する時間を測定して求められている。この方法ではある長さの平均の燃焼率を求めていることになり、フューズなどを挿入し結線する必要がある。そこでストランドに何等手を加えないで、燃焼中の各瞬間における燃焼率を連続的に求め、場合によっては燃焼率の過渡的变化をも求めようとする方法が2~3試みられている。Osborn¹⁾は γ 線をストランド側面から照射して燃焼面をシンチレーション・プローブで検出し、 γ 線の強さが変わらないようにサーボ機構を用いてストランドを移動させ、その移動速度を燃焼率とする方法を用いた。また Derr と Osborn²⁾は γ 線の代わりに可視光線をレンズ系を通してストランド側面からあて、その光を光電管で受光する方法を用いた。これらはいずれも燃焼率を連続的に求めるほかに、燃焼面の位置を一定位置に保持し、燃焼面の光学的観察等を容易にするという別の目的も有している。しかしこの方法で用いられた装置はサーボ機構や光学系が非常に複雑になり、しかも燃焼面が不整一になることの影響を

受け易く、光を使用した場合には更に燃焼中に出る煙の影響も受ける。

ここで使用した連続測定の方法はストランドの燃焼による重量変化を測定することによって燃焼率を求める方法である。ストランドの重量を測定するためにコイルスプリングを使用し、その変位を差動トランスを用いて測定する。この方法は燃焼率の連続測定だけに限定していえば、機構的にも電気的にも非常に簡単であり、煙の影響も受けにくい燃焼面が不整一になることの影響も受けにくいので、これまでのフューズ法に代って一定圧力における燃焼率の測定には勿論、圧力が変化するときの測定にも使用出来る。

2. 実験装置および方法

測定に用いた燃焼ボンベは従来から使用されているものと同じタイプのもので、内径 160mm、深さ 240mm 内容積 4.8^l である (Fig.1)。透視窓による観測を容易にし、また内部に取りつけた装置の腐蝕を防止するため、ボンベ下部から加圧し同時に上部から燃焼ガスを排出するようにしてある。このボンベの中に Fig. 2 に示すような重量測定機構を入れ、所望の圧力に加圧して、あるいは圧力を連続的に徐々に変化させながら実験した。重量検知部に市販の直流差動トランスを使用し、そのコアがトランスの中央にくるように上下をコイルスプリングで支持し、その上にストランドを乗せた。この差動トランスは D. C 6V を加えた

昭和50年3月10日 受理

* 防衛大学校航空工学教室 〒239 横浜須賀町走水1-10-20

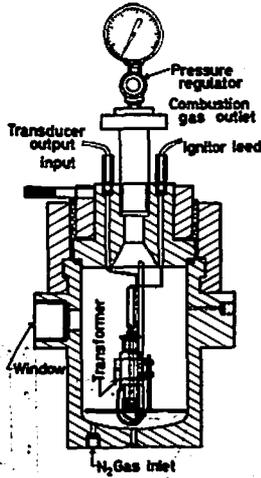


Fig. 1 Schema of the strand burner.

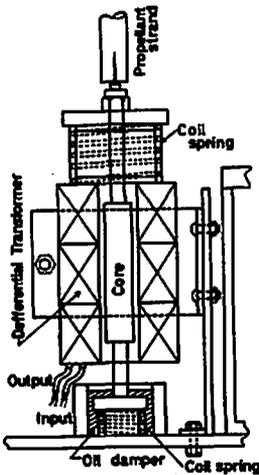


Fig. 2 Apparatus for measuring the strand weight.

とき、コア1 mmの変位に対し約0.5 Vの出力が得られる。この測定では1 gあたり62.5 mVの出力が得られるように、コイルスプリングの張力および入力を調整してある。また適当なダンピング特性を与えるため、コア下部にオイルダンパーを取りつけて、測定中に現れる過度の振動を除去するようにした。着火方法はストランドに直接強い荷重がかからないようにするために、0.18 φのコンスタンタン線をストランドの上に約1 mmはなしてはり、これに約5 Vの電圧を加えて赤熱させストランドに着火するようにした。

この重量測定機構から求めたストランドの重量減少率 dW/dt と、あらかじめ測定しておいた。

その点での単位長さあたりの重量 $\rho_p g A$ から、

燃焼率を $r = (dW/dt) / (\rho_p g A)$ として求めることが出来る。さらにストランドの断面積および密度が一定ならば、 c はまた $r = (dW/dt) / (W/l)$ となりデータの整理が簡単である。使用したプロペラントはポリサルファイド系のもの2種類である(以後PSI, PS2と略記する)。

3. 実験結果および考察

3.1 一定圧力下での測定

先ず初めにフューズ法などと同じように、ボンベ内圧力を一定にして測定した。Fig. 3は圧力が17.3 kg/cm²(g)における記録である。曲線の最初の急激な変

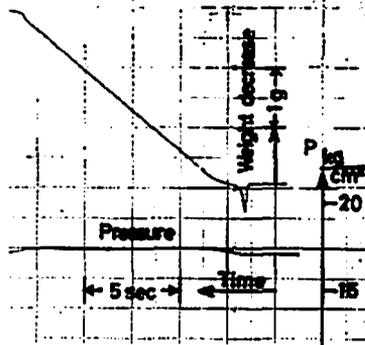


Fig. 3 Typical record at constant pressure (propellant; PSI)

化は着火のときに点火線が溶けて、ストランド表面にぶつかるために生じたものである。またストランドが燃えつきるときには燃え残りの部分が吹き飛ばすため、データの最後の部分で急激な重量減少を示している。着火後少しの間曲線の傾斜が比較的緩やかであるのは、着火を一様にするためにストランドを頂点付近だけ錐状に加工しているため、その重量減少量が少ないからである。Fig. 4はこのような加工をしない場合で

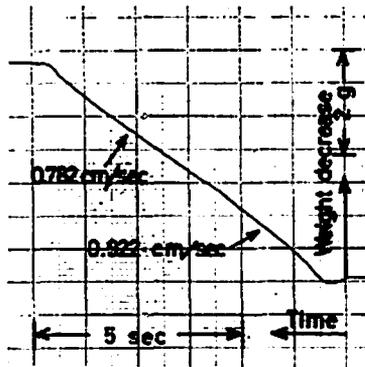


Fig. 4 A sample of the weight decrease record for non-uniform ignition.

あるが、どうしてもストランドの上面一様に着火しにくく、多くの場合縁の方から着火して、着火後しばらく燃焼面が斜めになり、より高い燃焼率を示すことになる。したがってこの部分はデータとして不適当であり、除外する必要があることがこの曲線から判断される。そこで曲線が着火時とか消火時のように直線でない部分を除き、ほとんど直線的に変化している部分の勾配から重量減少率を算出し燃焼率を求めた。差動トランスのコアには厳密にはストランドの重量だけでなく、燃焼ガス放出による推力荷重とその時の雰囲気ガスの浮力が加わっている。これらを考慮して重量減少率を求めなければならないが、これについては後述する(各図には便宜上重量減少と記したが、正しくはコアに加わる荷重の減少量である)。

一定圧力のもとでは、断面積および密度を一定に加工したストランドを使えば、重量は直線的に減少する筈である。もしストランドの中にある程度以上大きい気泡とか亀裂があると、重量減少の急激な増加または減少として曲線に特別な変化が現れるし、また途中から何等かの理由で燃焼率が変わると勾配が変化する。断面積一定でも密度が一様でなければ直線からはずれる。すなわち重量減少曲線から間接的ではあるが、燃焼の全経過をある程度知ることが出来る。したがって得られた曲線から、それをデータとして採用するか否か判断出来るし、また定常に燃焼したと思われる部分だけを採用出来るので、フューズ法より信頼性のあるデータが得られると思われる。

この方法ではまた2種以上のプロペラントを接合して、一回の測定で同時に各々の燃焼率を求めることが可能である。Fig. 5 は約 $17\text{kg/cm}^2(\text{g})$ に加圧して測定した例であり、接合部での燃焼の移行の様子も合わ

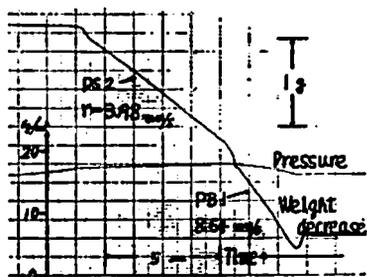


Fig. 5 Typical record for two pieces of strand bonded together.

せて知ることが出来る。なおこの場合、各ストランド毎に断面積を一定にしておくだけで充分であり、お互いに異っていても構わない。何種類のプロペラントを同時に測定出来るかは、重量測定機構の特性、測定圧

力、それぞれの燃焼率等によって異なるが、ここで使用した装置で、圧力 50kg/cm^2 ぐらいまでならば4種類程度は測定出来るであろう。

3.2 階段状にまたは連続的に変化する圧力下での測定

燃焼中に圧力を階段状に、または徐々に連続的に変化させて、一回の測定である圧力範囲の燃焼率を同時に求めることも出来る。Fig. 6 は PS2 について燃焼中に圧力を $3.8\text{kg/cm}^2(\text{g})$ と $11.3\text{kg/cm}^2(\text{g})$ に2段階

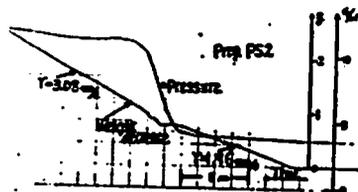


Fig. 6 Typical record for two pressure steps (propellant; PS2)

階に変えた場合の記録である。ここに使用したストランドの長さは 60mm であるが、 100mm 程度のものを使用すれば、この程度の圧力範囲では3~4段階に変えて測定することも可能である。

Fig. 7 は PS2 について圧力を連続的に変えて得られた記録である。約 3kg/cm^2 から 13kg/cm^2 までの燃焼率が一回の測定で得られたことになる。PS1 に

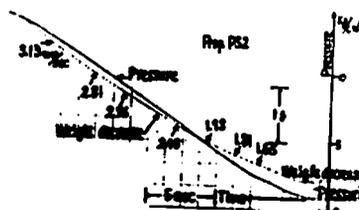


Fig. 7 Typical record for variable pressure (propellant; PS2).

ついて $1\sim 35\text{kg/cm}^2$ の圧力範囲を $1\sim 15$, $10\sim 25$, $20\sim 35\text{kg/cm}^2$ の3段階に分けて燃焼率を連続的に求めた。 $1\sim 15\text{kg/cm}^2$ の場合の記録を Fig. 8 に示した。

このようにして得られた燃焼率を一定圧力下での測定値と共に Fig. 9, 10 に示した。これらの図から明らかのように、圧力を連続的に変えて得られた結果は圧力を一定にして得られたものと良い一致を示している。この要領で燃焼率を測定すれば測定回数を少なく出来るし、また燃焼率が圧力に対して微妙な変化をす

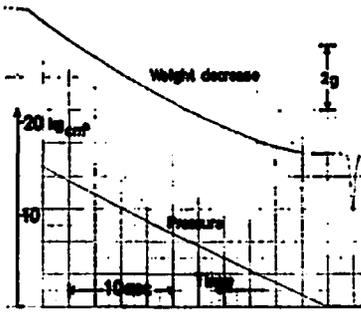


Fig. 8 Typical record for variable pressure (propellant; PS1).

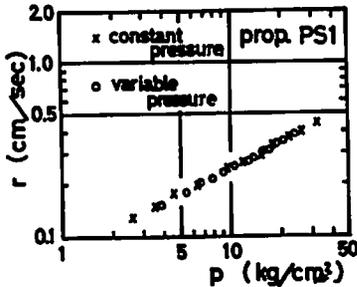


Fig. 9 Comparison of burning rate data obtained at constant pressure and for variable pressure (propellant; PS1).

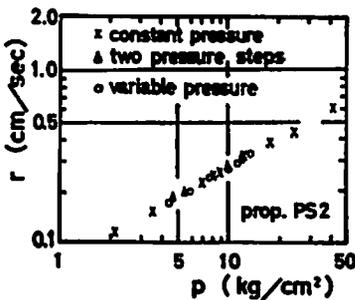


Fig. 10 Comparison of burning rate data obtained at constant pressure and for variable pressure (propellant; PS2).

る場合にもそれを見逃すことはないであろう。これらの曲線から重量減少率を求めるのに、ここでは関数微分をしたが、トランス出力をデジタル量として測定し数値微分するか、あるいは電気的に微分回路を通せば更に精度良く勾配を求めることが出来るであろう。

3.3 燃焼ガス放出による推力荷重と浮力の影響

差動トランスのコアにはストランドの重量 W の他に、燃焼ガス放出による推力荷重 F と浮力 G が加わっている。したがってコアに加わる力を R とすると

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dW}{dt} + \frac{dF}{dt} - \frac{dG}{dt} \quad (1)$$

となり、プロペラント、燃焼ガスおよび雰囲気ガスの密度をそれぞれ ρ_p , ρ_g , ρ_a 、ストランドの断面積を A 、長さを l 、燃焼率を r 着火から燃えつきまでの時間を t_b とすると W , F , G はそれぞれ次のようになる。

$$W = g \int_t^{t_b} \rho_p A r dt \quad (2)$$

$$F = \frac{\rho_p^2}{\rho_g} A r^2 \quad (3)$$

$$G = \rho_a g \int_t^{t_b} A r dt \quad (4)$$

今、燃焼ガス、雰囲気ガスを完全ガスとすると

$$\rho_g = \frac{p}{g R_g T_g}, \quad \rho_a = \frac{p}{g R_a T_a} \quad (5)$$

となり、燃焼ガスと雰囲気ガスの T_g , T_a および ρ_p A を一定と仮定すると

$$\frac{dW}{dt} = -\rho_p g A r \quad (6)$$

$$\frac{dF}{dt} = -\rho_p^2 g R_g T_g A r \left(\frac{r}{p} \frac{dp}{dt} - 2 \frac{dr}{dt} \right) \quad (7)$$

$$\frac{dG}{dt} = \frac{A}{R_a T_a} \left(l - \int_0^t r dt \right) \frac{dp}{dt} - \frac{A}{R_a T_a} p r \quad (8)$$

となる。

推力荷重と浮力を無視した場合、どの程度の誤差になるかを求めるために、燃焼率が $r = \alpha p^n$ で表わされ、圧力の変化率を $dp/dt = K$ として一定と仮定すると、(1)式は

$$\frac{dR}{dt} = -\rho_p g A r (1+C) \quad (9)$$

となり、ここで

$$C = C_F + C_G \quad (10)$$

$$C_F = -(2n-1) \alpha K \beta p^{n-2} \quad (11)$$

$$C_G = -\frac{(n+2)}{(n+1)} \alpha p + \left(\frac{Kl}{a} + \frac{p_0^{n+1}}{(n+1)} \right) \times \alpha p^{-n} \quad (12)$$

である。 C_F は推力荷重、 C_G は浮力の影響をそれぞれ表す係数である。 α , β はプロペラントの密度、燃焼ガス、雰囲気ガスで決まる定数で次のとおりである。

$$\alpha = \frac{1}{\rho_p g R_g T_g}, \quad \beta = \rho_p R_g T_g \quad (13)$$

実験に使用したプロペラント PS1 について、 C_F C_G および C を求めると Fig. 11 のようになる。(1)式

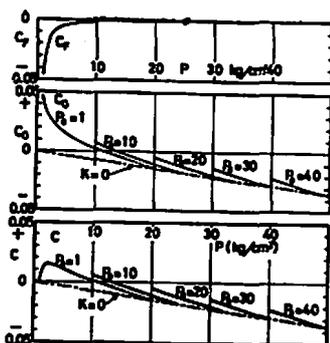


Fig. 11 Effects of thrust and buoyancy on burning rates.

$K=1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$, $l=5\text{cm}$, $n=0.52$, $a=0.075\text{cm/s}$, $\alpha=0.7127 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{kg}$, $\beta=15.328 \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^3$.

からもわかるように、 $n=0.5$ または $K=0$ のときに $C_F=0$ となり推力荷重による誤差は生じない。そうでないときでも極く低圧範囲においてのみ C_F が大きく、普通で使用される圧力範囲では C_F は非常に小さくなり無視出来る。 $n < 0.5$ では $C_F > 0$, $n > 0.5$ で $C_F < 0$ となり、 n が 0.5 から離れる程、また K が大きくなる程 C_F の絶対値は大きくなる。

浮力による誤差 C_G は n と K の他に、ストランドの長さ l と初期圧力 p_0 の影響を受ける。 $K=0$ のときには

$$C_G = -\alpha p \quad (1)$$

となり、 C_G は圧力に比例する。 K が 0 でないときには、たとえば Fig. 11 で $p_0=1$ の線を見ればわかるように、圧力の低いところで C_G は大きく、圧力の増加と共に減少し、途中で 0 となり続いて負の方向に増加して最後に $K=0$ の線にぶつかる。これはこの点でストランドが燃えつきることを示している。 l が長くなると、また K が大きくなると C_G は増加し、圧力の増加と共に同じ傾向を示す。 p_0 が増加すると C_G も若干増加する。

結局、 C_F と C_G を加えたものが全体としての誤差 C であり、Fig. 11 に見るように圧力が非常に低い部分を除いて C_G とほとんど同じであることがわかる。したがってあるプロベラントについて燃焼率を求めようとする場合、先ず大雑把に定圧下での測定をして、 a や n を求め、それらを用いて Fig. 11 のような誤差曲線を求める。それで許容される誤差範囲に入るように、ストランドの長さや初期圧力、測定圧力範囲、圧力上昇率などを決め、出来るだけ推力荷重や浮力の影響について補正しなくても良いようにすることが望ましい。補正する場合には次の方法による。圧力一定

下での測定では C は $(-\alpha p)$ であり、 α はプロベラントの密度および雰囲気ガスの種類温度で決まる定数であるので簡単に修正出来る。圧力が変化する時には C が r の関数となるので、逐次近似の方法で補正する必要がある。しかし、Fig. 11 からもわかるように、通常使用される圧力範囲では C は $K=0$ の線に接近しているので、たとえ圧力が変化しても、それぞれの圧力で $K=0$ であったかのように考えて、 $C=-\alpha p$ として補正しても良いように思われる。

3.4 この方法を用いる時の留意事項

- 1) ストランドの断面積、密度を一定にしておくことが望ましい。一定でないときでもその分布を知れば、燃焼率を求めることは可能である。
- 2) ストランド全体を有効に利用するために、一様な着火を行うことが必要である。
- 3) 燃焼ガス放出による推力荷重や浮力による誤差を許容範囲内にとどめるか、またはそれを補正する必要がある。
- 3) 圧力を連続的に変化させるときは、重量測定機構の動特性を考慮して、圧力の変化率をその追従性の許容範囲内にとどめる必要がある。

4. 結 言

ここに述べた固体推進薬燃焼率の連続測定の方法は、燃焼中のストランドの重量を連続的に測定することによって、燃焼率を求めるものである。この方法を用いて、ポリサルファイド系推進薬について、一定圧力下と、階段状にあるいは連続的に変化する圧力下で測定を行ったところ良好な結果を得た。最後にこの方法の特徴をまとめると次の通りである。

- 1) フューズやイオンプローブを挿入しなくても良い。しかし、あらかじめストランドの重量および長さを測定しておく必要がある。
- 2) 重量変化から燃焼中の全経過を知ることが出来るので、データの信頼性を高めることが出来る。
- 3) 2種以上のストランドを接合して、それらの燃焼率を同時に求めることが出来る。
- 4) 圧力を階段状に、あるいは連続的に変化させて、ある圧力範囲を一回で測定出来る。
- 5) 他に報告されている連続測定の方法にくらべて装置が非常に簡単である。

文 献

- 1) J. R. Osborn, R. J. Burick, and R. F. Panella; Rev. Sci. Instr., 37, 86 (1966)
- 2) R. L. Derr, and J. R. Osborn; J. Space, 6, 1120 (1969)
- 3) C. E. Hermance; AIAA, J., 5, 1774 (1967)

Continuous measurement of solid propellant burning rates

By K. Yamada, M. Goto, K. Hayashi

A new simple experimental method is presented for measuring the instantaneous burning rate of a solid propellant strand under continuously varying test condition. The burning rate is determined from the slope of the time dependent weight decrease curve. The variation in weight makes a strand move which is supported by coil spring, and its displacement is sensed with differential transformer.

Measurements were made for two polysulfide propellant formulations under various conditions, such as constant pressure, stepwise or continuously varying pressure, and furthermore by the use of strand consisted of several pieces bonded together.

This method seems to determine the burning rate easier and more accurately than before. The effect of thrust loading due to combustion gas injection and the buoyancy in the high pressure atmosphere on the burning rate discussed in detail, and it was concluded that the correction is unnecessary usually and very simple even if it is needed.

(Department of Aeronautical Engineering, National Defense Academy, Yokosuka)

ニュース

小型化された発破器

小型化された発破器が Excoa 社から紹介されている。寸法 $7\frac{1}{8} \times 3\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{4}$ インチ、重量 2 ポンドで "Maxi-Blaster" はこの種のものでは市場で一番小型軽量であると同社は言っている。

この発破器は現場で作業員がベルトにはさんで簡便に運べる、出力 400 ボルト、直列結線で 50 発、直並列結線 400 発までの能力である。

E/MJ-February 1975

New Product Digest

(岩武)

ダイナマイト最後の日

1976年の終りにはダイナマイトは最後の日となるでしょう。その理由は小薬径のウォーターゲルの TOVEX。ダイナマイトが 100 年前発明されて以来火薬の研究における最大と進歩である。

TOVEX はダイナマイトと同じかまたはそれ以下の値段でダイナマイトと同等の威力のものが開発された。そして火薬取扱者はニトログリセリンの頭痛が除かれたものを好むようになるだろう。

TOVEX は通常の発破パターンにおいて穿孔間の衝撃を小さくすることが実際の操作により判明した。普通のダイナマイトに比べ後ガスが減少し、優れた耐水性があることが立証された。

しかし最も大切なことは安全性が高いことである。TOVEX は衝撃や火に対し不慮の爆発が殆どない。これは取扱いや貯蔵に対して安全性が増すことを意味している。しかし TOVEX は火薬であるので取扱い保管は火薬として行わねばならない。

TOVEX は多くの品種と寸法のもが用意されていて建設、採石、石炭、金属鉱山等のそれぞれの用途に応じられる。雷管で起爆できない品種のものに対しては TOVEX と同様に安全な "DETAPRIM E" が用意されている。

現地試験によって試みて下さい。何故ダイナマイト最後の日が近づいていることがお判りでしょう。

Du Pont Company

Explosives Products Division,

E/MJ-December 1974

(岩武)