

力によつて薄層状燃焼物が一箇の集合体として移動することによつてできる。振動燃焼はこの亀裂の空間により熱エネルギーの供給や酸化力ある流動気体の作用が妨害されるために反応速度が遅くなるので起る。

(4) 従がつて振動燃焼は層状亀裂に伴なつて現われ、亀裂のピッチは振動の周波数に関係し、亀裂の幅は振幅に関係する。

(5) 仮比重の小さいほど、又還元剤粒子の径の大きいほど振動燃焼は激しい。開放管の場合、密閉管より激しい。

(6) 密閉管の場合、仮比重の小さいほど燃焼伝播速度が大きいのに開放管では逆の結果になること、直挿式が筒管式より燃焼伝播速度が遅いことなども上述の理論によつて説明できる。

(7) 振動燃焼を少なくすることが移時精度向上に必要であるが、それには装填を均一にしかもできるだけ密にし、管内の延焼率はできるだけ動かないようにし、又還元剤粒子は細かくすることが必要である。分解生成ガスの量はあまり多くなく、又分解速度も遅い方がよい。

文 献

- 1) 米田, 疋田: 工火 16 85 (1955).
- 2) 小川: 粉体科学序説 (工業物理学講座 (1957). 日刊工業新聞社.)
- 3) 若圃: 工業火薬協会春季講演会 (1957).
- 4) 中原, 疋田: 工火 20 356 (1959).
- 5) 中原, 疋田: ibid. 20 275 (1959).
- 6) 若圃: ibid. 20 50 (1959).

Studies on Delay Powders (IV)

The Oscillatory Burning of Delay Powders.

Shōji Nakahara and Tsutomu Hikita

Oscillatory propagation is observed in the burning of delay powders and at the same time immediately behind the wave front the layerwise cracks are produced which may be intimately related to the oscillation of the burning. Wave lengths and widths of these oscillations change with loading density, diameter of reducing agents, construc-

tions of delay elements and soon. A mechanism of oscillatory burning and reasons of appearance of layerwise cracks or striped patterns are explained here. And relations between the accuracy of delay time and the oscillatory burning of delay powders are also stated.

ロケット火薬の形状に関する考察特に内面等齊 燃焼の場合について

清水 武 夫*

I. 緒 言

ロケット火薬の形状の設計については多数の文献があるが、それ等は一般に先づ取る形状を与えてそれが如何なる燃焼特性を示すかを考察したものである。然るに実用に当つてはエンジンの要求する性能に対して如何なる形状が最適であるかを定める必要に迫られ

る。この場合従来の設計理論によれば種々形状や条件を前提として計算しこれ等のうち何れが最適であるかを暗探する等所謂試行錯誤法によらねばならない。

本文の目的は代表的な各種の形状についてその設計理論相互を貫通する相似条件を見出し全体として努めて明快な統一理論を建設し、以つて上記の如き設計上の欠陥を除去するにある。

本文では現在及び将来の実用上の要求を考慮し内面

昭和35年3月8日受理

* 大日本セルロイド株式会社・相谷火工株式会社

等高燃焼の場合を主として述べる。

Ⅰ. 形状設計の一般概念

薬質は各部均質であるとする。設計に当つては火薬の燃焼表面積と燃焼時間との二つの要求が前提されるのが通常であるが、単にこれに応じて火薬の形状を設計することは必ずしも難事ではない。ただこれを最も経済的な容器に収め得るように火薬の形状寸度を定めなければならないところに問題点がある。

先づ火薬が薄いリボン状のものとし、その片面からのみ燃焼する場合を考える。即ち図1, a1, b1 の如くなる。但し小さい矢印は燃焼が進行する方向を示す。設計に当つてはこれをなるべく小さい容器中に畳みこむようにしなければならない。即ち同図 a2, b2 より a3, b3 の如くなる。これ等は燃焼面積が等しいので近似的に同一の燃焼状況を示すものと考えられる。

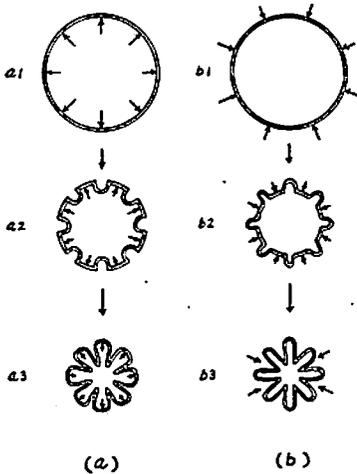


Fig. 1 Configurations of ribbon propellant.

火薬が相当に厚い一般の場合にも大体以上の考えのもとに設計を進めるのであるが、この場合には火薬の屈曲部に於ける燃焼面積が時間とともに変化するので更に細部の考察が必要になる。

Ⅲ. 記号及び定義

火薬はその長辺について同一形状の棒状又は管状としその両端は燃焼を防いであるものとする。即ちその長辺の表面に直角な断面（以下火薬断面という）の形状寸度は長さに沿つて各部同一とする。その断面について次の記号及び定義を定める。

w : 設計基準薬厚（設計薬厚）、設計上に用いる仮想の最薄薬厚であつて例えば図5,6に示す如くである。

w' : 製造薬厚、実際に製造する場合の薬厚であつて、例えば図5,6に示す如くである。 w' は w と一致する場合もあればそうでない場合もある。

L : 燃焼線長、某時刻に於ける火薬の燃焼面の火薬

断面との交線の長さ。

l : 燃焼線の部分長

r : 火薬の外半径

n : 火薬断面に於ける設計単位の数（突起の数、又は多角形の角数、歯数等）

θ : 一つの設計単位に於ける中心角（多角形の一辺に対する中心角）

θ' : 火薬断面中錐形突起頭の頂角

θ_x : 同上その底角（図5参照）

φ : 円弧に対する中心角（図5,6参照）

S : 設計基準薬厚に於ける等高燃焼部分（又は等高燃焼に近似した部分、図7参照）の火薬断面積

S' : 残片の火薬断面積、 $S'' : \pi r^2$ より $S+S'$ を減じた理論空隙

o : 火薬断面の中心点

o' : 発起点または会合点（後述）

中立線：常に燃焼面に直角をなし、燃焼の進行軌跡を現わす線をいう。例えば図5,6中 $o'n$ 又は $o'n'$ なる複鎖線にて示す。

発起線（発起点）：火薬断面にて燃焼の発起する仮定の線（点）をいう。例えば図5,6中 a 線（ o' 点）にて示す。

初燃線：実際に燃焼を開始する線の跡であつて燃焼開始面と火薬断面との交線をいう。例えば図5,6中 b 線にて示す。

会合線：火薬断面にて二つの燃焼面の燃焼の進行が会合する線をいう。例えば図5,6中 on なる鎖線にて示す。

会合点：火薬断面にて燃焼曲面の燃焼の進行が会合する点をいう。例えば図6 p 点にて示す。

内面：中立線が発散する方向に燃焼する火薬面

外面：中立線が交叉する方向に燃焼する火薬面

燃焼防止面：燃焼防止の為に加工してある火薬面、例えば図2, cc' 線にて示す。

Ⅳ. 基礎燃焼形の考察

4.1 燃焼に関する基礎仮定

燃焼は常に燃焼面に直角なる方向に進行し、その速度は各部同一であると仮定する。実際には薬質の不均一、火薬ガスの流動状態の不均一等によつて必ずしもこの仮定の如くならぬであろうが²⁾、経験的に近似法則として成立することが認められる。またこのような仮定のもとに設計を遂行すれば理想と実際との差異を求めその原因を究明し修正法則をそれより見出すことも可能であろう。

4.2 燃焼体の基本形

発起線または初燃線の設計はここでは直線、円の二つに限る。その他複雑な曲線形も考え得るであろうが

実際にはこの二つの組合せにて十分代用し得る。

火薬が厚みを有しこれが制限された容器内に積みこまれたときは一般に燃焼面積は時間とともに変り、これが為めに内圧、燃焼速度、推力が変化する。而してこの度合の調節は部分的に内、外面燃焼を適当に組合わせることによつて行われる。

燃焼体の基本形としては図2中(a),(b),(c)の三種が挙げられる。即ち(a)は平行体であつて二つの燃焼面が平行し互に反対方向に燃焼するもの、(b)は外面扇形体であつて燃焼面は一点 o' を会合点とする円弧をなして燃焼するもの、(c)は内面扇形体であつて燃焼面は一点 o' を中心とし o' を発起点としてそれと反対方向に燃焼するものである。若し(b),(c)にて角 φ 、薬厚 w の値が互に相等しいときは両

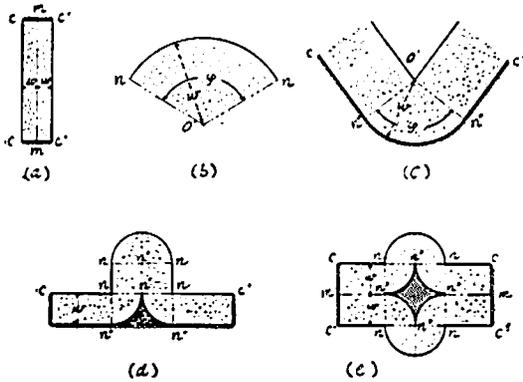


Fig. 2 (a), (b) and (c) are the three partial fundamental configurations, and (d) and (e) the patterns of association of (a), (b) and (c).

者の燃焼面積の和は常に変わらず、この値は $l = w\varphi$ である。従つて(a),(b),(c)の三つの基本形を適当に組合わせるときは燃焼面積の不变な所謂等燃焼が得られる。同図(d),(e)はその例であり、残片(複斜線の部分)の燃焼を除けば等燃焼を示す。

4.3 交換法則

外面扇形体と同一燃焼特性を有する錐体が存在し、従つてこれ等相互の交換が可能である。これを本文では交換法則と称する。

図3に於いて左列Aなる外面扇形体に等価な錐体の設計を右列Bに示す。即ち錐体は二つの相等しい直角三角形 mnn' が会合線 mn' にて相接した形である。 mn は燃焼線であつてその長さを扇形体の燃焼線長の半分 $\frac{1}{2} \varphi w$ に等しくとり、 nn' は中立線であつてその長さを扇形体の薬厚 w に等しくとる。従つて錐体の頂角は

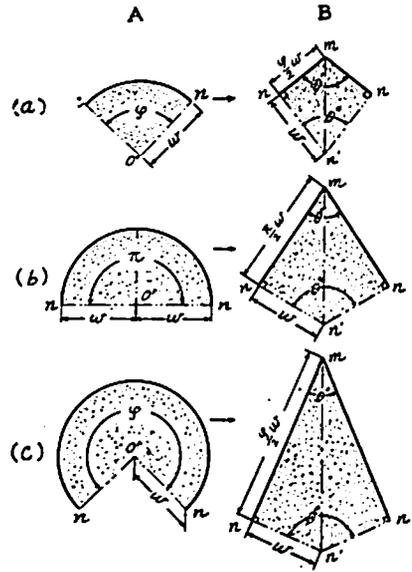


Fig. 3 Correspondence between round and rhombic partial configurations.

$$\angle mnn' \equiv \theta' = 2 \arctan \frac{2}{\varphi} \quad (1)$$

また底角は

$$\angle nn'n' \equiv \theta'' = 2 \arctan \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

にて表わされる。即ちこれ等は扇形角 φ にも関係し薬厚 w には関係しない。

この交換法則は特に内面燃焼に於いて外面扇形体を錐体にて交換しエンジン内の空積を有効に利用する為により重要な法則である。

4.4 組合せ突起

燃焼室の空積を有効に利用する為には更に種々に形を組合せた突起を用いるのが通常である。これ等は部分的には通常平行体、外面扇形体又は錐体より成り、等燃焼の為には平行体以外の部分は同一火薬断面中に存する他の内面扇形体の開角に対応していなければならない。

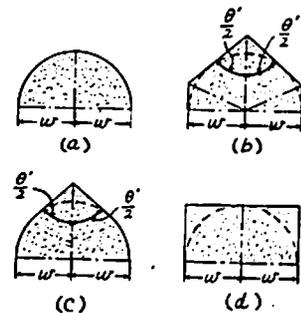


Fig. 4 Head configurations associated with round, rhombic and parallel surfaces.

この場合考え得る突起の形は図 4, (a), (b), (c), (d) となる。これ等の薬厚が互に相等しいときは燃焼時間は同一となる。これ等の中で (b), (c), (d) は表面が多角形をなしている為に燃焼線長は円の場合よりも長く、このことを設計上利用する機会が多い。その各々の燃焼線長 l は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} a : l/w &= \pi \\ b : l/w &= 2\cot \frac{\theta'}{2} + 4\tan \frac{\theta'}{4} \\ c : l/w &= \theta' + 2\cot \frac{\theta'}{2} \\ d : l/w &= 4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

即ち l/w は (a), (d) の場合は一定であり, (b), (c) の場合は頂角 θ' の函数であつて θ' が小さいほどこの値は大きくなる。(b), (c), (d) なる形は $\varphi > \pi$ なる内面扇形体に対応するものであつて内面燃焼火薬の設計に適する形である。若し以上の四つの形にて支障を生ずる如き場合には適当に多角形の角数を増加することも考えられる。

V. 火薬断面設計上の基本形式

5.1 同心円形式

これは最も簡単な形であつて断面が円形の管状薬の中に向じく断面が円形の棒状の火薬を挿入したものである。この場合全燃焼線長と薬厚との比は

$$L/w = 4\pi$$

であつて等容燃焼が得られる。(但し最外面は燃焼防止面とする。)

5.2 内面扇形体と錐形突起との組合せによる形式 (スター形)

(1) $\theta' > \theta$ なる場合

図 5, (a) はこの場合の火薬断面を示す。左図中央の尖頭星形の線 a は突起線であり, 円頭星形の線 b は初燃線である。後者は製造上の難易, 薬の機械的強度, 使用条件, 燃焼特性等を考慮して定める。右図はこの設計単位部分を示したものである。

これより等容燃焼を条件として次の諸関係が得られる。

$$\theta = \varphi - 2\arctan \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

$$\theta' = 2\arctan \frac{2}{\varphi} \quad (5)$$

$$\theta_x = \arctan \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

$$w/r = \frac{1}{1 + \frac{\sin \theta_x}{\sin \frac{\theta}{2}}} \quad (7)$$

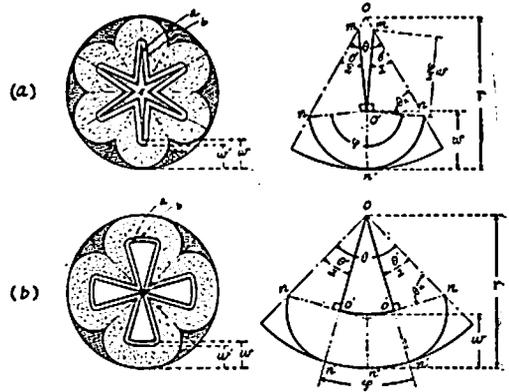


Fig. 5 Internal burning configurations of star form, (a) $\theta' > \theta$ and (b) $\theta' < \theta$.

$$L/w = n l/w = n \pi = S/w^2 \quad (8)$$

$$L/r = (L/w) \cdot (w/r) \quad (9)$$

$$S/\pi r^2 = \frac{1}{\pi} (S/w^2) \cdot (w/r)^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S''/\pi r^2 &= \frac{1}{\pi} (S''/w^2) \cdot (w/r)^2 \\ &= \frac{1}{\pi} \left\{ n \sin \theta_x \left(\sin \theta_x \cdot \cot \frac{\theta}{2} - \frac{\varphi}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cos \frac{\theta'}{2} \right) \right\} \cdot (w/r)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$S'/\pi r^2 = 1 - (S/\pi r^2) - (S''/\pi r^2) \quad (12)$$

$$om = (r-w) \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\varphi}{2} w \cos \frac{\theta'}{2} \quad (13)$$

$$on = om + w \sqrt{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2 + 1} \quad (14)$$

(2) $\theta' < \theta$ なる場合

図 5 中, (b) の左図はこの場合の火薬断面を示す。またその右図はこの設計単位部分を示す。

等容燃焼を条件として次の諸関係が得られる。

$$\frac{\theta}{2} = \arctan \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} + \frac{r}{w} - \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

$$\frac{\theta'}{2} = \arctan \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} \quad (16)$$

$$\theta - \theta' = \varphi \quad (17)$$

$$\begin{aligned} L/w &= n \left[\pi + \frac{r}{w} \left\{ 2 \cdot \frac{r}{w} - (2 + \pi) \right\} \right] \\ &= S/w^2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$L/r = (L/w) \cdot (w/r) \quad (19)$$

$$S/\pi r^2 = \frac{1}{\pi} (S/w^2) \cdot (w/r)^2 \quad (20)$$

$$S'/\pi r^2 = \frac{n}{\pi} \left[\frac{\theta'}{2} - \frac{w}{r} \left(1 - \frac{w}{r} \right) - \frac{\pi}{2} \left(\frac{w}{r} \right)^2 \right] \quad (21)$$

$$S''/\pi r^2 = 1 - (S/\pi r^2) - (S'/\pi r^2) \quad (22)$$

$$on = w/\sin \frac{1}{2} \theta' \quad (23)$$

(3) $\theta' = \theta$ なる場合

この形は図 5, (a) にて二つの m が, (b) にて二つの o' が互に相重つた形であつて (a) の場合は $\varphi = \pi$, (b) の場合は $\varphi = 0$ である。このような構造によつて残片の燃焼を除いては常に燃焼面積が一定である。諸元の関係は

$$r/w = 2.57, \theta = 64^\circ 58', n = 5.54, l/w = \pi$$

となる。この形は最も空間利用率の高い(理論上100%)形ではあるが角数は 5.54 なる端数となり近似的に 6 条螺旋形となる。これは理論上のもので実際には突用し得ぬであろうか。

(4) 設計諸元

以上三つの場合に就いて夫々の計算式により求めた設計の為必要な主要諸元の値を例示すれば表 1 の如くなる。

表 1 スター形に関する設計諸元

n	θ	θ'	φ	w/r	L/r	$S/\pi r^2$	$S'/\pi r^2$
2	180.00°	39.50°	140.50°	0.264	6.52	0.548	0.026
5	72.00	62.20	9.80	0.376	6.78	0.812	0.136
8	45.00	74.66	150.31	0.325	6.82	0.705	0.108
11	32.73	82.46	129.97	0.274	6.83	0.595	0.075
14	25.71	88.90	116.82	0.238	6.79	0.514	0.055

5.3 内面扇形体と組合せ突起との組合せによる形式ギヤー形

(1) $\theta' > \theta$ なる場合

図 6, (a) の左図はこの場合の火災断面を, 同右図はこの設計単位部分を示す。後者に於いて斜線の部分は等斉燃焼をする筈であるが, $o' n' n'' o'$ なる弧体の部分が等斉燃焼せず時間とともに燃焼面積を増加する。この増加分を打消す如く突起頭部の形を図 4, (c) に示す組合せ突起の形に修正してある。

これより等斉燃焼の条件のもとに次の関係が得られる。

$$\theta - \varphi = 2 \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} \quad (24)$$

$$\theta' + 2 \cot \frac{\theta'}{2} = \theta + \pi \quad (25)$$

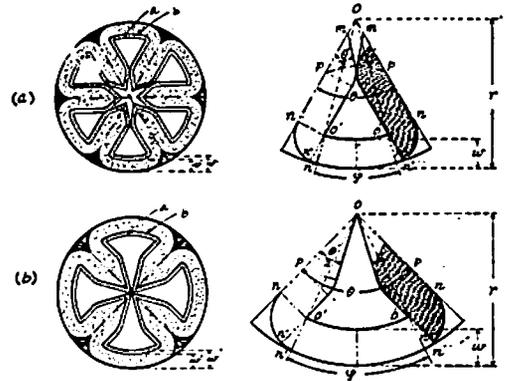


Fig. 6 Internal burning configurations of gear form, (a) $\theta' > \theta$ and (b) $\theta' < \theta$.

$$L/w = n \left\{ \theta + \pi - \frac{2}{\sin \frac{\theta}{2}} + 2 \cot \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} \right\} = S/w^2 \quad (26)$$

$$\frac{1}{\frac{r}{w} - 1} + \left(\frac{r}{w} - 1 \right) \varphi = S/w^2 \quad (26)$$

$$L/r = (L/w) \cdot (w/r) \quad (27)$$

$$S/\pi r^2 = \frac{1}{\pi} (S/w^2) \cdot (w/r)^2 \quad (28)$$

$$S'/\pi r^2 = \frac{n}{\pi} \left(\frac{w}{r} \right)^2 \left[\left\{ \left(\frac{r}{w} \right)^2 - 1 \right\} \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} - \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} \tan \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (29)$$

$$S''/\pi r^2 = 1 - (S/\pi r^2) - (S'/\pi r^2) \quad (30)$$

$$om = op - pm \quad (31)$$

$$op = \frac{w}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (32)$$

$$pm = \frac{w}{\sin \frac{\theta'}{2}} \quad (33)$$

$$pn = on - op \quad (34)$$

$$on = \sqrt{r(r-2w)} = w \cot \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} \quad (35)$$

(2) $\theta' < \theta$ なる場合

図 6, (b) の左図はこの場合の火災断面を, 同右図はこの設計単位部分を示す。

等斉燃焼の条件のもとに得られる関係式は次に示すものを除いては $\theta' > \theta$ なる場合と共通である。

$$L/w = n \left\{ \theta + \pi - \frac{2}{\sin \frac{\theta'}{2}} + 2 \cot \arcsin \frac{1}{\frac{r}{w} - 1} + \left(\frac{r}{w} - 1 \right) \varphi \right\} = S/w^2 \quad (36)$$

$$op = \frac{w}{\sin \frac{\theta'}{2}} \quad (37)$$

(3) w/r の臨界値及びこれに応ずる L/r の値
 図6にて知られるように, w/r の値を任意に採り得る或る範囲があり, その最大の臨界値が存在する。これは $pn=0$ なる条件により求められる。

(34), (35), (32) 式よりこの条件を考慮して

$$r/w = 1 + \sqrt{1 + \left(\operatorname{cosec} \frac{\theta'}{2} \right)^2} \quad (38)$$

また (26) 式に $pn=0$ なる条件を代入して

$$L/w = n \left\{ \theta + \pi + \left(\frac{r}{w} - 1 \right) \varphi \right\} \quad (39)$$

この二式より臨界値 $(w/r)_{\max}$ 及びこれに応ずる $(L/r)_e$ を求め得る。(同様にして臨界値 $(S/\pi r^2)_e$, $(S'/\pi r^2)_e$ をも求め得る。) 表2はこれ等の値を示す。

表2 ギャー形 $(w/r)_{\max}$ の値及びこれに応ずる $(L/r)_e$

n	$(w/r)_{\max}$	$(L/r)_e$
2	0.242	6.82
4	0.299	7.57
6	0.309	8.26
8	0.263	8.59
10	0.228	8.82
12	0.200	8.98
14	0.179	9.09

(4) 設計諸元

この形について計算により求めた主要諸元の値を例示すれば表3の如くなる。(表中括弧内の数字は w/r の臨界値以上に属し尖はしないが線図描画の便宜上載せたものである。)

表3.1 ギャー形 $n, w/r$ に応ずる L/r の値

n	w/r	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30
4	12.18	11.34	10.45	9.53	8.56	(7.60)	
7	16.37	14.76	13.09	11.38	9.58	(7.71)	
10	18.83	15.78	12.65	9.46	-	-	
13	20.14	15.21	10.16	-	-	-	

表3.2 ギャー形 $n, w/r$ に応ずる $S/\pi r^2$ の値

n	w/r	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30
4	0.388	0.505	0.598	0.667	0.709	(0.720)	
7	0.521	0.658	0.750	0.797	0.793	(0.737)	
10	0.599	0.703	0.725	0.663	-	-	
13	0.641	0.678	0.582	-	-	-	

表3.3 ギャー形 $n, w/r$ に応ずる $S'/\pi r^2$ の値

n	w/r	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30
4	0.007	0.014	0.025	0.040	0.062	(0.092)	
7	0.012	0.024	0.043	0.070	0.108	(0.160)	
10	0.017	0.034	0.062	0.100	-	-	
13	0.021	0.044	0.080	-	-	-	

5.4 準ギャー形 (波形)

これは図7に示す形であつて純粋に等容燃焼はしないが近似的に等容燃焼形として用い得るものである。通常この形は単独に用いられることは少なく前述のスター形の $\theta' > \theta$ なる形に接続して用いられることが多い。よつてこのように接続されるものとして述べる。

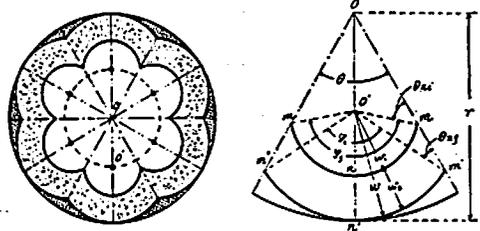


Fig. 7 Internal burning configuration of wave form attached to the end of the star.

スター形の葉厚及び燃焼線長を夫々 w_1, L_1 , 波形の葉厚を w_2 , これに応ずる燃焼線長を L_2 , 全葉厚を w , 両者の接続部の諸元を添字 i にて, 波形の終末に対応する諸元を添字 f にて示す。然るときは次の諸関係が得られる。

$$\theta = \varphi_i - 2 \arctan \frac{\varphi_i}{2} \quad (40)$$

$$\theta_{at} = \arctan \frac{\varphi_i}{2} \quad (41)$$

$$\theta_{xf} = \frac{1 - \frac{w_2}{w_1}}{\frac{w_2}{w_1}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (42)$$

$$\frac{L_2}{w_1} = n \left(1 + \frac{w_2}{w_1} \right) (\theta + 2\theta_{xf}) \quad (43)$$

$$\frac{L_1}{w_1} = n \varphi_i \quad (44)$$

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{1}{\varphi_i} \left(1 + \frac{w_2}{w_1} \right) \cdot (\theta + 2\theta_{xf}) \quad (45)$$

$$w = w_1 + w_2 \quad (4)$$

$$\frac{w}{r} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{\sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{w_2}{w_1}} \right) + 1}} + 1}} \quad (47)$$

$$S'/\pi r^2 = \frac{n}{\pi} \left\{ \frac{\theta}{2} - \frac{\varphi_1}{2} \left(\frac{w}{r} \right)^2 - \left(1 - \frac{w}{r} \right) \frac{w}{r} \sin \frac{\varphi_1}{2} \right\} \quad (48)$$

$$S/\pi r^2 = 1 - S'/\pi r^2 - \frac{n}{\pi} \left\{ \frac{\varphi_1}{2} \left(\frac{w_1}{r} \right)^2 + \left(1 - \frac{w}{r} \right) \frac{w_1}{r} \sin \frac{\varphi_1}{2} \right\} \quad (49)$$

この形の設計に必要な主要諸元の計算値を示せば表4の如くである。

表 4.1 波形 w_2/w_1 に応ずる L_2/L_1 の値

w_2/w_1	0.2	0.4	0.6	0.8
6	1.027	1.077	1.136	1.199
9	1.020	1.058	1.105	1.154
12	1.016	1.048	1.086	1.129
15	1.013	1.041	1.074	1.111

表 4.2 波形 $n, w/r$ に応ずる $S/\pi r^2$ の値

w/r	0.24	0.28	0.32	0.36
6	-	-	-	-
9	-	-	0.019	0.068
12	-	0.025	0.071	0.116
15	0.014	0.060	0.103	0.145

w/r	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56
6	0.034	0.084	0.129	0.172	0.212
9	0.112	0.155	0.196	0.235	0.273
12	0.157	0.197	0.237	0.275	0.313
15	0.186	0.226	0.265	0.304	0.342

表 4.3 波形 $n, w/r$ に応ずる $S'/\pi r^2$ の値

w/r	0.24	0.28	0.32	0.36
6	-	-	-	-
9	-	-	0.087	0.072
12	-	0.060	0.049	0.039
15	0.047	0.038	0.031	0.026

w/r	0.40	0.44	0.48	0.52
6	0.132	0.110	0.094	0.080
9	0.060	0.050	0.043	0.037
12	0.034	0.028	0.024	0.021
15	0.021	0.018	0.015	0.013

VI. 設計諸元の相似性と各種基本形の特性

6.1 設計諸元の相似性

以上に於ける設計諸元の計算公式を通覧すると設計主要諸元たる $L/r, S/\pi r^2, S'/\pi r^2$ 等は波形を除いて一般に角数 n 及び w/r の函数として表わされる。即ちこの場合 n 及び w/r の値を相等しくする二つの火薬は $L/r, S/\pi r^2, S'/\pi r^2$ をも相等しくするという相似性が成立つ。この中で最も重要なものは $L/r \sim w/r$ に関する相似性である。即ち w/r は火薬の燃焼時間を代表し、 L/r は推力を代表するからこの関係が設計上の基礎になる。また $S/\pi r^2$ に関する相似性は設計基準薬厚 w を採つた場合与えられた燃焼室空間が火薬によつて占有される割合を大体表わすから、空間利用率の判断に適する。また $S'/\pi r^2$ に関する相似性は残片に関し衝突した火薬が無効に消費される割合を判断するに適する。これ等により設計上の目的に応じて実際の火薬の形を定めることになる。

この相似性の関係を示すと図 8, 9, 10 の如くなる。

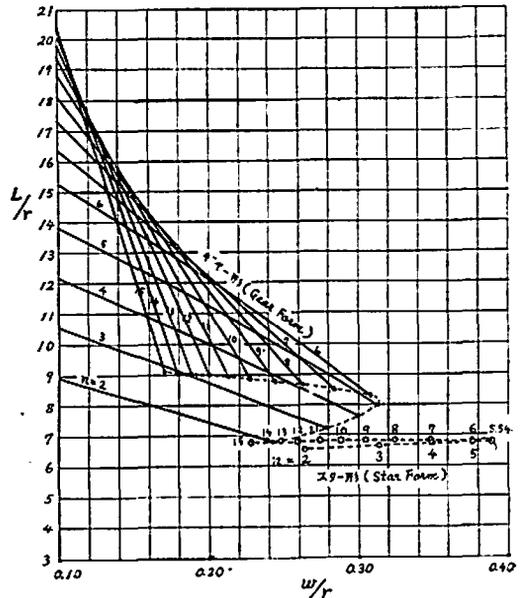


Fig. 8 L/r versus w/r .

6.2 各種基本形の特性の比較

図 8, 9, 10 ならびに V までの記述によつて各種の基本形式の特性を比較すれば次の如くである。

(1) 同心円形: L/r の値が 4π に限定される。但し幾重にも管状火薬を同心円として重ねるときは理論上無限にこの値を増すことが出来る。この形は火薬を二つ以上のブロックにしなれば理論上緻密な等容燃焼は得難い。然しながら理論上残片は全く生ぜず空間利用率が高い長所がある。

(2) スター形: L/r の値はギヤ形に比較して小

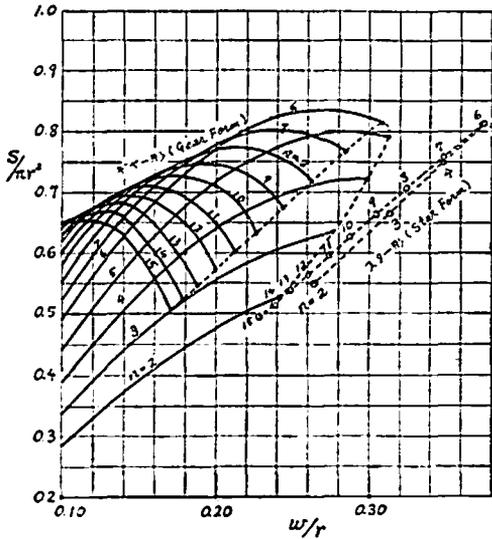


Fig. 9 $S/\pi r^2$ versus w/r .

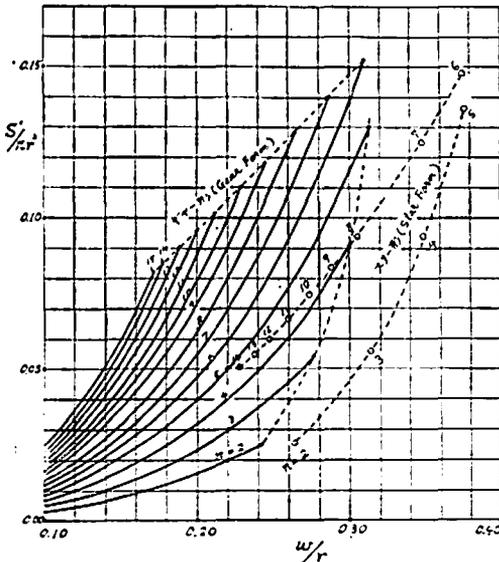


Fig. 10 $S'/\pi r^2$ versus w/r .

さく、 w/r の変化に対してこの値があまり変わらないのが特徴である。即ち推力が比較的 low 且ほぼ一定であり燃焼時間を角数 n の選択によって調節する如き場合に適當する。なお波形に接続するときは近似的に等容燃焼を行うことができるので w/r の範圍を更に大きくすることが出来る。従つて比較的長秒時低推力を要求される場合の設計に適當する。

$S/\pi r^2$ の値は角数 n によつて甚しく影響され $n=5, 6$ のとき最大である。即ちこの場合の空間利用率が最も高い。

$S'/\pi r^2$ の値はまた角数によつて甚しく影響され、同様に $n=5, 6$ のとき最大である。即ちこの場合は残片

の大きさもまた大である。即ち $n=5, 6$ なる設計では有利な要素と不利な要素とが相取つている。然しながら燃焼終末を波形に接続するときは w/r の増加とともに残片は小さくなるから、この不利な影響を取る程度除去することが出来る。

(3) ギャー形： L/r の値はスター形に比較して大きく、角数 n を一定とするとき w/r の増加に対して L/r の減少が著しい。この傾向は n を増すに従つて大となる。 w/r を一定とするときは L/r は n により変化するが、一般に L/r の最大値が存在する。この最大値を示す n の値は w/r の値によつて異なる。従つて図 8 に示す如く $L/r \sim w/r$ の曲線は n をパラメーターとする包絡線を形成する。ギャー形は設計上 $L/r \sim w/r$ の適用範圍が広く、従つてその適用範圍が広いことが同図にて知り得る。

$S\pi r^2$ の値は n と w/r の値によつて複雑な変化をなし、 n をパラメーターとする包絡線を形成する。よつて $n=5$ 以上の曲線では w/r の取る値に対して $S/\pi r^2$ の極大値が存在する。即ちこれは空間利用率を最大ならしめるような最適葉厚が存在することを示す。而して一般に空間利用率が最大なもの $n=6$ の場合であつて、その最大部は $w/r=0.27$ 附近にある。

$S'/\pi r^2$ の値は一般に $n, w/r$ を増すに従つて増す。

この形はスター形よりも短秒時高推力を要求される場合の設計に適當する。

(4) 波形：この形はスター形に接続したとき特にその効用が大である。而してこの場合は燃焼線長の比 L_2/L_1 と残片 $S'/\pi r^2$ の値が問題となる。 L_2/L_1 の値が 1 に近いときは近似的に等容燃焼と看做される。この値の例を挙げると $n=6, w_2/w_1=0.5$ にて $L_2/L_1=1.1$ 、また $n=6, w_2/w_1=0.8$ で $L_2/L_1=1.2$ である。 n を増加すれば一般に L_2 の増加率は小さくなる。従つてどの程度にこの変化を許し得るかは設計上の目的によつて定められ、これより葉厚 w_2 が定められる。 $S'/\pi r^2$ の値は w/r が増加し、また n を増加するに従つて減少する。

Ⅶ. 理論の応用

目的によつて種々な場合があるがここでは所要の推力と燃焼時間とが与えられて葉形及びその寸度を定める場合について述べる。

推力 F は理論的に燃焼室内圧 P_1 、ノズルの最狭部面積 A_t 、同出口面積 A_e 、火薬ガスの比熱比 k 、外気圧力 P_2 の函数である。³⁾ 今推力修正係数を ζ_F とすればこの関係は

$$F/\zeta_F = \Phi_1(P_1, P_2, A_t, A_e, k) \quad (50)$$

$$\text{但し } A_e/A_t = f(P_1/P_2) \quad (50')$$

但し P_2 はノズル出口圧力である。上式より

$$A_t P_1 = \Phi_2(P_2, A_c, k, F/\zeta_p) \quad (51)$$

として $A_t P_1$ なる値を求める。次に火薬の標準比推力 I_{sp} を既知しこれより RT なる値を求める。但し R は火薬 1kg についてのガス恒数である。この算式は

$$RT = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{1}{2} g I_{sp}^2 / \left\{ 1 - \left(\frac{P_{20}}{P_{1s}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\}, \quad (P_{20} = P_2) \quad (52)$$

ここに P_{20} はノズル出口圧力で標準大気圧に等しいとし、 P_{1s} は所定の標準燃焼室圧力で例えば 70kg/cm² とする。単位時間に於ける火薬の所要燃焼量 \dot{G} は、流量修正係数を ζ_a として

$$\dot{G}/\zeta_a = \Phi_3(A_t P_1, RT) \quad (52)$$

一方に於いて薬長を L_p 、燃焼速度を r_b とすれば \dot{G} は

$$\dot{G} = L_p \cdot L \cdot r_b \cdot \rho_p \quad (53)$$

但し r_b は内圧 P_1 、薬温 τ_p の関数であつて

$$r_b = \Phi_4(P_1, \tau_p) \quad (54)$$

また ρ_p は火薬の密度である。(53) 式より

$$\frac{L}{r} = \frac{\dot{G}}{L_p r_b \rho_p r} \quad (55)$$

にて L/r が求められる。

次に燃焼時間 t_b は製造薬厚 w を r_b にて除して

$$t_b = w/r_b \quad (56)$$

設計基準薬厚 w と w' との関係は製造上の条件、薬の性質、燃焼特性等を考慮して予め定められる。即ち

$$w'/w = k_w \quad k_w < 1 \quad (57)$$

(56), (57) 式より

$$\frac{w}{r} = \frac{t_b r_b}{k_w r} \quad (58)$$

次に図 8 に (55), (58) 式によつて求められた L/r 及び w/r の値を適用して角数 n を求め、これと本文

の諸式を利用して設計寸度を定めることが出来る。また w/r の値を図 9, 10 に適用して $S/\pi r^2, S'/\pi r'^2$ の値を求め得る。よつて所要薬量 G は

$$G = \pi r^2 L_p \rho_p \{ (S/\pi r^2) \cdot k_w + (S'/\pi r'^2) \} \quad (58)$$

Ⅷ. 結 論

(1) 内面等斉燃焼薬形について n をパラメーターとする $L/r \sim w/r$ なる相似性を見出し、設計に関する一般理論を確立し得た。また $S/\pi r^2, S'/\pi r'^2$ についても同様である。

(2) この相似性を考察するときは実用し得べき種々なる薬形は各々独自の適合領域を有することが判明した。

本稿を終るに際し平素より指導を賜つた大日本セルロイド河内工場長川井亮氏に深甚の謝意を表する。なお本研究は昭和35年2月26日宇宙科学技術シンポジウムにて発表した。

文 献

- 1) G. P. Sutton, Rocket propulsion elements, 2nd edition (1956), L. Ivan Epstein, The design of cylindrical propellant grains, Jet propulsion 26,757 (September 1956), Dipl. Ing. Ernst Mohr, Wuppertal, Über Feststoffraketen, Weltraumfahrt 12,116 (1957), Max W. Stone, A practical mathematical approach to grain design, Jet propulsion 28,236 (1958), Jean A. Vandekerckhove, Recent advance in solid propellant grain design, ARS Journal 29,483 (1959).
- 2) Leon Green Jr., Some effects of charge configuration in solid propellant combustion, Jet propulsion 28,483 (1958).
- 3) G. P. Sutton, Rocket propulsion elements, 2nd edition pp. 45~89 (1956).

Consideration on Solid Propellant Grain Configurations Especially in Case of Internal Neutral Burning

Takeo Shimizu

The aim of this paper is to find similarity relations of burning area, web thickness etc. among some grain configurations practically used, especially in case of internal neutral side burning.

A configuration of a grain cross section generally consists of three kinds of partial units, whose burning surfaces are parallel, external round and internal round as shown by (a), (b) and (c) in Fig. 2. It is important

to know the existence of a rhombic unit which has the same burning characteristic as a external round unit as shown in Fig. 3, and this correspondence principle is effectively applied to filling the port area of the grain by the rhombic unit in place of the round.

The characteristics of grain configurations are discussed mainly in case of star and gear forms which are shown in Fig. 5 and 6 respectively. We find that L/r , $S/\pi r^2$ and $S'/\pi r^2$ are functions of w/r and n , where L is the length of burning line as shown by symbol b in Fig. 5, r the radius of the grain, S and S' the cross sectional area of the neutral burning part and that of the final grain fragment respectively, w the web

thickness, and n the number of the unit configurations in one cross section (for example in Fig. 5 the upper shows $n=6$ and the lower $n=4$).

The curves in Fig. 8, 9 and 10 show these relations, and we find in them that if the two different configurations have the same values of w/r and n , then their values of L/r , $S/\pi r^2$ and $S'/\pi r^2$ must be equal. This theory should be very usefully applied to designing.

The wave configuration, shown in Fig. 7, should be connected to the web end of the star form and it shows nearly neutral burning characteristic.

(Dainippon Celluloid Co. and Hosoya Fireworks Co.)

TNT に対する光の化学的作用

野村 羊 襪*・阿部 武 弘*

I. 緒 言

日光にさらされると、TNT が黄色をへて次第に褐色に着色していく事は古くからよく知られた事である。この TNT に対する日光の化学的作用は、TNT の不安定化の原因の一つとして研究されて来て居り、これに関して幾つかの報告もある。TNT を日光にさらすと、Kranz と Donati¹⁾ はピクリン酸とトリニトロベンゾイック酸が生ずると報告して居り、Schultz と Ganguly²⁾ は赤色物質である *o*-及び *p*-chinonoxim 誘導体が得られると報告している。一方、Lodati³⁾ は亜硝酸ガスが発生すると報告して居り、Mitra と Srinivasan⁴⁾ は、日光照射の結果 TNT より発生したガスを稀アルカリ溶液に導き、その溶液を調べた所、 NO_2^- の痕跡と明かな NO_2^- の存在が認められると冒っている。又、日光の照射を受けた TNT は、融点が低くなり⁵⁾、感度が高くなるが⁶⁾、猛度が低くなる⁷⁾ ことが認められている。

本実験では、固体の TNT 及び TNT のエチルアルコール溶液に、紫外線及び可視光線を与える日光の

代りに、可視光線と紫外線とを別々に照射して、これら光線が TNT の吸収スペクトルにどのような変化を与えるかを調べて見た。

II. 実 験

用いた TNT は市販の 2,4,6-トリニトロトルエンをメチルアルコールから 3 回再結して精製した、m.p. 82.5°C 。エチルアルコールは市販の特級品を金属ナトリウムで脱水後、分溜して精製した。

可視光線光源としてはタングステンスポットランプ (100V500W) を 80V で使用し、紫外線光源としてはマツダ超高压水銀ランプ SHLS-1002A 型を使用した。可視光線及び紫外線の照射の場合、夫々、マツダ色ガラスフィルター V-Y3A 及び UV-D2 を用いたので、可視光線としては約 $430\text{m}\mu$ 以上の光を、紫外線としては約 $300\sim 400\text{m}\mu$ の光線を照射したことになる。何れの場合も、光源装置から約 7cm 離れた所に試料を置いて照射した。ガラス容器から溶出するアルカリが TNT と赤色物質を作るので、可視光線或は紫外線照射に際して、TNT のエチルアルコール溶液は透明石英製容器に入れた。

溶液の吸収スペクトルは日立分光光度計 EPU-2

昭和35年3月22日受理
* 防衛大学校、横浜貫市