

菊花型花火(割物)の設計条件について (3)

(昭和31年8月22日 受理)

清水 武 夫

(細谷火工株式会社)

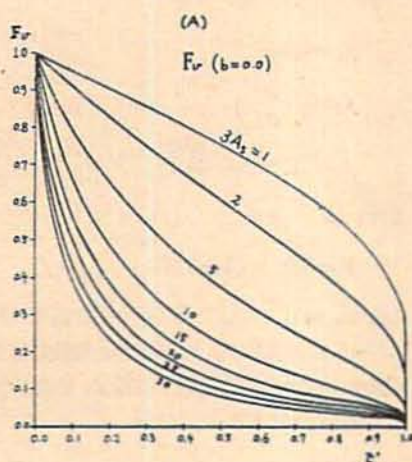
VI 設計条件の検討

6.1 星の空中弾道公式の検討

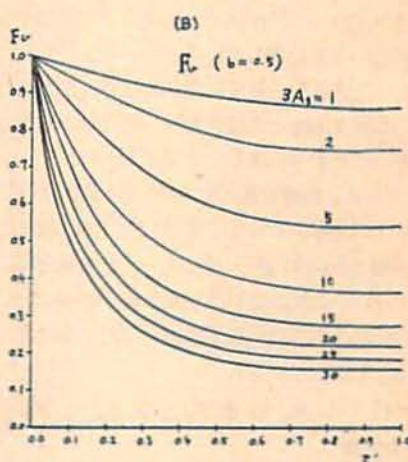
(24), (25) 式より

$$F_v = \frac{v}{v_0}, \quad F_z = \frac{z}{v_0 T'}$$

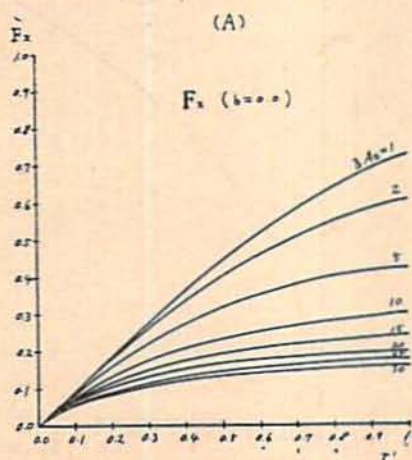
従つて単色光星について言えば F_v は初速に対する存速の割合を示し, F_z は初速が減耗しないで星が飛んだ仮想の距離 $v_0 T'$ に対する実際の飛行距離の割合を示すのであり, F_v, F_z 何れも大なるほど星の性能はよいことになる。 F_v, F_z 函数の値を図示すると図10, 11の如くなる。



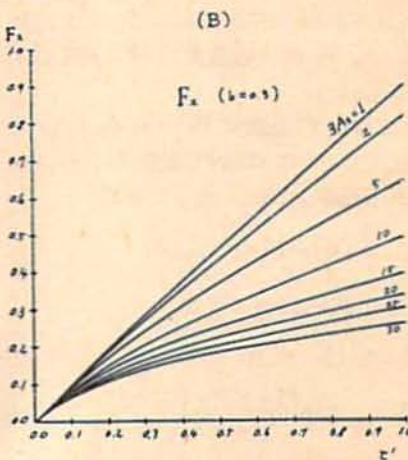
図



10



図



11

両者を通じて (A) は $b=0$ なる場合を, (B) は $b=0.5$ なる場合を表わす。また本文末の弾道表は実用の為のもので $b=0$ なる場合の F_v , F_z の値を掲げた。但し表は作表の便宜上基目 A_s の代りに $3A_s$ を用いてある。(弾道表は紙面の都合により省略した。)

A_s の値は (21) 式の添字 1 を除いて再録すれば

$$A_s = 0.258 v_0^{0.92} \frac{1}{R/T'} \cdot \frac{1}{\delta}$$

にて表わされる。ここで R/T' は問題としている燃焼層の燃焼速度, δ はその層の真比重である。従つて v_0 を一定と看做せば層の燃焼速度が大であるほど A_s は小であり, またその層の比重が大であるほど A_s は小である。前図によると A_s が小であるほど F_v 及び F_z の値が大きく, 速度の減耗が小であつて, 星の性能がよいことを示している。従つて星の問題としている燃焼層の燃焼速度 R/T' が大で, 比重もまた大なる星ほど性能がよいことを示している。

次に b の値は前述の如く星の比重が内部層に至るに従つて大となれば b は正なる値であり, 逆なれば負なる値であり各層の比重が相等しいときは $b=0$ である。図10, 11の F_v , F_z 曲線を見るに $b=0$ なる場合よりも $b=0.5$ の方が性能がよいことを示している。特に $r'=1$ 即ち燃焼の終りに於いては $b=0$ なる場合は $F_v=0$ であるが $b=0.5$ の場合は有限な値で終つてゐる。即ち星の比重は内部層に至るに従つて大なるほど性能がよいことを示している。

6.2 函数 $F_v(r', A_s, b)$ を $F_v(r', A_s, 0)$ より求める方法

本文附表の弾道表中に計算された F_v 函数は $b=0$ に応ずるものであり, その他の b の値については表より直ちに之を求めることは出来ないが, 次のようにするときは $F_v(r', A_s, 0)$ の函数表よりその数値を求めることが出来る。

今求めようとする F_v 函数を $F_v(r', A_s, b)$ とし之と A_s を等しくし, $b=0$ に応ずる函数 $F_v(r', A_s, 0)$ をとつて之と相等しくおく。然るときは

$$F_v(r', A_s, 0) = F_v(r', A_s, b)$$

この式に (22) 式を代入するときは

$$\begin{aligned} & \{1 - A_s \log(1 - r'^2)\}^{-1.075} \\ &= \left\{1 - A_s \log \frac{(1 - r')^2 + b}{1 + b}\right\}^{-1.075} \end{aligned}$$

之より

$$\log(1 - r'^2) = \log \frac{(1 - r')^2 + b}{1 + b}$$

之より

$$r'_z = 1 - \sqrt[3]{\frac{(1 - r')^2 + b}{1 + b}} = r(r', b) \quad \dots (47)$$

従つて $F_v(r', A_s, b)$ なる値はこの r' と b によつて計算された r'_z に応ずる $F_v(r'_z, A_s, 0)$ の値に等しいことになる。従つて $F_v(r', A_s, 0)$ の函数表によつて任意の b に応ずる $F_v(r', A_s, b)$ の値を求めることが出来る。

任意の b に応ずる $F_z(r', A_s, b)$ の値は $F_z(r', A_s, 0)$ より簡単には計算出来ない。この場合には上記方法によつて先ず $F_v(r', A_s, b)$ 函数を求め之を数値積分するのはかゝらない。

6.3 初速公式の検討

今 (46) 式に於いて

$$f_1 = (f\omega)^{0.459},$$

$$f_2 = \left(\frac{p}{\sigma}\right)^{-0.377},$$

$$f_3 = A^{-0.352} e^{-\frac{13.42}{anA}}$$

とすれば

$$V = 5.91 \times (1 \pm 0.084) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \dots (48)$$

となる。但し (46), 又は (48) 式は割薬の装填比重が 0.29~0.33 の間に於いて得られた実験式であることに注意すべきである。函数 f_1, f_2, f_3 を図示すれば図12, 13, 14 の如くである。

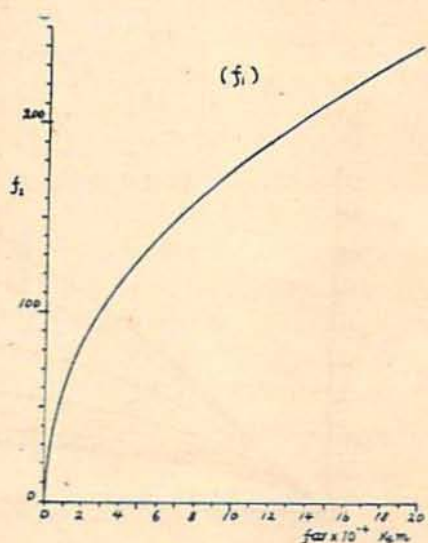


図 12

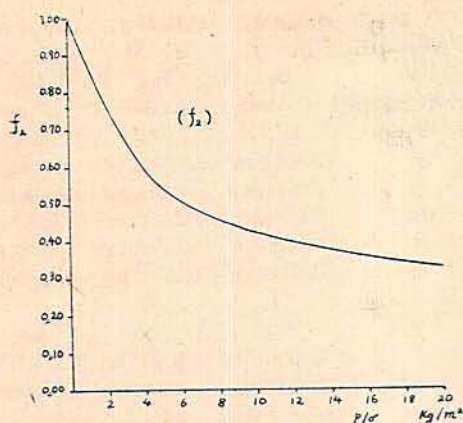


図 13

特に注目すべきは図14の f_3 曲線である。紙質が異つている場合でも an が一定であれば f_3 の値は $an = \text{const.}$ の曲線上を動く。而して an 曲線について見るに an が比較的小なる値に対しては f_3 の極大値を示さないが an が大となると f_3 は A の増加するに従つて一度極大値に達し爾後減少している。而して A に対する f_3 の増加の割合は $A=2 \sim 6$ では an を増すに従つて小となる。今標準和紙にて玉貼する場合を例にとつてみると寸当8枚貼 ($an=8$), $A=5.0$ とすると $f_3=0.41$ となる。今 $A=1.5$ なる緩焼割薬を以つて置換すると同一の f_3 の値を得るには $an=12$ であるから寸当12枚貼としなければならない。また貼数を更に増加して寸当16枚貼とすると $A=5$ の割薬と $A=1.5$ の割薬とに於いて f_3 の値は大差がなくなる。即ち貼数を相当に増加すると緩焼な割薬でも急焼な割薬でも f_3 の値は大体等しくなり、同一の効果を与え得るものと考えられる。

6.4 星の初速の偏差 dV/V と之に應ずる水平到達距離の偏差 dx_1/x_1 との関係

星の第1層について燃焼開始より燃焼終り迄の水平到達距離は (20), (23) 式より

$$x_1 = VT_1' F_z (\tau_1', A_{s1}, b_1)$$

星の構造を一定にすると T_1', τ_1', b_1 は一定である。上式を対数微分すると

$$\frac{dx_1}{x_1} = \frac{dV}{V} + \frac{dF_z}{F_z}$$

然るに

$$\frac{dF_z}{F_z} = \left(\frac{A_{s1}}{F_z} \cdot \frac{\partial F_z}{\partial A_{s1}} \right) \frac{dA_{s1}}{A_{s1}}$$

今略近的に A_s の式中 V の指数を1と看做して

$$A_{s1} = 0.258V \cdot \frac{1}{w_1 \delta_1}, \quad \left(\text{但し } w_1 = \frac{R_1}{T_1'} \right)$$

之を対数微分して

$$\frac{dA_{s1}}{A_{s1}} = \frac{dV}{V}$$

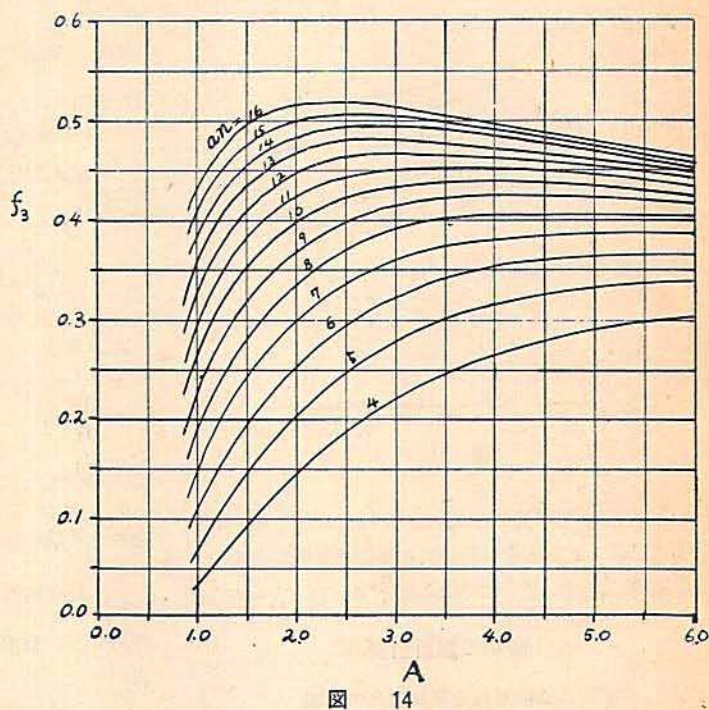


図 14

従つて

$$\frac{dF_z}{F_z} = \left(\frac{A_{s1}}{F_z} \cdot \frac{\partial F_z}{\partial A_{s1}} \right) \cdot \frac{dV}{V}$$

従つて

$$\frac{dx_1}{x_1} = \frac{dV}{V} \left(1 + \frac{A_{s1}}{F_z} \cdot \frac{\partial F_z}{\partial A_{s1}} \right)$$

今一般に

$$\varepsilon_{A_2} = 1 + \frac{A_2}{F_z} \cdot \frac{\partial F_z}{\partial A_2} = \varepsilon_{A_2}(r', A_2, b)$$

とし、且 dx , dV を夫々偏差 Δx , ΔV にて置き換えると

$$\frac{\Delta x_1}{x_1} = \varepsilon_{A_1} \frac{\Delta V}{V}$$

一般に任意の層に於いては

$$\frac{\Delta x_i}{x_i} = \varepsilon_{A_i} \frac{\Delta v_{0i}}{v_{0i}} \dots \dots \dots (49)$$

この式は初速の偏差と水平到達距離の偏差との相互関係を示す公式である。 ε_{A_i} を図示すれば図15の如くなる。

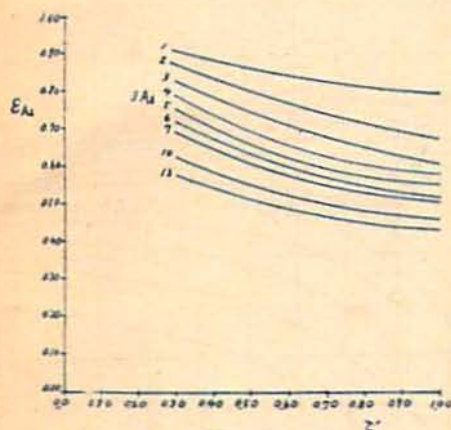


図 15

一般に A_2 を増加するに従つて ε_{A_2} は小となる。このことは A_2 を増すに従つて初速の小変動はあまり到達距離に影響しなくなることを示す。

VI 割物の設計計算例

7.1 公式による計算値と実験値との比較

既に初速の実験公式の精度については表16による常数 K の公算偏差として知り得たところであり、また存速の実験公式の精度については表12に於ける n' 及び $\log v_0$ の公算偏差によつて判定することが出来る。従つてここには単に二三の問題を提出して、之を前章迄に於いて得られた実験公式と函数表とを利用して結果を導出し、之を実験結果と比較点検するに止める。

算例1 次の与えられた諸元より、水平方向に発射された星の到達距離を求める。

計算番号	1	2	3
玉の記号	D ₄ B ₈ PM ₁	D ₅ B ₁₂ HW ₂	D ₅ G ₁₂ PW ₃
玉の呼称寸法	四寸	五寸	五寸
星の構造	B ₈	B ₁₂	G ₁₂
T ₁ (青色発光部)	0.72sec	1.60sec	2.92sec
T ₂ (輝心部)	0.60	0.60	0.60
δ_1	1,620kg/m ³	1,620kg/m ³	1,640kg/m ³
δ_2	1,650kg/m ³	1,650kg/m ³	1,650kg/m ³
R ₁	0.00453m	0.00600m	0.00600m
R ₂	0.00250m	0.00250m	0.00250m
p	0.00055kg	0.00147kg	0.00156kg
割薬の種類	P	H	P
A	1.93	5.99	1.93
f	7.12×10 ⁴ m	7.36×10 ⁴ m	7.12×10 ⁴ m
ω	0.116kg	0.234kg	0.256kg
玉貼紙	セメント袋紙 (クラフト紙)	標準和紙	標準和紙
a	2.33	1.00	1.00
n	4	8	8
d	0.30	0.30	0.30

(i) 初速の計算

公式

$$V = K \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$$

$$K = 5.91, f_1 = (f\omega)^{0.480},$$

$$f_2 = \left(\frac{p}{\sigma}\right)^{-0.377}$$

$$f_3 = A^{-0.552} e^{-\frac{13.42}{anA}}$$

計算番号	1	2	3
$f\omega$	0.826×10 ⁴	1.722×10 ⁴	1.823×10 ⁴
f_1	57.91	80.57	82.62
f_2	0.432	0.380	0.377
f_3	0.376	0.403	0.333
V	55.6	72.9	61.3

之を先の同一条件による環星玉の実験値と比較すると

V 実験値	47.3	71.4	67.1
-------	------	------	------

であつて、計算値との合致の程度を知ることが出来る。

(ii) 水平到達距離

輝心の部分を除いて青色部(又は緑色部)が燃え終る迄の到達距離を求める。

公式

$$x_1 = VT_1' F_z(A_2, r_1', b_1)$$

$$A_2 = 0.258 V^{0.83} \frac{T_1'}{R_1 \delta_1}$$

$$b_1 = -\left(1 - \frac{\delta_2}{\delta_1}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^n$$

$$T_1' = \frac{T_1}{1 - R_2/R_1}$$

$$\tau_1' = \frac{T_1}{T_1'}$$

計算番号	1	2	3
T_1'	1.694	2.744	5.008
$V^{0.95}$	41.97	53.99	45.96
A_2	2.60	3.93	5.94
$3A_2$	7.80	11.79	17.82
b	0.0034	0.0013	0.0004
τ_1'	0.425	0.583	0.583

$b=0$ と看做して $3A_2$ と τ_1' により F_x の表より

F_x	0.249	0.242	0.193
V	55.6	72.9	61.3
T_1'	1.694	2.744	5.008

この三つの数値を乗じて

x_1	23.4	48.5	59.2
-------	------	------	------

これと実測値と比較すると

x_1 実測値	28.0m	52.1m	63.8m
	(112)	(371)	(542)

但し下段に附した括弧内数字は星番号を示す。またこの計算に用いた T_1 の値はこの星によつて得られた燃焼時間をそのまま用いて計算結果の比較に便利にした。上記の結果によれば計算値の方が 3.6~4.6m 程度小さく表われた。

7.2 割物の設計例

算例 2. 開花の水平半径 80m, 引先青であつて曳光水平距離 40m, 引 40m の割物の設計
燃焼第2期(青光部)の計算
条件によつて

$$x_2 = 40.0 = v_1 T_2' F_x(3A_2, \tau_2', b_2) \quad (i)$$

F_x 函数は表の編纂に便にする為 A_2 の代りに $3A_2$ を基目にとつてある。 v_1 は燃焼第1期の終末速度で第2期に於ける初速である。 x_2 は燃焼第2期中に星が運動すべき距離である。以下燃焼第2期に於ける記号には添字 2 を附し同第1期の夫には添字 1 を附す。また

$$T_2' = T_2$$

$$A_2 = 0.258 v_1^{0.95} \frac{T_2}{R_2 \delta_2} = 0.258 v_1^{0.95} \frac{1}{\delta_2 \delta_2}$$

然るに実験によつて

$$v_2 = 0.00195 \text{ m/sec}$$

$$\delta_2 = 1,620 \text{ kg/m}^3$$

故に

$$3A_2 = 0.2450 v_1^{0.95} \quad (ii)$$

また一方に於いて $\tau_2 = 0.95$ に於ける存速 $v_{0.95}$ の値は

$$v_{0.95} = v_1 F_x(3A_2, 0.95, 0) \quad (iii)$$

にて計算される。種々の $3A_2$ の値に対して (ii) より v_1 を、之と $3A_2$ とにより (iii) より $v_{0.95}$ を求めると次の如くなる。

$3A_2$	v_1	$v_{0.95}$	$3A_2$	v_1	$v_{0.95}$
1	4.54	1.85	9	48.14	3.13
2	9.56	2.41	10	53.91	3.18
3	14.78	2.68	11	59.72	3.17
4	20.14	2.84	12	65.59	3.21
5	25.59	2.94	13	71.48	3.22
6	31.13	3.02	14	77.41	3.25
7	36.74	3.05	15	83.37	3.25
8	42.42	3.10	16	89.35	3.22

この関係を示せば図16の通りである。

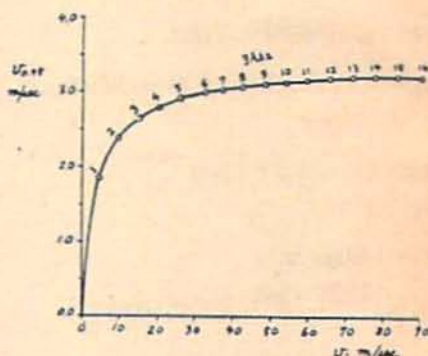


図 16

図によれば $3A_2 = 9$ 以上に於いては v_1 を相当に増加しても終末速度 $v_{0.95}$ はあまり増加しない。従つてこの場合は $3A_2 = 9$ 以下にて星を設計することが望ましい。而して $v_{0.95}$ がなるべく大であれば、星の光跡の重力による歪曲の度は少くなる。之が為には A_2 は $3A_2 < 9$ の範囲でなるべく大であることが望ましい、従つてこの設計では $3A_2 = 9$ を採用する。然るときは

$$v_1 = 48.14, v_{0.95} = 3.13$$

である。然るときは $\tau = 0.95$ に於ける星の光跡の画く曲率半径は (26) 式より

$$\rho \cos \theta = -\frac{v^2}{g} = -\frac{3.13^2}{9.80} \approx -1.0 \text{ m}$$

1m は小に失するが、之は既にこの成分の星では開花能力に関して問題の要求が稍無理であることを示している。 A_{s2} の算式にて知り得る如く比重も若くは燃焼速度 w の大なる成分を用いば v_1 の一定値に対して A_{s2} は小となり、従つて弾道表によつて明かなように $\tau=0.95$ に対する $F_v(3A_{s2}, 0.95, 0)$ が増すから (iii) により同一の v_1 に対して終末速度 $v_{0.95}$ は増す。即ち若くは w の大なる星を用いることによつて終末速度の要求は改善される。

(i) より $T_2' = T_2$ なることを願ひして

$$T_2 = \frac{40}{v_1 F_v(9, 1, 0)}$$

とおいて T_2 が得られる。表により

$$F_v(9, 1, 0) = 0.318$$

であるから上式は

$$T_2 = \frac{40}{48.14 \times 0.318} = 2.61 \text{ sec}$$

之より第2層(青光部)の半径は

$$R_2 = w_2 T_2 = 0.00195 \times 2.61 = 0.00509 \text{ m} \\ = 5.09 \text{ mm}$$

燃焼第1期(青光部)の計算
実験結果より

$$\delta_1 = 1480 \text{ kg/m}^3 \\ w_1 = \frac{12.26 - 4.92}{2} / (2.17 - 0.60) \\ = 0.00234 \text{ m/sec}$$

またこの期に於いては第2期の諸元を受けて

$$VF_v(3A_{s1}, \tau_1', 0) = v_1 = 48.14 \quad (\text{iv})$$

$$VT_1' F_v(3A_{s1}, \tau_1', 0) = x_1 = 40 \quad (\text{v})$$

また

$$A_{s1} = 0.258 V^{0.93} \frac{1}{w_1 \delta_1} = 0.258 V^{0.93} \\ \times \frac{1}{0.00234 \times 1480} = 0.07453 V^{0.93}$$

故に $3A_{s1} = 0.2236 V^{0.93}$

この式より $3A_{s1}$ と V との関係を求めると

$3A_{s1}$	23	24	25	26	27
$V \text{ m/sec}$	145.6	152.4	159.3	166.1	173.1

この場合の終末の τ_1' は不明であるから適当に假定

し、次式によつて終末存速 v_1 を計算する。

$$v_1 = VF_v(3A_{s1}, \tau_1', 0)$$

$\frac{3A_{s1}}{\tau_1'}$	23	24	25	26	27
0.12	60.13	61.26	62.45	63.62	64.70
0.14	54.16	55.17	56.23	56.97	57.96
0.16	49.21	50.14	50.82	51.66	52.25
0.18	44.99	45.72	46.36	47.01	47.58
0.20	41.35	41.91	42.38	43.02	43.42
0.22	38.15	38.56	39.03	39.53	39.96

この関係を線図に描画すれば図17の如くなる。

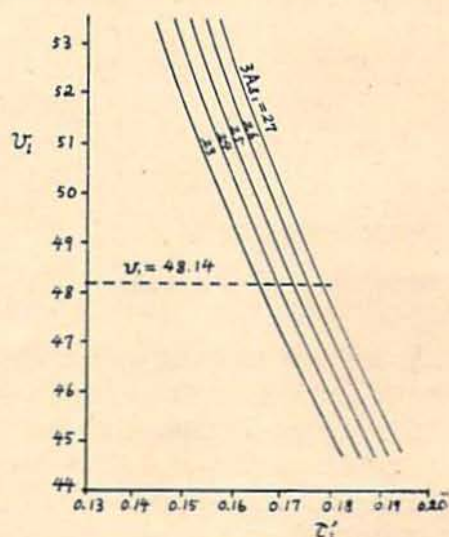


図 17

線図上にこの期の終末存速(第2期の初速に相当) $v_1 = 48.14 \text{ m/sec}$ に応ずる横線を引いて各曲線の交点に於ける τ_1' を読めば第Iの $3A_{s1}$ と τ_1' との関係が得られる。即ち次の如くなる。

$$(I) \begin{cases} 3A_{s1} & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 \\ \tau_1' & 0.1647 & 0.1685 & 0.1720 & 0.1750 & 0.1775 \end{cases}$$

而して

$$\tau_1' = 1 - R_2/R_1$$

之より

$$R_1 = \frac{R_2}{1 - \tau_1'} = \frac{0.00509}{1 - \tau_1'}$$

一方に於いて

$$T_1' = \frac{T_1}{1 - R_2/R_1} = \frac{R_1}{w_1} = \frac{R_1}{0.00234} \\ = 427.4 R_1$$

上式と結合して

$$T_1' = \frac{2.175}{1 - \tau_1'} \quad (\text{vi})$$

之によつて各種の τ_1' に応ずる T_1' が求められる。
即ち

τ_1'	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
T_1'	2.471	2.530	2.558	2.654	2.719	2.788

之と V を用いて星の燃焼第1期に於ける終末到達距離 x_1 を計算する。

$$x_1 = VT_1'F_z(3A_{s1}, \tau_1', 0)$$

$3A_{s1}$	τ_1'	23	24	25	26	27
0.12		27.35	28.24	29.13	29.97	30.79
0.14		30.56	31.63	32.64	33.62	34.59
0.16		34.29	35.09	36.28	36.96	38.07
0.18		37.47	38.43	39.73	40.55	41.77
0.20		40.76	41.85	42.88	44.27	45.16
0.22		44.25	45.03	46.20	47.23	48.23

この関係を線図に描画すれば図18の如くなる。与件に

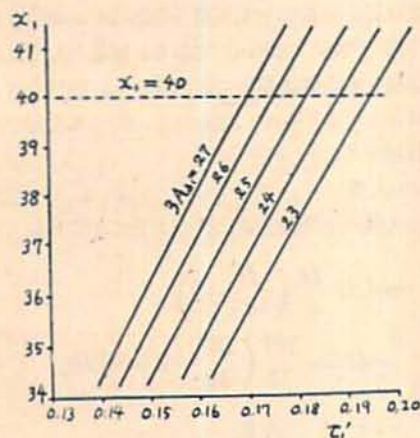


図 18

よれば $x_1 = 40\text{m}$ であるから、之を水平に入れて曲線との交点を読めば、第IIの $3A_{s1} \sim \tau_1'$ の関係が得られる。即ち次の如くである。

(II)	$3A_{s1}$	23	24	25	26	27
	τ_1'	0.1950	0.1890	0.1820	0.1755	0.1700

この関係を先に求めた第Iの $3A_{s1} \sim \tau_1'$ の関係を線図に描画すれば図19の如く互に相交する二曲線となる。この二曲線の交点は与件を満足する $3A_{s1}$ 及び τ_1' を与える。即ち

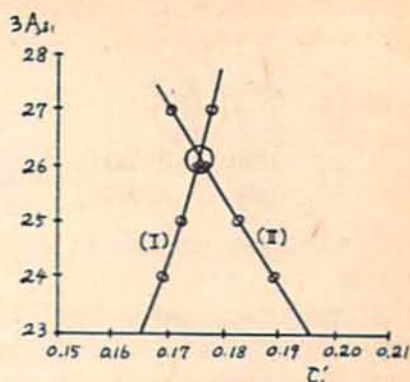


図 19

$$3A_{s1} = 26.12, \tau_1' = 0.175$$

之に応ずる V は先に求めた関係より、上記 $3A_{s1}$ の値に応じて

$$V = 167.0\text{m/sec}$$

従つて

$$R_1 = \frac{R_2}{1 - \tau_1'} = \frac{0.00509}{1 - 0.175} = 0.00617\text{m} = 6.17\text{mm}$$

従つて星の直径 d は

$$d = 0.00617 \times 2 = 0.01234 = 12.3\text{mm}$$

となる。また

$$T_1 = \frac{R_1 - R_2}{w_1} = \frac{0.00617 - 0.00509}{0.00234} = 0.46\text{sec}$$

以上で燃焼第1期の解は終つた。

星の全燃焼時間は

$$T = T_1 + T_2 = 0.46 + 2.61 = 3.07\text{sec}$$

星1個の重量は

$$\begin{aligned} p &= \frac{4}{3} \pi \{ (R_1^3 - R_2^3) \delta_1 + R_2^3 \delta_2 \} \\ &= \frac{4}{3} \times 3.14 \{ [(0.00617)^3 - (0.00509)^3] \\ &\quad \times 1480 + (0.00509)^3 \times 1620 \} = 0.00153\text{kg} \\ &= 1.53\text{g} \end{aligned}$$

断面比重は

$$p/\sigma = \frac{0.00153}{3.14 \times (0.00617)^2} = 12.80\text{kg/m}^2$$

以上の計算に於いて $b_1=0$ としたがこの仮定が許容され得るかどうかをしらべる。

$$b_1 = -\left(1 - \frac{\delta_2}{\delta_1}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^3 \\ = -\left(1 - \frac{1620}{1480}\right) \left(\frac{0.00509}{0.00617}\right)^3 = 0.053$$

之は $b_1 \neq 0$ として大差ないことを示している。

玉の設計

先ず満星と環星とは初速に影響すべき差がないものとして設計する。本文にて述べたように一般に満星の初速は環星の夫よりやや大なる如く考えられるが、環星として設計しておけば、実際には満星として製造しても、設計諸元よりも星の開花半径が伸びるものとなれば実用上の支障はないからである。初速の関係は

$$V = K \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 167.0 \text{ m/sec}$$

である。之より f_1 を求めると

$$f_1 = \frac{V}{K \cdot f_2 \cdot f_3} = \frac{167.0}{K \cdot f_2 \cdot f_3} \quad (\text{vii})$$

一方に於いて

$$f_2 = (p/\sigma)^{-0.377} = (12.80)^{-0.377} = 0.382$$

割薬として過塩素酸カリを主剤とする火薬 P を用いるものとすればその特徴数は

$$f = 7.12 \times 10^4 \text{ m}, A = 1.93$$

また玉貼にはセメント袋紙(クラフト紙)を用い、製造の便を考慮し寸当6枚に定めれば

$$an = 2.33 \times 6 = 13.98$$

an と A とより f_3 を計算すると

$$f_3 = A^{-0.352} e^{-\frac{13.42}{anA}} = (1.93)^{-0.352} e^{-\frac{13.42}{13.98 \times 1.93}} \\ = 0.483$$

従つて (vii) 式より

$$f_1 = \frac{167.0}{5.91 \times 0.382 \times 0.483} \\ = 153.1 = (f\omega)^{0.459}$$

であるから之より $f\omega$ を求めると

$$f\omega = 71710 \text{ kgm}$$

従つて之を $f = 71,200 \text{ m}$ にて除して

$$\omega = 1.007 \text{ kg}$$

を得る。之を附着するに要する純粋の量 ω' は ω/ω' を 1.6 として

$$\omega' = \frac{\omega}{1.600} = 0.629 \text{ kg}$$

従つて割薬の全重量 W は

$$W = \omega + \omega' = 1.007 + 0.629 = 1.636 \text{ kg}$$

割薬の仮比重は 0.556 であるから、割薬の占有体積は

$$v = \frac{1.636}{0.556} = 2.942 \text{ l}$$

球形とした場合の占有体積の半径は

$$R = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot 2.942\right)^{\frac{1}{3}} \\ = 0.889 \text{ dm} \approx 89 \text{ mm}$$

之に星の直径 $d \approx 12 \text{ mm}$ を加えれば

$$R + d = 101 \text{ mm}$$

従つて玉皮の内径は $D_i = 101 \times 2 = 202 \text{ mm}$ あればよい。之に近い玉皮は七寸玉用(内径 187 mm)または八寸玉用(内径 214 mm)である。満星としては以上の計算値よりも初速が大であらうから、製造すべき玉は七寸としてよいものと思われる。従つて呼称寸法七寸を採用する。

星の入数

星の入数の半実験公式は次のようになるから

$$n = 4.35 \frac{D}{d} \left(\frac{D}{d} - 2\right) \\ = 4.35 \times \frac{187}{12} \left(\frac{187}{12} - 2\right) = 922 \text{ 個}$$

但し n : 星の入数

D : 玉皮内直径

d : 星の直径

割薬の効率

割薬の効率 η は略的に次のようにして計算される。

$$\eta = \frac{\text{星の運動発起時に於ける運動のエネルギー}}{\text{割薬の開発し得べき全エネルギー}} \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{p}{s} V^2 n \bigg/ \frac{f\omega}{\gamma - 1} \\ = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.00153}{9.80} \times (167.0)^2$$

$$\times 922 / \frac{71710}{1.25-1} = 0.0067 = 0.67\%$$

但しここに γ は平均断熱膨脹係数である〔(28)式参照〕。この計算によれば割物の効率は極めて小さいものである。

Ⅷ 結 論

各種の条件を異にする割物の地上破裂試験を行いその結果より従来不明であつた割物の設計に関する諸因子の数量的な関係を明かにした。而してこの関係を基礎として、空气中弾道及び破裂弾道に関して、割物の設計に使用し得べき実験公式を導出した。且この公式を使用するに際して設計並びに星の性能、玉の諸性質等を明かにする為に便利な弾道表を準備した。以上の過程に於いて得られた主要な事項を挙げれば次の通りである。

(1) 星の燃焼速度は空气中を飛行する場合と、静止する場合とに於いては大なる差異は認められない。従つて星の設計に際してはその静止燃焼時間をそのまま使用することが出来る。

(2) 星の空气中弾道性能は A_s, b なる二つの数によつて影響される。 A_s が小なるほど、 b が大なるほど性能が良好である。 A_s は $1/\omega^2$ に比例する量であるから、星の燃焼速度 ω が大なるほど、比重 δ が大なるほど性能がよいことになる。後者の関係は既に常識上知られていたところであるが、前者の関係はこの研究によつて初めて知られたものであろう。また $b = (1 - \delta_0/\delta_1)(R_0/R_1)^3 + \dots$ であるから、内部層の比重が大なるほど b は大となり従つて星の性能がよいことになる。但し以上は菊花型の割物を設計する場合であつて、若し柳等の如く菊花型の変形したものを設計する場合には以上の反対に考えねばならぬであらう。

(3) 星の空气中運動に於いて空気抗力の加速度は大体存速 v の二乗に比例するものと看做し得る。之はNewtonの抵抗法則に一致した関係である。但し甚しく低速に於いてはこの法則よりはずれるようであるが、之に関しては将来の研究に俟つ。

(4) 割薬について、火薬の力 f を計算により求め、ビバシチー A の比較値を実験により見出した。この A の比較値は割薬の大気中燃焼時間の逆数とはほぼ一致した。従つて将来割薬の設計に当つては A を大気中の燃焼より求めることが出来るものと思われる。而して f の計算に当つては仮定の反応条件式が問題となり、実験的に不明な条件式を用いる場合には計算値の信頼度を低下するから、将来ボンブ試験等の実験結果

と比較吟味しなければならない。

(5) 割薬の設計に当つてはビバシチー A を適当に大ならしめる如く工夫されなければならない。従つて薬粒の大きさに関しては、特に過塩素酸カリを主剤とする割薬の如く燃焼速度が遅いものに関しては適当に工夫しなければならない。

即ち燃焼速度の遅い割薬にあつても薬粒の大きさを適当に選ぶことによつて割薬として実用し得るものと考えられる。但し割薬は他に星に着火する役割をもっているから、あまりに A が大であつて着火不能や星の破壊を起すことがあつてはならない。本研究の結果よりすれば A は3~5附近が最も適当と考えられる。

(6) 玉貼の紙の枚数は多いほど割薬の効率を高めるが、しかしあまりに多いと逆効果を生ずるに至る。之は恐らくは玉皮を破断する為に火薬のエネルギーの一部が消費される為と考えられる。

(7) 引張強度試験によつて測定した和紙とクラフト紙との破断強度の比は、破裂実験によつて求めた夫と比較して若干の差があつた。然しながら、破裂実験による値が不明な場合には、引張強度試験によつて強度係数 α を定めても実用上大差はないものと考えられる。

(8) 本研究では玉の型式に於いて環星と満星とによる星の初速の差異については試験数少く十分な結論が得られなかつたので之は将来の研究に俟つ。

(9) 本研究では割薬の装填比重を大体一定として試験した。実用上はこれにて十分間に合うが、装填比重の影響が如何になるかは設計者として原理的に把握しておく必要がある。之に関しても将来の研究に俟つ。

(10) 割物の製造に際して従来危険視されていた塩素酸カリを主剤とする割薬に代つて管理上比較的安全と考えられる過塩素酸カリを主剤とする割薬を用い得ること、並びにその条件を明かにした。

(11) 以上本研究の成果の応用として割物の設計計算の一例を示した。之によつて従来定性的な判断による大体の見当によつて設計されていた割物の構造を定量的な数値計算によつて定め得る基礎を確立した。

本研究を実施するに当り多大の援助を賜つた東京大学工学部山本祐徳教授に対し深甚の謝意を表する。また本研究に於いて写真撮影に関しては総て東京大学生産技術研究所植村恒義助教授を煩わしたものである。また地上破裂試験に際しては東京大学火薬学教室並びに東京都庁、通産省関係の方々の直接参加並びに試験の援助を賜つた。深く感謝の意を表する。また本研究の実施を許容せられた細谷火工株式会社社長細

谷政夫氏並びに研究中終始筆者と労苦を共にせられた
同社従業員各位に対し心よりお礼申上げる。(本報告

は昭和30年4月24日工業火薬協会春季研究発表会にて
その一部を発表した。)

Conditions for Designing Japanese Fire-Display-Shells of Chrysanthemum Type

by Takeo Shimizu

The Japanese fireworks of chrysanthemum type are very popular because of their brilliant beauty. But the precise conditions for designing them are not yet determined. Here we have tried to clarify them.

Sample shells are prepared under the various conditions of

- (1) bursting charges:
 - (H) potassium chlorate powder,
 - (S) black powder,
 - (P) potassium perchlorate powder,
- (2) shell papers:
 - (W) Japanese paper, called "Kozosi,"
 - (M) kraft paper,
- (3) stars:
 - (B) blue to flash, 8mm and 12mm in diameter,
 - (G) green to flash, the same in diameter as (B),
- (4) sizes of shells:
 - (D₄) 4 sun (about 5 in.) in diameter,
 - (D₅) 5 sun (about 6 in.) in diameter,
- (5) strength of shells:
 - (W₈), (W₁₆), (M₄), (M₈).

For example, in the case of (D₄), (W₈) means a shell which consists of 8×4=32 layers of "Kozosi", and (M₄) means an other shell which consists of 4×4=16 layers of kraft paper, suffix 8, 16, 4 or 8 denoting the number of layers of shell

paper.

62 pieces of shells are prepared. In each shell stars are arranged in shape of a ring so as to facilitate the analysis of the results, except the six standard shells, in which stars are arranged in usual form, spherically inside the shells.

Each of these shells is exploded at low height near the ground, and the photograph is taken by a camera with a rotating shutter which shuts one sixth of one revolution and whose velocity is 25 r.p.s. For checking, a 16mm moving camera, was also used, although it does not afford such accuracy as the former, but this is recommended to know the conditions of burning of a bursting charge at the time of explosion of a shell.

The locus of each star in the photograph is shown as a dotted line on a film, and we can calculate velocity and acceleration at any point along the line by measuring the length of a dash.

Analyzing photographs by this way, we know that, though stars move while they are burning, the law of air resistance follows the Newton's law approximately, and is written as

$$p'(t) \frac{dv}{dt} = -0.483v^{1.93},$$

where v is horizontal velocity of a star

and $p'(t)$ is weight per unit area (m^2) of section of the star. As the star burns while moving, $p'(t)$ is a function of burning time t . Solving this equation, we obtain

$$v = v_0 F_v(A_s, \tau', b) \quad (1),$$

$$x = v_0 T' F_x(A_s, \tau', b) \quad (2),$$

where v is initial velocity of the star, x is horizontal distance measured from the origin to the position of the star at time t , T' is $T/(1 - R_i/R_a)$ [where T is burning time in the referred zone of the star, i. e.

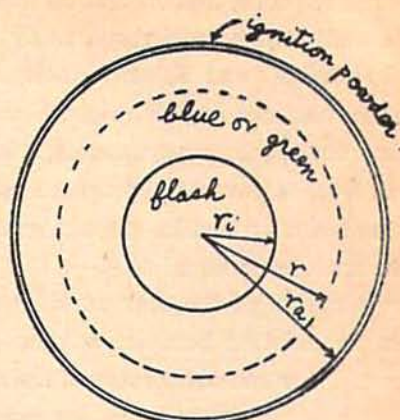


Fig. 1

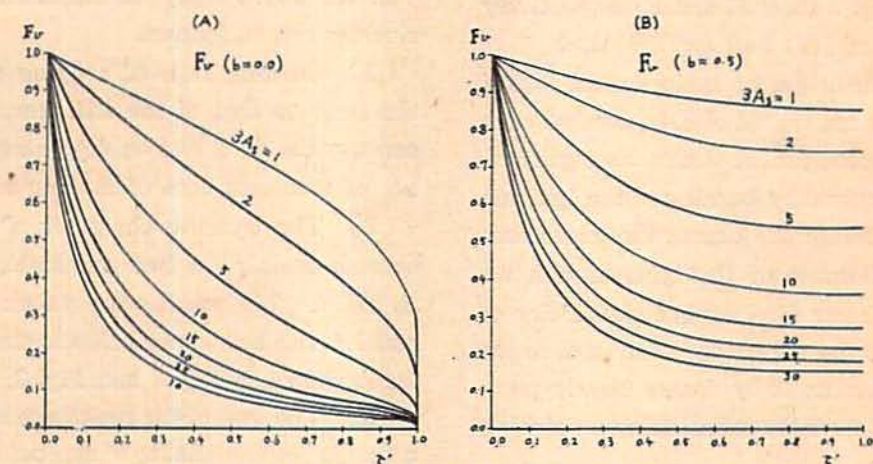


Fig. 2

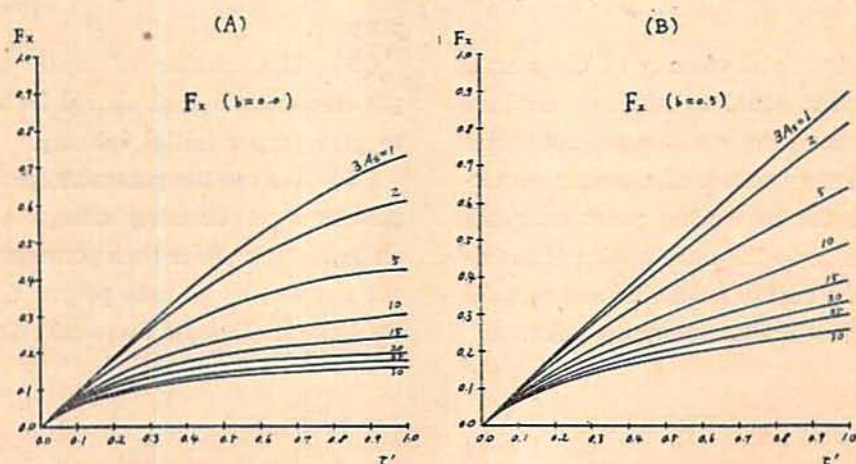


Fig. 3

blue or green zone, and R_i and R_a are its inside and outside radii respectively (cf. Fig. 1)] and F_v and F_z are velocity and distance functions respectively, which vary according to three parameters, i. e. A_s , τ' and b . A_s is inversely proportional to burning velocity and to specific gravity of the zone. τ' is equal to $(1-r/R_a)$, where r is radius of the star at time t . b shows the relation between specific gravities of inner and outer zones of the star. When inner and outer zones are same in specific gravity, $b=0$, and when inner specific gravity exceeds outer one, $b>0$. Fig. 2 and Fig. 3 show F_v and F_z respectively in cases of (A) $b=0$ and (B) $b>0$.

Near the origin of explosion the loci of stars are not dotted clearly, because each star is accompanied with a long glittering tail caused by burning of the ignition powder before the blue or the green zone burns. Because of this phenomenon we can not know directly initial velocity of a star at the explosion point, and so we must calculate it by dashes clearly photographed near the origin using a reducing formula:

$$V^2 = v^2 e^{2ky/p'} + u^2 e^{2ky/p'} + \frac{g p'}{k} (e^{2ky/p'} - 1),$$

where V is initial velocity of the star, k is a constant equal to 0.366, determined by air resistance, v and u are horizontal and vertical velocities of the star respectively at the measuring point near the origin and g is the acceleration of gravity. x and y denote horizontal and vertical co-ordinates of the measuring point.

Calculated initial velocities of stars are 50~130 meters per second. Using these data we obtain a semi-empirical formula:

$$V = 5.91 (1 \pm 0.084) (f\omega)^{0.450} (p/\sigma)^{-0.377} A^{-0.552} e^{-13.42/AnA} \quad (3),$$

where f is force of explosives, ω is weight of bursting charge, p is initial weight of a star, σ is area of section of the star and A is Charbonnier's vivacity of bursting charge. M. K. S. unit is used for the formula. Combining formulae (1), (2) & (3) we can now design shells by calculation.

In the above study the important conclusions are as follows.

(1) Burning time of a flying star is the same as that of the still star, so we can use the data rest on designing in place of unknown data of moving state.

(2) The ballistic character of a star depends mainly on two parameters, i. e. A_s and b . The smaller the values of A_s and $1/b$, the better the ballistic character is, as shown in Fig. 2 and Fig. 3.

(3) The law of air resistance against a star is proportional to v^2 approximately.

(4) On designing a bursting charge, vivacity A should be kept suitable for our purpose.

(5) The number of layers of paper pasted outside a shell should be adequate to give proper initial velocity.

(6) We can use potassium perchlorate powder as a bursting charge which is thought to be safer than potassium chlorate powder, if we take proper designing conditions. (Hosoya Fireworks Co.)