

円筒形煙火星の着火性

指村泰弘*, 堀内 守**, 渡邊日出夫**, 渡邊摩衣子**, 丁 大玉**, 吉田忠雄***†

*花火コンサルタント 〒221-0005 横浜市神奈川区松見町1-27-14 トンボ荘201

**足利工業大学大学院工学研究科 〒326-8558 足利市大前町268-1

†Corresponding address: yoshida@ashitech.ac.jp

2007年1月18日 受付 2007年8月3日 受理

要旨

円筒形煙火裸星, 全面着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星の揚薬量を変えた打ち揚試験を行った。揚薬量を増していくと星は着火しなくなった。星が着火しなくなる限界の揚薬量を着火限界揚薬量と定義し, 着火性の尺度とした。着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星の着火限界揚薬量は裸星のそれより大きかった。着火剤被覆星と裸星または接着剤・着火剤塗布星の着火限界揚薬量間の相関は良く, どちらも着火剤被覆星の着火性の評価に使えよう。着火剤被覆星の着火性は一定ではなくそれが被覆している裸星の着火性の影響を受ける。粉末組成物の線燃焼速度の大きい裸星の着火性は大きい傾向があった。

1. 緒言

煙火星は, 煙火玉内の割薬の爆燃によって放出され, または地上の打揚筒内の打揚火薬の爆燃によって打ち揚げられ, 空中にいろいろな形の火の花を咲かせる。一般には, 色火星は着火性が悪いので, 表面に着火剤 (prime) を被覆して着火を確実にしている。煙火の着火性については Kosanke 夫妻が解説している¹⁾。煙火星の着火性の試験法として “shot test” が知られているが, 詳細は不明である。本研究では, 裸星, 全面着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星を打揚筒を用いて地上より打ち揚げ, 着火・不着火と打揚火薬量との関係を調べた。

2. 実験

2.1 試料

用いた星はアルプス煙火工業 (株) で製造され, 提供された円筒形のプレス星である。組成は文献²⁾ 記載のものに外割でみじん粉 5% を添加したものである。着火剤は同社提供のものである。用いた色火星および着火剤の組成を Table 1 に記す。

裸星 (Bare star) の寸法は直径約 11 mm, 高さ約 10 mm である。着火剤被覆のものは, 全面被覆したもの (Primed star) と, 側面および底に難燃性接着剤を塗布し上面に着火剤を塗布したもの (PPR) を用いた。これらの試料は Fig. 1 に示す。打揚筒は内径 12 mm, 深さ 217 mm の鋼管と内径 15 mm, 深さ 270 mm の鋼管を用いた。

2.2 装置

打ち揚げられた星の初速の測定には Phantom 社製の高速ビデオカメラ (VRI-V4.2) を用いた。着火の有無は目視および高速度カメラ記録によった。

2.3 実験方法

打揚筒の底に点火玉をセットし, 筒を垂直に立て, 筒口から所定量の打揚火薬を流し込む。その上に星を入れる。秒読みの後打揚火薬に点火し, 星を打ち揚げる。同時に高速度ビデオカメラを作動させ, 星の軌跡を追跡する。また星の着火の有無を調べる。

3. 結果と考察

3.1 星の着火性に及ぼす揚薬量の予備的検討

紅星と内径 12 mm, 深さ 217 mm の打揚筒を用いて予備実験を行った。その結果を Table 2 に記す。

裸星は, 揚薬量 1.5 g では全部不着火, 揚薬量 0.5 g 及び 1.0 g では着火と不着火があった。着火剤全面被覆星は, 揚薬量 0.5 g ~ 4.0 g で全て着火した。

3.2 裸星の着火性に及ぼす揚薬量の影響

予備試験の結果, 間隙率が小さすぎると星が筒内につかえたり着火・不着火のバラツキが大きくなることがわかったので, 間隙率をやや大きくして実験を行った。裸星および着火剤被覆星についての結果を Table 3 に記す。紅星では揚薬量が 2.0 ~ 5.0 g, 緑星では 0.6 g 以上, 青星では 5.0 g 以上, 黄星では 0.4 ~ 1.0 g, 紫星では 5.0 g 以上, 着火剤全面被覆紅星は 9.0 g 以上で不着火であった。

Table 1 Composition of stars and prime.

Material	Red	Green	Blue	Yellow	Purple	Prime
KClO ₄	53.2	45.7	53.2	55.3	53.2	
KNO ₃						55.9
Phenol resin	10.5		10.5		10.5	
Binsol resin		9.5		11.4		
Chlorinated gum	4.8	4.8	4.8	5.7	4.8	
Sulfur						4.7
Sb ₂ S ₃						9.3
Silicone (fine)						4.7
Charcoal				5.7		
Hemp charcoal						9.3
MgAl	10.5	6.7	10.5		10.5	
MgAl (fine)						9.3
K ₂ Cr ₂ O ₇						0.3
SrCO ₃	16.2				8.1	
Ba(NO ₃) ₂		28.2				
CuO			16.2		8.1	
Na ₂ C ₂ O ₄				17.1		
Rice granules	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	6.5

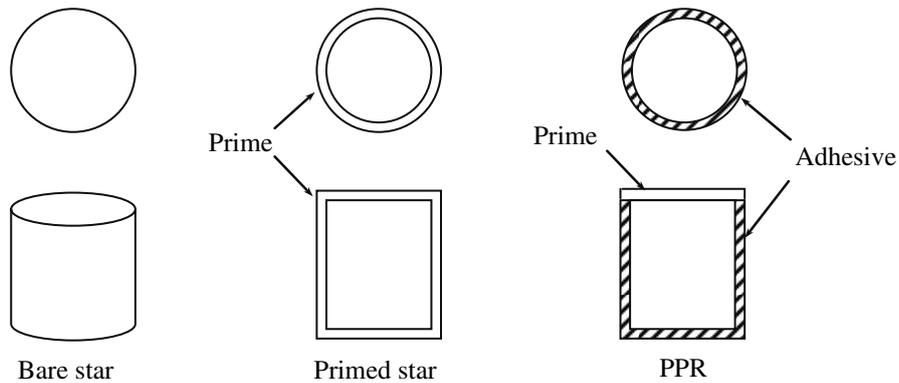


Fig. 1 Samples.

Table 2 Preliminary test result of ignitability (gap ratio: 7 ~ 16 %).

Star	Diameter (mm)	Height (mm)	Lift charge (g)	Ignition	Muzzle velocity (m s ⁻¹)
Red bare	10.9	11.3	0.5	×	
Red bare	11.0	11.2	0.5	×	
Red bare	11.0	11.3	0.5	○	48.5
Red bare	11.0	10.6	0.5	×	
Red bare	10.9	11.2	1.0	○	
Red bare	11.0	11.2	1.0	○	
Red bare	11.0	10.8	1.0	×	
Red bare	10.9	10.7	1.5	×	
Red bare	11.0	11.3	1.5	×	
Red primed	11.2	10.2	0.5	○	69.9
Red primed	11.1	9.28	1.0	○	77.4
Red primed	11.6	10.6	1.5	○	97.4
Red primed	11.3	10.6	2.0	○	110
Red primed	11.0	9.10	2.5	○	79.9
Red primed	11.5	9.57	3.0	○	87.4
Red primed	11.5	10.2	3.5	○	82.4
Red primed	11.1	9.80	4.0	○	107

Table 3 Shot test results of bare stars using 15 mm ID mortar (gap ratio: 41 ~ 64 %).

Star	Diameter (mm)	Height (mm)	Lift charge (g)	Ignition	Muzzle velocity* (m s ⁻¹)
Red bare	11.0	11.5	0.5	○	47.6
Red bare	11.0	11.0	1.0	○	62.9
Red bare	11.0	10.4	1.0	○	71.9
Red bare	11.0	11.3	2.0	×	
Red bare	11.0	11.1	5.0	×	
Green bare	11.0	9.58	0.5	○	41.5
Green bare	9.70	11.1	0.5	○	40.6
Green bare	11.0	9.42	0.6	×	
Green bare	9.80	11.0	0.7	×	
Green bare	9.90	11.3	1.0	×	
Blue bare	10.0	11.0	0.5	○	59.6
Blue bare	10.1	11.0	0.5	○	72.9
Blue bare	9.80	11.0	2.0	○	84.6
Blue bare	11.0	9.60	4.0	○	
Blue bare	10.9	9.10	5.0	×	
Yellow bare	10.7	10.9	0.2	○	15.2
Yellow bare	11.3	11.0	0.3	○	30.3
Yellow bare	11.0	11.3	0.4	×	
Yellow bare	10.7	11.0	0.5	×	
Yellow bare	11.3	11.0	1.0	×	
Purple bare	10.6	11.0	1.0	○	
Purple bare	10.9	10.0	2.0	○	104
Purple bare	11.0	10.8	3.0	○	
Purple bare	11.0	10.7	4.0	○	
Purple bare	11.0	10.2	5.0	×	
Red primed	11.5	10.2	5.0	○	158
Red primed	11.5	9.70	7.0	○	
Red primed	11.0	9.00	8.0	○	
Red primed	11.2	9.34	9.0	×	
Red primed	10.9	9.70	10	×	

*Muzzle velocity was the velocity when a star passed through the muzzle of a mortar. The velocity was determined by a high speed camera.

3.3 接着剤・着火剤塗布星 (PPR) の着火性に及ぼす揚薬量の影響

さらに、円筒星の円周面と下面に接着剤を塗布し、上面に着火剤を塗布した試料 (PPR) を作成し、着火剤塗布面を下にして打揚筒に装填し、揚薬量を変化させて打揚実験を行った。その結果を Table 4 に記す。PPR 紅星は 5.0 g 以上で、PPR 緑星は 5.0 g 以上で、PPR 青星は 6.0 g 以上で、PPR 黄星は 3.0~4.0 g で着火と不着火があり、5.0 g 以上で不着火であった。PPR 紫星は 4.0 g 以上で不着火であった。

3.4 全面着火剤被覆星の着火性に及ぼす揚薬量の影響

実際に用いられている星は色星の全表面を着火剤で被覆した全面着火剤被覆星である。全面着火剤被覆星の打揚実験結果を Table 5 に記す。全面着火剤被覆の紅星は 8.0 g 以上で、緑星は 5.0 g で、青色は 7.0 g で、黄星は 0.5 g 以上で不着火であった。紫星は 5.0 g で着火と不着火があり、6.0 g で着火した。

3.5 星の着火の限界揚薬量及び着火性と燃焼速度との相関

星の打ち揚げの揚薬量を増していくと、星、着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星は、打揚筒から打ち揚げられたときに着火しなくなる。これは打揚薬量を増していくと、筒内における星の加速度が増加し、星の筒内滞留時間すなわち星と打揚火薬の燃焼火炎との接触時間が短くなるからであろう。

Table 2 に記した予備試験は、紅星と内径 12 mm の打揚筒を用いて行われた。この場合は、間隙率 (gap ratio: (筒内横断面積 - 星の横断面積) / 筒内横断面積) が比較的小さい。揚薬量が 0.5 g のときの着火の割合は 1/4 であった。1.0 g のときは 2/3、1.5 g のときは 0/2 であった。同じ揚薬量でも着火と不着火が生じた。また、揚薬量が小さいのに着火率が低い結果も出た。これは間隙率が小さいために、星の大きさの変動による間隙率の変動割合が大きく、その結果同じ揚薬量でも燃焼火炎と星との接触時間が変動して着火・不着火にバラツキが起こったためと思われる。一方、裸星と着火剤被覆星を比べると、裸星では 1.5 g の揚薬量では 2 回とも不着火であったのに、着火剤被覆星では揚薬量 4.0 g でも着火し、明らかに着火性が良くなった。

Table 4 Shot test results of partly primed and restricted (PPR) stars.

Star	Diameter (mm)	Height (mm)	Prime (g)	Lift charge (g)	Ignition
Red PPR	11.0	11.0	0.042	3.0	○
Red PPR	10.9	10.5	0.032	4.0	○
Red PPR	11.0	11.0	0.042	5.0	×
Red PPR	11.0	10.5	0.037	5.0	×
Red PPR	11.0	11.0	0.049	10	×
Green PPR	11.0	9.84	0.035	3.0	○
Green PPR	11.0	10.0	0.033	3.0	×
Green PPR	11.0	10.0	0.041	4.0	×
Green PPR	11.0	9.22	0.023	4.0	○
Green PPR	11.0	9.84	0.035	5.0	×
Blue PPR	11.0	9.22	0.019	4.0	○
Blue PPR	11.0	9.57	0.029	5.0	○
Blue PPR	11.0	9.79	0.061	5.0	○
Blue PPR	11.0	9.77	0.030	6.0	×
Blue PPR	11.0	9.11	0.044	6.0	×
Yellow PPR	11.0	11.3	0.025	3.0	○
Yellow PPR	11.0	11.2	0.028	3.0	×
Yellow PPR	11.0	10.7	0.040	4.0	×
Yellow PPR	10.9	9.79	0.027	4.0	○
Yellow PPR	11.0	10.8	0.020	5.0	×
Purple PPR	11.0	10.7	0.024	3.0	○
Purple PPR	11.0	10.7	0.028	3.0	○
Purple PPR	11.0	10.2	0.037	4.0	×
Purple PPR	11.0	10.3	0.014	4.0	×
Purple PPR	11.0	10.1	0.036	5.0	×

Table 5 Shot test results of primed stars using 15 mm ID mortar.

Star	Diameter (mm)	Height (mm)	Lift charge (g)	Ignition	Burning time*(s)
Red primed	13	10.5	5	○	1.27
Red primed	12.9	11.6	6	○	1.53
Red primed	13.2	11.4	7	○	1.47
Red primed	12.7	9.87	8	×	—
Red primed	12.7	10.8	8	×	—
Green primed	12	11	2	○	2.21
Green primed	12.1	11	2	○	2.21
Green primed	12.1	11.3	3	○	2.68
Green primed	12	11.2	3	○	2.46
Green primed	12.2	11.4	5	×	—
Blue primed	12	11.8	5	○	1.33
Blue primed	12.8	11.9	6	○	1.34
Blue primed	12.2	11	7	×	—
Blue primed	12.7	11.1	7	×	—
Blue primed	12.4	11.6	7	×	—
Yellow primed	11.5	10.5	0.2	○	4.09
Yellow primed	11.5	10.3	0.5	○	5.61
Yellow primed	11.7	10.5	0.5	×	—
Yellow primed	11.5	9.84	2	×	—
Yellow primed	11.8	10.2	5	×	—
Purple primed	11.9	10.7	1	○	1.18
Purple primed	12.1	9.9	4	○	—
Purple primed	11.7	9.64	5	○	1.11
Purple primed	11.2	10.1	5	×	—
Purple primed	11.7	10.9	6	○	—

*Burning time is the time between ignition and burnout of a star.

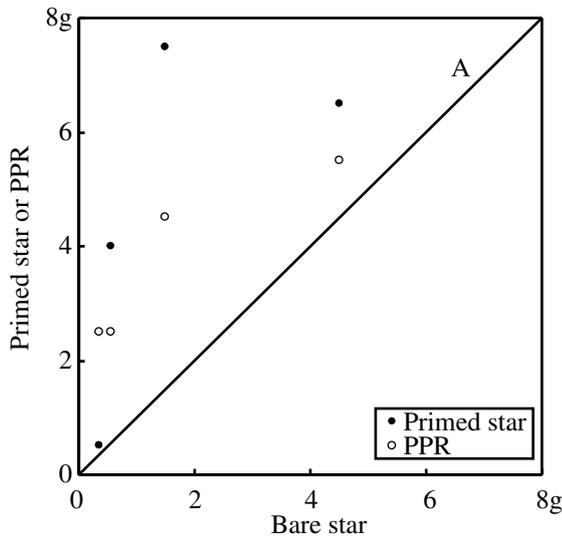


Fig. 2 Plot of ignition limit lift charges of primed and PPR stars vs. bare star.

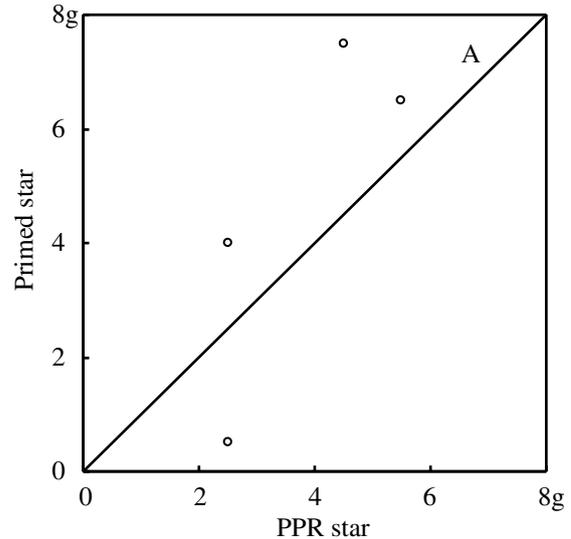


Fig. 3 Plot of ignition limit lift charges of primed star vs. PPR star.

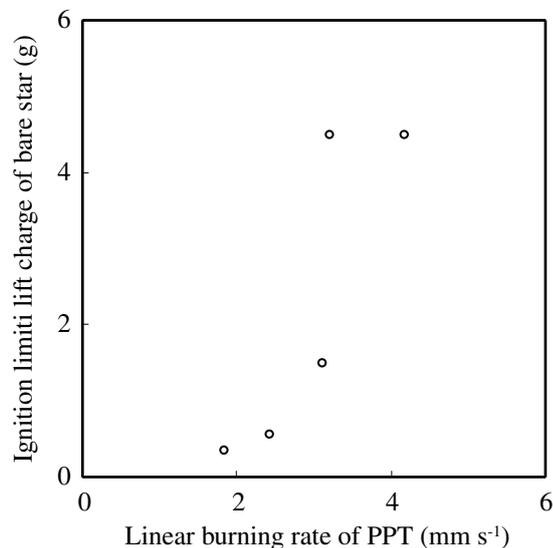


Fig. 4 Plot of ignition limit lift charge vs. linear burning rate of PPT

間隙率の変動割合が小さくなるように、打揚筒の内径を12 mmから15 mmと大きくして実験を行った。紅裸星については、揚薬量1.0 gで2回全数着火、2.0 gで不着火という改善された結果が得られた。その他の裸星についても着火・不着火の揚薬量の境界が明瞭になった。とりあえず下のような着火限界揚薬量を定義した。

着火限界揚薬量 = (着火した最大の揚薬量 + 着火しなかった最小の揚薬量) / 2

上のように定義した着火限界揚薬量を Table 6 に記す。

Table 6 のデータを図表化したのが、Fig. 2 および Fig. 3 である。Fig. 2 は全面着火剤被覆星および PPR 星の着火限界揚薬量を縦軸に、対応する裸星の着火限界揚薬量に対してプロットしたものである。Fig. 2 においては、着火剤被覆星の限界着火薬量と接着剤・着火剤塗布星の限界着火薬量は、1つの例外を除いて共に45度の直線Aの上方にあり、

Table 6 Ignition limit lift charge (g) of the shot test for evaluating ignitability of stars.

Star	Bare	Primed	PPR
Red	1.5	7.5	4.5
Green	0.55	4.0	2.5
Blue	4.5	6.5	5.5
Yellow	0.35	0.5	2.5
Purple	4.5	5.5	3.5

Table 7 Linear burning rate of powder in a paper tube (PPT).

Star	Red	Green	Blue	Yellow	Purple
Rate (mm s ⁻¹)	3.12	2.43	4.18	1.85	3.21

着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星が裸星より着火性が良いことがわかる。またこの図から、着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星の着火性は着火剤の着火性のみによって決まるものではなく、被覆されている星の着火性の影響を受けることがわかる。

Fig. 3 は、着火剤被覆星の着火限界揚薬量と接着剤・着火剤塗布星の着火限界揚薬量との相関図である。着火剤被覆星の着火限界揚薬量は、1つの例外を除いて45度の直線Aの上方にあり、着火剤被覆星は接着剤・着火剤塗布星より着火性が良いことがわかる。これは前者の方が星の表面の被覆割合が多いことで説明できる。1つの例外を除いて着火剤被覆星と接着剤・着火剤塗布星の着火限界揚薬量の相関が高いことから、着火剤被覆星の着火性の評価にはどちらの着火限界揚薬量を用いても良いであろう。

本実験の範囲では、各星の着火性の順序は下のようであった。

裸星	青 = 紫 > 紅 > 緑 > 黄
着火剤被覆星	紅 > 青 > 紫 > 緑 > 黄
接着剤・着火剤塗布星	青 > 紅 > 紫 > 緑 > 黄

3.6 着火性と燃焼速度との相関

筆者らは先に星組成物の燃焼時間の測定を行った³⁾。その中で紙筒入り粉末組成物の燃焼時間が星の燃焼時間推定の簡便な方法となることを示した。紙筒入り粉末組成物の燃焼時間からこのものの線燃焼速度が算出できる。Table 7に、ここで用いた星と同じ組成の紙筒入り粉末組成物の線燃焼速度を記す。

紙筒入り粉末組成物の線燃焼速度に対する裸星の着火限界揚薬量のプロットをFig. 4に示す。粉末組成物の線燃焼速度の大きい裸星は着火性も高い傾向にあることが示された。

紙筒入り粉末組成物の線燃焼速度は星の着火性のスクリーニング試験に使える可能性がある。

4. 結論

円筒形煙火裸星、全面着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星の揚薬量を変えた打揚試験を行って、各試料の着火性の比較を行い、次の結果を得た。

- (1) 揚薬量を増していくと星は着火しなくなる。
- (2) 星の着火性は着火限界揚薬量で比較できる。
- (3) 着火剤被覆星および接着剤・着火剤塗布星の着火限界揚薬量は裸星のそれより大きい。
- (4) 着火剤被覆星の着火性は一定ではなく、被覆されている裸星の着火性の影響を受ける。
- (5) 紙筒入り粉末組成物の線燃焼速度の大きい裸星の着火性は大きい傾向がある。

References

- 1) K. L. and B. J. Kosanke, "Pyrotechnic Primes and Priming", in "Pyrotechnic Chemistry", Chapter 7 (2004), Journal of Pyrotechnics, Inc.
- 2) All Japan Association for Safety of Explosives, "Manufacture and Safety of Fireworks", p.96 (2006).
- 3) Y. Sashimura, H. Watanabe, M. Horiuti, M. Watanabe, K. Itoh, D. Ding, and T. Yoshida, *ibid.*, 68, 141 (2007).

Ignitability of cylindrical firework stars

Yasuhiro Sashimura*, Mamoru Horiuchi**, Hideo Watanabe**, Maiko Watanabe**,
Dayu Ding**, and Tadao Yoshida**†

A series of test firings were carried out for the purpose of evaluating the ignitability of cylindrical firework stars. The stars were bare (unprimed), primed and partially primed and restricted (PPR). The stars failed to ignite when the lift charge was increased beyond some limiting amount. That limiting lift charge amount was then used to characterize the ignitability of the stars. The ignition-limit lift charges amounts for primed and PPR stars were larger than that for bare star and correlated well with each other. This suggested that both might be used for evaluating the ignitability of primed stars. The ignitability of primed stars was not constant but varied with the ignitability of the bare stars.

Keywords: Firework star, Ignitability, Shot test, Primed star, Ignition limit lift charge.

*Fireworks Consultant, 1-27-14-201 Matsumi-cho, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 221-0005, JAPAN

**School of Engineering, Ashikaga Institute of Technology, 268-1 Omae-cho, Ashikaga-shi, Tochigi 326-8558, JAPAN

†Corresponding address: yoshida@ashitech.ac.jp