

煙火星および組成物の燃焼特性

指村泰弘*, 渡邊日出夫**, 堀内 守**, 渡邊摩衣子**, 伊東一臣**,
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16日 受付 2007年7月25日 受理

要旨

煙火星およびその組成物の燃焼挙動と燃焼時間を測定し、それらの特性について考察した。燃焼挙動は燃焼火炎の特定のスペクトルピークのプロファイルから考察した。煙火星および組成物の燃焼火炎の強さは時間的な変動が大きい。全体の燃焼時間のバラツキはそれほど大きくなかった。紙筒入り組成物粉末の燃焼では、最初筒口炎が見られる。その後筒口炎はなくなり筒内部で燃焼を継続する場合が見られたが、燃焼時間には差が見られなかった。煙火星の燃焼速度の推定には、実験の簡便性とバラツキの小ささから組成物粉末の紙筒内燃焼法が優れている。

1. 緒言

煙火は花火と同義語であり、現在世界の夜空を彩り、多くの人々を楽しませている。煙火の効果を発揮する主な部品は星である。星は燃焼しながら空中を飛行し、いろいろな形と色彩を与える。煙火の形を与える星の主要な特性は燃焼時間である。日本の代表的な煙火である八重葎菊花型煙火はまん丸(真球)に開く。この場合は星の燃焼時間は短いことが必要である。一方、冠(かむろ)と呼ばれる煙火は燃えながら垂れ下がってくる。この場合は、星の燃焼時間は長いことが必要である。

本研究では、5種類の色星組成物と着火剤組成物を用いて、裸星、着火剤被覆星、接着剤・着火剤塗布星、ストランド成形固形組成物および紙筒入り粉末組成物について燃焼時間を測定した結果について述べる。

2. 実験

2.1 試料

用いた星および同組成物は、全国火薬類保安協会編「煙火の製造と保安」¹⁾記載の組成物に外割りで5%のみじん粉を加えたものである。用いた色星および着火剤の組成をTable 1に記す。

用いた試料の形状をFig. 1に示す。裸星(bare star)はアルプス煙火工業(株)で製造した直径11 mm、高さ約10 mmのプレス星である。全面着火剤被覆星(primed star)は、裸星の全表面に着火剤を被覆したものである。接着剤・着火剤塗布星(PPR)は、裸星の側面と底面に難燃性接着剤を塗布し、上面に着火剤を被覆したものである。ストランド

(strand)は、高さ30 mm、縦横約6 mmの直方体圧搾固形試料の側面と底面に難燃性接着剤を塗布し、上面に着火剤を塗布したものである。紙筒入り粉末組成物(PPT)は、直径約8 mm、高さ約95 mmの紙筒に粉末組成物を手で圧縮充填したものである。また、各試料の密度をTable 2に示す。

2.2 実験

静止燃焼の測定には、浜松ホトニクス(株)製のスペクトルメータPMA-11C59966-31を用いた。飛行燃焼の観察には、内径15 mm、深さ270 mmの鋼製打揚筒とPhantom社製の高速ビデオカメラVRI-V4.2を用いた。

静止燃焼実験は、ドラフトチャンバー内で試料の上端にトーチバーナーで点火して、発光スペクトルの特定波長のピークのプロファイルをスペクトルメータで記録した。飛行燃焼実験では、打揚筒から星を打ち揚げて、星の燃焼時間を高速ビデオカメラで測定した。実験装置の配置図をFig. 2に示した。

3 結果と考察

3.1 裸星および全面着火剤被覆星の静止燃焼挙動

裸星の燃焼における火炎の特定スペクトル・ピーク強度のプロファイルの例をFig. 3(a)に示す。特徴は、(1)燃焼の不均一による変動があること、(2)火炎表面伝播が遅いことによるピークの立ち上がりから頂点に達するまでの時間が長いこと、(3)燃焼の後半では、未燃焼の星の表面積の減少によりピーク強度が時間と共に減少することなどである。

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
Magnalium	10.5	6.7	10.5		10.5	
Magnalium (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

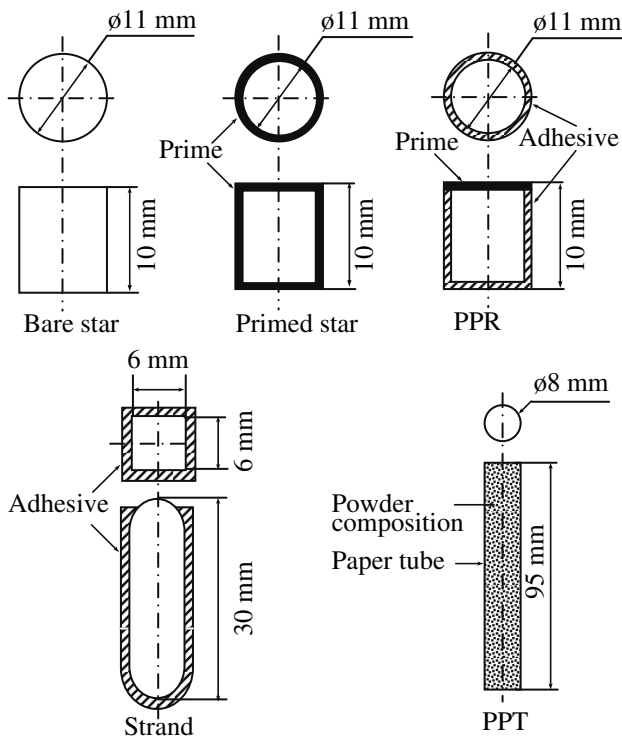


Fig. 1 Various shapes of samples.

Table 2 Density of samples (unit: 10³ kg m⁻³).

	Red	Green	Blue	Yellow	Purple
Bare star	1.62	1.41	1.58	1.42	1.57
Primed star	1.16	1.48	1.25	1.45	1.39
PPR	1.60	1.41	1.61	1.42	1.62
Strand	1.95	1.85	2.10	1.69	2.03
PPT	1.01	0.95	1.15	0.98	1.12

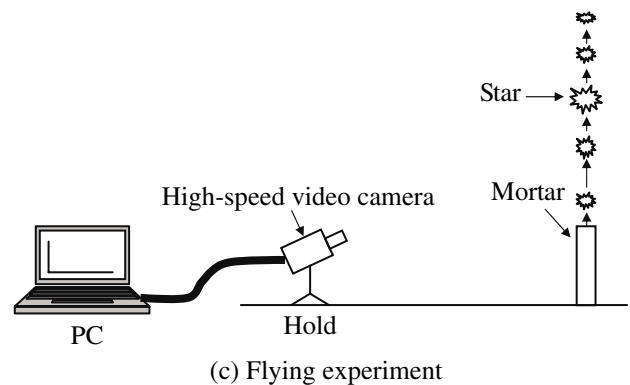
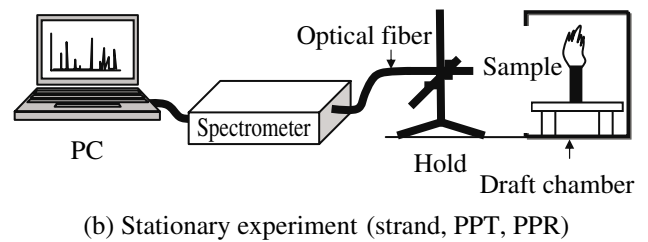
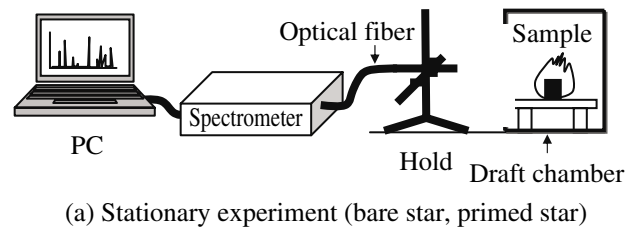


Fig. 2 Setup of measuring system.

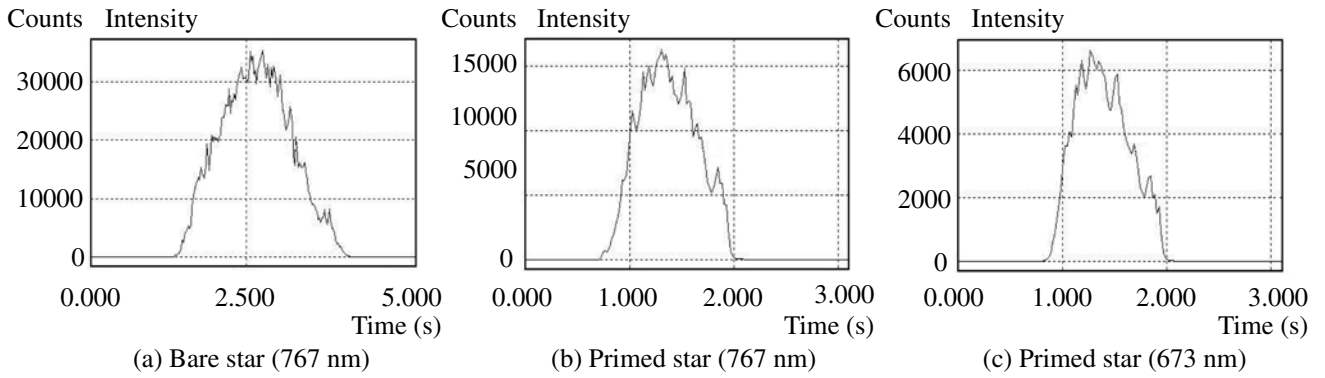


Fig. 3 Spectrum peak intensity profiles of a bare red star and the star covered by prime.

Table 3 Mean burning times of various types of star compositions.

Type	Height (mm)	Burning time (s)				
		Red	Green	Blue	Yellow	Purple
Stationary burning						
Bare star	10	2.64	2.75	2.57	6.98	3.06
Primed star	10	1.15	2.18	1.16	4.23	1.24
PPR star	10	3.70	4.92	2.74	7.94	2.94
Strand	30	10.6	19.0	8.33	24.9	9.31
Strand 10	10	3.53	6.33	2.78	8.30	3.10
PPT	95	30.5	45.2	19.9	52.3	26.2
PPT 10	10	3.21	4.76	2.09	5.51	2.75
Flying burning						
Bare star	10	1.74	2.71	1.48	3.29	1.46
Primed star	10	1.42	2.39	1.34	4.85	1.15
PPR star	10	3.26	4.11	2.39	5.42	3.12

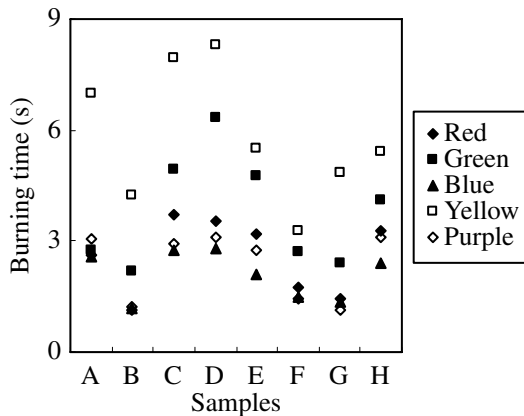


Fig. 4 Burning times of various types of star compositions. Stationary burning (A: Bare star; B: Primed star; C: PPR; D: Strand; E: PPT) Flying burning (F: Bare star; G: Primed star; H: PPR)

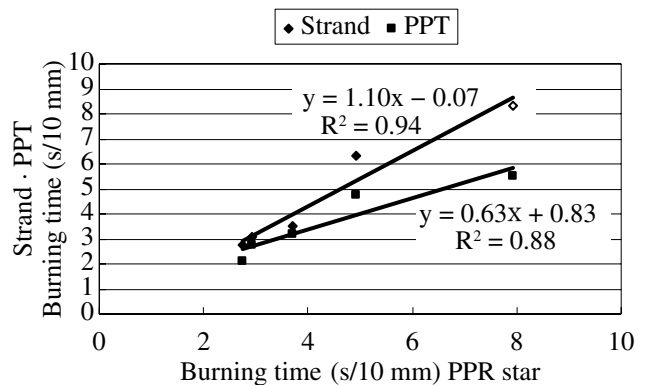


Fig. 5 Correlations of burning times of various star compositions.

◆ : Correlation between strand and PPR star
 ■ : Correlation between PPT and PPR star

着火剤全面被覆星のピーク強度プロファイルの例をFig. 3 (b)および(c)に示す。(b)はKピーク(767 nm, 着火剤・星の火炎中とともに含まれている), (c)はSrClの最強ピーク(673 nm, 着火剤の火炎には含まれず, 星の火炎に含まれている)のプロファイルである。着火剤は火の回りが速く, 立ち上がりからピークに達する時間が短くなり, 星の全体の燃焼時間も短くなることからわかる。この場合, Kピークの立ちあがりSrClピークの立ちあがりより0.10 sはやい。

これは, まず着火剤が最初に燃焼を開始し, 0.10 s後に星の色火剤に伝火が始まることを意味する。

3.2 各種形状の星および組成物の燃焼

各種形状の星組成物の平均燃焼時間をTable 3およびFig. 4に示す。

静止燃焼における各種形状試料の燃焼特性を比較する。裸星と全面着火剤被覆星では, 後者の方が燃焼時間が短い。

Table 4 Relative standard deviations (RSD) of various firework star compositions.

	Red	Green	Blue	Yellow	Purple	Mean
Bare star	0.02	0.06	0.21	0.4	0.22	0.22
Primed star	0.09	0.05	0.05	0.05	0.25	0.1
PPR	0.02	0.13	0.13	0.43	0.14	0.17
Strand	0.05	0.08	0.03	0.05	0.02	0.05
PPT	0.06	0.03	0.17	0.01	0.05	0.06
Mean	0.08	0.07	0.12	0.19	0.14	0.12

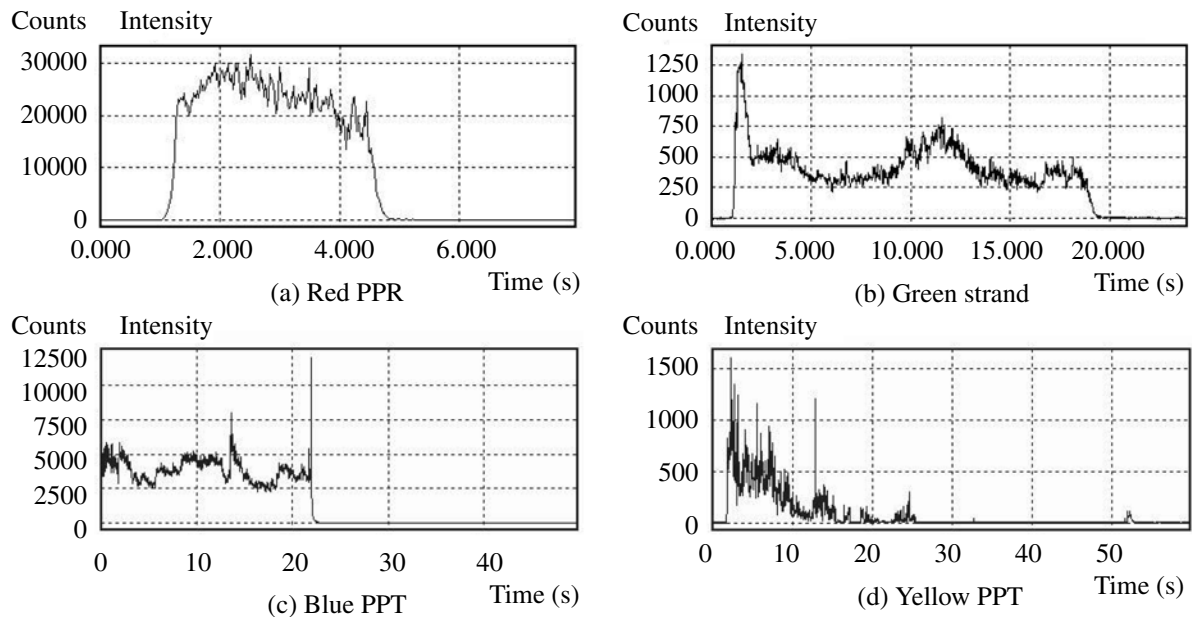


Fig. 6 Examples of spectrum peak intensity profiles in the burning of PPR, strand and PPT.

着火剤の方が裸星より火の回りが速いのが原因である。全面着火剤被覆星と接着剤・着火剤被覆星との比較では、後者の方が燃焼時間が長い。円筒形星の全面燃焼と端面燃焼の違いによる。接着剤・着火剤被覆星とストランドの比較では、緑星を除いて10 mm当りの燃焼時間は類似であった。

ストランドと紙筒充填組成物の大きな違いは、前者は圧搾固形物であり、後者は手で圧填された粉末であることである。平均して後者の方が10 mm当りの燃焼時間は短い。粉末の間隙に火が回り線燃焼速度を上げているためであろう。しかし、Fig. 5に示すように、接着剤・着火剤塗布星、ストランドおよび紙筒充填粉末組成物の燃焼時間の間にはある程度の相関がある。これらのいずれの方法も星の燃焼速度の比較に役立つであろう。

裸星の静止燃焼時間と飛行燃焼時間を比較すると、後者の方が短くかつ星間の燃焼時間の差が大きい。飛行燃焼時間の方が短い一つの理由は、飛行燃焼の場合の着火は打揚筒内で打揚火薬の燃焼による強力全面加熱によるものであり、星の全表面への伝火がトーチによる局所的な点火の場合より速いためであろう。全面着火剤被覆星の静止燃焼時間と飛行燃焼時間ではあまり差が見られなかった。どちらの場合も、星の全表面への伝火が同じ程度に早いであろう。

接着剤・着火剤塗布星 (PPR) の静止燃焼時間と飛行燃焼時間を比較すると、後者の方がやや短い。試料の一部表面に着火剤が塗布してあるので、着火時の火の回りは静止燃

焼でも飛行燃焼でもあまり差はないと思われる。飛行中には燃焼を促進する何らかの要因が存在する可能性もある。

3.3 接着剤・着火剤塗布星 (PPR), ストランド (strand) および紙筒入り粉末組成物 (PPT) の燃焼時間のバラツキ

星の燃焼時間は、空中で開発した煙火の形状を決める重要な要素である。実際の星の燃焼時間は星を打揚筒から直接打ち揚げて測定することができる。しかし、この方法は星を造り打ち揚げるための長い時間と手数がかかる。次に考えられる方法は、全着火剤被覆星を地上で燃焼させて燃焼時間を測定する方法である。この方法も試料作成に長時間を要する。次に考えられる方法は、PPR, ストランドまたはPPTを用いて線燃焼速度を測定する方法である。

時間の最もかからない方法は、紙筒入り粉末組成物の端面燃焼を用いる方法である。この方法は清水によっても用いられている²⁾。ストランド法は固体ロケット推進薬の線燃焼速度測定に用いられている³⁾。

燃焼時間測定法の優劣の評価に、燃焼時間の測定のバラツキを用いることができよう。各種形状の星組成物の燃焼時間の相対標準偏差 (標準偏差/平均値) を Table 4 に記す。

燃焼時間のバラツキの平均の順序は次の通りであった。

裸星 > 接着剤・着火剤塗布星 > 全面着火剤被覆星 > 紙筒入り粉末組成物 > ストランド

実験の簡便性からは紙筒入り粉末組成物を用いた燃焼速度推定法はストランド法より優れているようである。

3.4 燃焼火炎のスペクトルピーク強度プロファイルから見た各種形状組成物燃焼の安定性

煙火星および組成物の燃焼火炎の強度の変動は、スペクトルピーク強度プロファイルで見ることができる。裸星および全面着火剤被覆星のピークプロファイルの例はFig. 3に示した。PPR, ストランドおよびPPTのピーク強度プロファイルの例をFig. 6に示す。

ピーク強度プロファイルの変動の大きさから見た見かけの燃焼安定性は、次の順序であった。

接着剤・着火剤被覆星(PPR) > ストランド(strand) > 紙筒入り粉末組成物(PPT)

PPTでは、途中の立ち消えはなかったが、ストランドでは立ち消えがあった。PPTでは、最初火炎が筒口から噴出したが、燃焼の途中から筒口からの火炎の噴出はなくなり、内部でのみの燃焼が見られた。それでも、全燃焼時間はあまり変化しなかった。Fig. 6 (d)において26 s以降のピーク強度が燃焼終了時の52 sまで0となっているのは、筒口火炎がまったく見られない状態である。燃焼の最後には短時間の筒口火炎が見られた。筒内燃焼はスペクトルメータのピーク強度プロファイルでは検出できなかったが、目視では筒が明るくなるので知覚でき、ストップウォッチで燃焼終了時間を測定できた。

コンポジット固体ロケット推進薬の表面燃焼機構は、燃焼表面付近における反応発熱とその熱の未燃固体への移動によって燃焼が継続することが知られている³⁾。紙筒入り粉末組成物の燃焼の場合には、実質的な燃焼は筒口火炎の有無に関わらず、筒内の未燃固体の表面付近で行われていると思われる。

4. 結論

実際の煙火の打ち揚げで重要な煙火星の燃焼時間は着火剤被覆星の飛行燃焼時間である。これを組成物から予測することは実用上重要である。最も簡単で測定値のバラツキの小さい方法は粉末組成物を内径8 mm, 長さ95 mmの紙筒に手で充填して端面燃焼させ、全燃焼時間をストップウォッチで測定する方法であった。

謝辞

本研究に当り試料を提供していただいたアルプス煙火工業(株)社長堀内幸敏氏に感謝します。

References

- 1) All Japan Association for Safety of Explosives, "Manufacture and Safety of Fireworks", p. 96 (2006).
- 2) T. Shimizu, "Fireworks", p. 137 (1961), Hitotubasi syobo.
- 3) N. Kubota, "Pyrotechnic Chemistry", Chapter 11 (2004), J. Pyrotechnics, Inc.

Burning characteristics of firework stars and compositions

Yasuhiro Sashimura*, Hideo Watanabe**, Mamoru Horiuti**, Maiko Watanabe**, Kazuomi Itoh**, Dayu Ding**, and Tadao Yoshida**†

The burning behavior and burn-time of firework stars and their compositions were observed. The burning behavior is discussed from the perspective of specific spectral peaks observed in the combustion flame. Although the intensity of combustion flame fluctuated greatly with time, the total burning times of the stars had little scatter. During the combustion of the powdered star composition that had been loaded into paper tubes, at first the flame projected from the upper end of the tube. Sometimes, the flame disappeared below the upper end of the tube, with the combustion continuing down inside the tube; however, the total combustion time did not change much. For an estimation of burn rate of a firework star, the combustion of the powdered composition in a paper tube may be useful from the view point of simplicity and the small amount of scatter in the observed data.

Keywords: Firework star, Star composition, Burning time, Spectrum peak profile.

*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