

煙火原料火薬の研究(第2報)

火の粉剤, 星剤, 色火剤の大量燃焼

石川 昇*, 日下部正夫*

通産省では煙火工場での保安技術基準の資料を作成することを目的として, 大規模な野外爆発実験²⁻¹¹⁾を実施してきた。その際に筆者らは煙火原料火薬の爆発状況を 16mm 映画カメラを用いて撮影し, その燃焼速度, 炎の経緯時間などを測定した。これらの実験結果のうち, 雷薬, 割薬については前報¹⁾で報告したので火の粉剤, 星剤, 色火剤について報告する。

火の粉剤は混合されたアルミニウム (Al) 粉の粒度によっては爆ごうするものがある。星剤の燃焼状態には量的影響が見られ集積薬量の増加によっては燃焼に転移することがある。色火剤は比較的穏やかに燃焼し, 他の煙火原料火薬に比べて燃焼速度は遅いと思われる。

1. 緒言

一般に煙火原料火薬は爆ごうを利用する雷薬などの一部種類を除けば, その大部分は燃焼を利用するものである。しかし, これらの火薬でも煙火工場などで大量に集積された場合, 着火すれば激しく燃焼し, あるいは爆ごうに到る可能性があり, その結果事故につながる場合がある。したがって事故予防の目的から, 各種別ごとに大量での爆発特性を調べておくことは保安上重要であると思われる。

通産省では昭和42年以来, 煙火原料火薬の爆発性を検討するため, 大規模な野外実験を実施し, その成果は10冊の爆発実験報告書²⁻¹¹⁾に記載されている。筆者らはこの実験に参加して 16mm 常速カメラを用いて煙火原料火薬の爆発状況を撮影し, その解析を行って報告してきた。本報告はこれらの実験報告書の実験結果をまとめ整理したものである。なお, 前報¹⁾においては雷薬, 割薬について報告したので今回は火の粉剤, 星剤, 色火剤の燃焼について報告する。

2. 実験方法

各種煙火原料火薬を地上またはコンクリート床上に 5kg, 30kg, 50kg, 100kg を野積みしたのち, 6号電気雷管または点火玉2ヶと薬紙を点火源として着火させた。これらの燃焼状況を保安距離を十分に確保した位置から 16mm 映画カメラ (Bolex) を用いて焦点距離 75mm, 撮影速度 32コマ/秒で撮影した。これらの

撮影フィルムを現像したのち, 解析映写機 (Bell and Howell, 173型) を用いて炎や煙の発生, 進展, 消滅の状況を解析した。撮影方法, 解析方法については前報に詳述してあるので省略する。

実験に用いた煙火原料火薬の組成は Table 1 に示す。主酸化剤として塩素酸カリ ($KClO_3$), 過塩素酸カリ ($KClO_4$) および過塩素酸アンモン (NH_4ClO_4) の三種類を用いて, これらの間の比較を主目的とした。表中の記号 G は火の粉剤, 記号 S は完成品の星剤, 記号 R は粉末状の色火剤で星の原料薬となるものである。アルミニウム粉 (Al) の括弧内の数字はその粒度を示した。

煙火原料火薬はその用途により特殊な混合薬品で調製されているものがあるので概説する。BL 助燃剤 (BL) は生松ヤニからテレピン油を分離した残査ロジン的一种である。松根ビッチ (PI) は松根を乾溜して松根油を除いた黒褐色の残査である。セラック (Se) はトリヒドロキシパルミチン酸 [$C_{25}H_{51}(CH_2)_{11}(CHOH)_3COOH$] が主成分で炎色剤として優秀な作用があるとされている。木粉 (WM) は 350 μ 以下の微細な木粉で配合薬の固化防止とともに助燃剤となる。花緑膏 (CA) はフジツボの付着を防止するための船底塗料用として用いられている [$3CuO \cdot AS_2O_3 + Cu(CH_3COO)_2$] で一般にエメラルドグリーンと言ひ毒性がある。なお, みじん粉 (RP), アルミニウム粉 (Al), 麻炭 (CH) については前報に記述してある。

試料は 5kg の場合はクラフト紙またはポリエチレン袋で包装し, 30kg 以上の場合は段ボール箱あるいは

昭和54年2月15日
*東京工業試験所保安現明化学部
〒254 神奈川県平塚市四八幡1-3-4

Table 1 Samples of firework compositions.

Symbol	Formula	(Weight ratio)	Note
G-1	KClO ₃ /Al/S/Sh	(100/40(200mesh)/20/15)	SUISEI
G-2	KClO ₃ /Al/BL/Wm/Sh	(100/27(200mesh)/17/3/3)	DRAGON
G-3	KClO ₃ /Al/BL/Wm/Sh	(100/27(300mesh)/17/3/3)	"
G-4	NH ₄ ClO ₄ /Al/BL/Wm/Sh	(100/27(200mesh)/17/3/3)	"
G-5	NH ₄ ClO ₄ /Al/BL/Wm/Sh	(100/27(300mesh)/17/3/3)	"
G-6	NH ₄ ClO ₄ /Al/BL/Wm/Sh	(100/38(200mesh)/17/3/3)	"
S-1	KClO ₃ /SrCO ₃ /Se/C	(100/30/10/8)	covered with ignition composition
S-2	KClO ₃ /SrCO ₃ /BL/C/Sh	(60/20/9/6/5)	
S-3	KClO ₃ /Ba(NO ₃) ₂ /BL/C/Sh	(45/30/9/9/7)	
S-4	KClO ₃ /CA/C/Sh	(60/23/12/5)	
S-5	KClO ₃ /Al/C/Sh	(53/23/4/10)	
S-6	KClO ₃ /SrCO ₃ /Se/C	(100/20/10/8)	covered with black powder
S-7	KClO ₃ /SrCO ₃ /Mg/BHC/Se	(100/60/140/20/20)	
S-8	KClO ₃ /SrCO ₃ /Mg/BL/Pi	(36/18/33/6/7)	
S-9	KClO ₃ /Ba(NO ₃) ₂ /Mg/BL/Pi	(33/26/30/5/6)	
R-1	KClO ₃ /SrCO ₃ /Se/C	(100/30/10/8)	
R-2	KClO ₃ /SrCO ₃ /Se/C	(100/20/10/8)	

Sh.....Starch Wm.....Wood meal BL.....Rosin Pi.....Pine root pitch
 Se.....Shellac CA.....3CuO·As₂O₃+Cu(CH₃COO)₂

木箱に収納して野積みにした。

3. 実験と考察

3.1 火の粉剤

火の粉剤は未燃焼の高温金属粉が空気中に放出され二次燃焼を起す現象を利用するもので、金属粉を Al 粉としたスイセイ剤やドラゴン剤と呼ばれるものがある。実験条件は Table 2 に示した。

14例の実験を行い、その結果は Table 3 に示した。表中に示す燃焼、燭燃、爆轟の別は現場での爆発跡の状況あるいは写真解析によったものである。すなわち、写真解析による炎の膨脹の速さ、燃焼途上におけ

る試料薬の飛散状況および現場のロート孔の有無などを総合して判定したもので、それらが特に急激なものは爆燃とし、ゆるやかなものについては燃焼とした。また試料薬の集積位置にロート孔ができたものを爆ごうとした。この判定基準は前報における雷薬、割薬の場合と同じである。

消炎時間とは通電したのち試料薬から炎が発生し、消滅するまでの時間 (sec) である。燃焼速度は薬量を消炎時間で除して得られた単位時間当りの平均反応量である。炎の地上高は炎の成長状況を時間の経過ごとに図示して着火後 50ms の時の地表からの高さを表し

Table 2 Experimental conditions for gerbes

No.	Symbol	Quantity	Package	Location	Igniter
1	G-1	5kg	Polyethylene sheet bag	on the ground	Two detonators
2	"	30kg	Corrugated carton	Concrete-floor	Two squibs and Yakushi
3	"	"	"	on the ground	"
4	"	50kg	"	"	"
5	"	"	"	Concrete-floor	"
6	G-2	30kg	"	on the ground	"
7	G-3	"	"	"	"
8	G-4	"	"	"	"
9	G-5	"	"	"	"
10	G-6	5kg	Polyethylene sheet bag	"	"
11	"	30kg	Corrugated carton	"	"
12	"	"	"	Concrete-floor	"
13	"	50kg	"	on the ground	"
14	"	"	"	Concrete-floor	"

Yakushi: Washi (Japanese paper) which is coated with black powder.

Table 3 Experimental results from gerbes

No.	Phenomenon	Extinguished time (sec)	Burning velocity (kg/sec)	Flame height at 50ms from ignition (m)
1	Combustion	2.12	2.4	5.6
2	"	3.33	9.0	7.6
3	"	3.79	7.9	8.5
4	Deflagration	1.82	27.5	14.4
5	"	1.00	50.0	9.0
6	"	2.03	14.8	—
7	Detonation	—	—	—
8	Deflagration	2.87	10.0	—
9	"	2.75	10.9	—
10	Combustion	4.85	1.0	5.0
11	"	3.70	8.1	11.5
12	"	3.30	9.1	7.6
13	"	6.24	8.0	9.5
14	"	14.40	3.5	10.2

たものである。

実験例のうち No.7 は爆発音をともなって爆ごうしたが、その他の試料は燃焼あるいは爆燃状態であった。爆ごうした No.7 は集積位置の地表に最大径 2.5m、深さ 0.72m のロート孔ができた。このロート孔の大きさは同薬量の雷薬よりは小さいが割薬よりは大きい。組成は爆燃した No.6 とほぼ同じであるが混合した Al 粉の粒度の違いがある。すなわち、No.6 は 200 メッシュであり、No.7 は 300 メッシュで粒度が細くなっている。このように酸化剤が $KClO_4$ より安定と思われる $KClO_3$ でも Al 粉の粒度によっては燃焼速度が早くなり、爆ごうすることがある。このことは NH_4ClO_4 系についても同様のことが言える。すなわち、Al 粉の細かい No.9 は同薬量の粒度の大きい No.11、No.12 と比べると燃焼速度が早くなっている。

集積薬量と燃焼速度の関係は $KClO_3$ 系においては薬量の増加にともなって燃焼速度は早くなっているが、 NH_4ClO_4 系については判っきりした傾向がなかった。

炎の進展状況は火の粉剤特有の即きと明るさをもって燃焼し、燃焼温度が高いものと思われる。また、他の煙火原料薬と比べて炎の広がりが大きく、薬量が多くなれば地表から 10m 以上の高さに達するものがあった。

3.2 星 剤

星剤は色火剤に糊(みじん粉、等)と水を混ぜて成型乾燥したのち、表面に伝火薬として黒色火薬等をまぶして完成する。したがって、配合薬の組成は色火剤とあまり変りはない。S-1、S-6、S-7 は成型したのち黒色火薬等の着火剤をまぶした完成品である。その他

の星剤は着火剤の仕上げをしない半成品である。集積状況および点火方法は Table 4 に示す。また燃焼状況は Table 5 に示した。

実験23例のうち、No.19 は燃焼途中で爆ごうへ轉移したが、その他の試料は燃焼あるいは爆燃状態であった。No.19 は着火数 ms 後に鈍い爆発音をともなって爆ごうし、地表には径 90cm、深さ 13cm のロート孔ができた。このロート孔は試料のほとんどが燃焼したのちに爆ごうしたので、雷薬のように着火直後に爆ごうするものと比較すると、その大きさは小さくなっている。

主酸化剤による爆発状況の違いは、概ね $KClO_3$ 系は $KClO_4$ 系よりも燃焼速度が早く、爆燃状態になる場合が多い、また主酸化剤の種類にかかわらず集積薬量の増加にともなって爆燃あるいは爆ごう状態になるものがあった。同薬種 (No.15~No.19) での薬量の増加による燃焼速度は明らかに薬量の増加にともなって燃焼速度は早くなっている。また爆発状況も 5kg、30kg では燃焼あるいは爆燃であるが No.19 のように 100kg では爆ごうするようになる。このように大薬量になるにつれて薬包中央部の圧力が上昇することにより、燃焼は加速されて爆ごうに轉移していくので、大薬量の火薬を取り扱う場合は特に注意が必要である。

星剤は例外なく燃焼しながら星が激しく飛散する。それらはその時の気象条件、集積状況などによっては広範囲に散る場合がある。表中の星の飛散距離はカメラ観測によって求めたもので、集積位置に正対して水平方向に飛散した星の落下位置を測定したものである。しかしながら、燃焼後現場での飛散状況を調べると必ずしも集積位置を中心とした円形上にならず、表中の測定値よりも広範囲に散っている。ここでは一応

カメラ観測による飛散距離を示して参考資料とした。
これらによると星の飛散状況は燃焼状態のものは当然

燃焼のときより遠方まで飛散している。また薬量の増
加にもなって更に広範囲に飛散している。

Table 4 Experimental conditions for star grains

No.	Symbol	Quantity	Package	Location	Igniter
15	S-1	5kg	Craft paper bag	on the ground	Two squibs and Yakushi
16	"	"	"	"	Two detonators
17	"	30kg	Wooden box	"	Two squibs and Yakushi
18	"	"	"	Concrete-floor	"
19	"	100kg	"	on the ground	"
20	S-2	5kg	Craft paper bag	"	"
21	"	30kg	Corrugated carton	"	"
22	S-3	5kg	Craft paper bag	"	"
23	"	30kg	Corrugated carton	"	"
24	S-4	5kg	Craft paper bag	"	"
25	"	30kg	Corrugated carton	"	"
26	S-5	5kg	Craft paper bag	"	"
27	"	30kg	Corrugated carton	"	"
28	S-6	5kg	Craft paper bag	"	"
29	"	30kg	Wooden box	"	"
30	S-7	5kg	Craft paper bag	"	"
31	"	30kg	Polyethylene sheet bag	"	"
32	"	"	"	Concrete-floor	"
33	"	100kg	Wooden box	on the ground	"
34	S-8	5kg	Craft paper bag	"	"
35	"	30kg	Corrugated carton	"	"
36	S-9	5kg	Craft paper bag	"	"
37	"	30kg	Corrugated carton	"	"

Table 5 Experimental results from star grains

No.	Phenomenon	Extinguished time(sec)	Burning velocity(kg/sec)	Scattering diameter of stars(m)
15	Combustion	2.2	2.3	1.6
16	Deflagration	2.1	2.4	—
17	"	3.3	9.1	—
18	"	1.6	18.8	—
19	Detonation	—	—	5.5
20	Combustion	1.6	3.1	3.5
21	Deflagration	1.3	23.4	—
22	Combustion	1.6	3.2	5.7
23	Deflagration	2.1	14.1	17.3
24	"	2.4	2.1	—
25	"	2.5	12.1	—
26	Combustion	3.2	1.5	—
27	"	4.7	6.4	15.5
28	"	—	—	—
29	Deflagration	2.8	10.7	5.8
30	Combustion	2.7	1.9	3.7
31	Deflagration	—	—	—
32	"	4.5	6.7	5.3
33	"	4.7	2.1	4.0
34	Combustion	2.2	2.3	3.3
35	Deflagration	3.1	9.8	11.0
36	Combustion	2.4	2.1	2.8
37	Deflagration	—	—	—

Table 6 Experimental conditions for star compositions as powder

No.	Symbol	Quantity	Package	Location	Igniter
38	R-1	5kg	Polyethylene sheet bag	on the ground	Two squibs and Yakushi
39	"	"	"	"	Two detonators
40	"	30kg	"	"	Two squibs and Yakushi
41	"	100kg	Wooden box	"	"
42	R-2	5kg	Polyethylene sheet bag	"	"
43	"	30kg	Carft paper bag	"	"

Table 7 Experimental results from star compositions as powder

No.	Phenomenon	Extinguished time (sec)	Burning velocity (kg/sec)
38	Combustion	10	0.5
39	"	1.5	3.2
40	"	4.3	7.0
41	"	10	10
42	"	8.0	0.6
43	"	3.2	9.4

3.3 色火剤

実験した色火剤は粉状の星用色火剤である。集積状況は Table 6 に示し、その実験結果を Table 7 に示した。

全試料ともにゆるやかな燃焼であり、その燃焼速度は他の煙火原料火薬に比して概ね遅い、また薬量の増加にもなつての燃焼速度の増加は他に比してわずかである。

主酸化剤の影響については実験回数が少ないため、はっきりした差は得られないが、この実験に用いられた配合成分組成の範囲内では主酸化剤による燃焼状況の違いはないと思われる。

4. 総括

本報告は数年次にわたって実施した煙火原料火薬についての実験結果を同薬種ごとに整理し、比較検討したものである。

1) 火の粉剤の爆発性は過塩素酸アンモン系では緩やかな燃焼をしたが、塩素酸カリおよび過塩素酸カリ-Al 粉系において、Al 粉の粒度が細くなると燃焼速度は増し、No. 7 のようにその粒度が 300 メッシュになると爆ごうする場合があった。

2) 星剤は 5kg, 30kg 程度では燃焼または爆燃の状態であったが、100kg になると燃焼途中で爆ごうへ転移することがある。また、星剤は例外なく薬の飛散があり、大量になると非常に遠方まで飛散する。明らかにその爆発性は量的影響を示しているので取扱上の注意が必要である。

3) 色火薬は煙火原料火薬のうちで比較的燃焼が緩やかなものと思われる。特に小薬量では燃焼速度は他

の煙火原料薬に比して非常に遅いが薬量の増加することによりわずかに増す傾向がある。

付 記

本実験は通産省が主催し、第一薬品興業 K K, 村井一氏をはじめ関係団体の諸氏の助勢によって実施されたものである。深く謝意を表す。なお実験の生の結果は通産省爆発実験報告書(公刊)に記載されている。

文 献

- 1) 石川昇, 日下部正夫, 工火誌 37, No. 6 (1976)
- 2) 滋賀県(櫻庭野)における爆発実験報告書(1968)
通産省化学工業局, 工業技術院
- 3) 大分県(日出生台)における爆発実験報告書(1969)
通産省化学工業局, 工業技術院
- 4) 岩手山爆発実験報告書(1970)
通産省化学工業局, 工業技術院
- 5) 関山(新潟県)爆発実験報告書(1971)
通産省公害保安局, 工業技術院
- 6) 関山(新潟県)爆発実験報告書(別冊)(1971)
通産省公害保安局, 工業技術院
- 7) 上富良野(北海道)爆発実験報告書(1972)
通産省公害保安局, 工業技術院
- 8) 日出生台(大分県)爆発実験報告書(1973)
通産省公害保安局, 工業技術院
- 9) 日出生台(大分県)爆発実験報告書(別冊)(1973)
通産省公害局, 工業技術院
- 10) 岩手山(岩手県)爆発実験報告書(別冊)(1974)
通産省立地公害局, 工業技術院
- 11) 上富良野(北海道)爆発実験報告書(1975)
通産省立地公害局, 工業技術院

Studies on firework compositions (II)

Combustion characteristics of piled firework compositions ; gerbs, star grains and star compositions as powder

by Noboru Ishikawa* and Masao Kusakabe*

Since 1967 a series of field experiments has been practiced on a large scale by The Ministry of International Trade and Industry to contribute useful data to safety regulations. This paper summarizes the results on the combustion characters of three types of firework compositions (Table 1). The compositions were piled on the ground or on a concrete-floor in 5kg, 30kg, 50kg or 100kg and they were ignited with two squibs combined with powder pasted paper, Yakushi, or for some samples with two detonators (Table 2, 4, 6). The phenomena were photographed with a 16 mm cinecamera (Bolex) with a speed 32 pictures per second and the crater formations were examined. From 37 tests the reaction modes were classified into three : combustion, deflagration and detonation. Most gerbes showed combustion or deflagration except when a composition contained fine aluminium, the particle size of which was less than 300 mesh. The reaction of the composition with fine aluminium was promoted to detonation (Table 3). The star grains of 100 kg shifted to detonation from several ten ms combustion and in other cases they showed combustion or deflagration (Table 5). The star composition powders showed combustion even with a quantity of 100kg (Table 7).

(*Agency of Industrial Science and Technology, 1-3-4Nishiyawata, 254
Hiratsuka-shi, Kanagawa-ken, JAPAN)