

## 煙火組成物の鋼管試験 (I)

畑中修二\*, 早川 隆\*\*, 官原 章\*  
田村昌三\*\*\*, 長田英世\*\*\*\*

煙火組成物の鋼管試験を行い、伝爆性や起爆感度を検討した。アルミニウムを含有する雷薬、澆剤を中心に鋼管破片、漏斗孔、伝播速度を測定した。その結果、雷薬は6号雷管で完爆するが、澆剤にも完爆するものがあり、いずれもブースターを使用して起爆力を強めると更に威力を増すことが判明した。

鋼管試験において連続的に伝播速度を測定する方法として、抵抗線プローブは使用可能であるが、低速、特に1000 m/s以下では信頼性が低く問題がある。

## 1. はじめに

煙火組成物は、煙火に用いられる性格上、導火線着火が可能であるが如く概して鋭感である。感度については、種々の研究<sup>1), 2)</sup>がなされておりさらに総合的な研究へと進んでいる。しかしながら、威力や伝爆性についての研究は殆ど進んでいない。1992年に発生した茨城県の煙火製造所の事故<sup>3)</sup>を契機に、煙火組成物の感度や威力について総合的に研究することとなった。

煙火組成物、特に雷薬と黒色火薬に関する威力関連の研究としては、爆風圧測定が通商産業省主催の大規模野外実験<sup>4)</sup>で継続的に行なわれている。同実験は被害の予測などの点で有効であり貴重なデータが得られたと思われるが、大規模であり場所や人手の確保の点で一般的に行なうには難がある。

筆者らは煙火組成物の威力関連の研究の一環として、

1996年8月20日受理

\* (社)日本煙火協会検査所

〒441-11 愛知県豊橋市石巻西川町字吉祥 18-17

TEL 0532-88-5581

FAX 0532-88-4795

\*\* 日本油脂(株)愛知事業所武豊工場研究開発部

〒470-23 愛知県知多郡武豊町字北小松谷 61-1

TEL 0569-72-0916

FAX 0569-73-7376

\*\*\* 東京大学大学院工学系研究科

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL 03-3812-2111 (Ext.7291)

FAX 03-5800-6871

\*\*\*\* 九州工業大学名誉教授

〒215 川崎市麻生区高石 2-30-1

TEL 044-951-1296

FAX 044-951-1296

鋼管試験を取り上げた。鋼管試験は比較的簡便であり、試験方法の工夫によって、伝爆性、起爆感度や爆速の評価を行なうことが出来る<sup>5), 6)</sup>。

煙火組成物は基本的に酸化剤粉末と可燃剤粉末を混合した混合火薬類であり、可燃剤としては金属、硫黄や天然樹脂類が使用される。アルミニウムなどの金属を混合した火薬は、概して発熱量が大きく威力も大となると考えられる。

花火において、鮮やかな色や光を発することは一つの重要な目的である。例えば“澆”では、長い時間光輝する火の粉を吹き出すことが目的である。火の粉となる粗粒子のアルミニウムと、そのアルミニウムを高温まで熱して着火燃焼させるために、過塩素酸カリウムと微粉末のアルミニウムを混合した組成物が使用される<sup>7)</sup>。必然的に澆用煙火組成物(以下“澆剤”という)は発熱量が大きくなる。前述の製造所での事故を大きくした原因として澆剤の大量存置が疑われた。

本研究では、発熱量が大きく危険性が高いと思われる澆剤などのアルミニウムを含有する煙火組成物を中心に、起爆力等の条件を変化させて、平均伝播速度(爆速)、漏斗孔の測定および鋼管の破碎状況を観察して起爆感度や伝爆性を検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 試料

## 2.1.1 原料薬品

使用した原料薬品は、煙火製造所で使用されているものを選んだ。塩素酸カリウム(KClO<sub>3</sub>): Eka Nobel Elektrokemi社(スウェーデン)仕様不明、過塩素酸カリウム(KClO<sub>4</sub>): 日本カーリット(株) #250 パス97.3%, 硫黄(S): (株)軽井沢精錬所 #200 パス

Table 1 Tested fireworks composition

Sample name and composition (wt.%)	Manufactory
1. Report1 (Flash and sound) KClO <sub>3</sub> /Al/S=71.4/21.4/7.2	JPABPI*
2. Report2 (Flash and sound) KClO <sub>4</sub> /Al/S=71.4/21.4/7.2	JPABPI
3. Cascade1 KClO <sub>3</sub> /Al(FC)/Al(FF)=55/36/9	JPABPI
4. Cascade2 KClO <sub>3</sub> /Al(FC)/Al(FF)/S=55/36/9/7 (additional)	JPABPI
5. Cascade3 KClO <sub>4</sub> /Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al(FC)/Al(FF)/Al(AC)/S =37/7/12/10/27/7	Sanshu Kakou
6. Thick cascade KClO <sub>3</sub> /Al(FC)/Al(FF) (estimated)	Daido Kakou
7. Thin cascade KClO <sub>3</sub> /Al(FC)/Al(FF) (estimated)	Daido Kakou
8. Black powder (fine grain) KNO <sub>3</sub> /Charcoal/S=74/16/10	Nippon Kayaku
9. Silver star (made in China) Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /S/Mg-Al (estimated)	Yamazaki Enka

\*Japan Pyrotechnics Association, Bureau of Pyrotechnics Inspection

Al(FC): Aluminum (flaky coarse), Al(FF): Aluminum (flaky fine)

Al(AC): Aluminum (atomized coarse), Mg-Al: magnesium aluminum alloy

99.57%, フレークアルミニウム(細) (Al(FF)): 中塚金属箔粉工業(株) 純度99.3%, #325パス93.5%, フレークアルミニウム(粗) (Al(FC)): 中塚金属箔粉工業(株) 純度99.5%, #10~#20

### 2.1.2 混合

試料はアルミニウムを含む雷薬や澆剤を主に選んだ。試料組成を Table 1 に示した。試料1~4の雷薬1, 2, 澆剤1, 2は日本煙火協会の検査所で混合準備した。試料は, 30gを1バッチとして可燃剤を予めV型混合機で10分混合した後, 最後に酸化剤を加えて再度10分混合した。試料には鋭感な混合物が含まれるので安全のために, スイッチのON, OFFは遠隔で操作した。

試料5~7の澆剤3, 太澆, 細澆は, 実用されている澆剤でメーカーから入手して試験に供した。

比較のために試料8の黒色小粒薬を測定した。また, 参考として試料9の中国製の星剤(銀星の色火組成物)を取り出して粉碎して測定した。

### 2.2 装填・設置

一端を紙テープで閉じた鋼管(JIS G 3452 32A SGP)に試料を軽くタッピングしながら充填し, 装薬量から装填密度を計算した。実用の澆剤の装填密度が0.97~1.24 g/cm<sup>3</sup>であったので, 装填密度の基準を1.0

g/cm<sup>3</sup>とした(澆剤3は酸化剤に比重の重い硝酸バリウムが使われているために例外的に重くなった)。後方から抵抗線プローブを試料中央になるように挿入した。ブースターとして50gのエマルジョン爆薬(日本油脂(株)製)を半球形になるように成形して, ブースターにオシロスコープのトリガー用のイオンギャップセンサーを取り付けた。このブースターを鋼管に取り付けテープで固定した(Fig.1参照)。

爆発ピット内で雷管を取り付け, 深さ30cmの砂中に(あるいは砂上に)鋼管を水平に設置して砂をかぶせて起爆した。

### 2.3 観察及び漏斗孔計測

雷管に通電起爆し, 後ガスの排気後, 鋼管の破片回収と漏斗孔の大きさの計測を行なった。漏斗孔の大きさは試料軸方向長さ(a)と垂直方向長さ(b)と試験前の表面からの深さ(h)をcm単位で計測し, 漏斗孔を楕円錐形とみなして, 次式で容積(V)を計算した。

$$V = \pi abh / 12$$

### 2.4 伝播速度測定

爆速測定方法としては, ドートリッシュ法, イオンギャップ法など種々の方法が知られている<sup>6)</sup>が, 連続的に測定できて比較的簡便な方法として抵抗線プ

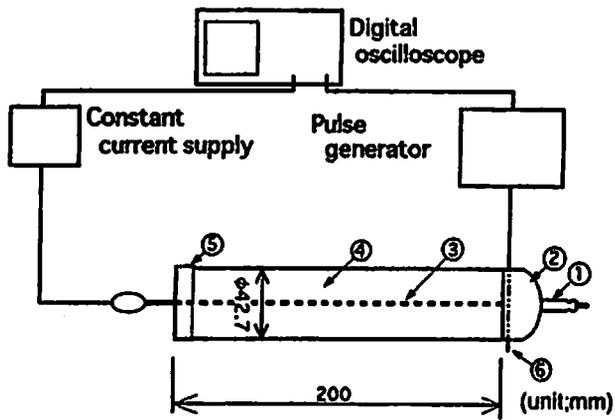


Fig. 1 Block diagram of steel tube test  
 1. Electric detonator 2. Booster 3. Resistance wire probe 4. Steel tube ( $\phi 42.7 \times 200$ , t3.5)  
 5. Sealed tape 6. Ion gap probe

ローブ法を採用した。

本試験における装置の概要を Fig. 1 に示した。

イオンギャップからの信号をトリガーとし、抵抗線プローブの電圧変化をデジタルオシロスコープ (Nicolet社製) に記録した。プローブの抵抗率を予め測定しておく、定電流を流した場合、測定電圧はプローブの長さに比例しており、電圧の時間変化はプローブの長さの時間変化を意味している。伝播速度がプローブの短絡速度に対応している限りは、伝播速度が測定できる。本試験では測定で得られた曲線の平均の傾き、即ち平均伝播速度を求めた。

本試験で用いた抵抗線プローブ<sup>9)</sup>は、外径が0.55 mmと非常に細く時間遅れが少ないとされるもので、抵抗線の保護にスチールチューブ (外径0.55mm 内径0.3 mm) が使われている。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 破碎状況

鋼管の破碎状況の例を Photo. 1 に示した。雷薬 1 では砂上で雷管起爆した場合とブースターで起爆した場合のいずれの場合も、全体的に破碎しており完爆と判定した。雷薬 2 も同様であった。

一方、滝剤 1 では、砂上雷管起爆によってブースター側の一部と末端側の一部が裂けるだけであり半爆と判定した。砂上ブースター起爆では、破片の大きさは雷薬の場合より大きい、全体的に破碎しており完爆となった。太滝も同様であった。これらの組成物は、雷管とブースターの起爆力の差によって伝爆性が異なるといえる。

細滝、銀星、黒色小粒火薬は、ブースターを用いても鋼管の一部が裂けずに残り半爆と判定した。これらの結果をまとめて Table 2 に示した。

試験した煙火組成物は、6号雷管1本で完爆するもの、ブースターを使って起爆力を強めて初めて完爆するもの、さらにこの程度では完爆しないものが存在することになり、起爆感度は広範囲に亘ることが判明した。

砂中と砂上でブースター起爆した結果を比較し、密

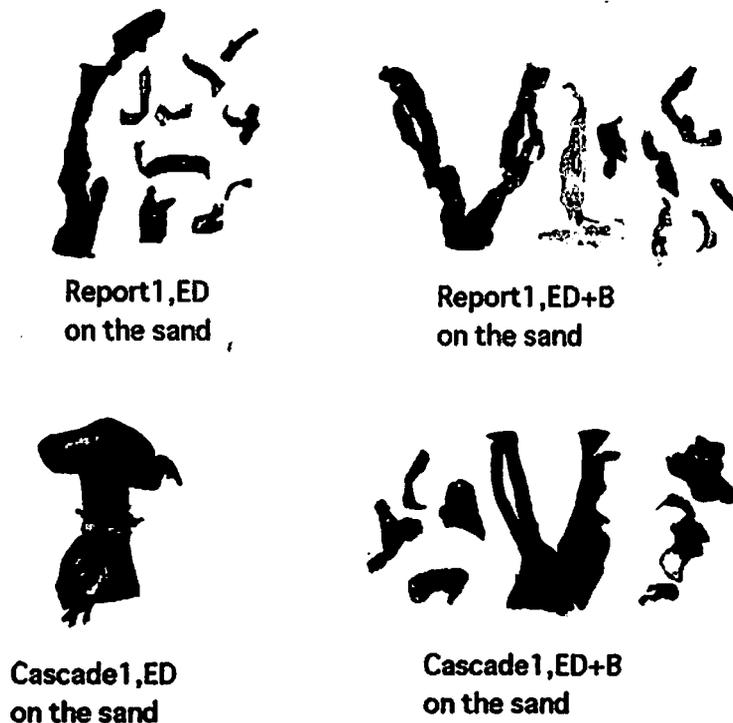


Photo. 1 Examples of steel tube fragments

Table 2 Results of steel tube test

Sample	Initiator	Situation of tube	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Velocity (m/s)	Crater (×10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup> )	Evaluation
Booster	ED	IN	—	—	14.4	Complete
	ED	ON	—	—	0.54	Complete
Chitamite	ED	ON	1.15	5000	2.51	Complete
Report1	ED+B	IN	1.022	614	28.26	Complete
	ED	ON	1.036	1655	0.94	Complete
	ED+B	ON	1.043	969	3.77	Complete
Report2	ED+B	IN	1.075	—	26.49	Complete
	ED	ON	1.016	1108	0.86	Complete
	ED+B	ON	0.980	1582	0.99	Complete
Cascade1	ED+B	IN	1.021	—	28.26	Complete
	ED	ON	1.016	578	0.58	Incomplete
	ED+B	ON	1.052	—	1.43	Complete
Cascade2	ED+B	IN	1.077	—	30.14	Complete
	ED	ON	1.054	—	0.58	Complete
	ED+B	ON	1.038	1212	1.04	Complete
Cascade3	ED	ON	1.339	769	0.85	Complete
Thick Cas.	ED	ON	0.994	—	0.47	Incomplete
	ED+B	ON	0.905	—	0.86	Complete
Thin Cas.	ED+B	ON	1.012	—	0.79	Incomplete
B/P	ED+B	IN	1.120	—	22.20	Incomplete
Silver star	ED+B	ON	0.880	—	0.64	Incomplete

\*ED:No6 detonator, B:50 g "Chitamite" (emulsion explosive)

\*Steel tube was putted on the sand or in the sand (30cm depth)

\*\*"Velocity": average propagation velocity.

\*Crater volume (V) was calculated by the following equation:

$$V = \pi abh / 12 \quad \text{here } a : \text{long axis of crater}$$

$$b : \text{short axis of crater}$$

$$h : \text{depth of crater}$$

\*Explosion was classified into complete explosion, incomplete explosion, or non-explosion.

\*\*"—" mark in Velocity column: failure

閉度の影響を調べた。雷薬 1, 2 と滴剤 1, 2 について行なったが、いずれも砂上で完爆しており、破片の大きさを比較しても明確な差が見いだせなかった。

### 3.2 漏斗孔の大きさ

漏斗孔容積を Table 2 に併せて示した。砂中起爆の漏斗孔容積が砂上起爆のものより大きくなるのは当然であるが、砂上起爆では容積が小さく、深さは 9~20cm と浅いので測定誤差が大きくなると考えられる。漏斗孔の測定では明確な漏斗孔の寸法が測れない上に、漏斗孔の形状を楕円錐形に近似しているために容積値に誤差が大きいのは無理からぬことと思われる。正確な容積の測定は埋め戻し<sup>5)</sup>など、測定方法を工夫する必要があると思われる。

Table 3 Net crater volume of the in-sand explosion used booster

Report1	13.8 × 10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>
Report2	12.0 × 10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>
Cascade1	13.9 × 10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>
Cascade2	15.7 × 10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>
B/P	7.8 × 10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>

砂中起爆での漏斗孔容積から、ブースター単体によって生じた漏斗孔容積をブランクとして差し引いた其の漏斗孔容積を Table 3 に示した。雷薬と滴剤との間で漏斗孔容積に殆ど差が見られず、黒色火薬は、そ

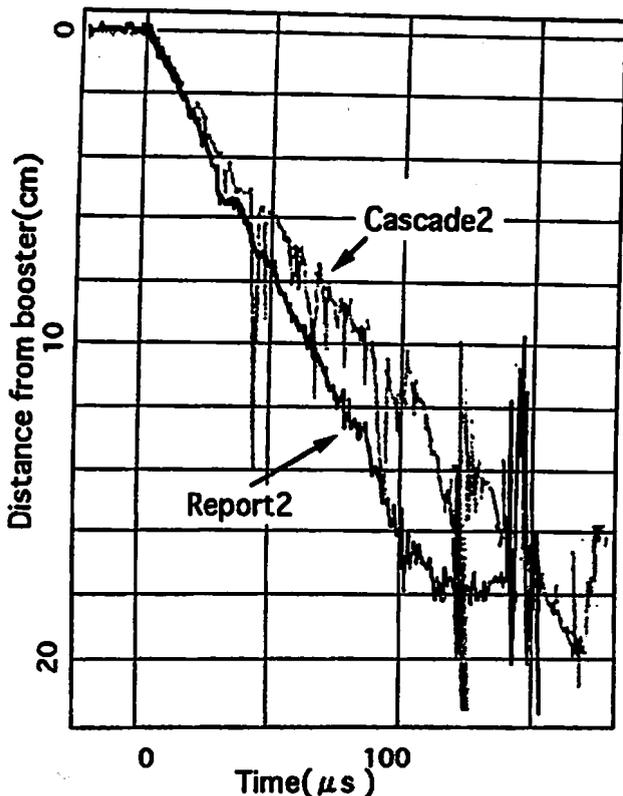


Fig. 2 Examples of time distance curve

これらの半分程度となった。又、漏斗孔容積は静的威力を表わすと考えると、雷薬と滝剤では静的威力にほとんど差がなく、黒色火薬は、これらに比べるとずいぶん弱いことになる。

### 3.3 伝播速度

#### 3.3.1 抵抗線プローブ法

抵抗線プローブ法で得られた雷薬2と滝剤2に関する時間-距離の曲線例をFig. 2に示した。雷薬2の測定結果は、安定した波形が得られているが、滝剤2の波形は電圧値が大きく変動しており不安定であった。

ブースターから約5cm区間は、雷薬2と滝剤2ともにはほぼ同じ傾き、すなわち同じ伝播速度を有する。滝剤2では、その後、徐々に傾きが緩くなり伝播速度が遅くなっている。ブースターに近い5cm区間の伝播速度を計算すると、滝剤2では所要時間29 $\mu$ sであり速度は約1700 m/sとなる。一方、雷薬では所要時間27 $\mu$ s、速度1850 m/sとほぼ同じ値となった。同じ速度を有するのは、ブースターのエマルジョン爆薬(鋼管中での爆速5200~5800 m/s<sup>10)</sup>)の影響のためと考えられ、この試験条件においては、ブースターから5cm以上離れた位置で伝播速度を測ることが適切であると考えられる。

雷薬1はブースターから18cmの位置で伝播が止まったように見える。破片の観察によれば、終末端まで完全に裂けており反応の伝播は、行なわれたと解釈で

きる。従って、圧力が弱く保護用のスチールチューブがつぶれず抵抗線が短絡しなかったなど、計測上の障害が原因と考えられる。

本試験では電圧変化が測定できた距離と、その所要時間から平均伝播速度を求めた。たとえば、滝剤2では、伝播測定距離20cm、所要時間165 $\mu$ sとし、平均伝播速度1212 m/sを得た。実際には、前述したようにブースターの影響を受けた区間は、伝播速度が速くなることを勘案しなければならないが、ここでは暫定的に速度を求めておく。

前述のようにして求めた平均の伝播速度の結果をTable 2に併せて示した。伝播速度が測定できたのは試行回数18回中8回であった。測定の失敗は破碎状況からみて滝剤、細滝など威力が弱い組成物に多いことから、圧力波が弱くスチールチューブがつぶれず抵抗線の短絡が起こらなかったために測定できなかったと考えられる。今回は、抵抗線プローブを火薬の力を均等に受けるように、中心軸上に置いたが鋼管壁に沿わせるなどの工夫をすれば潰れ易くなると思われる。

雷薬1について、砂上ブースター起爆と雷管起爆の結果を比較するとブースター起爆では969 m/s、雷管起爆では1655 m/sとなっている。破碎状況は前述したようであり完爆しているが、時間-距離曲線は、部分的な区間でしか測定できていない。一般的に言われるように、起爆力の強い方が伝播速度が速くなることから考えると、この数値は明らかに疑問である。本試験の平均伝播速度の求め方は、全区間に亘って定常的に伝播する場合は有効であるが、ブースターの影響を受けるなどの原因で途中から速度が変化する場合には、不適切と思われる。

#### 3.3.2 起爆の影響

Fig. 3に雷薬2の起爆方法を変えた場合の時間-距離曲線を示した。曲線の傾きから、雷管起爆に対してブースター起爆の方が伝播速度が速いことがわかる。平均伝播速度を求めると、雷管起爆が1108 m/sに対してブースター起爆は1582 m/sと速くなっている。伝播速度に対する起爆力の影響を示す例といえる。このことは、起爆力を大きくすると完爆した滝剤1の例と考え合わせると、起爆力によって伝播速度が変化し、伝爆性に影響が表われると考えることが妥当である。

一般的に動的な破壊効果の尺度として爆轟圧が考えられており、経験的に爆轟圧は爆速の自乗に比例するとされている。従って、伝播速度が爆速であるとすれば、起爆力によって伝播速度が変化することは、動的な威力が変化することであり、打揚煙火である実用の雷における音の質の問題、又打揚げ玉の割薬における

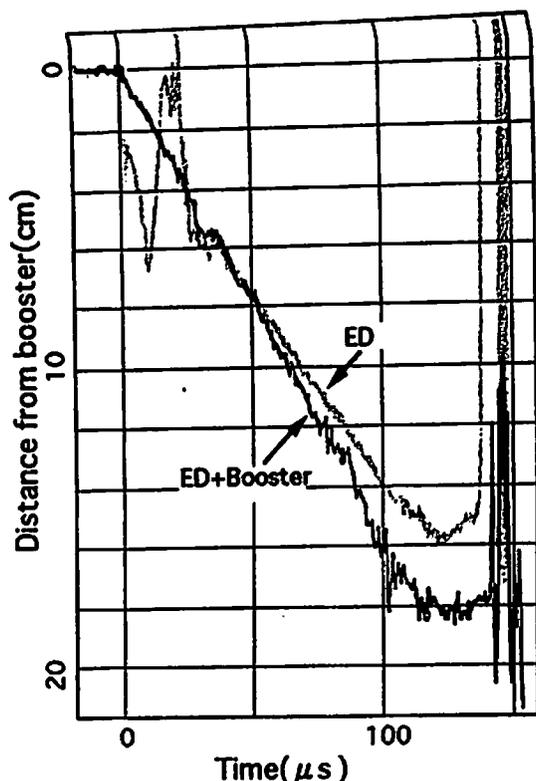


Fig. 3 Time distance curve of Report 2

星の破損問題などの原因である可能性が考えられる。

### 3.3.3 雷 薬

雷薬は、本試験条件では6号雷管で十分に起爆され、完爆したと判断される。雷薬1と雷薬2は、酸化剤だけが異なり、各々塩素酸カリウムと過塩素酸カリウムである。伝播速度は最大値がいずれも1600 m/sであり、破片状況にも差が見いだせず、漏斗孔の大きさもほぼ同じである。従って、この試験では起爆感度、伝播速度や伝爆性に差がないことになる。

### 3.3.4 滝 剤

滝剤1や太滝は雷管起爆では半爆であるが、ブースター起爆すると完爆する。しかし、滝剤2や滝剤3では、雷管起爆だけでも完爆した。細滝はブースター起爆しても、伝爆せず半爆であった。

滝剤2は滝剤1に硫黄を加えた組成物である。滝剤2は雷管で完爆しているが、滝剤1は半爆であった。ブースター起爆した場合には、いずれも完爆しており、破片状況には差が認められないことから考えると、硫黄は起爆感度が鋭感になるが伝爆性に影響していないかも知れない。

細滝も基本的に太滝とおなじ配合組成と推定されるにも関わらず、太滝と異なり、ブースター起爆で半爆でありばらついた結果となった。これらの試料にとって本試験条件が定常的に伝播する限界条件に近いものと考えられることができる。

滝剤は、わずかな成分の差によって起爆感度や伝爆性が変化するものと思われる。今後、成分の影響や試験条件を変えた検討が必要と思われる。

### 3.3.5 その他の煙火組成物

黒色火薬は、爆燃性物質とされているが、本試験では砂中、ブースター起爆しても完爆せずに半爆となった。

星剤も、ブースター起爆しても半爆するだけであり、本試験条件ではいずれも雷管起爆性がなく、伝爆性もなかった。

## 4. ま と め

煙火組成物に関して鋼管試験を行なった結果、次のことが判明した。

- 1) 鋼管試験で、煙火組成物の起爆感度を区別できる可能性がある。6号雷管1本で起爆するもの、ブースターで起爆するもの、ブースターでも起爆できないものに区別できた。
- 2) 滝剤は、本試験の条件で完爆する可能性があり、静的威力は雷薬と大差がない可能性がある。
- 3) 雷薬は6号雷管で完爆するが、滝剤にも完爆するものがあり、いずれもブースターを使用して起爆力を強めると更に威力が増す。
- 4) 抵抗線プローブ法は、鋼管試験における伝播速度を連続的に測ることはできるが、速度の遅い場合には失敗し易く他の測定方法を考える必要がある。しかし、雷薬で1700 m/s、滝剤でも1200 m/sで伝爆する可能性が示された。

本試験の問題点を考えると、次の点があげられる。一般に伝爆に関する因子として①薬径効果、②密閉度、③装填密度、④起爆強度が言われている<sup>11)</sup>。又、硝安のように非理想爆轟をする火薬類では爆速は薬径や密閉度によって変化することが報告されている<sup>12)</sup>。従って正確な爆速を求めるには、これらの因子を変化させて測定するなどの検討が必要である。

本試験の成果として、経燃させて火の粉を鑑賞する目的で製造される滝剤組成物が大きな威力を出す可能性を指摘できたことが挙げられる。しかし、なぜ滝剤が定常的に伝播し雷薬に近い威力を出すかは不明である。伝爆性に与えるアルミニウムの含有率や酸化剤の種類など組成の影響を明らかにする必要があると考える。

本試験では、試行回数が1回であり、結果に対して信頼性が低い。試行回数を増した試験を行なう必要があると思われる。

## 謝 辞

多数の煙火関係者のご協力で試験を進めることができた。また、試験の大部分において手伝い、ご助言を

戴いた日本油脂(株)武豊工場研究開発部の黒川孝一氏はじめ皆様に深甚の感謝を申し上げる。

なお、本研究は1992年に発生した茨城県の煙火製造所事故の調査の一環として行なわれた。

#### 文 献

- 1) 姿沢俊雄ら, 工業火薬, 55, p39 (1991)
- 2) 畑中修二ら, 工業火薬, 50, p498 (1989)
- 3) 高圧ガス及び火薬類保安審議会火薬部会火薬類事故調査分科会(茨城県煙火事故調査委員会), 「茨城県北相馬郡守谷町で発生した煙火製造所における事故に関する調査報告書」, 平成4年10月19日
- 4) 飯田光明, 火薬学会1994年度年会講演要旨集, p 189 (1994)
- 5) 吉田忠雄, 田村昌三編著, “反応性化学物質と火工品の安全”, p248, 大成出版 (1988)
- 6) 総合安全工学研究所, 「火災・爆発危険性の測定法」, p170, 日刊工業新聞社 (1978)
- 7) J. A. Conkling, “Chemistry of Pyrotechnics”, p 147, Marcel Dekker (1985)
- 8) 工業火薬協会, 「火薬ハンドブック」, p242, 共立出版 (1987)
- 9) 花崎紘一, 酒井洋, 工業火薬, 42, p208 (1981)
- 10) 工業火薬協会, 「火薬ハンドブック」, p124, 共立出版 (1987)
- 11) 吉田忠雄, 「化学薬品の安全」, p96, 大成出版 (1982)
- 12) 三宅淳巳ら, 火薬学会1993年度年会講演要旨集, p205 (1993)

---

### Steel tube test for fireworks compositions ( I )

by Syuji HATANAKA\*, Takashi HAYAKAWA\*\*, Akira MIYAHARA\*  
Masamitsu TAMURA\*\*\* and Hideyo OSADA\*\*\*\*

We tried steel tube test for fireworks compositions, mainly report and cascade compositions containing aluminum, to know the detonator ignitability and detonation propagation. Report compositions were evaluated as complete explosion by No 6 electric detonator. Also, one of the cascade compositions was completely exploded by No 6 ED, but other ones were incompletely exploded.

It was found that stonger ignitor (booster) accelerated the propagation velocity.

We thought that the resistance wire probe method is not suitable for measuring the propagation velocity of some fireworks compositions with slow propagation velocity.

(\*Bureau of Pyrotechnics Inspection, Japan Pyrotechnics Association, 18-17

Kichijyo, Ishimakinishigawa-cho, Toyohashi, Aichi 441-11, Japan

\*\*NOF Corporation, Aichi works, Taketoyo plant, Kitakomatudani, Taketoyo-cho, Chita, Aichi, 470-23, Japan

\*\*\*School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

\*\*\*\*Emeritus Professor, Kyusyu Insitute of Technology 2-30-1, Takaishi, Asoh-ku, Kawasaki, Kanagawa 215, Japan)