

## 513 玩具煙火（Uターン花火）の燃焼温度測定および熱分析

Combustion temperature measurement and thermal analysis of toy fireworks

○岡田賢（産総研）、井上吉勝（井上玩具煙火(株)）、秋吉美也子（産総研）、松永猛裕（産総研）

Ken OKADA<sup>1</sup>, Yoshimasa INOUE<sup>2</sup>, Miyako AKIYOSHI<sup>1</sup>, Takehiro MATSUNAGA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Explosion Safety, AIST, 1-1-1, Higashi, Tsukuba Ibaraki JAPAN, 305-8565

<sup>2</sup>Inoue fireworks Mfg., Co., Ltd. 8373-2 Gioncho, Shimada, Shizuoka JAPAN, 427-0058

*Key Words* : Toy fireworks, DSC, Infrared camera, Bomb calorimetry

### 1. 結論

安価な中国産の花火との差別化を図るために、より特徴的な商品の開発が、がん具煙火の業界内でも必須となっている。玩具煙火の吹出花火は火薬類取締法で薬量 15g 以内と定められており、この範囲内で商品を作成する必要がある。その中でUターン花火（井上玩具煙火製）(Fig. 1)と呼ばれる面白い性能を有する玩具煙火が市販されており、人気を集めている。長さ 46cm、(火薬塗布部 20cm、直径 0.7cm) 手持ち型の花火で、内薬と外薬の二重構造になっており、着火すると内薬・外薬の両方に着火し、燃焼が進み、燃焼速度の違いから、外薬は先に進行し、内薬が後から進行する。外薬は最終端まで到達後、内薬に着火しUターンし中央部に結合する。燃焼時間は約 1 分である。日本が誇る玩具煙火の技術を集積した作品でもある。しかしながら、外側火炎が分離し、内側に引火しないメカニズムは経験的に完成した物である。そこで、本研究では火薬類の評価で使用されている計測技術を駆使し、火炎温度や熱分析を行い現象の把握に努めた。

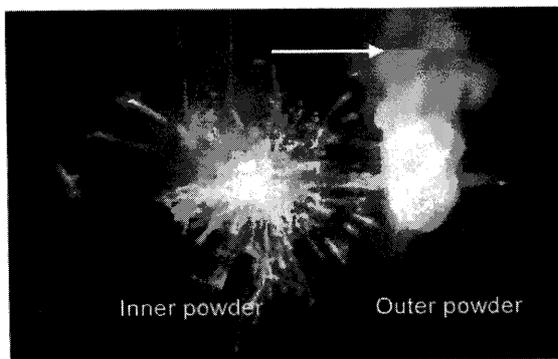


Fig. 1 Photograph of U-turn fireworks.

### 2. 実験方法

#### 2.1 示差走査熱量測定 (DSC)

Uターン花火に主に用いられている、外薬と内薬の熱的な挙動の把握のために、示差走査熱量測定 (DSC 測定)を行った。装置は、TA Instruments 社製 DSC 2920 with Pressure DSC Cell である。試料量は約 1mg でステンレス製のセル(Fig. 2)に封入し、窒素 0.1MPa の加圧下で、10K/min の昇温速度で 500°Cまで加熱した。

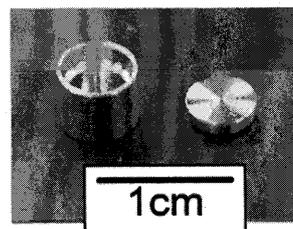


Fig. 2 SUS cell for DSC measurements.

#### 2.2 爆発熱量計測定

使用される火薬の燃焼エネルギー評価のために、爆発熱量計 (ボンベカロリメーター、宝工業 L320) (Fig.3)を用いた。爆発熱量計は発生した熱による水温の上昇によって試料の燃焼熱を求める装置である。0.5-1g の火薬をステンレス製容器(250ml)内でニクロム線着火した。一般的には酸素加圧下で完全燃焼の際の燃焼熱を測定するが多い。がん具煙火は空気下で燃焼させるため、雰囲気は 3MPa の酸素加圧下と空気下の 2 種類で実験を行った。容器内での試料飛散による測定誤差を防止するために、酸素加圧下では、ゼラチンカプセル内に火薬を封入し、空気下ではステンレス燃焼皿を用い実験を行った。測定はそれぞれ 2 回ずつ行い、内薬、外薬の比較として、黒色火薬 (日本化薬製)でも測定を行った。

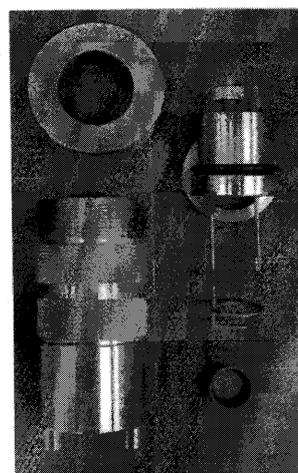


Fig. 3 Photograph of bomb calorimeter.

#### 2.3 二次元温度計による温度測定

Uターン花火の燃焼時の火炎温度、外薬と内薬

の境界温度を測定するために、二次元温度計（赤外線カメラ）を用いた。赤外線カメラは、AGEMA 社製 THV900SW/TE である。電子冷却式の検出器を用いて赤外線領域（3-5 $\mu$ m）での画像計測（204x128pixel, 10Hz）が可能なカメラである。測定距離 1m、カメラ内には高温用フィルター（TGL, 3.9 $\mu$ m 狭帯域）を用い、試料前に石英ガラスを透過させ測定を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 燃焼現象

外薬、内薬の重量はそれぞれ約 5.6g, 5.3g となっている。外側、内側の燃焼速度はそれぞれ 7.6mm/s, 1.8mm/s であった。燃焼速度は外薬が内薬に比べ 4 倍程度速い。燃焼火炎の色は、外側は紫色の火炎で、内側は鉄粉の燃焼による赤色の火炎である。

#### 3.2 熱分析

DSC 測定の結果を Fig.4 および Fig.5 に示す。測定は 2 回ずつ行い、いずれも再現性の良い結果が得られた。内薬は 300 $^{\circ}$ C から緩やかな発熱を示す。これは内薬に含まれる鉄粉の酸化反応に起因すると考えられ、500 $^{\circ}$ C までには反応は完了しない。一方、外薬は 275 $^{\circ}$ C より発熱し始め、熱分析の加熱条件下では複雑な反応を示す。350 $^{\circ}$ C より大きな発熱反応(3511J/g)が確認された。これら結果より、内薬に比べ外薬の方が反応性が高いことが分かった。

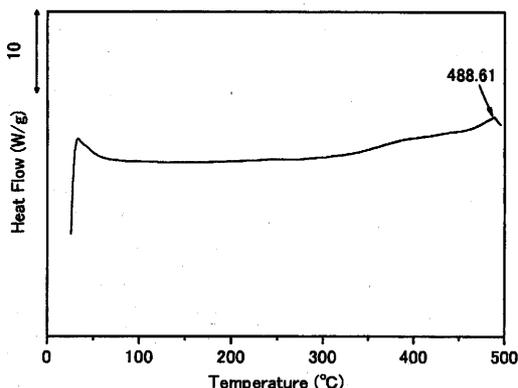


Fig. 4 DSC results of inner powder.

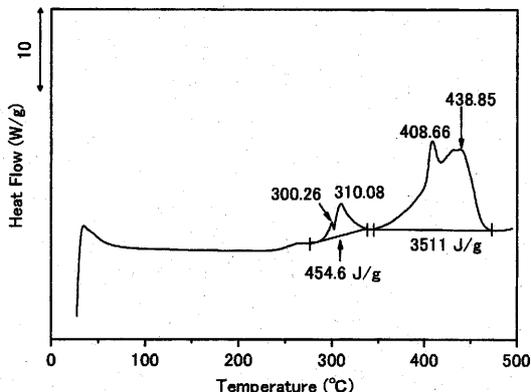


Fig. 5 DSC results of outer powder.

#### 3.3 燃焼熱量測定結果

燃焼熱量での測定結果を Table 1 に示す。酸素加圧下での燃焼熱量（完全燃焼の際）は、黒色火薬 > 外薬 > 内薬の順序であったが、大気圧下での燃焼熱量は外薬 > 黒色火薬 > 内薬の順であった。外薬の大気圧下での燃焼熱量 4.14kJ/g は DSC の 2 つのピークの合計値 3.9kJ/g に近い値を示した。いずれの場合も燃焼熱量は内薬より外薬が大きかった。

Table 1 Heat of combustion (kJ/g)

	Air condition	3MPa O <sub>2</sub> condition
Black powder	3.93 $\pm$ 0.15	5.91 $\pm$ 0.10
Outer powder	4.14 $\pm$ 0.11	4.89 $\pm$ 0.50
Inner powder	3.11 $\pm$ 0.59	4.00 $\pm$ 0.46

#### 3.4 二次元温度測定結果

外薬と内薬の火炎が分離した際の火炎温度測定の結果を Fig.6 に示す。縦軸に燃焼温度、横軸に距離を示しており、左側が花火先端部分で、右側が柄の部分である。燃焼温度は外薬は 800 $^{\circ}$ C、内薬は 1300 $^{\circ}$ C で、燃焼していない境界部分の温度は 500 $^{\circ}$ C であった。外薬の燃焼速度は速いが燃焼温度は低く、内薬の燃焼速度は遅いが燃焼温度は高いことがわかった。内薬と外薬の境界温度は 500 $^{\circ}$ C であり、この温度では内薬には着火せず、末端のテープが巻いてある部分で蓄熱が起こり外薬から内薬への着火が起こることが分かった。

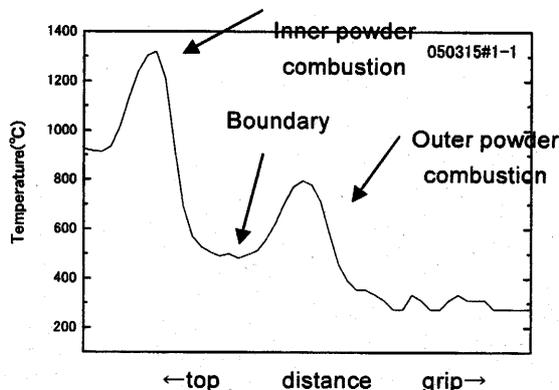


Fig. 6 Two dimensional temperature measurements.

#### 4. まとめ

二次元温度計、熱分析、爆発熱量測定から U ターン花火を構成する火薬の諸性質が明らかとなった。発熱量、燃焼速度、着火点等が火薬の調合により巧みに制御され U ターン花火が製作されていることが分かった。これらのデータを検討の上、火薬の調合を変更すれば 3 重以上の U ターン花火を作成するのも夢ではないかもしれない。