

煙火材料の燃焼炎ふく射

中野義信*, 水島容二郎**

煙火材料等数種の空中燃焼炎から出る可視と近赤外部のふく射を熱電対型のふく射計で測定した。薬量 0.3g~500g, 距離 1m~15m で得たデータより最大瞬間強度と強度の時間積分すなはちエネルギーを求めた。何れも薬量に比例し, 距離の自乗に反比例している。薬量によりエネルギーには3倍, 燃焼時間には4倍の差がある。ポンプカロリメーター値と比較すると, ふく射エネルギーは数分の以下で, その他の部分は煙に含まれ測定されない。

1. 緒言

煙火材料とは打上花火, 仕掛花火等の火薬部分で, 製造, 取扱中の発火危険性が大きく, 発火時は火災が発生し, 周囲を加熱し, 火災, 火傷を起こす。この加熱は炎の接触によるほか, ふく射によるので, 数種の材料につきふく射を測定した。従来データの無いものである。

2. 実験

2-1 試料

煙火材料には種類が多いが, 代表的な4種および参考に3種の火薬を用いた。Table 1に示す。

2-2 発散スペクトル

数gの試料を電熱器加熱の銅板上で燃焼させ, 集光レンズを用いず, 石英およびガラスプリズム分光器で撮影した。無煙火薬のほかはいずれも炎中に大量の固

体粒子を含むので, 連続スペクトルを主とし, 帯・輝線スペクトルをも示した。従って炎は不透明に近いと思われる。紫外部に現われ易い OH 帯は認めなかった。Table 2に示す。

2-3 ふく射測定

1g以下の少量燃焼の時は実験室内に設置したアングルの光学軌台で, 多量の時は燃焼は屋外三脚台上で, 測定部は室内開放窓の近くに設置した。試料は水平石棉板上に盛り, 板面中央に露出させた電熱線1cmに通電し点火した。炎全体が常にふく射計の視野内にあるよう留意した。

ふく射計は HILGER-WATT 製空気入り, 螢石窓付 FT-4 型, 感熱部は 2mmφ の黒色円板の裏に1対の熱電対を付したもので, 時定数0.04秒である。説明書には 0.12~100μ の全域で使用できるとしてい

Table 1 Composition of materials tested

Materials	Ingredients (%)
Star (red)	KClO ₃ 67, SrCO ₃ 20, Shellac 7 Charcoal 6
Percussion powder	KClO ₃ 70, Al powder (300 mesh) 20, Sb ₂ S ₃ 10
Dragon	KClO ₃ 70, Al powder(100) 22, Rosin 4, Charcoal 2, Flour 2
Bursting charge for bombshell	KClO ₄ 69, Charcoal 17, woodmeal 12, Flour 2
Smokeless powder for shotgun	Double base, granular
Carlit KURO No.5	NH ₄ ClO ₄ 71-76, Ferrosilicone 12-17, Carbonous dope 3-7, Heavy oil 3-7
Black powder	Graphite-glazed, granular, fine

昭和52年8月17日受理

*元東京工業試験所平塚分室 現盛徳工業大学 神奈川県厚木市萩野

**東京工業試験所平塚分室 神奈川県平塚市西八幡

Table 2 Observed spectroscopic feature

Materials	Lines	Bands	Continuum
Star	Na-D, Sr-4608, K-4047 K-4044	SrOH-6050, SrCl-6239, SrCl-6362, SsCl-6614	Weak
Percussion	Na-D, K-4802, K-5780 K-5360, K-5341	AlO-Green system CuCl-4847	Weak
Dragon	Na-D, K-4044, Al-3962, Al3944, Al-3093	AlO-green system	Weak
Burster	Na-D	--	Strong

As to flame spectra of smokeless powder, carlit KURO No.5, black powder, cf. lit. 1,

る。分光感度は重要な特性であるが、その測定は容易でなく、実施できなかった。かかる広範囲にわたっての平坦性は望むべくもないが、本実験の範囲つまり、可視と近赤外部では一応平坦と見なしても大きな誤りは生じないであろう。

感度の測定は暗室内 5 m の光学軌台上で電子技術総合研究所応用光学研究室検定済近藤シルパニヤ社製 500W 単平面コイルヒラメントガス入り電球によった。DC71.5V, 4.06A, 色温度 2,700°K, 1.7m の距離で $991\mu\text{W}/\text{cm}^2$ のふく射照度を与えるものである。ふく射計出力は TELEDYNE-PHILBRICK 1701 IC による自作 100 倍増器を経て、東亜電波製 EPR レコーダに記録した。極めてよい直線性を示し、増幅器共で $289\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{mV}$ の感度となった。

燃焼測定時にはレコーダとして両軸校正したオシロスコープとカメラを使用した。別に 700V を加えたホトマル 1P28 で発光の初期を捕え、トリガーに用いた。フィルム上の記録曲線は多くは単純な山型、時には双峰型であるが、その尖頭値より瞬間最大ふく射射強度 (L)、曲線下の面積をプランメーターで知り、これよりふく射エネルギー密度 (Q) を求めた。

薬量 (W) 0.3~500g, 距離 (D) 0.5~15m の範囲で 100 回測定した結果を Fig.1, 2 に示す。最大ふ

Table 3 K_1 and K_2 values in Eqs.1 and 2

Materials	K_1	σ_1	K_2	σ_2
Star	3.6	1.4	1.9	0.18
Percussion	62	17	4.5	0.83
Dragon	1.9	0.7	1.5	0.29
Burster	45	20	3.5	0.34
Smokeless powder	23	10	3.7	1.2
Carlit	10	2.4	2.3	0.17
Black powder	39	10	2.3	0.41

σ' , are standard deviations at linear regression.

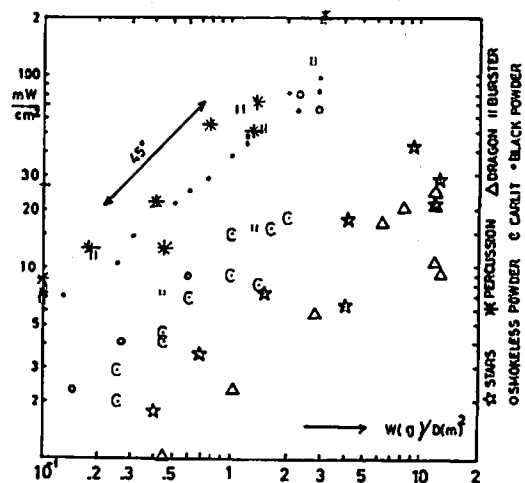


Fig. 1 Max. radiation intensity of pyrotechnic materials

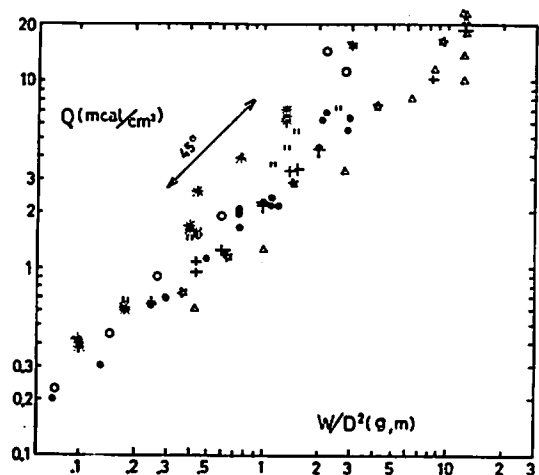


Fig. 2 Integrated radiated energy. Legends are the same as in Fig.1

く射強度についてはバラツキが大きい、ほぼ 45° の直線で代表できるように見える。エネルギー密度についてはほぼ 45° の直線に合う。それらの直線式と係数

を式(1), (2), Table 3 に示す。

$$L(mW/cm^2) = K_1 \frac{W(g)}{D^2(m^2)} \quad (1)$$

$$Q(mcal/cm^2) = K_2 \frac{W(g)}{D^2(m^2)} \quad (2)$$

爆風圧, 保安距離の表示に使用される立方根の式を適用して見た所直線・曲線に全く乗らなかった。

試料の形の影響を知るために, 黒色火薬, 無煙火薬 2~3g を線状に盛り, 縦横 2 方向より観測したが標準としている円すい形と差が無かった。

2-4 燃焼継続時間

オッシュログラムより星薬, 雷薬では 1.5~4 秒, ドラゴン 4~11 秒, 割薬, 黒色火薬では 1 秒以下, 無煙火薬とカーリットで 1 秒前後と読みとれた。バラツキがあるが, 実験の薬量範囲では各薬種ごとにほぼ一定である。燃焼速度が一定でなく, 薬量増加で大となることを意味している。

3. 考察

3-1 測定波長域等

熱電対素子は広範囲に感度があることは前述したが, 螢石窓のため有効域は $0.12 \sim 10 \mu$ となる。さらに空気中の酸素の吸収で短波長側は 0.2μ で限られる。有効波長は光源の分光分布にも左右されるので煙火材料の炎を $1,500 \sim 3,000^\circ K$ の黒体と仮定し, そのふく射エネルギー 波長積分値を $0.2 \sim 10 \mu$ と $0.2 \sim \infty \mu$ につき求め, その比をとるに 97~99.5% となる。従って窓材の存在が測定結果に及ぼす影響は無視できる。

煙火材料の炎は前述のように黒体と仮定しても, 上の計算に大きな誤りは生じないであろう。メタン・水素の透明な炎ではこの仮定は成立しない。

ふく射が薬量に比例し, 距離の自乗に反比例することは常識通りで了解しやすい。空気中の二酸化炭素と水蒸気が赤外部に強い吸収を示すことはよく知っているが, これが影響していれば減衰は指数関数の形となるはずである。しかるにそうで無いのは本実験の条件

ではこの吸収は無視できることを示している。

試みに長さ 30cm, 両端に臭化カリ窓を付した硬質塩ビ筒に二酸化炭素, 次に水蒸気で飽和した空気を充たし, ローソクの炎からの光路に置いたが, 吸収の増加を認めなかった。ただしローソク炎は暗いので数% の誤差を伴っている。

3-2 ふく射量と燃焼熱量との比

石棉板上で燃焼している時, ふく射は下方に無く, 側方に強く上方に弱いが, 簡単に全立体角の 1/2 に均一に分布すると仮定し, Table 3 の K_2 より全ふく射量を求め, ポンプカロリメーターによる 10 気圧酸素中の実測燃焼熱との比をとり Table 4 に示した。この値は燃焼条件で幾分変わるであろうが, 空中燃焼エネルギーの大半は煙の熱含量としてふく射計の測定視野外に拡散し去るものと思われる。この煙は低温のためふく射度は小さい。

雷薬の効率がよいのは爆燃に近く, 炎の温度が高いのでエネルギーが有効にふく射計に捕捉されるためであろう。

3-3 文献との比較

無煙火薬と有機過酸化物 500kg までの空中自由燃焼最大ふく射強度の測定 9 例³⁾では, 前者についての値は本実験の値の 1/30 で大差があるが, 燃焼時間が長くその 1/2 を有効な継続時間として乗算しエネルギー値を求めれば Fig. 2 の無煙火薬列の延長上 $\pm 100\%$ つまり 6db 内に入る。燃焼速度が数分の一から十分の一の過酸化物では, はるかに弱いふく射強度を与えている。

薬量 (W) 500ton までの液体ロケット推進, 爆薬の空中自由燃焼火炎の大きさと継続時間 (d) の写真測定⁴⁾ではバラツキは大きい, $d(\text{sec}) = 0.196 W^{0.349}$ を得ている。これを本実験を適用すれば, すべて 1 秒以下となる。大略合っているとよい。

4. 結語

従来測定データのない煙火材料の空中燃焼が出すふく射エネルギーを測定した。小数例であるが, 大勢は

Table 4 Conversion ratios of heat of combustion to radiation from flame

Materials	Radiate energy around flame (cal/g)	Heat of combustion measured with bomb calorimeter (cal/g)	Ratios (%)
Star	119	914	13
Percussion	281	1165	24
Dragon	94	1518	6
Burster	218	1841	12
Smokeless powder	231	2201	10
Carlit	144	1258	11
Black powder	144	1324	11

判ったので、類似の火薬類については実験をまたずともふく射エネルギーの推測ができよう。ただ本実験の薬量が少ないので、数 kg についての測定が望ましいが、今後に待ちたい。

ふく射による火傷、発火はその強度と継続時間との双方によると考えられ、また当然対象物の吸収率、温度伝導度、化学変化等にもよるであろう。これらについては検討していない。

実験試料について多大の便宜を賜った第一薬品興業 K. K. の村井一氏に深謝します。

文 献

- 1) 水島, 爆薬の燃焼温度測定, 工火誌, 20, 265 (1959)
北川, 富永, 消炎理論の研究 (第2編) 海軍火薬廠火研報甲345号, 昭和13年
T. Shimizu, Feuerwerk von Physikalischem

Standpunkt, Hower Verlag, Hamburg 1976 p. 77

R. W. B. Pearse, A. G. Gaydon, The identification of molecular spectra 4th. Ed. Chapman and Hall, London 1976 p. 339

- 2) マルセル・ボル, 万能数値表, 白水社 (1971) p. 488
- 3) Th. M. Groothuizen, J. Romijn, Heat radiation from fires of organic peroxides as compared with propellant fires, J. Hazardous Materials 1, 191 (1975/76)
- 4) J. R. Gayle, J. W. Bransford, Size and duration of fireballs from propellant explosions NASA TM-53314 Goerge C. Marshall Space Flight Center (1965)

Radiation from flame of fireworks

by Yoshinobe Nakano, Yojiro Mizushima

Radiation from burning pyrotechnic materials was measured by a radiometer of thermocouple type with a fluorite window. The radiation seemed to have been concentrated in red and near infrared regions according to spectrographic observation. The quantity used was from one gram to 500 grams at distances of one meter to 15 meters. Intensity curves on CRT were of a simple pulse type in most cases, and durations were nearly constant in the range of the experimental condition. The peak intensity and radiate energy observed are given in the forms of Eqs. 1 and 2. Transformation efficiencies of the burning energy obtained with a bomb calorimeter into the emitted energy are estimated (Table 4).

(National Chemical Laboratory for Industry, Hiratsuka Branch, 1-3-4
Nishiyawata Hiratsuka, Japan)