

As the oxidizer, two ammonium perchlorate preparations, one having a particle size selected from large particle-size group and the other possessed of a particle size selected from small particle-size group, were mixed and put to the test. The specific surface area of the oxidizer was varied from sample to sample by changing the particle diameter or mixture ratio of the particles of which the oxidizer is composed. The relationship between the specific surface area of the oxidizer and the tensile properties of propellants was determined at +50°C, +20°C and -50°C. As the result, the following were learnt:

- 1) Larger specific surface is desirable, because both tensile strength and elongation increase with the increase of this area.
- 2) Even if the specific surface area is constant, the oxidizer in which there exists particles of a particularly large particle size provides lower strength, then it is assumed that the concentrated strains on the oxidizer surface have considerable effects upon the strength.
- 3) As the specific surface area of oxidizer increases, the propellant exhibits the tendency of losing modulus. In this case, presence of large particles exerts little effect.

## ロケット推進薬の火焰温度測定法

吉川 達 男\*

ロケット推進薬の火焰温度は重要な特性値の一つであり、種々の方法で測定されているが<sup>1) 2)</sup>、他の特性値と比較し測定が困難であるためデータは致少い。これは多量のエネルギーを放出し、それらがただちに様々な形に変つてしまうという火焰の性質による。どのようなエネルギー状態を観測して火焰の温度とするかは種々議論があり難しい問題である。<sup>3) 4)</sup>

ここでは NaD 線反転法を波長走査方式で行つている。装置は未だ不十分なものであるが大気圧下で燃焼するロケット推進薬の火焰温度を測定した。波長走査方式は 10~20 sec で 1 回の測定が出来、この程度の現象の測定に適している。

なお、推進薬の火焰スペクトルは明るいバックグラウンドを持ち、その上にカリウム、ナトリウム等単体原子のスペクトルと、わずかではあるが OH 等 2 原子分子のスペクトルが見られる。

### 1. 測定法および装置

NaD 線反転法は温度既知の黒体をバックにナトリ

ウムを含む火焰を分光器で観測する。火焰の温度が黒体より高い場合は黒体の連続スペクトルの上に NaD 線が輝線となつて観測され、逆に火焰の温度が黒体より低い場合、黒体の連続スペクトルのうち NaD 線の部分が火焰中の Na に共鳴吸収され暗線となつて観測される。火焰と黒体の温度が等しい場合、輝線も暗線もなく連続スペクトルが観測される。この実験では NaD 線部分を波長走査スリットと光電子増倍管で検出し、スペクトル曲線をオシロに描かせ、その波形より NaD 線が発光しているか吸収しているか判定し、比較光源の電流を調整して平衡点を求めている。装置は Fig. 1 の通りである。比較光源の光は集光レンズ  $L_1$  を通つて火焰の所に像を結び、火焰の光と共に光源と火焰の光の立体角を調整するスリット  $S_1$ 、レンズ  $L_2$  を通つて分光器の入光スリット  $S_2$  上に像を結ぶ。分光器を出た光は波長走査スリット  $S_3$  上に像を結び、そこで選択されて周期的に光電子増倍管に入る。光電子増倍管の出力は増幅してオシロに導かれ、ブラウン管面上に NaD 線近傍のスペクトル曲線を描く。

昭和40年9月9日受取

\* 日本油田武豊工場 愛知県知多郡武豊町西門82

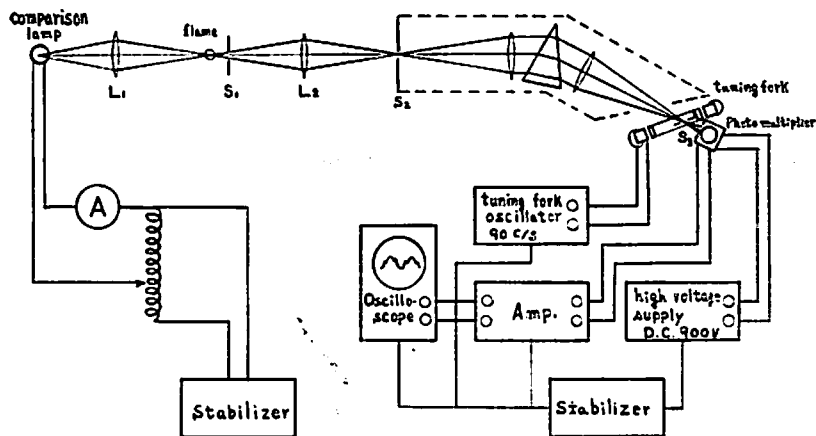


Fig. 1 Apparatus for wave scanning method

比較光源には映写機用 500W タングステンフィラメントランプを使用した。このような測定には広い面積にわたり一様な温度を示すリボンランプが望ましいが、取扱に注意すればフィラメントランプでも精度良く測定出来る<sup>3)</sup>。温度測定の際は分光器のスリットに入る部分をうまく調整すればよいが、ランプの温度を光高温計で校正する時、視野に他の部分も入ってくるので注意を要する。フィラメントランプは 2,800°C 迄使用出来るとされている<sup>4)</sup>。映写機用ランプはコイル状のフィラメントが 4 本づつ 2 列に並んでおり、その列の向合った内側の面が輝度も比較的一様であり温度も高いのでその部分を利用した。電源は直流電源が用意出来ず、100V、60 c/s の交流を使った。スライダックで電圧を調整し、集光レンズを通して光高温計で電流温度関係を求めた。温度は光高温計で求めた 0.65  $\mu$  の輝度温度を 0.59  $\mu$  の輝度温度になおして使用した<sup>3)</sup>。電流温度関係は一次に近いので最小自乗法により一次式にしておいた。

分光器は島津の PQ60 型を使った。スペクトル撮映カメラを取りはずし、波長走査スリットを NaD 線がスリットの位置で像を結ぶ様に設置した。入力スリットの所に小さな白紙をおき、火焰の像を写して火焰のどの部分がスリット内に入っているかわかる様にした。入力スリットは S/N 比の関係からスリット巾を 0.2 mm、長さ 10 mm で使用した。

波長走査スリットは安全カミソリの刃を利用して作った軽量なもので、スリット巾 0.1 mm、長さ 13 mm である。これを 90 c/s の電磁音叉のフォークの先端近くに接着剤で貼りつけ、他方のフォークにも同じ重量の鉄片を接着して、振幅 1 mm 位迄は安定した正弦振動をできるようにしてある。測定の際は振幅約

0.5 mm で使用した。スリットの位置は Na スペクトル光源を使用して NaD 線がスリット上で像を結ぶように調節したが、スリットの光に対する角度はフォークの幅等の関係で色収差をとるに充分でない。しかし検出するのは NaD 線近傍だけであり、光源のみの場合出力はきれいな正弦波となるので誤差は無視した。電磁音叉のアンプは 12AU7、6AR5 を使った正弦波発振器である。

光電子増倍管は東芝 7305 で、陽極電圧 900V、負荷抵抗 10 k $\Omega$  で使った。波長走査スリットのすぐ後においてスリットを通過した光はすべて検出出来るようにしてある。出力は 6AU6 $\times$ 2, 6AV6 のアンプで増巾してブラウン管オシロに入れていた。波長走査スリットと光電子増倍管は光源等の光学系、分光器と異った鉄のレールに組んでおり、電磁音叉の振動で他の部分がずれることはなかった。

## 2. 実 験

試料はダブルベース推進薬を 4 $\times$ 4 $\times$ 100 mm の棒状に削り、側面を塩化メチレンで薄くレストリクトしたものである。大気圧下で約 10~20 sec 燃焼する。Na は試料中に不純物として含まれ、単独で見るとは充分であるが、比較光源と合せてみると S/N 比が悪くなるので側面に炭酸ソーダの粉末を塗って補った。試料の支持は鉄棒を 2 本立て、その間にそれに沿って移動する水平な台を作り、それにとめた。台の移動はベアリングを用いているので滑かである。分光器の入力スリットに取付けた白紙の火焰の像を見ながら手で動かした。火焰は大気圧下であるため不安定であるが、燃焼面から約 10 mm の所を中心に測定した。

実験は暗室で行なつた。オシロに描かれる NaD 線附近のスペクトル曲線は Fig. 2 の通りである。オシ

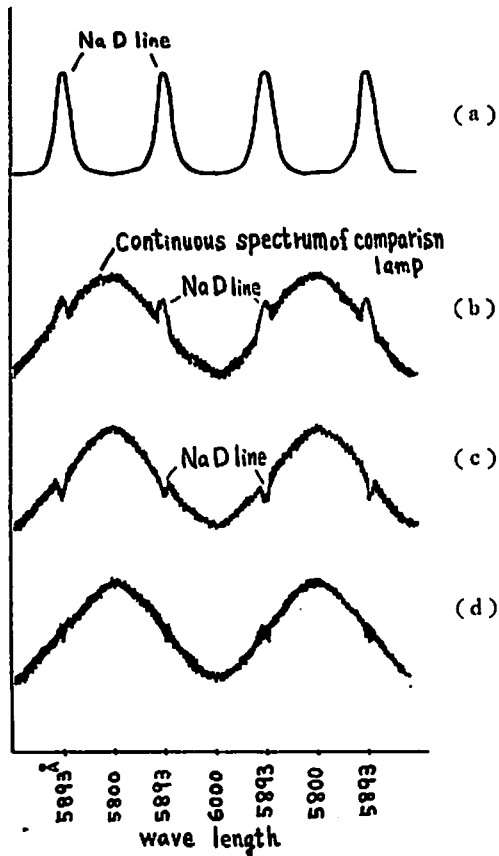


Fig. 2 Wave form of spectra detected by wave scanning slit and photo multiplier

- a: NaD line from propellant flame
- b: Emissive spectrum of Na; observed when flame temperature is higher than the brightness temperature of comparison lamp.
- c: Absorption spectrum of Na; observed when flame temperature is lower than the brightness temperature of comparison lamp.
- d: Wave form for matching condition. There observed only continuous spectrum of comparison lamp.

ロには電磁音叉の3サイクル、すなわち波長走査スリットが3回往復する部分が見える様に同期をとつた。比較光源の連続スペクトルはタングステンのスペクトル分布よりも光電子増倍管の特性に従い、短波長側が小さく、長波長側が大となるから、波長走査スリットにより正弦波となつて観測される。光源を交流で点燈したため、正弦波の振巾が周期的にわずかに変化する。NaD線は正弦波の中腹、変曲点に表われる。発光スペクトルの場合は Fig. 2 (b) のように上側に、

吸収スペクトルの場合は Fig. 2 (c) のように下側に表われる。平衡した場合は上下共表われないが、火焰の乱れから上、あるいは下と同じ程度に出る。測定の場合、光源の電流を推定温度よりやや下にしておいて推進薬に着火し、発光スペクトルが消え吸収スペクトルが表われる迄電流を増加し、後、平衡点を求め、そのままの状態で燃焼終了後電流を読んだ。

実験結果は表1の通りである。1種の推進薬につき5~15回測定し、その平均値と標準偏差を示してある。計算値は水性ガス反応により計算した温度である。

表1 火焰温度測定値(大気圧下)

推進薬	計算値	測定値	標準偏差
GEP-10B	2,830°K	2,450°K	18°K
GEP-23		2,410	24
GEP-25	2,525	2,350	19
GEP-32B	2,560	2,340	16
GEP-56	2,655	2,350	13
GEP-57	2,610	2,350	13
GEP-58	2,570	2,350	9
GEP-59	2,640	2,350	7
GEP-60	2,600	2,350	5
GEP-61	2,550	2,350	10
GEP-62	2,630	2,350	8
GEP-63	2,590	2,340	11
GEP-64	2,545	2,320	15
GEP-26	2,155	2,220	12
GEP-92	2,000	2,150	22
GEP-93	1,790	2,150	21
GEP-94	1,920	2,170	33

GEP-32B は温度、圧力不感推進薬である。GEP-56 から GEP-64 迄は殆んど同一組成で燃速制御剤の量のみ異なる実験用推進薬である。GEP-26 から GEP-94 迄は低燃速組成の推進薬で大気圧下で燃焼した場合、煤が多い。

### 3. 実験結果

ロケット推進薬には種々の添加剤が含まれており、その影響で火焰には固体粒子も含まれている。しかし多くの場合、ダブルベース推進薬では固体粒子を生成する添加剤は微量であり、従つて火焰中の固体粒子も微量であると思われる。表1の GEP-26 から GEP-94 までは低燃速用推進薬のため添加剤が多く、大気中で燃焼した場合目視で煤の存在が認められたもので、測定した温度が計算値より高いのは明らかに煤の影響と云える。他の推進薬の火焰温度測定には NaD 線反転法を用いて何ら差支えないと思われる。

火焰温度測定で最も問題となるのはその精度であるが、2,000°K以上の火焰で温度が安定し、温度標準として使用出来るものがないため装置の面から考えた。

比較光源の温度校正に用いた光高温計は1,500°C迄は0.65 $\mu$ のフィルターのみで測定し、更に1,200°Cから3,000°Cの間を灰色フィルターを加えて測定する。この光高温計の校正は大同製鋼中央研究所でさせていただいた。灰色フィルターを入れた場合、1,200°Cから1,600°C迄の間でリボンランプの温度と光高温計の目盛の読みと差があり、これをグラフにとると直線となるので、2,000°C以上もその線を延長して使用した。光高温計で比較光源の温度を校正する場合、前にも述べた様にフィラメントが4本づつ2列に並んだ構造であるため温度が一様でなく、又交流で点燈しているためもあつて、校正値の標準偏差は18°Cであつた。

NaD線反転位置を決定する精度は表1の標準偏差の通りである。この場合、火焰のみだれが大きく影響しているが、スペクトルの検出に光電子増倍管を使用しているため、このS/N比にも関係する。特に温度が高いと雑音も増大するので、光電子増倍管のまわりを厳重に遮蔽する必要がある。この実験の場合、2,700°K位迄はNaD線が充分検出出来た。火焰が安定している場合は表1のGEP-66の様にばらつきが5°Kである。又、この場合、測定者は光の明るさを見るのではなく、ブラウン管に描かれる波形より反転位置を決定するので個人差も少ない。

NaD線反転法では、比較光源の光路内にあるナトリウムの平均温度を測定するが、この実験では火焰中のナトリウムが推進薬に不純物として含まれているものだけでは足りず、側面に炭酸ソーダの粉末を塗つたため、火焰中のナトリウムの分布が一様でないことが考えられる。目視では推進薬の一つの側面のみ炭酸ソーダを塗つた場合、その面の上だけ特にナトリウムの発光が強いとは感じられなかつたが、分布が一様でないとする、火焰の周辺に多く含まれ、空気と接した温度の低い部分を主に測定したことになる。なお、ナトリウムの量は温度測定に影響を与えない。

以上の測定値の精度に関する検討を考に入れて表1の値を見ると、煤の多いGEP-26以下は測定法が不適当であるから例外として、いずれも計算値より大巾に低下した温度が測定されている。これは計算値が反応の最終段階迄考えているのに対し、大気圧下の燃焼では活性化したガス分子の拡散が大で充分反応していないことと、周囲の空気による冷却があるためであ

らう。又、測定値が計算値程差が出ていない、すなわち、計算値が異なつても測定値にはあまり差がなく似た様な値が得られたことも、やはり大気圧下の燃焼であることと、周囲の空気の冷却の効果が大きいからであろう。GEP-56からGEP-64迄は少しづつ温度の異なる火焰を用いて測定値との対応を見ようとしたものであるが、殆んど同一の測定値でうまくいかなかつた。これらの推進薬は燃速制御剤の組合せ量がわずかに異なるだけで殆ど同一組成であるため、最終反応迄考えた計算では差が出て、大気圧下では燃速制御剤の火焰温度に対する効果が殆どないということであろう。

#### 4. 結 び

この実験では比較光源の安定度、ナトリウムの添加方法、火焰の状態等に問題があるが、NaD線反転法に波長スリットと光電子増倍管を用いると、測定が簡単だけでなく、精度も良いことがわかつた。精度はS/N比に従うが、光電子増倍管の取扱に注意し、高圧直流電源、増倍器に低雑音のものを使用すれば、NaD線の反転位置は充分検出出来る。

オッシロに描かれたスペクトル曲線の写真も合せて報告したかつたが、装置を他の実験に流用して掛る機会がなかつた。

火焰温度測定について教えていただいた東工試の水島容二郎氏、実験を指導していただいた渡辺定五氏、稲垣誠也氏に感謝します。

#### 文 献

- 1) 土屋莊次, ロケット研究ノート, Vol. 3, No. 14 (1961)
- 2) Powling, Combustion and Flame Vol. 6, No. 3 (1962)
- 3) Gaydon Flames, Chapman & Hall London (1953)
- 4) 浅羽哲郎, 工業火薬協会誌, Vol. 18 No. 5 (1957)
- 5) 石田良平, 東工試報, 51, 333 (1956)
- 6) 土屋莊次, 燃焼の計測に関する講習会教材(1964)
- 7) Ladenburg Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion Princeton New Jersey (1954)
- 8) 水島容二郎, 東工試報, Vol. 55, No. 1 (1960)
- 9) Gaydon Spectroscopy and combustion theory Chapman & Hall London (1948)
- 10) Middlehurst J. Sci. Inst. Vol. 38 (1961)
- 11) 清水武夫, 工業火薬協会誌, Vol. 19, No. 5 (1958)

(火薬研究会, 昭和40年6月25日)

## Measurement of the Flame Temperature of Solid Propellants

by Tatuo Yosikawa

Wave length scanning method is applied to NaD line reversal method; and the flame temperature of solid propellants are measured.

Instead a plate, a wave length scanning slit, sat on a 90c/s tuning fork, and a photo-multiplier detect the intensity of spectra near NaD line, and draw an intensity curve on the oscilloscope (Fig. 1). Matching condition is obtained by so varing the currents of the comparison lamp that emissive spectrum or absorption spectrum of Na D line eliminate from intensity curve (Fig. 2).

Strand shaped solid propellants are burned at an atmosphere and those flame temperatures are shown in table 1 with standard deviations of measurment and calculated temperatures. the measured temperature of flames is lower than the calculated temperature, for burning condition is different from the assumption of calculation; and standard deviations, depending] mainly on the instability of flames, show that the wave length scanning method is adequate for Na D line reversal method.

### 新 著 紹 介

F. P. Bowden and D. Tabor: *The Friction and Lubrication of Solid*  
(Clarendon Press, Oxford, First Edition in 1950, Corrected Edition  
in 1954 and 1958)

パウデン・テイバー 著 固体の摩擦と潤滑 (丸善 昭36)  
會 田 範 宗 訳

上の原本と訳本は発刊時期から見ると新本とは言い難いが、内容に極めて特色のある、既に古典的名著の地位を占めている良書だから紹介しようと思います。原著者パウデンは周知のように英国ケンブリッジ大学で現在研究を続けており、年来 Proc. Roy. Soc. 等に大量に発表しております。上の本は彼自身の発表済の研究を中心に纏めたもので、Reynold 流の層流潤滑の範囲外の潤滑剤のない場合、単分子層油膜の場合、極圧潤滑の場合のメカニズムやスケート、スキーの滑走、軸受合金、結晶、有機高分子材料の摩擦、衝突現象、爆薬の摩擦衝撃による分解、起爆について、彼の考えを適用して見事な展開を見せています。彼の考えの根本は摩擦は試料片での高温局部発生、融着せん断によつて起るのだと言うのであります。研究のやり方は英国流で、高価な装置を用いず、手作り装置を主体にし、現象を一つ捕えたら、これでもか、これでもかと観点、方法を変えて徹底的に攻撃し、殆んど疑問の余地のない確実な知識の累積をつくりあげて行くと言う風であります。本書の定評あるのは当然と思われま

す。最後の章の爆薬に関係した部分は以前に刊行された F. P. Bowden and A. D. Yoffe: *Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids* (Cam-

bridge University Press, 1952)

の抄録と言つても宜しいが、本書の他の部分の潤滑剤の語を爆薬に置換して考えることにして全体を読みなおしますと、爆薬感度が一層よく判るような気がしますし、全く興味津々、示唆を多く与えられます。

とにかく本書を読んで行きますと推理小説のような感じがします。摩擦の本性、潤滑油の作用等が推理され、確認されていきます。クロードルの「実験医学序説」と言うその方面の開拓的古典がありますが、紹介者はこれを読んだとき(勿論日本語ですが)と同じような感慨をパウデンのこの本に感じました。

日本語は東大航空研究所の會田氏を中心に10人余りで訳されたもの、とにかく我々には何んと言つても英語より日本語がはるかに読みやすいので有難いことあります。残念なことには誤訳、不適当訳が可なり多くて、たとえば特に p. 186 の中頃の訳は到底受けません。不自然な感じの所は誤訳の類と思つてよろしいが、大抵推量すれば真意は捉えられるでしょう。16章化学反応に出て来る爆発剤は explosive のことですが、何故爆薬としなかつたか一寸抵抗を感じます。

原本(¥3,000)より廉く(¥1,300)入手が楽なのも有難いことです。(水島容二郎)