

Fig. 1 Experimental setup for measuring the surface temperature at ignition

ーム・パーの先端に固定され、反対側のパー突端には重りがつけられている。光トランジスタは $\phi 8\text{mm}$ の黄銅管に挿入され、回転半径 60mm 、回転速度 1500rpm で推進薬試料表面との距離を 10mm に保って毎秒 25 回、約 940cm/sec の線速度で走査する。黄銅管前面には推進薬から発生する分解ガスによって集光レンズが腐食するのを防止するため、スリット・グラスを取付け実験毎に交換する。光トランジスタ保持器の後面は厚さ 1mm のヘミット板で蔽いレーザー光による加熱から守っている。

固体推進薬試料は末端カルボキシル基ポリブタジエン $15\text{wt}\%$ 、過塩素酸アンモニウム $85\text{wt}\%$ からなる長さ 20mm 、断面 $3 \times 3\text{mm}$ の直方体で、支持台から水平に 10mm 突き出ている。

着火過程におけるレーザー放射過熱と化学反応によって推進薬表面およびその近傍から発散される。熱放射はそれを受けた光トランジスタの出力に変換、パッケージ形スリップリング (Michigan Scientific Co. USA) によって中継され、直接シンクロスコープ、ブラウン管にパルス状電圧となって現われるので、単一掃引でその時間変化を写真撮影して記録した。

光トランジスタ出力の時間微分 dV/dt が急激に変化するところを着火点と定め、次に述べる実験によって作製した電圧-温度校正曲線にもとずき着火温度を求めた。

Fig. 2 の中に示されているように、古いスチール製レコード針を多数重ねて円筒容器に入れて黒体をつくり、電気炉に入れて加熱した。その時、 $\phi 0.3\text{mm}$ クロメル・アルメル熱電対で前後 2 カ所測定し、平均値をもって黒体温度とした。推進薬試料表面と同じ放射面積に合わせて黒体放射面を仕切り、実際の着火実験

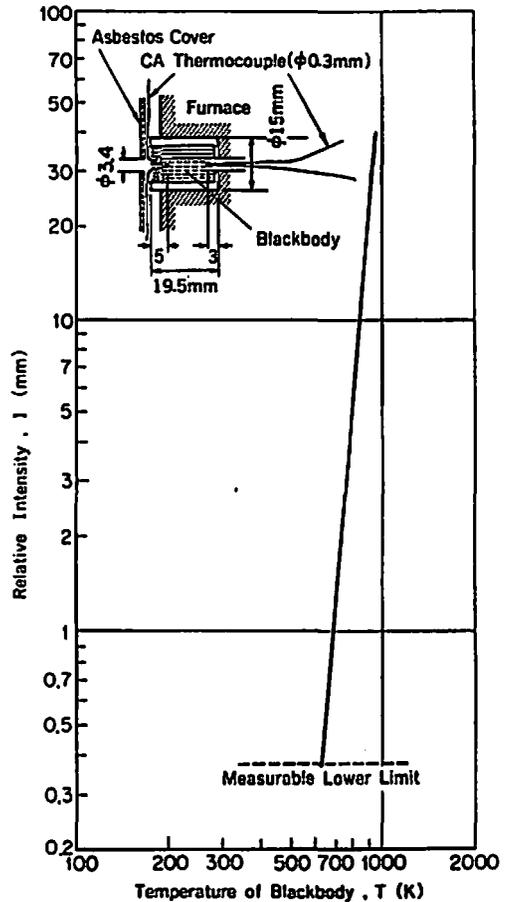


Fig. 2 Calibration curve of photo-transistor sensitivity versus reference black body

と条件を同一にして、前述の放射計測器を置いて黒体からの放射強度と光トランジスタ出力との関係を求め、Fig. 2に示すような校正曲線を作製した。縦軸は相対放射強度で、シンクロスコープ、スクリーン上に現われた電圧を長さ (mm) で表わしたものである。

可視光線の範囲では推進薬表面の黒度は着火温度に近づくとき炭火して $0.93 \sim 0.95$ にはなるが完全黒体とはいえない。しかし、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ の赤外線に対してはほぼ 1.0 になり、推進薬表面を黒体として取扱っても差支えない。

3. 実験結果と討論

前章に記述した放射強度計測法により減圧下で雰囲気へヘリウム、窒素および酸素に置換して着火過程における推進薬表面温度の推移を測定した。レーザー照射は光トランジスタが試料表面を走査する間は中断されるが、中断時間は全照射時間の 1.25% に過ぎず着火時間には、回転する放射センサ保持具でレーザー光を瞬間的に遮っても影響はみられない。

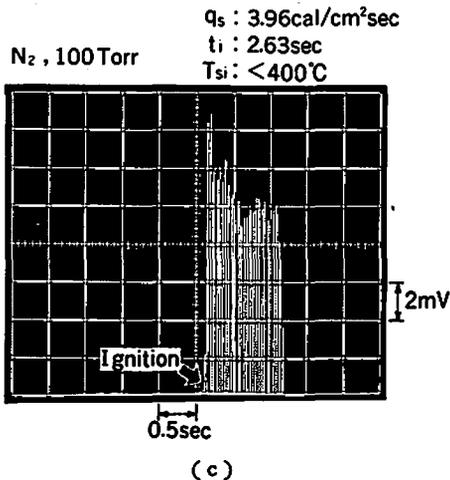
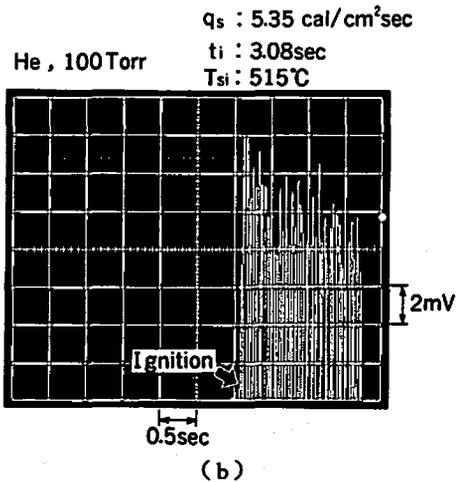
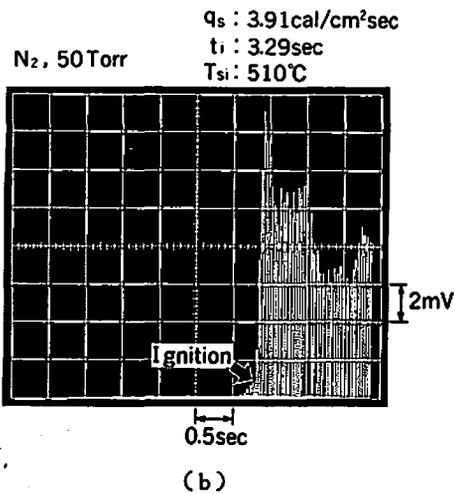
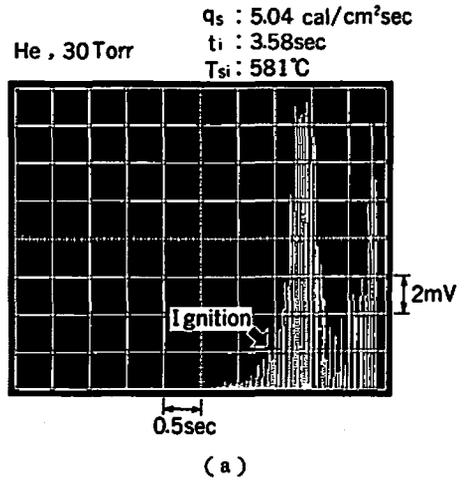
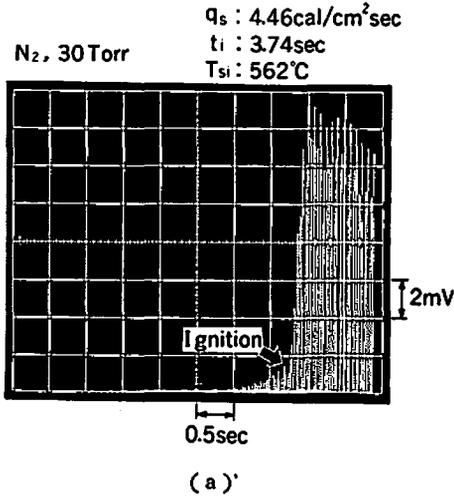


Fig. 3 Phototransistor output versus time curves in nitrogen atmosphere, (a), (b) and (c).

Fig. 4 Phototransistor output versus time curves in helium atmosphere, (a) and (b).

Fig. 3 (a) (b) および (c) は窒素雰囲気、レーザー放射強度 $3.9 \sim 4.4 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ において、それぞれ 30~50 および 100 Torr での推進薬表面からの放射強度の時間変化を記録したオシロ写真である。図中の記号で q_s : レーザ放射強度、 T_{si} : 着火温度、 t_i : 着火時間を示す。30 Torr ではレーザー放射開始から 3.74 sec 経過したところで表面温度は 562°C に達して着火している。それまで表面温度は時間に対して指数関数的に上昇している。50 Torr へ雰囲気気圧を増すと放射強度のパターンは 30 Torr の場合と変わらないが、着火時間が 3.29 sec に短縮されるとともに着火温度は 510°C と低くなっている。つまり着火時の表面温度は雰囲気気圧の影響を受け変化することがここに明らかになった。さらに 100 Torr へと雰囲気気圧を高めると、表面温度が光トランジスタによる検知下限温度、 380°C

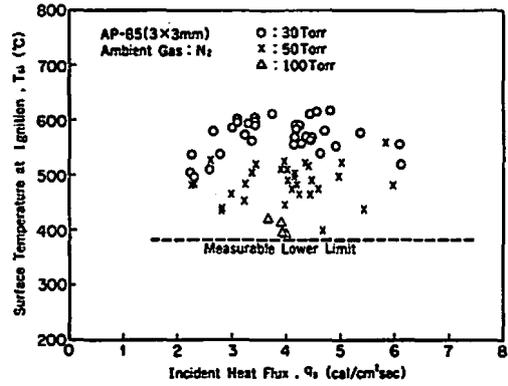
に達しないうちに火炎が発生、温度上昇の待定数は前二者と比べて非常に大きいことが認められる。この時、放射センサは気相放射をみているのであって、着火点は明らかに気相にある。また、380℃の温度では表面で着火するにはあまりにも低過ぎる。

ヘリウム雰囲気気中に置換すると Fig. 4 (a) および (b) に示すように表面温度の時間履歴や着火温度は30~100 Torrの間では明確に測定できる。Fig. 4 (a) ではレーザー放射強度が5.04 cal/cm², sec と Fig. 3 の実験例よりも高いために、着火時間は3.58sec とやや短くなっているが着火温度は581℃と窒素雰囲気の場合より20℃程度高くなっている。また、100Torrへと雰囲気気圧を増した Fig. 4 (b) から明らかであるが、この圧力においても表面温度は着火まで指数関数的に上昇しており、しかもその待定数は小さく着火温度515℃と、Fig. 3 (c) の実験条件で400℃以下であったと対比すれば、着火機構の違いをうかがわせる大きな差を生じている。

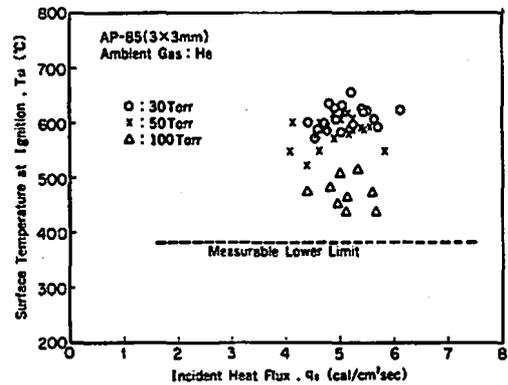
着火状況を高速カメラ²⁾や流し写真¹⁾で観察するとヘリウム雰囲気中では100Torrの場合、先に表面が灼熱状態になった後に、表面から気相へと火炎が生長してゆくに対して、窒素やアルゴン100Torrにおいては、先ず気相に火炎が生じ、それが表面と後流へ生長してゆき、推進薬表面は20~500ms後に灼熱状態になる。筆者らは前者を表面着火、後者を気相着火と呼んでいるが前者は着火点が表面のみに限ることを意味するのではなく、着火前反応で生長した多孔性炭素質内の細孔を内部から推進薬分解ガスが通過する途中で着火する現象—これをもっとも妥当な着火機構と思われる—を含んでいる。つまり、30~100Torrのヘリウム雰囲気気圧や他の雰囲気気中でも着火限界圧近くなると、あたかも表面で着火が起こっているようにみえるのは、このような条件下では表面から発散した推進薬分解ガスがもはや自力では着火をみるまでには反応を進めることができず、レーザー加熱を充分に受け表面に生成した多孔性炭素質層が高温・灼熱状態になって、その中を通る間に分解ガスが加熱され着火している故と思われる。したがって、表面着火では気相着火の場合よりも着火時間の表面温度が高いのはむしろ当然といえる。

酸素雰囲気は気相と表面の2相における着火過程の化学反応に強く関与し、気相着火する圧力範囲が拡大し、この実験で表面着火と認められたのは30Torrのときのみである。気相着火では大きな火球が生成するので容易に区別できる。

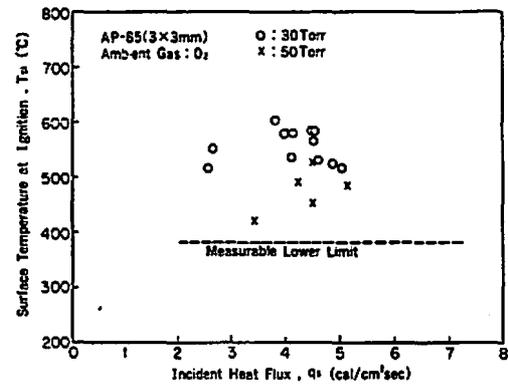
Fig. 5 (a), (b) および (c) は、圧力をパラメータとしてそれぞれ窒素、ヘリウムおよび酸素雰囲気中における着火温度とレーザー放射強度との関係をプロット



(a)



(b)



(c)

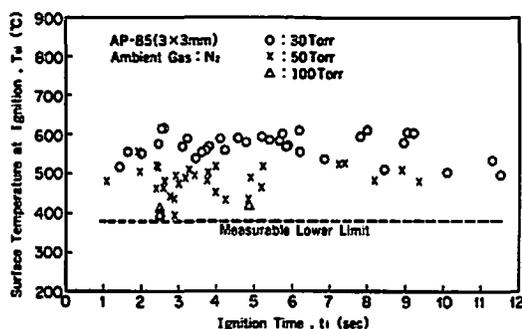
Fig. 5 Ignition temperature of propellant versus incident heat flux various in ambient gases, (a), (b) and (c)

した結果である。ただし、100Torr 窒素および酸素雰囲気では着火温度が380℃より低かったときには、表面温度は測定できず、このデータは放射センサで検知可能なもののみが採択されている。測定値のばらつき

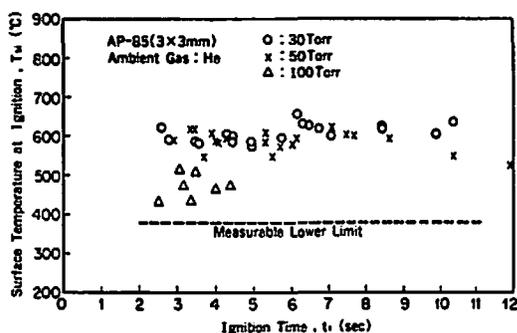
Table 1 Dependency of ignition site upon ambient pressure for various gases: Based on the photographic examination by streak camera and high-speed 16mm camera.

Ambient Gas \ Pressure (Torr)	30	50	100
	He	Surface	Surface
Ar, N ₂	Surface	Surface	Gas Phase
O ₂	Surface	Gas Phase	Gas Phase

→ : Shift of Ignition Site



(a)



(b)

Fig. 6 Ignition temperature of propellant versus ignition time in various ambient gases, (a) and (b).

は大きいが雰囲気圧が低くなるにつれて着火温度が高くなる事実が明らかである。たとえば、窒素とヘリウム雰囲気中では30 Torrと100 Torrとの間の着火過程差は150°Cになっている。また、雰囲気の種類によって着火温度の高低を低くすると $\text{He} \gg \text{N}_2 > \text{O}_2$ の順になる。

気相着火から表面着火へ移行する雰囲気圧は明瞭で高速度と流し写真で着火過程を撮影、観察した結果から雰囲気の種類によって異なる遷移圧力がおよそ那辺にあるか示したのが Table 1 である。ヘリウム雰囲気では300~400 Torr までその着火点は表面にある。

着火温度に対する着火時間の依存性を調べるためにレーザー放射強度にとらわれずに圧力をパラメータにとって、窒素とヘリウム雰囲気中における T_{ii} と t_i との関係プロットしたのが Fig. 6 (a) および (b) である。これらの図をみると着火温度は着火時間すなわち着火エネルギー²⁾との相関性は認められず、圧力のみに強く依存していることがわかる。

4. 結論

センサを測定部に接触させずに放射強度の測定を利用して、レーザー着火過程にあるコンポジット推進薬の

表面温度の推移を熱電対に匹敵する程度で測定できることを実証し、レーザー着火がなされるコンポジット推進薬の特異な振舞を客観性をもって明確にすることができた。

雰囲気の種類を変え、減圧下における着火実験で、1) 雰囲気圧が低くなるにつれて着火温度(着火時の推進薬表面温度)が高くなる。2) ヘリウム雰囲気中ではアルゴン、窒素、酸素など、他の不活性非支燃性、支燃性雰囲気中よりも著しく着火温度が高い、という前報¹⁾²⁾で筆者らが結論として導いた事項に新しい裏付けを得た。既に高速度と流しカメラによる撮影記録によってこれを確認、報告しているが、このような現象は圧力の低下とともに気相から表面、あるいは表面にある厚さをもって生成した多孔性炭素質層内部へ着火点が移動するのと連動して起こっている。

本法によって取得された着火温度データは大きなばらつきをみせているが、これは測定精度の問題というよりはむしろコンポジット推進薬の着火温度自体もっている性質であり、微視的にみると燃結剤と酸化剤成分の表面分布とレーザー放射束の空間と時間的不均一性にも起因するところが多いと思われる。S/N比の改

善のために、減圧、加圧、腐食性雰囲気でも使用に耐える高感度、超小型赤外線センサの開発が切望される。それを用いて、常温から400℃まで、本法では測定できなかった。推進薬表面温度を今後追究してゆきたい。

文 献

- 1) Sofue, T. and Iwama, A. : Propellants and Explosives 4, 98 (1979).
- 2) 斉藤, 原山, 岩間 : 工業火薬 41, 3, 131 (1980).
- 3) Klein, R., Menster, M., von Elbe, G. and Lewis, B. : J. Phys. Colloid Chem. 54, 877 (1950).
- 4) Sabadell, A. J., Wcnograd, J. and Summerfield, M. : AIAA J. 3, 1580 (1965).
- 5) Powling, J. and Smith, W. A. W. : Combust. & Flame. 6, 173 (1962).
- 6) Powling, J. and Smith, W. A. W. : Tenth Symposium (International) on Combustion, 1373 (1965).
- 7) Selzer, H. : Eleventh Symposium (International on Combustion 439 (1967).
- 8) Beckstead, M. W. and Hightower, J. D. : AIAA J. 5, 1785 (1967).

A Non-Contact Surface Temperature Measurement Method for the Propellant to be Ignited by Means of CO₂ Laser.

by Takeo SAITO*, Shoichiro AOYAGI* and Akira IWAMA*

In the ignition transient process for the propellant composed of carboxyl-terminated polybutadiene and ammonium perchlorate to be ignited by means of CO₂ laser, the influence of different ambient gases upon the surface temperature has been evaluated by a radiative intensity measurement method under sub-atmospheric pressures. Such a temperature measurement of a non-contact type would make it possible to eliminate the complex problems involving the attachment of solid sensor at the heated surface. Photo-transistor having the maximum sensitivity at wavelength 1.5 μm was put on the tip of a rotating arm-bar and the heated surface was scanned with the radiation sensor. The output was recorded on the screen of a synchroscope through the slip rings electric terminals. The calibration of the radiative intensity to temperature was achieved using the reference black body emission in a furnace. The measured surface temperatures at ignition (ignition temperatures) coincided with the trend of the previous experimental results using thermocouple method that the ignition temperature becomes higher with lowering the ambient pressure and particularly higher ignition temperature is needed in helium atmosphere.

(Institute of Space and Astronautical Science)