

HAN/TEAN系液体発射薬の着火・燃焼特性

岸田智浩*, 橋 武史*, 小坂安則**

一液性液体発射薬の主流であるHAN/TEAN系液体発射薬の着火・燃焼の基礎特性を知るための実験研究を行った。着火試験は発射薬の液滴を熱面に自由落下させる方法によるもので、高速撮影の結果、高圧力下の方が着火遅れ、燃焼完了までの時間共に短いことが判った。密閉ポンプを用いた燃焼試験では、圧力が上昇するにつれて燃焼速度はまず上昇し、その後一旦低下する中圧力領域 (500~1000atm) が現れ、更に高圧力下では再び上昇することが判った。また水の含有率の増加に伴い燃焼に要する時間が延びることも確認された。

1. 緒 言

液体発射薬は固体発射薬と比較して、無薬炭化などに代表される実用面での利点に加え¹⁾ 薬量や燃焼室形状を選択することにより要求に応じて燃焼状況、燃焼時間を制御できる可能性を有するため1970年頃から各国で研究が進められてきた。特に後者の燃焼制御性は発射薬砲システムの適用範囲 (flexibility) を大きく拡張する要素であり、その実現により固体発射薬にはない利用法も期待されている。これらの特性を活用するためにはその基礎的な燃焼特性を知っておく必要があるが充分なデータの蓄積はなく、むしろ応用技術が先行している。しかし、更に高度な利用方法や安全面を考えれば基礎研究は不可欠であり、今回はまず着火性試験や密閉ポンプ燃焼試験を開始した。用いた発射薬は混合一液性発射薬で主流となっているHydroxyl Ammonium Nitrate (HAN)を酸化剤、Tri-Ethanol Ammonium Nitrate (TEAN)を燃料としたLP1845 (HAN/TEAN/H₂O=63.2/20.0/16.8%Wt)系発射薬である。

2. 実 験

2.1 熱面着火実験

着火特性を調べるために熱面着火試験装置を製作し使用した。Fig. 1にその概略図を示す。この試験装置は直径12.5cm高さ36cmの円筒形耐圧容器内の上部か

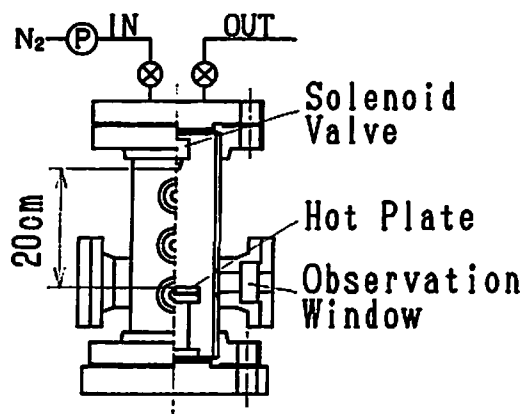


Fig. 1 Chamber for LP droplet ignition test.

らLP1845の液滴をステンレス製の熱面に自由落下させ、観察窓を通して液滴の着火に至るまでの様子を高速度ビデオ撮影するものである。液滴の落下は電磁弁により制御され、落下距離は約20cmである。電磁弁によって制御される液滴1滴の質量はあまりばらつきはなくほぼ一定とみなすことができることを確認し、今回は25~30mgに設定して実験を行った。熱面であるステンレス円板はその下から電熱線ヒータによって加熱され、温度設定は600℃まで可能である。雰囲気の高圧には窒素を用い、実験は1, 10, 20atmに設定して行った。

2.2 密閉ポンプ実験

内容積約250ccの密閉ポンプ内でステンレス容器に入れたLP1845を燃焼させ、その燃焼圧力変化をビエゾ型圧力ピックアップ (Kistler Type 6211) により記録した。標準薬量は50gとし、ステンレス容器は

1992年6月9日受理

*九州工業大学 工学部 機械工学教室
〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1
TEL 093-871-1931 (内線 313)

**旭化成工業株式会社 大分工場
〒870-03 大分市大字里 2620
TEL 0975-92-2145

Table 1 Vessel for closed-bomb test

Number of rooms	Cross section (mm × mm)	Depth of LP (mm)	Vessel weight (g)
1	60 × 20	29.2	110.5
2	20 × 20	28.4	153.5
12	10 × 10	27.6	173.7

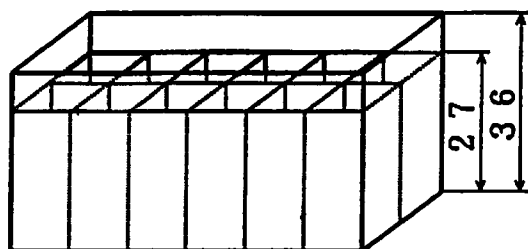


Fig. 2 Configuration of LP containing vessel used for closed-bomb test (thickness 2mm, stainless steel).

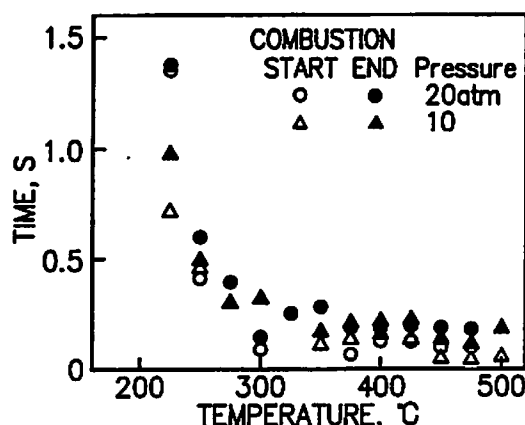


Fig. 3 Influence of hot surface temperature and chamber pressure on the ignition delay and combustion duration.

Table 1 に示すように内側の仕切り方の異なる 3 種類のものを用意した。異なる部屋数の容器を用いて実験した目的は、1 室の断面積の違いにより線燃焼性にどの程度の影響があるかを確認することにある。容器上面の方は仕切られておらず、全体に一樣に着火が行われるようにしてある。この容器の概略図を Fig. 2 に示す。試料は液体発射薬に溶媒として含まれている水の量の影響をみるために、水の量を重量割合で 16.8% (LP1845 相当)、20.0% (LP1846 相当)、29.0% と変化させたものの 3 種類とした。点火は 2.3 g のニトロセルロースをニクロム線加熱することで行った。

3. 結果及び考察

3.1 着火特性

Fig. 3 は横軸に熱面温度をとり縦軸に液滴が熱面に達してから着火および燃焼完了するまでの時間を示したものである。着火は輝炎の現れた瞬間、燃焼完了は液滴が消失した瞬間としたが、その判定による誤差は 5 ミリ秒程度であるので結果にはほとんど影響を与えない。予圧のない状態や熱面温度の低い状態では輝炎を確認することができなかった。例えば圧力が 1 atm では熱面温度が 500℃ においても液滴が熱面上で跳ね回ったり分割されるだけで輝炎は確認されず、液滴の存在がなくなるまでの時間も数～10 秒と図中に全く表せないくらいとなっている。Fig. 4 に 20atm, 475℃ のときの液滴の挙動の写真を示す。これは液滴が熱面に達した瞬間、着火、燃焼の様子を示している。Fig. 4-(c) では輝炎を発している様子が確認できる。

上記の 1 atm において液滴が跳ね回る現象について原因を調べるために、比較として水の液滴を同じ条件で熱面に落としてみたところ、1 atm, 400℃ では水の液滴は跳ね回りながら蒸発したのに対して 20atm, 400℃ では水の液滴はその場で蒸発するのが確認された。このことから低圧下では LP に含まれる水の熱面との接触部分が比較的早く蒸発し蒸気層が形成されて反応に必要な熱を熱面から受け取りにくくなるが、逆に予圧がかかった状態では水の蒸発が抑制され跳ね回りも抑えられることにより、液滴内部に熱を取りこみやすくなり反応が円滑におこなわれるものと思われる。類似の現象は同発射薬を用いた自由落下燃焼²⁾ や自燃性液体推進薬でも報告されており³⁾、液体発射薬や推進薬の着火性を検討する際に周囲圧力は重要な要素となる。

3.2 燃焼特性

密閉ポンプを用いた実験によって得られた圧力-時間変化を Fig. 5 に示す。ここには部屋数が異なる条件のものに加えて点火薬のニトロセルロースだけのものが 1 つの座標上に表されている。得られた圧力線図から圧力変化率 (曲線の傾き) を燃焼速度 (単位時間あたりの燃焼質量または燃焼液面後退量) とみなすと、

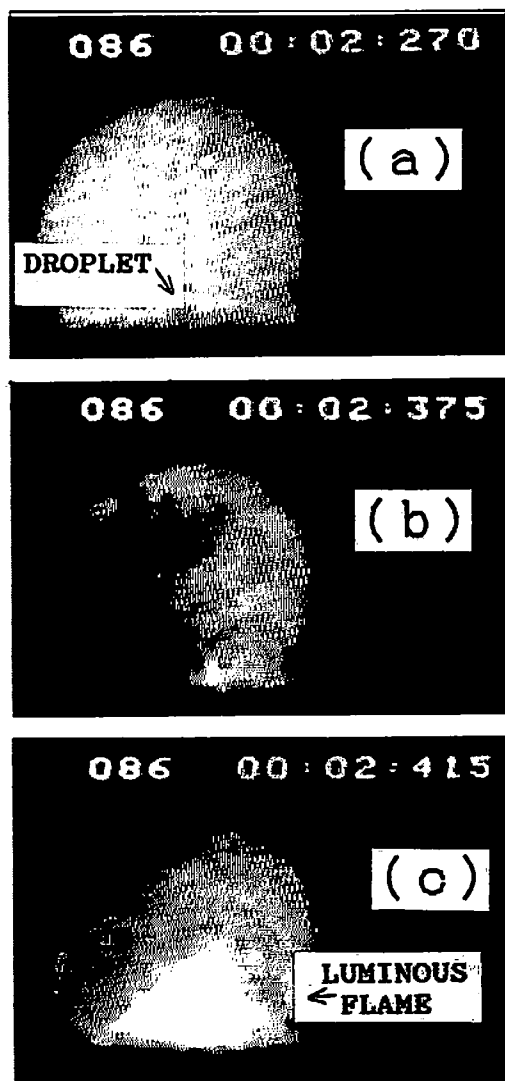


Fig. 4 High-speed motion picture records showing the instants of (a) LP droplet with hot surface, (b) ignition and (c) combustion.

いずれの容器の場合も500~1000atm付近に、燃焼速度が減少から増加に転ずる領域が存在している。

最終到達圧力については、いずれの容器の場合もほぼ2000atm程度である。厳密には、実際のLPのみによる達成圧力は点火薬による圧力分を差し引いたものとなる。また、燃焼に要する時間については部屋数が多くなるに従って長くなる傾向がある。この原因としては部屋数が増すにつれてLPと容器との接触面積が増え、そのため燃焼熱のうち液面へのフィードバック量が容器への熱損失により幾分低下し燃焼時間が長くなることによるものと思われる。部屋数が増すにしたがって最終到達圧力がわずかに低下しているのは容器

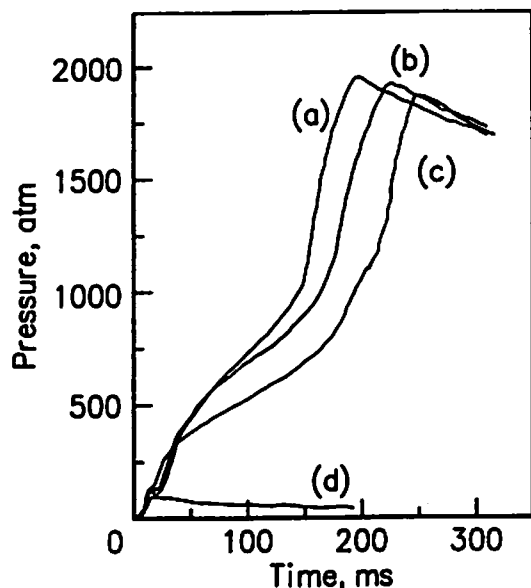


Fig. 5 Influence of the number of rooms of LP vessels on the pressure-time history: (a) 1 room, (b) 3 rooms, (c) 12 rooms with LP(50g) and nitrocellulose (2.3g) for ignition and (d) nitrocellulose only.

への熱損失の差が主な要因であろう。

次に液体発射薬中の水の量を変化させたときの圧力変化の様子をFig. 6に示す。ここでは容器は全て12室のものを用い、試料容積も一定にしてあるため、容器内のHAN+TEANの重量はそれぞれ異なる。そのためTEANの単位質量当たりの発熱量から算出した液体発射薬の容器内の発熱量は、水の含有率を29.0%としたものは37.2kcal、16.8%のものは46.4kcalとなり、29.0%としたものの方が発熱量は20%近くが少なくなるが、それに対して実験により得られた最高圧力値はそれぞれ1920atm、1220atmと圧力の低下割合が約40%になり発熱量の低下割合よりも大きい。ここで下の(1)式により求めた理論最高圧力値 P_{th} と実験により得られた最高圧力値 P_{ex} の差 ΔP と、燃焼時間 t との関係性を求めてみた。その結果をFig. 7に示す。

$$P_{th} = \frac{RT/M}{V/w - \alpha} \quad (1)$$

P_{th} : 気体の圧力 R : 気体定数 T : 燃焼温度 M : 燃焼ガスの平均分子量 V : 燃焼室容積 w : 燃焼ガス質量 α : コポリウム

コポリウムの値は文献4)の値 $\alpha = 0.72 \text{ cm}^3/\text{g}$ を用いた。Fig. 7を見ると最高圧力の低下はほぼ燃焼時間に比例していることがわかる。したがって圧力の低下割合約40%のうち発熱量の低下20%を除いた残りの約

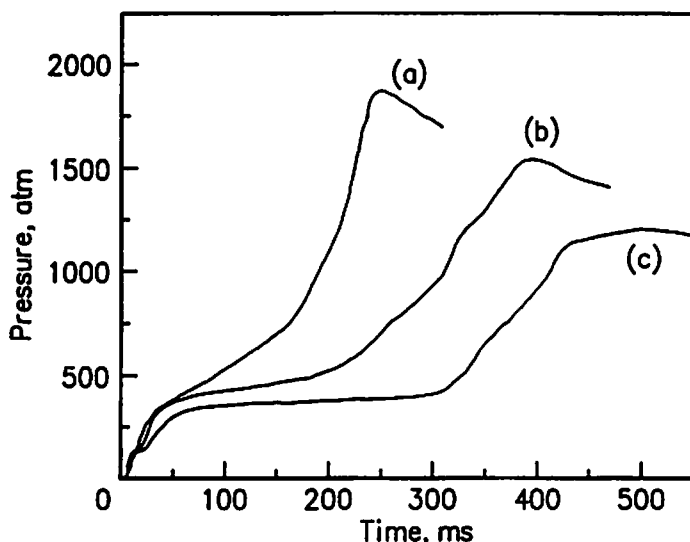


Fig. 6 Influence of water content on the pressure-time history :
(a) 16.8% H₂O (Lp 1845), (b) 20.0% H₂O (LP 1846)
and (c) 29.0% H₂O.

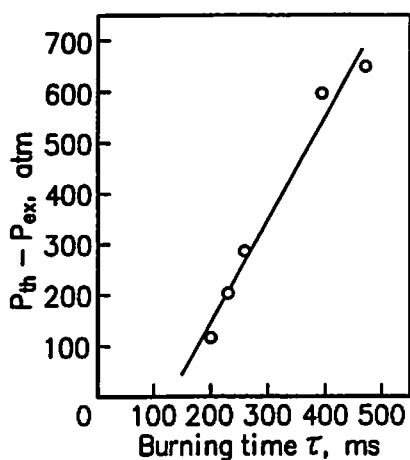


Fig. 7 Relation between pressure difference
 $\Delta P = P_{th} - P_{ex}$ and burning time τ .

20%分は燃焼時間が長くなったためにポンプ本体への熱損失が大きくなったためと考えられる。また燃焼時間が長くなったのは水の蒸発潜熱による作用のために反応速度が低下しているのが原因ではないかと思われる^{2) 5)}。一方、燃焼速度が変化する領域は、水の含有率の影響を余り受けずに同じように500～1000atmの圧力範囲において現れ、またこの領域では水の含有率の増加に伴う燃焼速度の著しい低下が読みとれる。

これまでの報告は、400atm以下（低圧領域）のものが多く、この領域における圧力上昇に伴う燃速の低

下についてはHAN、TEANの分解特性の相違や気・液相境界の安定性に起因するのではないかという説明もある⁶⁾。しかし今回行った様な実用上重要となる高圧領域（～2000atm）での報告例はほとんど無く、この領域まで含めると燃焼速度が更に複雑に変化する領域が存在している。このことについては今回の実験だけでは燃焼状態が装置や燃焼容器の形状にも依存すると考えられるため理由の断定は難しいが、HAN/TEAN系の液体発射薬の特性の一つではないかと考えており、さらに詳しく検討したい。

4. 結 論

以上の実験により次の結論を得た。

- 1) 予圧をかけることにより液体発射薬の着火性は向上する。
- 2) 密閉ポンプ内で液体発射薬を燃焼させると燃焼速度が時間に対して急激に増加する圧力領域があり、それに続いて一旦低下する領域、再び増加する領域がある。このように燃焼速度がポンプ内圧力500atm付近で変化するものは液体発射薬特有の燃焼特性ではないかと思われる。
- 3) 水の割合を増加させることで燃焼時間を延ばすことが可能であり、燃焼速度の圧力依存度と共に燃焼制御を行う上で重要な要素である。

5. 終わりに

3. 2で記したように燃焼速度を圧力変化率で代用しているが、1～数千気圧に渡る範囲では実在気体としての取扱いが必要で、その誤差を除くためには実際

の燃焼面の確認により（線）燃焼速度を知る必要がある。そのため現在、液面レベル検知が行える密閉ポンプの製作を検討中である。

なお本研究は砲火薬工業技術奨励会の研究助成により行ったものであり、ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 柴田亮男, 工業火薬協会誌, 49, P.73 (1988)
- 2) D. L. Zhu et al., Combust. Flame, 70, P. 333 (1987)
- 3) W. Daimon et al., J. Propul. Power, 7, P. 946 (1991)
- 4) P. G. Baer et al., BRL-TR-2860, P.9 (1986)
- 5) S. R. Vosen, Combust. Sci. and Tech., 68, P. 85 (1989)
- 6) S. R. Vosen, Combust. Flame 82, P.376 (1990)

Ignition and combustion characteristics of HAN/TEAN liquid gun propellants

Tomohiro KISHIDA, Takeshi TACHIBANA and Yasunori KOSAKA

Ignition and combustion characteristics of HAN/TEAN liquid gun propellants (LP) have been experimentally examined under several conditions. Tests of ignitions initiated by contact of LP droplets with hot surface showed that ignition delay is shorter in the case of higher ambient pressures and less water content in LP used. It indicates that the vapor layer formed between the droplet and the hot surface plays an important role for ignition.

The pressure-time history obtained by closed-bomb tests showed that with increase of pressure the burning rate increases at first, decreases in the mid-pressure range and then increases again at higher pressures.

(*Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensuicho, Tobata, Kitakyushu 804 Japan

**Oita Plant, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 2620 Oazasato, Oita 870-03 Japan)