

液体発射薬を用いた飛翔体発射機構の研究 (第1報)

一点火機構と初期昇圧特性

岡本昭宏*, 丸畑徳世*, 奥村俊治*, 大里浩文*
 金安正記*, 村上賀國**

飛翔体発射機構に使用する点火装置を開発するために、電気点火方式を採用した3種類の点火装置を試作し、各装置の初期昇圧特性に着目して諸特性を評価した。その結果、各装置の燃焼室初期昇圧特性を制御するための主要因を明らかにし、実用のための指針を得た。また、燃焼室の昇圧特性とその特性を左右する液体発射薬の初期分解プロセスとの関連性を考察し、点火機構の設計上有用な知見を得た。

1. 緒言

液体発射薬は、固体発射薬に比して、製造、貯蔵、輸送等が容易であり安全性が高い。飛翔体発射機構にこれを用いた場合、装填の自動化機構が簡素でかつ比較的低下圧力で大きな初速が得られると言われている。このような理由で、液体発射薬を飛翔体発射機構に適用するための実用的研究の重要性は近年とみに認識が深まってきており、特に再生燃焼方式が有望とされている。^{1) 2) 3)}

液体発射薬を用いた再生燃焼方式の飛翔体発射機構の一例をFig. 1に示す。この機構において、特に点火時に要求されるのは、燃焼室内の初期昇圧特性を制御することにより噴射ピストンを作動させ、液体発射薬を薬室から燃焼室に噴射し、着火、継続燃焼させる条件を作ることである。点火機構はこの様な初期条件を現出する上で重要な役割を有している。

また将来実用に供しうる発射システムを追及する上で電気エネルギーを用いて液体発射薬に直接点火する方式⁴⁾が最適と考えられる。具体的にはスパーク点火とノンスパーク点火の2方式がある。

本研究では、これら電氣的点火方式を使用した点火装置を試作し初期昇圧特性に着目して諸特性を評価した。さらに液体発射薬の初期分解プロセスに関する考

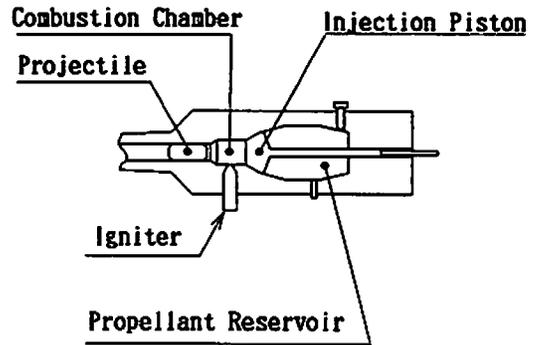


Fig. 1 Test Fixture

察を加えた。

2. 実験装置

実験装置をFig. 2に示す。点火方式として開放型およびピストン型はスパーク点火方式を、ノズル型はノンスパーク点火方式を採用した。次に各点火装置の機構について説明する。

2.1 開放型点火装置

開放型点火装置をFig. 2(a)に示す。本点火装置は点火室が直接燃焼室につながっており、プラス電極は点火室内中心部にあり、マイナス電極は装置本体とした。

2.2 ピストン型点火装置

ピストン型点火装置をFig. 2(b)に示す。本点火装置は、装置下部にある点火室と燃焼室と点火室を分離するピストンで構成されている。ピストンは加圧室内のシリコンオイルの圧力により制御される。点火室に

1992年4月24日受理

* 鈞日本製鋼所 広島製作所
 〒736 広島市安芸区船越南1-6-1
 TEL 0822-1830

** 鈞日本製鋼所
 〒100 千代田区有楽町1-1-2

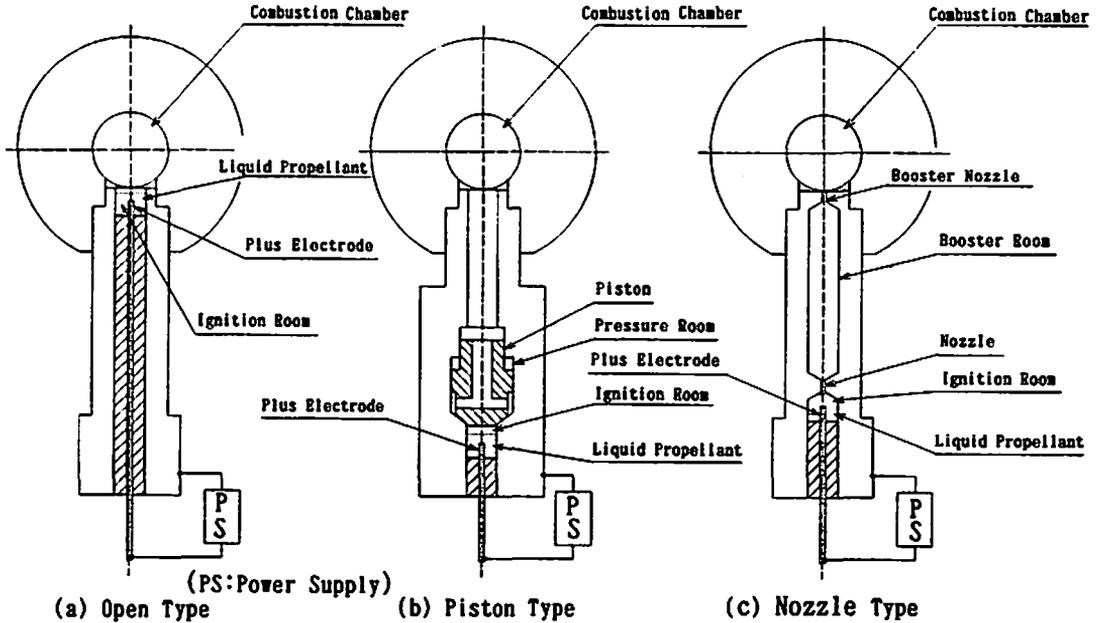


Fig. 2 Electrical Igniter

は、開放型と同様に電極を配した。

2.3 ノズル型点火装置

ノズル型点火装置をFig. 2(c)に示す。本点火装置は、点火室とブースター室で構成され、各室はノズル部で隔てられている。点火室には、電極があり配置は開放型と同様である。

3. 実験方法

本実験に使用した液体発射薬は現在研究の主流であるHAN (Hydroxyl Ammonium Nitrate), TEAN (Tri Ethanol Ammonium Nitrate), および水から成り、HANを酸化剤, TEANを燃料成分とし、成分構成は重量%でHAN60.8, TEAN19.2, 水20である。⁸⁾

3.1 開放型点火装置

点火室に液体発射薬を注入し、点火を容易にするために燃焼室を N_2 ガスで初期加圧⁵⁾し、電極間に高電圧を印加することにより点火した。このとき、電源電圧、液体発射薬量、燃焼室容積および燃焼室初期圧力を可変条件とし、燃焼室圧力、電極間の電圧および電流を計測した。

3.2 ピストン型点火装置

点火室に液体発射薬を注入し、加圧室をシリコンオイルにより加圧してピストンを固定し、さらに点火室を N_2 ガスで初期加圧した状態⁵⁾で電極間に高電圧を印加した。このとき、電源電圧、点火室初期圧力、加圧室初期圧力、液体発射薬量および燃焼室容積を可変

条件として、点火室圧力、燃焼室圧力、電極間の電圧および電流を計測した。

3.3 ノズル型点火装置

点火室およびブースター室の一部に液体発射薬を注入し、電極間に高電圧を印加した。このとき、点火室容積、ブースターノズル面積、ブースター内液体発射薬量および燃焼室容積を可変条件とし、点火室圧力、ブースター室圧力、燃焼室圧力、電極間の電圧および電流を計測した。

4. 実験結果および考察

4.1 開放型点火装置

得られた電気特性の一例をFig. 3に示す。電圧印加後ジュール発熱により気泡が発生し、電気抵抗が増大する過程を経てスパーク (絶縁破壊) が起こり300 A以上の電流が流れた。最初のスパーク発生までの時間は0.25~0.40msの範囲であり、その後も上記の過程をくり返しつづ200A前後の電流が数msの間流れた。この大電流のため点火後電極部に損傷が生じ、何度か使用すると電極交換が必要となった。最初の絶縁破壊電圧は全般に1.9kV前後に集中した。

Fig. 4に初期圧力と燃焼室圧力上昇率の関係を示す。点火前の燃焼室初期圧力を高くすればするほど燃焼室圧力上昇率は増加する。本実験では16MPaまでの初期圧力に対して1~7 MPa/msの圧力上昇率が得られた。このことから初期圧力を増大することによって、より高い圧力上昇率が得られると考えられる。

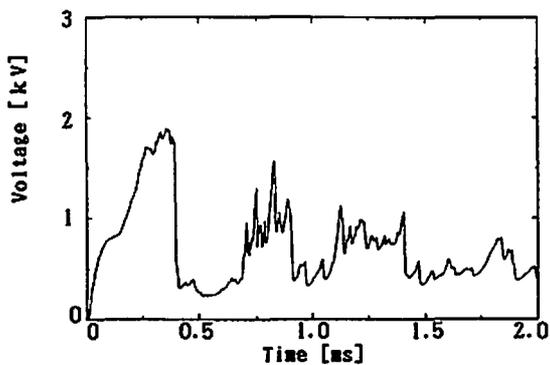


Fig. 3 Electrical characteristics of the open type igniter

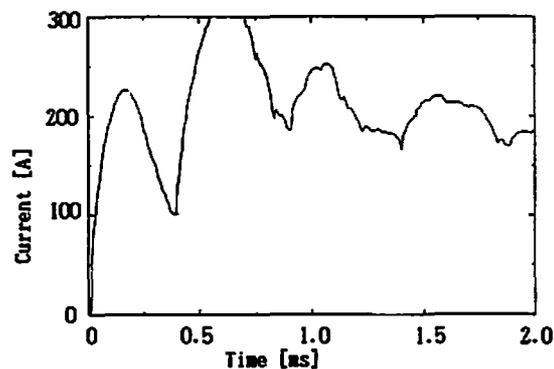


Fig. 4 Rate of pressure rise vs prepressure relation of the open type igniter

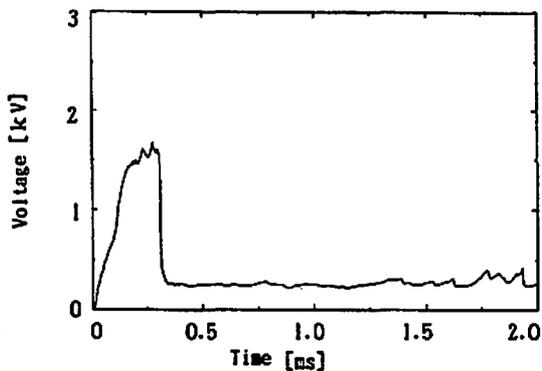


Fig. 5 Electrical characteristics of the piston type igniter

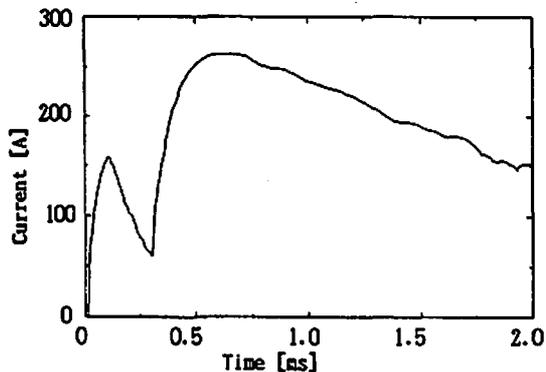


Fig. 6 Rate of pressure vs pressure room pressure relation of the piston type igniter

4.2 ピストン型点火装置

電気的特性の一例をFig. 5に示す。電圧印加後、スパークに至る過程では、開放型点火装置の場合と同様の傾向を示した。ピーク電流は約260A、絶縁破壊電圧は1.6kVでそれぞれ開放型に比べやや低めの値を示した。

スパーク発生後は、開放型とは異なり一定電圧の下

でのゆるやかな電流減少が観察された。電極部の損傷は開放型と同様の傾向を示した。

加圧室圧力と燃焼室圧力上昇率の関係をFig. 6に示す。

この図から加圧室圧力を高くすると燃焼室圧力上昇率

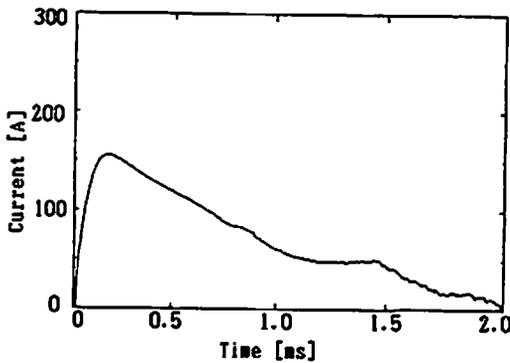
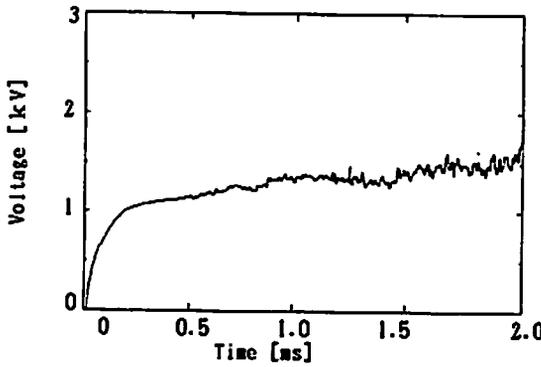


Fig. 7 Electrical characteristics of the nozzle type igniter

も増加する傾向が判明した。本実験では、加圧室圧力 15MPa までの範囲で 30~60MPa/ms の圧力上昇率が得られた。

4.3 ノズル型点火装置

本点火装置は、さらに簡易な方式で安定した点火を狙ったものである。Fig. 7 に電圧電流特性を示す。ノンスパーク方式である本点火装置の電気特性は他の点火装置とは異なる特性を示した。電流ピークは、点火後約 0.2ms で約 160A に達し、2.0ms 後にはほぼ流れなくなった。電圧は、点火後約 0.2ms で約 1.0kV に達し、その後も電流の減少とともにゆるやかに上昇している。このことは、気泡の蓄積に関与していると考えられる。このとき、電極部の損傷は確認されなかった。

Fig. 8 にブースターノズル面積と燃焼室圧力上昇率の関係を示す。2~8 cm^2 のブースターノズル面積の範囲に対し、10~28MPa/ms の圧力上昇率が得られた。燃焼室昇圧特性は点火室およびブースター室の圧力特性の影響を受ける。特に点火室における液体発射薬の初期分解プロセスに依存すると考えられる。この初期分解プロセスについては下記のように考察される。

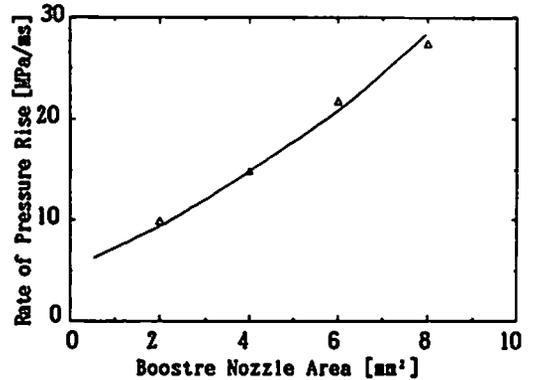


Fig. 8 Rate of pressure rise vs booster nozzle area relation of the nozzle type igniter

時間と点火室圧力、ブースター室圧力および電流の関係を図 9 に示す。これは、液体発射薬の初期分解プロセスとして、まず点火室の液体発射薬に電流が流れ始め、ピークを過ぎ減少域に至る約 0.7ms の電流投与過程（電気エネルギー投与）を経て点火室の圧力が立ち上がり始め、その後約 140MPa になったときブースター室の圧力が立ち始める現象を表している。すなわち、点火室の液体発射薬に電流が流れ始めるとそのジュール熱により液体発射薬が局部的に熱分解を起こし気泡が生じる。この気泡の発生は電流がほとんど流れなくなるまで続き、点火室電極部に蓄積された結果、点火室圧力として立ち上がりと考えられる。その後は、液体発射薬内部の連鎖的分解反応を誘発することにより発生蓄積されたガスがノズルを通してブースター室に噴流し、ブースター室圧力が立ち始める。このような初期分解プロセスを経て最終的に燃焼室が昇圧される。したがって初期分解プロセスとして

プロセス①：電気エネルギー投与による初期分解開始プロセス（Fig. 9 中の①表示部）

プロセス②：点火室の圧力立ち上がりおよび液体発射薬内部の連鎖的分解反応プロセス（Fig. 9 中の②表示部）

が考えられる。プロセス①では、電極間に流れた電流により投与された電気エネルギー（ジュール熱）100% がその電流の流れた部分の液体発射薬の分解に関与したとすれば

$$M_p(T_p \div T_0) C_{Lp} = Q \quad (1)$$

ここで

M_p = 分解した液体発射薬量

Q = 電気エネルギー (= $\int V I dt$)

T_p = 液体発射薬の分解温度

T_0 = 液体発射薬の初期温度

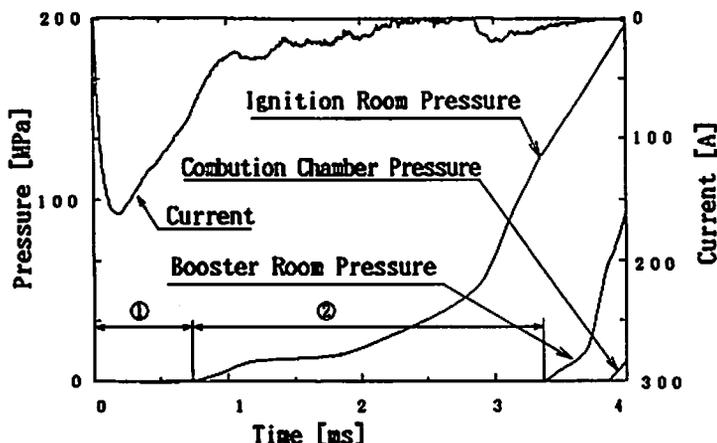


Fig. 9 The initial stage characteristics of the nozzle type igniter

C_{LP} = 液体発射薬の比熱

が成り立つ。(1)式のQは実測データであり、本実験では33~39.5calの範囲であった。このQの値と下記に示す T_g , T_o , C_{LP} の各値を(1)式に代入し M_g の値を求めると0.32~0.38gの範囲であった。

$$T_g = 212^\circ\text{C}^{(6)}$$

$$T_o = 20^\circ\text{C}$$

$$C_{LP} = 0.544\text{cal/g}^\circ\text{C}^{(7)}$$

これは充填された液体発射薬の10~12%である。すなわち点火室液体発射薬量の10~12%を分解させることによって、プロセス②の液体発射薬内部の連鎖的分解が起こり始めると考えられる。また燃焼室は上述したように初期分解プロセスを経て最終的に昇圧される。このときの圧力は、充填した液体発射薬全量が燃焼したときの燃焼室における圧力 P_c でありガス温度 T_c との関係は理想気体として次式で示される。

$$P_c V_c m = nmRT_c \quad (2)$$

ここで

P_c = 燃焼室の圧力

V_c = 容積 (点火室 + ブースター室 + 燃焼室)

n = 液体発射薬 1g が燃焼して発生する分解ガスのモル数

M = 装填した液体発射薬量

R = 気体定数

T_c = 燃焼室内ガス温度

燃焼室の圧力 P_c の計測値はブースターノズル面積を2.0~8.1mm²の範囲で計測したもので、ブースターノズル面積が小さくなるにつれて燃焼室圧力 P_c が減少する傾向を示した。これはブースターノズル(面積)を通過する生成ガスの圧力損失(管路抵抗)、熱損失等によるものと思われる。この時の計測した燃焼室圧力 P_c に対する T_c を推定するため、(2)式の P_c にブースターノ

Table 1 Temperature in combustion chamber of the nozzle type igniter

Booster Nozzle Area (mm ²)	T_c (°K)
2.0	1000
2.0	1049
4.0	1200
4.0	1229
6.0	1422
8.0	1499
8.0	1492

ズル面積をパラメーターとした場合の実験結果(計測した P_c)を代入し求めた T_c の値をTable 1に示す。

これはガス温度の文献値 $2469^\circ\text{K}^{(8)}$ の40~61%の範囲であり、ブースターノズルによる熱損失の影響がうかがえる。熱損失の要因としては、ノズル(形状)の他にブースター室壁面、燃焼室壁面、空気への熱損失、および断熱膨張等によるものが考えられるが、定量的な把握は今後の課題である。

以上、点火から燃焼室昇圧に至るプロセスにおいて、プロセス①②で初期分解が起こるが、プロセス①で点火室内の液体発射薬が10~12%分解することによりプロセス②に移行し点火室圧力が立ち上がり、その後ブースター室の圧力が立ち上がるというように各圧力が逐次立ち上がり最終的に燃焼室が昇圧される一連のプロセスが確認できた。また燃焼室が昇圧されるまでにブースターノズル等による39~60%の熱損失が推定された。

5. 結論

開放型点火装置では燃焼室初期加圧、ピストン型点火装置ではピストンの動作を制御する加圧室圧力、ノ

ズル型点火装置ではブースターノズル面積をそれぞれ主要因として燃焼室内の初期昇圧特性を制御することが可能である。ノンスパーク点火方式のノズル型点火装置は全体的に損傷が少なく、特に電極への侵食は軽微であった。また、燃焼室昇圧特性を左右する液体発射薬の初期分解プロセスとその影響因子との考察により、点火機構の設計に有用な知見が得られた。これらの点火装置は、飛翔体発射機構の特性に応じて選択することが可能である。今回の実験で得られた結果は、今後使用目的に応じた点火装置を設計する上で重要なものであり、今回の知見を基にさらにほりさげた研究を行い設計に反映させたい。さらに、実用的な飛翔体発射機構に適用すべく形状および性能の最適化をはかっていきたい。

文 献

- 1) 桑島昌考, 「液体装薬そのメカニズムをさぐる」, PANZER, 91, 12, (1988)
- 2) 平樹孝行, 「液体発射薬とその火砲 (II)」, 兵器と技術, P. 35及びP. 36, 7 (1988)
- 3) 柴田亮男, 「液体発射薬」, 工業火薬, 73, 2 (1988)
- 4) G. Klingenberg, H. J. Frieske, H. Rockstroh, "ELECTRICAL IGNITION OF HAN-BASED LIQUID PROPELLANTS", AD-A223 272, 6, 1 (1990)
- 5) G. Klingenberg, J. D. Knapton, C. Watson, W. F. Morrisn, "Liquid Propellant Studies", AD PA, 6, 7 (1987)
- 6) 岸田智浩, 橋武史, 小坂安則, 「液体発射薬に関する基礎研究」, 工業火薬協会秋季研究発表講演会要旨, 25, 11 (1990)
- 7) 旭化成技術報告書, 3 (1991)
- 8) G. Klingenberg, J. D. Knapton, C. Watson, "Investigation of the Combustion of Liquid Gun Propellants in Closed Chambers", 133, (1987)

The study of the liquid propellant launching system of the projectile (I) Electric igniters and their initial pressure rise characteristics

by Akihiro OKAMOTO*, Noriyo MARUHATA*, Toshiharu OKUMURA*, Hirofumi OSATO*, Masaki KANEYASU*, and Yoshikuni MURAKAMI**

In the development program of the liquid propellant launching system of the projectile, three experimental types of electrical igniters were examined, especially for their initial pressure rise characteristics. Through the experimental results, major control factor for each type of igniter was obviously proved.

"Nozzle type" igniter was proved as the most optimistic type for the future larger caliber equipment, where non-spark igniter is applied. Initial decomposition and ignition process were also discussed.

Experiences and data above will be useful for further development toward the practical.

(*Hiroshima Plant, The Japan Steel Works, Ltd, 6-1.1-chome, Funakoshi-minami, Aki-ku, Hiroshima-city, Hiroshima 736, Japan,

**The Japan Steel Works, Ltd, 1-2. 1-chome, Yuraku-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan,)