

# 液水／液酸エンジン用固体推進薬点火器

荒木 哲夫・秋葉鏢二郎・橋本 保成  
相原 賢二・富田 悦・安田 誠一

(1983年2月7日受理)

## Solid propellant ignition motors for LH<sub>2</sub>/LOX rocket engine system

By

Tetsuo ARAKI, Ryojiro AKIBA, Yasunari HASHIMOTO  
Kenji AIHARA, Etsu TOMITA and Seiichi YASUDA

**Abstract :** Solid propellant ignition motors are used in the series of experiments of the 10 ton LH<sub>2</sub>/LOX engine featured by the channel wall thrust chamber,

This paper presents design specification, experiments and results obtained by actual applications of those ignition motors.

### 概 要

当研究所で開発中の液水／液酸ロケットエンジンの点火を目的として、固体推進薬を用いた小型点火モータを開発していたが、その設計の基準、構造、性能、そして開発途中の単体燃焼試験を紹介し、実際に10トン級の液体エンジンに使用した結果について評価を行い、今後この種の点火器を開発する場合の参考事項を列挙する

### 1. 序 論

固体点火器は、当初3トン級の液水／液酸エンジン用として開発が始められたが、その後、液体エンジンの規模が7トン級、10トン級へと移行したため、その目標を10トン級に変更した。

液体エンジンの開発途中の各燃焼試験に於ては、何回でも繰り返し使用できる気体式の方が、その都度交換または燃料を詰め換える必要がなくて便利なので、実際にこれまではずっとその方式が用いられてきた。しかし、飛しよう・推進を目的としたエンジンへ発展した場合、10トン級というエンジン規模からみても、機構が簡単な固体モータを用いる利得は大きく、当初より試験でも、最終的には固体式を用いる計画であった。

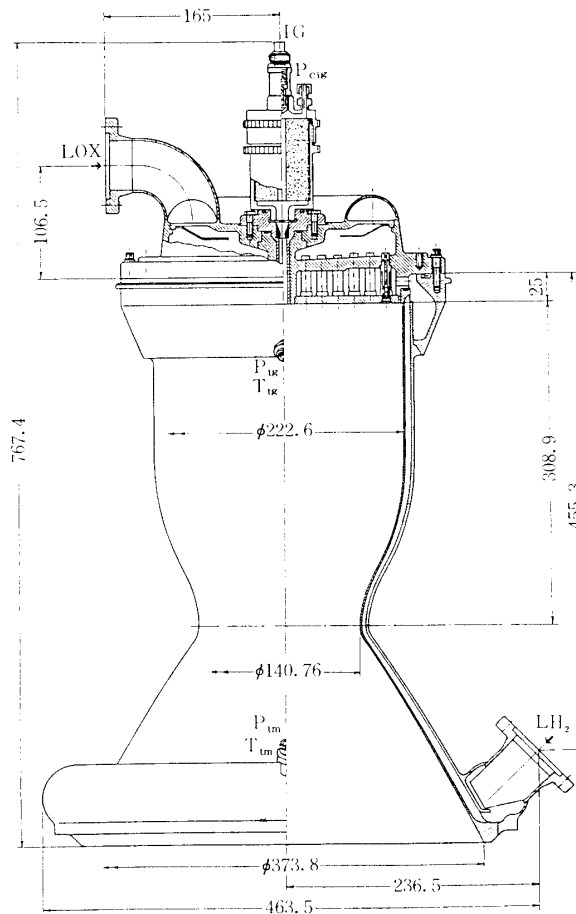
## 2. 設計基準について

本器は設計にあたり、特に次の点に配慮した。

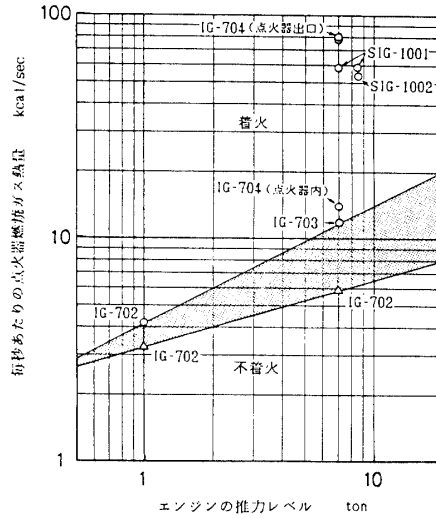
- (1) 燃焼器，メインエンジンとの形状又は構造上の取り合い。
- (2) メインエンジンの規模と点火器能力。
- (3) 始動シーケンスと着火特性。

まず、(1)であるが、本器の構造形状は使用するメインエンジンのそれに当然制約を受ける。本器を最初に使用した10トン溝構造燃焼器を例にとれば、第1図に示すとおり、点火器の噴射口の中心軸とエンジン本体のそれが一致している。一方、この後に計画されている10トンステージシステム用燃焼器については、中心軸に約 $30^\circ$ の角度をもって組み付ける構造で、点火器の発生する熱流束の方向を中心軸に一致させるため導管に弧をもたせねばならず、それに伴い、管に熱負荷の大きい部分がでてくるため、その対策を考えなくてはならない。

(2) は、本器の目的である点火に十分な熱量を決める重要な事項で、これについては



第1図 10トン溝構造燃焼試験器



第2図 エンジンの規模と着火に必要な点火器発生熱量

試験実績のある気体式の実験データ等を基準にして決定した。第2図は、液体エンジンの規模と着火に必要なエネルギー供給率の関係を大まかに示したものである。ここには、後述の設計による固体モータの単位時間発生熱量も書き込んである。

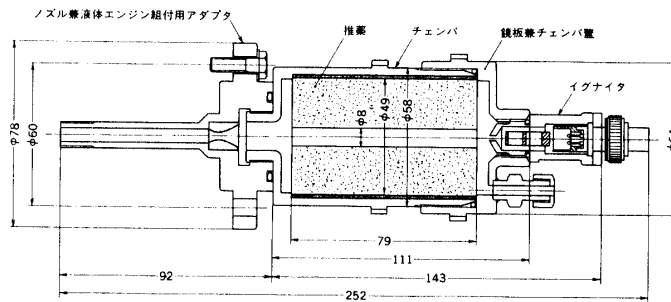
これより、発熱量に関する限り十分な安全率がとられていると考えられる。

### 3. 点火器の構造・性能について

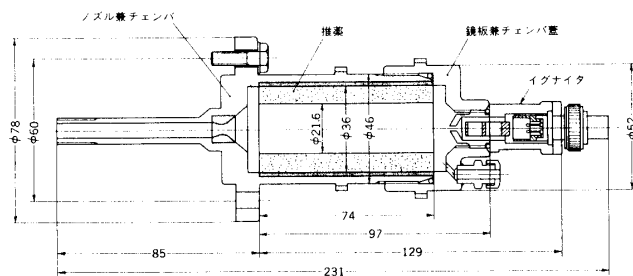
前述の2種の点火器の組み立て断面と寸法をそれぞれ第3図、第4図に示す。図からわかるように、燃焼秒時2秒間のものは5秒間のものに比べて、ノズル部がチェンバー部と一体構造になっていて、推進薬、その他全体が小さめになっている。その構成部品と全体の外観を、SIG-1001を例に、第5図と第6図の写真に示す。

本器の特徴として、推進薬は、第7図の写真のように外周をレストリクタを兼ねたFRPの筒で覆った円筒形で、使用する前に、ローディングすなわちチェンバーに挿入して組み立てる方式である。したがって、ノズル部とチェンバー部は、燃焼後FRPの筒(第8図の写真)を抜き出し清掃して、損傷のないかぎり繰り返し使用できる。

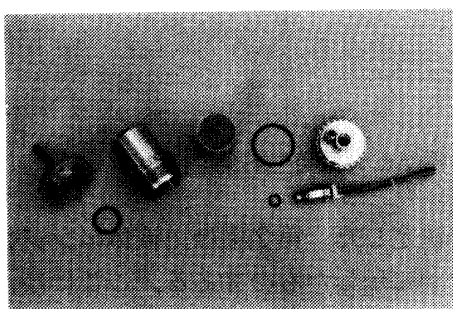
本器の主な性能・諸元を表1に示す。推進薬は、推進を目的としたロケットに比べ、燃



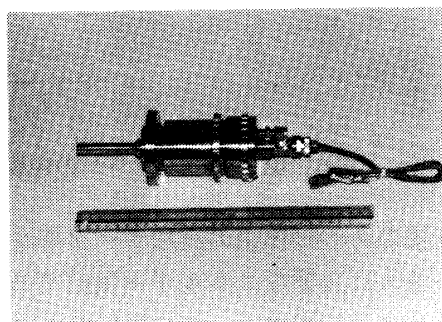
第3図 固体点火モータ・SIG-1001組立図



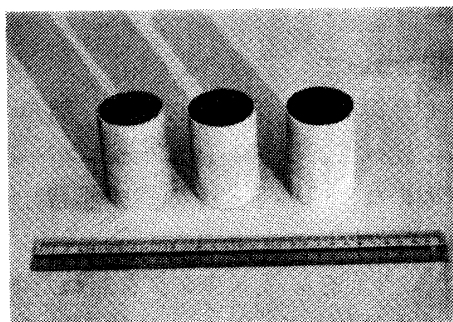
第4図 固体点火モータ・SIG-1002組立図



第5図 点火器の構成部品 ((SIG-1001))



第6図 点火器の外観(SIG-1001)



第7図 点火器用推進薬



第8図 燃焼後のFRPレストリクタ

焼速度の遅いコンポジット系のBP-25 B (日本油脂) に相当するものを用いており、過塩素酸アンモニウムとCTBP ブタジエンが主材で、点火器自体およびエンジン本体を汚損しないように金属粉等は含まれていない。イグナイタに用いられている薬材はNAB-0(日本油脂)のペレットで、ボロンと硝酸カリウムが主材である。

燃焼方式はいずれも内端面燃焼で、SIG-1001については、燃焼面積が、最初と最後まで同じになるように、すなわち(1)式を満足するような設計であるが、SIG-1002についてはその点を特に考慮していない。

$$L = \frac{1}{2}(3D + d) \quad (1)$$

$L$  : 推進薬の長さ

表1 点火器の性能・諸元

		SIG-1001	SIG-1002
モ ト タ	全長 (mm)	252	231
	全重量 (g)	1720	1130
	ノズルスロート径 (mm)	4.2	4.0
	有効燃焼時間 (sec)	5.0	2.0
	有効平均内圧 (kgF/cm <sup>2</sup> )	48.	41.
推 進 薬	重量 (g)	240.	94
	長さ (mm)	79.	74
	外径 (mm)	49.	38
	内径 (mm)	8	22
	燃焼速度 (mm/sec)	0.15 × Pc <sup>0.258</sup>	
	燃密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.65	
イ グ ナ イ タ	発火遅れ (msec)	3.5 (参考値)	
	燃焼時間 (msec)	116. ( " )	
	有効平均内圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	16. ( " )	
	導通抵抗値 (Ω)	0.4	
燃 焼 ガ ス 特 性	比熱比	1.26	
	平均分子量 (g/mol)	20.9	
	発熱量 (cal/g)	1100	
	ガス温度 (K)	2003	

$D$  : 推進薬の外径

$d$  : 推進薬の内径

表2の燃焼ガス組成からもわかるように、この点火器は **fuel rich** となっているので、酸素リードの液体エンジンに適しているといえる。

#### 4. 単体燃焼試験

本器は実際の使用に先立って、その性能、安全性などを確認するため、それぞれ数回の単体燃焼試験を行い諸データを取得したが、以下にその主な項目について簡単に述べる。

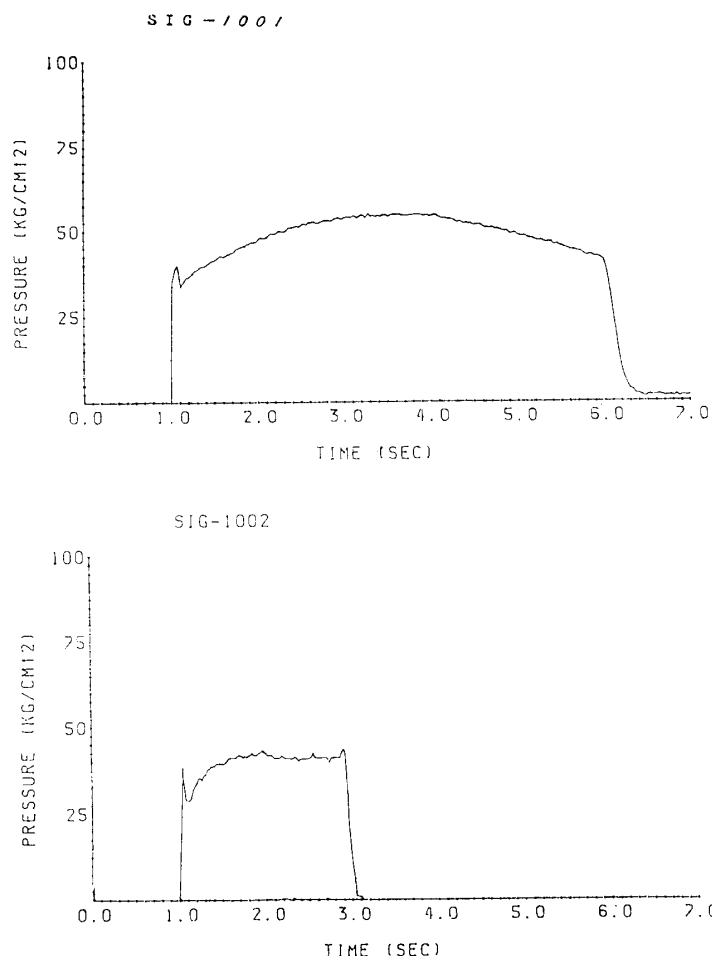
##### (1) チェンバー内圧の計測

水冷式の圧力ピックアップを用いて、燃焼時間に伴うチェンバー内圧の変化を計測した。このデータ信号は直接コンピュータに導いて処理し、第9図のデータ例のような内圧曲線を  $XY$  プロットにて出力させた。

内圧の変化と燃焼時間は、実験を通して、再現性があり、設計値ともよく合致することが確認された。

##### (2) 点火器外壁の温度分布測定

燃焼時の点火器の温度上昇とその分布を知ることは、安全性の面からも大切である。ここでは、温度の変化がカラー別に判読できるサーモビデオカメラを用いて、着火から燃焼



第9図 単体燃焼試験の内圧曲線

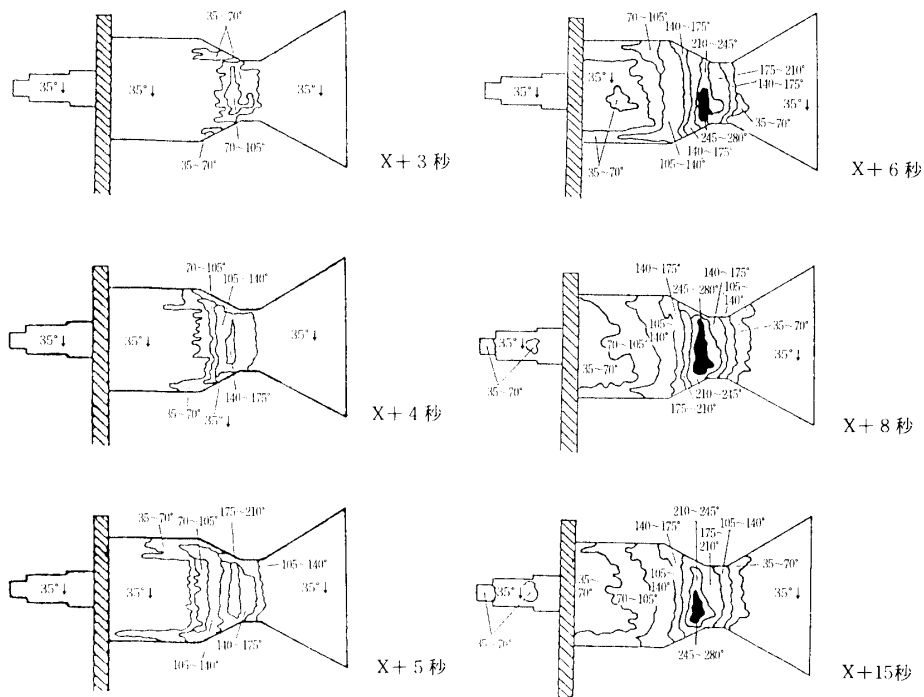
終了後約300秒までの温度変化と分布をVTRに収録した。その結果、イグナイタ部およびノズルスロート部の外壁温度は点火後15秒～30秒で最高に達し、せいぜい110°C前後であったが、ノズルスロートの後の細い導管部は赤熱している。

#### (3) メインチェンバーへの影響試験

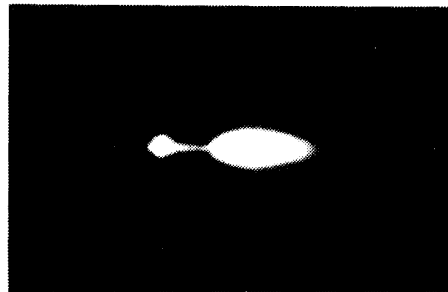
本器がメインエンジンのチェンバーに及ぼす影響を調べるため、10トン溝構造燃焼器の形状を模擬した肉厚が約1mmのダミーチェンバー(SUS304製)に組み付けて燃焼させ、同じサーモビデオカメラにて、ダミーチェンバー外壁面の時間経過に伴う温度分布を測定、収録した。その結果は、第10図に示すとおりで、チェンバー壁面温度は最高約280°Cまで上昇したが、この値は10トン溝構造燃焼器のスロート近辺内側の設計値より少し低めになっており、この程度の熱負荷では、メイン燃焼器への影響はほとんどないと思われる。また、燃焼ガスによる燃焼室内の汚損も目視では認められなかった。

#### (4) 連続写真の撮影

燃焼全体の観察と火炎の状態を知るため、すべての試験について8mm映画とVTRで撮影または収録した。



第10図 グミーチャンバーを用いた熱分布の計測



第11図 火炎の形状

SIG-1001の火炎形状の1カットを第11図の写真に示す。

#### (5) ノズルスロート部の寸法計測

本器はすべてノズルスロート部の材質にカーボングラファイトを用いているが、燃焼毎に、清掃した後、スロート径の寸法を専用ゲージで計測した。その結果、SIG-1001の5秒間燃焼を3回行った時点でも、その摩耗度は7%以内であることを確認した。

### 5. 10トン溝構造燃焼器の燃焼試験

本器は10トン溝構造燃焼器の燃焼試験(TC-1002-1)で初めて実際のエンジン点火に用いられた。この試験は合計4回行われたが、3回目まではSIG-1001を、最後の1回にSIG-1002を使用した。この試験およびその結果については、本特集号「液水/液酸10トン溝

構造の試作燃焼実験」の項で詳述されるので、ここでは、そのポイントにのみ簡単に触れるにとどめる。

まず本器の目的である着火はすべて実行されたが、前にも述べたとおり、燃焼ガスが **fuel rich** となっているため、酸素リードの方が着火性が良いという事がこの実験にて確認された。また、この推進薬のガス成分として、モル分率で約 14 % の HCl を含んでいる(表 2 参照)ため燃焼室内壁の腐蝕が心配されたが、燃焼終了後、比較적すみやかに洗滌を行えば特に問題がないことがわかった。その他この実験で気付いた点などは次項でまとめて述べることにする。

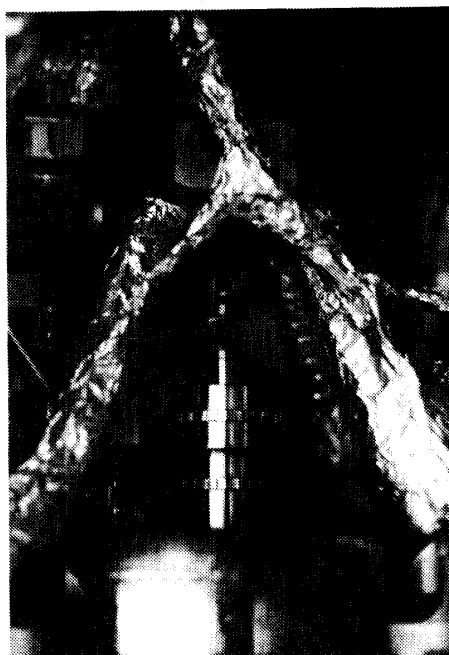
表 2 燃焼ガス理論モル分率

H <sub>2</sub>	34 %
CO	20
HCL	14
CO <sub>2</sub>	12
H <sub>2</sub> O	12
N <sub>2</sub>	7

## 6. 検討および今後の問題点

ここで、開発途中での単体燃焼試験および実際に使用した 10 トン溝構造燃焼器の試験を通して気が付いた点などを列挙して今後のための参考としたい。

- (1) 10 トン級の液水/液酸エンジンの点火は、SIG-1002 の 2 秒間燃焼で充分である。
- (2) 固体推進薬を用いた点火器は、着火シーケンスが酸素リードとなっているエンジ



第 12 図 10 トン溝構造試験器に組みつけられた点火器



ンシステムに適している。

(3) ノズルスロートの部分はカーボングラファイトをはめ込んで造られているが、これとその下流の熱流束導管部分との接合点で流れをさえぎる段差があると、流速が遅くなり、熱伝達係数が著しく大きくなるため、約 2000 K のガス流が金属部を溶かしてしまう。この点は特に念入りに設計・製作しなくてはならない。また、この種の小型モータでは、ノズルスロート径の比較的わずかな損傷・摩耗でも、その性能に影響するので注意しなくてはならない。

(6) 固体推進薬の形状は、できるだけ燃焼面積が一定となるような形状が望ましいのはいうまでもないが、せめて燃焼初めと終了時の面積を同じにさせれば、安定した燃焼が得られる。また、その外周の FRP 加工については、その厚さを 1.5 mm 以上として、レジンをよく浸透させるように充分注意を払う必要がある。

(7) メインエンジンは、点火器をその中心軸上に組み付けられる構造が望ましく、組み付けの際の作業空間もできるだけ広くとるべきである（第 12 図参照）。

## 7. おわりに

以上述べた点火器は、液体エンジンの燃焼試験用として製作されたものであるが、これから予定されている 10 トンステージシステム用エンジンの燃焼試験に用いる点火器の設計・製作も既に始められている。ステージシステム用といえば、たとえそれが燃焼試験とわかっていても、将来の飛しよう用エンジンを想定して、たとえ小型の点火器とはいえ、その構造・寸法の決定にあたり飛しよう体を意識してしまう。そして、液体エンジンの特徴を考慮した、再点火の可能な固体点火器や繰返し使用できるものなどと欲ばった期待を抑えつつ、当面の、30 度の弧を持った導管の熱対策に苦慮している。なにはともあれ、これまで並行して開発が進められていた経験豊かな固体モータと、規模の差はあっても、新開発の液体エンジンが合体して燃焼試験に到達したことは、それなり意義あるものと思われる。

最後に、ここで用いたイグナイタと推進薬は日産自動車(株)および日本油脂(株)にて製造されたものであり、両社から本器の設計に必要なデータやアドバイスをいただいた。また、この開発にあたり全般にわたって有益な助言をいただいた秋葉研究室の高野氏と温度計測の指導をくださった中部氏に、実験の際オペレーションや保安に尽力していただいた吉田(裕)氏に、データ処理に貴重な時間を費してくださった大学院生の土井・中島の両氏に、単体燃焼試験用のテストスタンドを製作していただいた佐藤(進)氏に、それぞれ深く謝意を表する次第である。

## 参考文献

○秋葉鏡二郎他「液水／液酸 10 トン構造の試作燃焼実験」, 宇宙研報告「液水特集号」, 1983