

# ワックス系燃料ハイブリッドロケットにおける 燃焼効率改善に関する研究

原田 潤一<sup>\*1</sup> 那賀川 一郎<sup>\*2</sup>

## A Study on the Combustion Efficiency Improvements of a Wax-based Fuel Hybrid Rocket Motor

by

Junichi HARADA<sup>\*1</sup> and Ichiro NAKAGAWA<sup>\*2</sup>

(Received on Mar. 31, 2015 and accepted on Jul. 14, 2015)

### Abstract

A Hybrid rocket motor using wax fuel has the advantage of the higher regression rate than other conventional fuels such as HTPB. But on the other hand, a wax-based fuel hybrid rocket motor also has a disadvantage. It is that of a lower C\* efficiency compared with other fuels. In previous studies, it has been confirmed that liquefied wax is supplied to a combustion chamber other than vaporized wax. We consider that the presence of liquid state wax is the cause of low C\* efficiency. We tried to improve the low C\* efficiency using a baffle plate. The baffle plate's purpose is improvement of atomization and vaporization of liquid wax fuel. We confirmed the effect of the baffle plate for improving the C\* efficiency. As well, we confirmed improving the C\* efficiency at high combustion pressure.

**Keywords:** Propulsion, Hybrid Rocket, Wax Fuel, Combustion Efficiency, Baffle Plate

## 1. 緒言

近年、超小型ロケットや有人サブオービタル飛行のための推進システムとして、ハイブリッドロケットが注目されている。ハイブリッドロケットとは液体酸化剤と固体燃料を組み合わせるロケットシステムであり、液体ロケットや固体ロケットと比較すると実用化の例は少ない。この原因はハイブリッドロケットが後発のエンジンシステムであるのに加え、実用化を阻む要因が多く存在するためである。実用化を阻む要因としては既存エンジンシステムと比較して低燃料後退速度に起因した大推力化が難しい点、一部の推進剤の組み合わせでは燃焼効率が悪い点などが挙げられる。本研究ではハイブリッドロケットエンジンの高性能化（大推力・高燃焼効率）を実現するためのエンジンシステムとして、燃料後退速度が高く大推力化が容易なワックス系燃料を用いたハイブリッドロケットにおいて問題となる、低燃焼効率の改善を目的とした研究を実施した。一般にワックス系燃料を用いたハイブリッドロケットにおいては、固体燃料の気化だけでな

く液化により高い燃料後退速度が得られるというメカニズムから<sup>1)</sup>、多量の未燃液体燃料の排出による低燃焼効率化を生ずるという課題がある。低燃焼効率の改善に対するアプローチとしては燃焼室容積の拡大を図ることが一般的であるが、燃焼室の拡大は燃焼室の重量過多を招きロケット推進システムとしての性能を下げる要因となる。そこで本研究では、燃焼促進デバイスであるバッフルプレート(以下 BP)の採用によって、燃焼室容積の拡大を抑えつつ燃焼効率向上を目指した。従来の研究により、BPの搭載によって燃焼効率の向上効果が確認されているものの、それはあくまで燃焼室内径Φ40mm、燃焼室圧力0.5MPa以下のモータにおいてであり、実用レベルの作動点における燃焼効率の改善効果は未知数であった。本稿では、従来よりも大きな規模かつ実用的な圧力域で動作するロケットモータ燃焼実験を実施し、BPの搭載による燃焼効率改善を試みた。

## 2. BPの概要

前述のように、ワックス系燃料ハイブリッドロケットにおいてはグレインから供給される燃料のうち、相

\*1 工学研究科航空宇宙学専攻修士課程

\*2 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻教授

当な割合がエントレイメントドロップレットや燃料表面を流れる液流として液相状態で燃焼室に供給されていることが Fig.1 に示すように実験的に確認されている。液相状態で供給される燃料は、気化にかかる時間が確保されなければ、その大部分が未燃のまま排出されることになり、これがワックス系ハイブリッドロケットにおける燃焼効率の低さの原因であると考えられている。



Fig.1 Combustion image of wax fuel<sup>1)</sup>

この燃焼効率の低さを改善するための、BP とはハイブリッドロケットモータの燃料グレイン直下に搭載される Fig.2 に示すような多孔円板状の燃焼促進デバイスである。Fig.3 に示すように BP の搭載によって液相で供給される燃料の微粒化・拡散を図り、後部燃焼室で燃焼させることで燃焼効率の改善が期待できる。

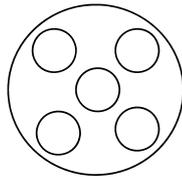


Fig.2 Schematic drawing of BP

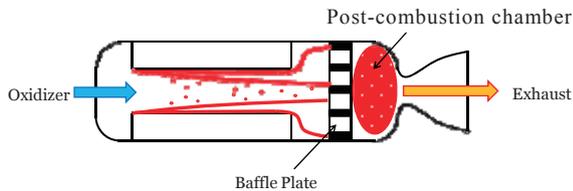


Fig.3 Schematic drawing of a hybrid rocket with BP

### 3. 燃焼試験-1

#### 3.1 過去の燃焼試験結果の検討

BP とモータ推進性能を関連付けるためのパラメータである  $G_{PL}$  という評価関数を導入し、そのパラメータと特性排気速度効率との相関関係について検討を進める。 $G_{PL}$  とは BP 孔内部を通過する推進剤質量流量として定義され、その定義式は次に示す通りである。

$$G_{PL} = \frac{\dot{m}_p}{A_{baffle}} \quad (1)$$

ここで  $A_{baffle}$  はパッフルプレート孔の総断面積である。

過去の燃焼試験結果として、Fig.4 および Fig.5 に示すように異なる 2 つの試験条件において実施された燃

焼試験結果が、 $G_{PL}$  と特性排気速度効率（または  $c^*$  効率）との相関関係について整理されている。Fig.4 の場合は推進剤に GOX/wax を、BP の材質には SUS304 を用い、燃焼試験供試体の能力も燃焼圧が 1 MPa 以下の作動を前提とした燃焼室内径  $\Phi 40$  mm のモータを用いてデータが得られている。また、Fig.5 の場合は推進剤に  $LN_2O/wax$  を、BP の材質にはグラファイトを用い、燃焼試験供試体の能力も燃焼圧が概ね 2 MPa 程度での作動を前提とした燃焼室内径  $\Phi 55$  mm のモータを用いてデータが得られている。

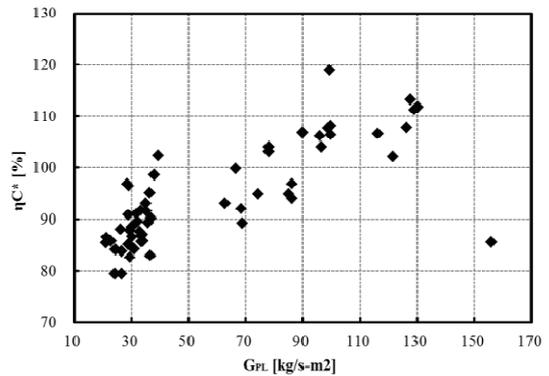


Fig.4 Relationship between  $G_{PL}$  and  $c^*$  efficiency<sup>2)</sup>

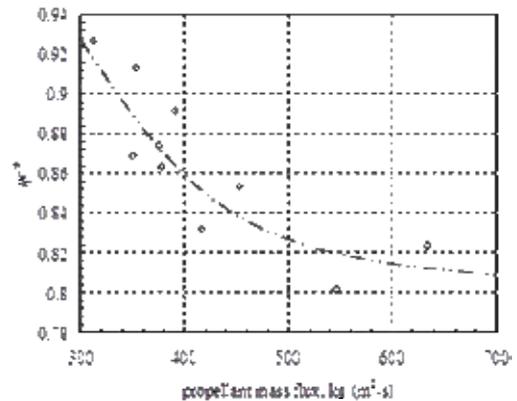


Fig.5 Relationship between  $G_{PL}$  and  $c^*$  efficiency<sup>3)</sup>

このような燃焼試験条件の異なるデータを用いて整理された  $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関から次のことが明らかとなっている。前者の条件においては  $G_{PL}$  の増加とともに  $c^*$  効率が増加しており、BP の効果によって未燃燃料の微粒化・拡散効果が表れていると考察される。ただし、データに関しては得られている  $G_{PL}$  の領域が概ね  $170 \text{ kg/s-m}^2$  程度以下と相対的に小さい領域でしか評価できていない。後者の条件においては  $G_{PL}$  の増加とともに  $c^*$  効率は低下しており、一見すると BP の効果による  $c^*$  効率の向上が表れていないと見て取れる。これは高  $G_{PL}$  領域において、熱損失の増大が考えられる。データに関しては、得られている  $G_{PL}$  の領域が概ね  $600 \text{ kg/s-m}^2$  と相対的に広い領域における評価

が出来ている点については問題ないが、液相状態で供給される酸化剤を用いている事から、酸化剤の気化過程が  $c^*$  効率に与える影響に関する可能性を排除できない。総じて、 $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関に関する考察としては、BP 部における熱損失の影響が示唆されたものの、燃焼試験条件が異なる場合におけるデータからの考察であるため、明確とは言えない。したがって、本研究では燃焼試験供試体の仕様を同一条件とした場合における燃焼試験を実施し、 $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関に関して整理することで BP 部における熱損失の影響を考察することとした。前述の議論より、燃焼試験供試体に与えられる要求仕様は以下の 2 つである。

a) 推進剤の組み合わせ

BP の効果に関して、 $c^*$  効率へ及ぼす影響を評価する為にはガス酸化剤を使用する。

b) BP の材質の違い

$G_{PL}$  が増大した場合においては、BP 部における熱伝導の違いによって生ずる熱損失効果が  $c^*$  効率に対して影響を及ぼすことが考えられる。したがって BP に採用する材質には熱伝導率の異なる 2 種の材質を採用する。

3.2 燃焼試験の構成

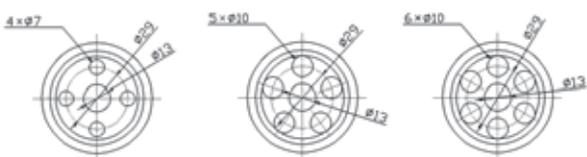
まず、推進剤の組み合わせであるが、 $GN_2O/wax$  を採用した。酸化剤にはより高性能な GOX が一般的であるが、ここでは既に実験的な燃料後退速度式が取得済みである推進剤の組み合わせである  $GN_2O/wax$  を選択した。これは、燃焼試験を実施する前の段階から O/F に関しての見積もりが行えることによる。

BP については材質及び形状の 2 つの要素が設計変数となっている。まず材質については、以下に示す熱伝導率の異なる 2 つの材質を選択した。

Table 1 Materials and coefficient of thermal conductivity of BP<sup>4)</sup>

Material	Coefficient of thermal conductivity [W/m-K]
Graphite (G347)	116
Bakelite	0.23

両者の材質の熱伝導率の差は概ね 500 倍程度であり、十分に大きな差があると判断した。また、形状については以下に示す 3 つの基本形状を定めた。



(Unit:mm)

Fig.6 Basic shapes of BP

Fig.6 で示した基本形状を基に、穴径を拡大或いは縮小して任意の  $G_{PL}$  が達成されるように試みている。ただし、BP 部における肉厚は全て 6 mm とした。

$G_{PL}$  の領域については 0~600 kg/s-m<sup>2</sup> 程度となるべく広い範囲を取る必要があると考えられる。しかし  $G_{PL}$  の増大は BP のプレート部にかかる構造的な負荷も同時に増大させる要因となる。これは  $G_{PL}$  の増大が BP の破壊の危険性を増大させる事に直結する。本研究で実施する燃焼試験で採用した BP の材質が双方ともに脆性材料である事を踏まえて、まずは 0~300 kg/s-m<sup>2</sup> 程度を目標に燃焼試験条件を決定した。

3.3 燃焼試験供試体

燃焼試験供試体は主に酸化剤供給系と推力室系の 2 種に大別される。まず酸化剤供給系に関して述べる。Fig.7 に、本研究で用いた酸化剤供給系のシステム図を示す。

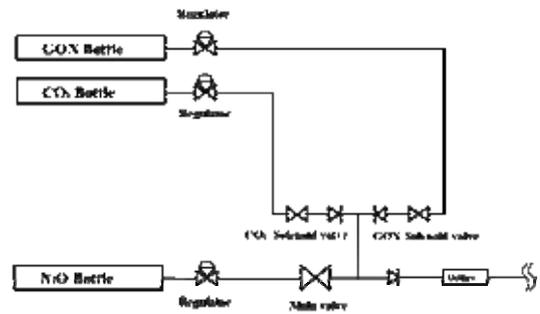
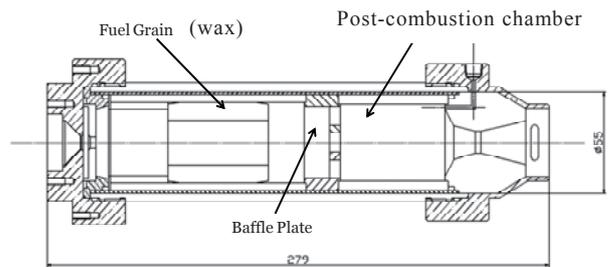


Fig.7 Schematic drawing of the oxidizer supply system

Fig.7 に示した酸化剤供給系では容量 30 kg の  $N_2O$  ボンベと  $\Phi 2.9$  mm のチョークオリフィスを介して、概ね 40 g/s 程度の酸化剤供給能力を有する。また、 $N_2O$  が酸化剤として機能する温度域が概ね 200℃ 以上である事から、主燃焼移行までの間に別途余熱を与える必要がある。これは GOX によって行われる。したがって本供試体を用いた点火シーケンスでは、まず GOX を用いた予備燃焼が行われ、その後に  $N_2O$  を供給し本燃焼に移行するというシーケンスを取る。本燃焼開始直後に GOX の供給は切られる。その後、主燃焼終了のタイミングで  $N_2O$  の供給を切り、消化用の  $CO_2$  が供給され燃焼試験が終了する。

推力室形状概要を Fig.8 に示す。



(Unit:mm)

Fig.8 Schematic drawing of the combustion chamber

推力室内径はΦ55 mm, 推力室全長概ね 280 mm である。推力室内部はグレインカートリッジ, BP, 後方燃焼室 (アブレータ) で構成される。また, 推力室後方にはΦ12mm (スロート径) のグラファイト製ノズルが装着される。推力室内部の3つのコンポーネントは GFRP 製のライナで覆われており, 推力室全体の断熱が行われる。BP 後方に搭載される後方燃焼室 (アブレータ) には PMMA が採用されており, 当該箇所を冷却を担う。したがって主燃焼中においては一定量のアブレータが推力室内部に供給されるため, これも推進剤の一部として見なされる。推力室の L\* は全ての燃焼試験で 0.7 m に統一されている。燃料の組成は, 日本精蠟社製マイクロクリスタリンワックス Hi-Mic-2095 が 92.5wt%, ステアリン酸が 7.5wt% である。

3.4 燃焼試験結果

Table 2 に合計 12 回実施された燃焼試験の解析結果を示す。また, 次の Fig.9 に燃焼試験で得られた酸化供給圧力, 燃焼室圧力の時間履歴の一例を示す。

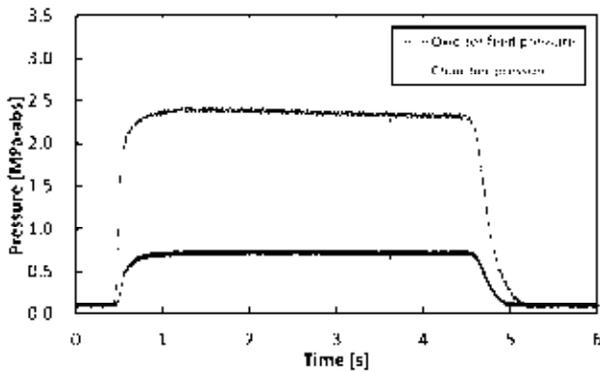


Fig.9 Pressure curve of the firing test

Fig.9 各種圧力履歴実施された燃焼試験すべてにおいて, 燃焼時間が3秒程度となるよう試みている。マニュアル操作によるため, 正確に3秒間実施できていないが, 定常燃焼時間が3秒以上になる事は達成されているため, 各種考察の実施に際して問題は無いと判断した。

O/F に関しては最適値である 6.7 から大きく逸脱している事が特筆される。本燃焼試験を実施する前の段階では事前取得していた実験的な燃料後退速度式を用いて燃料長さ等含めた O/F に寄与するパラメータを決定しており, 最適な O/F になるように試みていた。

実際の燃焼試験で行った条件では, 特に酸化剤質量流束 26~63kg/s-m<sup>2</sup> と小さい領域であることから, 事前に予測した燃料後退速度に対してのズレが生じたと考えられる。実際に得られている O/F の領域が概ね 2.6~4.36 の範囲内にあり, 燃焼試験毎に若干のズレが生じている結果を許容して, G<sub>PL</sub> と c\* 効率との相関に関する考察を行う事とした。また燃焼圧に関しては, 概ね 0.31~0.83 MPa で推移している。燃焼室圧力もまた c\* 効率との相関が疑われるが, 燃焼試験毎の燃焼圧に見られるズレを許容して G<sub>PL</sub> と c\* 効率との相関に関する考察を実施する事とした。

3.5 GPL と c\* 効率との相関

Fig.10 および Fig.11 に一連の燃焼試験から得られた結果をもとに G<sub>PL</sub> と c\* 効率との相関について整理したグラフを示す。

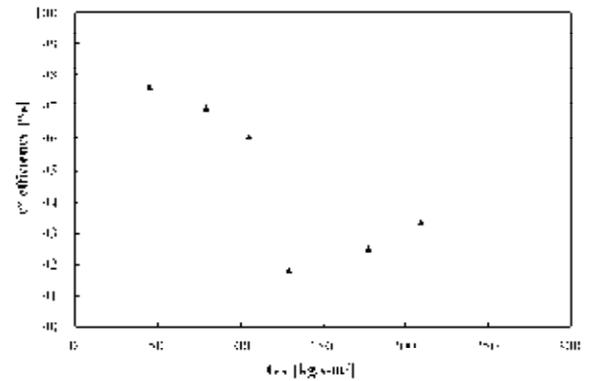


Fig.10 Relationship between G<sub>PL</sub> and c\* efficiency (Graphite BP)

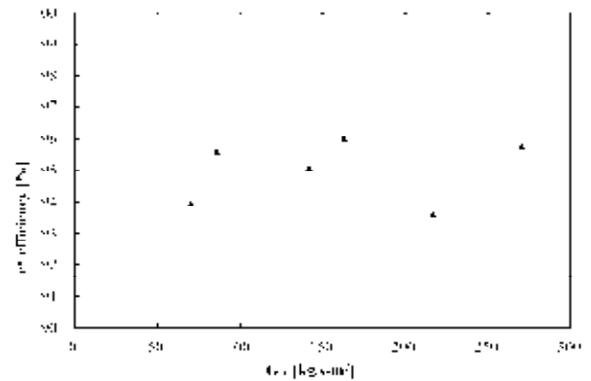


Fig.11 Relationship between G<sub>PL</sub> and c\* efficiency (Bakelite BP)

Table 2 Results of firing tests

No.	BP	Material	Length [m]	Grain	Grain	Grain	P <sub>ch</sub> [MPa]	P <sub>ox</sub> [MPa]	U <sub>gr</sub> [m/s]	U <sub>gr</sub> [m/s]	O/F	c* [%]	Efficiency [%]
2-12-1	Graphite	BP	1	1	1	1	0.81	0.57	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-2	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-3	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-4	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-5	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-6	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-7	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-8	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-9	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-10	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-11	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38
2-12-12	Graphite	BP	1	1	1	1	0.75	0.55	10.0	10.0	1.0	0.75	0.38

整理した結果より、BPに使用している材質の違いによって  $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関の関係性に違いがある事が明らかとなった。グラファイト製 BP の場合においては  $G_{PL}$  の増加とともに  $c^*$  効率が低下しているのに対して、ベークライト製 BP の場合においては  $G_{PL}$  によらず  $c^*$  効率が一定水準で安定している。この結果より、BP における熱伝導率の違いが  $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関関係に影響を及ぼすことが明らかになったと言える。BP における熱伝導が顕著な場合においては、 $G_{PL}$  の増大に伴って熱損失も増加し、見かけ上 BP 本来の効果である  $c^*$  効率の向上は得られない。これに対し BP における熱伝導が小さい場合においては、 $G_{PL}$  が増大しても顕著な熱損失は見られず、見かけ上 BP 本来の効果である  $c^*$  効率の向上が得られる。

以上の結果は実験点数が少ないため確定はできないが、BP における熱伝導率の違いによって  $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関関係に影響を及ぼすモデルについて考える事が出来る。すなわち、BP における熱伝導率が高い場合と低い場合の2通りに関して  $G_{PL}$  と  $c^*$  効率との相関に関して異なるモデルを示すことが出来る。次の Fig.12 および Fig.13 にそれぞれのモデルに関して示す。

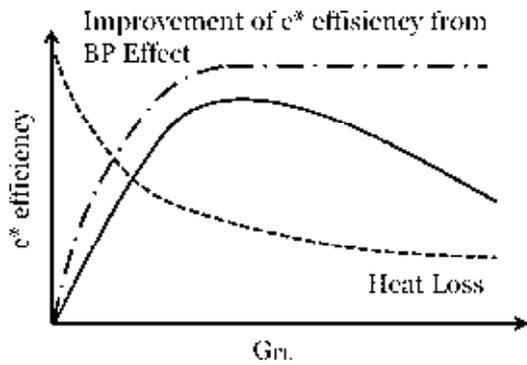


Fig.12 Relationship model between  $G_{PL}$  and  $c^*$  efficiency (High coefficient of thermal conductivity BP)

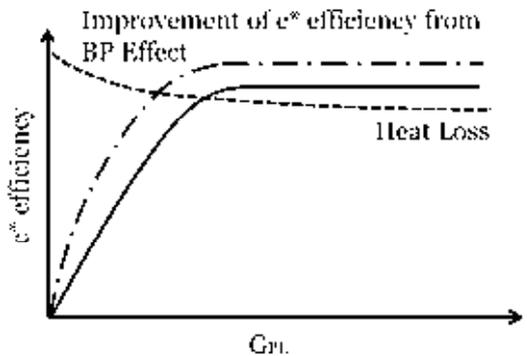


Fig.13 Relationship model between  $G_{PL}$  and  $c^*$  efficiency (Low coefficient of thermal conductivity BP)

上記に示したそれぞれのグラフにおける一点鎖線、点線、実線はそれぞれ流束( $G_{PL}$ )の増大による  $c^*$  効率向上

効果、熱損失、実効で得られる  $c^*$  効率を意味する。BP における熱伝導が顕著な場合においては  $G_{PL}$  の増大に伴い未燃燃料の微粒化・拡散が増加する一方で、 $G_{PL}$  の増大に伴って熱損失も増加し、見かけ上 BP 本来の効果である  $c^*$  効率の向上は得られない事が考えられる。これに対し BP における熱伝導が小さい場合においては  $G_{PL}$  の増大に伴い未燃燃料の微粒化・拡散が増加する一方、 $G_{PL}$  が増大しても顕著な熱損失は見られず、見かけ上 BP 本来の効果である  $c^*$  効率の向上が得られる事が考えられる。

### 3.6 アブレータの損耗に関して

アブレータの損耗に関して、材質の異なる BP を搭載して実施された燃焼試験の双方において、 $G_{PL}$  との相関が示唆される結果が得られた。以下に各 BP の材質ごとのアブレータの損耗量と  $G_{PL}$  との相関について整理されたグラフを示す。

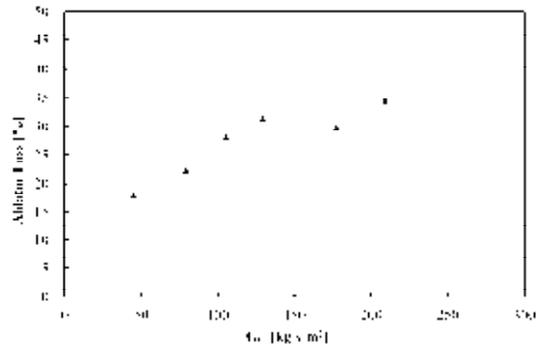


Fig.14 Relationship between  $G_{PL}$  and ablator loss (Graphite BP)

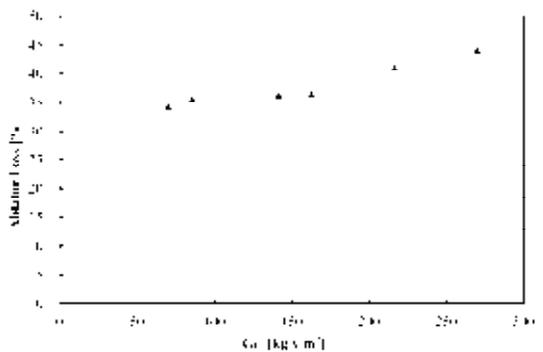


Fig.15 Relationship between  $G_{PL}$  and ablator loss (Bakelite BP)

ここで、アブレータ損耗量は推力室より供給された燃料質量およびアブレータ損耗量の合計質量に対するアブレータの損耗量と定義される。また、ベークライト製 BP においては BP 自身もアブレータとして供給されている事が確認されており、これを踏まえ BP の損耗もアブレータの損耗に含めることとした。上記の結果より、アブレータの損耗が  $G_{PL}$  と正の相関にある事

が確認できる。すなわち、 $G_{PL}$ の増大によって後方燃焼室での燃焼が促進している事が示唆され、BPの搭載による $c^*$ 効率への寄与を間接的に把握する事が出来ると考えられる。

#### 4. 燃焼試験-2

##### 4.1 実作動圧力領域での燃焼試験の検討

これまでに議論した $G_{PL}$ と $c^*$ 効率との関連に関する考察から、BPの搭載によって期待できる $c^*$ 効率の向上は、BPにおける熱損失が少ない場合において効果的に作用する事が示された。しかし前述の燃焼試験は、あくまでサブスケールレベルでの作動点における燃焼試験を実施するに留まっており、実用レベルにおける燃焼試験は実施されていない。そこで、BP搭載モータにおける優位性を確認するべく、実用レベルの作動点における燃焼試験を実施する事でBPの有無と $c^*$ 効率との関連について検討する事とした。前述の議論より、燃焼試験供試体に与えられる要求仕様をまとめると以下のようなになる。

##### a) バッフルプレート

BPの有無と $c^*$ 効率との関連について検討するため、燃焼試験供試体にはBPを搭載した場合とBPを搭載しない場合の2パターンで燃焼試験を実施する。

##### b) 供試体

実用レベルの作動点が得られる供試体として、過去の研究で用いられたサブスケールモータより大型のモータを供試体とする。また、搭載するBPの材質には前述の試験結果よりベークライトを採用する。

##### 4.2 燃焼試験の構成

前述の要求仕様に基づき、ここではより具体的な実験構成について述べる。

まず推進剤の組み合わせであるが、これは本研究における燃焼試験ではGOX/waxとした。酸化剤には高性能なガス酸化剤であるGOXを採用した。

燃焼試験の実実施計画については、BPを搭載した場合とBPを搭載しない場合の2パターンの燃焼試験の実施を行えばよいので、最低それぞれの条件において1回ずつ燃焼試験を行えばよいことになる。すなわち、BPの搭載の有無以外は全て同一の構成とした対照実験を実施する事を意味する。

##### 4.3 燃焼試験供試体

燃焼試験供試体は主に酸化剤供給系と推力室系の2系統に大別される。ここではまず酸化剤供給系に関して述べる。以下に、本研究で実施した燃焼試験で用い

た酸化剤供給系のシステム図をFig. 16に示す。

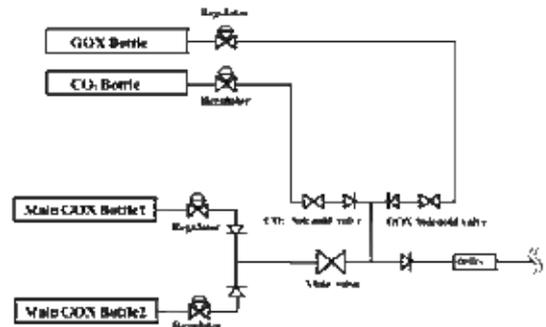


Fig. 16 Schematic drawing of the oxidizer supply system

本研究では必要流量のGOXを供給するため、主燃焼用酸化剤であるGOXのポンペを2本並列に接続している。酸化剤流量の制御は $\Phi 2.9$ mmチョークオリフィスを用いて行っている。主流路から供給される主燃焼用酸化剤の供給能力としては、酸化剤供給圧力は最大で7MPa程度であり、その時に得られる酸化剤流量は100g/s程度である。

本研究で用いた燃焼試験供試体は燃料外径が80mm、燃料長さは140mmであり、固体ロケットの $\Phi 80$ 標準モータに倣っており、 $\Phi 80$ モータと呼ぶことにした。 $\Phi 80$ モータはガス酸化剤を用いて300N程度の推力を得られるように、定格作動性能として酸化剤供給圧力を7MPa、燃焼室圧力を3MPaとして作動する事を前提として設計がなされている。実用レベルのハイブリッドロケットもこの程度の圧力条件で作動する事が予想され、 $\Phi 80$ モータを燃焼試験供試体とすることで、実用レベルのモータ設計に必要な情報を取得できることが期待される。燃料の組成は、日本精蠟社製マイクロクリスタリンワックス Hi-Mic-2095 が92.5wt%、ステアリン酸が7.5wt%である。

Fig. 17及びFig. 18に、 $\Phi 80$ モータの概要図を示す。

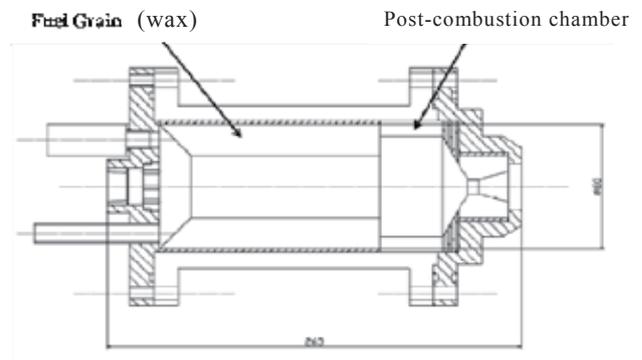


Fig. 17 Schematic drawing of  $\Phi 80$  motor without BP

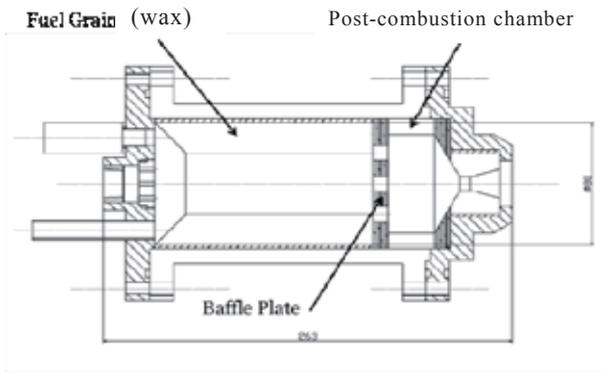


Fig.18 Schematic drawing of Φ 80 motor with BP

燃焼器は主に燃焼室外郭構造と燃焼室内コンポーネントに2種類に分けられる。前者は燃焼器における圧力容器系であり、バルクヘッド、シリンダ、ノズルカバの3つのコンポーネントから構成される。またこれらは全て SUS304 製である。後者は燃焼器内部に挿入される消耗品であり、グレインカートリッジ、アブレータ、ノズルインレット、ノズルの4つのコンポーネントから構成される。また、BP 搭載型モータについては4つのコンポーネントに加えグレインカートリッジ-アブレータ間に BP が搭載される。グレインカートリッジは厚さ 2mm の PMMA のアウターにワックス燃料が充填されている。BP、アブレータ、ノズルインレットはそれぞれベークライト製である。ノズルはグラファイト製のコアとノズルコア周囲の断熱を担う GFRP 製パイプの2つの部品から構成される。燃焼室内コンポーネント間におけるシールは全て高粘度シリコングリスによってのみ行われ、接着等によるシーリングは行われていない。ただし、グレインカートリッジ上流側端面-バルクヘッド間における隙間に関しては、例外的に1液式 RTV ゴム(信越化学工業製 KE-45)によるシールが行われる。本燃焼器はプラズマジェットトーチ(以下 PJT と呼称)による点火をしており、点火を確実なものとするため、グレイン上流側端面は 45° テーパー加工が施される。

Fig.19に燃焼実験で使用したBPの概要図を示す。このBPを用いて燃焼試験を実施した場合に得られる  $G_{PL}$  の値については 300~400 kg/s-m<sup>2</sup> 程度となる事が予想される。 $G_{PL}$  の極端な増大はBPのプレート部にかか

る構造的な負荷も同時に増大させる要因となり、BPの破壊の危険性を増大させる事に直結するため、本稿で実施する燃焼試験で採用したBPの材質が脆性材料である事を踏まえた上で  $G_{PL}$  の目標値を決定している。



(Unit: mm)

Fig.19 Schematic drawing of BP

#### 4.4 燃焼試験結果

Table 3にBP搭載/非搭載それぞれの条件において合計で6回実施された燃焼試験結果について示す。本研究において要求された燃焼試験回数はBPの搭載/非搭載それぞれの条件で1回ずつであるが、燃焼試験供試体であるΦ80モータの定格作動性能が供給圧で7MPa、燃焼圧で3MPaであり、当研究室が所有する他のモータと比較すると極めて高い圧力で運用する事が前提とされている。したがって、初回から定格性能で運用する事は危険であると判断し、BP非搭載型モータを用いて段階的に性能を引き上げながら実験を行い、燃焼試験供試体全体の設計における健全性の確認を実施している。故に、本稿で議論するBPの有無と  $c^*$  効率との関連に関する検討に際して用いられるデータは試験番号#150113\_1および#150213\_1の2つである。これらの燃焼試験で得られている酸化剤供給圧力(Oxidizer feed pressure)及び燃焼室圧力(Chamber pressure)の各履歴をFig.21及びFig.22に示す。

Table 3 Results of firing tests

Number	BP Installed	Normalized P <sub>chamber</sub>	Normalized P <sub>chamber</sub> / P <sub>chamber</sub>	Barrel time	P	P <sub>ch</sub>	G <sub>PL</sub>	G <sub>PL</sub>	IEI	c* <sup>2</sup>	c* <sup>2</sup> efficiency
-	-	-	-	s	MPa	MPa	kg/s-m <sup>2</sup>	kg/s-m <sup>2</sup>	-	m/s	%
151077	No	303	311	1.03	2.12	0.93	53.55	N/A	2.07	13009	78.8
151078	No	309	325	1.05	2.79	1.28	63.32	N/A	1.86	14700	73.7
150275	No	302	319	1.05	6.24	2.79	161.36	N/A	2.75	14845	4.7
151287	No	707	766	2.63	3.15	2.16	66.17	N/A	2.69	15200	82.6
150113	No	175	192	2.09	6.84	2.11	65.15	N/A	2.94	15416	83.6
150213	Yes	270	305	2.26	6.79	2.72	61.44	365.5	2.60	15211	80.4

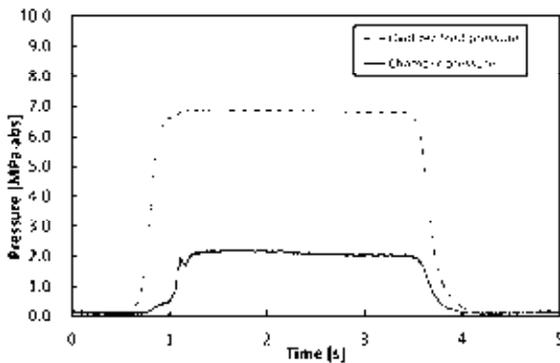


Fig.20 Pressure curves of #130113\_1 (without BP)

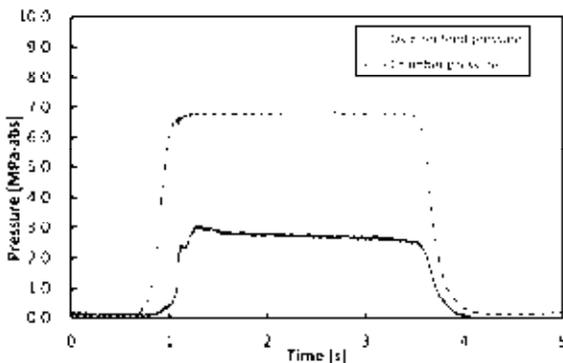


Fig.21 Pressure curves of #130213\_1 (with BP)

Fig.20 および Fig.21 より、BPの有無によらず燃焼圧が安定して得られている事を確認した。両者の燃焼試験はBPの有無以外は全て同一条件にて実施されている。すなわち、定格性能を狙って燃焼試験を実施しているが、BPを搭載していない#150113\_1における燃焼圧に関しては定格性能を大幅に下回る値である、定格比で約70%という値が得られている。これは燃焼試験で用いたノズルにエロージョンが確認されており、オペレーションの都合上、両者の燃焼試験で用いられていたノズルの仕様をすべて揃えることが出来なかったために生じている問題である。このように、双方の燃焼試験における燃焼圧にズレが生じているが、本稿ではこのズレを許容して以降の考察を実施することとした。燃焼圧についてはc\*効率との正の相関が考えられ、本実験における燃焼試験においてもそれを裏付けるデータが得られている。これに関する詳細は別途報告する。

その他のパラメータに予想外の挙動を示している事は確認されず、本実験で実施した燃焼試験全てにおいて安定動作が得られている事を確認した。

#### 4.5 BPの有無とc\*効率との相関

Table 1における燃焼試験毎のc\*効率について示したグラフを以下のFig.22に示す。

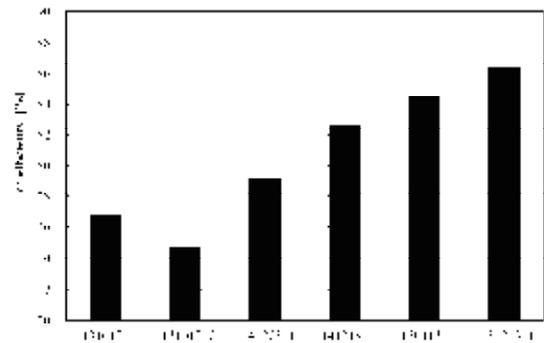


Fig.22 c\* efficiency of firing tests

Fig.22に示したグラフでは今回実施した燃焼試験6回のデータを記載している。このように、BP搭載型モータのc\*効率の結果である#150213\_1の値が86%という値を示しており、BP非搭載型モータを上回るc\*効率が得られており、実用燃焼圧力領域でのBPの搭載によるc\*効率の向上効果が確認された。また、B.P.非搭載型モータにおけるc\*効率は大きく振れており、その値は74~85%の範囲内にある。

#### 4.6 BP以外のパラメータとc\*効率との相関

前述のようにBP非搭載型モータにおけるc\*効率のデータが最大で10%程度のバラツキを持つという興味深い結果が得られている。本研究ではBPの搭載によるc\*効率向上への寄与を考察する事が目的であるから、BPの搭載以外によるc\*効率向上へ寄与する要因についても洗い出す必要がある。何故ならば、c\*効率に対するBPの寄与とBP以外の要因による寄与とを明確に区別することは、BPの効果に関してより深い理解を行うためには必須であると考えられるからである。本稿ではc\*効率と相関があると疑われるパラメータである酸化剤質量流束および燃焼室圧との比較を行う。まず、酸化剤質量流束とc\*効率との相関に関して整理したグラフをFig.23に示す。

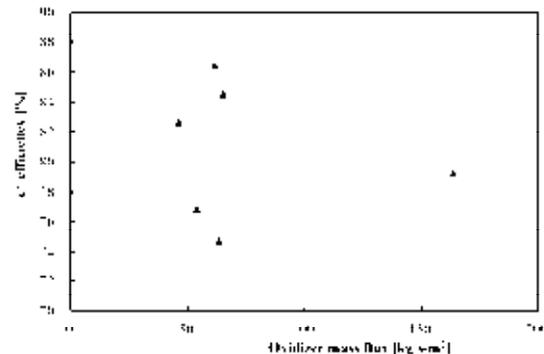


Fig.23 Relationship between oxidizer mass flux and c\* efficiency

ワックス系燃料を採用するハイブリッドロケットにおける酸化剤質量流束とc\*効率の間には、流束の増

大に伴って $c^*$ 効率が增加する傾向があると言われていたが、本実験結果からはその傾向は確認されなかった。本実験において得られている酸化剤質量流束の値が低い領域であり、かつその範囲も極めて狭いものであるから、 $c^*$ 効率との相関について検討できないレベルであることが考えられる。

次に、燃焼室圧力と $c^*$ 効率との相関に関して整理したグラフをFig.24に示す。

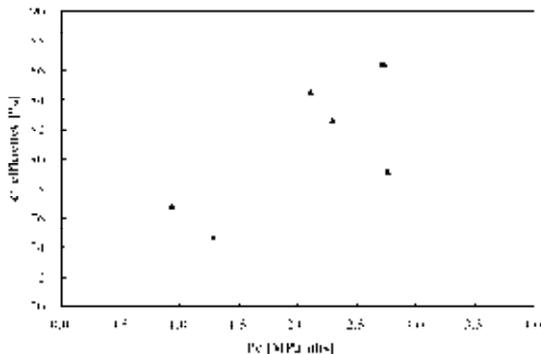


Fig.24 Relationship between combustion pressure and  $c^*$  efficiency

グラフより、燃焼圧の増加とともに $c^*$ 効率も増加する傾向にある事が分かる。また燃焼圧が概ね1~3MPa程度増加する中では $c^*$ 効率が概ね10%程度増加している事が確認できる。本実験で実施した一連の燃焼試験においては、燃焼圧の定格値である3MPa付近まで徐々に上昇させるように試みている。この理由は既に述べたとおりであるが、結果として一連の燃焼試験で得られている燃焼圧が1~3MPa程度の幅を持つことになった。このように、燃焼室圧力と $c^*$ 効率との間に一定の相関が認められ、その関係性は燃焼室圧力と $c^*$ 効率との間には正の相関関係が確認された。燃焼圧の増加は燃焼温度を増加させることに繋がり、液相で供給される未燃燃料の燃焼完結性の向上が図れるため、燃焼圧と $c^*$ 効率の正の相関関係を示す結果が得られたと考えられる。

## 5. 結言

2つの異なる材質によるBPを採用した場合における $G_{PL}$ と $c^*$ 効率との相関関係について、ラボスケールモータである $\Phi 55\text{mm}$ モータを用いて $G_{PL}$ の領域が0~300 kg/s- $m^2$ における燃焼試験データを取得して整理した。

また、実用的なハイブリッドロケットで想定される酸化剤供給圧7MPa、燃焼圧3MPaを定格動作点とする $\Phi 80$ モータを用いて、BPの有無による $c^*$ 効率の改善効果を確認する燃焼試験を実施した。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) BPの断熱性の差異すなわちBPにおける熱損失の影響によって $G_{PL}$ と $c^*$ 効率との関係性に差異を生じさせている事が明らかとなった。
- 2) 性能面においては、全 $G_{PL}$ 領域で安定して高水準な $c^*$ 効率を得られるベークライト製BPは、 $G_{PL}$ の増大とともに $c^*$ 効率が低下する特性を持つグラファイト製BPよりも優れていると判断される。
- 3)  $G_{PL}$ の増大に伴ってアブレータの損耗量が増大しており、 $G_{PL}$ の増大に伴って後方燃焼室での燃焼が促進されている事が間接的にも示唆された。
- 4) 定格動作点を概ね達成する燃焼試験結果の比較より、BP搭載型モータの $c^*$ 効率がBP非搭載型モータの $c^*$ 効率を1.8%上回ることを確認した。これにより、BP搭載型モータの優位性が確認された。
- 5) 燃焼圧1~3MPa程度の動作点の範囲内で実施されたBP非搭載型モータによる燃焼試験結果より、燃焼圧の増加に伴い $c^*$ 効率が向上するというこれまでの定性的な知見を確認することができた。

## 参考文献

- 1) I. Nakagawa and S. Hlikone: Study on the Regression Rate of Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels, Journal of Propulsion and Power, 27, pp. 1276-1279,(2011)
- 2) 崎尾和樹: WAX燃料を用いたハイブリッドロケットの燃焼効率に関する研究, 東海大学大学院2012年度修士論文, (2013)
- 3) 飯嶋海: ワックス燃料ハイブリッドロケットモータにおけるバップルプレートの効果に関する実験的研究, 東海大学大学院2011年度修士論文, (2012)
- 4) 株式会社東海カーボン:等方性黒鉛丸棒の物性値, (2015)