

ハイブリッドロケットにおけるWAX燃料の成型特性

臼井 雄太郎*, 那賀川 一郎**
* 東海大・院, ** 東海大・工

1. 緒言

ハイブリッドロケットは固体の燃料と液体や気体の酸化剤を用いたロケットエンジンシステムであり、これらはそれぞれ別の空間に充填され、エンジン作動時には燃料に酸化剤を噴射することで燃焼が行われる。推進剤は様々な組み合わせがあるが、主に固体の燃料には樹脂等、酸化剤は酸素や亜酸化窒素等が用いられる。よって、推進剤は危険性が少なく、排気ガスも比較的クリーンであることから、今後の宇宙輸送に用いる推進システムとして注目されている。しかし、ハイブリッドロケットは大推力化が難しく、一つの原因として燃料後退速度が低いことによる性能への影響が挙げられる。この問題を解決するために低融点であるWAX(蠟)を燃料に採用することで燃料後退速度を樹脂系燃料に比べて3倍程度向上させることができる。しかし、WAXは熱膨張率が大きく、鋳込んで成型する過程でクラックが発生することがあり、製造性に難がある。クラックの発生原因は成型時に融けて液体のWAXが冷めて固まる時に生じる熱応力である。本研究では成型時に発生する熱応力を予測、WAXの強度と照査し、成型が可能であるかを判断することで製造性の向上を検討した。

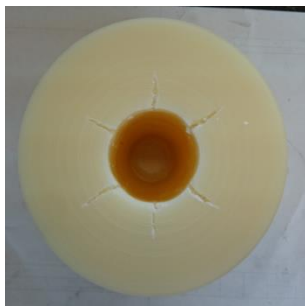


Fig.1 クラックが発生したWAX燃料

2. WAX と添加剤

WAX系の燃料にはパラフィンワックスやマイクロクリスタリンワックス等の石油から精製された素材が主に使用され、本研究では(株)日本精蠟製のHi-Mic-2095 マイクロクリスタリンワックスを採用した。このWAXは他のマイクロクリスタリンワックスに比べて融点が高い特徴を持っており、値段も安価で入手性が良い。

Table 1 Hi-Mic-2095 諸元

	Chemical formula	Melting point [°C]	Penetration [25°C]	Density [g/cm ³]
Hi-Mic-2095	C ₄₄ H ₉₀	101	8	0.935



Fig.2 Hi-Mic-2095

WAX燃料の強度を向上させる添加剤として(株)三井・デュポンポリケミカル製のエバフレックス® EV210ETRを使用した。EVA(エチレン酢酸ビニル共重合体)は衝撃や環境応力亀裂に抵抗性があることや、WAX同様に単体で爆発する危険性や毒性が無く、相溶性も良い。

Table 2 EV210ETR 諸元

	Chemical formula	Melting point [°C]	Density [g/cm ³]
EV210ETR	C ₅ H ₇ O ₂ (CH ₃)	73	0.950

3. WAX 燃料の製造方法

WAX燃料の製造は遠心成型方式を採用している。遠心成型方式は樹脂や金属製の円筒状治具の中に融かしたWAXを入れて、治具を回転させると遠心力によってWAXは治具の内壁に張り付きながら固化する。その際、WAXの中に含まれる気泡が分

離されクラックの発生低減に寄与し、モータ装填時に酸化剤が通るポートも形成される。WAXは切削加工を行っても熱により発火することは無いので、製作した燃料を任意の寸法に後から加工することも可能である。しかし、加工前のφ80×150mm程度の燃料を製造するのでさえ、融かす段階から除熱が完了するまでに2時間の時間を要し、経験則から治具の予熱や治具へのWAXの注入温度、除熱時の雰囲気温度を設定し成型を行っても、燃料の種類や治具の素材、季節による気温の変化等、様々な要因によりクラックの有無は変わってしまい、それは実際に製造するまで結果はわからない。このような方法でトライ&エラーを繰り返すことは時間や素材が無駄になってしまうことに繋がり、特に大型のWAX燃料を作る際には大きな問題となりえる。

4. WAXの強度

WAXの強度を調べるために引張試験および圧縮試験を行った。引張試験はJISによって金属や樹脂に対して規格化された方法もあるが、本研究では固体推進薬との比較を容易に行えるように社団法人火薬学会の火薬学会規格(プロベラント計測方法)で規定されている、火薬学会規格“PT-007 単軸引張計測方法”を適用して試験を行った。また、圧縮試験は旧圧縮試験規格JIS K7208を参考に行った。引張、圧縮速度は使用した試験装置の最遅速度である10 mm/minを採用している。引張試験ではHi-Mic-2059ワックスにEVAを添加して、強度への影響を調べた。圧縮試験についてはEVAを添加すると試験機が発生させられる最大荷重よりも強くなってしまうのでワックス単体で行っている。

Table 3 試験機構成

試験機本体	SVZ-50NA型引張圧縮試験機
指示部	SL-6001型荷重変位計
センサー	LV-500N型ロードセル

以下にWAXの引張試験および圧縮試験の真応力の実験結果を示す。

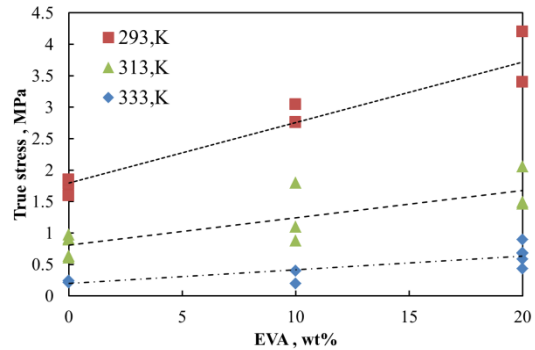


Fig.3 EVA添加量に対する真応力の関係

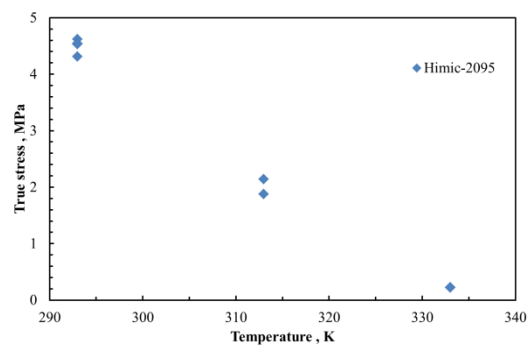


Fig.4 圧縮試験結果

EVAを添加したことにより常温時の強度は1.5倍から2倍まで向上した。温度が上がるにつれて、EVAの影響は弱まるが、これはEVAの融点が70°Cと低いことが原因だと考えられる。また、WAXは引張よりも圧縮に強い耐性がある結果が得られた。

5. 燃料成型中の熱伝導

熱応力を算出するために遠心成型中の燃料をモデルに熱伝導の計算を行った。遠心成型では熱は治具の外周とポート面から放出される。したがって、固化はそれらから始まり、燃料の中心に向かって進行する。そして、既に固化した面に対して中心の融けたWAXは冷えていく段階で、大きい熱膨張率により収縮して熱応力が発生する。この過程をモデルとして熱伝導および熱応力の算出を行

う. また, 計算に用いる物性パラメータは融点を境に固体と液体別々の値を使用した.

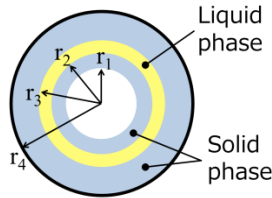


Fig.5 計算モデル

算出には以下の一次元の熱伝導方程式を用いた.

$$\pi(r_{j+1} + r_j) \cdot \lambda \frac{T_{r_{j+1}} - T_{r_j}}{\delta} - \pi(r_j + r_{j-1}) \cdot \lambda \frac{T_{r_j} - T_{r_{j-1}}}{\delta} = \rho \cdot 2\pi r_j \cdot \delta \cdot c_p \left(\frac{dT}{dt} \right)_{r_j} \quad (1)$$

Table 4 熱伝導計算で用いたパラメータ

Properties	Value	Unit
Density- liquid phase	800	kg/m ³
Density- solid phase	900	kg/m ³
Specifi heat -liquid phase	2920	J/kg-K
Specifi heat -solid phase	2030	J/kg-K
Thermal conductivity -L	0.15	W/mK
Thermal conductivity -S	0.25	W/mK
Melting point	373	K

燃料直径 120 mm, 除熱時の表面温度を 313 K と
して半径方向の時間による温度を算出した. 結果
を Fig.6 に示す.

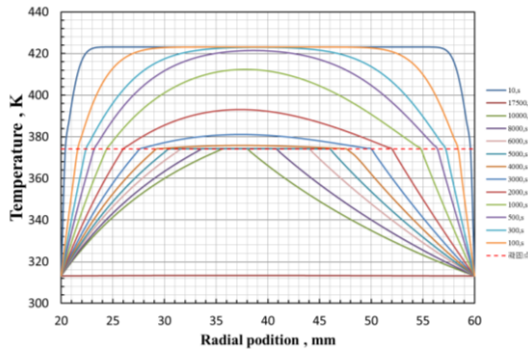


Fig.6 熱伝導計算結果

約 6000 秒で全ての位置において融点を下回り,
固化が完了する結果を得た.

6. 熱応力

算出した温度と Fig.5 の計算モデルより熱応力を
求めた. 計算に使用した式は以下に示す. また,
算出にあたり, 線膨張率 $a=4.633E-4$, ヤング率
 $E=82.75 \text{ MPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$ とした.

T2>T1 の内側の固体層に対して

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_r)_{r_3} = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} (T_3 - T_4) \beta_2 \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\ln r_4 / r_3} - \frac{2r_4^2}{r_4^2 - r_3^2}$$

T3>T4 の外側の固体層に対して

$$(\sigma_r)_{\max} = (\sigma_r)_{r_1} = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} (T_2 - T_1) \beta_1 \quad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{1}{\ln r_2 / r_1}$$

上式を用いて計算した結果は以下のようになった.

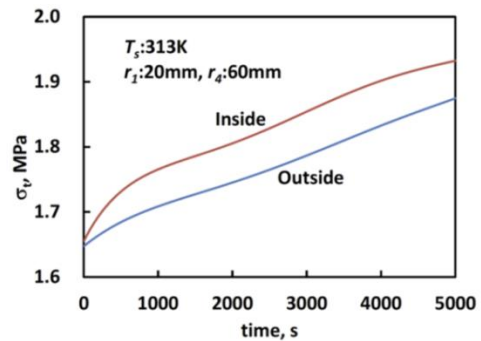


Fig.7 除熱時間と最大熱応力の関係

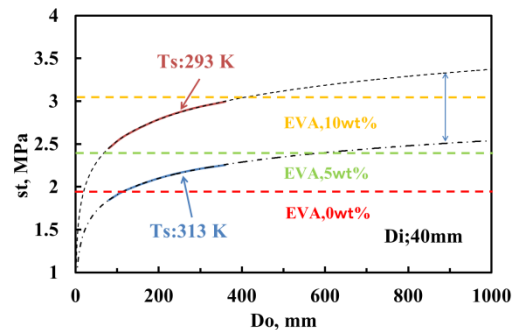


Fig.8 燃料直径と最大熱応力の関係

Fig.7 は遠心成型での除熱時間と, その時に発生

する熱応力を示しており、この図から除熱中に発生する熱応力は外側の固相面よりも内側の方が強くなる結果を得た。Fig.8 は表面温度と燃料直径を変えた場合の成型時に発生する熱応力を示している。図より EVA を添加していない WAX では小径の燃料しか製造時の熱応力に耐えられないが、EVA を添加する事によって強度が高まり、大きな径に対応できる。また、除熱時の表面温度を 313 K, EVA を 5 wt% 添加すれば直径 500 mm 程度までの WAX 燃料が製造可能であると考えられ、表面温度が高ければ成型時に発生する熱応力は小さくなる傾向があるので、除熱の際に雰囲気温度を高く保つことはクラックを低減させることに有効であると考えられる。

7. 推進剤としての性能

WAX に EVA を添加した場合の燃料後退速度と比推力への影響を調査した。燃料後退速度は $\phi 40$ 燃焼器を用いて EVA の添加量を変え、酸化剤質量流速は一定として実験を行った。

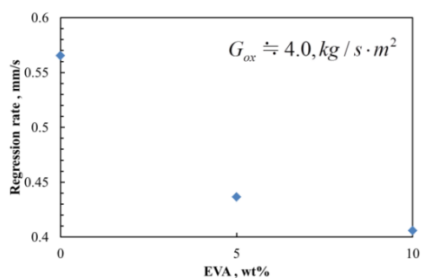


Fig.9 EVA を添加した際の燃料後退速度

Fig.9 より EVA を添加すると燃料後退速度は減少する結果が得られた。しかし、さらに融点の低い WAX を使用する事で、この問題は解決できるのではないかと考える。また、EVA を燃料後退速度の調整剤として用いることも可能である。

また、EVA の添加量を多くした際の比推力の理論計算を NASA,CEA400 で行った。最適 O/F 付近では添加量を 10 wt% 多くすると 0.3 % ずつわずかに低下するような結果が得られた。

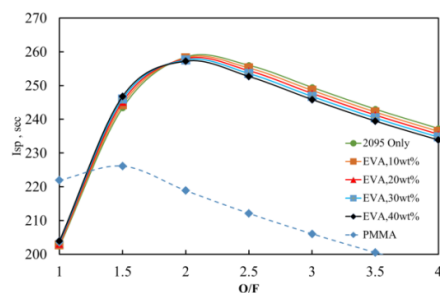


Fig.10 EVA 含有率と比推力の関係

8. 結言

ワックス燃料の成型特性の知見を得るために強度試験や熱応力予測を行い以下の結果を得た。

- EVA を添加すると強度は向上する
- EVA の添加によって燃料後退速度は減少し比推力はわずかに減少する
- 除熱中の熱応力はポート面に強く発生し、温度差が大きくなると共に強くなる
- クラックの低減には EVA を添加することと、除熱中の雰囲気温度を高くし、表面温度を高く保つことが有効である
- 燃料の直径が大きくなると発生する熱応力も大きくなり、EVA を添加すれば 500 mm 程度の WAX 燃料の製造が可能であると考えられる

参考文献

- 1) Karabeyoglu M. A., B. J. Cantwell, and D. Altman : DEVELOPMENT AND TESTING OF PARAFFINE-BASED HYBRID ROCKET FUELS AIAA 2001-4503, 2001.
- 2) M. A. Karabeyoglu, D. Altman, B. J. Cantwell, *Journal of propulsion and power*, 18, No. 2, (2002), 610-620.
- 3) 火薬学会規格, “PT-007 単軸引張計測方法”
- 4) 丸山信也: ハイブリッドロケット用ワックス燃料の強度改善に関する研究, 東海大学大学院 2011 年度修士論文