

K7-45

AN 添加による WAX 系ハイブリッドロケット固体燃料の高性能化 Improving performance of WAX-based hybrid rocket solid fuel with adding AN

○山添郁也¹, 北川達也², 永塚優輝², 高橋賢一³*Ikuya Yamazoe¹, Tatuya Kitagawa², Yuki Nagatuka², Kenichi Takahashi³

Abstract: AN is used as an oxidizer for composite propellant of solid rocket because it does not emit toxic substances like AP and particle size does not influence burning rate by melting at combustion surface. Addition of oxidizer to fuel makes it possible to improve combustion efficiency. This paper ignition characteristics added ammonium nitrate to WAX type solid fuel were evaluated.

1.背景

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使用するロケットであり、その安全性や低価格、低環境負荷という利点より、超小型ロケットの推進システムとして近年注目を集めている。しかし、低燃料後退速度や低燃焼効率という点において、固体ロケットと液体ロケットに比べて実用されるケースがほとんどない。この問題点を解決すべく、燃料に固体酸化剤や高エネルギー物質を添加して得られる発熱反応により、燃料後退速度を向上させる試み^[1]や、近年では、パラフィン等の燃料により高い後退速度を得るような試みが為されている。このような試みは、一般に WAX 燃料を用いたハイブリッドロケットにおいて、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^[2]による。また、固体燃料に AN や AP を混ぜることにより、燃焼効率を上げようとする試みも行われている。^[3]

本研究では、WAX 系固体燃料に過塩素酸アンモニウムのような有害物質を排出しない硝酸アンモニウムを酸化剤に添加した際のハイブリッドロケット用の WAX 系固体燃料の着火特性について評価する。

2.実験方法及び実験装置

2.1 固体燃料の試料製作

使用した WAX 及び AN 粉末を以下に示す。

(1) MICROCRYSTALLINE WAX (日本精蠟製)

型番 : Hi-Mic-2095

融点 : 101 °C

密度 : 780 kg/m³ (120°C)

(2) AN 粉末 (関東化学製)

AN : Ammonium nitrate

純度 : 99% 以上

密度 : 1780 kg/m³ (120°C)

溶融した WAX に AN 粉末を混合させ、攪拌する。AN を混合した WAX を型に流し固め、直径 6mm、高さ 3mm の試料を製作した。

NASA-CEA を用い、AN 添加をした WAX 系固体燃料の性能を評価した。計算条件は、 $A_0/A_1=1.35$, $P=4\text{atm}$ とし、固体燃料は WAX (C₄₃H₈₈) とした。評価した結果を Figure 1 に示す。

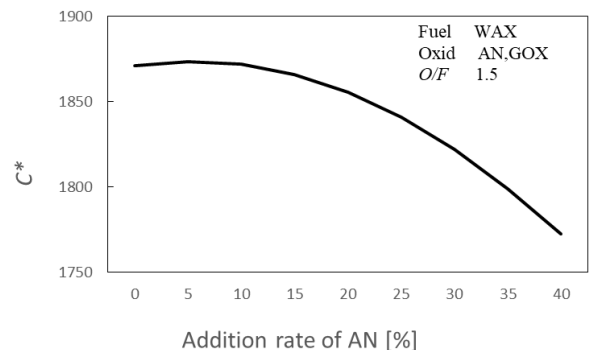


Figure 1. Theoretical calculation results

Figure 1 より、本実験では WAX 単体と C* が最大となる AN5% 添加した WAX を比較する。作成した試料の組成を Table 1 に示す。

Table 1. Composition of sample [mass%]

sample name	WAX	AN
AN0	100	0
AN5	95	5

2.2 電気炉を用いた着火試験

500°C に設定しておいた電気炉に製作した試料を入れ、着火の様子をカメラに撮影した。また、電気炉内温度は熱電対を用い、着火時間や燃焼時間は動画から計測する。

3.実験結果及び考察

AN0 と AN5 の着火時の画像を Figure 2, Figure 3 に示す。



Figure 2. State of combustion flame (AN0)



Figure 3. State of combustion flame (AN5)

Figure 2, Figure 3 から AN0 に比べ、AN5 は火花を散りながら着火していた。また、火炎は約 2 倍の高さまで大きくなった。

AN0 の測定結果を Table 2 に示し、AN5 の測定結果を Table 3 に示す。また、それぞれの平均化した結果を Table 4 に示す。

Table 2. Measurement results of AN0

	AN0					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Starting temperature [°C]	394.83	411.78	410.77	407.46	412.48	412.69
Maximum temperature [°C]	434.82	438.09	454.03	438.18	456.40	444.37
Temperature increases [°C]	39.99	26.31	43.26	30.72	43.92	31.68
Total time [s]	51.13	45.10	54.00	47.94	48.47	43.90
Ignition time [s]	9.71	7.46	7.74	7.27	6.43	6.14
Burning time [s]	41.42	37.64	46.26	40.67	42.04	37.76
	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	
Starting temperature [°C]	414.02	405.47	411.08	416.67	403.93	
Maximum temperature [°C]	450.87	443.78	452.11	462.71	452.40	
Temperature increases [°C]	36.85	38.31	41.03	46.04	48.47	
Total time [s]	50.00	42.65	55.03	46.06	50.12	
Ignition time [s]	7.64	7.86	9.55	6.27	9.36	
Burning time [s]	42.36	34.79	45.48	39.79	40.76	

Table 3. Measurement results of AN5

	AN5				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Starting temperature [°C]	376.74	390.68	397.31	390.96	390.74
Maximum temperature [°C]	438.66	421.75	445.46	447.26	442.32
Temperature increases [°C]	61.92	31.07	48.15	56.30	51.58
Total time [s]	44.38	36.03	39.25	35.37	50.60
Ignition time [s]	3.86	2.02	2.43	1.64	11.37
Burning time [s]	40.52	34.01	36.82	33.73	39.23
	No.6	No.7	No.8	No.9	
Starting temperature [°C]	405.42	399.52	405.97	405.54	
Maximum temperature [°C]	429.58	435.72	435.87	441.19	
Temperature increases [°C]	24.16	36.20	29.90	35.65	
Total time [s]	40.47	40.12	41.47	41.38	
Ignition time [s]	2.27	4.61	5.52	4.59	
Burning time [s]	38.20	35.51	35.95	36.79	

Table 4. Average results of propellant samples

	AN0	AN5
Starting temperature [°C]	408.34	389.29
Maximum temperature [°C]	444.32	439.09
Temperature increases [°C]	35.98	49.80
Total time [s]	48.42	41.13
Ignition time [s]	7.46	4.26
Burning time [s]	40.97	36.86

Table 3 から AN を添加した試料で測定結果のばらつきが多く見られた。これは、AN を添加する際に密度差から沈殿が生じ、十分に均一な試料の製作が出来ず計測結果に影響したと考えられる。

Table 4 において、AN5 は AN0 と比べ、温度上昇が約 14°C 高くなった。また、着火時間は AN0 に比べて、AN5 は約半減しており、燃焼時間に関しても 5 秒縮まった。これは、燃料に酸化剤を混ぜたことにより、固体燃料の燃焼速度が増加したと考えられる。

本発表では、AN 粉末の沈殿対策を施し、SEM を用いた熱的特性の解析を行う。

4.結論

- AN 粉末の添加によって、WAX 単体に比べ、温度上昇が増加、着火時間や燃焼時間が減少し、燃焼速度が上がった。

5.参考文献

[1] M.J.Chiaverini and K.K.Kuo: “Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Prorulsion”, America Institute of Aeronautics and Astronautics, pp7-11, 2007.
 [2] I.Nakagawa and S.Hikone: Study on the Regression Rate of Paraffin – Based Hybrid Rocket Fuels, Journal of Propulsion and Power, 27, pp1276-1279, 2011.
 [3] 桑原卓雄: 「ロケットエンジン概論」, 産業図書, pp89, 2009.