

K2-89

ダクトドロケットに使用されるホウ素粒子の着火・燃焼特性  
-酸素濃度の影響-

Ignition and Combustion Characteristics of Boron Particles for Ducted Rockets  
-Effects of Oxygen Concentration-

○里村翔平<sup>1</sup>, 鈴木直人<sup>1</sup>, 桑原卓雄<sup>2</sup>

\*Shohei Satomura<sup>1</sup>, Naoto Suzuki<sup>1</sup>, Takuo Kuwahara<sup>2</sup>

Abstract: Boron is suitable for the fuel of ducted rockets because it improves specific impulse. It is considered that pressure changes for change of flight altitude influences combustion of boron particles in the secondary combustor and decreases combustion efficiency. In this study, we investigate how pressure influences on ignition and combustion characteristics of boron particles. Oxygen concentration was changed to simulate the secondary combustor pressure at Mach 2.5. As a result, ignition delay time and burning time decrease with increasing oxygen concentration.

1. 背景・目的

近年, 超音速旅客機やミサイルなどの高速で飛行する飛行体の研究開発が進められている. ダクトドロケットエンジンは固体ロケットエンジンや液体ロケットエンジンと比較し3-4倍の高い比推力を有しており, 構造が簡単で軽量化が図れる為, 超音速旅客機等の推進機関として最適である. 図1にダクトドロケットエンジンの構造を示す. 1次燃焼器でガスジェネレータを燃焼し, 高温の燃料過剰ガスを発生させる. エアインテークで衝撃波により圧縮された空気と高温の燃料過剰ガスを2次燃焼器内で混合し, 燃焼させ推力を得る推進機関である.

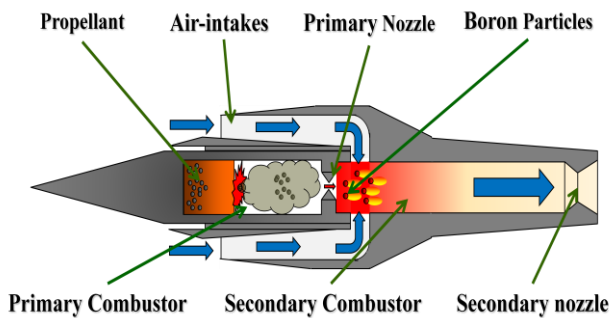


Figure 1. Fundamental structure of Ducted Rocket Engine

これまでの研究により B 粒子を推進薬に添加する事で, 比推力をより向上できる事が知られている. しかし, 飛行高度の変化は圧力変化を起こすため, 2次燃焼器内の B 粒子の燃焼に影響を及ぼし燃焼効率が低下すると考えられる<sup>[1]</sup>.

本研究では, 飛行高度変化による圧力変化が B 粒子の着火遅れ時間と燃焼時間にどのように影響を与えるか酸素濃度を変化させることにより, 明らかにする.

2. 実験条件の算出

飛行高度変化時の2次燃焼器内に流入する空気の圧力を算出した. 計算条件はマッハ 2.5 で大気中を飛行し, 空気圧縮方式は2重ランプ方式, 偏向角は圧力回復率が高くなる角度とした. 算出結果を図2に示す. 理想気体の場合, 大気の圧力とモル数(体積比)は比例の関係にある. 圧力を変化させると窒素, 酸素両方のモル数も同様の割合で変化するため, 酸素濃度は20 vol%と一定である. 本報告では, B 粒子の着火・燃焼には酸素のみ寄与すると考えた. 圧力変化時の酸素のモル数変化を窒素と酸素の体積比を変化させ, 大気圧下で再現する. 酸素濃度(式中 O.C.と略)は(1)式で表わされるため, 窒素と酸素の体積比変化とは, 酸素濃度変化である.

$$\frac{O_2}{N_2 + O_2} \Big|_{\text{Volume}} \times 100 = \text{O.C.} [\text{vol}\%] \quad (1)$$

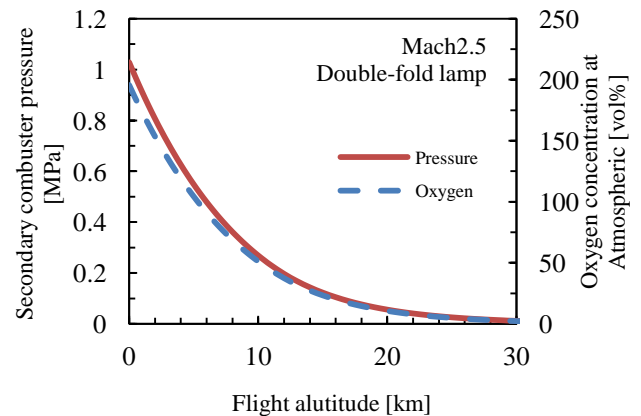


Figure 2. Relationship between Secondary Combustor Pressure, Oxygen concentration at Atmospheric and Flight Altitude

1: 日大理工・学部・航空 2: 日大理工・教員・航空

上記の内容を簡単化のため、表 1 に関係を示す。

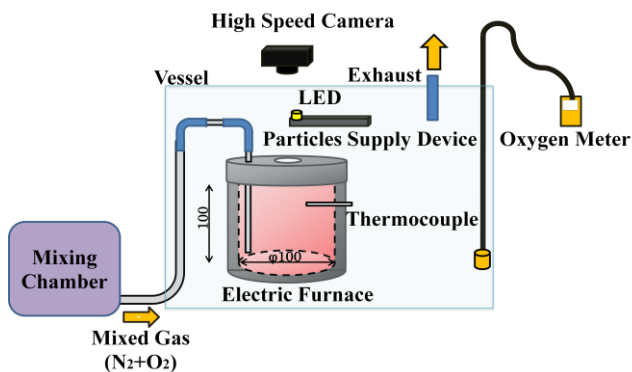
**Table 1.** Relationship between Pressure and Oxygen Concentration

Pressure [MPa]	Case of Pressure changes		Case of Atmospheric (Simulate pressure changes)	
	Volume ratio (N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> )	Oxygen concentration [vol%]	Volume ratio (N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> )	Oxygen concentration [vol%]
0.01	8:2	20	98:2	2
0.1	80:20		80:20	20
0.2	160:40		60:40	40
0.3	240:60		40:60	60
0.4	320:80		20:80	80
0.5	400:100		0:100	100
0.6	480:120		-	-

以上の関係を用い、大気圧下で酸素濃度を変化させ、2 次燃焼器内の高度変化に伴う圧力変化を模擬する。

### 3. 実験装置・方法

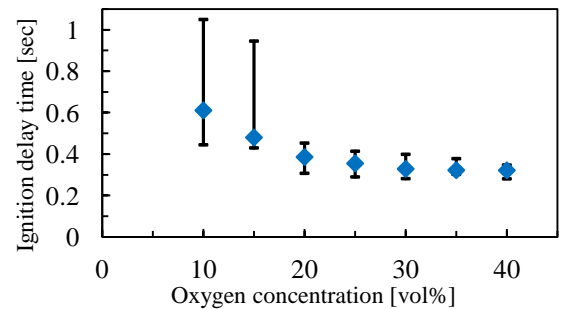
酸素濃度を変化させた場合の B 粒子(平均粒径:2 μm)の着火遅れ時間及び燃焼時間をハイスピードカメラ(撮影速度:1200 fps)で取得した直接映像を用いて求める。図 4 に実験装置を示す。本実験では酸素濃度変化による影響のみ考慮するため、電気炉の炉内温度を B 粒子が大気圧下で十分に着火する 1190 K と一定にした。なお B 粒子(平均粒径:2 μm)の着火温度は 1060 K 以上と確認されている<sup>[2]</sup>。容器内を窒素置換した後、酸素濃度 0 vol% から 40 vol% まで 5 vol% 刻みで増加させた。実験は粒子投入装置を用いて 1 組成、1 mg の B 粒子投入を 10 回行った。粒子投入時、炉内雰囲気中の酸素濃度を容器と同様にするため、炉内に各組成の混合気(N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)を流入させながら一定の酸素濃度で実験を行った。粒子投入装置はトリガー出力と同時に LED が点灯し、粒子が落下する機構になっており、LED 点灯から B 粒子の輝炎が観測された時間までを着火遅れ時間と定義した。燃焼時間は B 粒子の輝炎観測時から燃焼による光放出が完全に消えるまでの時間とし、粒子群で計測した。



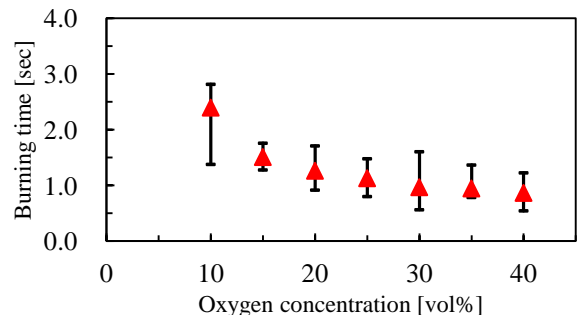
**Figure 4.** Experiment Apparatus

### 4. 実験結果・考察

図 5 に酸素濃度と着火遅れ時間、図 6 に酸素濃度と燃焼時間の関係を示す。着火遅れ時間および燃焼時間は 10 回計測した平均値である。炉温度が 1190 K の場合、酸素濃度が 0 - 5 vol% の範囲では、B 粒子が着火しない。未着火の原因は B 粒子着火に必要な酸素が無かったからだと考えられる。B 粒子の着火には表面に形成される B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の生成速度を蒸発速度が上回らなければならない<sup>[3]</sup>。酸素濃度を増加させると、着火遅れ時間は短くなる傾向にある。酸素濃度を増加させると、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の生成速度は増加する。同時に B の温度上昇の割合が増加するため蒸発速度も増加し、着火遅れ時間が短くなったと考えられる。酸素濃度を上げると酸素分子の総量が多くなるため反応速度が速くなり、燃焼時間が短くなったと考えられる。



**Figure 5.** Relationship between Ignition Delay Time and Oxygen Concentration (1190 K)



**Figure 6.** Relationship between Burning Time and Oxygen Concentration (1190 K)

### 5. まとめ

酸素濃度変化による圧力変化模擬では、酸素濃度増加に伴い着火遅れ時間、燃焼時間共に短くなり、酸素濃度が 5 vol% 以下の場合、B 粒子は着火しない。

### 6. 参考文献

- [1] 久保田浪之介・桑原卓雄:「ラムジェット工学」, 日刊工業新聞社, 1996.
- [2] 小田原貴樹:日本大学大学院理工研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2005.
- [3] 吉田隆男・川島勝・湯浅三郎・磯田浩:第 34 回燃焼シンポジウム講演要旨集, pp.165-167, 1996.