

## LOX/エタノール ガスジェネレータの高精度流量予測に関する研究

○奈女良 実央<sup>1</sup>, 藤浦 彰友<sup>1</sup>, 中村 祐太<sup>2</sup>, 中田 大将<sup>3</sup>, 江口 光<sup>3</sup>, 内海 政春<sup>3</sup>

<sup>1</sup>室蘭工業大学工学研究科, <sup>2</sup>室蘭工業大学理工学部, <sup>3</sup>室蘭工業大学

### The Study on High-Precision Flow Rate Prediction for LOX/Ethanol Gas Generator

Mio NAMERA, Akitomo FUJIURA, Yuta NAMAMURA, Hikaru EGUCHI, Daisuke NAKATA,  
and Masaharu UCHIUMI (Muroran Institute of Technology)

Key Words : Gas Generator, Throttling, Pressure Loss, Flow Rate

Abstract : In this paper, describe a method of prediction for gas generator throttled combustion tests. In addition to the conventional method, the injector Cd was set small based on past test results. As a result, the LOX flow rate error at 70% throttle was improved from 10% to 1.3%. In addition, for flight operation, the propellant orifice diameter was examined for the feed-line resistance of the control valves.

#### 記号一覧

$A_{ori}$	: インジェクタ断面積[m <sup>2</sup> ]
$A_{th}$	: スロット断面積[m <sup>2</sup> ]
$C_d$	: 縮流係数
$\dot{m}$	: 質量流量[g/sec]
$\rho$	: 密度[kg/m <sup>3</sup> ]
$P_{tank}$	: タンク圧力[MPaA]
$P_{GG}$	: 燃焼圧力[MPaA]
$R_{line}$	: 供給系レジスタンス[m <sup>-4</sup> ]
$\eta_{c^*}$	: c*効率[-]

#### 1. 研究背景

室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターでは、小型無人超音速機オオワシIIの研究開発を進めており、そのエンジンとして Gas Generator cycle Air Turbo Ramjet(GG-ATR) Engine を搭載する予定である。本エンジンは、Fig. 1 に示す部品で構成される。

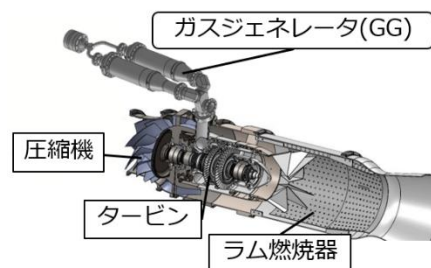


Fig. 1 GG-ATR エンジン

GG-ATR エンジンは、ガスジェネレータ(Gas Generator; GG)にてタービン駆動用ガスを生成することでタービンを駆動させ、圧縮機で取り込んだ空気とタービン後流のガスをラム燃焼器で再度燃焼させ推力を発生させる。また、離陸・旋回・着陸といった飛行状態において、GG の推進剤流量を変化させることで燃焼圧力を変え、タービンの回転数を調整する推力制御(スロットリング)を行う特徴を持つ。スロットリング範囲として、定格回転数 58000

rpm から二次危険速度を超えた 23200rpm ま  
で幅広く行うため、GG2 基で 40%から 100%  
の範囲でスロットリングを実施することとな  
る。50%以下の運用を行う際には GG1 基をカ  
ットオフし、片側 1 基で 80%~100%運用す  
ることでスロットルを達成する。

これまで、GG1 基における定格流量時の供  
給系圧損特性<sup>[1]</sup>、燃焼室内部の温度分布や性  
能評価<sup>[2]</sup>がなされた。加えて、90%流量と  
80%流量におけるスロットリング燃焼試験の  
流量予測<sup>[3]</sup>や 70%流量における流量決定精度  
と遷移特性<sup>[4]</sup>に関する報告が行われてた。

本稿では、70%流量における GG スロット  
リング燃焼試験の推進剤流量予測精度向上の  
アプローチと結果について示す。また、運用  
に向けたオリフィス径の検討について述べる。

## 2. 試験装置

本学で使用する GG は、点火器と噴射器、燃  
焼器、エルボの 4 つの部品で構成されており、  
液体酸素(LOX)とエタノール(EA)を O/F=0.45  
の一定の比率で噴射器より燃焼室へ供給し燃  
焼させることで、タービン駆動ガスを生成す  
る役割を持つ部品である。

燃焼試験を行う GG 供給系系統図を Fig. 2 に  
示す。LOX 側と EA 側のどちらもカードルから  
供給される窒素ガスにより任意の圧力でタン  
クを加圧し、流調弁、主弁、インジェクタを  
通過し、燃焼室へと推進剤を供給する。  
Figure2 に示す通り、圧力・温度計測点はタン  
ク、タービン流量計上流、流調弁上流と下流、  
インジェクタの計 5 点存在する。

スロットリング燃焼試験では、はじめに定  
格で燃焼させ、その後タンク加圧値を変更せ  
ず、流調弁を試験中に任意の開度に変更させ  
ることで、流調弁での圧力損失を増やし、流  
量を変動させる。流調弁の開度と Cv 値の関  
係はリニア特性であり、開度 100%のときに

LOX 側が  $C_v=0.7$ 、EA 側が  $C_v=0.5$  である。

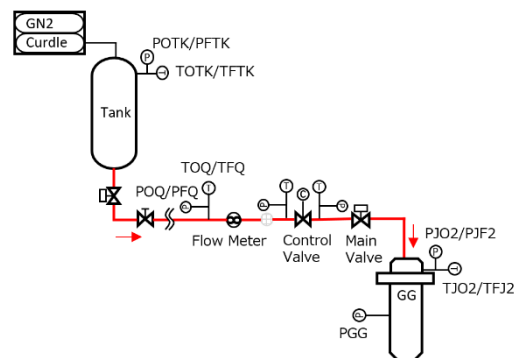


Fig. 2 供給系系統図

## 3. 推進剤流量予測手法

推進剤流量とタンク圧の関係は Eq. 1 のよ  
うに示すことができる。式に含まれる供給系  
レジスタンス  $R_{line}$  は、流し試験やスロットリ  
ング燃焼試験において取得した流量および各  
計測点での圧力値を用いて、Eq. 2 より算出  
した。また、燃焼圧力は Eq. 3 で表される。

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{P_{tank} - P_{GG}}{\frac{1}{2\rho C_d^2 A_{ori}^2} + \frac{R_{line}}{\rho}}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$R_{line} = \frac{\rho \Delta P}{\dot{m}^2} \quad \text{Eq. 2}$$

$$P_{GG} = \eta c^* \frac{(\dot{m}_{EA} + \dot{m}_{LOX})}{A_{th}} \quad \text{Eq. 3}$$

既に LOX 供給系・EA 供給系双方の定格およ  
び 90%流量、80%流量の流量予測は実施され  
ており、最大 5%の予測精度となっている<sup>[3]</sup>。  
しかし、70%流量で行った過去試験において  
LOX 流量の予測誤差が 10%となった<sup>[4]</sup>。試験  
結果より、インジェクタ部で気液二相化し Cd  
値が減少していることが明らかになった。そ  
のため、70%流量での予測では Cd 値を小さく  
して実施した。70%流量におけるスロットリ  
ング燃焼試験条件を Table1 に示す。また、  
70%流量における流調弁開度は LOX 側を 19%、  
EA 側を 42%と設定した。

Table 1 スロットリング燃焼試験条件

	タンク圧 [MPaG]		流量[g/sec]		O/F
	LOX	EA	LOX	EA	
定格	1.79	2.58	111	241	0.46
70%			77	167	

#### 4. 試験結果・考察

定格流量および 70%流量のスロットリング燃焼試験の結果を Table 2 示す。

Table 2 スロットリング燃焼試験結果

	タンク圧 [MPaG]		流量[g/sec]		O/F
	LOX	EA	LOX	EA	
定格	1.74	2.54	106	237	0.45
70%			76	165	

定格では、タンク圧が予測値より低くなり流量が少なくなった。試験終了後に試験時タンク圧で再度流量予測を行った結果、LOX 流量は 1.2%、EA 流量は 0.7%の誤差であった。このことから、タンク圧誤差が顕著に流量に影響を与えたと考える。一方、70%流量では予測値との誤差が 10%から 1.3%に改善された。また、目標として  $O/F=0.45 \pm 0.05$  としていたが、 $O/F=0.45 \pm 0.01$  に収めることができた。70%流量においては、タンク圧誤差よりも流調弁でのレジスタンスを正しく予測することで、多少のタンク圧の変動よりも大きな影響になると考える。これより、70%スロットルでの LOX 流量においても誤差 1%程度の高精度な流量予測が可能となった。

#### 5. オリフィス径の検討

前節まで述べてきた流調弁は非常に大きいため実機にそのまま搭載することが出来ない。そこで、電磁弁とオリフィスを複数個用いてスロットリングを行うことが検討されている。

供給系の仕様変更箇所を Fig. 3 に示す。



Fig. 3 供給系の仕様変更

流調弁を用いたスロットリング燃焼試験結果から、流調弁の各スロットル開度におけるレジスタンスを用いてオリフィス径を検討する。ここで、流量と圧力損失の関係式よりオリフィスにおけるレジスタンスは Eq. 4、バルブにおけるレジスタンスは Eq. 5 と表される。この際、オリフィス  $C_d$  は 0.9 と仮定する。

$$R = \frac{1}{2C_d^2 A_{ori}^2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$R = \frac{1.736 \times 10^9}{C_v} \quad \text{Eq. 5}$$

LOX 供給系における定格から 70%流量まで各スロットルでの流調弁開度と  $C_v$  値、レジスタンス  $R$  を Table 3 に示す。

Table 3 LOX 流調弁の諸元

流量	定格	90%	80%	70%
流調弁開度	100%	32%	22%	19%
$C_v[-]$	0.7	0.22	0.15	0.13
$R$ [ $\times 10^9 m^{-4}$ ]	2.48	7.75	11.3	13.1

レジスタンスは圧力損失要素が直列の場合要素の和、並列の場合、要素の逆数の和で表すことができる。加えて、総オリフィス断面積のみを求めるためには、 $C_v=1.5$  の電磁弁のレジスタンスを Eq. 5 より求め、流調弁にかかるレジスタンスから除く必要がある。この時の電磁弁のレジスタンスは、 $1.16 \times 10^9 m^{-4}$  となった。これより、オリフィスで必要なレジスタンス  $R_{orifice}$  と断面積を Table 4 に示す。

Table 4 LOX 供給系での $R_{orifice}$ と断面積

	定格	90%	80%	70%
$R_{orifice}$ [ $\times 10^9 m^{-4}$ ]	1.32	6.59	10.1	1.19
総断面積 [ $mm^2$ ]	21.6	9.67	7.81	7.20

Table4 より、定格時と 70~90%流量ではオリフィスの総断面積が大きく異なることが分かる。これより、3 つのオリフィスでは定格流量を得ることが難しい。そこで、GG1 基での要求性能であるスロットリング下限 80%でオリフィス径を検討すると、 $\phi 4.76$ ,  $\phi 3.50$ ,  $\phi 3.16$ となった。オリフィスの組み合わせとしては、定格時に 3 つ、90%流量時に $\phi 3.50$ のみ、80%流量時に $\phi 3.16$ のみでの使用を考えた。今後 3 つのオリフィスで行う場合は、タンク加圧値を大きくし、定格時の供給系レジスタンスを大きくすることでオリフィスの総断面積を小さく運用することが一案である。

EA 供給系においても密度 $\rho = 790 kg/m^3$ と仮定し、同様の検討を行う。定格から 70%流量まで各スロットルでの開度と Cv 値、レジスタンスを Table5, オリフィスに必要なレジスタンス $R_{orifice}$ と断面積を Table 6 に示す。

Table5 EA 流調弁の諸元

流量	定格	90%	80%	70%
流調弁開度	100%	75%	60%	42%
Cv[-]	0.5	0.38	0.30	0.21
R [ $\times 10^9 m^{-4}$ ]	3.47	4.63	5.79	8.27

Table 6 EA 供給系での $R_{orifice}$ と断面積

	定格	90%	80%	70%
$R_{orifice}$ [ $\times 10^9 m^{-4}$ ]	2.32	3.47	4.63	7.11
総断面積 [ $mm^2$ ]	16.3	13.3	11.5	9.32

Table 6 の総断面積より、オリフィス径を検討すると $\phi 4.12$ ,  $\phi 3.84$ ,  $\phi 3.44$ となった。オリフィスの組み合わせとしては、定格時に $\phi 4.12$ ,  $\phi 3.44$ , 90%流量時に $\phi 4.12$ のみ、80%流量時に $\phi 3.84$ のみ、70%流量時に $\phi 3.44$ のみの使用を考えた。しかし、EA は外気温により密度が変化するため、オリフィスの 1 つは常時変更する必要があると考察する。

## 6. 結言と今後の展望

70%スロットルにおける LOX 流量予測では気液二相化を加味して Cd を低く設定し予測を行うことで、誤差 1.3%と大幅に改善することができた。また、流調弁を用いたレジスタンスからオリフィス径の検討を行った。今後は、検討を行った 3 つのオリフィスでのスロットリング燃焼試験を実施し、供給系特性を取得しさらなる流量決定精度の向上につなげていく予定である。

### 参考文献

- [1] Koki Arimatsu et al., "On the Pressure Loss Characteristics of Liquid Oxygen Considering a Heat Input", Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol.19, No.2, pp.217-223, March 2021
- [2] 稲積 慧 他, LOX/エタノールガス発生器における燃焼時の表面温度計測, 第 64 回宇宙科学技術連合, JSASS-2020-4557, 2020
- [3] 住吉 政哉 他, GG-ATR エンジン用 LOX/エタノールガスジェネレータのスロットリング燃焼試験, 令和 3 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2021-017, 2022
- [4] 中田 大将 他, LOX/エタノールガスジェネレータのスロットリング時流量決定精度と遷移特性, 第 66 回宇宙科学技術連合, JSASS-2022-4646, 2022