

## 伸展ノズルの研究

### Research on an Extendible Nozzle

伸展ノズルに作用する動的荷重特性

Characteristics of Dynamic Loads acting on an Extendible Nozzle

ロケットエンジン技術センター / エンジンシステムチーム

長谷川恵一、日下和夫、佐藤政裕、

只野真、森谷信一、佐藤正喜

Rocket Engine Technology Center / Rocket Engine System Team

Keiichi Hasegawa, Kazuo Kusaka, Masahiro Sato,

Makoto Tadano, Shin-ichi Moriya, Masaki Sato

#### Abstract

An extendible nozzle is considered to be a feasible device to improve the performance of booster engines because it has possibilities to provide altitude compensation and to achieve higher specific impulse. The booster engines with the extendible nozzle have to deploy the extendible nozzle during firing. For the design of the extendible nozzle and its driving mechanics, it is required to clarify the characteristics of dynamic loads acting on the extendible nozzle. In order to clarify the characteristics of dynamic loads, firing tests on a high altitude test stand were conducted with varying the ambient pressure to simulate the altitude change. The thrust and side loads acting on the extendible nozzle were evaluated quantitatively by use of a supporting system consisted of six rods. Using the measured load data and the calculated nozzle pressure distribution data, the history of flow separation point was estimated. It was found that the large inverse thrust induced during the transition between full-flow and fully separated flow was caused by the pressure balance around the extendible nozzle.

#### 1. はじめに

近い将来の再使用型ロケットのブースターエンジンの性能向上の一案として、高度補償能力を備えた伸展ノズルが有望であると考えられている。本研究は、高度補償型伸展ノズルの設計技術の構築に不可欠な動的荷重の定量的評価を目的として、平成15年度より実施している課題である。以下に背景とこれまでの研究経緯について記す。

##### 1. 1 背景

高度補償型伸展ノズルとは、ノズル出口面積の小さい低膨張ノズル（固定ノズル）の先にノズル出口面積の大きな可動式の高膨張ノズル（伸展ノズル）を備え、エンジン作動中でのノズル伸展により高度上昇に伴い変化する環境圧に対してノズル膨張比（ノズル出口面積をスロート面積で除した無次元パラメータ）を変化させて、低高度から高高度まで高いノズル性能を引き出すものである。Fig.1 に伸展ノズルを備えたブースターエンジンの概念図を示す。LE-7A クラスのブースターエンジンへの適用を想定した予備的な概念検討によれば、比推力

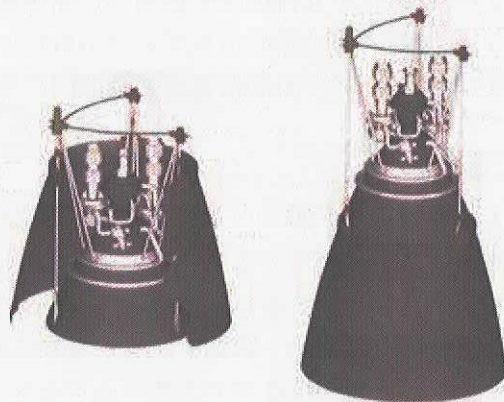


Figure 1. Conceptual image of booster engine with extendible nozzle

460 以上、推重比 70 以上を達成できる可能性がある。

伸展ノズルを備えた液体ロケットエンジンとしては、Delta III ロケットの上段エンジンである RL10B-2<sup>1)</sup>が既に実用化されており、現在開発中の Vinci<sup>2)</sup>や MB-XX<sup>3)</sup>でも伸展ノズルの採用が予定されているが、これらは収納時のエンジン全長を短くして機体段間部の軽量化を図った上段エンジン用の省スペース型伸展ノズルであり、機体分離後上段エンジン点火前にノズルを伸展させる。これに対し、高度補償型伸展ノズルを備えたブースターエンジンでは、エンジン作動中にノズル伸展を行う必要があるため構造・材料の観点からの課題も多岐に渡り<sup>4)</sup>、技術的難易度が高く世界でも実用化した例はない。

## 1. 2 研究経緯

高度補償型伸展ノズルの実用化のためには、設計資料となる技術データの取得、とりわけ、環境圧変化により低膨張状態（燃焼ガス流れが固定ノズル内に収まっている状態）から高膨張状態（燃焼ガス流れが伸展ノズル出口まで広がっている状態）へ変化する際の過渡的な燃焼ガス流れに関する現象の解明と、燃焼ガス流れのはく離や付着により動的に変化する伸展ノズルの荷重を把握することが重要となる。過去に実施した高度補償型ノズルに関する基礎研究では、各種ノズルを用いた高空燃焼試験を実施して、機体を損傷するような大規模な燃焼ガスの逆流がないこと、伸展過程で燃焼ガスが伸展ノズルに付着する際の熱伝達率は伸展完了時に比べ約 20% 増加することを明らかにした<sup>5) 6)</sup>。平成 15 年度に実施した伸展ノズルの研究では、伸展ノズルに作用する動的荷重の把握を目的に、小型単軸ロードセルを備えた 4 本の片持ちロッドからなるノズル支持機構を採用し、高度上昇を模擬した環境圧変化下での高空燃焼試験を行った。特定のノズル圧力比（燃焼圧を環境圧で除した無次元パラメータ）において燃焼ガスのはく離縁位置が固定ノズルと伸展ノズルの隙間を飛び越え、その際に動的荷重の横推力成分が発生することを明らかにするとともに、試験データより動的荷重の定量的評価を試みた<sup>7)</sup>（24th ISTS において Best Poster Award 1st prize 受賞）。

## 2. 研究概要

平成 15 年度に実施した研究では、伸展ノズルに作用する動的荷重について、定性的な特性を把握するとともに定量的評価を試みたが、動的荷重の定量的評価については難点があった。これは、燃焼ガス加熱等による伸展ノズルの変形が片持ちの支持ロッドに曲げ変形を生じさせ、各ロッドに備えた小型単軸ロードセルに不要な曲げ荷重が作用した結果、ロードセルでの荷重計測精度が低下したためであることが後の有限要素解析から判明した。

平成 16 年度には、上記の問題点を解決して、伸展ノズルに作用する動的荷重を定量的に評価するため、以下の項目を実施した。

- (1) 伸展ノズル動的荷重の定量的評価のための新たなノズル支持機構の考案・試作
- (2) 新ノズル支持機構を採用した高空燃焼試験の実施
- (3) 伸展ノズル動的荷重データの取得と検証
- (4) 伸展ノズル動的荷重の変動原因の検討

## 3. 成果概要

- (1) 伸展ノズル動的荷重の定量的評価のための新たなノズル支持機構の考案・試作

伸展ノズルに作用する動的荷重を定量的に評価するため、6 本ロッドによる新たなノズル支持機構を考案・試作した。6 本ロッドによるノズル支持機構を採用した供試体セットアップの状況を Fig.2 に示す。噴射器、燃焼器、固定ノズルからなるサブスケールエンジンは噴射器側がブラケットに固定されており、伸展ノズルは 6 本の支持ロッドを介してブラケットに固定する。伸展ノズルに作用する荷重 ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ : Fig.2 参照) は、各支持ロッドに取り付けられた小型ロードセルでの計測値を基に算出する。小型ロードセルは引張り圧縮両用の単軸ロードセルであり、曲げ荷重が作用する際には単軸荷重が正確に



計測できない。そこで、各支持ロッドの両端にボールジョイントを取付け、ロードセルに不要な曲げ荷重が作用しない構造とした。このロッドは1本につき1自由度しか拘束できないため、伸展ノズルを所定の位置に保持する（6自由度を拘束する）ためには6本のロッドで支持する必要がある。なお、ここで考案した6本ロッドによる動的荷重測定方法に関しては、特許出願した（特願 2005-65200号）。

(2) 新ノズル支持機構を採用した高空燃焼試験の実施

新たに考案・試作した6本ロッドのノズル支持機構を採用した金属製薄肉伸展ノズルおよびサブスケールエンジン（Fig.2 参照）を用いて燃焼試験を実施した。燃焼器は水冷却式であり、推進剤としては液体酸素/ガスメタンを用いた。燃焼試験には角田宇宙センター西地区の高空燃焼試験設備を用い、高度変化に伴う環境圧変化を模擬した高空燃焼試験では、低压室リーク弁の開度を調節することによって環境圧（低压室圧）を制御した。燃焼試験結果一覧を Table 1 に示す。

固定ノズルのノズル膨張比が  $\epsilon=51.7$ （ノズル収納状態）であるのに対し、伸展ノズルのノズル膨張比は  $\epsilon=124.9$ （ノズル伸展完了状態）であり、支持ロッドを交換すればノズル収納状態からノズル伸展完了状態への伸展過程を模擬することが出来る。今回の試験では伸展完了時のノズル位置で試験を行った。

(3) 伸展ノズル動的荷重データの取得と検証

燃焼時間は各目的に合わせて徐々に増加させ、最終的に 45～50 [sec]の長秒時燃焼で動的荷重データを取得した。試験番号 4054 を代表例として、取得した試験データを Fig.3 に示す。Fig.3 a) は燃焼圧、環境圧および主推力の履歴、Fig.3 b) は伸展ノズルに作用する荷重 ( $F_x, F_y, F_z$ ) とノズル圧力比の履歴である。環境圧制御により、高真空状態（時刻  $T1$ 、環境圧 3torr）→低真空状態（時刻  $T2$ 、環境圧 75torr）→低真空状態（時刻  $T3$ 、環境圧 5torr）とし、高膨張状態および低膨張状態を繰り返し発現させた。Fig.4 は時刻  $T1$  および  $T2$  における伸展ノズル出口付近での燃焼ガス流れの様子であり、時刻  $T1$  では高膨張

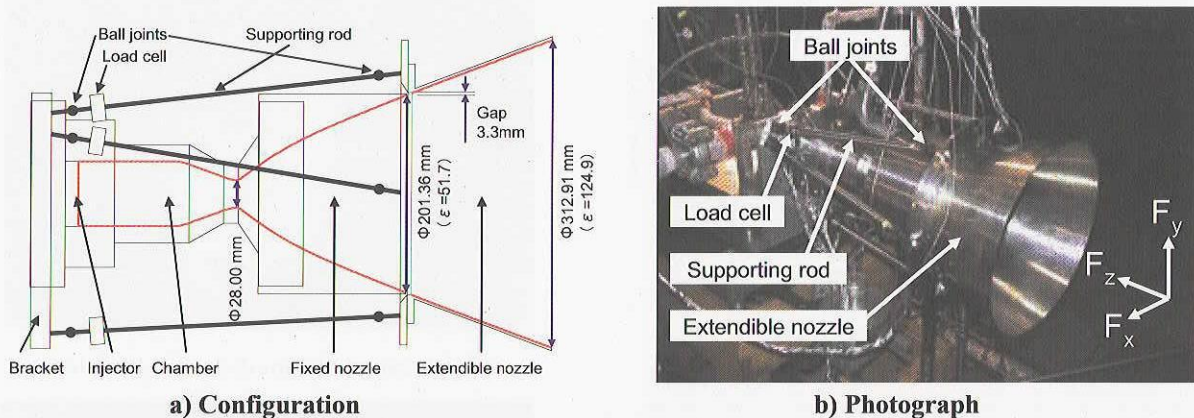


Figure 2. Test setup of combustor and extendible nozzle (Fully deployed position).

Table 1 Summary of hot firing test results

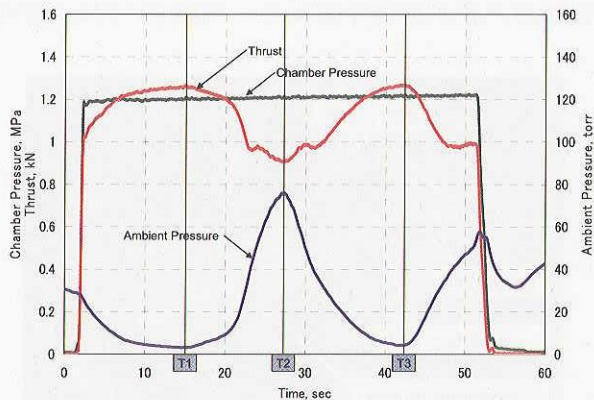
試験番号 T/N	4049	4050	4051	4053	4054
目的	計測・治具 チェックラン	HATS定常 燃焼確認	低压室圧 制御確認	動的荷重把握	動的荷重把握 (再現性確認)
試験条件	S/L	HATS	HATS	HATS	HATS
伸展量 [%]	100	100	100	100	100
燃焼時間 t [sec]	10	18	35	45	50
燃焼圧 $P_c$ [MPa]	1.18	1.18	1.20	1.21	1.22
混合比 LOX/GCH4	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9
最大主推力 F [N]	537 (@767torr)	1240 (@3.1torr)	1247 (@2.8torr)	1274 (@3.2torr)	1265 (@4.1torr)



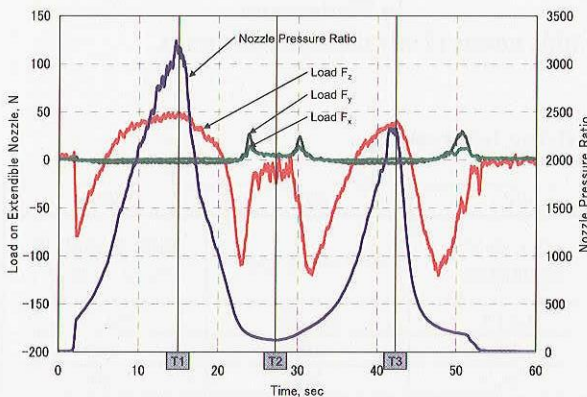
状態、時刻  $T2$  では低膨張状態となっていることが確認できた。Fig.3 b) において、伸展ノズルに作用する荷重の主推力方向成分  $F_z$  の履歴を見れば、高膨張状態の時刻  $T1$  および  $T3$  では約 50[N]の正推力、低膨張状態の時刻  $T2$  では約-10[N]の逆推力が計測されている。また、高膨張状態から低膨張状態（時刻  $T1 \rightarrow$  時刻  $T2$ ）、あるいは、低膨張状態から高膨張状態（時刻  $T2 \rightarrow$  時刻  $T3$ ）への過渡状態では、一時的に約-120[N]の大きな逆推力が計測されており、変動の激しい動的荷重の特性が確認された。一方、伸展ノズルに作用する荷重の横方向成分である  $F_x, F_y$  に関しては、過渡状態においてのみ突発的な荷重が計測されており、約 30[N]の横力  $F_r (= \sqrt{F_x^2 + F_y^2})$  の発生を示唆している。

変動の激しい動的荷重  $F_z$  について荷重測定値の妥当性を検証するため、伸展ノズルの内外圧から算出される推定値との比較を行った。動的荷重の推力方向成分である  $F_z$  は、燃焼ガス流れのはく離位置を適切に推定すれば、内外圧のバランスから推定することが可能である。伸展ノズルの外圧としては、計測された環境圧  $P_a$  を用いることとし、内圧については計測データがないため TDK 解析による圧力分布を燃焼ガス流れ付着領域の内圧  $P_n$  とした。また、燃焼ガスはく離領域の内圧  $P_s$  は、 $P_s = 0.97 \times P_a$  と仮定した。本仮定は時刻  $T2$  における  $F_z$  の試算を基にしたものであるが、 $P_s$  は環境圧  $P_a$  より若干低めの値を取る<sup>8)</sup>ことから、妥当な仮定と判断した。

Fig.5 に、推定したはく離位置の履歴 (Fig.5 上段) とそれに基づいて計算した  $F_z$  の推定値の履歴 (Fig.5 中段) を示す。ここでは  $F_z$  の計測値の履歴も合わせて示した。 $F_z$  の計測値と推定値は、定性的にも定量的にも非常に良い一致を示していることから、6本ロッドによる荷重計測方法を用いることにより、伸展ノズルの動的荷重が定量的に評価できることが確かめられた。



a) Histories of pressure and thrust

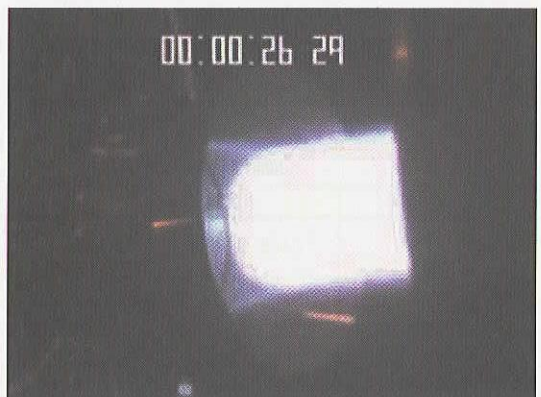


b) Histories of loads on extendible nozzle and nozzle pressure ratio

Figure 3. Results of T/N 4054 with fully deployed extendible nozzle.



a) High expansion mode ( $t=T1, P_a=3$  torr)



b) Low expansion mode ( $t=T2, P_a=75$  torr)

Figure 4. Photograph of nozzle exit flame.



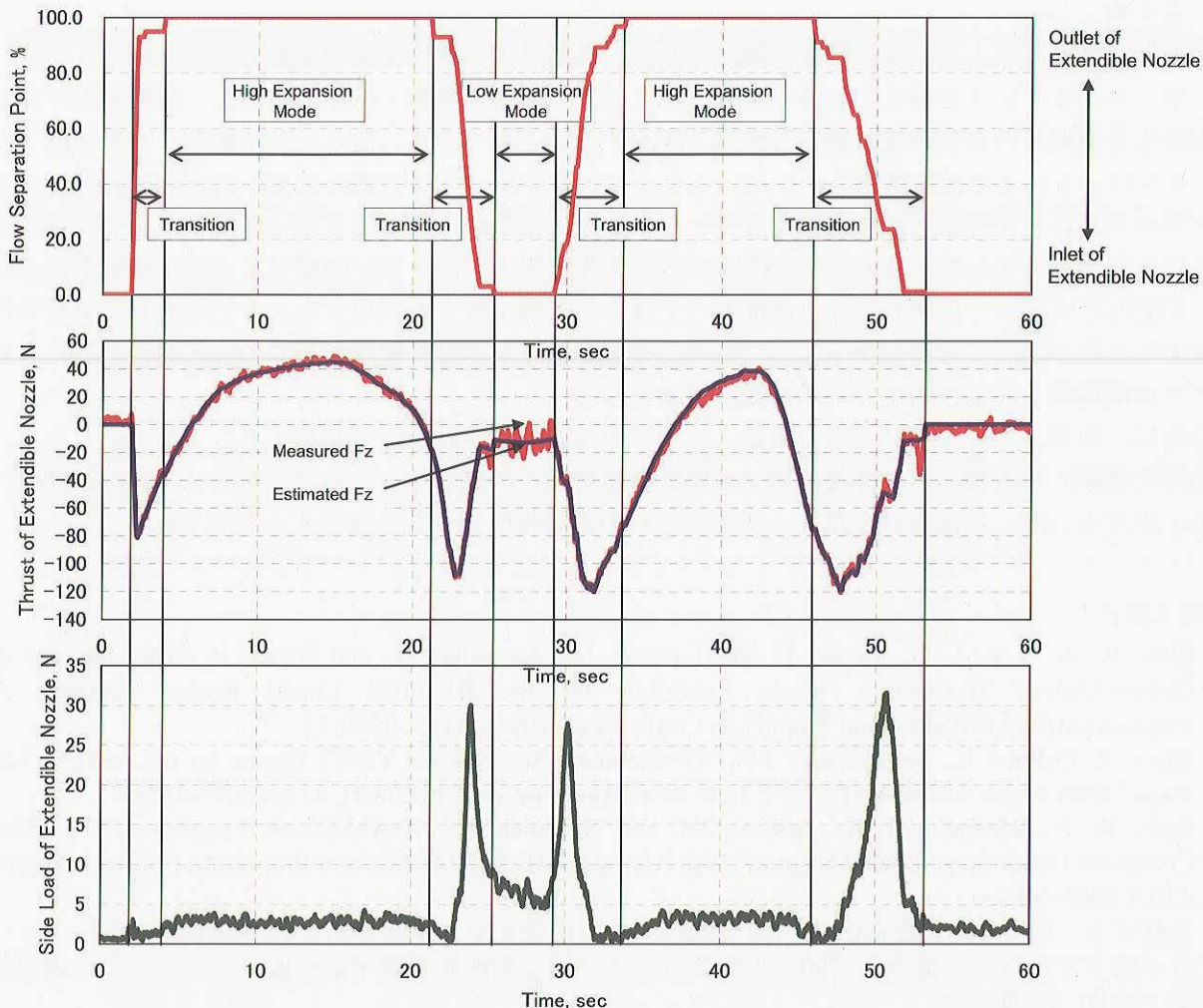


Figure 5. History of flow separation point and relation to thrust and side load.

#### (4) 伸展ノズル動的荷重の変動原因の検討

荷重  $F_z$  の履歴をばく離位置の履歴と照らし合わせ、 $F_z$  の変動原因について検討した結果、以下のような現象により激しい変動が生じていることが推察できた。まず、着火直後は低膨張状態から高膨張状態に至る過渡状態であり、ばく離縁は伸展ノズル入口から出口に向かって急激に移動する。このとき外圧によって受ける力が内圧によって受ける力よりも大きいため逆推力が発生する。着火と同時に流れは一気に膨張して高膨張状態に変化し、環境圧の低下に伴い外圧による力が内圧による力よりも小さくなるため  $F_z$  は徐々に増加して極大値をとる。その後環境圧の上昇とともに  $F_z$  は低下し、時刻  $t=21.5[\text{sec}]$  近傍より伸展ノズル出口からのはく離が始まり、伸展ノズル入口へ向けてはく離縁位置が移動する。このとき内圧分布による力と環境圧による力の不均衡により一時的に大きな逆推力が発生する。また、完全にはく離した状態では正推力は発生せず、 $P_s$  が  $P_a$  よりも低いことから若干の逆推力が発生する。

Fig.5 には、 $F_x$  および  $F_y$  の計測値から求めた横力  $F_r (= \sqrt{F_x^2 + F_y^2})$  の履歴 (Fig.5 下段) も合わせて示した。 $F_r$  の極大値はいずれもばく離縁位置がノズル内壁に沿って移動する過渡状態で発生しており、ばく離縁位置がノズル隙間を飛び越える際、すなわち流れが不安定になってばく離縁の軸対象性が崩れるときに横力が発生する。

#### 4. まとめ

本研究では、平成15年度の研究で難点のあった伸展ノズル動的荷重の定量的評価を解決すべく、両端にボールジョイントを備えた6本のロッドによる支持機構を考案・試作・採用し、高度変化に伴う環境圧変化を模擬した高空燃焼試験を計画通り実施することができた。得られた試験データを検証した結果、6本ロッドによる荷重測定方法を用いることにより伸展ノズルの動的荷重が定量的に評価できることが確かめられ、今回得られた動的荷重データの数値は定量的に信用できる設計情報として利用可能であることが分かった。このことより環境圧が変化する状況下でエンジン作動中にノズル伸展を行う際には、正推力だけでなく正推力以上の逆推力と正推力と同等の横力が作用することを考慮して伸展条件を設定する必要があることが分かった。このような伸展ノズルの設計情報としての知見が得られたことはノズル伸展機構を設計する上で有用な設計情報となる。

今後は、伸展ノズルの設計技術の構築に不可欠な基礎的な設計情報を蓄積することを目的として、伸展過程を模擬した各種ノズル伸展位置での動的荷重特性を評価するとともに、伸展ノズルに取り付けた圧力・温度センサ、熱流束計を用いノズル内流れの過渡特性データを取得する計画である。

#### [参考文献]

- 1) Ellis, R. A., Lee, J. C., Payne, F. M., Lacoste, M., Lacombe, A. and Joyez, P., "Development of a Carbon-Carbon Translating Nozzle Extension for the RL10B-2 Liquid Rocket Engine," 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (1997), AIAA 97-2672.
- 2) Alliot, P., Dalbies, E., and Delange, J-F., "Development Status of the VINCI Engine for the Ariane 5 Upper Stage," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (2003), AIAA 2003-4484.
- 3) Sack, W. F., Watanabe, J. H., Atsumi, M., and Nakanish, H., "Development Progress of the MB-XX Cryogenic Upper Stage Rocket Engine," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (2003), AIAA 2003-4486.
- 4) 佐藤正喜, 日下和夫, 森谷信一, 熊川彰長, "再使用型ロケット用伸展ノズルの開発課題について," 日本航空宇宙学会北部支部 2002 年講演会および第3回再使用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集, (2002), pp.291-296.
- 5) Kusaka, K., Kumakawa, A., Niino, M., Kon-no, A., and Atsumi, M., "Experimental Study on Extendible and Dual-Bell Nozzles under High Altitude Conditions," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, (2000), AIAA 2000-3303.
- 6) 只野真, 佐藤政裕, 日下和夫, 佐藤正喜, 熊川彰長, 長谷川恵一, 高橋秀明, 今野彰, 青木宏, 名村栄次郎, 渥美正博, "再使用型ロケットエンジン用伸展ノズルおよびデュアルベルノズルの基礎研究," (2003), NAL TR-1464.
- 7) Sato, M., Tadano, M., Sato, M., Moriya, S., Kusaka, K., Tomita, T., Hasegawa, K., and Kumakawa, A., "Research Progress of Experimental Study on an Extendible Nozzle," 24th International Symposium on Space Technology and Science, (2004), ISTS 2004-a-33p.
- 8) S. B. Verma, "Study of Flow Separation in Truncated Ideal Contour Nozzle," Journal of Propulsion and Power, Vol.18, No.5 (2002), pp. 1112-1121.