

# エジェクタノズル形状が空気吸い込み性能へ 及ぼす影響についての数値解析

田代 達也・那賀川 一郎  
(東海大学大学院・東海大学)

記号

- $\dot{m}_i$ : エジェクタノズル吸い込み質量流量 [kg/s]
- $\dot{m}_r$ : コアロケット排出ガス質量流量 [kg/s]
- $v_i$ : エジェクタノズル吸い込み流れ速度 [m/s]
- $v_r$ : コアロケット排出ガス速度 [m/s]
- $v_e$ : エジェクタノズル出口流れ速度 [m/s]
- $\eta_e$ : 混合効率

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

次世代の宇宙往還機として二段式の宇宙往還機であるTSTOシステム (Two-Stage-to-Orbit) が検討されている。

本研究室では一段目に有翼飛行体を用いることを想定し、推進器として一段目にエジェクタロケットとラムジェットとの複合推進システム、二段目にハイブリッドロケットを利用することを考えこれら推進器に関する研究を行っている。

一段目に用いる複合推進器は、 $M=0\sim 2$  程度までの加速をエジェクタロケットが行い、 $M=2\sim 6$  程度までの加速をラムジェットで行うことを想定する。本研究はエジェクタロケットを研究対象とし、特に空気吸い込みに影響を及ぼすエジェクタノズルに関する研究を行った。

## 1.2 エジェクタロケット

### 1.2.1 エジェクタ効果

エジェクタロケット<sup>(1)</sup>とはエジェクタ効果を用いた推進器であり、エジェクタ効果は高压流体を加速することによって低圧の空間を生成し、外部の流体

を吸引するものである。(図1)

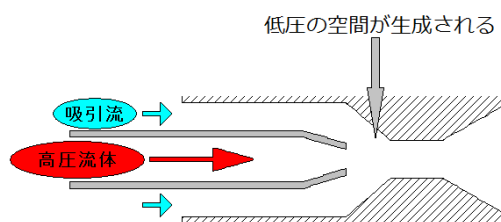


図1 エジェクタ効果

### 1.2.2 エジェクタロケット

本研究室で想定するエジェクタロケットは(図2)、高压流体に未燃焼ガスを含ませたハイブリッドロケット (コアロケット) の排出ガスを用い、吸引流として大気を吸い込む。その後エジェクタロケット内で未燃焼ガスと空気をを用いて燃焼を行って推力を得る。

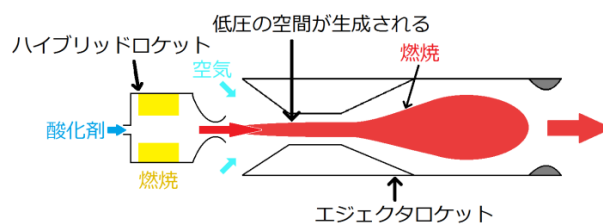


図2 エジェクタロケット

### 1.2.3 エジェクタノズル

大気の吸い込みは、コアロケットガスと大気との混合が行われるエジェクタノズル部 (図3) に大きく影響されると考えられる。

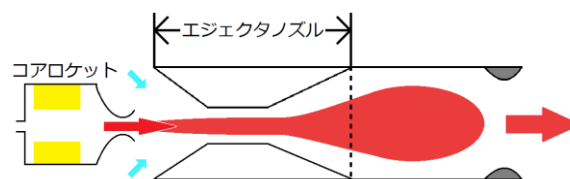


図3 エジェクタノズル

エジェクタノズルでの運動量の関係は (1) 式と表せる。  $\eta_e$  は初期の運動量がエジェクタノズル出口で保持できている割合を表す。

$$\eta_e(\dot{m}_i v_i + \dot{m}_r v_r) = (\dot{m}_i + \dot{m}_r) v_e \quad (1)$$

エジェクタノズル性能は、

- ・コアロケット，大気が同一条件のもとでより多くの空気を吸い込める
- ・吸い込みで行う混合での運動量の損失が小さい

がより達成されるものがより良いエジェクタノズルである。

#### 1.2.4 研究概要及び目的

本研究は数値解析を用いてエジェクタノズルの形状（エジェクタノズル内部の形状・エジェクタノズルのコアロケットからの距離）を検討する。研究目的として、

- 1.過去に行った実験に基づいた数値解析を行うことによって実験時に発生していた事象を解明する
- 2.エジェクタノズル形状の変化が性能へ及ぼす影響を明らかにする

また、本研究はコアロケットにハイブリッドロケット排出ガスを用いた研究の前段階としての実験であるコアロケットに酸素ガスを用いるコールドフロー実験に基づいて行う。

### 2.供試体及び解析条件

#### 2.1 供試体

本研究で行った数値解析は、実験に基づいた解析（目的 1）、及び「実験に基づいた解析」を基準としてエジェクタノズルの形状を変更して行った解析（目的 2）である。

過去に行ったエジェクタノズルに関しての実験で用いた実験装置図を図 4 に示す。この実験装置を用いた実験ではエジェクタノズルのみを研究対象としていたため、エジェクタノズル後方の構造は省略されている。本研究で行う数値解析は実験に基づいて

行うので、同様にエジェクタノズル後方を省略して実験条件になるべく近付ける。



図 4 エジェクタノズル実験

※他の装置図とは左右が逆転している

図 5 に数値解析を行った計算範囲、及び各部名称を示す。

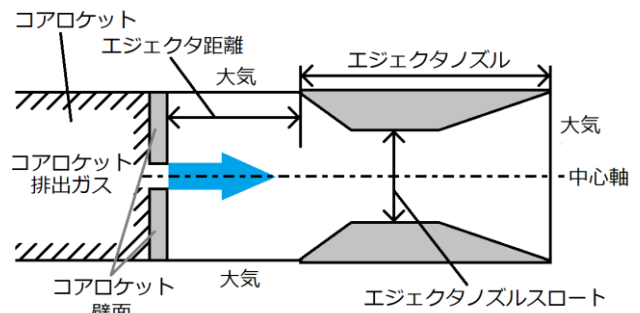


図 5 計算範囲（断面図）

実験装置のコアロケットのノズル付近形状は、図 4 で見えていない部分も含めて凹凸があり、この形状を今回用いた解析プログラムで再現するのは難しい。これよりコアロケットのノズル付近は凹凸のない壁面と仮定し、図 5 に示した計算範囲を定めた。また、エジェクタノズルの全長は 150mm、及び入り口・出口の径は 68mm である。

次に、解析を行ったエジェクタノズルの各部寸法をまとめる。行った解析は実験を基にした基準形状、およびエジェクタノズル形状を変更した 3 パターンである。形状の変更に使ったパラメータを図 6 に示し、各形状において変更した値を表 1 に示す。また、コアロケット、大気のパラメータはどの解析においても同じ値を用いた。詳細については次の項で示す。

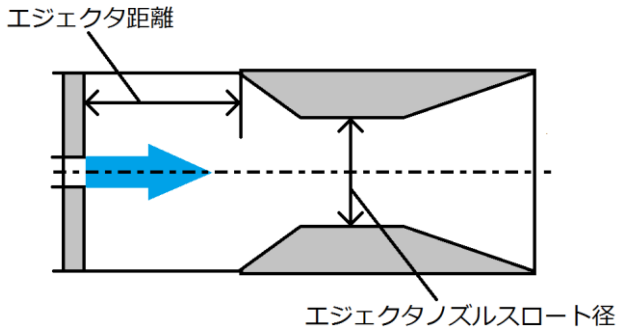


図 6 変更パラメータ

どの形状においても、エジェクタノズルの長さ、エジェクタノズル入口からスロートまでの長さ、及びスロートの長さを等しくした。

表 1 エジェクタノズル形状

形状	エジェクタノズル スロート径	エジェクタ距離
形状 1 (基準)	40mm	55mm
形状 2	30mm	55mm
形状 3	40mm	30mm
形状 4	30mm	30mm

## 2.2 解析条件

まず、数値解析に用いた解析プログラムについてまとめる。

支配方程式：軸対称ナビエ・ストークス方程式

離散化手法：有限体積法

時間積分：オイラー陽解法

数値流束：SLAU

今回の解析で用いたプログラムは層流のみを再現できるプログラムである。また、軸対称方程式を用いるので、計算格子は二次元で軸で分けた断面を用いる。また、コアロケット側の固体壁及びエジェクタノズル内側表面は固体壁とした。

次にコアロケット及び大気のパラメータについてまとめる。実験は静止状態・1気圧のもとの通常の屋内で行われたので、空気の吸い込み口及び流れが流出する出口側では大気圧を内挿する。また、実験でのコアロケットは酸素ガスを質量流量0.01998 kg/s, 速度 326m/s, 不足膨張で噴射していた。しかし、本研究では解析プログラムの都合より流出ガスを空

気・適正膨張とする。(実験でのコアロケット流れは、コアロケット内でチョークさせてから先細ノズルより $M=1$ として流出させていたが、種々の原因により速度が音速より低い値として求まった。実験時に正確な気温を測定していなかったことも踏まえて、本研究では音速より低く求まった速度を用いる)

本研究ではコアロケットガス及び吸い込み流れの両方で空気を用い、比熱比:1.4, 気体定数:287.4 (J/K・kg), プラントル数:0.717, 粘性係数は $0^{\circ}\text{C}$ での粘性係数を基にしてサザーランドの式より求めた(サザーランドの式で用いた定数は110.4である)。

## 3.解析結果

### 3.1 実験を基にした解析 (目的 1)

本研究で行った数値解析での計算条件と実験条件では多くの違いがあるので、ここでは数値解析及び実験それぞれで見られた現象を比較した後、数値解析結果を用いて内部の状態を把握していく。

実験では図 7 に示すエジェクタノズルスロート内側表面の静圧を測定しており、ここでは大気圧よりも低い圧力が測定された。

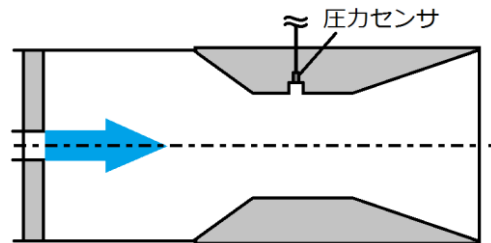


図 7 エジェクタノズルスロート内側表面静圧

数値解析でも同様に、大気圧よりも低い圧力が測定された。図 8 に圧力分布を示す。(図 8 では、大気圧以上及び大気圧-5Pa 以下は省略して同一の色で示している)

今後示す解析結果の図では、コアロケットの噴射は軸対象プログラムを用いているので図の左下より行われている。

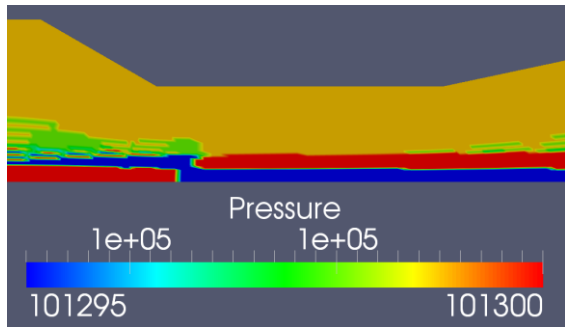
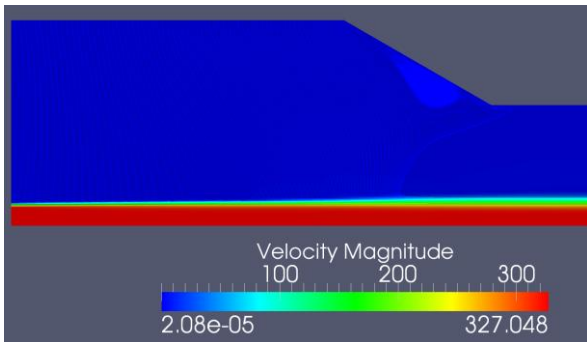


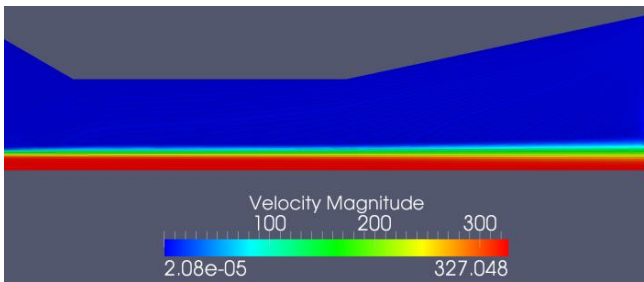
図 8 形状 1 スロート圧力分布 (大気圧 $\sim$ -5Pa)

次に、数値解析結果を用いて内部の状態について検討する。

図 9 に速度分布図、図 10 に圧力分布図、図 11 に圧力分布に速度ベクトルを重ねた圧力-速度ベクトル図を示す。

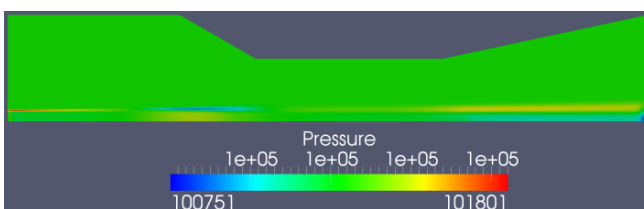


9-a 入り口側

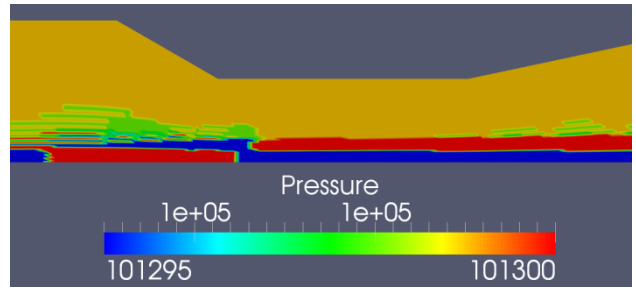


9-b 出口側

図 9 速度分布図及び流線



10-a 全体図



10-b (大気圧 $\sim$ -5Pa)

図 10 圧力分布図

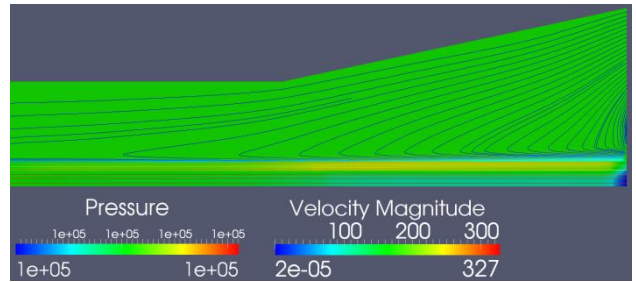


図 11 圧力-流線図

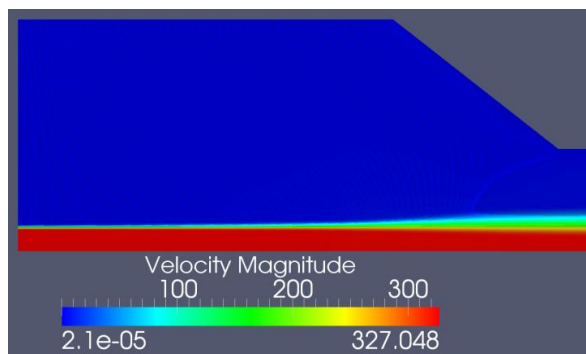
図 9-a での流線は、外部からノズル内へと向かう方向の流れを示している。また、9-b での流線は、出口から流れが逆流してノズル内に流れ込み、コアロケット流れに乗ってまた出口へと向かう流れを示している。図 9-a,b より前方からの吸い込みのほかにも後方からの吸い込みも発生していることが分かる。また、図 10 よりエジェクタノズル入口で圧力が最も低くなっていることが分かる(図 10-b も図 8 と同様な示し方である)。図 11 からは、エジェクタノズル後方で後方からの逆流流れとコアロケット流れとが接する付近で圧力が高くなっていることが分かる。これは、反対向きの流れが衝突して圧力が高まっているからだと考えられる。また、スロート付近では圧力の上昇は起こっておらず、これは解析プログラムが層流のみしか再現できない為に  $180^\circ$  逆向きの流れになってしまうと流れの衝突が発生しないからであると考えられる。

想定しているエジェクタロケットでは後方からの吸い込みは無いので、エジェクタノズルのみを対象とする実験ではエジェクタロケットのプランに則した結果を得ることができないことが分かった。

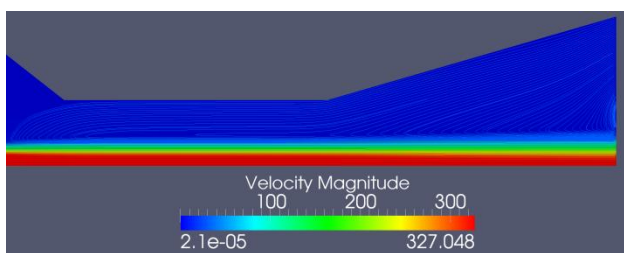
### 3.2 形状変化の影響 (目的 2)

#### 3.2.1 解析結果

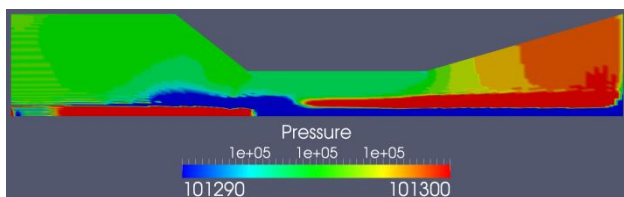
まず速度・圧力分布図について、3.1 で示さなかった基準形状以外での形状について示す。



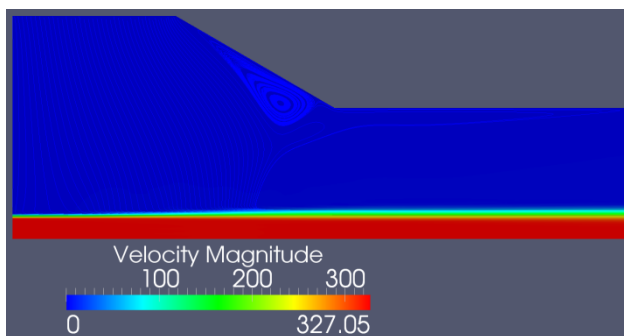
12-1a 入口側速度分布及び流線



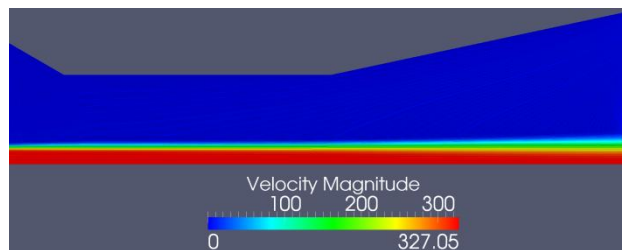
12-1b 出口側速度分布及び流線  
形状 2 速度分布図



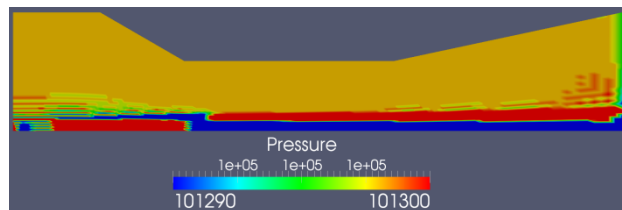
12-2 形状 2 圧力分布図（大気圧～-10Pa）  
図 12 形状 2（寸法の特徴を示す）速度分布図及び圧力分布図



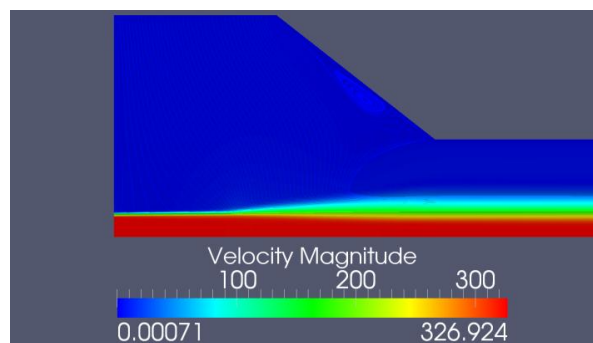
13-1a 入口側速度分布及び流線



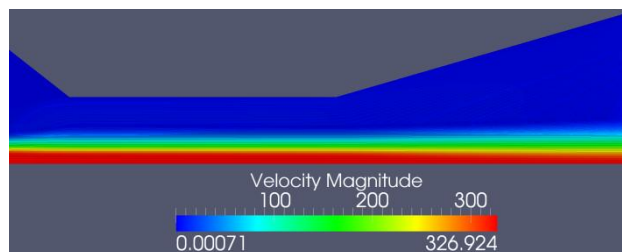
13-1b 出口側速度分布及び流線  
形状 3 速度分布図



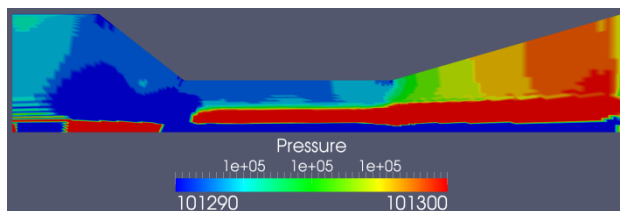
13-2 形状 3 圧力分布図（大気圧～-10Pa）  
図 13 形状 3（寸法の特徴を示す）速度分布図及び圧力分布図



14-1a 入口側速度分布及び流線



14-1b 出口側速度分布及び流線  
形状 4 速度分布図



## 14-2 形状4 圧力分布図（大気圧～10Pa）

図14 形状4（寸法の特徴を示す）速度分布図及び  
圧力分布図

形状2～4のどれにおいても形状1と同様にエジェクタノズル入口で最も圧力が低くなった。また、どの形状においても前方からの吸い込みのほかに後方から逆流し、方向転換して出口から出ていく流れが形状1と同様に表れた。

逆流の発生に伴ってエジェクタノズル後方でのコアロケット流れと逆流が衝突して起こる圧力上昇も見られた。

次に、解析を行った4パターンすべてでの吸い込み流量等の値をまとめる。また、値をまとめるにあたって次に示す量を定めた（図15）。表2に結果をまとめる。

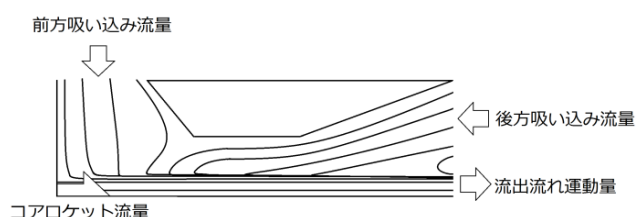


図16 値の取り方（流線も示す）

- ・前方吸い込み流量：逆流も含めた出口流量を求め、これよりコアロケットの流量を差し引いた値
- ・後方吸い込み流量：出口での逆流流量
- ・吸い込み流量：前方吸い込み流量と後方吸い込み流量を足し合わせた値
- ・初期運動量：コアロケットからの排出ガスの運動量
- ・流出流れ運動量：出口で流出する流れの運動量

表2 各流量・流出流れ運動量

形状	前方吸い込み流量 (kg/s)	後方吸い込み流量 (kg/s)	吸い込み流量 (kg/s)	流出流れ運動量 (kg・m/s <sup>2</sup> )
形状1	0.002215	0.007267	0.009482	6.4805
形状2	0.004110	0.007003	0.011113	6.4698
形状3	0.000758	0.008001	0.008760	6.4474
形状4	0.006042	0.009695	0.015737	6.4826

吸い込み流量は、エジェクタノズル内で作られる低圧部の大きさが同じならば後方からの吸い込みがなくても前方からのみで同じ流量を吸い込めると仮定したものと今後用いていく。これは後方からの吸い込みが無いエジェクタロケットの為の評価を行うためである。

### 3.2.2 解析結果比較

解析を行った4パターンの結果を比較する。

図17に混合効率 $\eta_e$ —吸い込み流量グラフを示す。混合効率はコアロケットの運動量がエジェクタノズル出口で保持できている割合を示し、(2)式でも表せる。

$$\eta_e = \frac{\text{流出流れ運動量}}{\text{初期運動量}} \quad (2)$$

図17に示す混合効率—吸い込み流量グラフでは、混合効率がよく吸い込み流量が多い形状が性能の高いエジェクタノズルである。以下に図17及び各形状での圧力分布図等の解析結果より、エジェクタノズル形状が性能へ及ぼす影響及び原因の考察をまとめる。

- ・スロート径が小さい形状2及び4では吸い込み流量が増加している。これは、スロート径が小さいと壁面がコアロケット流れに近く、より低い低圧を作れ、また、低圧が作られているとコアロケット流れが低圧側に引き寄せられ混合が促進し、更なる低圧を作る助けをするからであると考えられる。

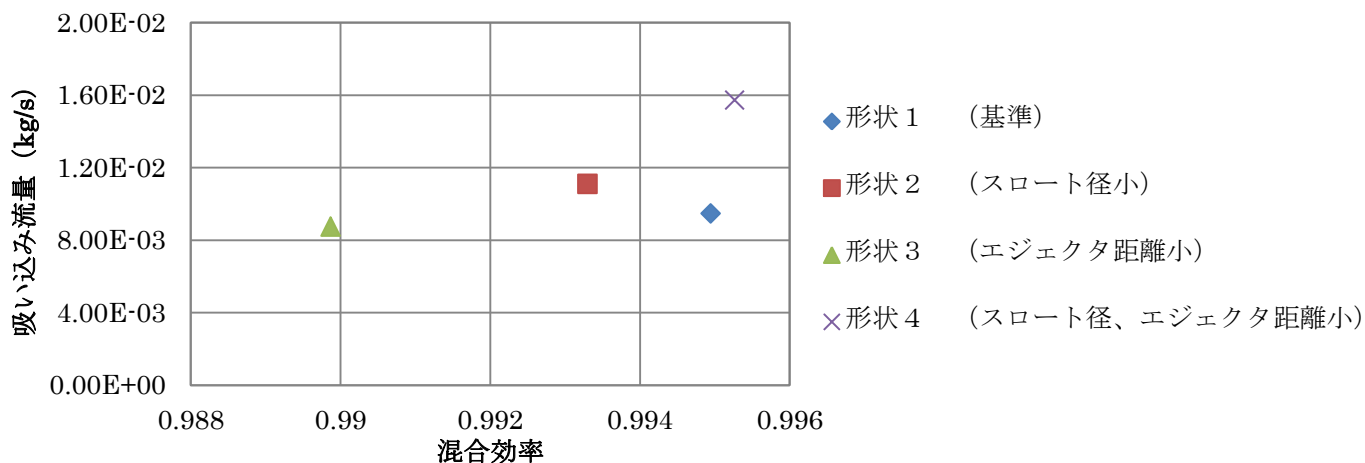


図 17 推力損失—吸い込み流量グラフ

・形状 2 では基準形状と比較して後方吸い込み流量は変化していないが前方吸い込み流量は増加しており (表 2), これはスロート径が小さいことによって作られたより低い低圧部がエジェクタノズル前方にあり, これに近い前方で吸い込み流量が増加したと考えられる.

・形状 3 では, エジェクタノズル入口の壁面に大きい渦が発生しており, この渦の形成によって運動量の減少が最も大きくなってしまったと考えられる.

・エジェクタ距離の短い形状 3 は基準状態と比較してさほど吸い込み流量は変化していないが, 前方吸い込み流量は減少して後方吸い込み流量は増加した. これは, 渦の発生によって前方からの吸い込みが抑制され, 作られた低圧の分だけ吸い込むために後方より多く吸い込んだためと考えられる. また, このことと基準形状及び形状 3 圧力分布図より, この 2 パターンでは形成される低圧部は同程度であると考えられる.

・スロート径小・エジェクタ距離短の形状 4 とエジェクタ距離短の形状 3 と比較すると圧倒的に形状 4 の性能が高い. エジェクタ距離短は性能を悪化させる働きをするならば, 形状 4 が最も高い性能とはならないはずである. よって渦の形成をさせなければエジェクタ距離短よっての性能向上はあり得ると考えられ, これはコアロケットとエジェクタノズル

でできる空間が狭まり, より低い低圧が作られて混合が促進し, 更に低い低圧部が形成されるからであると考えられる.

#### 4.まとめ

・数値解析結果より過去に行った実験でエジェクタノズル出口から吸い込む逆流が発生していた可能性を見つけた. また, これより実験手法の変更が必要であることが分かった.

・エジェクタノズルスロート径が小さくなるとより低い低圧部が形成され, 吸い込み流量を増加させる.

・エジェクタ距離が短くなることはより低い低圧部の形成を助け, 吸い込み流量を増加させる.

・エジェクタノズル入り口での渦の形成は, 吸い込みを抑制して運動量の損失を大きくする

・今回の解析で用いたプログラムは層流のみを模擬するものであり, 実際の流れを模擬できていない

#### 5.参考文献

- (1) 河内 俊憲・富岡 定毅・荻田 丈士 : 複合エンジンの静止大気中における吸い込み性能 第 1 報 : 数値計算による吸い込み性能予測 : 日本航空宇宙学会論文集 V o 1 5 6 : 2 0 0 8 年