B 3 1 0

NO-LIF 及び PSP を用いた側壁付きリニアエアロスパイクノズルの評価

○正 谷口真潮 (名大・院) 正 森英男 (名大) 西平竜太郎 (名大・院)
福島敦至 (名大・院) 正 新美智秀 (名大)

Investigation of Linear-Type Aerospike Nozzle with Sidewalls using NO-LIF and PSP

Mashio TANIGUCHI, Hideo MORI, Ryutaro NISHIHARA,
Atsushi FUKUSHIMA and Tomohide NIIMI

ABSTRACT

An aerospike nozzle has been expected as a candidate for an engine of reusable space shuttle to respond to growing demand for rocket-launching and its cost reduction. It has been reported that sidewalls of linear-type aerospike nozzles can suppress undesirable sideward flow expansion. In this study, the flow field around the linear-type aerospike nozzle with sidewalls and the nozzle without sidewalls are compared to confirm the effect of the sidewalls experimentally. Laser induced fluorescence is used to visualize and analyze flow fields around the nozzles. PSP is also applied to measurement of pressure distribution on the nozzle surfaces. The nozzles are set into a vacuum chamber to achieve larger pressure ratios PR (P_s : source pressure in a reservoir, P_a : ambient pressure in a vacuum chamber) because jet structures are affected mainly by pressure ratios.

Keywords: Aerospike Nozzle, Jet Structure, LIF, PSP, Sidewalls

1 緒言

ロケット打ち上げ需要の拡大に伴う低コスト宇宙輸送システムの要求が高まるにつれて単段式完全再使用宇宙往還機の実用化が期待され、推進装置としてエアロスパイクノズル¹⁾が有望視されている。我々はこれまでリニアエアロスパイクノズルの流れ場解析を行い、噴流の複雑な3次元構造を明らかにしてきた²⁾。しかしながら、リニアエアロスパイクノズルの形状は2次元流を仮定して設計されるため、側方への膨張は推力の損失を引き起こす。そこで、側方への膨張を抑制するためにノズル両端に側壁を設置する手法が提案され、Itoら³⁾による数値解析が行われている。本研究では、任意断面での可視化が可能なNO-LIFを用いた流れ場解析及びPSPを用いたノズル表面の圧力分布計測を行い、リニアエアロスパイクノズルの側壁の効果を実験的に解析する。さらに、幅広い圧力比 ($PR = P_s/P_a$, P_s : 貯気室圧力, P_a : 膨張室圧力) を可能にするため、ノズルを真空チャンバー内に設置し、低圧環境下で実験を行う。

2 実験装置

Fig.1 に本研究で用いたNO-LIFによる可視化計測システム機器構成を示す。実験装置は、真空チャンバー、給排気装置、圧力測定装置、光学系および同期システムからなる。本研究では、NO2%+N₂98%の混合気体をノズルから噴出し、ArFエキシマレーザー (Lambda Physik: LPX 105E) から発したレーザー光を複数のミラーを用いて伝搬した後に円筒レンズ (シグマ光機: $f=400\text{mm}$, $20\times30\text{mm}$) によりシート状にし、エアロスパイクノズル周りの流れ場に入射した。本研究で使ったArFエキシマレーザーは波長193nm、半値幅0.5nm、レーザー光強度120mJ/pulseである。流れ場中の微弱な紫外蛍光を撮像するために、イメージインテンシファイヤー (浜松ホトニクス: C6653) を取り付け CCD カメラ

(浜松ホトニクス: C7300-10) をレーザーシートに対して垂直に設置した。なお、CCDカメラの解像度は1280×1024画素、4096階調 (12bit) である。また、カメラレンズ (Nikon: UV-NIKKOR F(0.5)) にUG5フィルターを取り付けるとともに、レーザーの発振とCCDカメラの撮像時間を同期させることにより、散乱光を大幅に軽減した。CCDカメラで撮像されたデータは、専用のインターフェイスユニットに送られ、データ処理を行った後にホストコンピュータに格納され、モニターに出力される。また、カメラレンズの被写界深度が浅いので、焦点が常に合うようにパルスステージを用いてレーザーシートとCCDカメラが等距離を保つようにCCDカメラを移動させた。

PSPを用いたノズル表面の圧力分布計測にも同様の実験装置を用いたが、試料気体として純酸素を、入射光源としてキセノンショートアークランプ (ウシオ電機: UXL-500SX) を用いた。ランプからの光を透過波長域400±10nmのバンドパスフィルターを用いてPtTFPPの吸収波長域の光を取り出し、リキッドファイバーを介してチャンバー内に設置したPSPを塗布したノズル表面に照射した。600nmのロングパスフィルターをCCDカメラの前に設置し、PSPの発光のみを撮像した。PSPには本研究で使用する圧力領域に最も適したPtTFPP/poly-IBM-co-TFEM⁵⁾⁶⁾を用いた。実験条件として貯気室圧力を9.0×10⁴Paに固定し、背圧である膨張室圧力を制御することで圧力比を30から200まで変化した。

本研究ではFig.2(a)及び(b)に示すリニアエアロスパイクノズルを使用して実験を行った。なお、Fig.2(a)及び(b)には本研究で使った座標系を併せて示す。噴射口断面をyz-平面とし、この面に垂直かつノズルのベース面の中心を通る直線をx軸とする。本研究で使用するリニアエアロスパ

Fig. 1 Experimental Apparatus

イクノズルは膨張過程を等エントロピーと仮定し、貯気室から噴射口までの内部膨張部と噴射口からスパイク部先端までの外部膨張部に分け、特性曲線法により設計を行った⁷⁾。ノズル断面は矩形とし、 $PR=100$ のとき適正膨張となるようにスパイク部先端ノズル断面積とスロート断面積の面積比を 8.117 とした。Fig.2(a) に示すように、スパイク面に沿った流れ場及びスパイク面上の圧力分布を解析するために、設計で得られたスパイクを全長の 60% (8.66mm) で切断してスパイクを隔てた片側に噴射口を設置したノズルを作製した (Nozzle A)。Fig.2(b) に示すように、スパイクを隔てた両側から膨張する噴流の干渉を含む流れ場を解析するために、設計で得られたスパイクを全長の 20% (2.89mm) で切断してスパイクを隔てた両側に噴射口を設置したノズルを作製した (Nozzle B)。Fig.2(c) は本研究で使用したノズルの断面図である。噴射口断面 (Cowl Lip を含む平面) とノズル中心軸の交点を原点とし、原点より左側が内部膨張部、右側が外部膨張部である。また、ノズルスロートの高さを 0.5mm とした。側壁は、NO-LIF によって発した蛍光を撮像するために紫外光を透過する石英ガラスを用いた。なお、原点から Cowl Lip までの距離を z_e とし、全ての距離及び長さを z_e で無次元化した。

3 結果および考察

3.1 スパイク表面に沿う流れ場解析

スパイク表面に沿って流れる噴流を解析するためにスパイク長 60% ノズル (Nozzle A) を使い、NO-LIF により噴流構造を可視化するとともに、PSP によりスパイク表面の圧力分布を計測した。

2次元等エントロピー流れを仮定して設計されるリニアエアロスパイクノズルに対し、側方への膨張を抑制することで推力低下を防ぐことを目的とした側壁をノズルに設置して側壁の有無によるスパイク表面の流れ場の差異を比較することにより、側壁の有効性を調査した。

設計圧力比 (本研究のノズルは $PR = 100$) において、2次元、等エントロピー仮定におけるエアロスパイクノズルの噴流の流れは Cowl Lip を中心としたプラントル・マイヤー膨張扇によって常にスパイク表面に平行になるように偏向するので、ノズル出口の流れはノズル中心軸 (x 軸) に対して

Fig. 2 Aerospike Nozzles

平行となり、噴流境界もノズル中心軸に対して平行となる⁸⁾。

Fig.3(a) 及び (b) はそれぞれ $PR = 100$ における側壁付きノズル及び側壁のないノズルに関する NO-LIF による xz -平面の可視化画像を示し、Fig.4 及び Fig.5 はそれぞれ $PR = 100$ における側壁付きノズル及び側壁のないノズルに関する NO-LIF による yz -平面の可視化画像を示し、撮像位置は (a) $x/z_e=0.412$ 及び (b) $x/z_e=2.134$ である。

Fig.3(a) に示すように、設計圧力比 $PR = 100$ において、側壁付きノズル周りの噴流はノズル中心軸に対して平行であることが確認でき、Fig.3(b) から、側壁のないノズルの噴流境界は下流に向かうに従って収束していく様子が確認できる。また、Fig.4 及び Fig.5 に示す yz -平面に平行な可視化画像から、噴流の側方への膨張は側壁によって抑制されていることが確認できる。以上の結果から、設計圧力比 ($PR = 100$) において、リニアエアロスパイクノズルの噴流は側壁の設置により、側方への膨張が抑制されて噴流境界はノズル中心軸に対して平行になるので、側壁付きリニアエアロスパイクノズルの噴流は適正膨張していると考えられる。

次に、側壁の有無によるスパイク表面の圧力分布の差異を PSP を用いて検証した。Fig.6(a) 及び (b) はそれぞれ PSP により計測した $PR = 100$ における側壁付きノズルのスパイク表面の圧力分布及び側壁のないノズルのスパイク表面の圧力分布である。Fig.6(a) 及び (b) に示すように、側壁付きノズルのスパイク表面の圧力分布は y 方向にほぼ一様であるのに対して、側壁のないノズルのスパイク表面の圧力分布はノズル中心軸 (x 軸) 上が最も高く、側方に向かうにつれて圧力が減少していく様子が確認できる。Fig.6(b) 上の破線はスパイク表面の圧力が背圧と等しい位置を示し、破線より下流ではスパイク表面の圧力は背圧よりも低い。これは Fig.5 に示すように、側壁のないノズルの噴流が噴射口直後から側方へと膨張するために起こる。一方、側壁の付きノズルのスパイク表面の圧力は全体にわたって背圧よりも高くなったので側壁の設置によりスパイク表面の圧力は y 方向にほぼ一様となり、背圧よりも低くなることはないことを明らかにした。

設計圧力比 ($PR = 100$) において側壁のないノズルの噴流とは異なり、側壁付きノズルの噴流は適正膨張してスパイク表面の圧力は側壁のないノズルの圧力よりも高くなるので側壁の設置により推力の増加が見込まれる。

Fig. 3 LIF Image on xz -plane of Nozzles, $PR = 100$

Fig. 4 LIF Image on yz -plane of Nozzle with Sidewalls, $PR=100$

Fig. 5 LIF Image on yz -plane of Nozzle without Sidewalls, $PR=100$

(a) Nozzle with Sidewalls

(b) Nozzle without Sidewalls

Fig. 6 Pressure Distribution on Spike, $PR=100$

Fig. 7 LIF Image on xz -plane of Nozzle with Sidewalls

異なる圧力比における側壁付きノズル周りの流れ場を解析するために、設計圧力比未満 ($PR = 30$)、設計圧力比 ($PR = 100$)、設計圧力比より大きい圧力比 ($PR = 200$) における流れ場を比較した。Fig.7(a) 及び (b) はそれぞれ $PR = 30, 200$ における xz -平面の可視化画像を示す ($PR = 100$ は Fig.3(a) 参照)。Fig.7(a),(b) 及び Fig.3(a) からエアロスパイクノズルの特徴である外気圧に応じて噴流形状が変化する様子が確認できるが、低圧力比 ($PR = 30$) を含む全ての圧力比において噴流はノズル壁面から剥離していないことがわかる。ゆえに、リニアエアロスパイクノズルの噴流ではベル型ノズルで問題となる低圧力比における過膨張噴流のノズル壁面からの剥離が生じないことを明らかにした。

圧力比によるスパイク表面の圧力分布の差異を確認するため、PSP を適用して $PR=30, 50, 100, 170$ 及び 200 におけるスパイク表面の圧力分布を測定した。どの圧力比においても、側壁の設置により圧力分布は y 方向に対してほぼ一様であることを実験的に確認できた。そこで、各圧力比におけるスパイク表面の圧力の変化を詳細に示すため、PSP により計測したスパイク表面の中心軸上 ($y/z_e = 0$) における圧力を Fig.8 に示す。縦軸に示すスパイク表面の圧力を貯気室圧力 ($P_s = 9.0 \times 10^4 \text{ Pa}$) で無次元化した。Fig.8 に示すように、設計圧力比以上 ($100 \leq PR$) ではスパイク表面の圧力は外気圧に依存せずほぼ一様になることがわかる。一方、設計圧力未満 ($PR < 100$) において、上流のスパイク表面の圧力は設計圧力比以上の場合と同様に減少していくが、下流で圧力上昇が生じることが確認できる。圧力上昇が起こるときの圧力は、 $PR = 30$ において $P/P_s = 0.033$ であり、 $PR = 50$ において $P/P_s = 0.02$ である。これらの圧力値 (P/P_s) は、それぞれ外気圧と等しい。つまり、設計圧力比未満では、スパイク表面の圧力が外気圧と等しくなったとき圧力上昇が生じる。以上の結果から、側壁付きリニアエアロスパイクノズルのスパイク表面の圧力は、設計圧力比以上では外気圧に依存せず、一様な傾向を示すが、設計圧力比未満では、噴射口よりスパイク面に沿って膨張する噴流は噴流圧力が外気圧と等しくなる場所で、圧力上昇が起こることを実験的に明らかにした。

Fig. 8 Pressure on Spike Surface, $x/z_e = 0$

3.2 スパイク部の両側より噴出する噴流の干渉を含んだ流れ場解析

通常、エアロスパイクノズルはベル型ノズルよりも全長が長くなるが、切断面（ベース面）にかかる圧力によってスパイク切断に伴う損失が補填されることが報告されている³⁾。スパイク切断による推力損失の補填が起こる結果を実験的に検証するため、スパイク長 20% (Nozzle B) を用いて NO-LIF による可視化解析及び PSP によるベース面の圧力分布計測を行った。Fig.9(a) 及び (b) はそれぞれ $PR = 100$ における NO-LIF による側壁付きのノズル周りの流れ場及び側壁のないノズル周りの流れ場を xz -平面で可視化した画像である。Fig.9(a) から、側壁付きノズルの噴流境界はノズル中心軸に対してほぼ平行となることが確認できる。一方、Fig.9(b) から、側壁のないノズルの噴流境界は下流に向かうにつれてノズル中心軸方向へ収束する様子が確認できる。しかしながら、側壁付きノズル及び側壁のないノズル周りの流れ場は、共に、スパイクを隔てた両噴射口から流出する噴流がスパイク後端で膨張し、ベース面直後のノズル中心軸上で干渉する様子が確認できる。この干渉領域は高圧力となり、干渉領域より低圧力であるベース面に向かって逆流が生じ、この逆流がベース面に衝突することでベース面の圧力を上昇させる³⁾。しかし、逆流の構造自体は NO-LIF によって可視化できなかった。

次に、ベース面の圧力上昇がスパイク切断による推力損失を補填することを実験的に調査するために PSP を適用してベース面の圧力分布計測を行った。Fig.10 は PSP により計測したベース面の平均圧力を示したものである。縦軸に示すベース面の平均圧力は膨張室圧力 (P_a) で無次元化した。Fig.10 に示すように、側壁のないノズルの平均圧力はどの圧力比においても $P/P_a \approx 1$ である。つまり、側壁のないノズルではどの圧力比でもベース面の圧力は外気圧と等しいので、スパイク切断による推力損失を補填しない。一方、側壁付きノズルは低圧力比ではベース面の圧力は外気圧とほぼ等しいが、高圧力比になるにつれてベース面の圧力が高くなり、 $PR = 200$ では $P/P_a \approx 1.4$ である。以上の結果から、側壁のないノズルの場合、圧力比に関わらずベース面の圧力はほぼ外気圧に等しいのでスパイク切断による推力損失が補填されないことを明らかにした。一方、側壁付きノズルの場合、低圧力比ではベース面の圧力はほぼ外気圧と等しく、スパイク切断による推力損失を補填しないが、高圧力比になるに従ってベース面の圧力は上昇してスパイク切断による推力損失を補填すると考えられる。

4 結論

本研究では、リニアエアロスパイクノズルに対して側壁の有無による流れ場構造を解析するため、NO-LIF による可視化技術を用いて任意断面で可視化するとともに、PSP による圧力計測法を用いてリニアエアロスパイクノズル表面の圧

Fig. 10 Average Pressure on the Base surface

力分布計測を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. スパイク長 60% のノズル (Nozzle A) の流れ場の解析結果から、側壁設置によって噴流の側方への膨張は抑制され、噴流は設計圧力比において適正膨張することを明らかにした。また、側壁設置によりスパイク表面の圧力が高くなるので、推力の増加が見込まれる。
2. 側壁を付けた Nozzle A の流れ場の解析結果から、エアロスパイクノズルの特徴である圧力比の変化に伴う噴流の変化を確認し、設計圧力比以上でスパイク表面の圧力は外気圧に依存せず、一方で、設計圧力比未満では、噴流圧力が外気圧と等しくなる場所で圧力が上昇することを実験的に明らかにした。
3. スパイク長 20% のノズル (Nozzle B) の流れ場の解析結果から、側壁のないノズルの場合、ベース面の平均圧力は低圧力比から高圧力比までほぼ外気圧と等しいので、スパイク切断による推力損失を補填しない。一方、側壁付きノズルの場合、圧力比が高くなるにつれてベース面の平均圧力は上昇し、スパイク切断による推力損失を補填すると思われる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金の援助により実施した。ここに謝意を表す。なお、本研究で利用したノズルの製作には本学技術室の中西幸弘氏にご尽力いただいた。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Rao. G.V.R., Ballistic Missile and Space Technology, Vol.2, Pergamon Press, (1961), pp.92-101.
- 2) 新美智秀ほか, 日本航空宇宙学会論文集, **52** (2004), pp.235-240.
- 3) T. Ito, et al., Trans. Japan Soc. Aero. Space. Sci., **47** (2004), pp.17-22.
- 4) T. Ito, et al., AIAA Paper 2004-4018, (2004).
- 5) H. Mori, et al., Journal of Visualization, **7** (2004), pp.55-62.
- 6) Y. Amao, et al., Polymer Journal, **31** (1999), pp.1267-1269.
- 7) C. Lee and D. Thompson, NASA TM X-53019 (1964).
- 8) F. Nasuti, et al., Journal of Propulsion and Power, **15** (1999), pp.544-551.