クラスター型リニアエアロスパイクノズル噴流の NO-LIF 及び PSP を用いた実験的解析*

谷口 真潮¹⁾, 森 英男¹⁾, 西平 竜太郎²⁾, 新美 智秀¹⁾

Experimental Analyses of Jet Structures around Clustered Linear Aerospike Nozzle by NO-LIF and PSP

Mashio TANIGUCHI, Hideo MORI, Ryutaro NISHIHARA and Tomohide NIIMI

ABSTRACT

An aerospike nozzle has been expected as a candidate for an engine of a reusable space shuttle to respond to growing demand for rocket-launching and its cost reduction. In this study, flow field structures in any cross sections around a clustered linear-type aerospike nozzle are visualized and analyzed, using laser induced fluorescence (LIF) of NO seeded in the carrier gas N_2 . Since the flow field structures are affected mainly by pressure ratio (P_s/P_a), the nozzle is set inside a vacuum chamber to carry out the experiments in the wide range of pressure ratios from 75 to 200. The flow fields are visualized in several cross-sections, demonstrating the complicated three-dimensional flow field structures. The pressure sensitive paint (PSP) of PtTFPP bound by poly-IBM-co-TFEM is also applied successfully to measurement of the complicated pressure distribution on the nozzle surface. The pressure distribution on the base surface of the nozzle is measured to analyze thrust compensation of truncated aerospike nozzles.

Keywords : Laser induced fluorescence, Pressure sensitive paint, Aerospike nozzle, Jet structure

1. 緒 言

ロケット打ち上げ需要の拡大に伴う宇宙輸送システムの低コスト化の要求に対して完全再使用型宇宙往還機 (Single Stage to Orbit: SSTO) の実用化が期待され, その推進装置として低高度から高高度まで高い推力を得ることが可能なエアロスパイクノズル¹⁾が提案されている。今日の宇宙用ロケットにはベル型ノズルが使用されているが, ある高度でのみ噴流は最適膨張となる一方で, 他の高度において噴流は過膨張もしくは不足膨張するため高い推力を得ることができない。特に, 低高度における過膨張による推力損失や噴流がノズル壁面から剥離して起こるノズルの不安定性は深刻であり, 極端な過膨張を避けるために多段式ロケットにおいて低高度では低圧力比ノズルを用い, 高高度では高圧力比ノズルを用いて,

高度に応じたノズルを使い分けることにより高い推力を得ている。一方, エアロスパイクノズルは噴流が膨張過程で外気に接するために周囲の圧力に応じて噴流形状が変化し, 低高度から高高度まで高い推力を得ることが可能となる。また, エアロスパイクノズルはベル型ノズルに比べ全長が長くなるが, 切断面 (ベース面) に加わる圧力上昇が推力損失を補填するためノズル切断による推力損失の影響は非常に小さい²⁾。

エアロスパイクノズルは噴流がスリット状の噴射口からスパイクに沿って膨張するように設計されるが, スロートの加工精度や熱膨張の問題から大型化は困難である。そのため実機では噴射口を個々に分割したクラスター型エアロスパイクノズルが適しており, Ito ら²⁾によってクラスター型軸対称エアロスパイクノズルに関して数値計算による解析が行われている。

一方, これまでリニアエアロスパイクノズル周りの実験的解析として, Tomita ら³⁾によるシャドウグラフ法を適用した可視化解析が先行して行われてきた。しかしながら, クラスター型リニアエアロスパイクノズル周りの

* 原稿受付 2004 年 12 月 14 日

¹⁾ 正会員 名古屋大学 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: mashio@nagoya-u.jp)

²⁾ 非会員 名古屋大学 工学研究科

流れ場は隣接した噴射口またはスパイクを隔てた両噴射口から膨張した超音速噴流の干渉などにより複雑な流れ場構造となるため、視線方向に積算された構造しか見ることができないシャドウグラフ法による流れ場の詳細な解析は困難である。そこで本研究では、NO-LIF（レーザー誘起蛍光法）を用いた噴流の任意断面での可視化によりクラスター型リニアエアロスパイクノズル周りの複雑な流れ場を解析する。

また、各噴射口から膨張する噴流の干渉によってクラスター型リニアエアロスパイクノズルの表面には局所的な高圧力及び高温領域が生じるとともに、ノズル表面に加わる圧力を推進方向へ積算した結果が推力の一部となるので、噴流構造の詳細な解析及び推力の導出を実験的に行うためにはノズル表面の連続的な圧力分布を得ることが要求される。従来、固体表面の圧力計測には圧力孔が一般的に用いられてきたが、詳細な固体表面の圧力分布計測を行うためには、固体表面に狭い間隔で多くの圧力孔を設置することが必要である。しかしながら、狭い間隔で多くの圧力孔を設置するには膨大な労力、時間及び費用がかかる。さらに、圧力孔の設置は固体表面の圧力分布にじょう乱を与える可能性があるため、多くの圧力孔を用いることは望ましくない。一方、PSP（感圧塗料）は発光分子が酸素により消光される原理を利用して酸素分圧を測定する手法であるので、固体表面の圧力分布を詳細かつ連続的に計測することが可能である。本研究では、ノズル表面の圧力分布計測に PSP を適用して、クラスター化した噴射口から膨張する噴流によって生じるノズル表面の複雑な圧力分布を明らかにする。

2. 計測手法

2.1 LIF による可視化

レーザー誘起蛍光法（Laser Induced Fluorescence: LIF）は、励起光源にレーザーを用いて原子及び分子の蛍光を発生させる手法である。LIF は燃焼場において生成されるラジカルや公害物質の検出が可能な光学的計測法として発展してきた。また近年、レーザー光の照射により強い蛍光を発する分子をトレーサーとした LIF は流れ場の可視化技術として確立されている⁶⁾。

本研究では、一酸化窒素をトレーサーとした LIF をクラスター型リニアエアロスパイクノズル周りの流れ場の可視化に適用した。一酸化窒素は吸収スペクトルとして、193 nm（本研究で励起光源として用いる ArF エキシマレーザーの波長）付近に $B^2\Pi^+ \leftarrow X^2\Pi^+(7,0)$ バンド（ $J'' = 15.5 - 46.5$ ）及び $D^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi^+(0,1)$ バンド（ $J'' = 23.5 - 34.5$ ）を持ち、波長域 200 ~ 300 nm を中心とした紫外蛍光を発することが分光学的に解明されており⁹⁾、LIF による流れ場の可視化を行うためのトレーサーとして適している。LIF の蛍光強度は気体の数密度や温度などに依存するため、噴流境界や衝撃波など圧力、温度、密度などが大きく変化する領域の構造を可視化することが可能で

ある。

2.2 PSP による圧力分布計測

PSP は固体表面上に塗布した発光分子に光（主に紫外光）を照射して燐光発光させ、これが酸素によって消光される結果を利用して圧力を計測する。発光分子の共鳴周波数に一致する光を発光分子に照射すると、一重項基底状態（ S_0 ）にある分子は光を吸収して一重項励起状態（ $S_n, n \geq 1$ ）に遷移する。その後、より高い励起状態（ $n > 1$ ）の発光分子は内部転換により一重項最低励起状態（ S_1 ）に遷移する。 S_1 状態にある分子の一部は項間交差により三重項最低励起状態（ T_1 ）へと遷移する。 T_1 から S_0 へ遷移する際に燐光を発するが¹⁰⁾、三重項励起状態 T_1 に遷移した発光分子に基底状態が三重項状態である酸素分子が作用すると、発光分子の持つエネルギーが酸素によって奪われるために発光分子は失活する（消光）。PSP の発光強度は酸素圧力に依存し、圧力が高い場所は発光強度が低く、圧力が低い場所は発光強度が高くなる。

本研究では、リニアエアロスパイクノズル表面の圧力分布計測に PSP を適用するため、その準備として、本研究で想定する圧力条件（400 ~ 1.0×10^4 Pa）において最適な PSP の選定を行った。その結果、発光分子として PtTFPP⁴⁾ を、バインダーとして poly-IBM-co-TFEM⁵⁾ を用いて構成した PSP が最適であることがわかった。そこで、本研究では、この PSP を適用してノズル表面の圧力分布計測を行う。

3. 実験装置

3.1 クラスター型リニアエアロスパイクノズル

本研究では Fig. 1(a) に示すクラスター型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. 1(a) に本研究で使用し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。本研究で使用するクラスター型リニアエアロスパイクノズルは、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て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、貯気室圧力（ P_s ）を膨張室圧力（ P_a ）で無次元化した圧力比（ P_s/P_a ）が 100 のとき適正膨張となるようスパイク部先端におけるノズル断面積とスロート断面積の面積比を 8.12 とした。さらに、設計で得られたスパイクを全長の 20%（2.89 mm）で切断した。Fig. 1(b) は本研究で使用するノズルの xz -平面の断面図である。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。スパイクを隔てた両側に 5 個の噴射口を設け、各噴射口は高さ 1.13 mm、幅 1 mm であり、スロート高さは 0.5 mm である。なお、原点から Cowl lip までの距離を z_e （4.06 mm）とし、全ての距離及び長さを z_e で無次元化した。リニアエアロスパイクノズルを真空チャンバー内に

(a) Schematic view of clustered linear aerospike nozzle

(b) Cross section of the nozzle

Fig. 1 Clustered linear aerospike nozzle.

設置し、貯気室圧力を 9.0×10^4 Pa 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 75 から 200 まで変化させた。

3.2 NO-LIF による任意断面での可視化

Fig. 2 に、本研究で用いた可視化計測システムの機器構成を示す。実験装置は真空チャンバー、給排気装置、圧力測定装置及び同期システムからなる。NO-LIF の可視化を行うために励起光源として ArF エキシマレーザー (Lambda Physik: LPX 105E) を使用し、試料気体として体積混合比 NO 2% + N₂ 98% の混合気体を用いた。ArF エキシマレーザーから発するレーザー光の波長は 193 nm、半値幅は 0.5 nm 及びエネルギーは 120 mJ/pulse である。ArF エキシマレーザーから発したレーザー光を反射鏡によって伝搬した後、円筒レンズ (シグマ光機: $f = 400$ mm, 30×30 mm) によって、エアロスパイクノズル周りの流れ場にレーザーシートとして入射する。レーザーシートの厚さは約 $4.71 \mu\text{m}$ である。リニアエアロスパイクノズル周りの流れ場中に含まれる一酸化窒素から発する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) を取り付けた CCD カメラ (浜松ホトニクス: C7300-1) をレーザーシートに対して垂直に設置し、UG5 フィルター (透過波長 220 ~ 410 nm) をカメラレンズ (Nikon: UV-NIKKOR F (0.5)) の前に設置して一酸化窒素から発する紫外蛍光以外の乱反射光を除去すると共に、パルス信号によりレーザー発振とカメラゲートの開閉を同期させ、レーザー光による乱反射を大幅に減少させることを可能とした。なお、使用した CCD カメラの解像度は 1280×1024 画素、4096 階調であり、空間分解能は約 $8 \mu\text{m}$ である。撮像の

Fig. 2 Experimental apparatus for LIF.

際はレーザー発振パルスとカメラゲートを同期させ、1 パルスあたり 0.5 秒露光撮像した 3 枚の画像を積算した。CCD カメラによって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ため、常に焦点が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した。

3.3 PSP によるノズル表面の圧力分布計測

Fig. 3 に示すように、PSP によるノズル表面の圧力計測に対して NO-LIF による可視化実験と同様の真空チャンバー、給排気装置、圧力測定装置を使用した。さらに、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、PSP は酸素圧力に対して感度を持つため試料気体には純酸素を用いた。酸素分子は NO-LIF で用いた試料気体の窒素分子と質量の差が少なく、どちらも 2 原子分子であり比熱比も変わらないため、試料気体を窒素から酸素に変更することによる噴流への影響はほとんどないと考えられる。

キセノンショートアークランプから発する光は紫外光から赤外光まで幅広い連続的なスペクトルを持つため、透過波長域 400 ± 10 nm のバンドパスフィルターを用いて PtTFPP の吸収波長領域の光のみを取り出した後、リキッドファイバーを介して真空チャンバー内に設置したクラスタ型リニアエアロスパイクノズルに照射した。なお、撮像時間は約 0.3 秒である。PSP の発光以外の散乱光を除去するためにカメラレンズの前に 600 nm のロングパスフィルターを設置した。NO-LIF による可視化実験

Fig. 3 Experimental apparatus for PSP.

と同様に CCD カメラによって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、モニターに出力される。また、PSP の発光波長のピークは 650 nm 付近である。

4. 結果及び考察

4.1 ベース面の圧力上昇による推力補填現象の解明

緒論で述べたように，エアロスパイクノズルはスパイク部を切断しても，ベース面の圧力上昇によってノズル切断による推力損失が補填される．ベース面の圧力上昇はベース面直後における噴流の干渉領域からベース面へと向かう逆流が生じ，その逆流がベース面に衝突することで起こる²⁾．

Fig. 4 はクラスター型リニアエアロスパイクノズルの噴流の NO-LIF を用いた xz -平面における可視化画像である。**Fig. 4(a), (b), (c)** 及び **(d)** はそれぞれ $P_s/P_a = 75, 125, 170$ 及び 200 である。 P_s/P_a が大きくなるに従い噴流境界の広がりが大きくなり、その結果上下両噴流境界の干渉が強くなり、高圧力比 ($P_s/P_a = 170$ 及び 200) において斜め衝撃波が干渉領域から生じる様子が可視化できた。この上下両噴流境界の接する干渉領域は高圧力となり、この領域よりベース面に向かう逆流が生じてベース面の圧力上昇をもたらしと思われる。しかし、逆流の構造自体は可視化できなかった。一方、低圧力比 ($P_s/P_a = 75$ 及び 125) では、噴流境界が十分に広がらず、ベース面直後の干渉領域は高圧力とならないために逆流が生じず、ベース面の圧力上昇は起こらないと思われる。

上下両噴流の干渉によって生じた逆流により起こる

(a) $P_S/P_a=75$

(b) $P_S/P_a=125$

(c) $P_S/P_a=170$

$$x/z_e = 0.025 \quad 0.711$$

(d) $P_S/P_a=200$

Fig. 4 LIF images on the xz -plane.

ベース面の圧力上昇を確認するため、PSP を適用してベース面の圧力分布を計測した。Fig. 5 に $P_s/P_a = 75, 125, 170$ 及び 200 における、PSP により計測したベース面の圧力分布を示す。高圧力域を黒色で、低圧力域を白色で示す。高圧力比において、ベース面の圧力は上昇し、低圧力比において、ベース面の圧力上昇が起らないことが確認できる。

以上の結果から、高圧力比においてスパイクを隔てた噴射口より膨張した噴流がベース面直後の干涉領域から生じた逆流によってベース面の圧力が上昇し、ベース面の圧力上昇がスパイク切断によって損失した推力を補填

Fig. 5 Pressure distributions on the base surfaces.

すると思われる。一方、低圧力比では、噴流境界の広がりが弱く、ベース面直後の領域は高圧力とならないので、ベース面の圧力上昇が生じない。ゆえに、低圧力比においてスパイク切断による推力損失は補填されないと思われる。

4.2 スパイクに沿った流れ場の解析

クラスタ型リニアエアロスパイクノズルのスパイク表面上の複雑な流れ場を解析するために、NO-LIF を用いて yz -平面に平行な断面を可視化し、スパイク表面の圧力分布を解析するために PSP を用いて圧力分布計測を行った。Fig. 6(a), (b), (c) 及び (d) は $P_s/P_a = 200$ における NO-LIF による可視化画像であり、撮像位置は Fig. 4 (d) 上に白線で示す。Fig. 7 は PSP によって計測したスパイク表面の圧力分布である。

Fig. 6 (a) は噴射口直後の $x/z_e = 0.025$ における yz -平面に平行な断面の可視化画像であり、スパイクを隔てた両側に 5 つの高輝度領域が確認できる。この高輝度領域は 5 つの噴射口から流出した直後の高圧力噴流であると思われる。また、Fig. 7 に示すスパイク表面の圧力分布から噴射口直後に高圧力領域が確認できる。これは Fig. 6 (a) に見られる噴射口直後の高圧力噴流によって生じたスパイク表面の圧力上昇である。Fig. 6 (b) は Fig. 6 (a) より下流部の $x/z_e = 0.465$ における yz -平面に平行な断面の可視化画像である。噴流は下流に向かうに従い膨張して一体化し、隣接した噴流同士は互いに干渉する。干渉領域は高圧力となるため、台形状の噴流内部に 4 つの高輝度領域が確認できる。Fig. 7 に示すスパイク表面の圧力分布においても噴射口間に 4 つの高圧力領域が現れているので、隣接した噴流同士の干渉によって干渉領域は

 Fig. 6 LIF images on the yz -plane at $P_s/P_a = 200$.

Fig. 7 Pressure distribution on the spike surface.

高圧力となることが確認できる。さらに下流部のベース面上である $x/z_e = 0.711$ (Fig. 6 (c)) において、スパイク面に沿って膨張した噴流内部に 3 つの高輝度領域が確認できる。3 つの高輝度領域は隣接した噴流同士の間によって生じた斜め衝撃波が噴射口軸上で正常交差してきた高圧力領域である。ベース面を越えた $x/z_e = 1.70$ (Fig. 6 (d)) では、上下両噴流が干渉して再び膨張する様子が確認できる。また、噴流は z 方向だけでなく y 方向にも膨張する複雑な流れ場であることも明らかとなった。

Fig. 6 及び Fig. 7 から得られる噴流構造の模式図を Fig. 8 に示す。噴射口より膨張した噴流は樽型衝撃波を形成し、点 a 及び a' において隣接した噴射口より膨張した噴流によって形成した樽型衝撃波と干渉する。点 a 及び a' から斜め衝撃波が発生し、噴射口中心軸上の点 b において正常交差する。点 a 及び a' における干渉によって生じる高圧力領域は Fig. 6 (b) の $x/z_e = 0.465$ で確認したスパイク部を隔てた両側各 4 個ずつの矩形型の高輝度領域であり、噴射口中心軸上 b で正常交差によって生じた高圧力領域は Fig. 6 (c) の $x/z_e = 0.711$ で確認したスパイク部を隔てた両側各 3 個ずつの高輝度領域である。

以上のように、NO-LIF による yz -平面の可視化画像及び PSP によるスパイク面の圧力分布計測から、複数の噴射口から流出する超音速噴流がスパイク面に沿って膨張し、噴射口直後の高圧力領域及び隣接した噴流同士の干渉によって生じる高圧力領域などの膨張、圧縮及び干渉を含む複雑なスパイク表面上の流れ場構造を 3 次元的に

Fig. 8 Jet structure along the spike.

解明した。

今回、試料気体として NO-LIF には一酸化窒素を用いて PSP には純酸素を用いた複合計測を行った。今後は一酸化窒素にも圧力感度を持つ PdTFPP¹¹⁾ を発光分子として用いた PSP を圧力分布計測に適用し、NO-LIF による可視化との同時計測の確立を目指す。

5. 結 論

本研究では、複数の噴射口より膨張して互いに干渉するクラスター型リニアエアロスパイクノズルの噴流構造を解析するため、流れ場の任意の断面における可視化が可能な NO-LIF を適用した。また、ノズル表面の圧力分布を計測するために PSP を適用した。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. 高圧力比 ($P_s/P_a = 170$ 及び 200) の場合、上下両噴流は大きく広がりベース面直後で干渉し、干渉領域から逆流が生じてベース面の圧力が上昇することを明らかにした。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と思われる。一方、低圧力比の ($P_s/P_a = 75$ 及び 125) 場合、ベース面の圧力は上昇しなかった。これは噴流の広がりが弱いために、ベース面に向かう逆流が生じないからであると考えられる。
2. スパイク表面に沿って膨張する噴流を解析した結果、噴射口直後の高圧力領域や隣接した噴流同士の間干渉によって生じる高圧力領域などクラスター型リニアエアロスパイクノズルのスパイク表面上の複雑な流れ場を 3 次元的に解明した。

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

こに謝意を表する。なお、本研究で使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る。

参考文献

- 1) Rao, G. V. R.: Spike Nozzle Contour for Optimum Thrust, Ballistic Missile and Space Technology, Pergamon Press, Vol. 2 (1961) pp. 92-101.
- 2) Ito, T, Fujii, K.: Flow Field and Performance Analysis of Aerospoke Nozzles with Simplified Clustered Modules, Trans. Japan Soc. Aero. Space. Sci., Vol. 47, No. 155 (2004) pp. 17-22.
- 3) Tomita, T., Takahashi, M., Onodera, T., Tamura, H.: Visualization of Shock Wave Interaction on the Surface of Aerospoke Nozzles, AIAA paper 98-3523, (1998).
- 4) Mori, H., Niimi, T., Yoshida, M., Kondo, M., Oshima, Y.: Application of PSP to Low Density Gas Flows, Journal of Visualization, Vol. 7, No. 1 (2004) pp. 55-62.
- 5) Amao, Y., Asai, K., Miyashita, T., Okura, I.: Photophysical and Photochemical Properties of Optical Oxygen Pressure Sensor of Platinum Porphyrin-Isobutylmethacrylate-Trimethacrylate Copolymer Film, Polymer Journal, Vol. 31, No. 12 (1999) pp. 1267-1269.
- 6) 藤本哲夫, 新美智秀, 長田裕司: 自由噴流の干渉に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 53, No. 486 (1987) pp. 400-407.
- 7) Lee, C., Thompson, D.: Fortran Program for Plug Nozzle Design, NASA TM X-53019, (1964).
- 8) Nasuti, F., Onofri, M.: Theoretical Analysis and Engineering Modeling of Flowfields in Clustered Module Plug Nozzles, Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 4 (1999) pp. 544-551.
- 9) Lee, M., McMillin, B., Hanson, K.: Temperature measurements in gases by use of planar laser-induced fluorescence imaging of NO, Applied Optics, Vol. 32, No. 27 (1993) pp. 5379-5396.
- 10) Engler, R., Hartmann, K., Vollen, A., Troyanovski, I., Vollen, A.: Description and assessment of a new optical pressure measurement system (OPMS) demonstrated in the high speed wind tunnel of DLR in Göttingen, DLR-FB 92-24 (1993).
- 11) 森英男, 新美智秀, 大島佑介, 平光円: 高クヌッセン数流れ中の表面圧力計測に適した感圧塗料の開発, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 70, No. 699 (2004) pp. 2721-2728.