

## 審査の結果の要旨

氏名 堤 誠司

修士(工学) 堤 誠司提出の論文は「リニアエアロスパイクノズルのモジュール間干渉流れと性能に関する研究」と題し、7章及び付録から成っている。

ジェット推進を基本とする熱機関では推力を生むノズル要素の性能と作動特性が重要であり、特に、高速かつ高々度を達成せねばならないロケットやスペースプレーンなど宇宙輸送機の推進システムにとって、その効率や信頼性の向上に対する工夫が欠かせない。近年注目されているリニアエアロスパイクノズルは、円形スロートと矩形排気口を持つ多数の燃焼器モジュールがクラスター化され、片側大気開放の外部ノズル上流に列状配置される特徴的な構成がとられる。モジュールリップから生じる膨張扇を介してノズルを出るジェット流れは、常に各高度に応じた大気圧の状態まで膨張を達成できるため(高度補償性)設計点以外に最適膨張比をとれない従来のベルノズルに比べ適応に優れた性能が期待される。ところで、リニアエアロスパイクノズルには、燃焼器モジュールのクラスター化に起因する性能低下や局所的な熱負荷の増大などの未解決な課題も生じ、大きな技術的挑戦となっている。これらは当然ながらノズル流れ現象と密接な関係がある。発生する衝撃波の3次元構造をはじめ、いくつかの要素が複雑に絡み合った流れの詳細が不明のまま、従来の関連研究では上記課題に対して根本的な解決はなされていない。本研究で、著者は、そうした要素を一つ一つ分解しながら流れ場の全容を解明すべく、モジュール単体の排気流から始め、クラスター化によるモジュール排気流同士の干渉、そしてモジュールとノズルを含めた全体流れという具合に順序立てた解析により要素の絡み合いを十分に解きほぐすアプローチを採用し、リニアエアロスパイクノズル流れ場の統一的な把握ならびに技術的課題の克服に役立つ設計指針という目標達成につなげている。

本論文は、第1章から第7章までの構成となっている。

第1章は緒言であり、研究背景、リニアエアロスパイクノズルに関する従来研究そして本論文の目的が述べられている。

第2章では、本研究で用いた数値解析と実験の手法について述べている。数値解析に関しては、基礎方程式、境界条件、乱流モデルそして計算スキームにつき説明し、また、複雑な3次元衝撃波と渦構造の理解に有効な計算機ポスト処理として、衝撃波捕獲法や渦同定法を紹介している。一方、実験に関しては、窒素ガスのブローダウン方式超音速風洞装置とテストセクションのほか、流れ場の可視化手法や圧力測定法などを説明している。

第3章では、正方形出口を持つモジュール単体からの不足膨張ジェットの構造を解析した結果を述べている。モジュールの排気流は、出口形状に起因して、モジュールリップから生じるプラントル・マイヤー膨張扇を通過する2次元的な流れと、膨張扇同士の干渉により3次元性が生じる出口直角コーナー部の流れの2つの領域に大きく分けられる。そのた

め、衝撃波は2次元な流れ領域の intercepting shock と過膨張のコーナー領域で発生する再圧縮衝撃波の2つから構成され、対応して、ジェットの断面形状が後流において十字形状になることをミー散乱光学可視化実験の結果と併せて説明している。

第4章では、クラスター化を模擬し隣接させたモジュール排気流の干渉によって生じる流れ構造につき述べている。流れ場は、モジュール単体の流れと同一構造の領域と、モジュール間干渉の影響が現れる領域の2つに大別され、衝撃波構造として、モジュール出口コーナー部の再圧縮衝撃波およびモジュール排気流の干渉による tail shock の特徴などが説明されている。

第5章では、クラスターモジュールを含むノズル全体の流れ場の解析結果を述べている。流れ場は、上記モジュール単体の矩形出口の流れおよび隣接モジュール排気同士の干渉流れに加え、新たにモジュール排気流とノズル壁面境界層の粘性 - 非粘性干渉に起因した剥離流れという3つの要素から構成される。この新たな要素はノズル壁面近傍の流れに支配的なもので、実験で油膜観察されるノズル壁面上の1次および2次の2つの剥離線の発生を見事に理由づけている。また、これら剥離線によって、ノズル壁面が3つの高圧領域に仕切られる様子を説明している。

第6章では、流れ解析からの知見をもとに、クラスター化が抱える熱負荷と性能に関する技術課題を検討している。ノズル壁面上の熱流束分布は、静圧分布と同様、1次と2次剥離線により3つの領域に分けられ、そのうち高温のモジュール排気流が粘性 - 非粘性干渉に起因して吹き降ろす領域こそが、これまで実験的に見出された高熱負荷領域と判明すること、従って、ノズルの冷却設計を実施する際、予めノズル表面の剥離線を調べてホットスポットを把握しておくべきとの提言を述べている。一方、性能低下の原因については、2次元理想的な場合とモジュール間隙を変化させた場合とを比較して要因を分析し、その結果、損失の主な原因は、摩擦損失および隣接モジュール排気流の干渉による tail shock での全圧損失の2つであり、モジュール間隙が広がると tail shock 損失が増加し支配的な損失原因となること、従って、性能低下を抑えるには隙間を最小限にすべきと提言している。

最後の第7章は結言であり、本研究から得られた知見をまとめている。

以上要するに、本研究は、次世代宇宙輸送機への適用が期待されるリニアエアロスパイクノズルを特徴づける燃焼器モジュールのクラスター化の影響を、詳細な3次元衝撃波流れ構造の解明を通じ明らかにして、今後のノズル設計指針に役立つ足がかりを構築しており、航空宇宙工学に貢献するところが大きいと認められる。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。