

## 審査の結果の要旨

氏名 渡邊 保真

修士（工学）渡邊 保真 提出の論文は、「Flowfield and Aerodynamic Characteristics Control at Hypersonic Speeds with Direct Current Plasma Actuation（直流放電プラズマアクチュエーションによる極超音速での流れ場と空力特性の制御）」と題し、本文8章および付録4項から成っている。

将来のグローバルな高速輸送や再使用型宇宙輸送システム実現のため、日本を含む各国で極超音速機の研究開発が進められている。しかし、機体の空力形状や推進システムに比べ、姿勢制御法に関しては、高速飛行に対応できる応答性に優れたデバイスが必要にもかかわらず、舵面やリアクションコントロールなどの従来型を想定するに留まっており、新たな手法の研究開発が望まれている。筆者は、機械的駆動部がなく高速の応答が可能な放電プラズマ利用の空力制御に着目し、中でも、直流アーク放電によるサーマルアクチュエータを、気流への投入エネルギーが大きく、極超音速飛行の高エンタルピー気流でも制御効果が期待できるとして研究対象に設定している。

第1章は序論であり、本論文の背景、目的と意義を明確にしている。極超音速流れにおける直流放電プラズマアクチュエーションは過去に研究例がないため、最も基本的な平板を基準形状とし、（1）様々な気流条件下で安定して放電持続可能なプラズマジェネレータの開発、（2）プラズマアクチュエーション効果に関する極超音速風洞を用いた実験的解明とそれを記述し得る数値解析モデルの構築、（3）従来型の舵面方式に比べて本手法が持つ優位性を数値解析と風洞実験で示す、のように段階を踏んで研究を進めている。

第2章では放電回路の設計と極超音速風洞での機能実証が述べられている。高速気流中では着火したプラズマが吹き消えやすいため、放電を安定化させる回路が必要である。平板の上流側に陰極、下流側に陽極をフラッシュマウントし、大電流の主電源と着火用の高電圧電源を組み合わせることでアーク電流が電流設定範囲下限を下回った時に電圧を急上昇させることで、アーク放電を安定して持続させることに成功している。東京大学柏キャンパスのマッハ数7極超音速風洞で実験を行い、流れに平行に置かれた平板上の高速低圧気流環境、淀み点での低速高圧気流環境だけでなく、衝撃波や膨張波を横切った状況でも安定してアーク放電が持続できることを実証している。また、物体表面と電極材料を適切に選択することで熱による損耗は抑えることができるとしている。

第3章は直流アーク放電による気流制御に関する現象の実験的解明である。

シュリーレン法による衝撃波流れの可視化、放電プラズマの発光分光、放電部周辺での壁面圧力計測を行い、(1) 放電に伴う物体表面近傍気体に対するジュール加熱およびイオンの衝突による電極温度の上昇、(2) 加熱による壁面近傍の気体の膨張、(3) 膨張による境界層の剥離、(4) 剥離衝撃波の形成に伴う圧力分布の変化、のメカニズムを明らかにしている。

第4章は実験で明らかにされた現象を再現できる数値解析モデルの構築である。実験でのプラズマ発光観察から予測して、物体壁面上境界層底部の薄い領域に適切な加熱量分布を与えることで、熱量的完全気体モデルのCFD(数値流体力学)解析でも放電に伴う剥離や圧力変動を正しく再現できるとしている。逆に、このことで、本デバイスがジュール加熱によるサーマルアクチュエータ効果によるものであることを示したとも言える。さらに、2温度モデルによる熱化学非平衡流の数値解析を行い、並進-振動緩和など、投入エネルギーの流れと配分過程の詳細が明らかにされている。

第5章では、実験と数値解析の両方の結果を踏まえ、直流アーク放電による極超音速気流制御の特性がまとめられている。

第6章では、第4章で述べた数値解析法を用いて、本デバイスを空力制御装置として有効に機能させるための利用法について検討している。平面から立ち上がるスロープ前方で放電を起こすと、上記のような機構により流れが剥離して衝撃波が前進するため、有効スロープ角とともに壁面圧力が低下することに着目し、これをフラップと同様な制御モーメント発生に使うことを提案している。次章で述べる柏風洞の気流条件を想定したCFD解析を行い、有意な空気力変化が得られることを示している。

第7章は上記の風洞実験による実証である。モーメントを精度よく計測するのは困難なため、その代わりにスロープ壁面の圧力低下に伴う空気抵抗の低減を測定している。模型と支持部の間に放電回路用の配線がつながった状態でも精度よく空気抵抗を計測できる装置を新たに考案して、実験を行っている。その結果、放電時に空気抵抗が低減することが実測され、抵抗低減による仕事率は投入電力の3倍にも達することを示している。その応答時間は0.1秒以下であり、機械式のフラップ変角に比べてはるかに速いことを明らかにしている。

第8章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本論文は、極超音速気流中で安定してアーク放電を行うデバイスの開発に成功し、そのサーマルアクチュエータ効果による気流制御機構を明らかにして、飛行体の空力特性制御法としての有効性を実証した点で、航空宇宙工学、特に高速空気力学上、貢献するところが大きい。

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。