

論文審査の結果の要旨

氏名 山田 剛治

本論文は7章からなり、第1章は本論文の研究を着想するに至った背景と本論文の目的、第2章は本研究で新たに開発した自由ピストン二段隔膜衝撃波管装置と分光計測装置、第3章は衝撃波管装置の性能評価の結果、第4章は窒素分子からの発光を利用した温度計測の結果、第5章は真空紫外分光法および実験結果、第6章は観測結果を説明するための熱化学モデルの提案について述べられている。第7章は結論である。

第1章では研究の背景として、航空宇宙工学において、大気突入システムが遭遇する飛行環境について触れ、飛行環境予測において衝撃波背後の強い熱化学的非平衡過程を高い精度で予測することの必要性について議論がなされており、これを実現するために本研究において「将来の大気突入システム開発に十分な性能を有する衝撃波管実験装置および光学計測装置の開発」「同実験装置を用いた熱的非平衡過程の観測」「実験結果に基づいた新しい熱化学モデルの提案」を目的として掲げている。本章では当該研究分野に関わる背景の十分な調査が行われ、また目的の設定も合理的かつ独創的であると認められる。

第2章では従来の試験装置および計測装置の課題を精査し、これらを解決するために必要な要件を備えた装置を新規に開発した経緯が詳細に述べられている。従来よりも光路長を拡大し、不純物を除去してリークレートを抑制するために導入したアルミ引き抜き観測部は独創的であり、効果が認められる。また極短時間の過渡的現象を高い空間分解能で計測するために考案したダブルレーザシュリーレンシステム、多点同時分光システム、高効率集光装置による時間凍結分光システムは独創的であり、高速現象の測定に有効であると認められる。

第3章では、第2章で開発された衝撃波管の最適運転手法が検索されている。簡易な数値モデルにより作動条件をおおまかに推測し、実験によって最適な運転条件をパラメトリックに探索した結果、目標性能である超軌道再突入飛行環境を再現する衝撃波速度を実現できたことが認められる。

第4章では、窒素分子の発光スペクトルに基づいた温度計測により衝撃波背後の熱的非平衡過程が明らかとなり、計測装置が目標とする現象を観測することに成功したことが確認できる。ここでは、従来計測されてことが希であった窒素分子の1+バンドスペクトルにも注目し、同じ窒素分子からの発光スペクトルでも2+バンドスペクトルと1+バンドスペクトルでは分子の温度に差異があること、電子励起状態が従来のParkの二温度モデルが予測する振動-電子温度では説明できず、非平衡状態にあることが指摘されている。これは従来に無い新しい発見であると言える。

第5章では、第4章までの議論によって、広範なエネルギー領域における発光スペクトルを取得して電子励起状態に関する情報を取得する必要がある、という課題を新たに提起し、これを実現するために真空紫外分光計測システムを開発している。真空紫外波長領域において時間分解能が高く、かつ空間分解能の高い分光計測は世界にも類が無く、高い先進性が認められる。計測結果から、第4章で得られた分子における電子励起非平衡だけでなく、原子においても電子励起非平衡が存在することを新たに発見し、電子励起温度は分子と原子においてほぼ同じ温度で記述できること、また電子励起温度は広く用いられている Park の2温度モデルで予測される振動-電子温度よりも著しく高い、という結果を得ている。従来、狭い波長領域の分光計測から得られた電子励起温度は振動-電子温度よりも低く、その原因は謎とされていたが、本計測によって実際には電子励起温度は振動温度よりも高く、このような正しい結果は広い波長範囲に存在するスペクトルを利用しないと得られない、ということが新たに指摘されたといえる。

第6章では、第5章までの実験結果にもとづいて従来の熱化学モデルの問題点を分析し、プリカーサ加熱を導入した新しい熱化学モデルを導入することで実験結果が再現可能であることを示している。電子励起温度の非平衡性を考慮するために、従来広く用いられている Park の2温度モデルを、並進-回転-振動-電子温度を全て分離した4温度モデルへ拡張し、パラメトリックな解析を実施している。その結果、衝撃波背後の高温領域からの放射により衝撃波前方が加熱されなければ実験結果が再現できないこと、そのような物理機構が存在することが示されている。そして、4温度モデルにプリカーサ加熱を導入することにより、衝撃波背後で観測された電子励起温度を再現することに成功している。

第7章では結論として以上の結果をとりまとめており、第1章で掲げた目的を達成していると認められる。

なお、本論文第2章は、宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 流体グループにおいて進められた衝撃波管開発の一環として行われた共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上要するに、本論文は極超音速衝撃層内で発生する熱化学的非平衡現象を自由ピストン二段隔膜衝撃波管により発生させ、発光分光計測により物理過程を明らかにするものであり、従来計測が行われてこなかった波長領域のスペクトル計測を行い、電子励起状態に非平衡性があることを新たに発見し、新しい熱化学モデルを提案して実験結果をより高い精度で再現することに成功した独創的かつ先進的な研究であり、先端エネルギー工学、特に航空宇宙分野への大きな寄与が認められる。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。