

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 松下健治

修士(工学)松下健治提出の論文は「再突入極超音速プラズマ流の電磁気力による制御に関する研究」と題し、本文8章及び付録1項から成っている。

大気中を高速飛行する飛行体周りに生じる極超音速流れは高温であり、そのために生じる飛行体の加熱を防ぐことが機体設計上の重要な課題となっている。そのような流れはしばしば弱いながらも電離しており、電磁気力による制御の可能性および制御の結果としての加熱の低減が理論的に指摘されていた。最近、特に数値解析を用いて、特殊な仮定を用いながらも、その可能性があらためて様々な角度から検討されている。しかしながら、スペースシャトル等、地球低軌道から再突入飛行するような飛行体に対して、そのような効果がどの程度期待できるかについての検討は現在行われていない。このような検討はこの効果の実用化の観点からは必須である。そのため、本研究ではスペースシャトルを例にとり、実際の飛行経路に沿って、この効果がどの程度期待できるかについて検討を行っている。

第1章は序論であり、当該電磁効果の原理、研究の現状が述べられ、さらに、本研究の目的が述べられている。続けて、本研究の構成が述べられる。即ち、本研究では、この効果の程度を把握するため、まず、飛行経路に伴う各飛行条件における流れの状態を実在気体効果を含む計算により予測し、その結果をもとに、電磁効果を含む流れについての別の計算により、当該効果を見積もることとしている。

第2章では、電磁効果を含む流れの計算方式について説明している。支配方程式は、通常の流れの方程式にローレンツ力、ジュール加熱効果を含むいわゆる電磁流体モデルといわれているものである。このモデルでは、電磁効果は、磁場の強さの2乗に比例し、プラズマの密度や電気伝導係数、機体のサイズ、飛行速度などに依存する無次元パラメータ(インタラクションパラメータと言う)に現れてくる。また、電場と電流との関係は、一般的にはホール効果などが現れるが、これまでの解析では単純なオームの法則が用いられるのが現状である。一方、本研究ではホール効果まで解析可能としている。さらに、これらの数値モデルの数値解析法について説明されている。

第3章では、上記電磁流体モデルの数値的な解の妥当性が検討される。インタラクションパラメータへの解の依存性、さらに、ホールパラメータに対する解の依存性が検討され、本研究で開発された計算コードは十分信頼できることが結論されている。それらの依存性を要約すると、磁場の強さが強くなるとインタラクションパラメータは大きくなり、それにとともに、加熱の低減効果も大きくなる。また、ホールパラメータが大きくなると、加熱の低減効果が失われる傾向にある。

第4章は、実在気体効果を含む計算方式の説明であり、温度非平衡を4温度モデルで表し、非平衡化学反応を11種化学種について考慮したモデルであることが述べられる。さらに、この計算方式によるプラズマの密度予測の妥当性が過去の飛行データと比較検討され、信頼できる予測を与えると結論づけられている。

第5章では、ノミナルな実飛行としてスペースシャトルの飛行に着目してその経路に沿っての電磁力による加熱量低減効果を検討している。その際、電磁力の効果として、現在の標準的モデルであるところの、ホール効果を見積もるのではなく、インタラクションパラメータのみを考慮したモデルで、加熱量低減効果を見積もっている。また、機体形状は機体先端部のみに着目して、半球を頭部にもつ円筒形状で模擬することとし、磁場配位は従来の研究に従い双極型の配位を先端部に仮定している。検討の結果、実現可能性のある磁場の強さにおいて、約20%程度の加熱率の低減効果が、特に高高度において、期待できることが示されている。これと並行して、本モデルで無視されたパラメータの大きさを見積もったところ、ホールパラメータが予想外に大きく、単純に無視することには無理があるとの結論を得ている。

第6章では、5章の指摘を引き継いで、ホールパラメータを考慮した解析を行っている。ノミナルな実飛行環境下で予想されるホールパラメータを考慮した結果、加熱率の低減効果がホール効果により弱められるため、第5章において見出された加熱の低減効果はほと

んど期待できないほど弱まってしまうとの結論に達している。

第7章では、加熱の低減効果が期待できる可能性をノミナルな飛行状態の近傍で探っている。このため、シャトルの飛行経路近傍における飛行条件での加熱低減効果の現れ方を探るとともに、磁力の強さ、電離の度合いの効果について検討を加えている。その結果、さまざまな可能性を考慮するとある程度低減効果が期待できるものの、あくまでも、その効果は小さく、ここで仮定された磁場配位では、現在期待されている電磁力による加熱量の低減効果について余り期待できないとしている。

第8章は結論であり、シャトルに代表される地球低軌道からの再突入機における電磁力による空力加熱の低減効果について、従来検討されここでも仮定された磁気配位ではその効果が予想外に小さいことを結論としている。また、この結果は、従来の研究においては無視されてきたホール効果によるものであることを明らかにしている。さらに、さまざまな可能性を考慮すると、低減効果がある程度期待できるものの、あくまでも、その効果は小さく、現在期待されている磁気力による加熱量の低減については、磁気配位等、さまざまな工夫が必要であるとしている。

以上要するに、本論文は再突入機における電磁力による空力加熱量の低減効果について現実的な飛行環境下での現れ方について検討を加え、従来の予想に反し、一般に期待されているような低減効果を期待することが困難であることを示すと共に、さらなる工夫が必要であることを明確にした点で、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。