

論文の内容の要旨

論文題目 極超音速弱電離プラズマ流の電磁流体干渉効果に関する研究

氏名 永田 靖典

大気突入機のような極超音速で飛行する飛行体にとって空力加熱から機体を保護することは非常に重要な問題であり、機体内部の機器やペイロードを保護するためには熱防御システムが必須である。現在このような空力加熱に対する防御法としては、耐熱タイルや断熱材、アブレータを用いた方法が実用化されているが、これらは厳しい加熱環境に曝されることで破損や損耗が起き、繰り返し使用することが難しく、運用コスト増大の一因として考えられている。宇宙輸送機の開発主体は民間へ移行しつつあり、これに伴い宇宙空間からの物資回収や人員帰還の需要も高まると予想され、より経済性の高い熱防御システムが求められている。

大気突入機の空力加熱を低減させる方法として、電磁力を用いる方法が 1950 年代から提案されている。高速で飛行する機体の前方には強い衝撃波が発生し、それを通過した気体は高温となることで電離反応が起こり、弱電離プラズマ状態となる。この弱電離プラズマ流は導電性を持ち、機体周りに発生させた磁場と相互作用させることで電磁力が発生する。この電磁力は主に流れに逆らう方向に作用し、流れ場を変化させることで衝撃層拡大や、加熱量低減、抗力増大といった効果が期待されている。

この電磁ヒート・シールドに関するこれまでの研究では、鈍頭形状周りで磁極を機軸に対して平行に配置した状況が主に検討されているが、実際の大気突入機に適用することを想定すると次のような状況も考えられる。印加する磁場は任意に設定することができ、実際には磁場強度とともに磁極の向きも自由に選択可能であるため、磁極を傾けることで発生する揚力を利用することが検討されている。また、有翼型大気突入機のような複雑形状を持つ機体の場合、その周囲には複雑な流れ場が形成されるため、印加磁場による影響は鈍頭形状周りの流れ場とは異なる様相を示す可能性がある。これらの状況における印加磁場の影響の詳細は知られておらず、その影響を知ることは弱電離プラズマ流と印加磁場との電磁流体干渉効果を利用したシステムの応用範囲を広げ、設計する上での知見となり得る。

そこで本研究では、実際の大気突入飛行時に想定される状況における印加磁場の影響について CFD 計算を通して定性的な評価を行う。ここでは印加磁場効果としてこれまでに検討されていない状況に着目した。その 1 つとして、鈍頭物体周りの流れに対し様々な磁場（磁極の向きおよび磁場強度）を印加した際に生じる流れ場について論じる。もう 1 つとして、極超音速流における複雑構造流れの典型例である 2 重円錐形状周りの Shock-Shock

干渉およびこれに伴う流れの剥離や局所加熱を含む流れ場に対し磁場を印加した際の影響について論じる。

第 1 章では、本研究の研究背景および研究目的について述べる。

第 2 章では、弱電離プラズマ流と印加磁場との干渉効果を含む流れ場における支配方程式について述べる。電磁場に関する Maxwell 方程式は電磁流体力学的近似と低磁気 Reynolds 数近似を用いて簡略化し、Navier-Stokes 方程式には電磁場の効果を考慮する。

第 3 章では、理想気体に簡易的な導電率モデルを組み合わせた 3 次元電磁流体計算の手法について概要を述べる。鈍頭物体周りの流れ場の場合、温度が高く、導電率の高い領域は物体前方の衝撃層内のみであるため、この領域の導電率をうまく模擬できる簡易的なモデルを採用する。

第 4 章では、熱・化学非平衡性を考慮した軸対称電磁流体計算の手法について概要を述べる。導電率は気流温度や化学組成等の気流状態に依存し、流れ場が複雑である場合には導電率の分布を予め予想することは難しい。そのため、2 重円錐形状周りの流れ場に関しては実在気体効果を考慮したより現実的なモデルを採用する。

第 5 章では、電磁流体干渉により生じる鈍頭物体周りの複雑な流れ場について述べる。弱電離プラズマ流と印加磁場の干渉効果は、流体に作用する Lorentz 力により引き起こされ、これは印加する磁場分布に依存する。そこで、磁場分布に関して磁極の向き（磁場配位）と磁場強度を変化させた際の影響について論じる。また、弱電離プラズマ流において重要となる Hall パラメータによる影響についても論じる。

磁極を機軸に対して傾けると物体には揚力が作用することが予想され、カプセル型の機体でも大気突入時に揚力飛行することで空力加熱の小さい経路を飛行できるようになると考えられている。磁極の向きを変えることで鈍頭試験模型に作用する力や加熱量が変わることがアーク加熱風洞を用いた実験により報告されている。一方、数値計算においても磁極の向きに対する影響が報告されているが、電場の評価が簡略化されており、その影響が不明であるという問題がある。そこで、電場の影響を含めたより現実に近い電磁場モデルを採用した数値計算を実施し、鈍頭物体周りの流れ場に対して印加する磁場の磁極傾斜角の影響について評価を行った。計算条件としては、地球大気突入飛行を想定した条件を用いた。

計算結果として、磁極傾斜角を変えると流れ場、電磁場がともに変化し、物体に作用する空気力および加熱特性も変化する。磁極が機軸に対して平行および垂直である場合を除いて、物体には垂直力が作用する。機軸に対する磁極の傾きが大きい場合には、大きな Joule

加熱が生じることで対流加熱が増大する。磁極を傾けると物体周りには電位差が生じ、電位差による電場は主に誘導電場を弱める方向に作用する。このことは電流分布に影響を与えるため、空気力や加熱特性を評価する上で電場の影響は大きく、無視できないものである。また、Hall 効果による影響として、物体に作用する空気力が減少する傾向にあり、磁極回転面に対して垂直方向の力、横力が新たに物体に作用する。このことは、気流条件によって機軸に対して垂直方向に作用する力の方向が変化することを意味しており、大気突入飛行経路を予測する上で重要な知見といえる。

磁場強度が強い場合、物体周囲には循環領域が形成され、この循環領域の位置は磁極傾斜角によって変化する。機軸に対して磁極が垂直である場合において、循環領域の形成は Euler の運動方程式より Lorentz 力と一様流動圧との関係から予想され、このことは CFD 計算の結果と一致する。また、流れの剥離は物体表面上に生じる逆圧力勾配と関係しており、この逆圧力勾配は Lorentz 力によって発生しているため、循環領域の形成される位置は磁場配位に依存している。Hall 効果が作用すると、磁極回転面に対して非対称な場が形成されるが、循環領域も同様に非対称となり、より複雑な流れ場が誘起される。循環領域の形成は流れ場、電磁場に影響することで、空気力や加熱特性にも大きな影響を与える。

第 6 章では、2 重円錐形状周りに生じる Shock-Shock 干渉を含む複雑な流れ場に対して磁場を印加した際の影響について述べる。磁場分布に関して磁場源強度と磁場中心位置（磁場配位）を変化させた際の影響について論じる。

有翼型大気突入機の場合、Shock-Shock 干渉に伴い翼前縁において局所的に大きな空力加熱が生じる。2 重円錐周りの流れ場は、Shock-Shock 干渉を含む複雑な極超音速流れの典型例として、数値計算コードの検証問題としての研究が行われている。これは半頂角の異なる 2 つの円錐をつなげた形状であり、つなぎ目（Kink 位置）付近で Shock-Shock 干渉が生じ、剥離泡が誘起され、大きな局所加熱が発生することが知られており、複雑な構造を持つ流れ場が形成される。このような流れ場に磁場を印加すると、衝撃層拡大に伴い Shock-Shock 干渉にも影響を与えることで、鈍頭物体周りで見られるものとは異なる効果が現れる可能性がある。そこで、2 重円錐形状周りの流れ場に対して印加磁場の影響を数値計算により評価し、複雑流れに対する印加磁場効果の有効性について検討を行った。計算条件としては、膨張波管実験において予測される試験気流を用いた。なお、Hall パラメータが小さいため、Hall 効果の影響は無視した。

計算結果として、磁場中心位置を固定し磁場源強度を強くしていくと、第 2 円錐前方の衝撃層が拡大することで Shock-Shock 干渉位置も上流に移動し、剥離泡が拡大する。これに関連して壁面圧力分布や熱流束分布も変化し、印加磁場による影響は主に第 2 円錐表面上で見られる。磁場源強度が大きくなるほど壁面圧力は低下し、圧力抗力が低下するが、Lorentz 力の反力が物体に作用することで総抗力は増大する。また、第 2 円錐表面上の熱流束は低下し、局所的なピーク値についても減少する。このため、複雑流れに対しても印加

磁場による熱防御システムとしての効果が期待される。磁場中心位置を変えた場合の計算を行い、これらの結果を **Kink** 位置における磁場強度で整理し、局所的な現象である熱流束のピーク値と剥離泡について注目したところ、熱流束のピーク値は **Kink** 位置の局所的な磁場強度と相関がとれているのに対して、剥離泡に関しては単純に相関をとることはできず、局所的な磁場強度のみならず磁場配位にも影響を受けているといえる。また、総抗力に関しても磁場源強度を変化させた場合と磁場中心位置を変化させた場合とで **Kink** 位置の磁場強度に対する傾向が大きく異なり、局所的な磁場強度だけではなく、全体的な磁場配位にも大きく影響を受ける。

第 7 章では、本研究の結論について述べる。実際の気突入飛行時に想定される流れ場で、印加磁場効果としてこれまでに検討されていない状況に着目し、その弱電離プラズマ流と印加磁場との干渉効果について明らかにした。このことは電磁力を用いた弱電離プラズマ流制御における新たな可能性を示唆するものである。