

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04921

研究課題名（和文）電磁流体制御技術を用いた新しい大気圏突入機の機体制御に関する研究

研究課題名（英文）Study on New Atmospheric Entry Vehicle Control using MHD Flow Control

研究代表者

永田 靖典（Nagata, Yasunori）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：20635594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙から地上への帰還時などの大気圏突入飛行において、電磁力を利用した流体制御技術は革新的な飛行制御技術として応用できる可能性を秘めている。本研究では、能動的な飛行制御に応用することを目指した新しい手法を提案し、その基礎的な現象について検討することを目的としている。新しい手法では機体表面の導通を利用することを想定しており、導通を切り替えることで流体制御効果に影響を与えることを実験的・数値的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電磁力を利用した流体制御技術に関し、機体表面の導通に着目した新たなアプローチを提案し、実験的・数値的な知見を得たことでその可能性を世に示した。この技術は大気圏突入機の革新的な技術であり、実現することでサンプルリターンカプセルや惑星探査機の発展につながり、その結果として新たな宇宙ミッション・宇宙探査の創出につながる可能性がある。また、プラズマ気流と電磁場との干渉現象についての知見を得たことは、プラズマ物理の発展に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Flow control techniques using electromagnetic forces have a potential to be an innovative flight control technology for atmospheric entry flights such as return to the ground from space. In this research, a new method for active flight control is proposed and its fundamental phenomena are investigated. The new method is designed to utilize conduction on the surface of the vehicle, and it is experimentally and numerically confirmed that switching the conduction could affect the effect of the flow control.

研究分野：宇宙工学・高速流体力学

キーワード：航空宇宙工学 大気圏突入機 機体制御 プラズマ流制御 電磁流体

1. 研究開始当初の背景

大気圏突入飛行時の厳しい加熱（空力加熱）は、宇宙から地上へ帰還する際に避けることのできない課題であるが、揚力飛行させることで加熱の少ない帰還軌道を飛行することが可能となる。カプセル型機体で揚力飛行を実現するためには機体の姿勢制御が不可欠であり、これまではガスジェットなどの機械的デバイスを用いて実現されてきたが、多くの機体リソースが必要となる。機械的デバイスに頼らず、電気的デバイスのみで機体の制御が可能となれば、大気圏突入機技術に新たなパラダイムをもたらすことにつながる。

そこで、電磁流体制御（MHD Flow Control）技術に着目し、これを用いることで、機械的デバイスを用いない新たな機体制御手法について提案する。MHD Flow Control は電磁力を利用して気流を制御するものであり、その電磁力の効果によって、対流加熱の緩和と機体に働く空気力の変化が期待できる。この効果は高速気流と電磁場との干渉によって発現し、磁場を機体周りに展開しておけば受動的に効果を得ることができるが、さらに能動的な制御にも利用できると思われる。能動的な制御によって機体制御への応用も可能と考えられるが、その具体的な能動的制御システムは明らかになっていない。

MHD Flow Control の性質として、機体周りに展開する磁場を変化させれば、得られる効果を変化できるが、磁場分布を大きく変化させることは容易ではなく、多くのリソースを必要とすることが予想される。MHD Flow Control の効果に対しては、機体表面の導通も影響することが知られている。そのときの状況を参考に、機体表面に設置した電極を介して、プラズマ気流中に流れる電流を機体内部でバイパスさせ、これをスイッチ開閉により切り替える方法が考えられる。図 1 にその概要図を示す。プラズマ気流中の電流経路が変化すれば、MHD Flow Control の効果（機体に作用する空気力）も変化することになる。よって、これにより電気的スイッチのみで能動的な制御が可能になると考えられる。この制御システムを考える上で、機体表面の導通を部分的に変えることでどのような変化がもたらされるのかについて明らかにする必要があります。

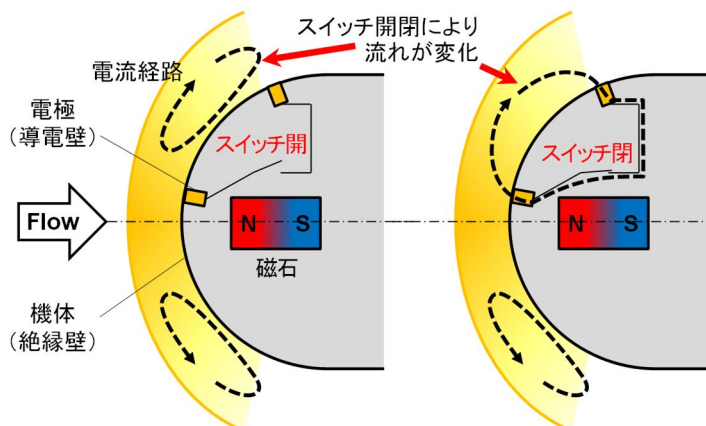


図 1：機体表面の導通を利用した MHD Flow Control の新しい制御手法の概要図

2. 研究の目的

本研究では、MHD Flow Control における機体表面の導通の影響を実験により検証するとともに、数値シミュレーションを併用することでその現象理解を目指すことを目的としている。表面が導電壁と絶縁壁それぞれの場合にどのような影響を与えるかに着目した研究は行われているが、部分的に導電壁と絶縁壁を組み合わせた場合にどのような影響を与えるかについては研究例が少ない。そこで、実験計測については、アーク加熱風洞を用いて実験実証を行い、機体表面の導通が MHD Flow Control の効果に影響を与えることを実証する。数値シミュレーションについては、部分的に導電壁と絶縁壁を組み合わせた場合の影響について数値的に検討する。

3. 研究の方法

MHD Flow Control の効果はプラズマ気流と電磁場との相互作用により生じる現象であり、この効果を地上実験で検証するために、アーク加熱風洞が使用されている。本研究では、現在 JAXA 宇宙科学研究所に設置（研究期間中に岡山大学から移設）されている 1.5kW 級アーク加熱風洞を用いて実験計測を行った。図 2 に、使用したアーク加熱風洞を示す。アーク加熱風洞を用いて、磁石を内蔵した鈍頭形状の実験模型を超音速プラズマ気流にさらし、模型に作用する抗力の計測を行った。抗力の計測はこれまでに開発された抗力計測装置を用いた。図 3 に、使用した抗力計測装置を示す。実験模型については新規開発し、導通の影響を明確に計測できるようにするための工夫を施した。

数値シミュレーションについては、これまでに MHD Flow Control 効果を検証するために開発してきた流体計算コードを使用し、これまで 2 次元軸対称計算に対して主に使用してきたが、3 次元計算も計算できるように改修した。

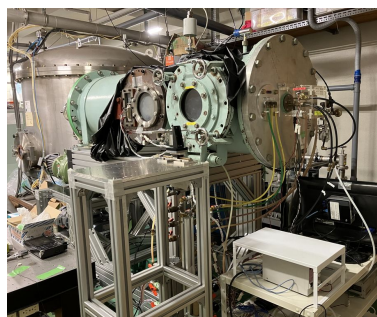


図 2：本研究で使した 1.5kW 級アーク加熱風洞

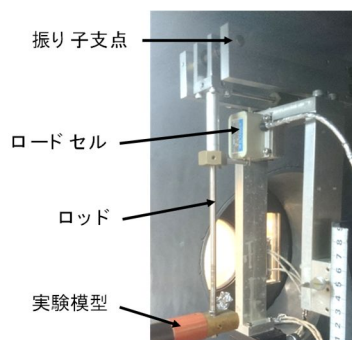


図 3：抗力計測装置

4. 研究成果

(1) 機体表面の電極状態による抗力への影響

模型表面に電極を配置し、その電極間の導通を通風中にスイッチで切り替えることで、スイッチ切替前後の抗力を 1 回の通風中に計測し、スイッチ切替により抗力が変化することを実験的に確認した。アーク加熱風洞のプラズマ気流はアーク放電を利用している関係で、気流の再現性が必ずしも良いとはいえない。加えて、プラズマ気流から受ける模型の抗力は 100 mN 程度と小さく、電極状態を変更する毎に通風を行ったとすると、抗力変化が小さいために気流のバラツキの範囲内に埋もれてしまう。また、模型内部にはネオジウム磁石が設置されており、それが模型内部の大部分を占めているため、電極を設置することも容易ではない。そこで、ネオジウム磁石を覆う真鍮製カバーを耐熱塗料で塗布し、電極部の塗料を取り除くことで片方の電極とし、もう片方の電極にはステンステープを用いた。それぞれの電極からは配線をアーク加熱風洞装置の外部まで引き出し、外部にスイッチを設置することで、電極間の導通を装置外部から操作できるようにした。図 4 に、製作した実験模型と通風中の様子を示す。これらの工夫を施した実験模型により、1 回の通風で電極間の導通ありとなしの両方について計測でき、気流のバラツキによる差異を回避することができた。また、スイッチ切替前後の抗力変化が、電極間に印加する電圧に依存することも確認した。図 5 に、抗力変化と印加電圧の関係を示す。

電極間の導通により抗力が変化することは、能動的制御システムで想定している基本的な現象であり、これが実験的に確認されたことで、この制御手法が姿勢制御などの制御へ応用可能であることが示された。また、開発した実験模型は、1 回の通風で複数条件のデータを得ることが可能となっており、プラズマ気流を用いた MHD Flow Control の実験計測技術において重要な知見が得られたと考えている。

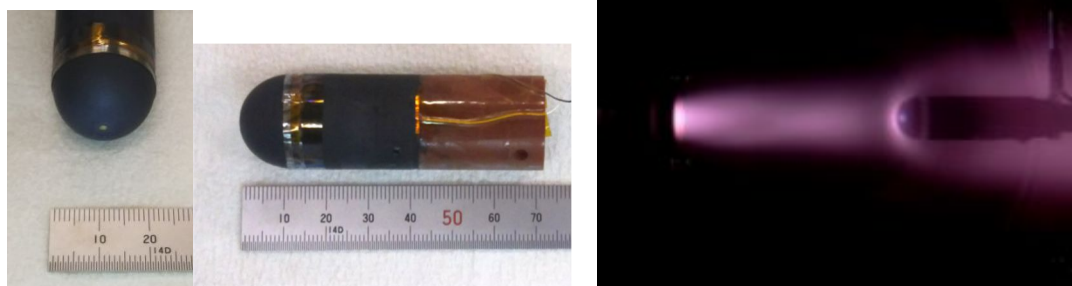


図 4：電極設置模型（左：模型外観，右：通風中の様子）

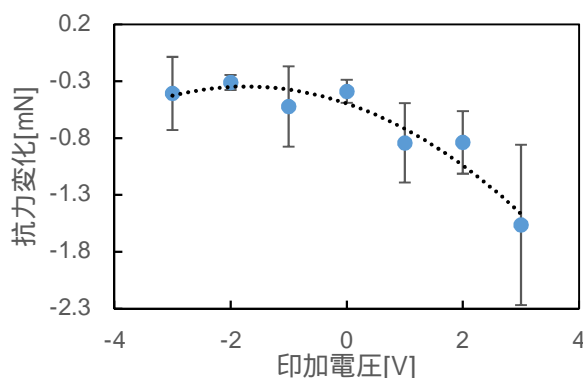


図 5：印加電圧とスイッチ開閉前後の抗力変化の関係

(2) 電極設置を模擬した数値シミュレーション

サイズの小さい電極を適切に設置したときの MHD Flow Control の効果は、その電極を包含する比較的サイズの大きい導電壁を設置したときの効果と同等となることを数値シミュレーションにより確認した。電極の設置箇所の選定は、MHD Flow Control の効果をスイッチ開閉により効率良く変化させる上で重要と考えられる。適切な設置位置を予測できれば、検証すべきケース数の削減につながり、研究開発を効率良く進めることにもつながる。MHD Flow Control の電磁流体シミュレーション計算では、電磁場計算における境界条件を変更することで、導電壁（電位一定条件）と絶縁壁（電流の法線方向成分 0 条件）を切り替えている。そのため、計算条件として電流が表面に出入りするよう条件設定しているわけではなく、流れ場との相互作用の結果として、電流が表面に出入りする場所が決まることになる。数値シミュレーションの結果として、広い範囲を導電壁としたケースで見られた電流が表面に出入りする場所に対して、その場所のみにサイズの小さい導電壁を設置したケースでも同様の電流経路が形成されることを確認した。計算結果の例を図 6 に示す。また、そのような電流経路によって生じる MHD Flow Control の効果は同程度であり、導通の有無によって大きな変化を得ることができることを確認した。

このことから、流れ場との相互作用の結果として電流が導電壁に出入りする場所は、能動的制御システムで大きな制御効果を得るために、電極の設置箇所を選定する上で重要な指標といえる。このことは今後の研究開発を進めていく上でも有益な知見であると考えている。

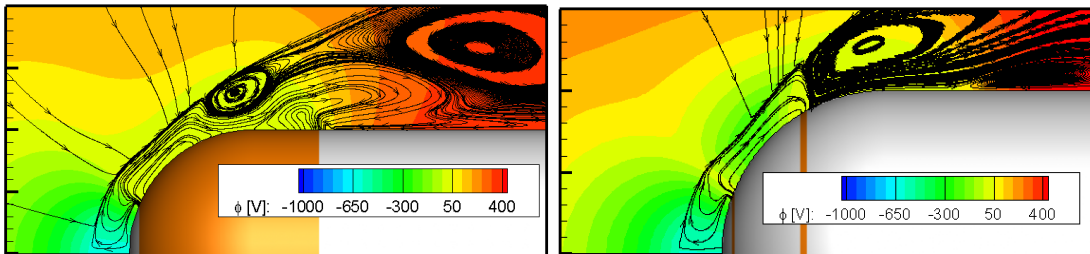


図 6：気流中と導電壁に流れる電流経路（左：導電壁サイズの大きいケース，右：導電壁サイズの小さい電極ケース）

(3) 数値シミュレーションによる非対称場の現象理解

機体表面に幾何学的に非軸対称な導電壁を設置した場合に、非対称方向（Y 方向）だけでなく対称方向（Z 方向）にも機体に横力が作用することを、3 次元電磁流体シミュレーションにより確認した。機体制御への応用を考える上では、抗力だけでなく他の力成分・モーメントへの影響も把握する必要がある。ここではサンプルリターンカプセル形状を対象に、機軸周方向に導電壁を設置した場合の影響について調べた。カプセル形状は軸対称であるが、その表面に導電壁を任意に設置することができ、どのように設置した場合にどのような影響が生じるかを知っておく必要がある。機体中心軸に対して周方向に設置する導電壁の範囲を変えるとすると、導電壁の配置に対して非対称方向と対称方向が定義できることになる。図 7 に、導電壁の配置に対する座標軸の定義を示す。3 次元電磁流体シミュレーションの結果として、導電壁を配置することで、機体に作用する力の非対称方向成分と対称方向成分の両方が変化することを確認した。図 8 に横力の結果を示す。これは、導電壁を設置したことによる電磁場の非対称分布に依り生じたものである。

姿勢制御に応用するためには十分な制御能力を得ると同時に、その制御能力を把握しておく必要があり、現象理解が重要である。MHD Flow Control の効果は、極超音速気流・プラズマ・電磁場などが関係する複雑な現象であり、ここで得られた知見はその一端を示すものであると同時に、姿勢制御への応用に向けた重要な知見であると考えている。

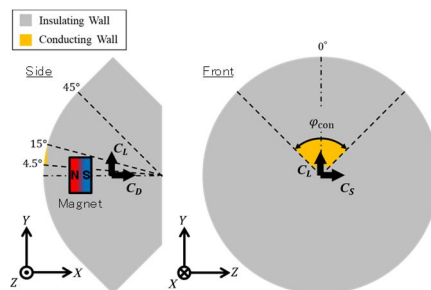


図 7：カプセル型機体の座標軸定義と導電壁配置との関係

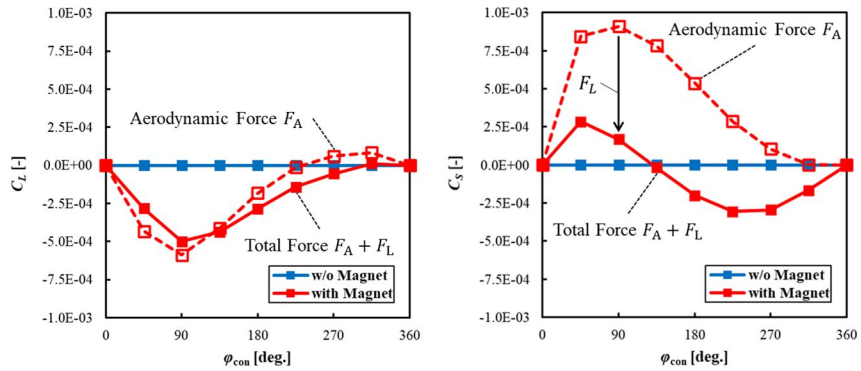


図 8：周方向導電壁配置と横力（左：非対称方向成分，右：対称方向成分）との関係

(4) くさび形状周りの流れ場に対する数値シミュレーション

2次元くさび形状周りの極超音速プラズマ気流に対し、肩部付近に磁場を印加した場合の影響として、くさび前方の衝撃層を大きく変化できる可能性を数値シミュレーションにより明らかにした。姿勢制御に応用するには、流れ場に対してより大きな影響を与えることが可能なコンフィギュレーションを模索する必要がある。そこで、比較的単純な流れ場として、くさび形状周りの流れ場に着目した。これはカプセル肩部付近に類似した流れ場を想定している。導電壁の配置と同様に、磁場配置についても任意に設定することができるため、ここでは肩部付近に磁場を配置した場合を想定した。半頂角 44 度のくさびの前方には斜め衝撃波が形成されるが、磁場印加により衝撃波形状が変形し、さらに強い磁場を印加することで衝撃波が前方に大きく移動する様子が数値シミュレーションの結果として確認された。計算結果の例を図 9 に示す。衝撃波の移動とともに、くさび表面の壁圧分布も大きく変化しており、流れ場に大きな変化をもたらされる。

MHD Flow Control は電磁力により流れ場を変化させる技術であり、小さな磁場でより大きな流れ場の変化を生み出すことができれば、制御能力の向上につながり、姿勢制御への応用にもつながる。このくさび形状周りの状況を、カプセル形状機体に適用できるかどうかは今後さらなる検討が必要である。

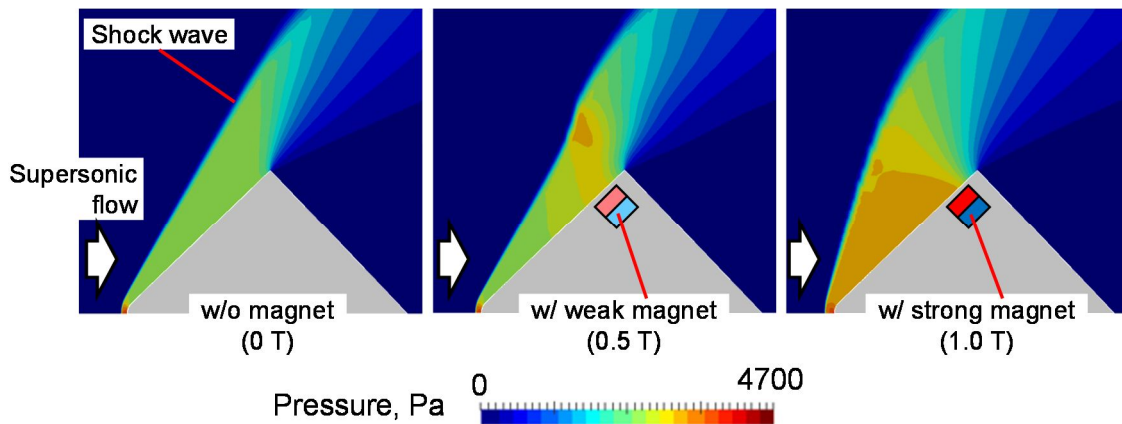


図 9：2次元くさび形状周りの流れ場に対する MHD Flow Control 効果（左：磁石なし，中：弱磁石，右：強磁石）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永田靖典
2. 発表標題 MHD flow control技術を用いた深宇宙エアロキャプチャへの適用に向けた検討
3. 学会等名 令和4年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤立樹, 今村宰, 永田靖典, 山田和彦
2. 発表標題 くさび形状周りの極超音速プラズマ流に関するMHD流体解析
3. 学会等名 2022年度 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村洸太, 永田靖典, 山田和彦, 河内俊憲
2. 発表標題 再突入カプセルの電磁流体制御に対する壁面の導通の影響に関する3次元流体解析
3. 学会等名 令和3年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田靖典, 前田真吾, 河内俊憲, 柳瀬眞一郎
2. 発表標題 電磁ヒートシールドを用いた大気突入機のVSL解析
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永田靖典, 前田真吾, 河内俊憲
2. 発表標題 電磁ヒートシールド大気突入機のVSL解析と軌道への影響
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中村 洸太 (Nakamura Kota)	岡山大学 (15301)	
研究協力者	佐藤 立樹 (Sato Ritsuki)	日本大学 (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------