

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820378

研究課題名(和文) フライト環境下における電磁ヒートシールド効果に関する研究

研究課題名(英文) Research on MHD heat shield effect under flight condition

研究代表者

永田 靖典 (NAGATA, YASUNORI)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：20635594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000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、加熱から機体を保護するための革新的な技術として電磁ヒートシールドが提案されている。本研究は、この電磁ヒートシールドの効果の予測精度を高めるために、空気プラズマ気流中での効果を実験計測することを目的としている。このための計測装置の新規開発を行い、空気プラズマ気流中においても電磁ヒートシールドの効果が発生することを確認した。

研究成果の概要(英文)：MHD heat shield is an innovative technology to protect the vehicle from severe heating during atmospheric entry flight to return from the space. In this research, the MHD heat shield effect was experimentally measured under air plasma flow to improve the numerical prediction. As a result, new measurement device was developed and it was confirmed that the MHD heat shield effect is also generated under the air plasma flow.

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 大気圏再突入機 プラズマ流制御 電磁流体 熱防御システム

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙から地上への帰還等の大気突入飛行で問題となる空力加熱から、機体内部を保護するための革新的な熱防御システムとして、電磁ヒートシールドが提案されている。これは電磁力を用いて気流を変化させることで、加熱低減や空力制御が可能と考えられている。この実現に向けて、長年、実験や数値シミュレーションが行われており、その効果について検証がされてきた。しかし、この電磁ヒートシールドは実際のフライトによる実証試験が行われておらず、想定されている現象が実際に起こるかどうかは明らかとなっていない。

フライト試験を行うためには飛行中の状況を事前に予測しておく必要があるが、地上実験で同じ状況を再現することは困難であり、数値シミュレーションによる予測が重要な役割を果たすことになる。地上実験では、電磁ヒートシールドで重要となる電磁場とプラズマ気流との相互作用についての現象理解に向けた研究が主に行われている。しかし、ガス種が空気ではないなど、実際のフライト環境とは大きく異なっているため、数値シミュレーションの妥当性を確認する上でも、よりフライトに近い環境での実験データが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、実際のフライト環境により近い条件下での電磁ヒートシールド効果について実験計測し、数値シミュレーションの妥当性を確認することを目的としている。実験計測では、電磁ヒートシールド効果による抗力増大効果に着目し、そのための抗力計測装置の開発を行う。抗力増大効果の計測ができることを確認した後、数値シミュレーションの妥当性検証に利用できる各種データを取得するために、条件を変えた実験を行うことを目指す。また、実際のフライト環境での電磁ヒートシールド効果について数値シミュレーションによる検討も行う。

### 3. 研究の方法

電磁ヒートシールド効果はプラズマ気流と電磁場との相互作用による現象であり、化学反応が内在するためガス種の影響を受ける。これまでの実験では主にアルゴンプラズマが用いられているが、実際の地球大気中のフライトでは空気がプラズマ化する。そのため、空気プラズマ中での電磁ヒートシールド効果について検証する必要があるが、数値シミュレーションの妥当性を検証可能なデータはほとんど得られていない。そのため、本研究では空気プラズマ気流中での電磁ヒートシールド効果について、JAXA 宇宙科学研究所の大口径 ICP 加熱器を用いて実験計測を行った。

ICP 加熱器を用いて、磁石を内蔵した鈍頭形状の実験模型を空気プラズマ気流中に投

入し、発生する抗力の計測を行った。ICP 加熱器には抗力を計測するための装置が整備されていないため、これまでに利用されてきたアーク加熱風洞の設備を参考に、新規開発を行った。また、実験模型についてもアーク加熱風洞で使われていたものを参考にし、直径 22mm の鈍頭円柱形状とした。ICP 加熱器での実験に先立ち、実験条件を変えた影響を把握するために、アルゴンプラズマを用いたアーク加熱風洞での実験を予備実験として行った。

数値シミュレーションについては、これまでに電磁ヒートシールド効果を検証するために開発してきた空気プラズマについての流体計算コードを使用した。

### 4. 研究成果

#### (1) ICP 加熱器における力計測装置の開発

JAXA 宇宙科学研究所の大口径 ICP 加熱器において、生成されたプラズマ気流による抗力を測定する装置の開発を行った。図 1 は開発した装置の外観、図 2 はこの装置を ICP 加熱器に設置した様子である。力の計測でよく用いられるひずみゲージやロードセルでは出力信号が微弱であり、ICP 加熱器でプラズマを生成するために使用される高周波電源の影響で SN 比が悪化することが予想される。そのため、実験模型を振り子状に動くようにし、その微小変位をレーザ変位計で計測するようにした。また、ICP 加熱器では気流に直接曝されない所でも温度が上昇し、その熱変形の影響が出るため、実験模型を除く振り子全体を覆って、気流を遮断するようにした。さらに、実験模型上流にシャッターを設置することで、自動ステージによって模型が所定の位置に投入されるまでの間、気流をシャッターで遮り、気流に曝される前後の値を計測できるようにした。これらの対策により、数 gf という微小な力を計測できるようになり、良好な再現性が得られた。ICP 加熱器では主に熱防御材料の耐熱試験が行われるが、損耗による気流への影響の一つとして抗力を見るなど、より発展的な研究に使用できる可能性がある。

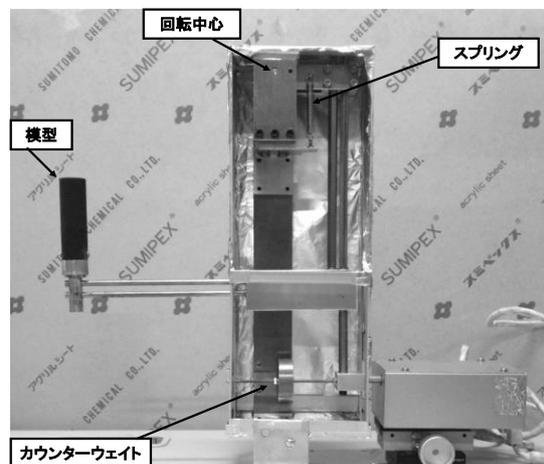


図 1 開発した力計測装置の外観

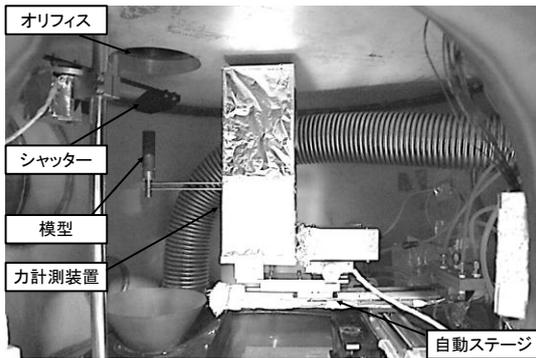


図 2 ICP 加熱器に力計測装置を設置した様子

(2) 空気プラズマ気流中での電磁ヒートシールド効果の実証

ICP 加熱器で生成された空気プラズマ気流において、電磁ヒートシールド効果による抗力増大効果の計測を行い、それが実際に発生することを実証した。図 3 は実験模型に空気プラズマ気流を曝したときの様子である。同一の気流条件下において、鈍頭実験模型内部にネオジム磁石を設置した場合の抗力は、消磁させた磁石を設置した場合に比べて、大きくなることわかった。図 4 はその実験結果を示している。このような効果はアーク加熱風洞ではすでに明らかであるが、本研究により ICP 加熱器の空気プラズマにおいても同様の効果が発生することが明らかとなった。ICP 加熱器ではコンタミの少ないより良好なプラズマ気流を得ることが可能であり、気流条件の変更も比較的容易であるため、様々な条件下での計測が可能と考えられる。本研究では力計測装置の開発に時間を要したため、条件を変えての計測はできておらず、今後の課題として残されている。また、計測データによる数値シミュレーションの妥当性確認についても、計算に必要な情報が十分得られていないため、これも今後の課題である。

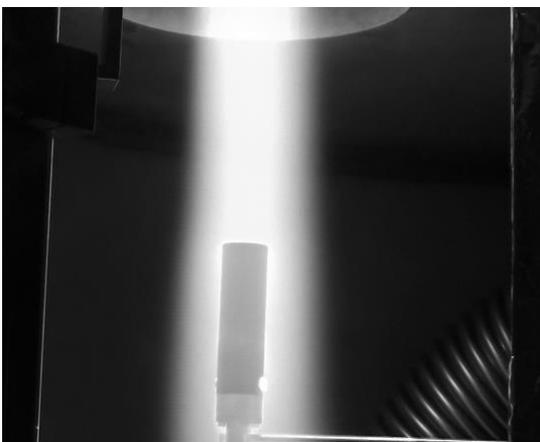


図 3 ICP 加熱器での実験の様子

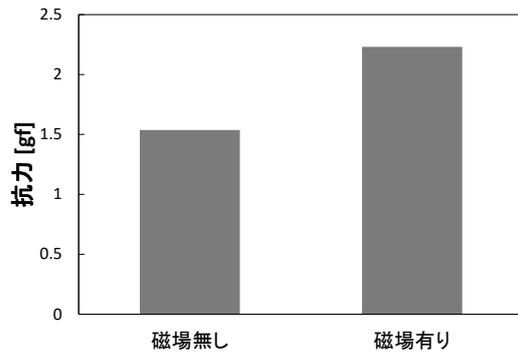


図 4 ICP 加熱器による空気プラズマ気流中における抗力増大効果の計測結果

(3) ノーズ半径による抗力増大効果への影響

ICP 加熱器実験の予備実験として、岡山大学のアーク加熱風洞において、実験模型先端の形状、ノーズ半径による抗力増大効果への影響について計測を行った。ノーズ半径を変えた実験模型に対し、同一のネオジム磁石を用いて抗力増大率がどのように変わるかを計測した。形状が変わることで磁石の有無に関わらず抗力の大きさは変わるが、ノーズ半径を変えると磁石による抗力増大率が変化することが明らかとなった。図 5 はその実験結果を示している。ノーズ半径は大気突入機の重要な設計パラメータの一つであり、これと電磁ヒートシールド効果との関係の一端を示す結果といえる。本実験はアルゴンプラズマを用いて行われたが、ICP 加熱器を用いて空気プラズマの場合にも同様の傾向にあるかについて今後検証を行う必要がある。

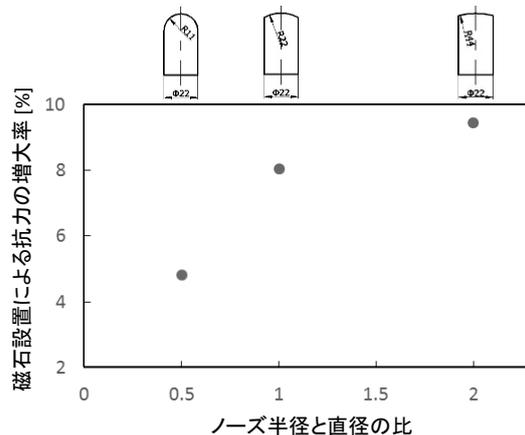


図 5 アーク加熱風洞におけるノーズ半径と抗力増大率の関係についての計測結果

(4) 実機を想定した磁場配置による電磁ヒートシールド効果の検証

実際の機体を想定した数値シミュレーションとして、複数の磁石を配置した場合の影響について検討を行った。これは実験計測との比較のために用意した計算コードを用いて行った。これまでの電磁ヒートシールドの数値シミュレーションでは、非常に強力な磁

石を用いることが想定されていたが、小型のカプセルでは機体サイズの制約上現実的ではない。そこで、実在する永久磁石の使用を想定した機体システムとして、図6の右に示すような、複数の磁石を用いた場合についての検討を行った。

その結果、抗力増大効果に着目した場合、複数の磁石を配置したとしても、強力な磁石一つに匹敵する効果を得られるとは限らないことがわかった。結果的に有効な機体システムを示すには至っていないが、実際に飛行した電磁ヒートシールドの機体が存在しない現状において、機体システムの一つの方向性を示すことができたと考えている。今後も有効な機体システムについて検討を進めていく必要がある。

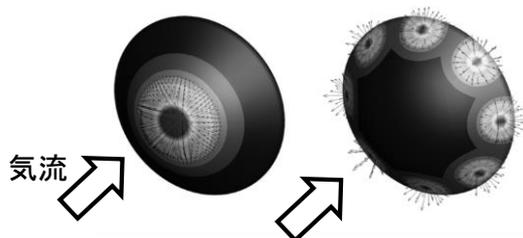


図6 カプセルに単一磁石を配置した場合(左)と、複数の磁石を配置した場合(右)の機体表面磁場分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Yasunori NAGATA, Kazuhiko YAMADA, Takashi ABE, "Drag Enhancement for Atmospheric Entry Capsule using Electrodynamical Effect with Multi-magnetic Source," Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 4, No. ists30, 2016, pp. Pe\_105-Pe\_111. 査読有  
doi:10.2322/tastj.14.Pe\_105

[学会発表] (計 4 件)

- ① 牟田将之, 「抗力増大効果に対する磁場印加型モデルの形状の影響」, 第18回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会, 2016年11月26日, 岡山.
- ② 永田靖典, 「極超音速プラズマ気流に対する複数磁場印加による効果」, 日本機械学会 第28回計算力学講演会, 2015年10月11日, 神奈川・横浜.
- ③ Yasunori Nagata, "Drag Enhancement for Atmospheric Entry Capsule using Electrodynamical Effect with Multi-magnetic Source," 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015/7/7, Kobe,

Hyogo, Japan.

- ④ 永田靖典, 「大気圏再突入機の電磁力を用いた抗力増大技術」, 第14回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会, 2014年12月13日, 岡山.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永田 靖典 (NAGATA, Yasunori)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 20635594

### (4) 研究協力者

湯原 正太 (YUHARA, Shota)

牟田 将之 (MUTA, Masayuki)