

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：15101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22018

研究課題名（和文）電離イグニッション方式による超高々度からの電磁力エアロブレーキングの検討

研究課題名（英文）Investigation of Magnetohydrodynamic Aerobraking from Super High Altitude by Ionization Ignition Method

研究代表者

葛山 浩（Katsurayama, Hiroshi）

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：80435809

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：電磁力エアロブレーキングにおける臨界高度の実証と物理機構の解明を目指し、以下の成果を得た。（1）希薄アーク気流中の磁化模型周りのレーザートムソン散乱計測を行い、臨界高度の要因である、ホール効果に起因するジュール加熱を、電子温度の上昇を捉えることで、間接的に証明した。（2）大型空気アーク風洞において、電離促進剤を用いて、非電離高エンタルピー気流を強制的に電離させる方法を開発し、衝撃層の電離とその拡大とみられる自発光変化を捉えた。（3）再突入流を忠実に再現できる膨張波管気流での電磁力発動試験を試みた。衝撃層拡大効果は得られなかったが、衝撃層拡大のために必要な気流条件を数値解析により精査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙船が大気圏に突入する際、断熱材を用いて、過酷な空力加熱に耐える技術が使われている。本研究で取り組む電磁力エアロブレーキングは、再突入時に生じるプラズマを電磁力により制御し、能動的に加熱を避ける革新的な技術であり、宇宙船の再利用や安全性を格段に向上させる。本研究では特に、数値解析により予想された臨界高度（上層大気から突然大きな電磁力が発生する現象）の存在と物理機構を検証すべく、三種の高エンタルピー風洞を用いた実験と数値解析による検証を行った。臨界高度の実証はまだ道半ばであるが、臨界高度の原因となるジュール加熱を確認し、上層で強制的に電磁力を発動させる電離促進剤添加法の開発にも成功した。

研究成果の概要（英文）：We investigated the existence and mechanism of the critical altitude in magnetohydrodynamic (MHD) aerobraking and obtained the following results. (1) We have conducted the laser Thomson scattering measurement around a magnetized body in the rarefied arc flow and captured the electron temperature increase by the Joule heating caused by the Hall effect, which is the cause of the critical altitude. (2) We developed a method of forcibly ionizing non-ionized high-enthalpy arc-heated airflow using an ionization seed. Using this method, we successfully made the shock layer ionized, and we observed the MHD shock layer enlargement from the self-emission change of the shock layer. (3) We tried to measure the MHD shock layer enlargement using an expanding wave tube flow that can faithfully reproduce the re-entry flow. Although we could not measure the effect in the experiment, we clarified the expansion tube flow conditions necessary for the shock layer enlargement using numerical analyses.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：大気圏突入 電磁力エアロブレーキング レーザートムソン散乱法 アーク風洞 膨張波管 空力加熱
ホール効果

1. 研究開始当初の背景

大気圏突入機の空力加熱を能動的に制御する革新的大気圏突入技術として、電磁力エアロブレーキングが提案されている。このシステムは、近年国内外で研究が行われ、低高度の流れが濃い領域での電磁力発生機構は、ほぼ明らかにされている。一方、高々度の希薄流領域では、ホール効果(電子の磁場巻き付きに起因)が卓越し、現象が複雑になるため、電磁力発生機構がよくわかっていない。特に、我々が、高々度からの電磁力ブレーキングを数値解析により調べたところ、ある高度までは全く電磁力が発生しないが、その高度を境にして、突如として大電磁力が発生する“臨界”高度が存在していることが予測された(Katsurayama et al., AIAA Paper 2015-3368)。また、臨界高度は、希薄気流中で卓越するホール効果に起因するジュール加熱と熱化学非平衡が絡んだ複雑な現象により引き起こされていることが予想され、この現象の解明のためには、予め電離している希薄アーク気流実験は適しておらず、忠実に再突入流れを再現できる(衝撃層内だけが電離する)膨張波管を用いた実験が必要とされていた。

2. 研究の目的

臨界高度の発生機構を膨張波管試験、希薄アーク風洞でのホール効果の検証、および数値流体力学(CFD)解析により検証する。さらに臨界高度以上で大電磁力を発生させるための、電離イグニッション方式の開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 希薄アルゴンアーク気流中に磁化模型を設置し、磁場印加により発生するホール効果に起因するジュール加熱(電子加熱)を、レーザートムソン散乱計測により電子温度を高精度計測することで間接的に捉える。また、計測結果をCFD解析により検証する。
- (2) JAXA 大型空気アーク風洞を用いて、実際の再突入流と同等の気流エンタルピーを持つ再結合非電離流中に、電離促進剤を搭載した磁化模型を設置し、衝撃層内だけを強制的に電離させることで、電磁力による衝撃層拡大効果が発現するか検証する。
- (3) JAXA 大型膨張波管において、空気及びアルゴン気流の電磁力試験を実施し、自発光計測により衝撃層拡大効果が起こっているか検証する。また、臨界高度現象を発現できる膨張波管気流条件をCFD解析により調査する。

4. 研究成果

- (1) 希薄アルゴンアーク気流中に置かれた磁化模型周りのレーザートムソン散乱計測

図1に希薄アルゴンアーク気流中に置かれた磁化模型を示す。模型は、電気的絶縁性を持つアルミナを溶射した銅でできており、内部によどみ点で0.35 Tの磁束密度を持つネオジウム磁石が搭載してある。

なお、臨界高度の発現機構では、気流中の絶縁境界位置が重要な役割を果たすため、風洞の背圧を制御して、プルーム境界位置を変化させて実験を行った。

レーザートムソン散乱(LTS)計測では、プローブ光となるYAGレーザーを模型よどみ点の前方5 mmに集光し、散乱光を図2に示す光学系で自作のトリプル分光器に取り込み、ICCDカメラで計測した。図3に取得したLTSスペクトルの一例を示す。

図4にLTSスペクトルから算出した電子温度と電子密度、およびCFD解析による予測値の背圧依存性を示す。磁場なしの場合、背圧 $p_b=30$ Paにおいて、実験値とCFD値は非常によく一致する。背圧 p_b が大

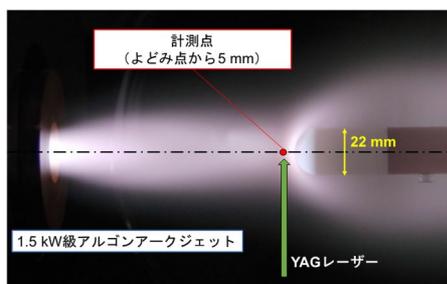


図1 希薄アルゴンアーク気流中に置かれた磁化模型

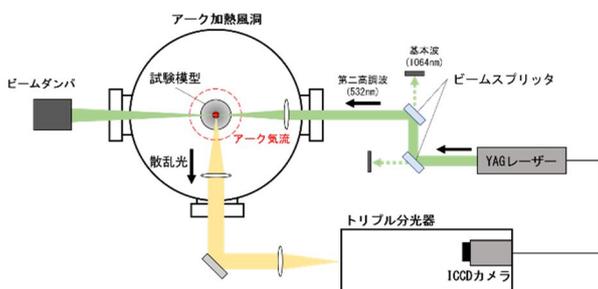


図2 レーザートムソン散乱光計測系

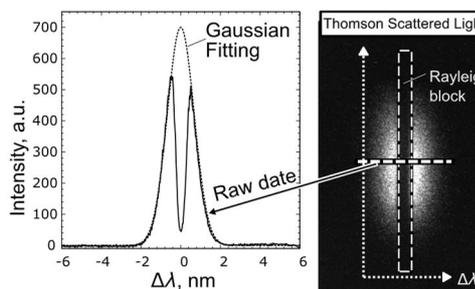


図3 レーザートムソン散乱スペクトル例

きくなると、CFD 値は実験値を過小評価するが（特に電子密度について）背圧に対する増加傾向は一致している。また、磁場を印加した場合に、ホール効果に起因するジュール加熱による電子温度上昇を初めて捉えることに成功し、背圧 $p_b=30$ Pa の場合は、CFD と実験値は定量的にも一致した。ただし、背圧 p_b が上昇していくと、ジュール加熱による温度上昇を CFD が過大評価した。この理由は、まだ明確になっていないが、プルーム中の絶縁境界の位置と関係している可能性が高いため、現在、半径方向の電子温度分布の計測を試みている。

(2) JAXA 大型アーク風洞での電離促進剤添加による衝撃層の強制拡大実験

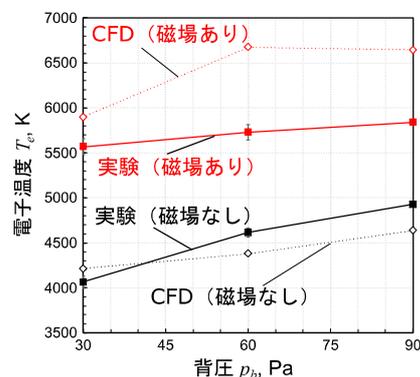
これまで我々は、ネオジム磁石を搭載した水冷式電磁力模型を開発し、JAXA の 1 MW 級大型空気アーク風洞にて加熱試験を実施したが、この空気流は高いエンタルピーを持つものの、非電離流であり、衝撃波圧縮も電離を引き起こすほどは強くないため、電磁力衝撃層拡大効果が得られなかった。そこで、電離エネルギーが小さく、かつイオンが発光しやすいアルカリ土類金属を含む化合物（硫酸バリウム）をペレットに整形し、これを試験模型に搭載して、衝撃層内に添加した。

添加方法は、試験模型の前方に設けたくぼみにコイン状のペレットを埋め込む方法（凹型）（図 5(a)）および、試験模型からロッドを伸ばし、その先端に円柱状のペレットを搭載する方法（ロッド型）（図 5(b)）の二種類を試した。

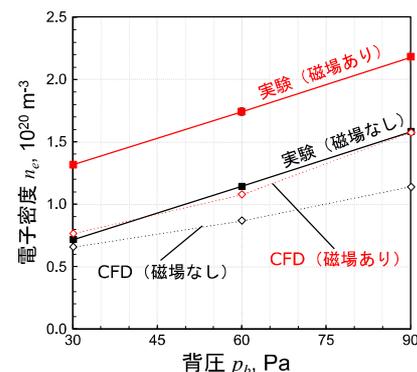
実験では、衝撃層内の発光分光計測、および自発光計測による衝撃層拡大の有無の調査を実施した。図 6 に自発光の様子を、図 7 に発光スペクトルを示す。衝撃層内でのバリウムイオンの発光を捉えることができ、衝撃層内を強制的に電離させることに成功した。また、磁石を搭載した場合にスペクトル強度が増加することもわかった。

図 8 に凹型模型の場合のよどみ線上の自発光強度分布の磁場ありとなしの比較を示す。信号強度 250 以上は信号強度が飽和しているため、議論できないが、磁場を印加すると、発光分布が前方に移動しており、衝撃層が拡大していることが示唆された。

以上より、電離促進剤を用いて、非電離高エンタルピー中で電磁力衝撃層拡大効果を強制的に



(a) 電子温度



(b) 電子密度

図 4 電子温度と密度



(a) 凹型搭載模型

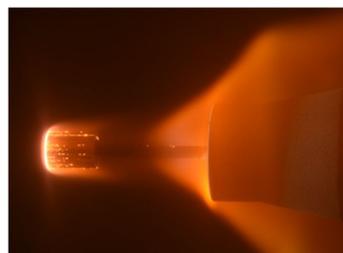


(b) ロッド型搭載模型

図 5 電離促進剤添加用模型



(a) 凹型搭載模型



(b) ロッド型搭載模型

図 6 自発光写真
(磁石搭載時)

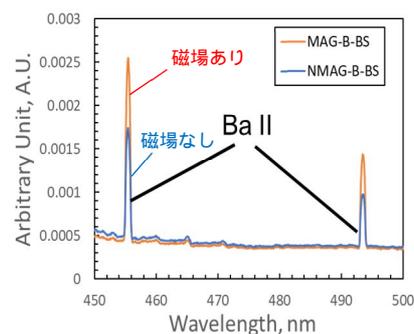


図 7 発光スペクトル

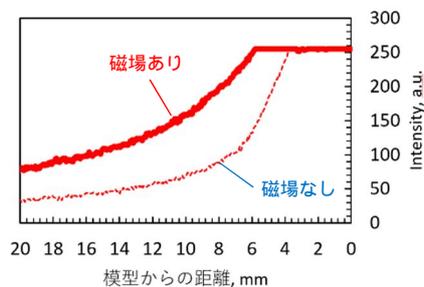


図 8 よどみ線上の自発光比較

発動することに成功したと考えられる。なお今後は、衝撃層内のスペクトル強度分布を取得し、衝撃層拡大効果を定量的に評価する予定である。

(3) JAXA 大型膨張波管での電磁力衝撃層拡大試験と数値解析

CFD で予測された臨界高度の物理機構を解明すべく、JAXA 角田宇宙センターの HEK-X 膨張波管での電磁力衝撃層拡大試験を行った。試験気流は、空気よりも電離しやすいアルゴンをうい、9.5 km/s の気流速度で実験を実施した。図 9 に試験に用いたネオジウム磁石模型を示す（電気的絶縁性を担保するため、模型表面はエポキシ樹脂でコーティングをした）。コロナ禍の影響で、試験は最終年度の一回のみであったため、計測として実施できたのは、図 10 に示す自発光計測のみであったが、自発光を解析した結果、100 μ s 程度の一様気流を維持できていることがわかった。ただし、磁場の有無による衝撃層の変化は、残念ながら確認できなかった。

本試験の検証と、臨界高度の物理機構の解明のために、どのような気流条件が必要か検証するため、CFD 解析を実施した。図 11 に、本試験と同一の気流条件（密度 $\rho = 1 \times 10^{-2}$ kg/m³、速度 $V=10$ km/s）での空気とアルゴン気流での CFD 解析結果を示す（圧力分布）。電磁力の出やすさを表す指標として、パラメータ $Q = \sigma B^2 D / \rho V$ があり（ σ は電気伝導度、 B は磁場、 D は代表長）有意な電磁力衝撃層拡大を得るためには $Q \geq 1$ が必要である。空気の場合は $Q=0.5$ 、アルゴンの場合は $Q>2$ であり、ある程度の電磁力は期待できる気流ではあるものの、明確な衝撃層拡大は現れなかった（この計算では、模型直径 D を図 9 の二倍の 40 mm としている）。

このため、もっと大きい Q 値での膨張波管実験が必要である。そこで、模型直径 D を図 11 の 2.5 倍の 100 mm とし、気流の密度を下げた条件で（空気では実験条件の 1/60、アルゴンでは 1/10）CFD を実施した。図 12 に得られた圧力分布を示す。この場合は、有意な電磁力衝撃層拡大効果があらわることがわかり、今後は、膨張波管気流をノズルにより拡大し、低密度かつ大型模型で実験を行う必要があることがわかった。

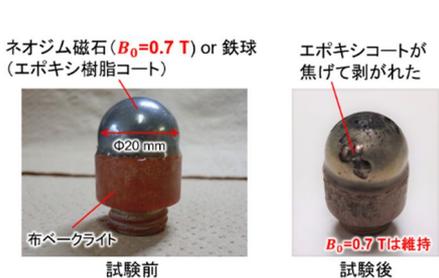


図 9 膨張波管用磁石模型

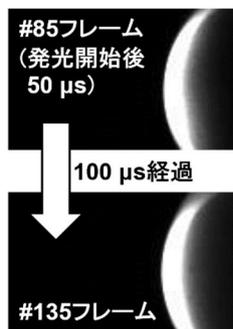


図 10 自発光の様子

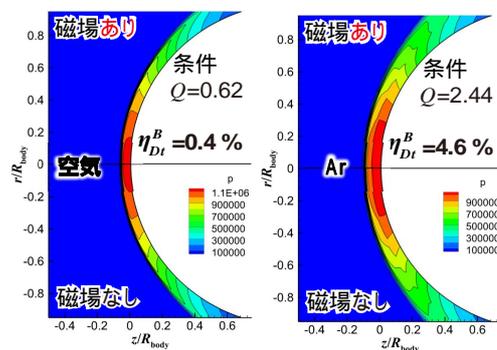
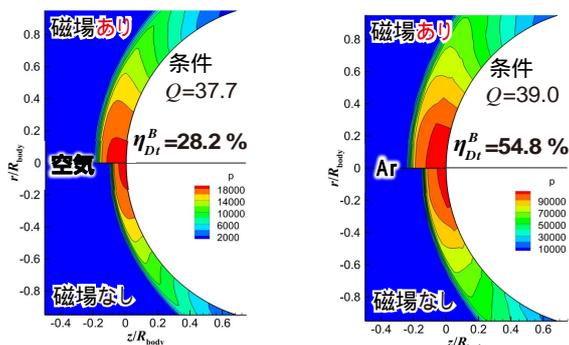


図 11 CFD 解析(試験と同一条件、圧力)



1/60 の気流密度

1/10 の気流密度

図 12 CFD 解析 (D=100 mm、低密度)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 葛山浩、嶋村耕平、森山皓太、岸本拓磨、近藤碧海、丹野英幸
2. 発表標題 膨張波管での電磁力ブレーキングの予備試験と数値解析
3. 学会等名 2021年度 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 葛山浩
2. 発表標題 鳥取大学での先端宇宙推進・減速機研究の取組み
3. 学会等名 第61回 航空原動機・宇宙推進講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiori Kusu, Hayato Iizuka, Hiroshi Katsurayama, Kenichi Sakamoto, Takeharu Sakai, Toshiyuki Suzuki, Makoto Matsui
2. 発表標題 Ionization Seed Addition Experiment for Magnetohydrodynamic Shock Layer Enlargement in Arc-Heated Flow
3. 学会等名 3rd International Symposium on Space Technology and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Moriyama, Hiroki Sakaguchi, Hiroshi Katsurayama, Kentaro Tomita
2. 発表標題 Laser Thomson Scattering Measurement around Magnetized Body in Rarefied Arc-Heated Argon Plume
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂口弘樹、楠汐里、小川原圭人、葛山浩、富田健太郎
2. 発表標題 電磁力ブレーキング試験模型周りの電子物理量計測
3. 学会等名 第65回 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯塚勇人、楠汐里、岡西一樹、森山皓太、葛山浩、坂本憲一、酒井武治、鈴木俊之、松井信
2. 発表標題 電磁力衝撃層拡大に向けたアーク気流中でのアルカリ土類金属スパイクロッド付き模型の発光分光法
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 楠汐里、飯塚勇人、葛山浩、坂本憲一、酒井武治、鈴木俊之、松井信
2. 発表標題 アーク加熱風洞における電離シードを用いた電磁力衝撃層拡大効果の検証
3. 学会等名 第58回 日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森山皓太、坂口弘樹、葛山浩、富田健太郎
2. 発表標題 アルゴン希薄気流中における電磁力印加模型周りのレーザートムソン散乱計測
3. 学会等名 第58回 日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯沼智章、飯塚隼人、葛山浩、酒井武治、八木秀明、鈴木俊之、松井信、野村哲史
2. 発表標題 アーク気流エンタルピー計測に向けた電磁カプローブとその発光分光計測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯沼智章、飯塚隼人、葛山浩、酒井武治、八木秀明、鈴木俊之、松井信、野村哲史
2. 発表標題 1MW級アーク気流での電磁力衝撃層拡大におけるアルカリ金属添加の効果
3. 学会等名 流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚隼人、飯沼智章、葛山浩、酒井武治、八木秀明、鈴木俊之、松井信、野村哲史
2. 発表標題 アーク気流中での電磁力衝撃層拡大に向けたアルカリ金属スパイクロッド付き模型の発光分光計測
3. 学会等名 令和2年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Hamada, T. Iinuma, H. Katsurayama, T. Sakai, Y. Takagi, H. Yagi, T. Suzuki, M. Matsui
2. 発表標題 Emission Spectroscopy around Magnetized Probe for Arc Flow Enthalpy Measurement
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱田柔久、飯沼智章、飯塚勇人、葛山浩、酒井武治、八木秀明、陰山稜平、鈴木俊之、松井信、野村 哲史
2. 発表標題 JAXA アーク風洞での電磁力衝撃層拡大試験における電離促進 剤添加の効果
3. 学会等名 令和元年宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱田柔久、飯沼智章、飯塚勇人、葛山浩、酒井武治、八木秀明、陰山稜平、鈴木俊之、松井信、野村 哲史
2. 発表標題 アーク気流エンタルピ決定のための電磁力衝撃 層拡大法の検証と電離促進剤の効果
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------