

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04200

研究課題名(和文) 電磁力エアロブレーキングの減速開始高度を制御する新技術の開発

研究課題名(英文) Development of a New Technology for Controlling the Deceleration Starting Altitude of Magnetohydrodynamic Aerobraking

研究代表者

葛山 浩 (Katsurayama, Hiroshi)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：80435809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：希薄大気中での電磁力ブレーキングにおける電磁力発生機構の解明を目指し、アーク風洞実験とその数値シミュレーションを実施した。これまでの我々の解析的研究において、希薄気流中での電磁力発生には、気流中の絶縁境界の役割が重要であると予想されていた。この予想を実証するため、アーク気流の絶縁境界位置を変化させ、全抗力が受ける影響を調べた。結果として、実験および計算とも、電磁力により全抗力が増加した。また、計算では、絶縁境界が試験模型に近づくことで、大きな電磁力が発生し、前述の解析予想の裏付けを得られた。しかし、実験では、流れが予想よりも濃く、電磁力による抗力増大は、絶縁境界位置に敏感ではなかった。

研究成果の概要(英文)：To clarify the mechanism of the electromagnetic force generation on the magnetohydrodynamic braking in rarefied atmospheres, we conducted an arc wind tunnel experiment and its numerical simulation. Our previous analytical study has predicted that an insulating boundary in a flow is necessary to activate magnetohydrodynamic braking in a rarefied flow. To validate this analytical prediction, we investigated the dependency of the total drag on the insulating boundary location by varying the arc plume boundary location. As a result, the measured and computed total drags increase by applying the magnetic field. The computation is consistent with the analytical prediction because the total drag increases by moving the insulating boundary to the test model. However, the measured electromagnetic drag increase is insensitive to the insulating boundary location because the flow is denser than expected.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電磁力エアロブレーキング 惑星突入流れ 高エンタルピー流れ 電磁流体力学 希薄気体力学

1. 研究開始当初の背景

電磁力ブレーキとは、惑星突入時に生じる高温気流に電磁力を発生させ、その反力で機体を減速して、加熱を能動的に避ける技術である。この技術は、低高度の厳しい加熱の防御法として研究が行われ、有効性が示されてきたが、もし加熱が厳しくない希薄な高々度からも減速が可能ならば、突入軌道全体で抜本的に加熱をなくせる革新的技術となりえる。

そこで、研究代表者が、高々度での数値流体力学解析 (CFD) を行ったところ、「予想よりも低い高度からしか電磁力が発生しないが、その高度より下がると突如として大電磁力が発生する“臨界高度”と言うべき現象が起こる」ことがわかった。

この現象の解明のためには、ホール効果が卓越する希薄気流中での複雑な電磁力発生メカニズムを解明する必要があるが、研究代表者による数値解析予想は行われていたものの、実験による実証がなされていなかった。

2. 研究の目的

アーク風洞を用いて、電磁力ブレーキ実験を行い、数値解析結果と比較し、希薄気流中での電磁力発生メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

これまでの研究において、研究代表者は、現象を簡略化したモデル的な希薄気流に対して CFD 解析を行い、希薄気流中での電磁力発生メカニズムを調べた。その結果、ホール効果が卓越する希薄気流中では、気流中の絶縁境界が電磁力発生に大きな影響を及ぼすと予想された (図 1)。

希薄気流中では、流れが一様な電離流の場合

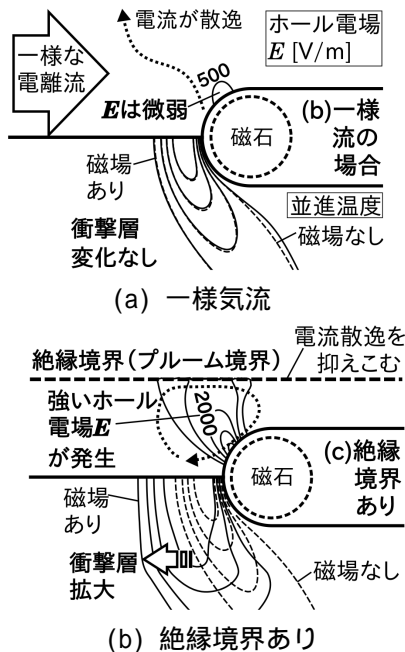


図 1 モデル化した希薄気流中での絶縁境界の役割予想 (CFD)

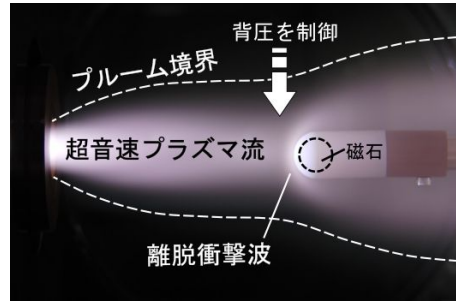


図 2 山口大アーク風洞

合は、ホール効果が電流を散逸させるため、電磁力が消えてしまう (図 1a)。一方、流れ中に絶縁境界が存在する場合は (図 1b) 電流散逸が抑えこまれる。その結果、強いホール電場が発生し、この電場が電磁力を発生させる。実際の突入環境では、衝撃波前縁が、アーク風洞実験では、プルーム境界が、この絶縁境界の役割を果たすと考えられる。

この予想を検証するため、山口大学アーク風洞 (図 2) を用いた実験を行う。具体的には、真空チャンバーと排気ポンプの間に設置したバタフライバルブを開閉し、チャンバー内の背圧を制御する。背圧の上昇と共に、絶縁境界 (プルーム境界) 位置が試験模型に近づくため、試験模型に掛かる抗力 (電磁力) を測定すれば、絶縁境界位置が電磁力発生に及ぼす影響を調べる事ができる。

なお、並行して、CFD によりこの実験を忠実に再現したシミュレーションを行い、実験結果の検証を行う。

4. 研究成果

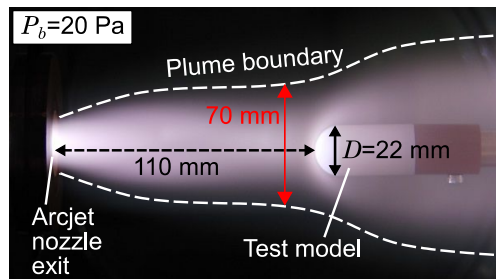
アーク気流の作動ガスは、アルゴンを用い、流量 6 slm、放電電流 60 A で試験を行った。試験模型本体への電流散逸を防ぐため、試験模型の材質は、電氣的絶縁材であるセラミックス (マコール) を用いた。なお、模型にはネオジウム磁石を搭載し、試験模型よどみ点で磁束密度 0.35 T の磁場を印加した。

図 3 にバタフライバルブを調整し、絶縁境界 (プルーム境界) を移動させた際の写真を示す。背圧 p_b の増加に伴い、絶縁境界が模型に近づいているのがわかる (ただし、図中に示したプルーム境界位置は、目視の発光を基準にしており、実際の絶縁境界位置を示すものではない)。

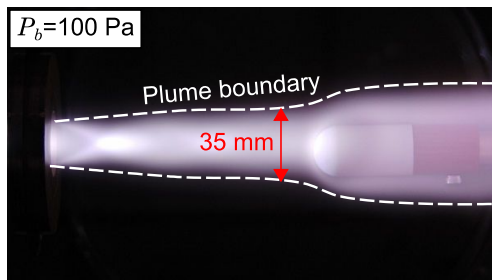
(1) CFD による実験の予測

CFD により実験をシミュレートし、気流条件と実験結果を予測した。図 4 に、背圧を変化させた場合の電気伝導度分布の変化を示す。背圧の上昇に伴い、プルーム径が収縮し、絶縁境界位置が模型に近づく。ここで、電気伝導度 σ が、 $\sigma=50$ S/m の位置を絶縁境界位置 r_i と定義した。図 5 に r_i の p_b 依存性を示す。 p_b の増加と共に r_i は減少し、 p_b を 15 Pa から 60 Pa まで増加させると、 r_i は 60 mm から 30 mm まで減少する。

ところで p_b を変化させれば、当然、気流の



(a) $p_b=20$ Pa



(b) $p_b=100$ Pa

図3 背圧変化によるプルーム境界の移動

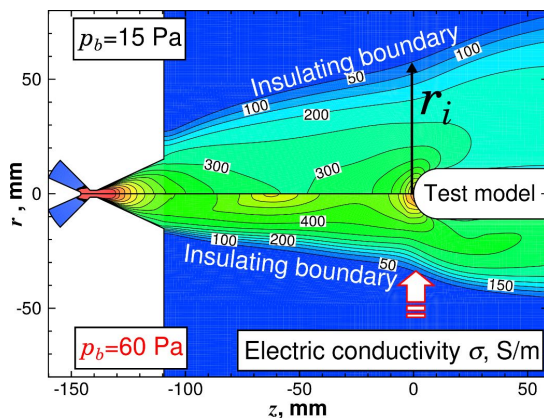


図4 電気伝導度分布の背圧依存 (CFD 予測)

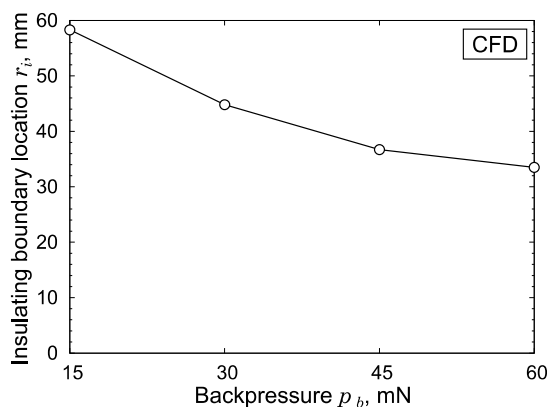


図5 絶縁境界位置の背圧依存性 (CFD 予測)

状態も変化する。実際、 $p_b=15$ Pa と 60 Pa での全圧分布は異なっており、 p_b の上昇により全圧は大きくなる (図 6)。このため、もし p_b の変化により、流れの電磁力の出やすさの程度が変化してしまうとしたら、絶縁境界位置の影響のみを議論することができなくな

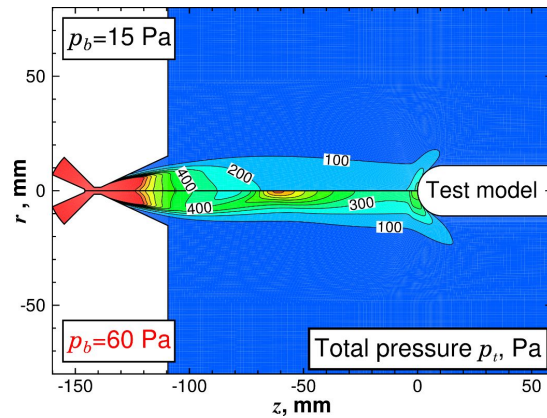


図6 全圧の背圧依存性 (CFD 予測)

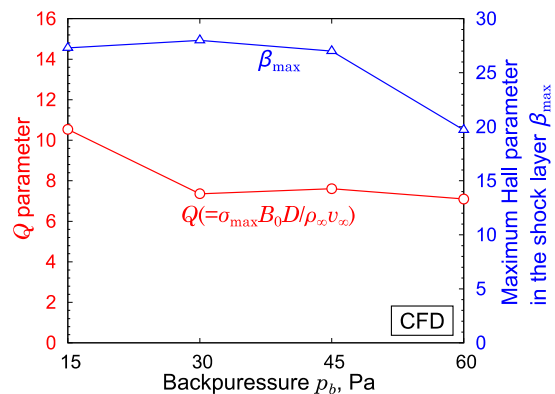


図7 Q と β_{max} の背圧依存性 (CFD 予測)

る。電磁力のでやすさの程度は、磁気相互作用パラメータ $Q(=\sigma_{max}B_0^2D/\rho v)$ およびホールパラメータ β_{max} で表せる。衝撃層内の代表的な値を使って算出した Q と β_{max} の代表値の背圧依存性を図 7 に示す。

$p_b=15$ Pa の時に、若干 Q が大きく、また、 $p_b=60$ Pa の時に、若干 β が小さいものの、 Q と β とともに p_b に対してほぼ一定とみなせる。結果として、 p_b を増加させても、気流特性自体が、電磁力の出やすい状態に変化するわけではない。このため、今回のアーク実験では、純粋に絶縁境界位置が電磁力発生に与える影響を議論できると予想された。

図 8 に p_b を上昇させた時のホール電場 E と電磁力 $J \times B$ の変化を示す (CFD の予測値)。 p_b の上昇と共に、絶縁境界が試験模型へ近づくため、予想通り大きな E が発生した。また、それに伴い、 $J \times B$ も上昇する。

(2) 抗力計測実験

以上の CFD による予測に基づき、試験模型の抗力計測実験を行った。図 9 に構築した抗力計測装置のポンチ図を示す。計測装置は、ロードセルを使用した振り子方式を採用し、試験模型に掛かる全抗力 D_t を計測した。

図 10 に CFD と実験値の D_t およびその電磁力による増加率 $\eta_{D_t}^B$ を示す。背圧の上昇による全圧上昇のため、実験値および CFD とともに、 D_t は p_b と共に上昇する。しかし、磁場印加の有無に依らず、実験値の D_t は、計算値よりも

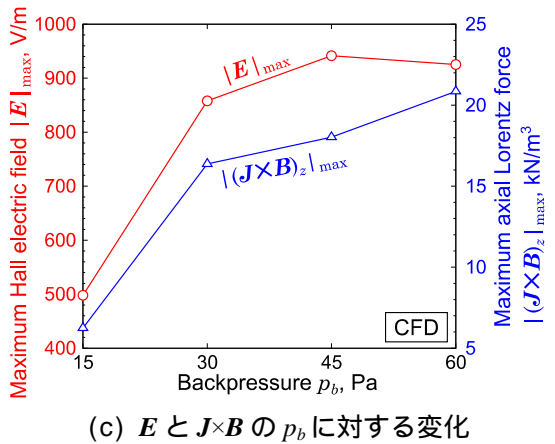
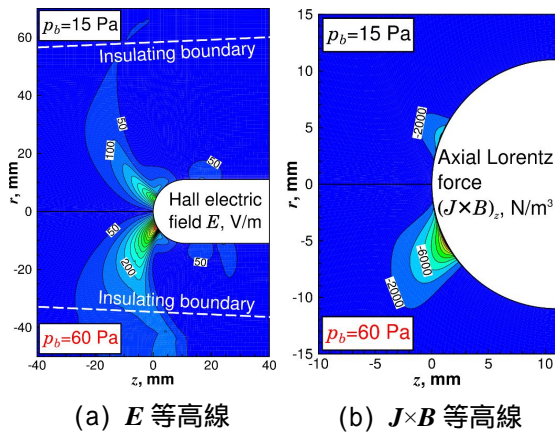


図 8 E と $J \times B$ の背圧依存性 (CFD 予測)

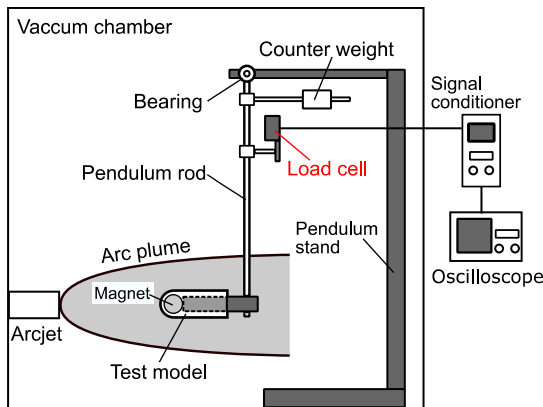


図 9 抗力測定装置

20 mN 程度値が大きい。このため、実験気流は、CFD による予測値よりもかなり濃い可能性が高い。

いずれの p_b の場合でも、磁場印加により、 D_t は 5-10 mN 程度の明らかな増加を示し、実験値において、大きな電磁力が発生している事が確認できた。

次に、電磁力による全抗力の増加率 $\eta_{D_t}^B$ については、CFD の場合は、当初の予測どおりに、 p_b の増加と共に $\eta_{D_t}^B$ が増加し、絶縁境界が試験模型に近づくことで、大きな電磁力が発生する事が確認できる。一方、実験の場合は、 p_b に対して $\eta_{D_t}^B$ はほぼ一定であり、絶縁境界が試験模型に近づくことによる電磁力の増大効果を確認することはできなかった。

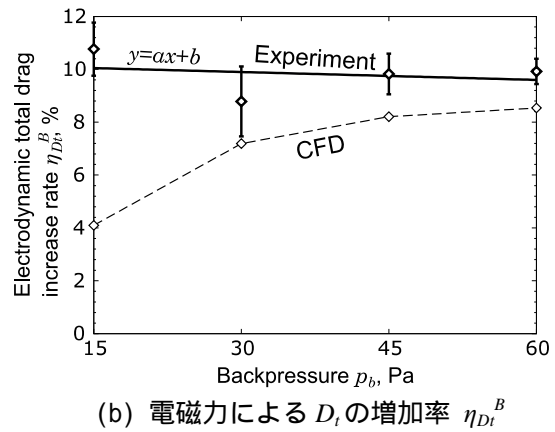
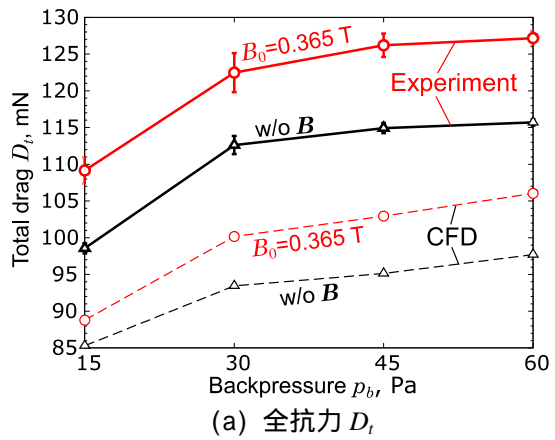


図 10 全抗力 D_t とその電磁力による増加率 $\eta_{D_t}^B$ の背圧依存性の実験値と CFD 値

この原因として、実験では、CFD で予想されるよりも、流れが濃く、結果としてホール効果が弱いため、電磁力がホール電場により発生しているのではなく、流速と磁場の積の起電力 $v \times B$ に従って発生している可能性が考えられる (ホール効果が無視できる気流では、 Q の定義に従い、 $v \times B$ に比例した電磁力が発生する)。今回の気流では、図 7 に示すように Q は p_b にほぼ依存せず、一定の値を取るため、ホール効果が弱ければ、 $\eta_{D_t}^B$ もほぼ一定となると考えられる。

以上より、アーク気流実験と CFD シミュレーションの完全な一致はみられなかったが、その原因は、実験の気流が予想よりも濃いことが考えられた。このため、今後はより希薄なアーク気流中での実験を実施する予定である。また、レーザートムソン散乱法による電子密度・温度計測を行い、アーク気流のホールパラメータおよび絶縁境界位置 (つまり電気伝導度分布) を定量的に明らかにすることを試みる予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

H. Katsurayama, N. Fukuda, T. Toyodome, M. Matsui, and Y. Katoh, "Total Drag Measurement in Electrodynamic Braking in Arc Plume with Variable Backpressure," *Frontier of Applied*

Plasma Technology, 査読有, Vol. 10, pp.35-38, 2017.

〔学会発表〕(計 15 件)

矢野智也, 濱田柔久, 葛山浩, 酒井武治, 松井信, 高木耀一, 上村圭市, 加藤泰生, “電磁力による衝撃層増大効果を用いたアーク気流用エンタルピー計測プローブの開発,” 平成 29 年度衝撃波シンポジウム, 2018.

幅野将司, 福田直生, 合志義亜, 葛山浩, 加藤泰生, “アーク気流中での電磁力エアロブレーキング抗力増大実験の DSMC 計算による検証,” 平成 29 年度衝撃波シンポジウム, 2018.

H. Katsurayama, N. Fukuda, T. Toyodome, K. Tomita, M. Matsui, and Y. Katoh, “An Electrodynamics Aerobraking Experiment in a Rarefied Arc-Heated Flow,” 31th International Symposium on Shock Waves, 2017.

N. Fukuda, T. Toyodome, H. Katsurayama, K. Tomita, M. Matsui, and Y. Katoh, “Experimental Investigation of the Role of an Insulating Boundary in the Electrodynamics Force Generation in a Rarefied Arc,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

福田直生, 豊留拓磨, 葛山浩, 松井信, 加藤泰生, “電磁力エアロブレーキングでの絶縁境界の役割解明を目指したアーク希薄風洞実験,” 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 2017.

葛山浩, 豊留拓磨, 福田直生, 酒井武治, 加藤泰生, “電磁力エアロブレーキング惑星突入法での希薄流効果解明に向けた実験的試みとそのエンタルピー計測技術への展開,” 平成 28 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2017.

葛山浩, 豊留拓磨, 福田直生, 加藤泰生, “電磁力エアロブレーキング惑星突入法での希薄流効果解明に向けたこれまでの数値解析的な試みとこれからの実験的試み,” 第 25 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2016.

葛山浩, 豊留拓磨, 福田直生, 上村圭市, 矢野智也, 酒井武治, 加藤泰生, “電磁力エアロブレーキングの希薄流効果解明を目指したアーク気流実験の数値予測とそのエンタルピー計測技術への応用の試み,” 平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2016.

鈴木陽詞, 葛山浩, 加藤泰生, “電磁力エアロスパイクを用いた加速突入法の実現性の検討,” 第 48 回流体力学講演会, 2016.

豊留拓磨, 福田直生, 葛山浩, 松井信, 加藤泰生, “アーク希薄気流中の絶縁境界が電磁力ブレーキング効果に与える

影響,” 第 48 回流体力学講演会, 2016. 葛山浩, 酒井武治, “電磁力による衝撃波層拡大効果を用いた新しいエンタルピー決定法の数値解析的検討,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 2016.

宮崎卓真, 葛山浩, 加藤泰生, “アーク希薄気流中での電磁力ブレーキングの粒子計算,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 2016.

宮崎卓真, 葛山浩, 加藤泰生, “アーク加熱式風洞の希薄効果の解明,” 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 2016.

宮崎卓真, 葛山浩, 加藤泰生, “アーク希薄風洞中でのプルーム膨張の粒子計算,” 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2015), 2015.

H. Katsurayama, “Numerical Investigation of Several Alkali Metal Addition Methods for the Forced Elevation of the Starting Altitude in the Electrodynamics Aerobraking Deceleration,” AIAA Paper 2015-3368, 46th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 22-26, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~aero_thd/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛山 浩 (Hiroshi Katsurayama)
山口大学・大学院創成科学研究科・准教授
研究者番号: 80435809

(2) 研究分担者

松井 信 (Matsui Makoto)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号: 90547100

野田 淳二 (Noda Junji)

近畿大学・生物理工学部・准教授
研究者番号: 00398992

(3) 連携研究者

山本 直嗣 (Naoji Yamamoto)
九州大学・総合理工学研究院・教授
研究者番号: 40380711

(4) 研究協力者

富田 健太郎 (Kentaro Tomita)
九州大学・総合理工学研究院・助教
研究者番号: 70452729