

令和元年6月24日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14505

研究課題名(和文) 電磁力による衝撃波層増大効果を用いたアーク気流のエンタルピー同定法の開発

研究課題名(英文) Development of Arc Flow Enthalpy Measurement Method using Magnetohydrodynamic Shock Layer Enlargement Effect

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：電磁力衝撃波層増大効果を援用した発光分光によるエンタルピー計測手法の確立を目指し、JAXA 750 kWアーク風洞での電磁力模型の加熱試験を実施した。設計した水冷式電磁力模型は、 3.75 MW/m^2 の加熱に耐え、内部冷却機構の性能も良好で、磁石の熱消磁も見られなかった。発光分光計測では、磁場ありとなしの計測において、スペクトルに有意な差は見られなかった。この原因は、計測したアーク気流の電離度が小さいため、電磁力が弱いことが考えられる。一方、スペクトル解析により、よどみ点近傍は熱平衡状態に近い事がわかり、導出したエンタルピーも妥当な値であることが確認され、本手法の有効性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙船は、惑星大気突入の際、強烈な加熱に晒される。この加熱から宇宙船を守るために、熱防御材が使われるが、その開発にはアーク風洞が使用される。しかし、風洞の重要なパラメータである気流エンタルピーを正確に計測する手段が確立されていない。本研究では、電磁力による気流増大効果と発光分光法を組み合わせることで、エンタルピーを計測する方法を提案し、JAXA大型アーク風洞での試験をおこなった。結果として、電磁力による効果は、得られなかったものの、発光分光による気流エンタルピー計測値は妥当な値を示し、本手法の有効性と将来性に一定の成果を得た。

研究成果の概要(英文)：To establish the enthalpy measurement method using the emission spectroscopy with the aid of the magnetohydrodynamic shock layer enlargement effect, a magnetohydrodynamic probe was heated in the JAXA 750 kW arc wind tunnel. The probe was newly designed, and it has a water-cooling system for resisting the heating of 3.75 MW/m^2 . As a result of the heating test, the probe has no damage, and the on-board magnet was free from the thermal demagnetization. In the emission spectroscopy, no significant difference was found in the spectrum in the measurements with and without the magnetic field. This cause will be attributable to the weak ionization degree of the flow and the resulting small magnetohydrodynamic force. On the other hand, the spectral analysis revealed that the area near the stagnation point was close to thermal equilibrium, and the derived enthalpy showed a reasonable value. Consequently, we confirmed the effectiveness of the present method for the enthalpy measurement.

研究分野：航空宇宙工学、熱気体力学、プラズマ力学

キーワード：アーク風洞 惑星突入 電磁流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アーク加熱風洞は、惑星大気突入機の設計や加熱環境の解明に欠かせない装置である。この風洞の最重要の作動パラメータは、全エンタルピーである。しかし、既存の方法では、全エンタルピーは、気流の平均値がわかる程度で、試験模型周りの分布を精度よく計測する方法は存在していない。高精度でエンタルピーを測定できる唯一の候補として、熱化学平衡の仮定の下、輻射強度比を計測して、全エンタルピーを同定する方法がある。しかし、アーク気流は一般的に非平衡状態にあるため、この方法の適用範囲は限定的である。

2. 研究の目的

研究代表者は、これまで再突入機の電磁力ブレーキングの研究を行い、電磁力を用いて衝撃波離脱距離を増大させる事ができると示した (Katsurayama, J. Spacecraft Rockets 2008)。この電磁力による衝撃波増大効果をアーク気流に適用すれば、模型前の平衡領域が拡大し、幅広い条件のアーク気流で、輻射強度比による全エンタルピー計測可能になると考えられる。そこで、JAXA 750 kW 大型アーク風洞の加熱に耐えうる電磁力模型を設計・開発し、発光分光・写真撮影により電磁力による衝撃層増大効果を検証する。

3. 研究の方法

- 簡単な 1 次元解析による熱設計を行い、750 kW アーク気流の加熱 (3.5 MW/m^2 以上) に耐え、かつ熱に弱いネオジウム磁石を搭載可能な試験模型を製作し、アーク加熱試験に供する。
- 発光分光計測を実施し、衝撃層内部の発光分布、および電磁力によるエンタルピー変化を捉える。また、発光からエンタルピーを導入する。
- 試験模型表面温度をサーモグラフィで撮影し、電磁力による衝撃層増大を間接的に捉える。

4. 研究成果

(1) 試験模型の開発

設計したプローブの断面図を図 1 に示す。今回の試験に使用した電磁力プローブは、カバー部、磁石部、支持部で構成されている。圧力ゲージや、熱流束計のように、繰り返し使用できる事が望ましく、熱に弱いネオジウム磁石を使用することを想定しているため、プローブ内部の温度を低く保つ必要がある。また、ホール効果による電磁力の低減効果を防ぐために、プローブは電氣的に絶縁である必要がある。以上から、このプローブのカバー部は、セラミックの内、高熱伝導かつ、強度が大きい Si_3N_4 を採用し、磁石部は、ネオジウム磁石 (耐熱温度 100°C) を使用している。なお、フレア状の形状にしたのは、プローブ前面と側面共に、磁石を気流に出来るだけ近づけたいが、冷却水漏れを防ぐため、セラミックカバーを後ろからネジで止める構造が望ましく、そのネジ留め部のスペースを設ける必要があったためである。内部の磁石については、試験後にも磁石を取り外して、磁力計測や磁石の交換ができるように、磁石を止めねじで固定して、取り外しが可能な構造にした。

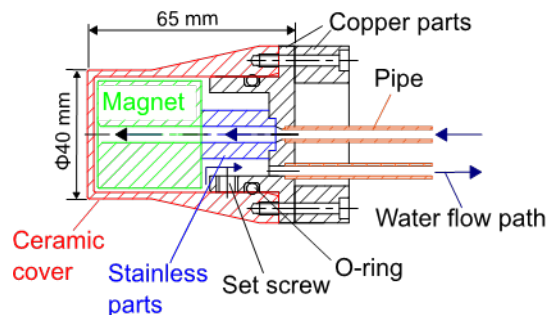


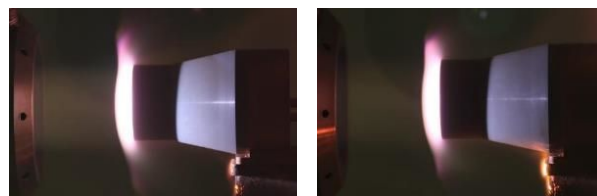
図 1 磁石搭載型試験模型

また、プローブ背後から、冷却水を流すことで、アーク気流の熱からプローブ内部を保護している。冷却水は、磁石内部の流路から模型内部へ流入し、加熱面の裏側から放射状に流れ、側面内壁を通り、再び後部から流出する構造にした。

このプローブに対し、 3.75 MW/m^2 の加熱 (放電電流 700 A 条件における直径 40 熱流束計のよどみ点での計測値) を仮定し、簡単な 1 次元熱解析を実施したところ、熱応力破壊に対する安全率は、4.5 程度あり、十分加熱に耐えられると予想された。

(2) 加熱試験の実施

アーク電流 500 A で、磁石ありとなしにおける加熱試験中の写真を図 2 に示す。静止画では、磁場を印加した場合でも衝撃層の拡大効果は確認することが出来なかった。また、サーモグラフィカメラによるプローブ表面温度を示す (図 3)。磁石あり、なし共に、表面温度は $300\sim 450^\circ\text{C}$ の値をとっている。もし、電磁力による衝撃層拡大効果が生じているならば、模型に流入する熱流束が低減されるため、模型表面温度は低くなるはずである。しかしながら、両者の表面温度に大きな違いは見られないので、この気流条件では、電磁力に衝撃層拡大効果は出てい



(a) 磁場あり

(b) 磁場なし

図 2 加熱試験の様子

な

い、もしくは効果が薄いと考えられる。

また、加熱前後のプロープ表面の写真を示す(図4)。加熱後、プロープには損傷等は見られなかったが、模型表面に、被膜のようなものが付着した。これは、アーク加熱器由来の銅が付着したものだと思われる。

さらに、加熱中の試験模型冷却水温度を熱電対で計測した。5秒間の加熱による温度上昇は磁石あり、なし共に9℃程度であった。このことから、試験模型内部の冷却機構は十分に機能していることがわかった。また、加熱前後で、磁石消磁も起こっていなかった。以上より、製作した磁石搭載型試験模型は、3.5 MW/m²クラスの加熱に対して、電磁力模型が満たすべき要求をクリアーしていることがわかった。

(3) 発光分光計測

試験模型のよどみ線上($x=0$ mmをよどみ点とする)に沿って、 $x=1, 3, 5, 7$ mmを真横から計測した。計測には、可視と近赤外用の二種類のアクロマティックレンズを使用した。図5に代表的なスペクトル(磁場ありとなし)を示す。

Cu, O, Nの原子スペクトル、N₂のバンドスペクトルが見られる。しかし、どの計測点においても、磁石の有無により、優位なスペクトル形状の差はみられなかった(なお、スペクトルの強度は、よどみ点から離れると減少するものの、スペクトル形状はほとんど変化しなかった)。以上より、今回の試験条件では、電磁力による衝撃層拡大効果は十分に発生していないことが予想される。この原因としては、アーク気流の電離度が低いため、有意な電磁力が発生していない可能性が考えられる。このため、今後は、気流に少量の電離剤を添加するなどの工夫が必要であると考えられる。

また、輻射解析ソフトSPRADIANを用いて、図5のスペクトル($x=1$ mm)のスペクトルフィッティングを行ったところ、並進回転温度は7,000 K程度、電子並進振動電子励起温度は6,000 K程度であると予想された。さらに、分担研究者・酒井らが開発した輻射解析手法を用いて、温度分布および気流エンタルピーを評価した。その結果、よどみ点近傍での並進回転温度は6,000 K程度、電子並進振動電子励起温度は5,000 K程度であり、衝撃層内が非平衡状態にある事が改めて確認できたものの、よどみ点付近は比較的熱平衡状態に近いことが示唆された。また、この解析により得られたエンタルピーは、 19 ± 0.5 MJ/kgであり、酒井らのCFD予測値19.4 MJ/kgと極めてよい一致を示した。

以上より、気流の電離度不足により、電磁力による効果は得られなかったが、電磁力用試験模型の開発には成功し、さらに気流が熱平衡状態に近ければ、発光分光によるエンタルピー計測法により導出したエンタルピーが、CFD予測値と良好な一致を見ることも確認できた。

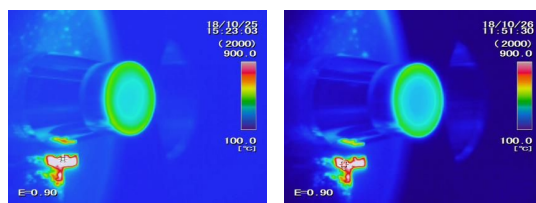
5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- [1] 葛山浩、濱田柔久、矢野智也、酒井武治、松井信、“アーク気流エンタルピー計測のための水冷式電磁力プロープの試作機開発と加熱予備試験,” プラズマ応用科学 26(1) 39-44, 2018. (査読有り)
- [2] 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 10(1) 35-38, 2017. (査読有り)

〔学会発表〕(計15件)

- [1] 高木耀一、八木秀明、葛山浩、濱田柔久、飯沼智章、鈴木俊之、酒井武治、“キャビティプロープを用いたアーク加熱気流中心軸上エンタルピー決定法に関する研究,” 平成30年度衝撃波シンポジウム, 2019.
- [2] 合志義亜、上部航洋、葛山浩、富田健太郎、“レーザートムソン散乱法を用いたアーク気



(a) 磁場あり (b) 磁場なし

図3 サーモグラフィー温度分布



(a) 加熱前 (b) 加熱後

図4 加熱前後のSi₃N₄表面

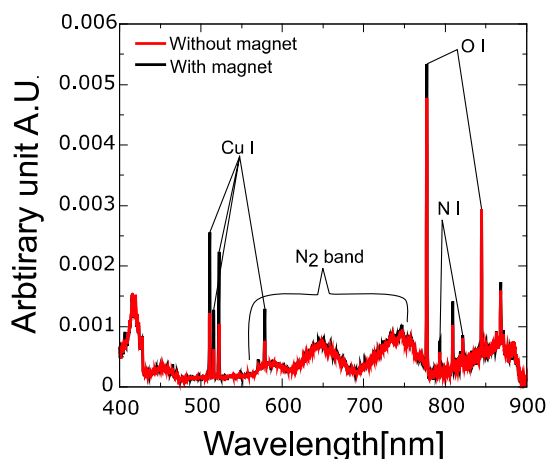


図5 発光スペクトル($x=1$ mm, 500 A)

- 流の電子密度・温度計測，”平成30年度衝撃波シンポジウム，2019.
- [3] 濱田柔久，飯沼智章，葛山浩，酒井武治，高木耀一，八木秀明，鈴木俊之，松井信，“アーク気流エンタルピー計測のための電磁力模型の開発と発光分光計測，”平成30年度衝撃波シンポジウム，2019.
 - [4] 葛山浩，濱田柔久，合志義亜，上部航洋，飯沼智章，酒井武治，高木耀一，八木秀明，富田健太郎，鈴木俊之，松井信，“アーク風洞での電磁力模型の発光分光計測とレーザートムソン散乱計測，”平成30年度航空宇宙空力シンポジウム，2019.
 - [5] 合志義亜，上部航洋，葛山浩，富田健太郎，“アルゴンアーク風洞での電磁力模型のレーザートムソン散乱計測，”平成30年度宇宙航行の力学シンポジウム，2018.
 - [6] 濱田柔久，飯沼智章，葛山浩，酒井武治，高木耀一，八木秀明，鈴木俊之，松井信，“JAXAアーク風洞での電磁力模型の加熱試験と発光分光計測，”平成30年度宇宙航行の力学シンポジウム，2018.
 - [7] 合志義亜，上部航洋，葛山浩，富田健太郎，“アーク気流中に置かれた電磁力鈍頭模型周りの電子状態のレーザートムソン散乱法による高精度計測，”日本航空宇宙学会西部支部講演会（2018）
 - [8] 濱田柔久，飯沼智章，葛山浩，酒井武治，鈴木俊之，松井信，“アーク気流エンタルピー計測のための電磁力プローブと計測手法の開発，”日本航空宇宙学会西部支部講演会（2018）
 - [9] 合志義亜，上部航洋，葛山浩，富田健太郎，“レーザートムソン散乱法を用いたアーク気流中の電磁力鈍頭模型周りの電子密度・温度計測，”第62回宇宙科学技術連合講演会 2018.
 - [10] N. Fukuda, T. Toyodome, H. Katsurayama, K. Tomita, M. Makoto, and Y. Katoh, “Experimental Investigation of the Role of an Insulating Boundary in the Electrodynamic Force Generation in a Rarefied Arc Flow,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017.
 - [11] H. Katsurayama, N. Fukuda, T. Toyodome, K. Tomita, M. Makoto, and Y. Katoh, “An Electrodynamic Aerobraking Experiment in a Rarefied Arc-Heated Flow,” 31th International Symposium on Shock Waves, 2017. (Proceeding of 31st International Symposium on Shock Waves Vol. 2, pp 625-632)
 - [12] 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年3月
 - [13] 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年3月
 - [14] 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年1月
 - [15] 葛山浩，豊留拓磨，福田直生，矢野智也，上村圭市，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年12月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

〔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)研究分担者

研究分担者氏名：酒井 武治

ローマ字氏名：Sakai Takeharu

所属研究機関名：鳥取大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：90323047

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。