

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246139

研究課題名(和文)電磁力による惑星大気飛行体周りの弱電離プラズマ流の制御技術の確立とその先端的展開

研究課題名(英文)Control of weakly-ionized flow around reentry spacecraft and its application

研究代表者

安部 隆士 (ABE, TAKASHI)

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・名誉教授

研究者番号：60114849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙空間から地上にもどる宇宙機は、大気圏飛行中において高温のプラズマに覆われ、これにより加熱されるため、それに起因する機体損傷の危険性を回避することが特に必要である。このため、加熱に耐える従来の手法に加えて、高温のプラズマが電磁力の影響を受けることを利用して、これを宇宙機から遠ざけるような制御をすることにより、加熱を避ける工夫が可能であることがこれまでの研究で既に示されているが、この研究では宇宙機への応用性についてさらに理解を深め、磁場配位制御による加熱分布の制御や高層大気飛行での希薄気体の効果などさまざまな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The spacecraft reentering into the atmosphere experiences a severe aerodynamic heating caused by the hot plasma flow around it. For flight safety, it is required to mitigate such a severe heating environment in addition to developing a heat protection system for the spacecraft. Because the hot plasma is influenced by the existence of the electromagnetic field, it is possible to make use of the electromagnetic force to mitigate such a severe heating environment. In this study, we investigated several problems inherent to this technique when it is applied to the spacecraft reentering to an atmospheric planet; ranging from the feasibility of the heat flux distribution control to the effect of high altitude flight.

研究分野：航空宇宙に係る工学研究、特に、高速空気力学の宇宙探査への応用

キーワード：極超音速流れ プラズマ 再突入宇宙機 磁気相互作用 流れの制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 惑星大気を高速で飛行する宇宙機は、地球低軌道からの再突入機や、惑星探査のための大気突入機など様々な応用がある。そのような機体では耐熱構造が必要不可欠であり、その軽量化、確実性の増大など、大幅な改善を必要とする。

(2) 一方、これまで宇宙機に強磁場発生装置を搭載し、電磁力と宇宙機周りの高温プラズマとの干渉を利用して、宇宙機の加熱を低減する方法に注目した研究を進めて来たが、原理的な確認にとどまっていた。

2. 研究の目的

この技術の応用性を高めるため、適切な磁気の強度、配位に関する知識を獲得する必要があるのみならず、複雑形状を有する宇宙機周りの衝撃波一衝撃波干渉などを含む複雑流れの適切な制御に積極的に利用する手段についても明らかにすることを目的とする

3. 研究の方法

(1) 地上実験において効果の詳細を明らかにする。気流発生装置として、アーク風洞以外に、膨張波管による高速気流発生装置を用いる。これにより高速流での実験は計測が困難になるものの、飛行状態に近い環境での実験が可能となる。

(2) 高速気流における実在気体効果を含む数値解析を利用して、実験で得られる結果を検証すると同時に、実験では得られないメカニズムの解明に迫る。

(3) 飛行実験による実証の可能性を検討する。このため、飛行実験の制約を十分取り入れ、現実的な案を模索する。

4. 研究成果

(1) 膨張波管での計測

実験として、従来用いられてきたアーク風洞（あらかじめ電離した気流を発生）に加えて、現実に近い気流（あらかじめ電離せず、飛行体との干渉により生じる強い衝撃波で電離する）で磁場との干渉効果を把握することに成功した。実験結果は数値解析とも比較検討され、その妥当性が実証された。

(2) 磁場配位と干渉効果

磁場の配位としてこれまでの標準的な配位

（磁極とノーズが一致している）に対して、磁極がずれた配位の効果として、揚力の発生が知られていたが、さらに、表面へ流入する熱入力分布について効果があることが明らかにされた。これは、干渉効果を利用して、力の発生以外に熱入力分布の制御も可能であることを示している。

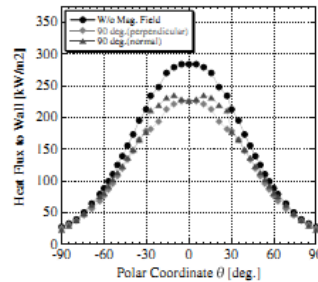


Fig. 9 Heat-flux surface distribution in the spherical part of the model with the magnetic oblique angle of 90 deg along the normal and perpendicular surface lines.

(3) 搭載型強磁場発生装置の着磁方式の件

実機において必要となる小型搭載型強磁場発生装置では、バルク超伝導体を用いる方式を検討したが、その着磁方式としてこれまでの静磁界を用いる方法に代えて、パルス磁界による方式を検討し、その可能性を示した。

(4) 永久磁石方式による飛行実験の可能性
飛行実験において用いる強磁場発生装置は、簡便なものが望ましい。そのため永久磁石による方式の可能性を検討した。その結果、適当な配置を用いることにより、効果の実証が可能であることが見いだされた。超伝導方式に比較して、干渉効果は小さくなるものの、検出可能な範囲であり、飛行実験は大幅に容易になる利点を活かすことが可能となった。

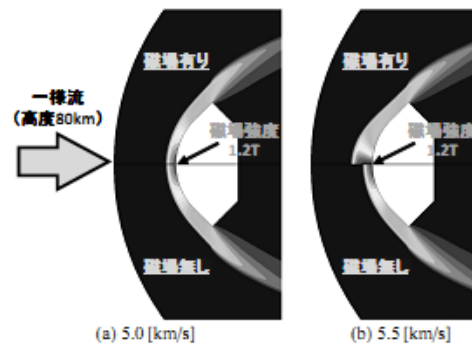
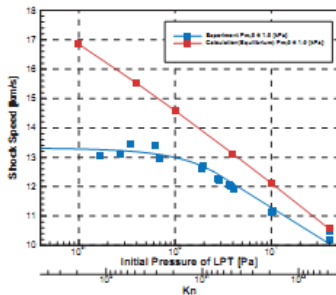


図2 印加磁場効果による圧力分布への影響(上: 磁場有り, 下: 磁場無し)

(5) 超高速気流の発生

惑星探査に利用する際にはさらに高速の飛行速度でこの技術を利用することになる。そのような高速飛行では、さらに大きな効果が期待できることが理論的に示されているが、実験的に検証する必要がある。このため、それに応じた高速気流を発生させる必要がある。現在までに、毎秒 13 km の気流が生成できることを実証した（外惑星からのサンプルリターンに相当する速度、因みに地球低軌道からの突入速度では毎秒 7.8 km である）。



(6) 高層大気での効果の確認

理論的には、本干渉効果は大気密度に応じて異なり、より低密度でより効果的になることが知られている。数値解析の手法で解析により、この理論的予測を確認したところ、低密度になるとより効果的になるものの、閾値より低密度になると、逆に効果が減じることが判明した。これは理論では考慮されていない、希薄気体効果によるものであることが判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

永田靖典, 山田宗平, 山田和彦, 安部隆土, 「弱電離プラズマ流制御技術の実証に向けた強磁場源の開発と運用について」 JAXA-SP-14-010, pp.57-62, 2015
<https://repository.exst.jaxa.jp/> (査読有)

永田靖典, 山田和彦, 安部隆土, 「3次元磁場配位による磁気シールド効果への影響」 JAXA-SP-14-010, pp.29-34, 2015
<https://repository.exst.jaxa.jp/> (査読有)

永田靖典, 里深優, 渡辺理成, 山田和彦, 安部隆土, 「磁気シールドに対する印加磁場配位

の効果について」 JAXA-SP-13-011, pp.53-58, 2014
<https://repository.exst.jaxa.jp/> (査読有)

H. Ishida, A. Tezuka, and T. Abe, “Influence of gas/surface interaction on shock wave propagation through a tube,” American Institute of Physics Conference Proceedings 1628, 419 (2014); doi: 10.1063/1.4902623 (査読有)

M. Kawamura, Y. Nagata, H. Katsurayama, H. Otsu, K. Yamada, T. Abe, “Magnetoaerodynamic Force on a Magnetized Body in a Partially Ionized Flow,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.50: 347-351, 2013
doi: 10.2514/1.A32279 (査読有)

Yasunori Nagata, Kazuhiko Yamada, Takashi Abe, “Hypersonic Double-Cone Flow with Applied Magnetic Field.” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.50, No.5, pp981-991, 2013 doi:10.2514/1.A32351 (査読有)

Hiroshi Katsurayama and Takashi Abe, “Thermochemical Nonequilibrium Modeling of a Low Power Argon Arcjet Wind Tunnel,” Journal of Applied Physics Vol. 113, 053304 2013
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4776765> (査読有)

Hiroshi Katsurayama and Takashi Abe, “Numerical Investigation of a Drag Increase Achievable in Electrodynamic Aerobraking of a Reentry Vehicle,” American Institute of Physics Conference Proceedings Vol. 1501, pp. 1477-1484, 2013
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4769713> (査読有)

Masaaki Kawamura, Hiroshi Katsurayama, Hirotsuka Otsu, Kazuhiko Yamada, Takashi Abe, “Magnetic-Field Configuration Effect on Aerodynamic Heating of a Magnetized Body,” Journal of Spacecraft and Rockets vol.49 no.2, pp. 207-211,

2012 doi: 10.2514/1.57994 (査読有)

[学会発表](計 38 件)

Hiroyuki Ishida, Kyousuke Arai, Yusuke Shimazu, Asei Tezuka, Yasunori Nagata, Kazuhiko Yamada, Takashi Abe, “Experimental Study to increase the Shock speed in a Free Piston Double Diaphragm Shock Tube” 8th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, 2015, March, Lisbon (Portugal)

Otsu, H., Yamada, K., and Abe, T., “Effect of New Electron Impact Ionization on the Aerodynamic Heating Environment for Super-Orbital Reentry Vehicles,” 46th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA 2015-2808, 2015, June, Dallas (USA)

Yasunori Nagata, Kazuhiko Yamada, Takashi Abe, “Drag Enhancement for Atmospheric Entry Capsule using Electrodynamic Effect with Multi-magnetic Source,” 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-e-04 2015, July Kobe (Japan)

石田広之、新井恭輔、嶋津悠介、山田和彦、安部隆士、手塚亜聖, 「衝撃波管を用いた超高速気流の分光計測」, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム 2C1-2 2015 年 3 月 9 日 ホテル天坊(渋川市)

永田靖典, 山田宗平, 山田和彦, 安部隆士, 「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 1 日 横浜国立大学 (横浜市)

Hiroshi Katsurayama, Takashi Abe, “Numerical Investigation of the Dynamic Triggering of Electrodynamic Aerobraking at High Altitudes using an Ablator with Alkali Metal” 45thAIAA Plasmadynamics and Lasers Conference AIAA 2014-2375 2014, June, Atlanta (USA)

Hirotaka Otsu Kazuhiko Yamada and Takashi Abe, “Effect of the Flight

Condition on the Thermochemical Non-equilibrium Phenomenon for Super-Orbital Reentry Vehicles,” 45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference AIAA 2014-2377, 2014 June, Atlanta (USA)

永田靖典、山田和彦、安部隆士, 「印加磁場効果による極超音速空力特性への影響に関する数値解析」, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム 1B1-3 2014 年 3 月 5 日~7 日 青山学院大学 (相模原市)

嶋津悠介、手塚亜聖、高橋裕介、永田靖典、山田和彦、安部隆士, 「衝撃波管を用いた弱電離プラズマ流と印加磁場の相互干渉による抗力増大効果の検証」平成 25 年度衝撃波シンポジウム 1B1-2 2014 年 3 月 5 日~7 日 青山学院大学 (相模原市)

永田靖典, 山田和彦, 安部隆士, 「3次元磁場配位による磁気シールド効果への影響」第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 1B07 2014 年 7 月 1 日 弘前文化センタ (弘前市)

永田靖典, 山田宗平, 山田和彦, 安部隆士, 「弱電離プラズマ流制御技術の実証に向けた強磁場源の開発と運用について」第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 1B12 2014 年 7 月 1 日 弘前文化センタ (弘前市)

葛山浩、安部隆士, 「アルカリ金属ロッドを用いた高々度での電磁力ブレーキ強制発動の数値解析的検討」第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 講演番号 2103 (JSASS-2014-4480) 2014 年 11 月 12 日 長崎ブリックホール (長崎)

(その他)
ホームページ <http://gd.isas.jaxa.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安部隆士 (ABE, Takashi)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・名誉教授
研究者番号: 60114849

(2) 研究分担者

大津広隆 (OTSU, Hirotaka)
龍谷大学・理工学部・准教授
研究者番号：20313934

山田和彦 (YAMADA, Kazuhiko)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号：20415904

西田浩之 (NISHIDA Hiroyuki)
東京農工大学・工学研究院・准教授
研究者番号：60545945

葛山浩 (KATSURAYAMA Hiroshi)
山口大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：80435809