

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01531
研究課題名（和文）宇宙プラズマと衛星磁場のイオンスケール相互作用の解明に基づく軌道維持機能の創出

研究課題名（英文）Ion-scale interactions between space plasma and satellite magnetic fields targeting orbit control

研究代表者
稲守 孝哉（Inamori, Takaya）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50725249
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、低軌道プラズマによる人工衛星の軌道摂動を解明し、プラズマによる力を利用した複数衛星の新たな編隊飛行手法を構築する。はじめに、これまで未解明であった低軌道プラズマと衛星の電磁コイルの相互作用に着目し、プラズマの運動量変化より生じる反作用力（プラズマ力）の発生メカニズムを実験的に解明する。本検討は、クーロン力によるイオンの反射など、プラズマを粒子単位で考慮する挙動を扱う点で独自のものである。本研究では実験とシミュレーションによりプラズマによる反作用力の発生原理を明らかにする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近、衛星の小型化と複数機化が急速に進み、複数機による新たな宇宙システムの構築と展開が喫緊の課題となっており、推進機の小型化が検討されている。本研究で扱った「電磁コイルにより力を生む」ことにより新たな軌道制御手法が構築できれば、これまで軌道制御が難しかったより小型の衛星についても軌道制御により編隊飛行やコンステレーションに応用することができ、多地点同時観測や継続的観測を長期間可能とする新たな宇宙システムへの展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a new orbit control method by studying the forces generated from interactions between low-earth orbit plasma and electromagnetic coils installed on satellites for attitude control. First, the research investigates plasma forces experimentally to clarify the mechanism of reactive forces, with a focus on the interaction between space plasma and onboard magnetic coils. Then, the lift force is also experimentally investigated. Through experiments and simulations, this research aims to elucidate the principles underlying the generation of reactive forces by plasma.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙プラズマ 人工衛星 軌道制御 磁気トルカ 軌道力学

1. 研究開始当初の背景

衛星の小型化の急速な進展のなか、複数の衛星による編隊飛行やコンステレーションといった時間や空間の分解能を高めて長期間の観測を行う次世代宇宙システムが期待されている。このような複数の衛星を利用した宇宙システムが期待されるなかで、より小型の衛星での軌道制御が求められている。一般的に姿勢制御には小型の衛星に搭載可能な電磁コイルを地球磁場と作用させ生じる磁気トルクが用いられてきた。軌道制御には推進機が用いられるが、小型ほど電力やスペースが小さく推進機の追加の搭載が困難となり、推進剤の制約から観測期間が限られてしまう。そこで電磁コイルを用いて、イオンや電子からなる宇宙プラズマや磁場といった宇宙環境が衛星に与える影響を利用した軌道変更が検討されている。惑星間軌道においては、太陽風プラズマのイオンが宇宙機の超電導コイルの強い磁場でローレンツ力により曲げられ反射し、その反作用力(プラズマ力)を得る手法が検討されている。しかしながら、地球軌道では電磁コイルの磁場が弱く、イオンがローレンツ力で大きく曲げられないためイオンが反射せず、衛星の軌道摂動は小さいと考えられてきた。そのようななか、地球周回軌道で電磁コイルが小さい場合において宇宙プラズマと衛星の電磁コイルの干渉による相対軌道摂動が生じる可能性が示唆されている。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙プラズマと衛星の電磁コイルの干渉を扱う。これは、以下の原理による。電磁コイルの小さな磁場強度において、イオンはローレンツ力で曲げられず、質量の小さな電子が磁場で曲げられるため、イオンと電子の分布の相違から電位が生じる。さらにこの電位分布からクーロン力によりイオンが曲げられ力が発生する。従来、研究されてきた、イオンがローレンツ力により曲げられることによるプラズマ力の発生原理とは異なるメカニズムである(図1、図2)。このプラズマによる力については数値計算による検討にとどまっておらず、実験による抗力発生メカニズムの解明には至っていない。そこで本研究では「低軌道プラズマと電磁コイルの磁場によるプラズマ力のイオンスケールでの発生メカニズム」を実験により明らかにすることを目的とする。このプラズマ力を軌道制御に応用することで、推進剤を必要としない宇宙環境を利用した新たな軌道制御手法が期待できる。

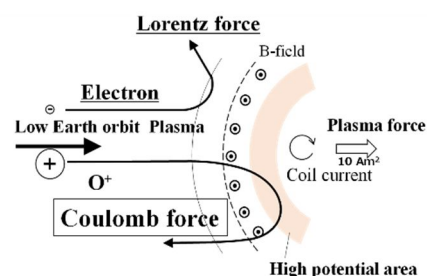


図1 プラズマ力の発生原理(惑星間軌道) 磁気モーメント ~ 10Am²

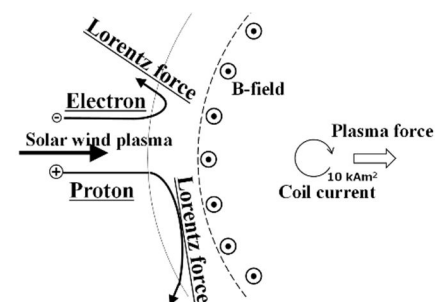


図2 プラズマ力の発生(原理地球周回軌道) 磁気モーメント ~ 10kAm²

3. 研究の方法

実験によるプラズマ力の計測と発生原理の確認

真空チャンバーにおいて電気推進機よりプラズマ流を生成し、10 Am²の磁気トルクに生じるプラズマ力を計測した。イオン・電子質量比が軌道上環境と近く取り扱いが容易な Ar⁺を用いることで、イオンはローレンツ力により曲げられず磁化されないが、電子は低軌道環境と同程度磁

化される環境を実験室にて再現した(表1)。磁気トルカの変位を LED 変位計により計測しプラズマ力を計測した(図3)。さらにイオンのクーロン力による反射などプラズマを粒子単位で考慮する必要があることから、イオンと電子を粒子として扱う Full-PIC (Particle in Cell) 法による数値計算コードにより数値計算を行い、イオン数密度分布を比較した。

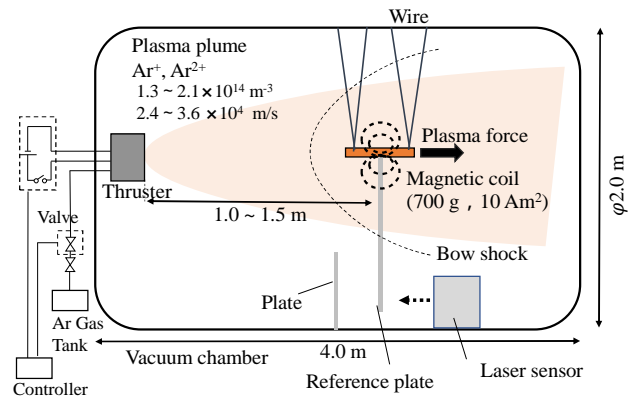


図3 プラズマ力発生原理の実験による説明

実験によるプラズマ流における揚力の確認

図3の実験系において電磁コイルを回転させることができるモーターを取り付け、さらに2つの LED 計測系から変位を計測することで、2軸の力を計測した。電磁コイルの出力を変化させ揚力の変化を確認した。さらに実験室環境を再現した Full-PIC 法によるシミュレーションを実施し、シミュレーション結果と実験結果を比較し、揚力についての発生原理についても考察した。

表1 実験条件

	地球低軌道	実験環境
イオン種	O^+	Ar^+
粒子速度 v_{sat}	8,000 m/s	25,450 m/s
プラズマ数密度 n_0	$1.0 \times 10^{11} / m^3$	$2.0 \times 10^{14} / m^3$
磁気モーメント M_d	1~100 Am ²	
磁気圏の大きさ L	0.67~3.12 m	0.10~0.45 m
$r_e/L < 1$	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
$r_i/L > 1$	10^3	$10^2 \sim 10^3$

4. 研究成果

4.1 実験によるプラズマ力の計測と発生原理の確認

電磁コイルとプラズマ流により生じる抗力の発生原理を確認するため真空チャンバーに電気推進機を設置し実験を実施した。実験では 10 Am² の磁気トルカを用いており、低軌道上と同じくイオンはローレンツ力により曲げられず磁化されない環境であるにも関わらず、イオンの軌跡が電磁コイルの周りで変化している様子が確認できた(図4)。特に電磁コイルの前方部にイオンの数密度が高まる領域が形成されることが確認できた。このコイル前方に形成される領域は、Full-PIC 法による数値シミュレーションにおいても確認でき、イオンの軌跡が変化しなければ形成されないことから、着目する現象が実験にて再現できていることを確認した。さらに二値化による画像解析(図4)により電磁コイルの磁気モーメントを大きくすることで、この領域が拡大することが確認できた。さらに磁気モーメント出力時における電磁コイル近傍の電位を計測し、磁気トルカから磁気モーメントを出力することで電位が上昇することを確認した。これは磁気トルカから出力された磁場により電子が磁化され軌道が曲げられるため電磁コイル

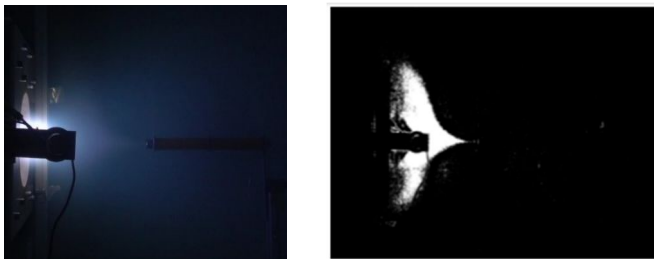


図4 (左)電磁コイル周りのイオン、(右)二値化画像

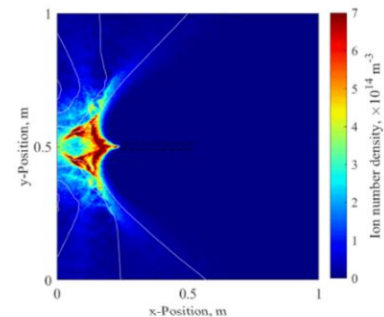


図5 Full-PIC 法シミュレーション結果による電磁コイル周りのイオン数密度分布

に電子が流入しにくくなったためと考えられる。これにより、電子が衛星の磁場で曲げられ、イオンが衛星近傍まで侵入することを確認できた。

4 2 . 実験によるプラズマ流における揚力の確認

推進機の機軸方向に対して異なる角度で電磁コイルを回転させ推力を計測した。推進機の機軸方向にプラズマ流が生成されるとし機軸方向にはたらく力を抗力、機軸と垂直方向にはたらく力を推力として計測した。推進機の機軸方向となす角度が 22.5 deg と 67.5 deg の場合の抗力と揚力を図 6 に示す。それぞれの角度において抗力と揚力が生じており、電磁コイルの磁気モーメントを増加させると、抗力と揚力のそれぞれが増大することが分かった。また、プラズマ流と電磁コイルがなす角度が大きくなるほど、揚力が比較的大きくなることが分かった。軌道上環境を模擬し、Full-PIC 法による数値シミュレーションを行ったところ、 $E \times B$ ドリフトにより発生する電流によりコイルが力を受けることで揚力が発生することが示唆された。この結果から、軌道運動する人工衛星において軌道面と垂直をなす方向にも軌道摂動を生じさせる可能性があることが分かった。

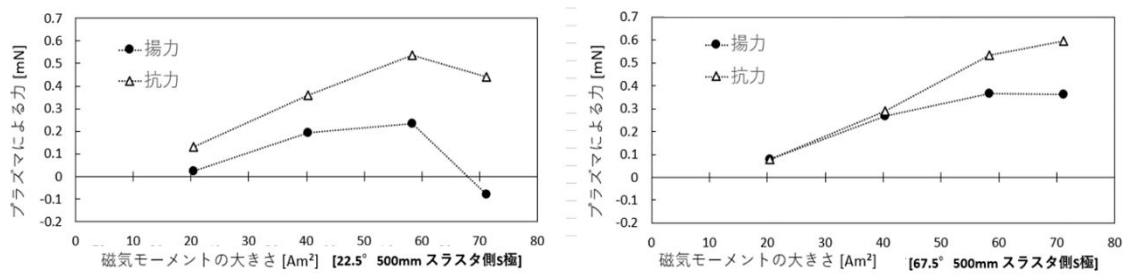


図 6 (上段) 数値シミュレーション結果 (下段) 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Park Ji Hyun, 稲守 孝哉, 宇佐見 海渡, 吉川 英儀, 山口 皓平, 川嶋 嶺
2. 発表標題 Patched bang-bang control for spacecraft attitude stabilization during magnetic plasma drag in-orbit demonstration
3. 学会等名 第67回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kameyama, R. Kawashima, and T. Inamori
2. 発表標題 Drag Force Augmentation of Magnetic Plasma Deorbit Method for Nanosatellites
3. 学会等名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮本 岳瑠, 稲守 孝哉, Ji Hyun Park, 川嶋 嶺
2. 発表標題 宇宙プラズマと磁気トルカの相互作用による現象を用いた小型宇宙機の軌道制御への応用
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Park, T. Inamori, H. Masuda, T. Miyamoto, T. Noro, K. Nagai, K. Kinefuchi, R. Kawashima, K. Yamaguchi
2. 発表標題 Magnetic plasma drag demonstration mission for nanosatellite orbit control
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田裕明, 稲守孝哉, Park Ji Hyun, 川嶋嶺, 杵淵紀世志, 山口皓平
2. 発表標題 磁気トルカと地球低軌道プラズマの相互作用から生じる力の実験研究
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

〔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
研究分担者	川嶋 嶺 (Kawashima Rei) (80794429)	芝浦工業大学・工学部・准教授 (32619)	
研究分担者	杵淵 紀世志 (Kinefuchi Kiyoshi) (90648502)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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