

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760774

研究課題名（和文）

長期間・長距離の深宇宙航行を可能とするソーラーセイルの燃料フリー姿勢制御系の開発

研究課題名（英文） Development of Fuel-free Attitude Control System for Solar Sail To Enable Long-term and Long-distance Deep Space Flight

研究代表者

船瀬 龍 (FUNASE RYU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70509819

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、大面積の帆で太陽光を反射し、その反力で宇宙を航行するソーラーセイルの姿勢を、燃料を用いずに制御するシステムを確立することである。これまでの研究で開発した光の反射特性を電気的に制御してトルクを発生させるデバイスに対して、本研究では、既存のデバイスの配置を工夫することによって任意の方向の姿勢制御トルクを発生できることを明らかにするとともに、デバイスの長期間の宇宙環境耐性確保の目処を得ることができ、加速（軌道制御）だけでなく帆の操舵（姿勢制御）にも燃料が不要な真に半永久的な深宇宙航行システムの実現につながる成果を上げた。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to realize the fuel-free attitude control system for solar sail, which deploys huge thin membrane in space and uses the reflection of sunlight as its propulsive force. We have previously developed a thin-film device that can switch its reflectivity by electric power supply, and in this research, we showed that the device can produce three-axis attitude control torque. We also developed a method to protect the device against long-term severe space environment. The results will lead to a completely fuel-free solar sail spacecraft which does not require any propellant for both orbital control and attitude control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：宇宙機制御工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ソーラーセイル，姿勢制御，太陽光圧，制御工学，液晶デバイス

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間で数10m以上の大面積の薄膜鏡（帆，セイル）を展開・展張し，膜面に作用する太陽光圧を推進力として宇宙空間を航行するソーラーセイル（図1）は，燃料を使用せずに宇宙空間を航行できるため，長期間・長距離の深宇宙探査を可能にする次世代の宇宙推進方式として注目されている。特に，スピンの遠心力を利用することによって帆の展開・展張のための構造物を削減した「スピン型ソーラーセイル」は，軽量化することで宇

宙機全体の重量とセイル面積の比（太陽光圧による加速性能）を極限まで向上させているにもかかわらず，帆を操舵（スピン軸方向を変更して太陽光圧による加速度ベクトルを制御）する際に，その巨大な慣性モーメント/角運動量ゆえに大量の姿勢制御用の燃料が必要になる。つまり，加速のための燃料が不要で半永久的に航行が可能なソーラーセイルであるはずが，姿勢制御用の搭載燃料量によって宇宙航行の寿命が決まってしまうという決定的な問題があった。

申請者のこれまでの研究では、電気エネルギーによって液晶の配向を変え太陽光の反射特性を制御する液晶デバイス（図 2）を開発した。そして、デバイスを帆に複数配置し、各デバイスの受ける光圧をアンバランスさせてトルクを発生させる燃料フリー姿勢制御システム（図 3）を開発し、世界初のソーラーセイル IKAROS で宇宙実証まで成功させた（図 4）。ところが、本デバイスは、反射率のみ制御可能で、光の反射方向は制御できないため、帆のスピン軸方向を変更するトルクしか発生できず、帆の展開状態の維持に必要なスピンレートの制御には未だ姿勢制御用燃料を必要とされていた。また、デバイスの長期の宇宙環境耐性についての基礎的な知見が不足していた。したがって、完全に燃料フリーなシステムは実現できておらず、また、5~10年以上の長期間の航行に必要な寿命評価が確立されていなかった。

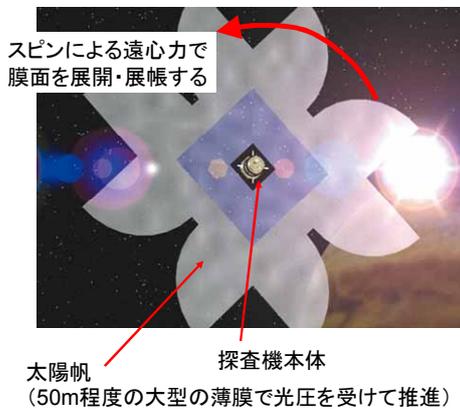


図 1 ソーラーセイル

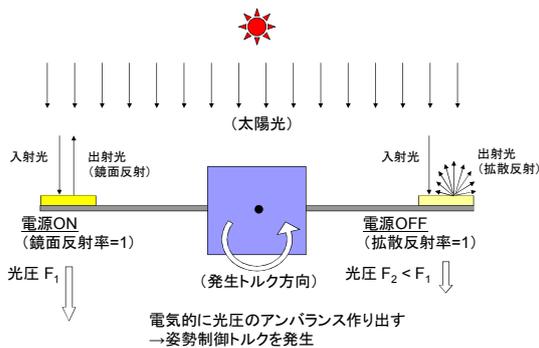


図 2 太陽光圧と電気エネルギーのみを用いた燃料フリー姿勢制御システム



図 3 液晶デバイス
(左：OFF (拡散反射), 右：ON (鏡面反射))

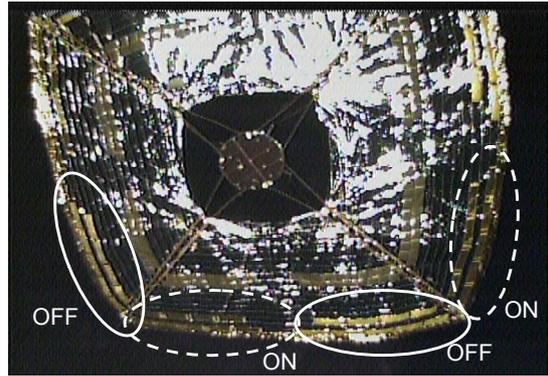


図 4 軌道上で動作実証した液晶デバイス

2. 研究の目的

本研究では、ソーラーセイルによる真に半永久的な深宇宙航行システムを実現するために、3次元の任意の方向にトルクを発生可能で、かつ、長期間の宇宙環境耐性も有する燃料フリーな姿勢制御システムを開発する。これにより、加速（軌道制御）にも姿勢制御にも燃料が不要（完全燃料フリー）で、真に半永久的な深宇宙航行システムを実現する。

3. 研究の方法

(1) 超長期の宇宙環境耐性を有する液晶デバイスを開発するために、既開発の液晶デバイスの素材単体の放射線耐性評価を行うとともに、放射線からデバイスの素材を保護する方策について研究する。

(2) 3次元の任意の方向に姿勢制御トルクを発生させるために、ソーラーセイル上のデバイスの配置方法の工夫、デバイスのスイッチング制御則の工夫等の方策を研究する。

4. 研究成果

(1) 液晶材料を利用した既開発の姿勢制御デバイスを構成する各材料要素のうち、耐環境性の観点でボトルネックになっている液晶ポリマー部の宇宙環境耐性評価試験（紫外線試験）を実施し、デバイスとして統合する前の素材レベルでの宇宙環境耐性についての基礎データを取得した（図 5, 6）。

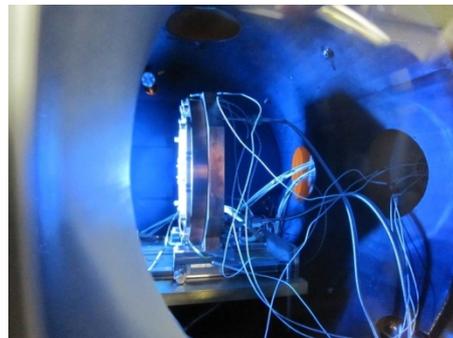


図 5 紫外線照射試験の様子



図6 紫外線照射試験後のデバイス

デバイスの宇宙環境耐性評価と平行して、酸化セリウムを用いた紫外線カットのコーティング処置をデバイスの基材に施したサンプルを作成し、その紫外線透過特性を評価した。そして、基材に挟まれた液晶材料に到達する紫外線量を見積もったところ、ソーラーセイルを用いた実ミッションで要求される耐環境性を満足できる可能性が確認できた。また、紫外線試験直後のデバイスの性能変化を詳細に評価したところ、デバイスの性能は紫外線照射後の時間経過に伴って変化（改善）することが確認された。実際の宇宙空間での低照射強度・長時間の照射における性能変化を精度良く評価するためにはさらなる詳細な評価が必要であることが本研究から明らかになった。

(2) 計画当初は既存の液晶デバイスではソーラーセイルのスピン軸方向のトルクは発生不可能と考えていたが、任意の変形を有するソーラーセイル上に配置した液晶デバイスによって発生可能な姿勢制御トルクのモデルを精密化することで、既存の液晶デバイスのみを用いて3次元の任意の方向の姿勢制御トルクを発生可能であることを解析的に明らかにした。本研究で導出した精密な姿勢制御トルクモデルの妥当性は、ソーラー電力セイルの技術実証機 IKAROS で液晶デバイスを用いて実施した姿勢制御実験の結果を通じて評価中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

1. Ryu Funase, Yoji Shirasawa, Yuya Mimasu, Osamu Mori, Yuichi Tsuda, Takanao Saiki, Junichiro Kawaguchi "On-orbit Verification of Fuel-Free Attitude Control System for Spinning Solar Sail Utilizing Solar Radiation Pressure", *Advances in Space Research*,

- Vol.48, Issue 11, pp.1740-1746, 2011
2. Yuichi Tsuda, Osamu Mori, Ryu Funase, Hirotaka Sawada, Takayuki Yamamoto, Takanao Saiki, Tatsuya Endo and Junichiro Kawaguchi, "Flight Status of IKAROS Deep Space Solar Sail Demonstrator", *Acta Astronautica*, Vol.69, Issues 9-10, pp.833-840, 2011
3. Yuichi Tsuda, Takanao Saiki, Ryu Funase, Yuya Mimasu, Tomohiro Yamaguchi, Hitoshi Ikeda, Masaki Nakamiya, Hiroshi Takeuchi and IKAROS Demonstration Team, "Modeling of Solar Radiation Pressure Effect for Trajectory Guidance of Spinner Solar Sailer IKAROS", *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol.10, No.ists28, pp. Po_4_7-Po_4_12, 2012

[学会発表] (計7件)

1. Ryu Funase, Yuya Mimasu, Yoshikazu Chishiki, Yoji Shirasawa, Yuichi Tsuda, Takanao Saiki and Junichiro Kawaguchi, "Modeling and On-orbit Performance Evaluation of Propellant-free Attitude Control System for Spinning Solar Sail via Optical Parameter Switching", *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, Girdwood, Alaska, July 31 - August 4, 2011
2. Ryu Funase, Yoji Shirasawa, Yuya Mimasu, Osamu Mori, Yuichi Tsuda, Takanao Saiki and Junichiro Kawaguchi, "Fuel-free and Oscillation-free Attitude Control of IKAROS Solar Sail Spacecraft Using Reflectivity Control Device", *28th International Symposium on Space Technology and Science*, Okinawa, Japan, 2011
3. Ryu Funase, Yuya Mimasu, Yuichi Tsuda, Takanao Saiki, Yoshinobu Okano, and Gou Kanno, "Propellant-free Attitude Control for Spinning Solar Sail via Optical Parameter Switching", *Proceedings of 21st Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics*, Sagami-hara, July 2011
4. 船瀬龍, 三榘裕也, 津田雄一, 佐伯孝尚, 岡野仁庸, 菅野剛, "光学パラメータ切り替え制御によるスピン型ソーラーセイルの燃料フリー姿勢制御", 第55回宇宙科学技術連合講演会, 松山, December 2011
5. Ryu Funase, Go Kanno and Yuichi Tsuda,

"Controllability of Propellant-free Attitude Control System for Spinning Solar Sail Using Thin-Film Reflectivity Control Devices Considering Arbitrary Sail Deformation", 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, 2012

6. 菅野剛, 船瀬龍, "可変反射率デバイスを用いた任意形状のスピン型ソーラーセイルの姿勢制御システムのダイナミクスと姿勢制御則", 第56回宇宙科学技術連合講演会, 別府, Nov 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船瀬 龍 (FUNASE RYU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70509819

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし