

B7 次期ソーラー電力セイル計画におけるセイル製作手法の検討

松本純(東京大学大学院), 水森主(東海大学大学院), 寺元祐貴(東京大学大学院), 大野剛(東京大学大学院),
白澤洋次(JAXA), 森治(JAXA), ソーラーセイル WG (JAXA)

Jun Matsumoto (The University of Tokyo), Tsukasa Mizumori (Tokai University),
Yuki Teramoto (The University of Tokyo), Go Ono (The University of Tokyo)
Yoji Shirasawa (JAXA), Osamu Mori (JAXA), Solar Sail WG (JAXA)

Abstract

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is now planning an outer solar system exploration and sample return mission from a Jovian Trojan asteroid using a 3000m² single spin solar power sail. In this paper, a current sail design and a sail manufacturing strategy are discussed. The new sail design is based on the IKAROS sail design. In addition, several requirements from a mission scenario and knowledge obtained from the IKAROS flight data are taken into account. In order to check this new sail design, a test sail was manufactured in 2012-2013. The sail design has been updated considering the knowledge obtained through this manufacturing. In future, several test sails will be manufactured and the sail design will be determined.

1. はじめに

現在, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では, 図1に示すような, シングルスピンの型 3000 m² クラスのソーラー電力セイルを用いた木星トロヤ群探査およびサンプルリターンを計画中である[1,2]. このような外惑星領域からのサンプルリターンミッションは, 燃料消費量の観点で, イオンエンジンを代表とする電気推進を用いなければ成立しない. 本ミッションは, 巨大なセイル全面に薄膜太陽電池を貼り付けることで, 外惑星領域でもイオンエンジンが駆動できるだけの十分な電力を確保し, 世界で初めての外惑星領域往復探査を可能にするものである. 本ミッションの大きな特徴は

- 世界初の外惑星領域往復ミッション
- 世界初のトロヤ群小惑星へのランデブーおよび探査
- 世界初のトロヤ群小惑星からのサンプルリターン
- 世界最高性能のイオンエンジンの搭載

である. 他にも, 長期間にわたるクルージング期間を活かした, 多数のサイエンス観測を行う.

ここでは, 現在 JAXA 内で行われているセイル設計の現状およびセイル試作状況について報告する.

2. IKAROS のセイル設計と, 次期セイルへの拡張

本ソーラー電力セイル計画の前段階として, JAXA は 2010 年に小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS を打ち上げ, 予定していたミッションを完遂した[3]. 本ミッションでのセイル設計は, IKAROS のセイル設計

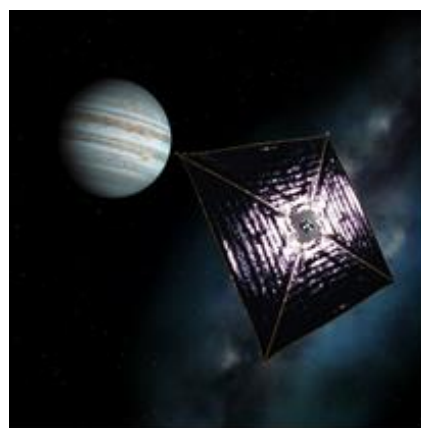


図1 次期ソーラー電力セイル

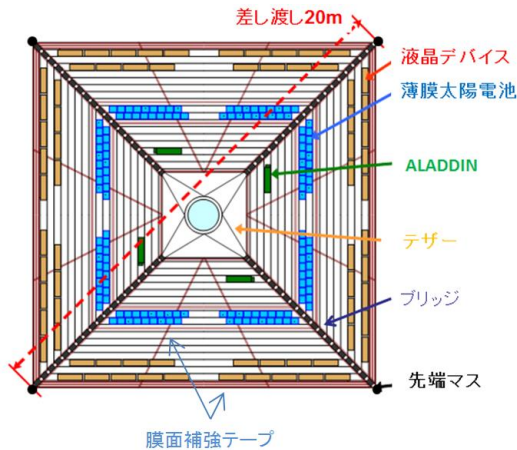


図 2 IKAROS のセイル設計

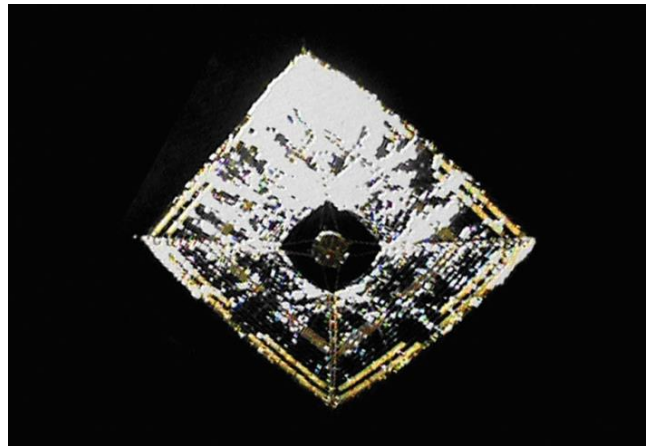


図 3 軌道上での IKAROS

をベースとし、さらに IKAROS ミッションから得られた知見をフィードバックしたものになる。本章では、まず IKAROS のセイル設計について簡単にレビューした後、次期ソーラー電力セイル設計の現状について述べる。

2.1 IKAROS のセイル設計

図 2 に IKAROS セイルの概念図を、図 3 に分離カメラから撮影された軌道上での IKAROS セイルの画像を示す。IKAROS セイルは、差し渡し 20m の正方形形状であり、 $7.5 \mu\text{m}$ のアルミ蒸着ポリイミドフィルムで全面が構成されている[4]。この薄膜フィルムの上には、発電実証用の薄膜太陽電池、液晶デバイス(姿勢制御用デバイス)、ダストカウンター(ALADDIN)など、各種薄膜デバイスが搭載されている。この IKAROS セイルは、先端マスと呼ばれるおもりの遠心力により、軌道上で展開した。

この差し渡し 20m のセイルを 1 度に製作するのは、製作場所の観点から非常に難しい。そこで、IKAROS セイルは正方形を、ペタルと呼ばれる 4 つの台形形状に分割して製作された。これらのペタルは、ブリッジと呼ばれるポリイミドフィルムにより接合されている。

2.2 次期ソーラー電力セイルへの要求

IKAROS ミッションからのフィードバックを含めた、次期セイルへの要求は以下のとおりである。ここで挙げる要求を満たすよう、セイル設計が進められている。

(1) ミッション成立性の観点から

- (1-1) 太陽距離 5.2AU で、十分な電力($\sim 7\text{kW}$) を確保するだけの、薄膜太陽電池を全面に搭載。
- (1-2) ハーネス(集電路)が一部破断しても、全体に与える影響を極力小さくする
- (1-3) セイル重量の削減

まず、トロヤ群小惑星への往復軌道設計から要求される電力値を達成できるだけの、薄膜太陽電池を搭載する必要がある。現在の薄膜太陽電池の性能から、この要求を満たすためには、約 3000 m^2 のセイルサイズが必要となる。これは IKAROS のセイルサイズの 15 倍の面積である。

さらに、この巨大なセイル全体で発電した電力を、ハーネスにより探査機本体へ輸送しなければならない。これらのハーネスが破断した場合に、多くの電力が失われてしまうと、イオンエンジンが駆動できず、ミッション遂行が不可能になる。そのため、1つのハーネスに流れる電力を小さくし、破断の影響を小さくする必要がある。

また、セイル自体の重量を削減することは、他機器に重量を回せること、セイルを支える構造を簡素にできることなど、ミッション成立性の観点から重要である。セイル重量として支配的なのは、全面に貼られた薄膜太陽電池であることから、薄膜太陽電池の重量削減が要求されている。

(2) 発電、姿勢制御の観点から

(2-1) 軌道上で、要求された形状となる

IKAROS のフライトデータから、IKAROS セイルは軌道上で平面形状ではなく、ある種の変形をしていることが分かっている[5]。この変形は、薄膜太陽電池に代表される薄膜デバイスの反り[6]によるものである。このようにセイル形状が平面形状からずれると、有効面積が減ることによる発電効率の低下および太陽光圧による姿勢擾乱が発生し、ミッション遂行に深刻な影響を与える。そこで、少なくとも大局的なセイル形状を、セイル設計により一意に決定できるようにする必要がある。現在は、ペタル間を結ぶブリッジや、本体とセイルを結ぶテザーの取り付けを工夫することで、セイル形状コントロールが出来るか研究中である[7]。

(3) 打ち上げ時の振動対処の観点から

(3-1) Launch Lock 機構を搭載

打ち上げ時の振動により、折りたたまれたセイルがこぼれないようにするため、次期ミッションでは、Launch Lock 機構を搭載する必要がある。

(4) 宇宙環境性の観点から

(4-1) 接着剤の再評価

IKAROS では、ポリイミドフィルム同士の接着およびデバイスの貼り付けにシラスコンと呼ばれる接着剤を用いている[4]。長期間にわたる本ミッションでの動作を保証するため、シラスコンの耐宇宙環境性を再評価する必要がある。なお、熱融着可能なポリイミドフィルムの開発[8]も同時に進めており、開発状況によっては接着を融着で行う可能性もある。なお、この熱融着は、アウトガスの観点からも有利である。

(5) 製作場所の観点から

(5-1) セイルのサイズを極力小さくする

(5-2) 小さい作業空間でも製作可能

製作および試験場所の観点から、セイルのサイズを極力小さくする必要がある。方策の1つ目は、薄膜太陽電池の効率を上げ、小さい面積でも必要電力を発生できるようにすることである。方策の2つ目は、正方形形状のセイルを台形による1/4分割ではなく、さらに細かく分割して製作するということである。現状の設計では、正方形を1/8分割して製作することになっている。地上で展開できるのは、この1/8セイルであり、セイル全体形状を地上で見ることはない。これはIKAROSでも同様である。

2.3 3000 m² セイル設計の現状

現状でのセイル設計の概念図を図4に示す。青で表示されている部分は薄膜太陽電池ユニットであり、赤で表示されている部分は液晶デバイスである。これらのデバイスの隙間に、他の薄膜デバイスを搭載していく。このセイルの折り幅は、450mmと設定した。展開のしやすさの観点および薄膜太陽電池の搭載効率の観

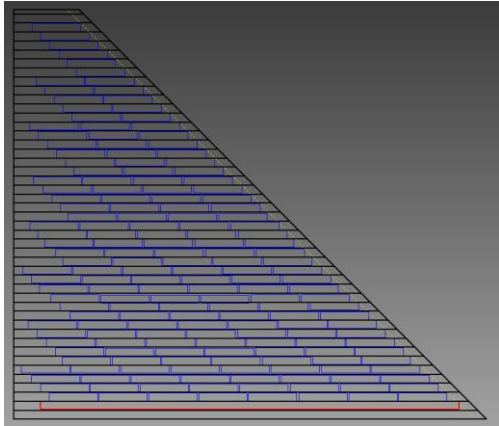


図4 セイル設計外観 (全体の1/8部分)

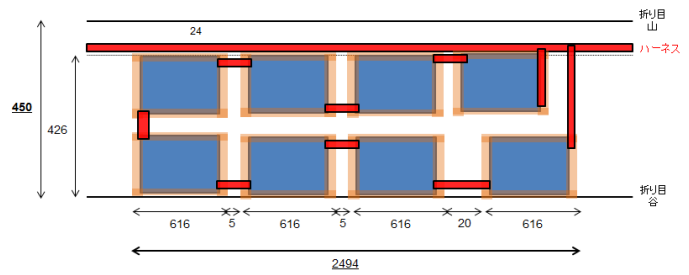


図5 各段の構成

(青：薄膜太陽電池，赤：ハーネス，黄：カプトンテープ)



図6 試作セイル外観



図7 ハーネス搭載後の試作セイル

点から、この折り幅は大きいほうが有利である。一方で、セイルの折りたたみは人間の手によって行われるため、あまり大きく設定しすぎると、セイルの折りたたみが物理的に不可能になる。この450mmという折り幅は、人間の手がとどく限界から設定されている。

続いて、セイルが折られる1段の詳細構成を図5に示す。図4内の薄膜太陽電池ユニットは、実際は8枚のCIGS薄膜太陽電池から構成されている。なお、このセイルではハーネスが非常に長くなることから、ジュール損失が無視できない。そこで、輸送電力の電圧を高く設定し(～200V)、ジュール損失を抑える設計としている。また、このソーラー電力セイルは、太陽距離1AU-5AUという大きな太陽距離変化を経験する。太陽距離が十分小さいときには(1AU-2AU)十分な電力が確実に確保できることから、すべての設計パラメーターは、5AU付近で発電できる電力が最大化されるよう設定されている。

3. セイル製作手順

セイル製作は、以下の手順で行われる。この手順は、基本的にIKAROSの製作手順と同様である[4]。

- Step.1 ポリイミドフィルムの帯を切り出し、マーキング・折り目づけを行う。
- Step.2 切り出した帯に、薄膜太陽電池を代表とするデバイスを貼り付ける。

Step.3 製作した帯同士を接着し，全体形状を作る．

Step.4 Launch Lock 用の穴をあける．

Step.5 ブリッジを取り付け，探査機本体に巻き付ける．

4. セイル試作

これらのセイル設計を踏まえて，2012-2013 年度にかけて，セイルの試作が行われた[9]．図 6 に製作されたセイルを，図 7 にハーネスを搭載した後のセイルを示す．この試作の目的は，製作手法のバグ出しであることから，製作されたセイルは実際のサイズではなく，縮小版となっている．また，実際のセイルはアルミ蒸着ポリイミドフィルムを用いて製作されるが，本試作では，安価な PET フィルムを用いて製作を行った．また，セイル上には，薄膜太陽電池および液晶デバイスと同等の剛性を持つ PET フィルムをダミーとして搭載している．この試作からのフィードバックを踏まえて，2014 年度に，フルサイズの試作セイルを製作する予定である．

5. おわりに

本論文では，次期ソーラー電力セイル計画におけるセイルへの要求と，現状でのセイル設計について述べた．この先，複数回のセイル試作を行い，設計を固めていく予定である．

References

- [1] R. Funase *et al.* : Trajectory and System Design for Jovian Trojan Asteroid Exploration Using Solar Power Sail, 29th International Symposium on Space Technology and Science, d-20, 2013
- [2] J. Matsumoto *et al.* : Mission Analysis of Sample Return from Jovian Trojan Asteroid by Solar Power Sail, 29th International Symposium on Space Technology and Science, k-57, 2013
- [3] 森治 *et al.* : IKAROS の開発およびミッション概要, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, pp.283-289, 2012
- [4] 遠藤達也 *et al.* : IKAROS のソーラーセイル膜面開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, pp.413-419, 2012
- [5] T. Chujo *et al.* : Analysis of Sail Deformation Based on Attitude Motion of Spinning Solar Sail, 29th International Symposium on Space Technology and Science, d-08, 2013
- [6] 白澤洋次 *et al.* : スパッタリングによる薄膜積層構造の曲率管理手法に関する研究, 第 28 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2012
- [7] 菊池隼仁 *et al.* : 真空槽を用いたスピン型ソーラーセイルの展張形状推定, 第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2013
- [8] 伊藤信平 *et al.* : 次期大型セイルに向けての宇宙環境性を持つ熱融着・熱可塑性ポリイミド薄膜の開発, 第 13 回宇宙科学シンポジウム, 2013
- [9] 松本純 *et al.* : 次期ソーラー電力セイル実現に向けた諸検討, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 1C08, 2013