

2016年6月15日

ソーラー電力セイル探査機による木星トロヤ群小惑星探査計画について

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
松本純

1. はじめに

2010年に地球へ帰還した小惑星¹⁾探査実証機「はやぶさ」、その本番機であり2014年に地球を旅立った「はやぶさ2」は、日本が世界に誇る深宇宙²⁾探査ミッション³⁾である。両ミッションで培った技術を継承・発展させ、かつ新たな技術を盛り込んだ次の深宇宙探査ミッションとして、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所は、「ソーラー電力セイル探査機による木星トロヤ群小惑星探査計画」⁴⁾を検討中である。図1に、目標天体とする木星トロヤ群小惑星の、軌道⁵⁾の1例⁶⁾を示す。はやぶさ・はやぶさ2の目標天体が地球近傍に存在する小惑星(NEAs, Near Earth Asteroids)であるのに対して、本探査の目標天体は外惑星領域⁷⁾に存在する小惑星である。

木星トロヤ群小惑星は、図2に示すような、太陽及び木星と正三角形をなす位置(L4, L5)⁸⁾の近傍に存在する小惑星の総称である。この位置に存在する小惑星は多数存在するが、人類はそのいずれにも探査機を送り込んだことがない。本ミッションは、世界で初めて木星トロヤ群小惑星へ探査機を送り込み、その素顔を明らかにすることを狙っている。

¹⁾ 太陽系に存在する小さな天体。イメージは、宇宙空間に存在する「小さな岩」のうち、彗星のような尾がないもの。

²⁾ 地球から遠く離れた宇宙空間。電波法による定義は、「地球からの距離が200万km以上である宇宙」。参考：地球と月の距離は38万km。

³⁾ Mission. 宇宙工学分野で使われる用語であり、「計画全体」のことを指す。

⁴⁾ 正式名称は、「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査の実証」

⁵⁾ 天体や探査機が飛行する道筋のこと。

⁶⁾ Trojan Asteroid が目標小惑星。この軌道図には、惑星である地球(Earth)・木星(Jupiter)、はやぶさ1/はやぶさ2の目標小惑星であるイトカワ(Itokawa)、リュウグウ(Ryugu)も同時に描いてある。地球からより遠く離れた天体へ行こうとしていることを見ていただきたい。

参考：AU…天文単位。太陽-地球間を1とする距離の単位。(1AU≒149597870.7 km)

⁷⁾ 太陽系全体を考えたときに、地球よりも内側の空間を「内惑星領域」、地球よりも外側の空間を「外惑星領域」と大雑把に分けている。

⁸⁾ 太陽-木星系のラグランジュ点(Lagrange Points)の4, 5つ目である。ここは太陽重力、木星重力、物体にかかる遠心力の3力が釣り合う点であり、太陽-木星-物体の相対位置が(理想的には)正三角形に固定される。

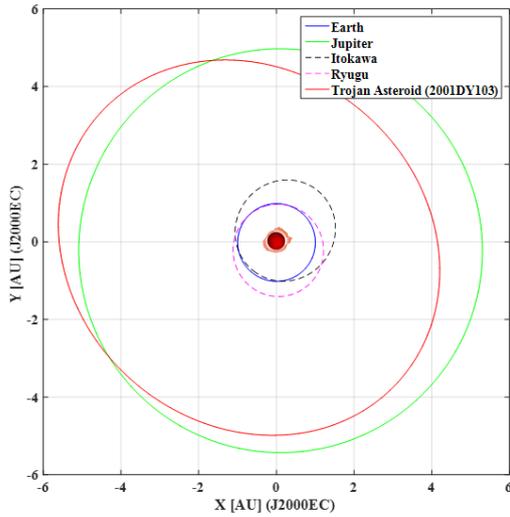


図1 目標天体の軌道図
(慣性系)

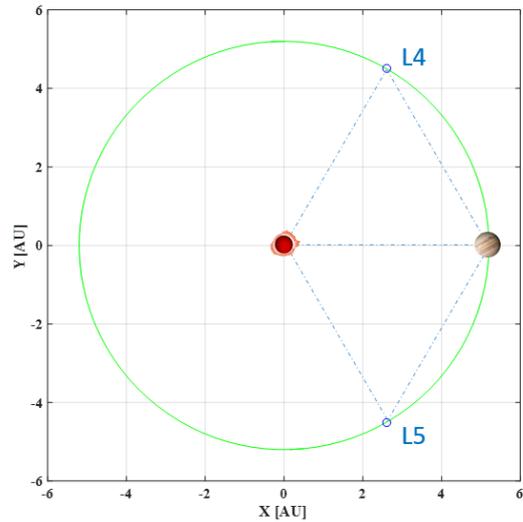


図2 木星トロヤ群小惑星の位置
(太陽-木星固定 回転座標系)



図3 はやぶさ(左) と、搭載されているイオンエンジン(右)

2. ソーラー電力セイル探査機のコセプト

はやぶさ・はやぶさ2の大きな特徴は、「イオンエンジン」と呼ばれる、燃費のよい推進機関を搭載していることである(図3)。このエンジンは、電気を使って推進剤を高速で噴出させる⁹⁾ものであり、非常に燃料効率が高い¹⁰⁾。はやぶさが大きな太陽電池パドル¹¹⁾

⁹⁾ 推進剤としてはキセノン(Xe)が使用されることが多い。Xeを陽イオン化した後、電場により加速し、探査機外へ噴出させることで推力を得る。

¹⁰⁾ 宇宙で使用されるエンジンは様々な様式がある。その燃費を統一的な指標で評価する目的で、一般に比推力(Isp, Specific Impulse)という性能指標が使われる。比推力の言葉による定義は、「1kgの推進剤を用いたとき、1kg重の推力を発生させ続けられる時間(sec)」である。いわゆる火が出るエンジン(Hot Thruster)はIsp~300sec程度、はやぶさに搭載されたイオンエンジン μ 10はIsp~3000sec程度、ソーラー電力セイル探査機で用いるイオンエンジンはIsp~6000sec程度である。この値が大きいほど燃費がよい。

¹¹⁾ 片翼あたりの大きさは4m×1.5m程度、重量は25kg程度。

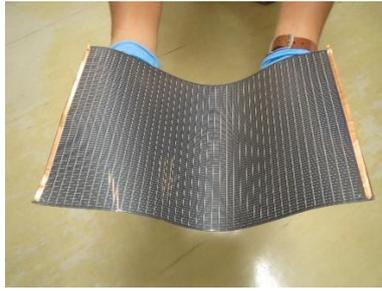


図 4 薄膜太陽電池

を持つのは、このイオンエンジンを駆動させるための電力¹²⁾を確保するためである。

本ミッションでも、このイオンエンジンを使用して推進剤を節約し、大量のペイロード¹³⁾を木星トロヤ群小惑星まで輸送することを考える。しかし本ミッションでは、(太陽からの距離が離れているため)太陽光の強度が小さい¹⁴⁾外惑星領域を飛行しなければならない。太陽光の強度が小さい領域で必要電力を確保するためには、太陽電池パドルを大きくする必要がある。「イオンエンジンの使用により推進剤を節約したい」のに「イオンエンジン駆動に必要な太陽電池パドルが非常に大きく重い」状態では、せっかくのイオンエンジンの利点を活かすことができない。

そこで、太陽電池パドルの圧倒的な軽量化を試みる。そのキモとなるのは、図 4 に示すような、薄くて軽い「薄膜太陽電池(はくまくたいようでんち)」である。この薄膜太陽電池を使用すれば、たとえ太陽電池を大きく広げたとしても、その重量はさほど大きくはならない。

以上を前提して、ソーラー電力セイル探査機は

- 薄膜太陽電池を大きく広げ、外惑星領域でも大量の電力を確保し、
- 燃費のよいイオンエンジンを駆動させ、
- 大量のペイロードを木星トロヤ群小惑星へ輸送し、よりよい科学観測をする

というコンセプトに基づき設計されている。図 5 に、本ミッションで用いるソーラー電力セイル探査機の CG を示す。薄膜太陽電池を大きく広げた様子が、「まるで海を航行するヨットの帆のようだ」という類似から、この発電システムを「電力セイル」と呼んでいる。本探査機に搭載される電力セイルの形状は、一辺約 50m の正方形である。電力セイルは、アルミ蒸着¹⁵⁾されたポリイミドフィルム¹⁶⁾をベースとし、その上に多数の薄膜太陽

¹²⁾ はやぶさの場合、イオンエンジン 1 台あたり 400W 程度の電力が必要。

¹³⁾ Payload. 宇宙工学では、「ミッション目的そのもので使用する機器」という意味で使われる。例えば小惑星観測機器。

¹⁴⁾ 太陽からの距離の 2 乗に反比例して光の強度は小さくなっていく。太陽からの距離が 1AU での光の強度を 1 とすると、3AU では 1/9, 5AU では 1/25。

¹⁵⁾ アルミで薄くコーティングしているということ。

¹⁶⁾ 人工衛星や探査機を覆っている金色の箔と同じもの。宇宙空間で晒される放射線・紫外線などに対して強い(ボロボロにならない、ということ)。

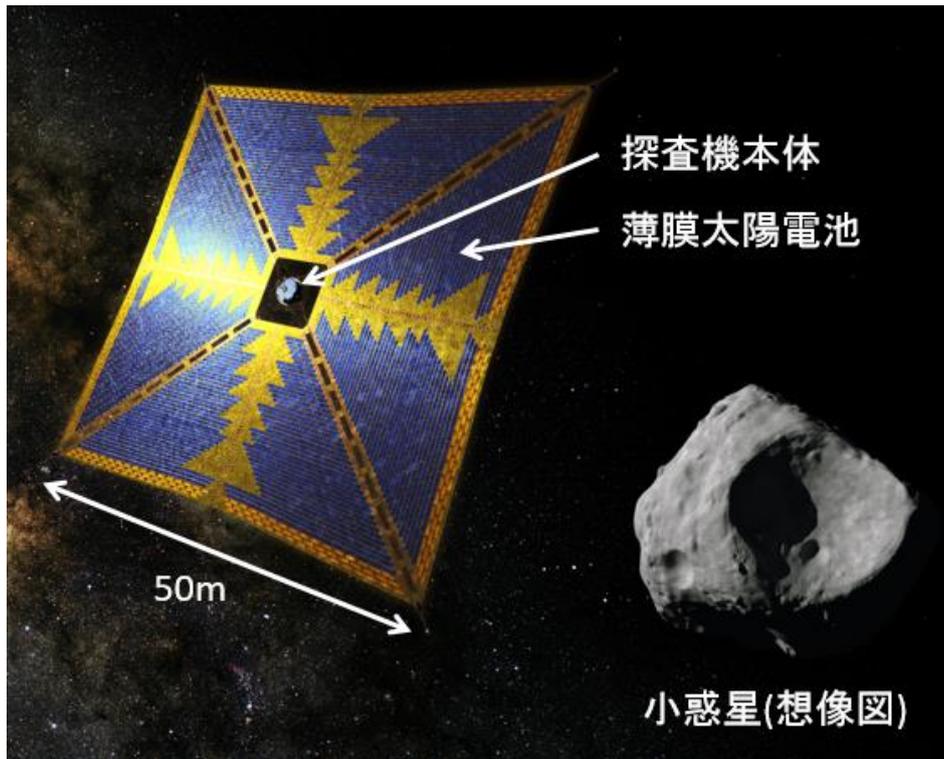


図5 ソーラー電力セイル探査機

電池が貼り付けられている。

ロケットによる打ち上げ時、電力セイルは探査機本体に巻きつけられた状態である。打ち上げ終了後、探査機本体を高速回転させ、遠心力を用いて電力セイルを展開する。木星トロヤ群小惑星への飛行中は常に探査機全体を回転させることで、支持棒(マスト)を使うことなく電力セイルの展張状態を保ち、イオンエンジン駆動に必要な電力を確保する。

3. ミッション目的

本ミッションの目的は、「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査を実証すること」である。具体的には、外惑星領域での航行技術と探査技術を実証・獲得し、「より遠く、より自在に、より高度な」宇宙探査活動を実現することである。

このソーラー電力セイル探査機は「実験機」である。すなわち

- 新たなコンセプトに基づく探査機システムが正常に機能し、
 - 制定した探査シナリオにより、外惑星領域の天体探査ができる
- ことを、実際に物を作り、実際に探査機を飛ばして、宇宙空間で大規模実験を行い、「こ

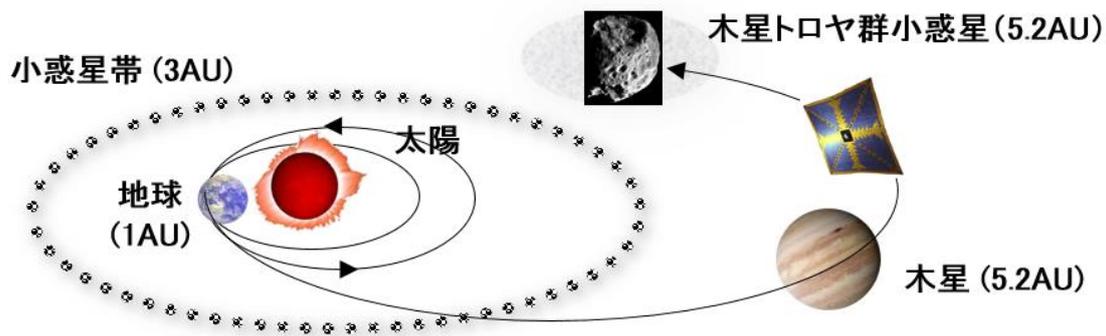


図6 木星トロヤ群小惑星までの軌道の概念図

表1 ミッションスケジュール案

日付	イベント
2020年代前半	打ち上げ
打ち上げから2年後	地球スイングバイ
打ち上げから4年後	木星スイングバイ
打ち上げから11年後	木星トロヤ群小惑星到着
～	小惑星のリモート観測 小型着陸機の着陸 小惑星のその場観測
(オプション)	サンプルリターン

の方式でできる！」ということを実証するということである¹⁷⁾。この実証の中で行われる探査を価値あるものにするために、本ミッションでは豊富な科学観測機器を準備し、十二分な科学成果を得ることを狙っている(後述)。

4. ミッションの流れ

図6に本ミッションにおける軌道の概念図を、表1にミッションスケジュール案を示す。本ミッションでは2020年代前半の打ち上げ後、地球と木星におけるスイングバイ¹⁸⁾を経て、11年後に木星トロヤ群小惑星に到着する。

¹⁷⁾ 日常生活においても、何か新しいことを行う際は、必ず練習や実験(試してみる)が必要である。例に漏れず、日本の深宇宙探査も、「実験機」と「本番機」を組み合わせることで発展してきた。直近の代表例は実験機「はやぶさ」と本番機「はやぶさ2」である。

¹⁸⁾ 深宇宙探査における探査機の軌道は、主に太陽からの重力に支配されている。その途中で惑星の直近を飛行すると、その惑星の重力を使って探査機の軌道を変更することができる。この技術をスイングバイ(もしくはフライバイ)と呼ぶ。

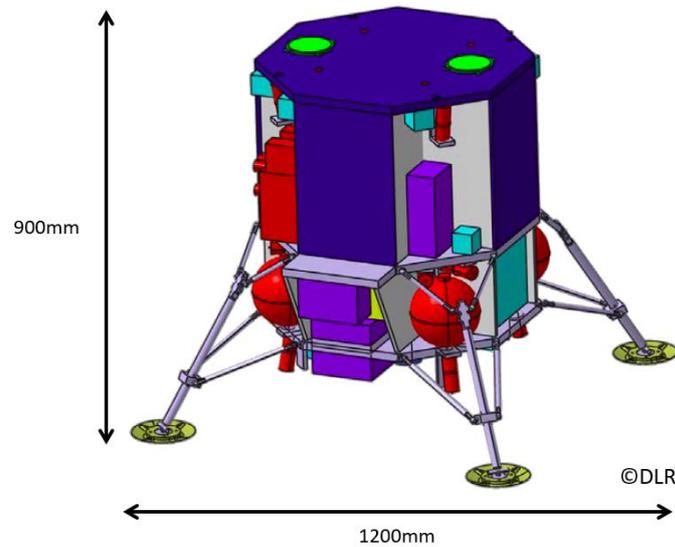


図 7 小型着陸機

イオンエンジンを駆動させるのは、(1) 打ち上げから地球スイングバイまでの期間¹⁹⁾と、(2) 木星スイングバイから木星トロヤ群小惑星到着までの期間である。電力セイルの真価が発揮されるのは、太陽からの距離が離れている(2)の期間である。

木星トロヤ群小惑星到着後、リモートセンシング²⁰⁾による小惑星観測を開始する。その後、図 7 に示す小型着陸機を小惑星へ着陸させ²¹⁾、その場観測²²⁾及び小惑星サンプルのその場分析を行う。(なお、オプションとして、採取したサンプルを地球へ持ち帰るサンプルリターンも検討中である。)

5. 狙う科学成果

主だったものを述べる。

(1) 新たな探査機システムの実証・航行技術の獲得 [工学]

新たなコンセプトに基づく探査機システムを使って、外惑星領域を飛行できることを実証する。また、そのための航行技術を獲得する。

¹⁹⁾ EDVEGA: Electric Delta-V Earth Gravity Assist を行う。イオンエンジンを使用し、地球スイングバイでの軌道変換効率を上げる技法であり、はやぶさミッションで初めて使用された。

²⁰⁾ 観測対象から離れた位置から遠隔で計測を行うこと。代表例は光学カメラによる撮影。

²¹⁾ はやぶさ・はやぶさ 2 とは違い、ソーラー電力セイル探査機は巨大な電力セイルを持つため、直接小惑星へ着陸することができない。そのため、100kg 程度の小型着陸機を搭載している。この小型着陸機を小惑星まで輸送できるのは、イオンエンジンを用いることで、推進剤重量を削減したからである。(なお、この小型着陸機はドイツ航空宇宙センター(DLR)と共同で研究開発を進めている。)

²²⁾ 観測対象に近い位置で計測を行うこと。代表例は磁力計による磁場計測。

(2) 探査シナリオの実証 [工学・理学]

本ミッションでは、豊富な科学観測装置を搭載する小型着陸機を着陸させ[工学]、木星トロヤ群小惑星のその場観測を行う[理学] 探査シナリオを採用している。

この小型着陸機に搭載する「サンプル採取装置 及び 分析装置(高性能質量分析器²³⁾)」により行う「木星トロヤ群小惑星サンプルのその場分析」は、本探査シナリオの中核をなす重要計測である。本ミッションで用いるサンプル採取装置は、小惑星の表面を最大 1m 掘削することで、風化していない地下サンプルを採取する新規開発機器である。このサンプル採取装置で採取したサンプルを高性能質量分析器にかけることで、小惑星の成分を詳細に解析する。この結果と、今までに人類が得てきた各天体のデータを比較することで、木星トロヤ群小惑星がいったい何者なのかを突き止める²⁴⁾。

(3) クルージング²⁵⁾観測 [理学]

本ミッションは、打ち上げから小惑星到着までに年月を要する。特に、地球スイングバイから木星スイングバイの間(太陽からの距離が大きく変化する期間)に、

- ・赤外線望遠鏡：赤外線背景放射の観測²⁶⁾
- ・ガンマ線バースト検出器：天体現象であるガンマ線バーストの検出、計測²⁷⁾
- ・ダスト検出器：宇宙空間のダスト(塵)部分の検出、計測
- ・磁力計：宇宙空間の磁場計測

などを用いた各種科学観測を行う。

6. 本計画の状況について

本ソーラー電力セイル計画は、2001 年度の検討チーム発足以来、多くの JAXA 職員、大学や研究機関の専門家、学生らが、その実現に向けて研究開発を積み重ねてきた。その検討の中には、

²³⁾ 物質の原子量・分子量を計測する装置。

²⁴⁾ それを通じて、太陽系形成論に制約を与える。現在、太陽系形成時のモデルとして、「木星以遠の惑星はその場で形成された」モデル(In-Situ Model)と、「木星以遠の惑星は太陽近傍で形成され、その後現在の位置に移動した」モデル(Nice Model)の 2 種が提案されている。トロヤ群小惑星の成分を分析し、その成分が「いわゆる小惑星に近い(In-Situ Model を支持)」か「いわゆる彗星に近い(Nice Model を支持)」かを決定することで、どちらのモデルがより確からしいかを判断することができる。

²⁵⁾ 打ち上げ後から、小惑星に到着するまでの飛行期間のこと。

²⁶⁾ 参考：https://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html

²⁷⁾ 参考：<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/gap/>

2004年：観測ロケットによる電力セイル展開実験

2010年：小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」による軌道上実証²⁸⁾

などの各種フライト実験が含まれる。その長年に渡る数多くの検討の集大成として、本ミッションは、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 公募中型計画の2つの候補のうちの1つとして選定されている。

²⁸⁾ 詳細は ISAS ニュース No.420 別冊 (2016年3月号別冊) 「IKAROS からソーラー電力セイル探査機へ」を参照。

<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/backnumber/2016/ISASnews420ex.pdf>