

第27回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要説明書

1. 作品情報・応募者情報

作品名（20文字以内） 太陽極域観測衛星（タイヨウキョクイキカンソクエイセイ）
副題（自由記入）
学校名 防衛大学校

2. ミッションの概要（プレスリリース等で使用するもので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。）

<p>この探査機は太陽の極域及び太陽周辺空間を極周回軌道から観測する。1AUの軌道傾斜角15°の太陽周回軌道に打ち上げたのち、イオンエンジンを利用して黄道面を脱出し極周回軌道へ遷移する。6年間かけて軌道傾斜角を約60°の観測軌道へ到達し、コロナグラフ・マグネトグラフ・EUVイメージャーを使用する。打ち上げから観測までの使用する電力はすべてCIGS太陽電池を利用した発電で賄う。</p>

3. ミッションの目的と意義（目的・重要性・技術的／社会的意義等）

<p>(a) 目的</p> <p>本ミッションの目的は、太陽の極域を観測することである。具体的には以下の観測を行う。現在のほとんどの太陽観測は地球近傍からの観測に限られていることから、これまでほとんど観測ができていなかった地球から見て太陽の裏側で起きている現象を観測する。次に太陽フレアについて、黄道面からの観測では難しかった、太陽光球からの背景放射の影響を受けないリムフレアの観測を行う。さらに、太陽の極性の入れ替わりは、太陽活動極大期に太陽の極地方で発生していることが知られているが、太陽の極磁場を地球から観測するのは困難である。よってこの過程を観測する。さらに、地球へ向かうCME (Coronal Mass Ejection) の観測を地球から行っても、その速度等の重要な物理量が正確に得られない。これを太陽の高緯度から見下ろす、もしくは見上げることによって正確な物理量を得ることができる。</p>
<p>(b) 重要性・技術的、社会的意義等</p> <p>これらの観測によって以下のことが可能になると考えられる。黄道面からのリムフレア観測を行うことで、フレアの3次元構造とその時間発展が解明できる。リムフレアを数多</p>

くの観測することにより、フレアの発生機構を解明するデータが取得できると考えられる。次に、太陽の磁場反転については原因がわかっていない。磁場反転は極域で発生しているため、極磁場とその時間変動を観測することは、磁場反転の原因を探ることにつながる。また、宇宙天気に影響がある地球に向かう CME は地球からは視線方向の広がりや速度を持っており観測が難しい。それを、太陽高緯度にある探査機より地球に向かう CME の上下から観測することにより、より詳しい CME の 3 次元分布と速度を得られることになるため、宇宙天気状況を正しく見積もることができるようになる。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

本ミッションでは黄道面脱出のために大きな ΔV を必要とする。そこでエンジンとしては効率の良いイオンエンジン 8 基を使用する。推力が小さいため、長時間の加速によって軌道を変えていく。搭載する観測機器はマグネトグラフ・コロナグラフ・EUV イメージャーの 3 つである。これら観測機器は順番に「SDO/HMI」・「SoHO/LASCO」・「STELEO」に搭載されているものを参考にした。本探査機はロケットにより黄道面からの軌道傾斜角度 15° 、1AU の軌道に打ち上げる。ここから 6 年間かけてイオンエンジンにより軌道傾斜角約 60° まで遷移する。遷移する間も太陽の観測を行い、既存の活動データの補助を行う。本探査機のイメージを図 1 に、軌道の概要を図 2 に示す。

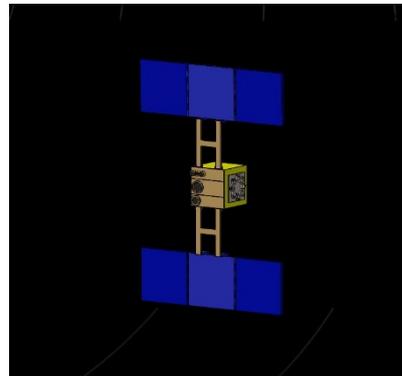
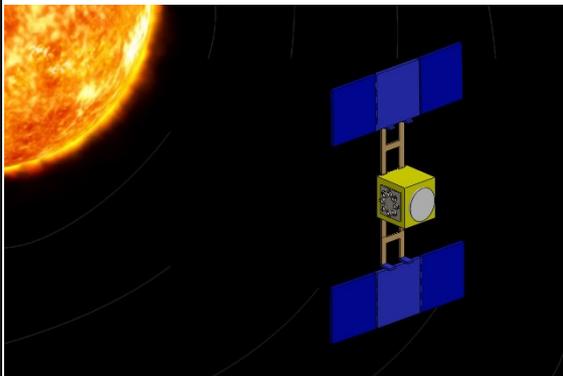


図 1 本探査機のイメージ (表と裏)

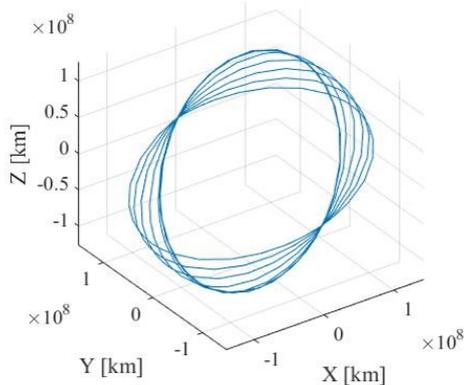


図2 探査機がとる軌道

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

本ミッションの実現には、高出力・高効率のイオンエンジンが必要であり、これを稼働させるために大量の電力が必要になる。よってイオンエンジンは「オケアノス」のものを利用し、必要な電力は、CIGS 太陽電池を使用し確保する。

問題は長期間（11年以上が望ましい）の任務にエンジンや観測機器が耐えられるかどうかである。観測機器は開発されているものをベースとしているため、現在の技術による能力の向上（空間解像度等）を目的とした開発が必要である。

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

太陽の極域を黄道面脱出し観測した観測機はユリシーズのみである。このことだけでも十分に独創性がある。特にユリシーズと違うのは、ユリシーズでは木製スイングバイにより黄道面脱出を行ったため軌道周期が長く、太陽近傍を通過する頻度が少ないため、観測周期が不足している。また、ユリシーズは太陽風の観測であり磁場の観測は行っていないほか、太陽の極域の磁場を見下ろす形で観測することは初めてである。同様に、CMEを地球からの視線方向以外で観測することが可能となり、CMEの具体的な様子の観測を大いに助けることができる。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

コロナの活動予測の精度が上がれば宇宙天気予報の精度がより上がる。コロナによって地球の重要インフラが大きな影響を受けることが知られているが、この宇宙天気予報の精度向上によってインフラ事業者は事前に被害を抑えることが可能となる。また、宇宙物理学的には、この観測結果より太陽の活動についての理解を深めることができる。

以上

ミッション解析書：太陽極域観測衛星

防衛大学校 航空宇宙工学科

カサイナミト 伊チカワユイコ カワゴエヘルヒコ ヤマダレイ
笠井南十 市川結子 川越晴彦 山田 濤

1. ミッションの目的

本ミッションの目的は、未だ誰も観測したことの無い太陽の極域を観測することである。

太陽は宇宙の中でも一般的な星であり、地球から一番近くにあるために、恒星で起こっている事象を詳細に観測できる唯一の星である。しかし、ほとんどの太陽観測は地球近傍からの観測に限られており、地球から見て太陽の裏側で起こっている事を知ることができない。太陽は約 27 日周期で自転しているため、約 1 ヶ月で太陽の全面を観測することはできる。しかし、主に太陽フレアなどの太陽で起こっている多くの現象のタイムスケールは数分から数時間と短いため、やはり地球から見て太陽の裏側で起こっている現象は、裏側が地球から見えるようになった 2 週間後には確認することができない。

またフレアについて、ほとんどのフレアは低緯度から中緯度の太陽表面に現れるため、地球から観測すると太陽からの放射が背景となる。太陽フレア発生の根源である磁気リコネクション現象は、太陽コロナ中で発生しているが、この磁気リコネクション領域は暗く、観測しにくい。太陽フレアの発生機構を解明するためには、太陽光球からの背景放射の影響を受けないリムフレアを観測する必要がある。

さらに、太陽の極域は観測の難しい領域である。太陽は約 11 年の周期で北極と南極

の極性が入れ替わっている。この極性を入れ替わりは、太陽活動極大期に太陽の極地方で発生していることが知られているが、太陽の極磁場を地球から観測するのは困難である。この理由はまず、太陽の極は地球からみると奥行き方向が縮退して見えるために、空間的な広がりがわからないことにある。また、視線方向磁場しか測定できないために、極域面に垂直な磁場成分の観測ができない。したがって、太陽の極地方がどのような磁場分布になっているのかを同定することは大変困難である。

太陽の活動のうち地球近傍に大きな影響を与える現象の 1 つにコロナ質量放出 (CME : *Coronal mass ejection*) がある。CME は主に太陽フレアに伴って太陽大気のプラズマが惑星間空間に噴出する現象であるが、この CME が地球磁気圏に当たると、磁気嵐などが発生し、地上でも通信障害などのインフラの障害が発生することがある。この地球へ向かってくる CME の観測を地球から行っても、その速度等の重要な物理量が正確に得られないため、現在はシミュレーションなどのモデル計算が代用されているが、そのモデル精度にも疑問が残る。

以上のことを解決するために、我々は OKEANOS ミッションで検討が進んでいるイオンエンジンを組み合わせたシステムを利用し、黄道面を脱出、高緯度から太陽の極域を観測する探査機を提案する。

2. ミッション要求

本ミッションでは太陽の極域を観測するために、黄道面から 60 度近くの傾いた軌道に探査機を送ることとする。また、1 年に 1 度は極域を観測するという観測の頻度の要求から、太陽からの距離は 1AU 以下とする。そして、1AU 以内で黄道面からの軌道傾斜角を 60 度まで変えつつ、太陽表面磁場、紫外線放射、そして CME の観測を目指す。

3. 本探査機の概要

本探査機は要求を満たすために、以下のような探査機とした。探査機のイメージを図 1 に示す。

- 打上ロケットにより黄道面から初期傾斜角 15 度に投入したのち、探査機自身により数年程度で傾斜角度 60 度へ軌道の変遷。
- 黄道面からの軌道傾斜角を変更するための推進力としてイオンエンジンを利用。
- 搭載機器としてマグネトグラフ、EUV イメージャー、コロナグラフを搭載。それぞれの空間分解能の向上。

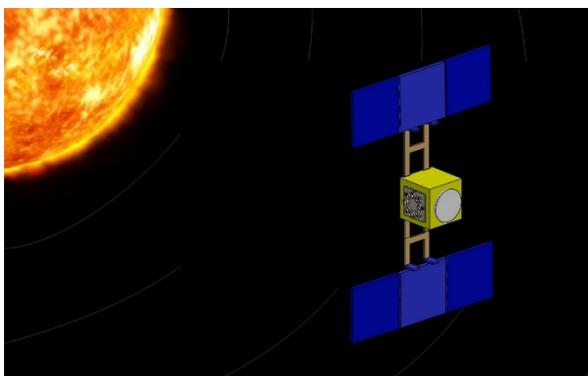


図 1 本探査機のイメージ画像

4. 期待される成果

本ミッションでは次の三項目を観測する。一つ目は紫外線によるリムフレアの観測、二つ目は太陽磁場の観測、三つめは可視光による CME の観測である。これらすべてを、太陽の高緯度から観測する。これらの観測により太陽の現象について新しい見地が得られると期待される。観測の詳細を以下に述べる。

1 点目はリムフレアの観測である。フレアは緯度が 30~50° 辺りの比較的 low 緯度で発生する。現在でもリムフレアの観測は行われているが、黒点が太陽のリムに来たときにフレアが起こるとは限らないし、ほとんどの黄道面内からの観測では背景となる太陽面が邪魔となり、フレアを明瞭に観測することが難しい。これを高緯度から観測した場合、衛星が太陽の北極側にいるときには北半球、衛星が南極側にいるときには南半球で発生する全てのフレアがリムフレアとして観測できる。また、同時に黄道面からのリムフレア観測を行えば、フレアの 3 次元構造とその時間発展が解明できる。このようにリムフレアを数多くの観測することにより、フレアの発生機構を解明するデータが取得できると考えられる。

2 点目は太陽の極領域の磁場を観測することである。ミッションの目的で述べた通り、約 11 年ごとに起こっている太陽の磁場反転については原因がわかっていない。磁場反転は極域で発生しているため、極磁場とその時間変動を観測することは、磁場反転の原因を探ることにつながる。「ひので」は地球周回軌道から極磁場を観測してきたが、この結果が改めて極域からの観測の必

要性を確認することとなった[1]。磁場は視線方向のみ観測が可能であるため、本衛星による観測と黄道面からの観測を同時に用いることで、太陽の全方向の磁場が得られ、3次元的な磁場構造を解明することが期待される。

3点目はCMEの奥行き方向の広がり観測である。CMEの観測は現在でもSOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 衛星に搭載されているLASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph experiment) がL1ポイントで行っている。また、STEREOは2機の衛星を時計・反時計まわりで黄道面を周回させることによってCMEを立体的にとらえるという試みを行った[2]。しかしこれらの観測は、視線垂直方向のCMEの広がりについては観測が容易であるが、視線奥行き方向の分布はその限りではない。地球に向かい、宇宙天気に影響があるCMEはLASCOにとって視線方向の広がり速度を持っているため、現在の観測装置の情報だけでは、地球への到達時間さえ見積もることが難しい。これを真上から観測できる本衛星に搭載した観測機器を用いることにより、より詳しいCMEの3次元分布と速度を得られることになるため、宇宙天気状況を正しく見積もることができるようになる。

5. ミッションの構成

5.1. ミッション機器

目的達成のために、以下の3つの観測機器を搭載する。

5.1.1. マグネトグラフ

太陽面上の磁場構造を観測するために開発された装置である。磁場を求めるにはゼ

ーマン効果を用いるのが一般的で、その原理は回転波長板と偏光装置を用いて偏光の4成分を求め、ベクトル磁場を算出する。視線方向磁場に対象を絞れば円偏光を検出することで磁極をもとめる観測が可能になる。波長板を回転させることなしに、片方の円偏光を調べるだけで、磁極まで含めた磁場を検出できることがわかる。つまり、幅の広がりが磁場の強さに関係することや偏光の度合いなどを測定することによって磁場構造を示す2次元図(マグネトグラム)を得ることができる。本探査機では「SDO (Solar Dynamics Observatory)」のHMI (Helioseismic and Magnetic Imagerと同様の機器を搭載する[3]。

また、太陽表面の観測が重要であるため、搭載機器の空間分解能は0.1~0.5秒角が要求される[4]。よって本衛星に搭載するのはこの空間分解能を満たすものとする。

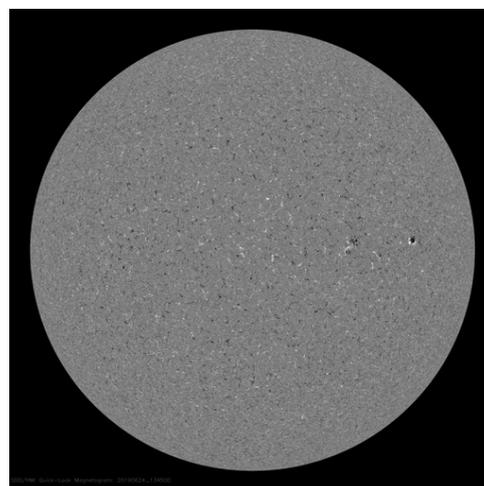


図2 HMIによる観測画像[5]

5.1.2. EUV イメージャー (Extreme Ultra Violet Imager)

本衛星ではSTEREO衛星のEUVイメージャーと同様の観測機器を搭載する。

171 °A、195 °A、284 °A、304 °A の 4 種類の極端紫外線で太陽全体を撮影する。EUV イメージャーの画像の輝度の時間変動を解析する事で、太陽フレア（磁気リコネクション）発生前後の極紫外線のフラックスの違いを議論することができる。[6]

太陽の表面からその周囲を観測するためマグネトグラフ同様の空間分解能が要求される。

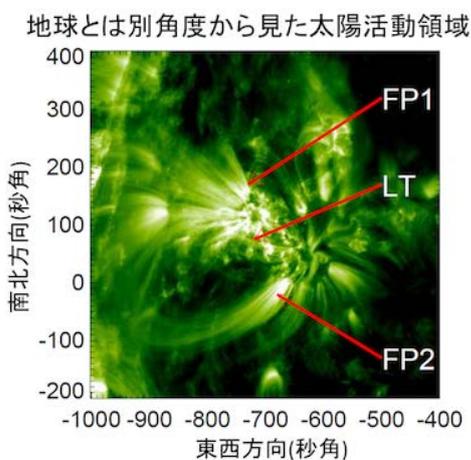


図 3 STEREO で観測された極端紫外線の画像 [7]

5. 1. 3. コロナグラフ

SOHO/LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) と同様の観測機器により太陽の極方向より CME の観測を行う。CME は、太陽の複雑な磁場の活動によって莫大な荷電粒子やエネルギーが放出される現象である。CME を撮影する際、CME の発光量はとても弱いため、太陽自体の光が観測の障害となる。そのため、遮光円盤で人工的な日食状態を作って、撮影する [8]。

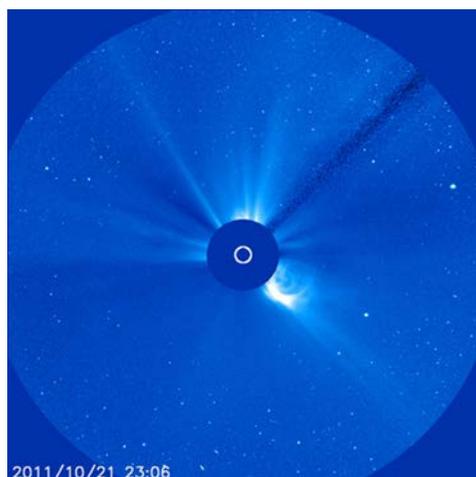


図 4 SOHO/LASCO の AIA193 カメラによる太陽コロナの様子 [8]

5. 2. 軌道

目標とする観測軌道は、半径が約 1 AU、黄道面からの傾斜角約 60° の太陽公転軌道である。打ち上げ時にロケットにより 15° の傾斜角を与え公転軌道に乗せる。その後、6 年間かけて観測軌道へもっていく。この軌道を選んだ理由は、イオンエンジンから得られる加速度と、太陽からの距離によって変化する傾斜角をつけるのに必要な加速度を比較した結果より導き出された。

下の図 5 は、導き出す工程の初期に加速度を計算したグラフである。まず OKEANOS ミッションで搭載予定の物と同様のイオンエンジン 6 基で得られる加速度と、目的の傾斜角度を達成するのに必要な加速度を比較した。試算では 6 基で十分な加速度を得られず、搭載するイオンエンジンの数を増やさなければならなかった。そこでイオンエンジンを 8 基に増量し再度シミュレーションした結果、6 年で約 60° に達することが分かった (図 6)。この時点で要求である「軌道傾斜角 60° での観測」をほぼ満たすことになった。さらに 8 年間かけることで

約 80° まで傾斜角をつけることが可能であった。より極域の観測を容易にするために軌道傾斜角 80° まで探査機を送ることが理想であるが、観測機器の高い空間分解能によってこれを補う。得られた軌道の概要を図 7 に示す。この図では X-Y 面が黄道面に相当しており、軌道傾斜角 15° から徐々に軌道傾斜角を増大させ、高緯度での観測を可能とする。

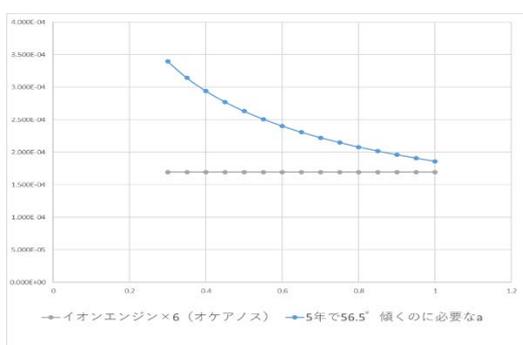


図 5 必要加速度の比較

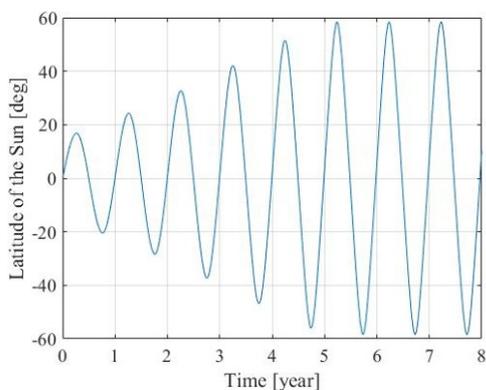


図 6 イオンエンジン 8 基で遷移した場合の太陽から見た探査機の位置 (緯度)

なおイオンエンジンを使用している間は、振動等によって観測機器が使用できないことが予想できる。よって、太陽を頂点とし、黄道面と衛星のなす角度が 40° を超えたときにイオンエンジンの使用を中断し、観測

を行う期間とした。その期間を図 7 の赤丸で示した。これによって観測開始可能時期は打ち上げからおよそ 3.2 年目になった。

また、1 AU より短い半径を持った軌道でもこの傾斜角をつける軌道変更は可能であった。しかしながら 1AU 以内に投入するためには相応の時間が必要となる。その間は本探査機の特徴である高緯度からの観測を行うことができない。よって、金星スイングバイなど行うなどの内惑星の公転軌道の使用は観測期間の減少を招いてしまう。

また、1AU 以上の距離では太陽を 1 周するのに 1 年以上要することになる。これは観測頻度の要求を満たさない。これらより我々は上記の軌道を選択した。

イオンエンジンを太陽中心と探査機を結ぶベクトルと、軌道速度ベクトルに直交する方向に噴射し続けることで加速度を得る。半年に一回、内蔵したリアクションホイールを利用しイオンエンジンの噴射方向を入れ替えることで途切れることなく加速度を得ることができる。

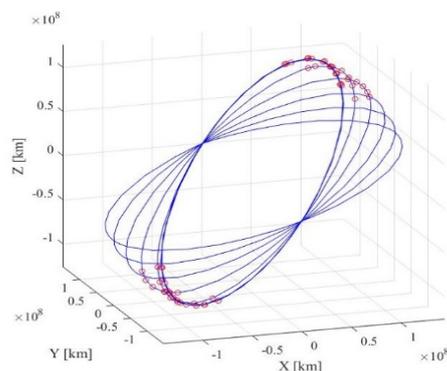


図 7 探査機がとる軌道

5.3. 電源系

電力の供給源は検討が進められている「CIGS 太陽電池」を利用することとする[9]。

この太陽電池は OKEANO (最大で 5.2AU の軌道)での利用可計画されており[10]、本探査機 (1AU を周回) では OKEANOS を参考に設計を行った。このときの OKEANOS の電力要求は 3.2kW であり、どちらの探査機もイオンエンジンが最大の電力消費機器であるため、1AU おいて、同様の発電量の確保を CIGS 太陽電池で行うこととした。この太陽電池の現状の発電能力は 0.7kW/kg であるため、約 6kg の質量となる。また、この余剰電力を持って通信や観測等の各種作業を行う。

5.4. 推進系

推進系は OKEANOS と同様のイオンエンジンを使用する。OKEANOS のイオンエンジンは比推力が最大で約 7000 s であり、性能は非常に高いといえる[11]。これは、はやぶさ、又は、はやぶさ 2 の比推力の約 2 倍である。それに伴って、電力消費量が大きくいなる。項目 5.2 で述べたように必要推力の要件からイオンエンジンの搭載数を 8 基とした。ここでヒドラジンを利用したエンジンも考慮したが、必要な推進剤を、比推力、予想される本体質量、必要な推力から計算したところ、膨大な燃料が必要であり不適切と判断した。

表 1 エンジン性能と必要質量の比較

	イオンエンジン	ヒドラジンエンジン
比推力 (s)	5936[11]	315.5
本体質量 (kg)	462.1	332.1
推進剤質量 (kg)	308.9	5,060,564.5



図 8 マイクロ波イオンエンジン[12]

5.5. ロケットと質量

軌道に投入するロケットは H2-A とする。本探査機は「Solar Polar Orbiter」を参考に検討し[13]、イオンエンジン以外のバス部質量をこの論文を基に算出し、合計 1000 kg となるように本衛星を設計した。その内訳は、イオンエンジンは約 150 kg、推進剤は約 500 kg、観測機器・通信系・本体を約 350 kg とした[14-17]。

6. 運用手順とその時期

i. 打ち上げ直後

H2-A によって黄道面から 15° の傾斜角度を持ち太陽を中心とする半径 1AU の公転軌道に投入する。投入時期を太陽の活動周期 11 年の間の極大もしくは極少期とする。現在の活動周期サイクル 24 の極小期は 2020 年ごろと予測されている。次の極大期は 2023~2026 とされているが[18]、これに間に合わせることは厳しいと考えられるため、11 年後の 2034~2037 年(サイクル 26)を目途に打ち上げ準備を行う。

ii. 観測軌道への移動間

展開後、イオンエンジンを使用し少しずつ傾斜角度を大きくしていく。観測軌道へ太陽極大期に向け 6 年間かけて遷移していくことになる。ただし、図 7 に示したように、4 年後から観測可能であるため、極小期へ

の移行が前後したとしても対処が可能になっている。また移動間であっても、観測機器を使用し可能な限り太陽観測を行うことで、地球から観測できない太陽の裏側の活動状況も観測する。6年かけることで、次の極小期に向けて変遷していく太陽の活動を極域から観測できる。

iii. 観測期間

観測軌道に到達後、イオンエンジンを停止し観測を続行する。

7. 独創性と社会的効果

太陽の極域を黄道面脱出し観測した観測機はユリシーズのみである。さらにユリシーズは太陽風の観測をしており[19]、太陽磁場に関しては未だに同様の軌道からは行われていない。本観測機は現在行われていない観測を埋めるものであり、太陽の新たな姿を観測することで恒星の理解を深め宇宙科学の進展に資することができる。

また、太陽の活動原理について調査し理解を深めることで太陽フレアやCMEについての活動予測を可能にする。これによって宇宙天気予報の精度を上げることができる。宇宙天気予報の精度が高くなれば、運用中の人工衛星やISS、地上の電子機器への太陽活動による影響を未然に防ぎ最小化することが可能となる。

8. まとめ

この探査機は、誰も観測していなかった太陽の極域を観測することで様々な科学的進歩をもたらすことを期待できる。本探査機での観測結果は、恒星の活動原理の理解、太陽活動の予想精度向上による宇宙天気予報の確立に寄与する。

参考資料

[1] 科学衛星「ひので」
<https://hinode.nao.ac.jp/> (2019/6/27 閲覧)

[2] STEREO | NASA
https://www.nasa.gov/mission_pages/sterео/main/index.html (2019/6/27 閲覧)

[3] 中村 佳昭 信州大学審査学位論文 高エネルギー宇宙線の太陽の影と太陽磁場の研究

[4] 次世代太陽観測衛星 - 科学衛星「ひので」 -
https://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/SOLAR-C/Documents/Solar-C_J.pdf

[5] SDO | Solar Dynamics Observatory
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/> (2019/6/27 閲覧)

[6] 岡本 幸平 スーパーカミオカンデにおける太陽フレア由来のニュートリノ探索

[7] Kazumasa Iwai et al. Coronal magnetic field and the plasma beta determined from radio and multiple satellite observations, *Earth, Planets and Space*, 66-149, pp. 1-10, 2014

[8] SOHO SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY
<https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/c3/512/> (2019/6/27 閲覧)

[9] 高浦直己 et al. SSPS 運用に向けた新規薄膜太陽電池を用いた大規模発電システムに関する研究報告, *宇宙太陽発電*, Vol. 1 (2016), pp. 31-38

[10] 松本純 et al. ソーラー電力セイル探査機における大型セイルの膜面製作状況, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集,

1C06, 2016

[11] Osamu Mori et al. System Designing of Solar Power Sail-craft for Jupiter Trojan Asteroid Exploration , trans. JSASS Aerospace Tech. Japan Vol. 16, No. 4, pp. 328-333, 2018

[12] 宇宙航空研究開発機構 電気推進研究室

<http://stage.tksc.jaxa.jp/wp-eplab/>
(2019/6/27 閲覧)

[13] M. Macdonald and, G. W. Hughes, Solar Polar Orbiter: A Solar Sail Technology Reference Study, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 43, No. 5, 2006.

[14] 森治 et al. ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査

[15] Helioseismic & Magnetic Imager Solar Dynamics Observatory
http://hmi.stanford.edu/Description/HMI_Overview.pdf

[16] 観測装置とデータレート - 科学衛星「ひので」 - 国立天文台
https://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/SOLAR-C/Meeting/SCSDM2010_dom/Hara_PlanA_part2.pdf

[17] Samuel Tun, Description of the LASCO instrument aboard SOHO , CiteSeerX

[18] Solar Cycle 25 Predicted to be Similar to Cycle 24 ,
<http://www.arrl.org/news/solar-cycle-25-predicted-to-be-similar-to-cycle-24>

(2019/6/27 閲覧)

[19] Ulysses - ESA Science & Technology
<http://sci.esa.int/ulysses/>

(2019/6/27 閲覧)