第３３回衛星設計コンテスト

ジュニア概要書（3 ページ以内）

応募区分　　ジュニアの部

１．作品情報・応募者情報

作品名（２０文字以内）＊作品内容が推測しやすいような名称を付けてください。（略称は不可） 深宇宙分散探査超小型実証機『キュベレー』
副題（自由記入） 母船『キュベレー』と小型探査プローブ群による再利用型輸送機を用いた木星トロヤ群小惑星の高精度マルチポイント探査ミッション
学校名 麻布高等学校

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

本ミッション『キュベレー』は、超小型衛星による低コスト・高頻度な深宇宙探査を可能にする革新的なアーキテクチャを工学実証し、太陽系初期の謎を秘める木星トロヤ群小惑星の起源解明に挑戦する。ソーラー電力セイルと電気推進のハイブリッド推進で木星圏へ自動航行する母機を拠点とし、自律的な往還が可能な再利用型輸送機が複数の探査子機を各々小惑星へ送り届け、未開拓の 1～5km 級天体を精密フライバイ・近接観測データを取得する。

３．目的と意義（目的・重要性・技術的意義等）

(a)目的

本ミッション『キュベレー』の主目的は、全く新しい深宇宙探査システムを構成する、以下の二つの基幹技術を工学的に実証することにある。

- **超小型衛星による外惑星領域への高効率航行技術**： ソーラー電力セイルと電気推進を組み合わせたハイブリッド推進の有効性を、木星圏までの実際の長期航行で証明し、その技術を確立する。
- **再利用型輸送機（デプロイヤー）による高精度マルチポイント探査技術**： 母船を拠点に自律的な往還飛行と再ドッキングが可能な輸送機が、探査子機を個々の目標天体へ高精度に送り届ける、一連の精密デリバリーシステムを開発・運用する。

上記工学実証の格好の舞台として、副次目的となる木星トロヤ群小惑星の科学探査を実施する。これまで人類が近接探査を行ったことのない直径 1～5km の小規模な天体を 4 つ目標とし、4 機の 6U 級探査子機による精密フライバイ観測を世界で初めて実行する。これにより、個々の小惑星の形状、表面状態、組成といった基礎的物理特性を捉え、その起源と多様性の解明に不可欠な初期データを提供する。

(b)重要性・技術的意義等

木星トロヤ群小惑星の探査は、太陽系初期の情報を保存した始原的天体と考えられており、その探査は惑星形成論に新たな知見をもたらす上で高い科学的重要性を持つ。これは、大型小惑星群を探査する NASA の Lucy ミッション[i]を直接的に補完し、天体進化のサイズスケール依存性を解明するためには、不可欠な探査対象である。

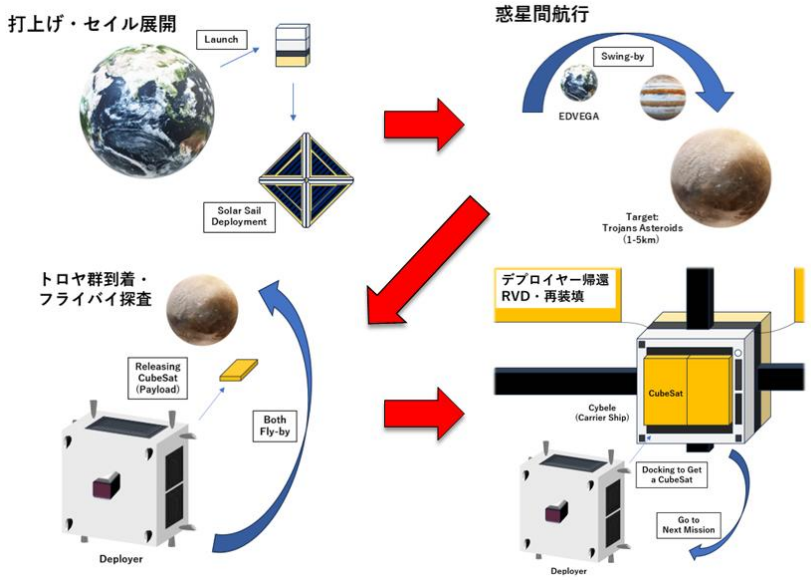
現在の宇宙開発が求める、挑戦的かつ多様な深宇宙探査を低コスト・短期間で実現するという課題に対し、本提案では超小型衛星を用いた解決策を提示する。ソーラー電力セイルと電気推進を組み合わせたハイブリッド推進は、これまで困難であった超小型衛星による外惑星領域への航行を可能にし、その活動範囲を飛躍的に拡大させる。加えて、本システムの核となるのが、自律ランデブー・ドッキング能力を持つ「再利用型輸送機」による高精度な子機デリバリー技術である。この手法は、単一の大型探査機では非効率であった複数小天体の系統的な調査を可能にし、ミッション全体のリスク分散においても大きな利点を有する。これらの技術要素の統合的な実証は、これまで日本が培ってきた多くの先進技術がベースとなっており、日本の宇宙開発が持つ独自の強みとなりうるものである。

４．アイデアの概要

【ミッションシーケンス】

本ミッション『キュベレー』は、以下の主要フェーズを経て実行される。

1. **打ち上げ・初期運用**：統合された一つの超小型衛星として打ち上げられ、健全性を確認。
2. **惑星間航行**：ソーラー電力セイルと電気推進のハイブリッド航法による SDVEGA を活用し、木星トロヤ群小惑星の分布領域へ到達。
3. **周遊探査と目標接近**：トロヤ群領域を巡る「周遊軌道」に入り、光学航法を用いて第一目標小惑星の探査エリアへと接近。
4. **第一回探査**：デプロイヤーに 1 機目の 6U 子機を装填し、出発。目標小惑星へのフライバイ軌道で子機を精密放出し、観測データを中継。自身も小惑星をフライバイした後、化学推進を用いて周遊中の母機へ帰還・ドッキングする。
5. **追加探査**：再びデプロイヤーに次の子機を装填し、第二目標小惑星以降の探査を行う。デプロイヤーは 4 機目の子機放出後、これが最後の任務のため母船には帰還しない。
6. **ミッション終了**：全ての科学データのダウンリンク完了をもって、計画運用を終了。



【宇宙機システム構成概要】

『キュベレー』のシステム構成を図 1（ソーラー電力セイル展開後を図 2）に示す。本機は、将来的な汎用性と拡張性を最大化するため、機能を完全に分離した 3 つのモジュール（A:バス、B:装填部、C:デプロイヤー）を直線に結合して構成される、合計質量 120kg の超小型衛星である。

主要諸元表

項目	A: 基本バス部	B: 子機装填部	C: デプロイヤー(輸送機)
目標寸法 (cm)	50 × 50 × 35	50 × 50 × 20	50 × 50 × 25
目標質量 (kg)	38.0 + 10.0 (キセノン) kg	10.0 ＋ 28.0 (子機分) kg	34.0 kg(Wet)
構体系	アルミハニカムパネル主構造	CFRP 製トラス構造	軽量トラス構造
推進系	ソーラー電力セイル (120m²)、μ10 エンジン×1	N/A	一液式ヒドラジン主エンジン
電源系	薄膜太陽電池-主バッテリー	バスモジュールより給電	独立バッテリーパック、ボディ太陽電池
姿勢・GNC 系	統合 ADCS(スタートラッカー、大容量 RW)、一液式ヒドラジン RCS スラスタ×8	N/A	自律航法 GNC システム(航法カメラ、LIDAR)、一液式ヒドラジン RCS スラスタ×8
通信系	X/Ka バンド膜面アンテナ(地球向け)S バンド(デプロイヤー向け)	N/A	S バンド×2 式(母船/子機向け)(データ中継機能)
C&DH 系	メインフライトコンピュータ	(バスモジュールが制御)	独立型フライトコンピュータ
熱制御系	MLI、ラジエータ	受動的熱制御	MLI、ラジエータ

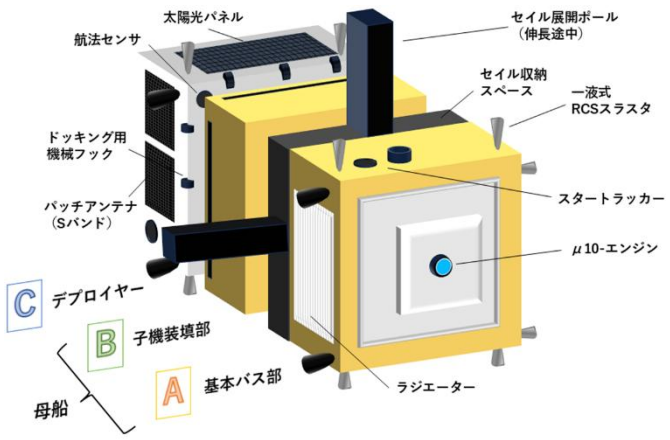


図 1

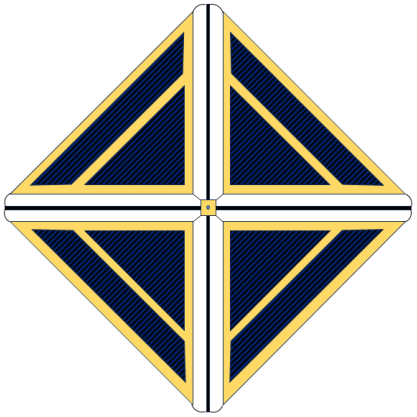


図 2

５．得られる成果

本ミッションは、科学的に、直径 1～5km 級の木星トロヤ群小惑星 4 天体に関する、世界初の高品質なデータセットを取得できる。これには高解像度画像に基づく三次元形状モデルや、表面の鉱物組成を示す分光データが含まれ、惑星形成論に新たな物理的制約を与える重要な科学的成果である。
同時に、工学的に、ハイブリッド推進システムが木星圏までの長期航行を経て、その有効性と実用的な性能モデルを実証する。また、本システムの核心である再利用型輸送機が、母船を拠点とした自律ランデブー・ドッキングと複数回の子機デリバリーという一連の軌道上サービスを完遂することで、その設計と運用の妥当性を証明する。これらの工学的成果は、単一ミッションの成功に留まらず、将来のより挑戦的な深宇宙探査の実現可能性を高める、貴重な技術的知見となる。

６．主張したい独創性または社会的な効果

本ミッションの最大の独創性は、持続可能かつ拡張性のある深宇宙探査を小型の衛星システムとして実現する、その設計思想とアーキテクチャの提案にある。母機が軌道上で探査活動の中継・補給拠点として機能し、再利用可能な輸送機が子機を精密配送するこのシステムは、従来の「一探査機・一目的」の中・大型探査機に対し、明確な新規性を持つ。また、これらの高度な機能は、従来の大型探査機とは比較にならないほど低コスト・短期間で開発可能な「超小型衛星」の枠組みで実現される。すなわち、『キュベレー』は超小型衛星としての十分な打ち上げ機会に適合するよう設計されている。加えて、本アーキテクチャの工学的実証は、母機の「標準バス」、子機を格納・交換する「挿入機構モジュール」、そして自律した「デプロイヤー」の組み合わせを一つのシステムとして機能させ、将来的に、ペイロードを交換することで多様な深宇宙探査に対応可能な「汎用プラットフォーム」へと発展する可能性を秘めている。
このプラットフォームの確立は、挑戦的な深宇宙探査への参加障壁を引き下げ、大学や研究機関といった、より多様なプレイヤーに新たな科学探査機会を提供する。これはコミュニティ全体の活性化と、次代を担う人材の育成に直接的に貢献するものである。さらに、本機が実証する自律的な軌道上輸送・ドッキング技術は、将来の衛星サービス（修理・補給）やデブリ除去など、宇宙空間の持続可能な利用に不可欠な基盤システムの基礎技術として、新たな技術的解決案を示すものである。

７．謝辞

本ミッション設計に当たり、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 副所長 津田雄一先生より、ミッションの持つ課題に関して多大なるご助言を賜りました。心よりお礼申し上げます。また、学生団体 ASE-Lab. のゼミを通じて多数の貴重なアドバイスをくださった先輩方に、重ねて厚くお礼申し上げます。

以上

第 33 回衛星設計コンテスト　補足説明資料

深宇宙分散探査超小型実証機『キュベレー』

麻布高等学校　大森湊太

1.　ミッションの定義

本ミッションは、超小型衛星による革新的な深宇宙探査を提案するための工学実証、及び付随する科学的成果の取得をその目的とし、次のとおりサクセスクライテリアを設定する。

項目	達成条件
エクストラサクセス	・第 2 回以降の探査を実施し、その観測データを取得すること
フルサクセス	・デプロイヤーが 1 機目の子機放出に伴う小惑星フライバイの後、母機に帰還、ドッキングする技術を実証すること
	・第 1 回探査の期待される観測データを中継、地上局に正常にダウンリンクすること
ミドルサクセス	・木星トロヤ群小惑星付近の子機放出ポイントまで航行すること
	・第 1 回探査において、デプロイヤーが子機を輸送し、対象小惑星へ正常に放出、フライバイさせる輸送技術を実証すること
ミニマムサクセス	・軌道上にて、ソーラー電力セイルを正常に展開し、期待される加速度、電力、及び通信性能を得ること
	・木星重力圏内まで航行し、超小型衛星によるハイブリッド航行技術を用いた深宇宙探査を実証するデータを取得すること
	・射出装填機構がデプロイヤーへ子機を 1 機以上の装填を達成し、デプロイヤーが正常に離脱すること

2.　宇宙機システム構成詳細

2.1.　バス部の設計

2.1.1.　推進系

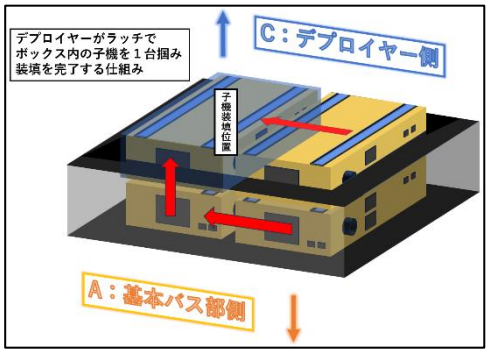
キュベレーには、木星トロヤ群小惑星まで航行するために、ソーラー電力セイル、及び電気推進の二つのシステムが搭載されている。ソーラーセイルは、太陽光子に起因する輻射圧を大きな帆で受け止め加速度を得る推進系であり、大きな燃料の輸送を必要とせず、太陽からの距離の逆二乗に比例して微笑ながらも持続的に有効な加速度を得ることができる。ソーラーセイル展開機構は、NASA が 2025 年現在運用中の 12U サイズの CubeSat ソーラーセイル実証機 ACS3（Advanced Composite Solar Sail System[ii]）搭載の軽量ブーム展開機構を参考としており、キュベレー搭載のブームは長さ約 9m、膜面面積を約 120 ㎡としている。このセイルシステムは、革新的な膜面通信系、電源系、推進系とで棲み分けがなされており、それらを加味した推進系としての諸元、評価は次のとおりである。

帆面積（膜面通信部を除く）	$110\mathrm{m}^2$
膜面太陽電池面積	$80\mathrm{m}^2$
特性加速度	$0.0023\mathrm{mm/s}^2$

電気推進は多くの実績を誇り、改良が続けられている μ10 イオンエンジンを一台搭載している。本エンジンは比推力 3000s[iii]の高性能イオンエンジンであり、10kg のキセノンを搭載している。

2.1.2.　構造・機構系

キュベレーは 100kg 級超小型衛星でありながら、地球スイングバイを経て木星圏を目指す深宇宙探査機であり、分解破損しない頑強な筐体が求められる。本機の構造系は、打ち上げ時の振動・加速度から内部機器を保護するため、軽量かつ高剛性なアルミハニカムパネルと CFRP トラス構造を組み合わせた設計となっている。機構系で最も重要なのは、モジュール B に該当する「子機装填部」である（右図）。これは、精密にプログラム制御されたストッパー付きベルトコンベアとドッキング対応部とで構成される。所定のドッキング位置にてデプロイヤーが近付き次第、デプロイヤー側の窪みがミッ



ション子機を捉え、同時に射出機構が子機を固定しているストッパーを解除し、デプロイヤーが再度分離することで装填を完了する。次回装填までに子機の周囲を回転する形で制御されたベルトコンベアが次装填機を装填位置まで回転させ、次ドッキング待機態勢を完了する。本基本モジュールに搭載できる子機の総容積は最大 32000 ㎤（40*40*20［cm］6U CubeSat　最大 5 機分）であり、加えて、高度に汎用化された本モジュールは、連結により幅広いペイロード要求に応じることが可能である。この一連の構造・動作は、ミッションの信頼性を担保する核心的機構である。

2.1.3.　GNC・ADCS 系

キュベレーの制御系は、システム全体の安定性を司る母船バスと、動的な任務を遂行するデプロイヤーで、その役割と要求性能が明確に異なる。本項では、これら両方を含む、統合されたバスシステムとしての GNC・ADCS 系について詳述する。

キュベレーは、120m² 級ソーラー電力セイルを展開した状態での精密な姿勢安定化に課題を有する。この課題に対し、本機は JAXA の「IKAROS」[iv]で実証されたスピン安定化方式を採用する。母船バス側面に接線方向に配置された化学推進スラスタ（RCS）を短時間噴射し、機体全体をセイル面に対して垂直な軸まわりに 1～2rpm の低速で回転させる。この遠心力によって帆膜全体が常に外側に展張され、懸念される帆面の「しわ」に起因する姿勢外乱トルクを大幅に低減する。また、このスピンは機体全体にジャイロ効果による剛性を与え、姿勢の安定性をさらに向上させる。このスピン状態を適宜維持しつつ、電気推進の長期噴射や太陽光圧による残存外乱トルクを補償するため、アクチュエータとして大容量リアクションホイールを搭載する。センサーにはスタートラッカーとジャイロを用い、リアクションホイールと、スピン軸の向きを制御（歳差運動を制御）する RCS を協調させ、安定した姿勢を維持し、太陽輻射圧によるΔvを最大化する。

デプロイヤーの誘導航法制御システムは、母船への自律ランデブー・ドッキングを、複数のセンサーを切り替えながら実行する。母船後方数百 m の待機領域に到達後、デプロイヤーは自身の航法カメラで母船のドッキングポートに設置されたマーカーを捕捉し、LiDAR による母船との相対航法へ移行する。これらのセンサー情報を機上のコンピュータがリアルタイムで統合し、母船との完全な相対状態（位置・速度・姿勢）を把握する。最終接近に当たり、12 基の一液式化学推進スラスタを精密にパルス噴射させながら、正確な姿勢制御を行う。デプロイヤーのドッキング機構が母船のポートに誘導され、磁気アシストによるソフトキャプチャを経て、機械的なラッチでドッキングを完了する。

2.1.4.　通信系

キュベレーでは、木星圏からの大容量科学データを伝送するため、ソーラー電力セイルに実装されたデュアル膜面展開式アンテナを用いる。コマンド・テレメトリといったミッションの根幹をなす通信は、信頼性の高い X バンドで行う一方で、子機が取得した膨大な科学データは、Ka バンドを用いることで、限られた通信時間内に効率よく地球へ伝送する。母船・デプロイヤー・子機が連携するための周回機間通信リンクは、より確実な通信を確保できる S バンドを用いる。特にデプロイヤーは、子機からのデータを受信し、母船へ中継する重要なデータリレー機能も担う。通信用の膜面アンテナは、約 10m^{2}である。

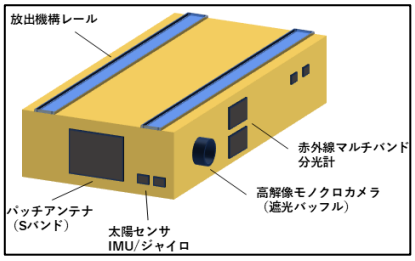
2.1.5.　電源系

キュベレーでは、太陽光の十分でない約 5AU の木星圏での安定した電力確保という課題解決が要求される。JAXA「IKAROS」で実証された薄膜太陽電池を帆膜に統合した「ソーラー電力セイル」により、基本バス部、及び電気推進の電源を確保する。

セイル総面積 120m^{2}のうち、80m^{2}に薄膜太陽電池が搭載されている。参照した先行研究[v]によると、木星圏でμ10 イオンエンジン 1 台を駆動させるために必要な太陽電池膜の面積は 40m^{2}と試算されている。電気推進を除いた主バス部の運用に必要な電力（基礎電力）を、先行研究に照らして 50W と考慮しても、最大で 350W（巡行中）の電力量が必要となるが、木星圏においても 600W の電力が得られるため、大きくマージンを確保した設計となる。

2.2.　ミッション部の設計

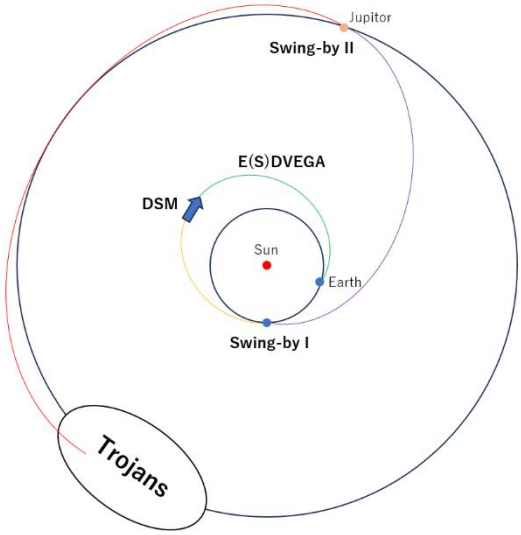
キュベレー搭載の CubeSat（右図）は、デプロイヤーによる自律フライバイ支援のもと、6U CubeSat の限られたリソースの中で科学的成果を最大化するため、推進系などの機能をあえて持たず、撮像と分光の 2 つの科学観測に集中する。太陽系初期の微惑星の姿、組成を明らかにするため、高解像度小型モノクロ CMOS カメラと赤外線マルチバンド分光計を搭載し、小惑星に限りなく接近、撮影する。



これは物理的な地形、及び化学的な組成の解明に限られたリソースの中で最も貢献できる手法である。デプロイヤーから放出された子機は、慣性飛行で目標小惑星へ接近し、フライバイの数時間前から観測シーケンスを自律的に開始する。小型リアクションホイールでカメラと分光器の視野を常に小惑星に向け続け、最接近を挟む数十分間に集中的にデータを取得し、膨大な科学データ（数 Gbit）は、搭載されたメモリに一時保存する。フライバイ完了後、母船との通信が確立され次第、S バンド通信でデプロイヤー、そして母船へと中継する。

3. ミッション軌道設計詳細

キュベレーが地球を出発し、木星トロヤ群領域へ到達するまでの惑星間航行軌道の詳細について述べる。本機は、100kg 級という質量の制約の中で外惑星領域へ到達するため、ソーラー電力セイルと電気推進の能力を最大限に活用する EDVEGA と、木星重力アシストを組み合わせた、高効率かつ採用実績の高い多段階の軌道計画を採用する。



本設計の推進システムが、上記の軌道計画を実現するのに十分な性能を有することを、定量的に評価する。類似のミッション（100kg 級ソーラー電力セイル機による木星探査）に関する先行研究[vi]では、EDVEGA フェーズにおいて、木星への遷移軌道に乗るために約 2400 m/s のΔvが必要であると示されている。これを要求Δvと定義し、本機の能力と比較する。本機に搭載された電気推進システムは、推進剤であるキセノン 10.0kg を全て消費した場合、ツィオルコフスキーの式により、総計で約 2558m/s のΔvを生成可能である。ホールスラスタのみで約 7%の要求Δvマージンを確保していることに加え、太陽輻射圧による加速も当然期待される。地球スイングバイを適切に実施できれば、先行研究より、十分にトロヤ群に接近することが確認できる。

4. 参考文献

「超小型ソーラー電力セイルによる惑星間空間探査ミッション」　高尾勇輝、他
「人工衛星・惑星探査機のための宇宙工学」　竹ケ原春貴、他
「ミッション解析と軌道設計の基礎」　半揚稔雄、他

---

[i] https://science.nasa.gov/mission/lucy/
[ii] https://www.nasa.gov/mission/acs3/
[iii] 高尾勇輝(九州大学)，森治，西山和孝，月崎竜童，田畑邦佳，森下貴都，尾崎直哉，船瀬龍，　久保勇貴，津田雄一，佐伯孝尚，宮崎康行，佐藤泰貴，竹内央，冨木淳史，鳥居航，杉原アフマッド清志，兵頭龍樹，嶌生有理，巽瑛理，矢野創，岡田達明，齋藤義文(宇宙航空研究開発機構)，　小川秀朗(九州大学)，奥泉信克(室蘭工業大学)，松下将典(防衛大学校)，黒川宏之(東京大学)，　脇田茂(Purdue University)，癸生川陽子(東工大)，伊藤元雄(海洋研究開発機構)：イオンエンジンとソーラー電力セイルを用いた小型外惑星探査ミッション構想，第 68 回宇宙科学技術連合講演会，姫路，2024
[iv] https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/ikaros.html
[v] 前掲：イオンエンジンとソーラー電力セイルを用いた小型外惑星探査ミッション構想
[vi] 前掲：イオンエンジンとソーラー電力セイルを用いた小型外惑星探査ミッション構想