

ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星探査および深宇宙空間観測

■ 科学目的

近年の Kepler 衛星などの観測により、系外惑星系の多様性が明らかになりつつある。なかでも中心星のごく近傍を周回するホットジュピターの存在は、惑星移動が惑星形成における一般的なプロセスであることを示しており、我々の太陽系においても Grand tack モデルや NICE モデルといった木星以遠の惑星移動モデルが提案されている。こうした惑星移動は Snow line 以遠で形成された微惑星の軌道に大きな影響を与え、その一部を内惑星領域に運び込む。こうした惑星移動によって原始地球に供給された水や有機物は、地球生命の原材料となった可能性がある。つまり、太陽系形成期に木星以遠の領域で形成された天体の組成を調べることは、そのまま生命の発生条件を探ることにもつながると考えられる。本提案の科学目的は、木星のラグランジュ点付近に存在するトロヤ群の直接探査により、原始太陽系円盤内の揮発性物質分布と惑星移動プロセスに重要な制約を与えることにある。また長期にわたるクルージングフェーズでは、宇宙初期に形成された第一世代の星からの宇宙赤外線背景放射観測およびガンマ線バーストを検出するための観測を行う。

トロヤ群小惑星の起源については、以下のようなふたつの仮説が提唱されている

- A 木星が形成された時に、周囲の微惑星が捕獲された
- B 太陽系形成から数億年経過した後に、木星以遠の惑星が大規模な移動を経験しその時に海王星以遠にいた天体がトラップされた (NICE モデル)

Snow line 以遠では、水よりも揮発性の低い CO, CO₂, CH₄, NH₃, N₂ と言った揮発性の高い物質も凝結して固体となるため、その混合比および炭素・水素・窒素・酸素の同位体比も大きく変化する。A のシナリオでは、トロヤ群の組成は木星付近での原始惑星系円盤の組成を反映しており、小惑星帯外縁部の組成と連続しているはずである。一方 B のシナリオでは、海王星以遠に存在するカイパーベルト天体や短周期彗星と同じ起源・組成を持つことになる。小惑星帯に存在する C 型の小惑星では、液体の水が無水鉱物と反応し含水鉱物が形成されている。これに対して彗星では、氷と無水のケイ酸塩が共存している。地上や地球周回軌道の望遠鏡で十分な精度で観測できる波長帯 (<2500nm) では、トロヤ群を含む小惑星帯外縁部の小惑星は、彗星核とよく似た可視近赤外反射スペクトルを示すため、両者の区別は難しい。しかし

- 1 種々の氷・含水鉱物・有機物が特徴的な吸収を持つ赤外域 (とくに 2500~5000 nm の波長域) で、天体サイズの数百分の 1 のスケールでのイメージング分光
- 2 探査機が表面に降り立ち、揮発性の高い炭素・水素・窒素・酸素などの同位体比をその場測定

を行うことで、トロヤ群と内側の小惑星／外側の彗星との関係を明らかにできると期待される。

■概要・特徴

1. 衛星軌道

現時点での候補天体は 2363 Cebriones (L5)、1868 Thersites (L4)、5028 Halaesus (L4) の3つである。いずれの候補天体の場合も、探査機は地球スイングバイ・木星フライバイを経てターゲット天体に向かう。太陽から遠く離れても、大面積のソーラー電力セイルによって生み出される電力が高効率のイオンエンジンを駆動する。小惑星帯通過時に近傍を通過できる天体があれば、フライバイ観測を行う。小惑星帯の外側に抜けた後は、惑星間塵からの熱放射の影響を受けることなく宇宙背景放射を観測できるようになる。トロヤ群小惑星に到着後は、はやぶさ・はやぶさ2同様に対象天体から太陽側に離れた場所でランデブーしながら小惑星全体の観測を行う。可視カメラ画像からは詳細な形状モデルが、赤外線イメージング分光計から詳細な表面物質マップが作成され、両者を組み合わせることで最適な着陸地点が選定される。その後、親探査機から分離した子機が小惑星表面に着陸しサンプルを採取する。サンプルの一部は、その場で質量分析計に導入され元素・同位体分析が行われる。残りのサンプルは親探査機によって地球に持ち帰られ、その場観測よりもさらに高精度かつ詳細な分析によって、対象天体の形成／進化を明らかにする。

2/3. 搭載研究装置候補のリストと重量

搭載観測装置の科学目的は（1）トロヤ群小惑星リモートセンシング（2）トロヤ群小惑星のサンプル取得およびその場分析（3）クルージングフェーズでの天文および惑星間塵観測の3種に分類される。以下に搭載観測装置候補のリストを挙げる。最終的に搭載する装置は、探査機システム設計の結果（搭載可能リソース）・各装置のTRL・科学目標の優先度等を考慮して選定する。

装置	ターゲット	重量 (kg)	科学目的	宇宙実績 (TRL)
赤外分光撮像装置 1*	小惑星表面物質組成 (鉄物, 氷)	5	1	M ³ (6) VIR(6)
赤外分光撮像装置 2	宇宙赤外線背景放射 惑星間塵組成・空間分布、 小惑星表面物質組成・温度分布	30	3	CIBER(4)
地形観測可視カメラ (航法カメラと共通化)	小惑星地形 (フライバイ用 periscopeを含む)	12	1	はやぶさ1/2、 プロキオン(5)
偏光ガンマ線測定装置	ガンマ線バースト (偏光、IPN 位置測定) 太陽風モニター	3.5	3	IKAROS(4)
サンブラ (カプセル質量を除く)	惑星間塵、小惑星サンプル捕集	20	2	たんぼぼ(3)
黄道光観測広視野可視カメラ (オプション、 航法カメラと共通化)	惑星間塵空間分布	3	3	はやぶさ(2)
ダスト Flux 計測器	惑星間塵空間分布	1	3	IKAROS(4)
ダスト質量分析器(オプション)*	惑星間塵組成 (分子種)	15	3	Cassini, LADEE(6)
マルチターン飛行時間型質量分析計	小惑星揮発物質組成 (分子種、	5	2	Rosetta

	同位体)			lab model (4)
子機搭載表面観測パッケージ*		10	2	MASCOT (5)
国内機器小計	—	69.5	—	—
海外機器小計	—	30	—	—
合計	—	94.5	—	—

* 国際パートナーからの提供を想定

■体制・経費・スケジュール

1. 推進体制

宇宙研工学委員会のソーラーセイル WG に、理学メンバーが積極的に参加することで科学的な検討をすすめる。ミッションを支える研究活動として、初期フェーズで最も重要なのは候補天体の地上・宇宙望遠鏡による観測である。これまでは主に小天体探査 WGT で行ってきたが、今後は宇宙研の工学 WG の中で中・大型の望遠鏡を持つ海外研究機関と連携しつつ推進していく。リモートセンシングおよびサンプル分析については、はやぶさ/はやぶさ 2 を経験した研究者が中核となる。世界有数の質量分析装置開発拠点である大阪大学を中心として、その場同位体分析という日本の惑星科学にとって新たな分野をきりひらく。天文分野とはクルージングフェーズの観測のみならず、「太陽系惑星間塵モデルの系外惑星系円盤への応用」や「惑星移動を考慮したより一般的な惑星形成モデルの構築」を協調してすすめる。また搭載機器公募などを通じて Rosetta/Dawn/彗星核サンプルリターンといった国際的な小天体ミッションに関わる海外の研究者の参加を促す。

2. 経費概算と年次進行計画

これまでのソーラーセイル WG での検討では、次期基幹ロケットが利用でき複数の搭載機器が国際協力で提供されるという前提のもとで、宇宙科学・探査ロードマップ中のカテゴリー 1 「ある分野の総力を結集し戦略的に実施する中型計画」の規模（～300 億円）に納まると見積もられている。データアーカイブについては SOAC と連携し、サンプルキュレーションについては、はやぶさ/はやぶさ 2 という先行ミッションの資産を最大限に活用することでコストの低減をはかる。また COSPAR での惑星検疫の議論を担当者が継続的にモニタリングしていく。ESA に提案された Odyssey（～4.7 億ユーロ）あるいは米国 Decadal Survey で検討されたトロヤ群探査ミッション（～9.4 億ドル）と本提案を比較するとコストパフォーマンスは圧倒的に高い。研究・開発および打上・運用スケジュールを以下に示す。

<研究・開発>

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
		WG活動	プリプロ					
	▲MDR		PM制作		FM制作		総合試験	

<打ち上げ・運用>

2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	...	2037	2038	... 2049
										Extra
	▲打ち上げ (対象天体 により前後)	▲地球スイ ングバイ				▲木星スイ ングバイ		▲小惑星 到着		▲地球 帰還