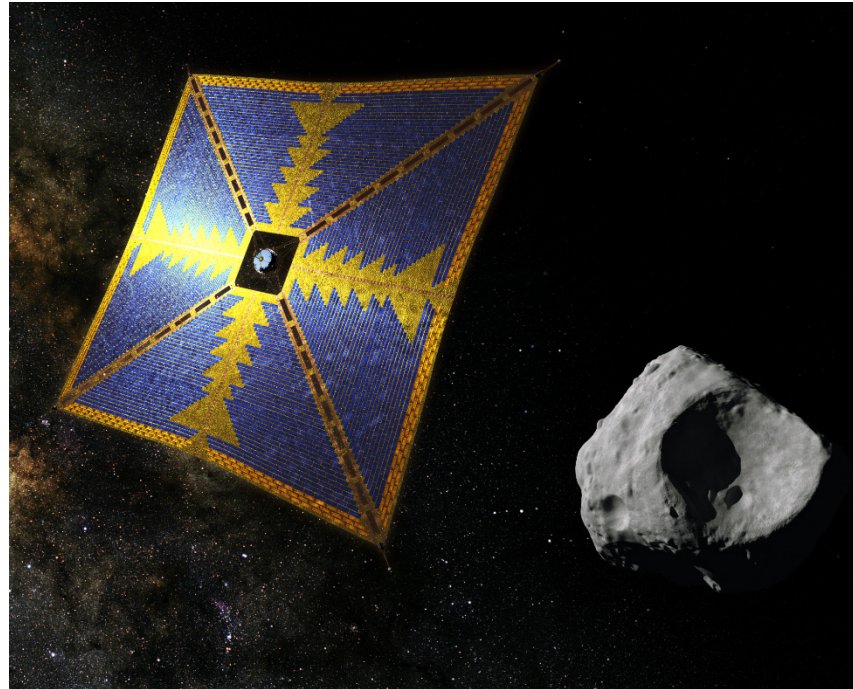


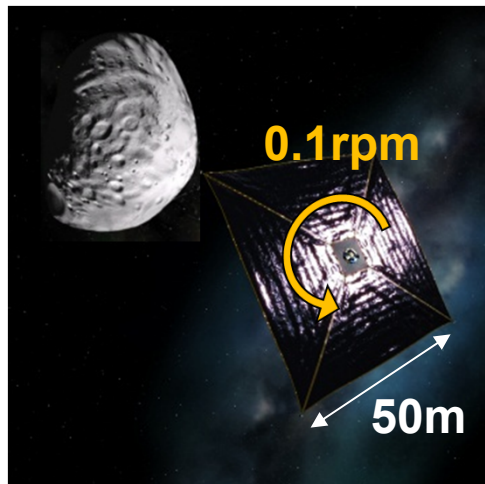
ソーラー電力セイル探査機による 外惑星領域の直接探査



森 治, ソーラー電力セイル準備チーム

ソーラー電力セイル探査機

- スピン展開式(0.1rpm)大型ソーラーセイル(IKAROSの10倍以上の2500m²)のほぼ全面に薄膜太陽電池を貼り付けることで超軽量発電システム(1kW/kg)を構成し、外惑星領域で大電力(5kW@5.2AU)を発電する。
 - 木星探査機JUNOの太陽電池パネルの発電量(486W@5.2AU)の10倍以上である。仮にフレームのある薄膜太陽電池パネルを用いたとしても、ここまで大幅な軽量化・大面積化は達成できない。
- この大電力を用いて高比推カイオンエンジン(はやぶさの2倍以上の7000秒)を駆動し、外惑星領域で大きな ΔV を獲得可能である。
 - JUNOの化学推進による ΔV (1800m/s)をはるかに超える ΔV を行うが、その高い比推力によって燃料質量は極めて小さい。

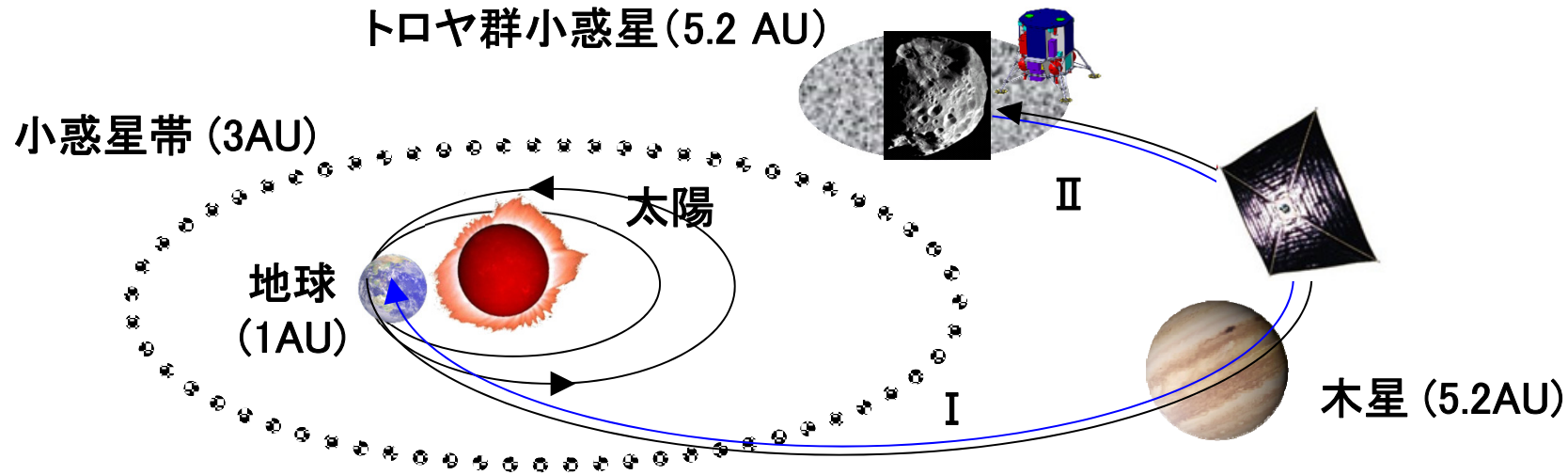


ソーラー電力セイル探査機



JUNO

ミッションシーケンス



<サイエンス>

I. クルージングフェーズ

- ・宇宙赤外線背景放射の掃天観測 (EXZIT)
- ・太陽系ダスト分布のその場計測 (ALDN2)
- ・ガンマ線バーストの偏光観測 (GAP2)
- ・磁場観測 (MGF)

II. ランデブーフーズ

- ・トロヤ群小惑星の観測・試料分析

<シーケンス>

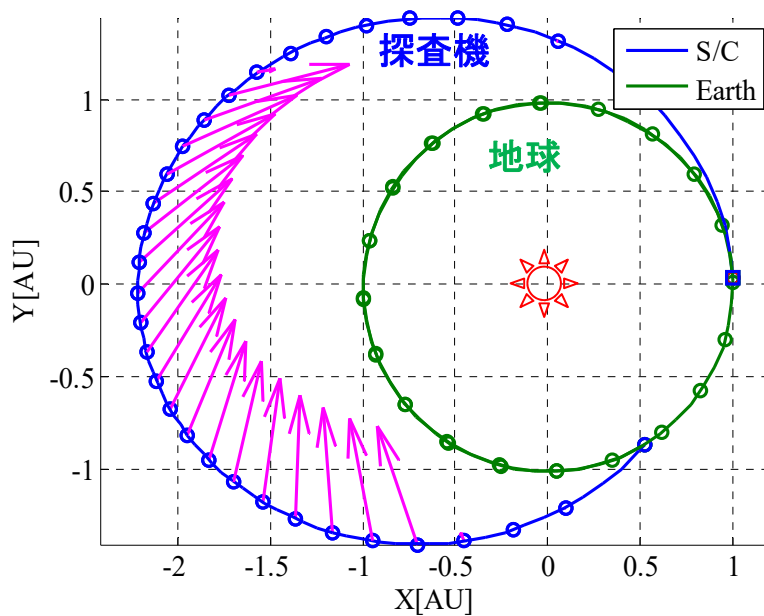
- ・打上げ
- ・地球スイングバイ
- ・木星スイングバイ
- ・トロヤ群小惑星到着
- ・ランダー着陸・試料採取・その場分析
- ・トロヤ群小惑星出発
- ・木星スイングバイ
- ・地球帰還

Plan-A: 片道 Plan-B: 往復

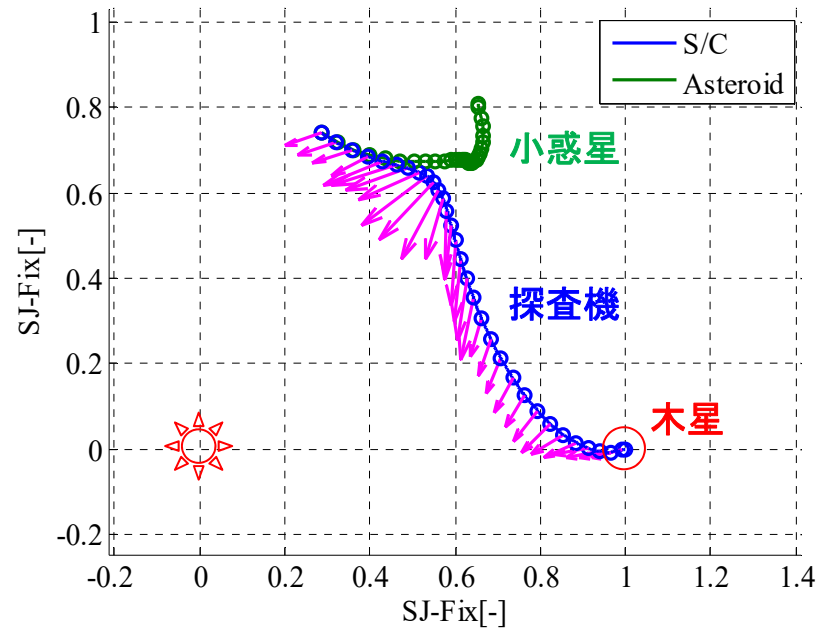
軌道例

目標天体: 2001 DY103(L4) ※往路最短約11年, 候補天体は毎年数個ある.

Phase	departure	arrival	IES dV[m/s]	Tf
2yr EDVEGA	2022/9/20	2024/7/24	1358	673d, 1.84yr
Earth to Jupiter	2024/7/24	2026/12/22	-	881d, 2.41yr
Jupiter to Asteroid	2026/12/22	2033/10/22	3808	2496d, 6.83yr
Total				4050d, 11.1yr



2 yr EDVEGA



J2A

ミッション目的

(1) 航行技術の実証

中型計画規模で、外惑星領域の着陸・往復に必要なペイロードを輸送するため、ソーラー電力セイル探査機を開発し、航行技術を実証する。

(2) 探査技術の実証

トロヤ群小惑星にランデブーして、ランダーを着陸させ、表面および地下試料を採取し、その場分析を行う(サンプルリターンも検討中)、というミッションシーケンスを実現することで、必須となる探査技術をまとめて実証する。

(3) 科学観測

深宇宙空間のクルージング環境を利用した科学観測およびトロヤ群小惑星での科学観測を実施する。

- 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。
- 本計画は実験機という位置づけであり、これを踏まえた本番機で第一級の科学成果を狙う太陽系探査ミッションを実現し、日本が太陽系探査を先導する。

長期計画の中での戦略的な位置付け

探査機	打上げ	航行技術の実証	探査技術の実証	科学観測
はやぶさ	2003年	イオンエンジン	母船着陸・ サンプルリターン (表面試料)	地球近傍小惑星 (S型)
IKAROS	2010年	ソーラーセイル	—	クルージング観測
はやぶさ2	2014年	イオンエンジン	母船着陸・ サンプルリターン (表面・地下試料)	地球近傍小惑星 (C型)
ソーラー電力 セイル探査機	TBD	高比推カイオンエンジン 大型ソーラーセイル	ランダー着陸・ その場分析・ サンプルリターン (表面・地下試料)	トロヤ群小惑星 (D型/P型) クルージング観測

ソーラー電力セイルは日本独自のアイデアであり、はやぶさシリーズ、IKAROSで実証した技術を発展させているため、日本の技術的優位性も活かされる。

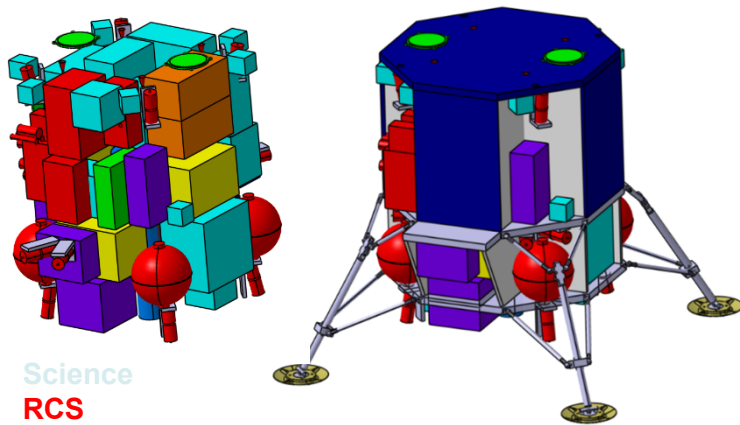
国際協力

＜ランダーの開発＞

- DLRがシステムを製作し, JAXAがその一部の支援を行うことを検討している.
- 2014年度, 2015年度にJoint Studyを実施し, ランダーのシステムの詳細設計を行った.
- 特に, 2015年8月にConcurrent Engineering (CE) Studyを行い, PhilaeやMASCOTの開発実績を考慮することで, 適切なマージンを確保したシステム成立解を得た.

＜トロヤ群小惑星のサイエンス＞

- 2015年度に日欧Joint Science Teamを結成した.
- DLRの他, Rosettaのサイエンス機器の開発を行ったIASやCNESのメンバーも参画.
- 搭載機器案を調整し, 質量・電力・サイズ・データ要求を満足する解の見通しを得た.

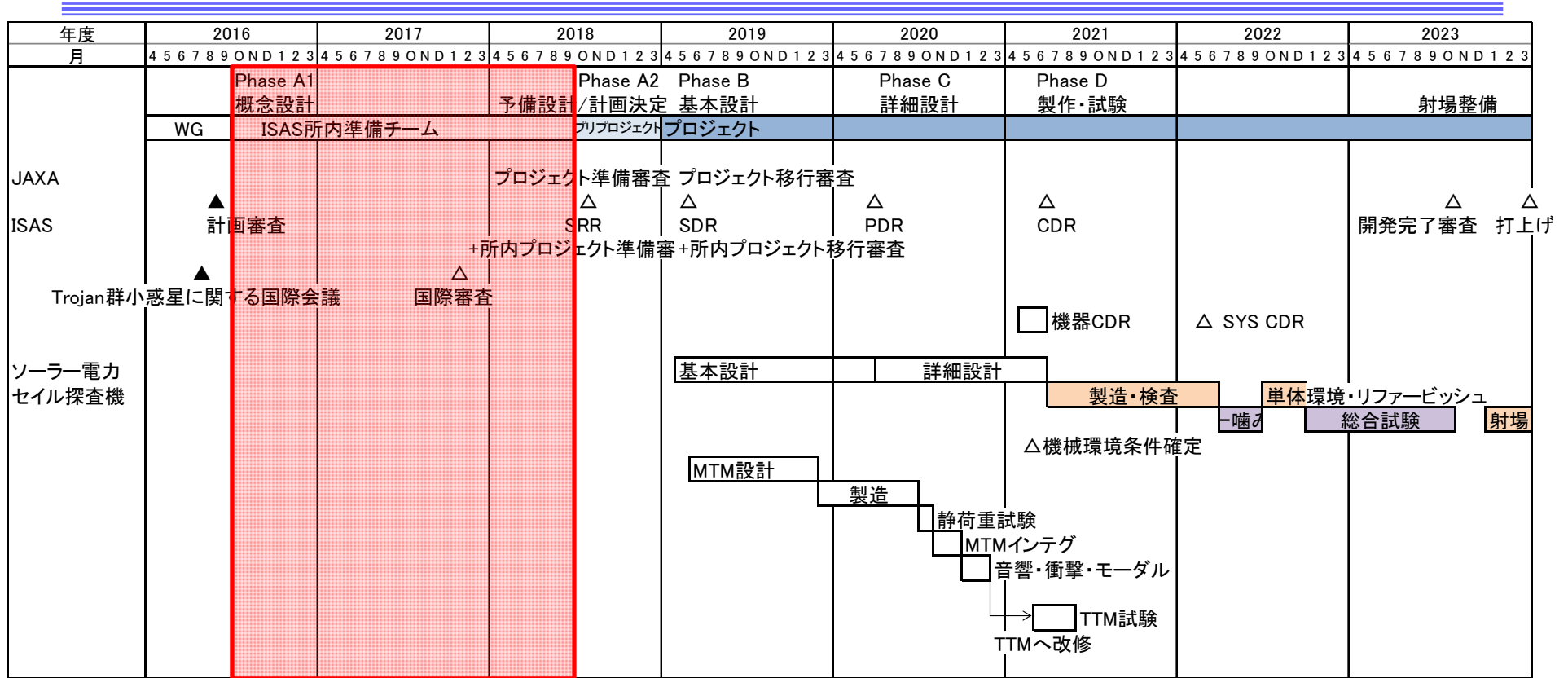


Science
RCS
AOCS
Power
DHU
Communication

※ 質量100kg以下を満足

Instruments	Mass [kg]	Pk Power [W]	Energy [Whr]	Raw Data [MByte]	Size [cm]
Sampling/Distribution: (Horn, Pneumatic drill, revolver, + ...)	7.0	↓	36	HK only	Φ15 x 51
HRMS:(IE, GC, MS, HV, E-Box)	4.9 (+0.9)	60?	236	1000?	18x18x10 (core) 22x22x20 (E-box)
Microscopic Instruments (MicrOmega / Raman)	2.5 (+0.1)	40?	45	200?	10x12x15
Panoramic Instrumetns Vis Camera (x6) IR Spectrometer + (periscope)	0.9 2.5	30 40	14 22.5	100 100	10x15X15 10x12x15 +φ10x10
Others: Magnetometer (MAG) Radiometer (MARA) Closeup Imager (CAM) VISTA Raman (Mini-Raman)	0.2 0.3 0.5 0.1 1.9	1 3 10 1 10	17 41 15 10 2	1 1 20 1 1	10x10x10 + BE 10x10x10 + BE 10x10x10 + BE 5x5x5 + BE 20x15x20 + BE +
Total	20.9 (22.5)	< 80	440 (587 for 75% DC/DC)		

開発計画



- ・2015年9月にミッション評価結果が開示され、WGからPhase-A1(所内準備チーム)に移行することが推奨された。
- ・2016年7-8月に計画審査を受け、9月にPhase-A1に移行。活動期間は2年間。外部要因により半年程度遅れた。

Phase-A1の計画

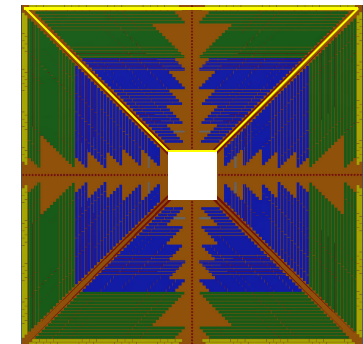
- 探査機システム(技術成立性の確認⇒コスト・スケジュールのオーバーラン防止)
 - ・**システム検討**: Plan-B(往復)の研究をまとめ, Plan-AかPlan-Bの絞り込みを行い, システムのコンフィギュレーションを確定する. 軌道設計やIPPU開発状況(後述)を踏まえて, 電力セイルとイオンエンジンの性能の詳細化し, 熱制御系の成立性を検討する. 観測機器・バス機器の質量・電力を含む仕様を調整する.
 - ・**電力セイル**: 薄膜太陽電池をユニット化して, 発電性能等を評価する. BBMを製作して, 実現化のための課題を示す.
 - ・**展開機構**: 実スケールでセイルの収納試験, 部分展開試験を行い, 展開機構の改良・軽量化を行う.
 - ・**通信系**: より優れた通信系の提案(システムI/F検討およびアンテナの成立性検討)を行う.
 - ・**イオンエンジン**: 開発リスクの大きいイオンスラスタ電源(IPPU)のBBM開発を行い技術的実現性の見極めを行う. 中和器EMの長期間動作試験を開始する.
 - ・**観測機器**: サンプリングパッケージ, サンプラーホーン, 弾丸発射機構, 地下サンプルデバイスについて, それぞれBBMを製作し, それぞれの技術的実現性を評価する.
 - サイエンス成果の最大化を図る活動(後述)
 - 国際協力に係る活動
 - ・**ランダーの開発**: DLRとのJoint Studyを継続し, 探査機とランダーとのI/F調整等を行う.
 - ・**トロヤ群小惑星のサイエンス**: 日欧Joint Science Teamを継続し, 観測内容の精細化等を行う.
- 上記の研究者レベルの調整と並行して, agencyレベルの国際調整を行う.

※ 体制強化(つくばとの連携など)について相談中

近況: 50mセイル展開試験

場所: 相模原市立総合体育館 大体育室, 時間: 2016/07/13 13:00-22:00

- 目的: (1) 50mセイル 1ペタルを完全に広げて, 写真を撮ること
(2) 50mセイル 1ペタルの実寸法を計測(メジャーを使用)すること
(3) ハーネス貼り付け作業を行うこと

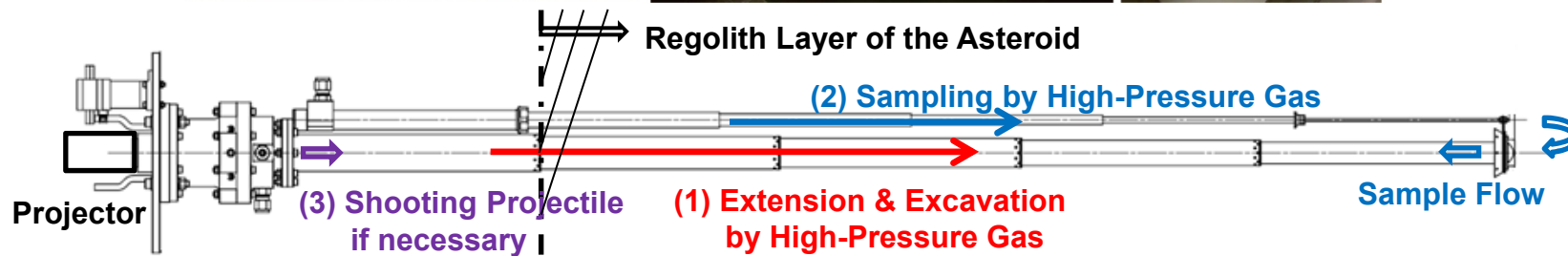


本試験は, 一般に公開した状態で行った.

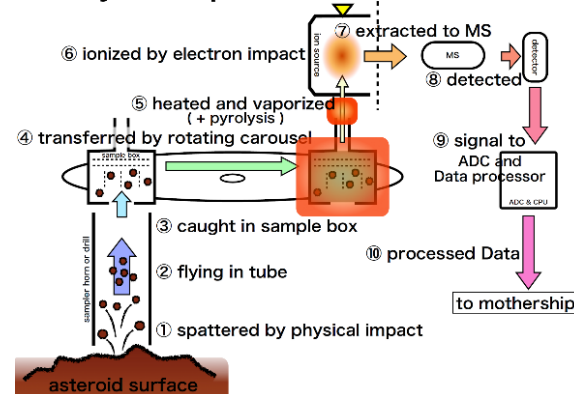
[アウトリーチ実績] 来場者: 250名程度, ネット生中継視聴者数: 5969名, メディア: 14社 10

近況：地下サンプリング

「1mの掘削 + 必要サンプル量(1mg)以上のサンプリング」ができることを機能試験モデルによる試験により実証済.



Analysis Sequence



ミッションの考え方(1/4)

実験機と本番機について

ソーラー電力セイルを実験機としてトロヤ群小惑星へ向かう理由

- 新たな宇宙理工学サイエンスの発揮には到達できる空間の拡大が必須である。
(宇宙理学などの「利用」が「技術」をドライブして空間が広がるわけではない)
- 近地球領域では、通信や熱など技術力の差が見えにくいですが、遠距離では明確。
(はやぶさは3億kmで8Kbps, New Horizonsは木星距離で38Kbps
はやぶさの消費電力, 送信機出力はNew Horizonsの数倍に達する)
- 外惑星圏に積極的な挑戦を行うべきである。

実験機と本番機をセット(姉妹機)で提案した理由

- 日本と欧米では技術レベルだけでなく、投資規模にも大きなギャップがある。
(中型計画は300億円だが, Rosetta, Curiosityは3000億円, JWSTは1兆円)
- これら二重の格差を埋めて、世界水準の理学サイエンス成果を発揮するには、繰り返し実施し信頼性を高めることがカギとなる。
- IKAROSのように、特定の技術要素を実証するものではなく、はやぶさ2に対するはやぶさのように、本番機の探査シナリオに必要な技術をまとめて実証する。

ミッションの考え方(2/4)

理学観測について

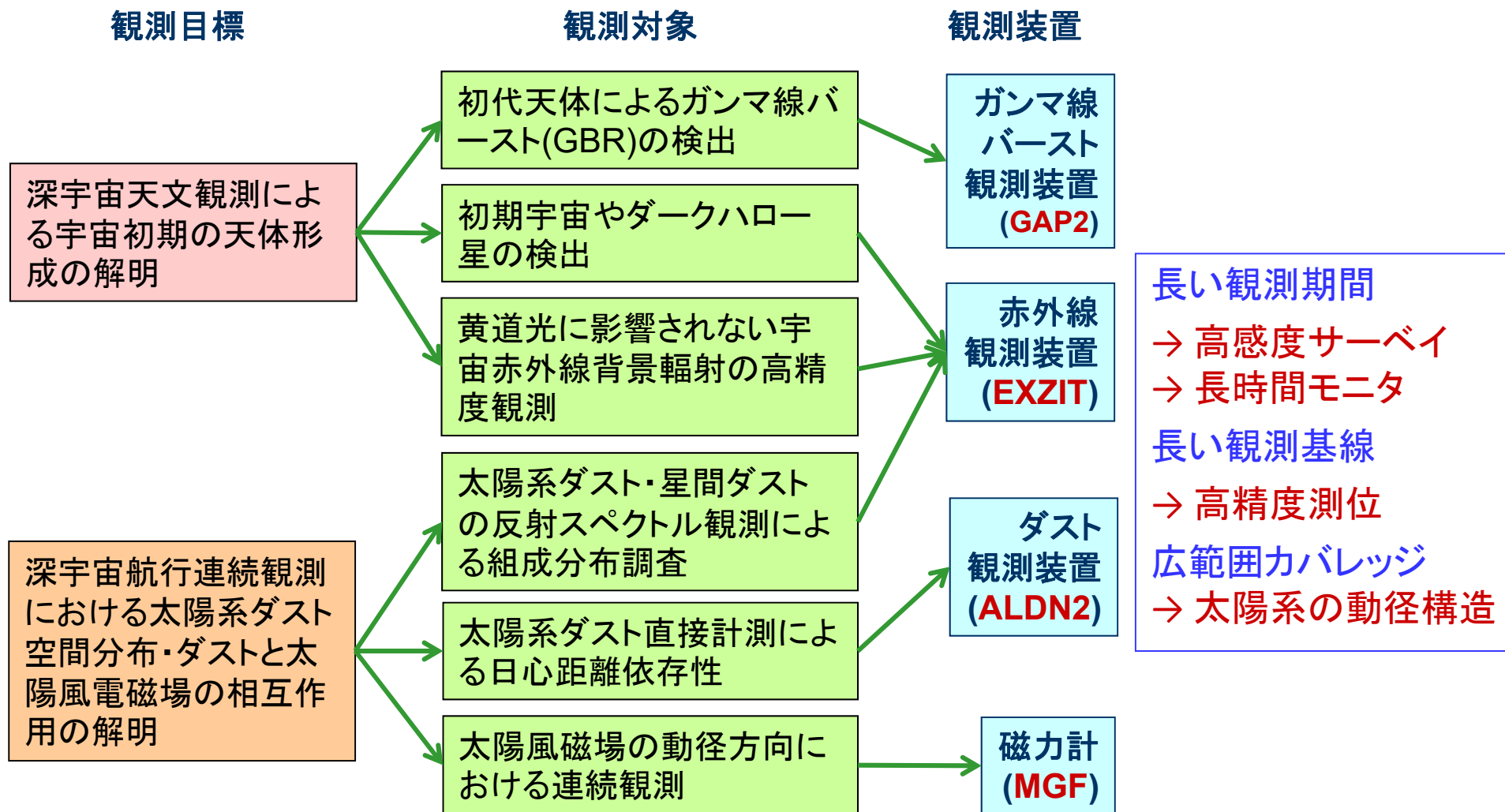
実験機による理学観測の位置付け

- 実験機であっても理学観測は本番機と同様に行う
(ミッション要求およびノミナル成功基準に理学観測を実施することを明記する)
- 結果として得られる理学成果についても明確にする
(到着することが確約できないため理学成果はエキストラサクセスとする)

理学観測についてのPhase-A1での活動

- 理学的ミッション意義をさらに高め、サイエンス成果の最大化を図る
クルージングサイエンス: 複数の科学観測について共通の科学目標を定める。
トロヤ群サイエンス: 国際協力により観測内容を精細化する。
- 理学的ミッション意義について国際審査を受ける。
これに先立ち昨年7月に国際サイエンス会議(Jupiter Trojan 2016)を開催した。

クルージングサイエンス



トロヤ群サイエンス

■ 探査対象 ～太陽系のミッシング・ピース

- ・太陽距離： 小惑星メインベルトの外側 & 外惑星系の内縁部
- ・小惑星タイプ： D/P型
- ・天体サイズ(20～30km)： 天体内部での熱変成作用の可能性

	太陽系内側	太陽系外側
大きな天体	Ceres (NASA Dawn)	Pluto & EKBO (NASA New Horizon)
小さな天体	Ryugu (JAXA Hayabusa2) Bennu (NASA OSIRIS-REx)	67P/Churyumov-Gerasimenko (ESA Rosetta)

**トロヤ群小惑星
D/P型
20～30km**

■ 科学目標 ～太陽系の進化過程, 地球への水や有機物の供給過程をたどる

- ・原始太陽系の動径方向物質分布： 酸化還元状態, 氷・有機物, 同位体比
- ・太陽系形成過程： 古典的モデル(静的) or 惑星移動モデル(動的)

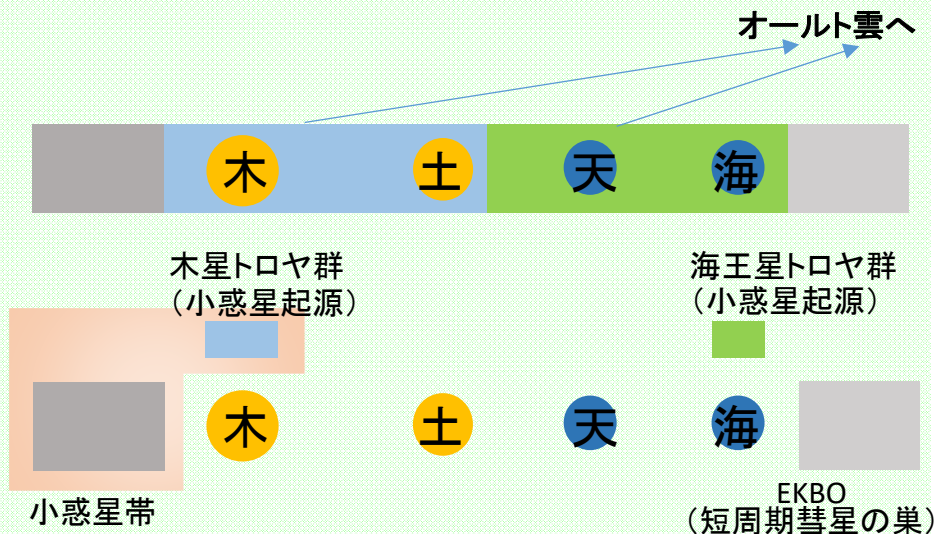
トロヤ群サイエンス

■木星トロヤ群の起源

- ・古典的モデル(静的)
 - ・現在の場所(木星軌道)付近で形成され、木星ラグランジュ点で捕獲され、以後滞在。
- ・惑星移動モデル(動的)
 - ・巨大惑星の外側への移動によってEKBO天体の一部が重力散乱され、一部が木星ラグランジュ点で捕獲、以後滞在(一部は地球・月系にも到達し、水・有機物を共有?)

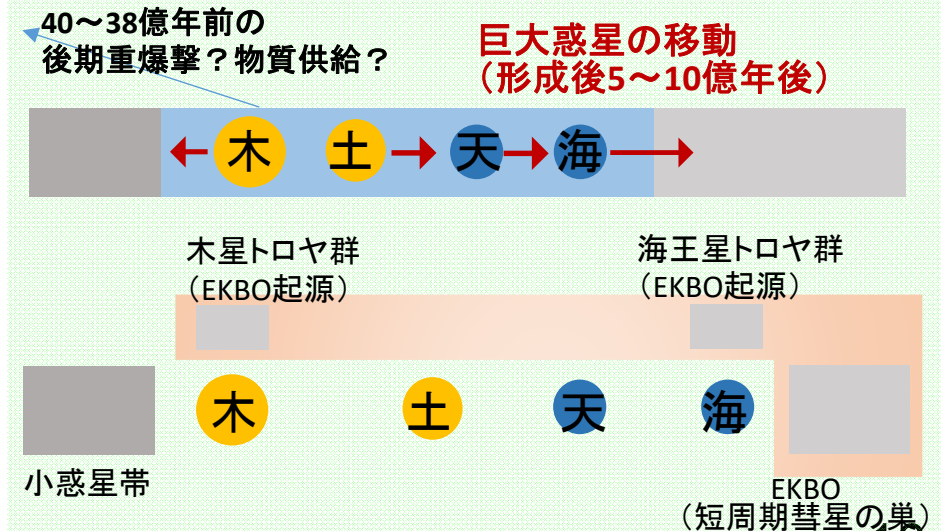
A: 古典的モデル(静的)

トロヤ群: 小惑星と同様(内惑星系起源)



B: 惑星移動モデル(動的)

トロヤ群: 彗星と同様(外惑星系起源)



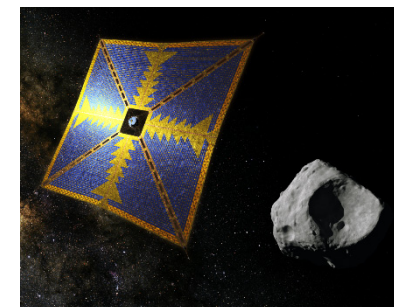
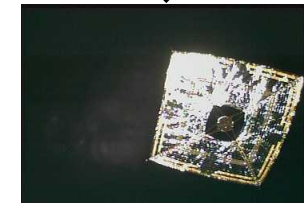
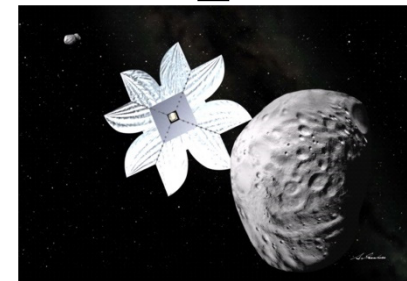
サクセスクライテリア

	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
(1) 航行技術の実証	<ul style="list-style-type: none"> 電力セイルを展開・展張し、必要な電力を確保することで、発電システムとしての性能が評価されている。 高比推力イオンエンジンを駆動し、必要なΔVを獲得することで、推進機関としての機能・性能が実証されている。 	<ul style="list-style-type: none"> EDVEGA、木星スイングバイも踏まえて、ソーラー電力セイル探査機を目標となるトロヤ群小惑星に到達させ、ソーラー電力セイルによる軌道・姿勢制御の性能が評価されている。 トロヤ群小惑星近傍では、画像による接近・HP維持を行い、相対位置制御性能が評価されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ソーラー電力セイル探査機をトロヤ群小惑星から地球に帰還させることで、ソーラー電力セイルによる外惑星領域往復技術が獲得されている(Plan-B)。
(2) 探査技術の実証	<ul style="list-style-type: none"> ソーラー電力セイル探査機の通信系、軌道決定系、熱制御系、化学推進系等のバスシステムの機能・性能が実証されている。 	<ul style="list-style-type: none"> トロヤ群小惑星表面へ接近し、ランダーを切り離すことで着陸が実現されている。 ランダーによって表面および内部試料が採取され、その場分析が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> ランダーが浮上し、ソーラー電力セイル探査機に試料を受け渡した後、地球帰還時にカプセルをリエントリーすることでサンプルリターンが実現されている(Plan-B)。
(3) 科学観測	---	<ul style="list-style-type: none"> 巡航飛行環境を利用して、共通の科学目標を持った複数の深宇宙空間観測が断続的に行われている。 トロヤ群小惑星のリモート観測、着陸時のその場観測が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> 深宇宙空間観測により未踏の理学領域が開拓されている。 トロヤ群小惑星観測により未踏の理学領域が開拓されている。 地球に持ち帰った試料が詳細に分析されている(Plan-B)。

ミッションの考え方(3/4)

NASA Discovery計画の選定について

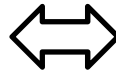
- 1月4日にNASAがDiscovery計画(約530億円)にて、
Lucy(トロヤ群小惑星マルチフライバイ) →
Psyche(M型小惑星ランデブー)
の2つの小惑星探査ミッションを選定した。
- この結果は、タイプ別(S, C, M, D-P)の小惑星探査
という我々の長年の主張と完全に合致する。
- Lucy計画はソーラーセイルWGが2005年に提案した
トロヤ群小惑星マルチフライバイ(+木星探査)計画 →
とほぼ一致する。
- 我々は、技術的リスクの指摘を受け、2010年に
IKAROSにてソーラー電力セイルを先行実証した。 →
またM-VロケットからH2Aロケットへの変更も踏まえ、
トロヤ群小惑星の直接(着陸)探査へ発展させた。 →
- Lucy計画はトロヤ群小惑星を見渡すものであり、
ソーラー電力セイル探査機による詳細な探査と
組み合わせることでサイエンス成果を最大化できる。
すなわち、両者は相補的なミッションである。
(Jupiter Trojan 2016でLucy提案者らとも議論済み)



ミッションの考え方(4/4)

戦略的中型ミッションについて

- かつて、NASA-ISASで研究をしていた小惑星ランデブー計画について、NASAにNEARシューメーカーで先を越されたが、ISASははやぶさで小惑星サンプルリターンにつなげた。



- トロヤ群小惑星の直接探査は現状、ソーラー電力セイルが唯一の解である。NASAも手が出ない領域に踏み込まない限り世界一級の成果は得られない。本計画を戦略的中型ミッションとしてぜひ実現したい。

太陽系天体毎の国際動向

	月	水星	金星	火星	彗星	小惑星 (外惑星領域 除く)	木星圏	土星圏	天王星	海王星	冥王星, EKBO
フライバイ	● U, R, J	● U	● R, U	● U, R	● J, U, E, R	● U, E, C ▲J:プロキオン	● U ■J	● U	●U	●U	▲U: New Horizons
周回・ランデブー	● U, R, J, E, C, I	●U ■E/J: BepiColombo	● R, U, E ▲J:あかつき	● U, R, E, I ■C, J	● E	●J, U, R	●U ■E/J: JUICE ■U (エウロパ)	●U	■U		▲運用中 ●実績 ■開発・ 検討中
着陸	● U, R, C ■I, J		●R ■U	●U ■E, J	●E/G (CG彗星)	●J, U ■E/G	●U ■J (トロヤ群 小惑星)	●E (タイタン)	■U		
サンプルリターン	● U, R ■U, C, I, J			■U, E, R	●U ■U (彗星核 表面)	●J:はやぶさ ▲J:はやぶさ 2 ■U, E	■J (トロヤ群 小惑星)	■J (エンケラ ドス)			
有人往復	●U ■C					■U:ARM					

ソーラー電力セイル

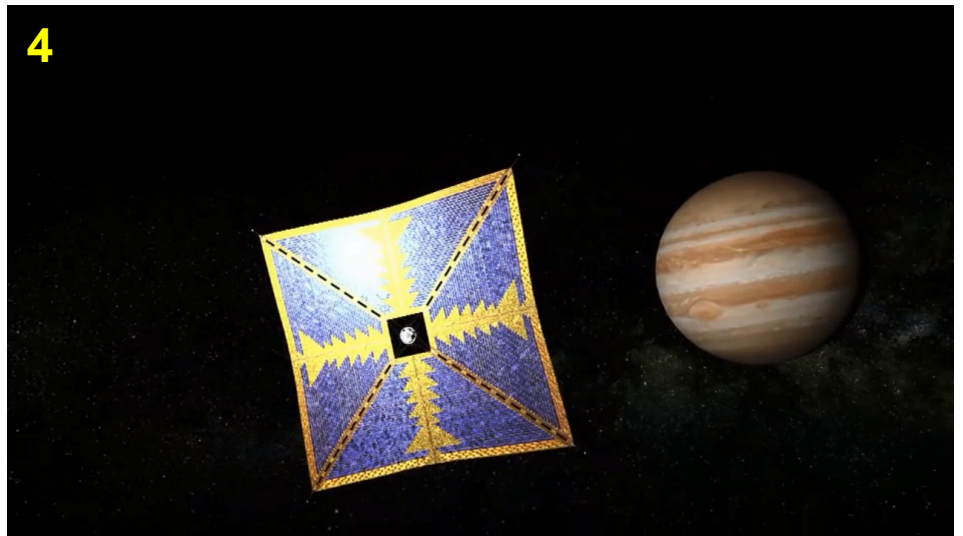
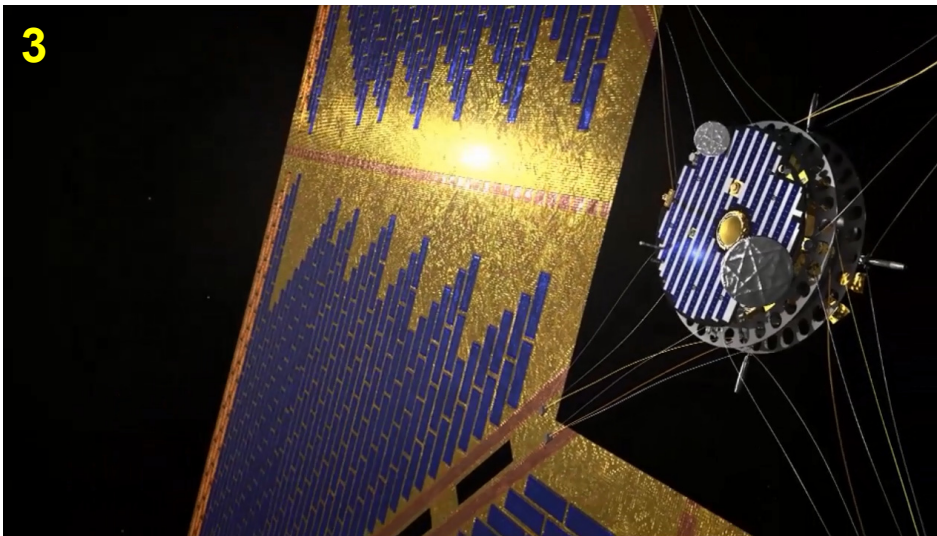
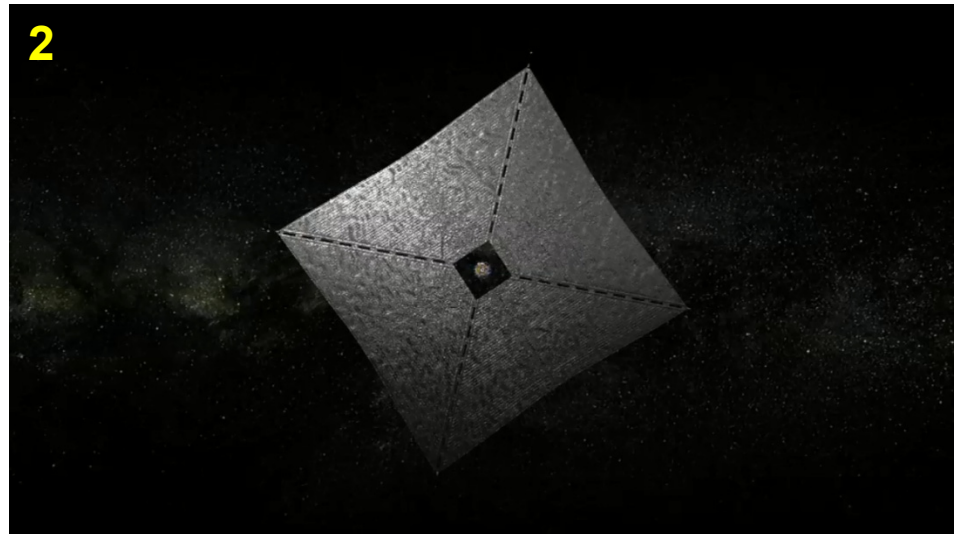
* 2016年時点の最先端 = 黄色

* 今後20年の最先端 = 橙色

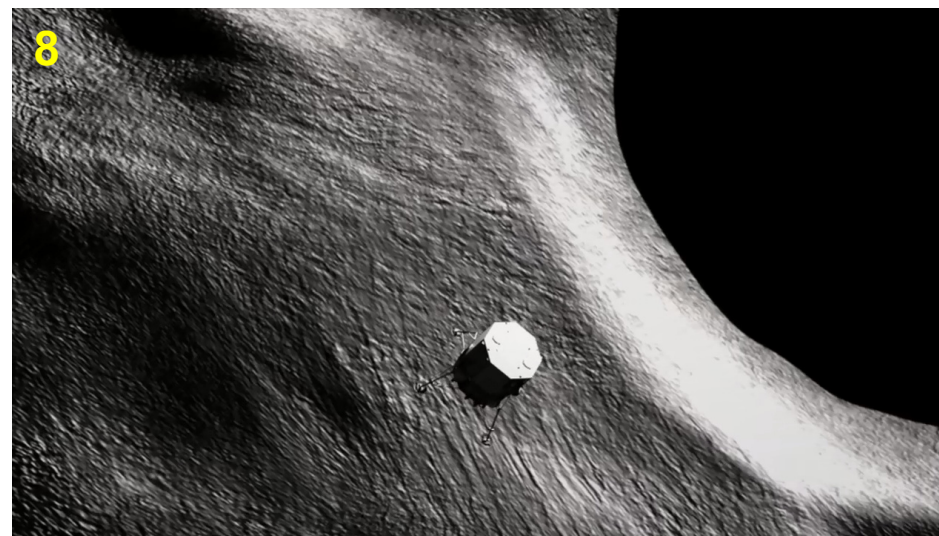
U = 米国; R = ロシア・旧ソ連; J = 日本; E = ESA; C = 中国; I = インド; G = ドイツ

ソーラー電力セイルが木星圏(トロヤ群小惑星)や土星圏(エンケラドス)の直接探査を可能にする現状唯一の解と考えられる。

ミッションイメージ(1/2)



ミッションイメージ(2/2)



ポスター

- P-103: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査ミッションとそのシステム概
- P-104: ソーラー電力セイルの高比推カイオンエンジン系と電源系
- P-105: ソーラー電力セイルミッションにおけるサンプリング・その場分析
- P-106: ソーラー電力セイルミッションによるトロヤ群およびクルージング中のサイエンス
- P-107: ソーラー電力セイル探査機用薄膜太陽電池膜面展開構造の研究開発状況