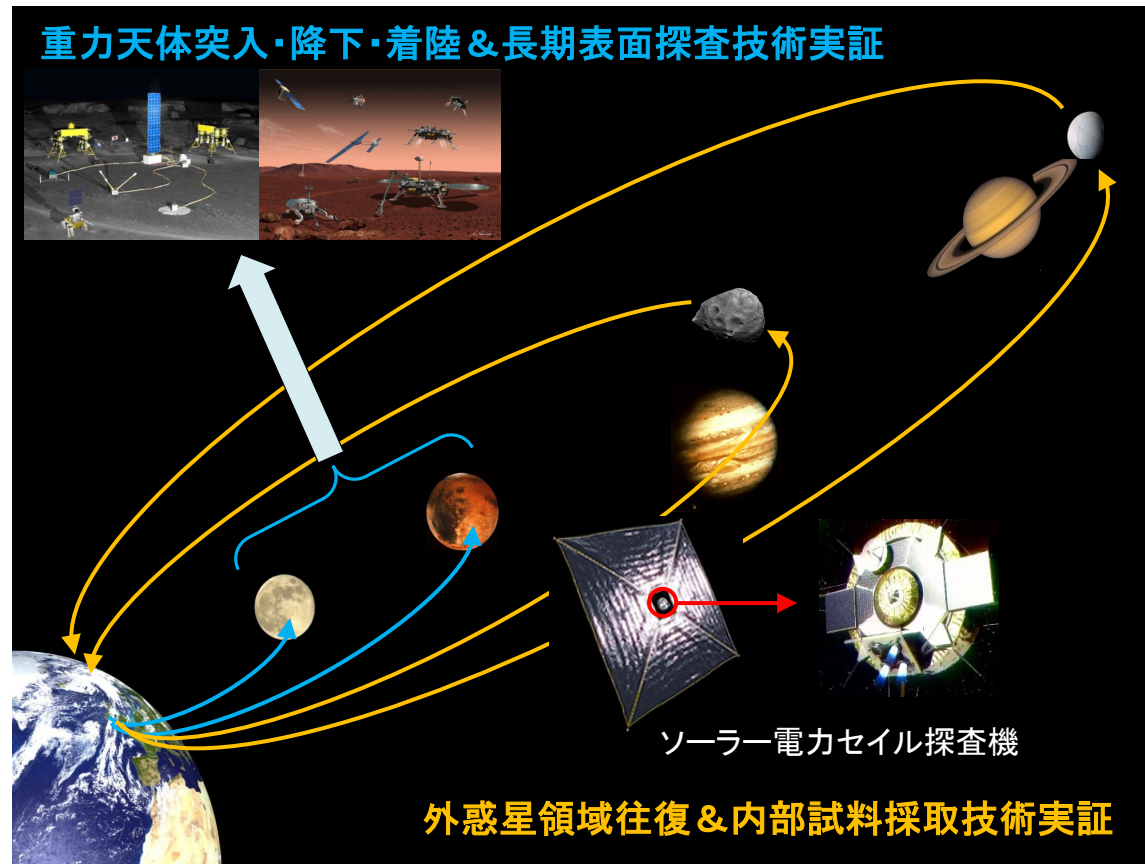


ソーラー電力セイルによる太陽系大航海と 宇宙探査イノベーションによる太陽系開拓



マスタープラン2014「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」

2025年12月19日(金) 森 治

森 治(もり おさむ)自己紹介

・所属

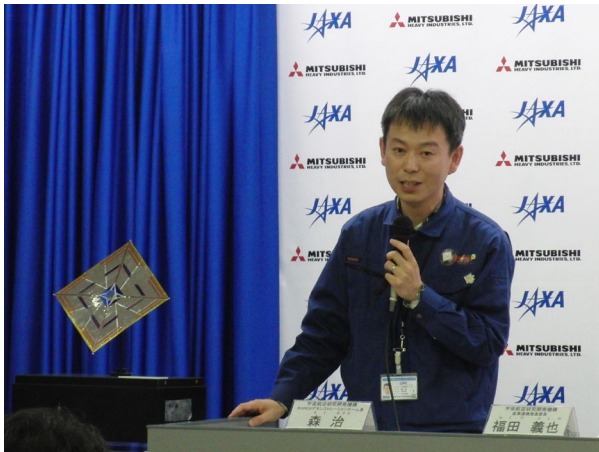
宇宙航空研究開発機構(JAXA)

宇宙探査イノベーションハブ(TansaX)

宇宙科学研究所(ISAS)

・専門

宇宙機システム・推進システム, 動力学・制御



ソーラー電力セイル

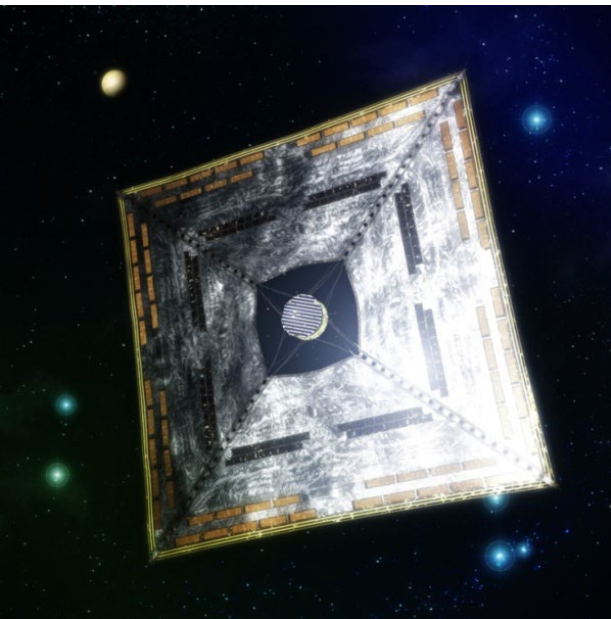


小天体サンプルリターン

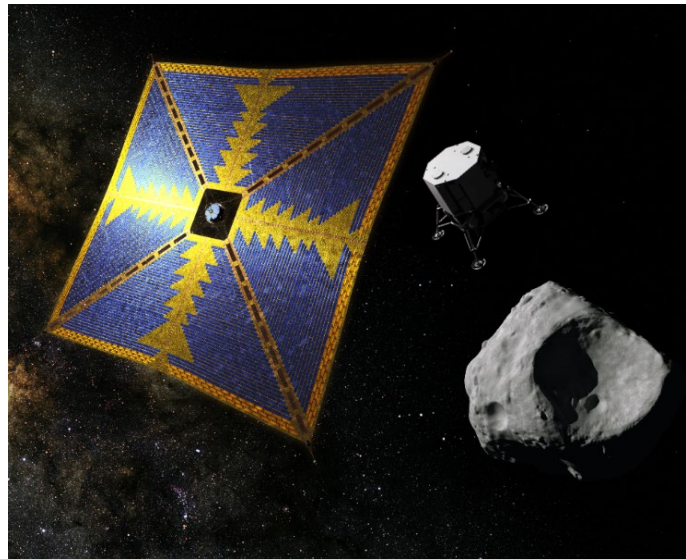


月面探査

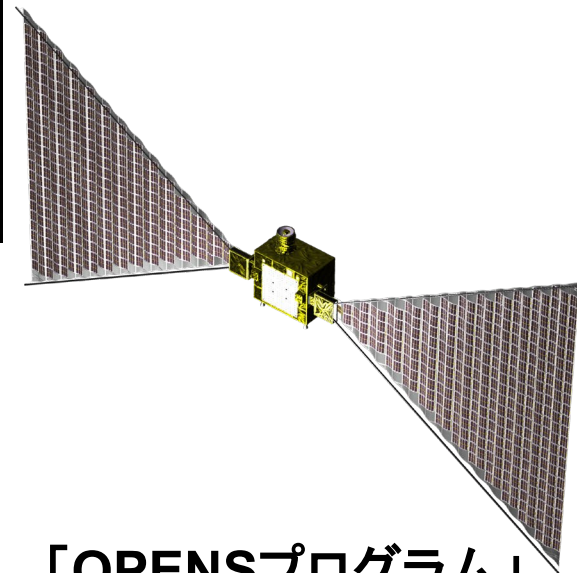
ソーラー電力セル



「IKAROS」
プロジェクトマネージャ



「OKEANOS」
検討チームとりまとめ

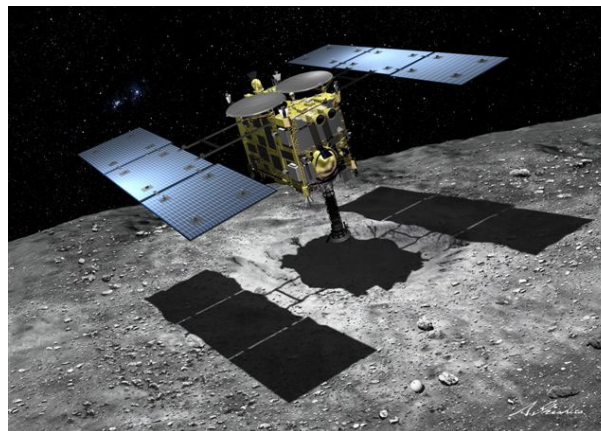


「OPENSプログラム」
検討チームメンバー 3

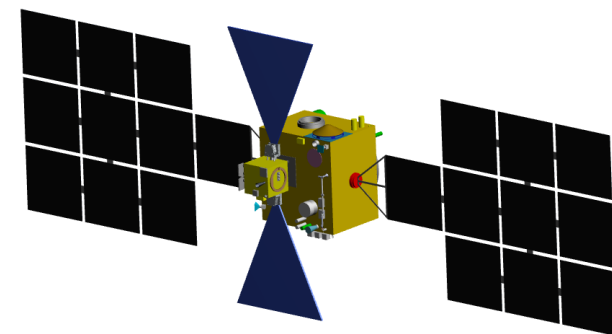
小天体サンプルリターン



「はやぶさ」
運用スーパーバイザー
化学推進系とりまとめ



「はやぶさ2」
運用スーパーバイザー
化学推進系とりまとめ
ターゲットマーカ担当

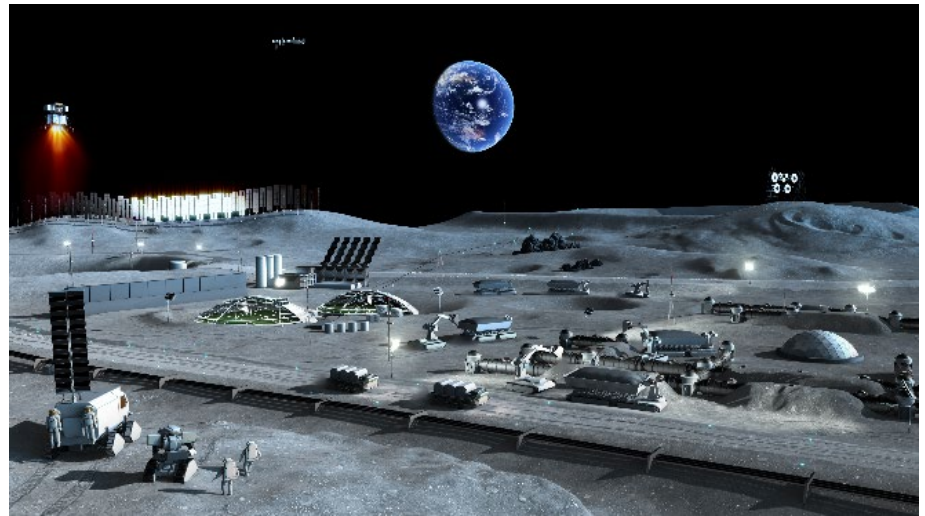


「次世代小天体
サンプルリターン」
検討チームメンバー 4

月面探査



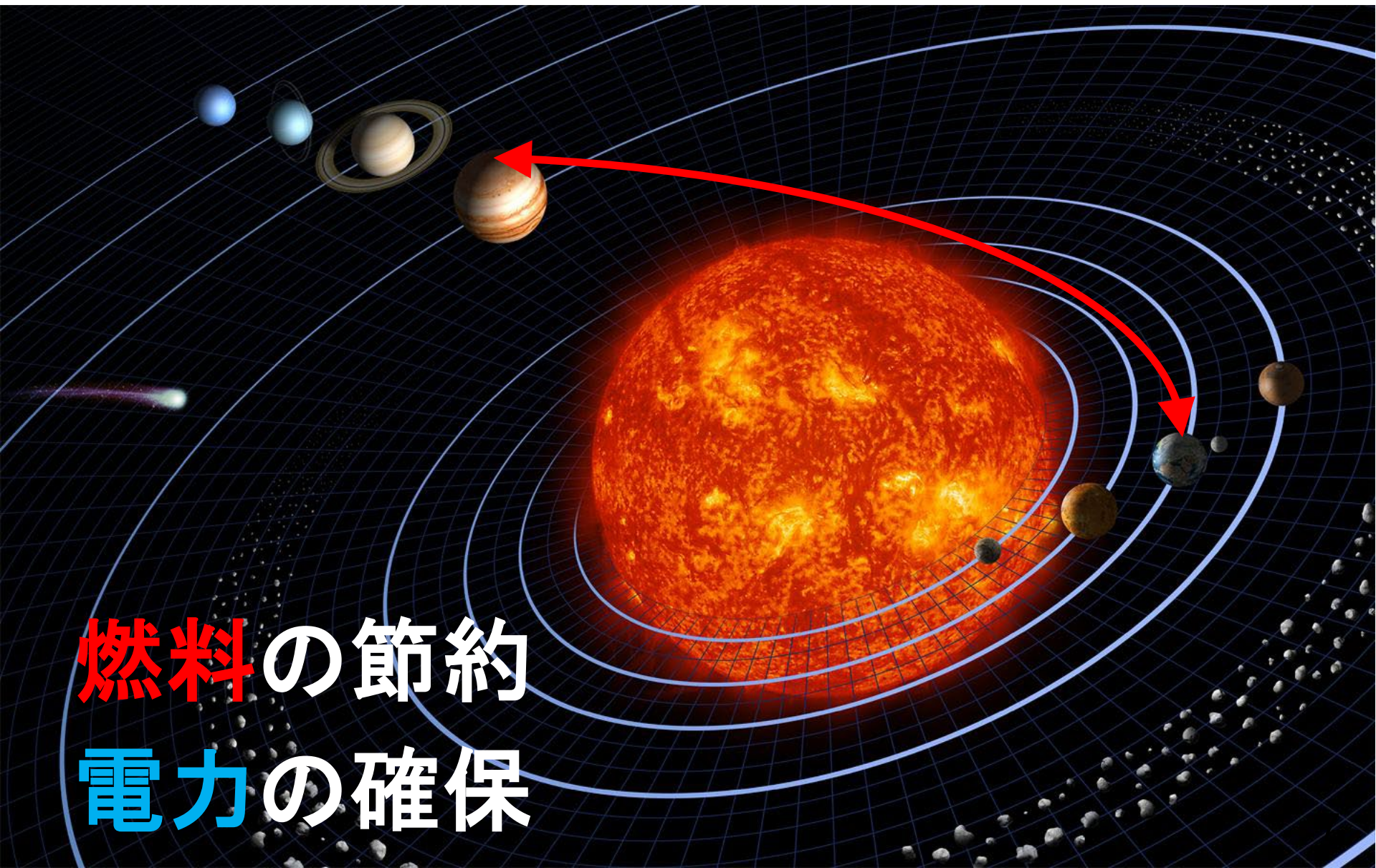
「月面科学プログラム」
検討チームメンバー



Moon to Mars Innovation
宇宙探査イノベーションハブ

- **IKAROS**
- **OKEANOS**
- **OPENSプログラム**
- **月面科学プログラム**
- **Moon to Mars Innovation**
(宇宙探査イノベーションハブ)

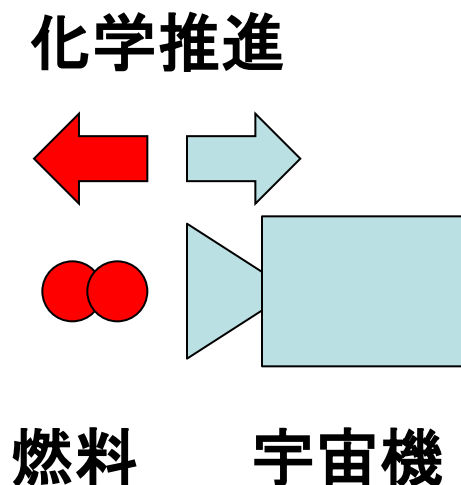
遠く離れた星を自由に行き来するには？



燃料の節約
電力の確保

化学推進(ガスジェット)

通常、宇宙機は化学推進で燃料を放出し、その反動で加速する。

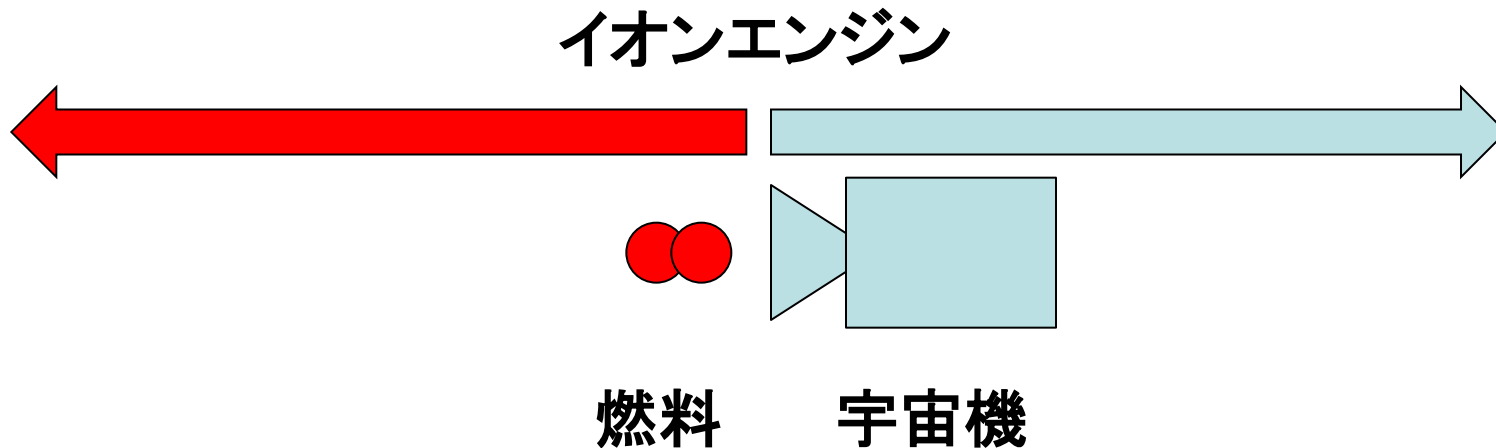


燃料がなくなれば「おしまい」です。



イオンエンジン

燃料を速く放出することで、燃料を節約できる.



※10倍速く放出すれば、燃料は1/10になる.

「あかつき」(全体500kg)の化学推進燃料200kg
⇒イオンエンジン燃料20kg

イオンエンジンを使って、遠く離れた星に行って、
かけらを地球に持ち帰るという探検を実現した・・

小惑星探査機「はやぶさ」



イオンエンジン

2003年5月9日：打ち上げ



2005年：小惑星「イトカワ」到着



2010年6月13日：地球帰還

The Death of the Falcon:
Reentry of Hayabusa and its sample return capsule
June 13, 2010

Movie credit to NASA / ARC
Processed by Emily Lakdawalla, The Planetary Society

Hayabusa

Reentry
capsule

2005/09/04 02:36 UTC

1000 km

ソーラーセイル(宇宙帆船)

帆(セイル)で風を受けて海を進むヨットのように,
帆で太陽からの光を反射して宇宙空間を推進する.

→燃料を使わない「夢の宇宙船」

※アイデア自体は100年前からあり, SFにもよく登場する.

世界中で研究開発が行われているが, 実現されていなかった..



ユニークな形状！

電力の確保

多くの宇宙機は太陽電池で発電する.

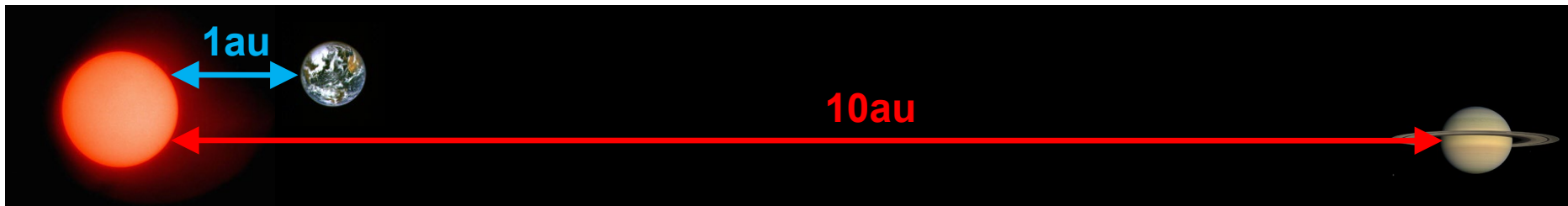
きょっこう



だいち



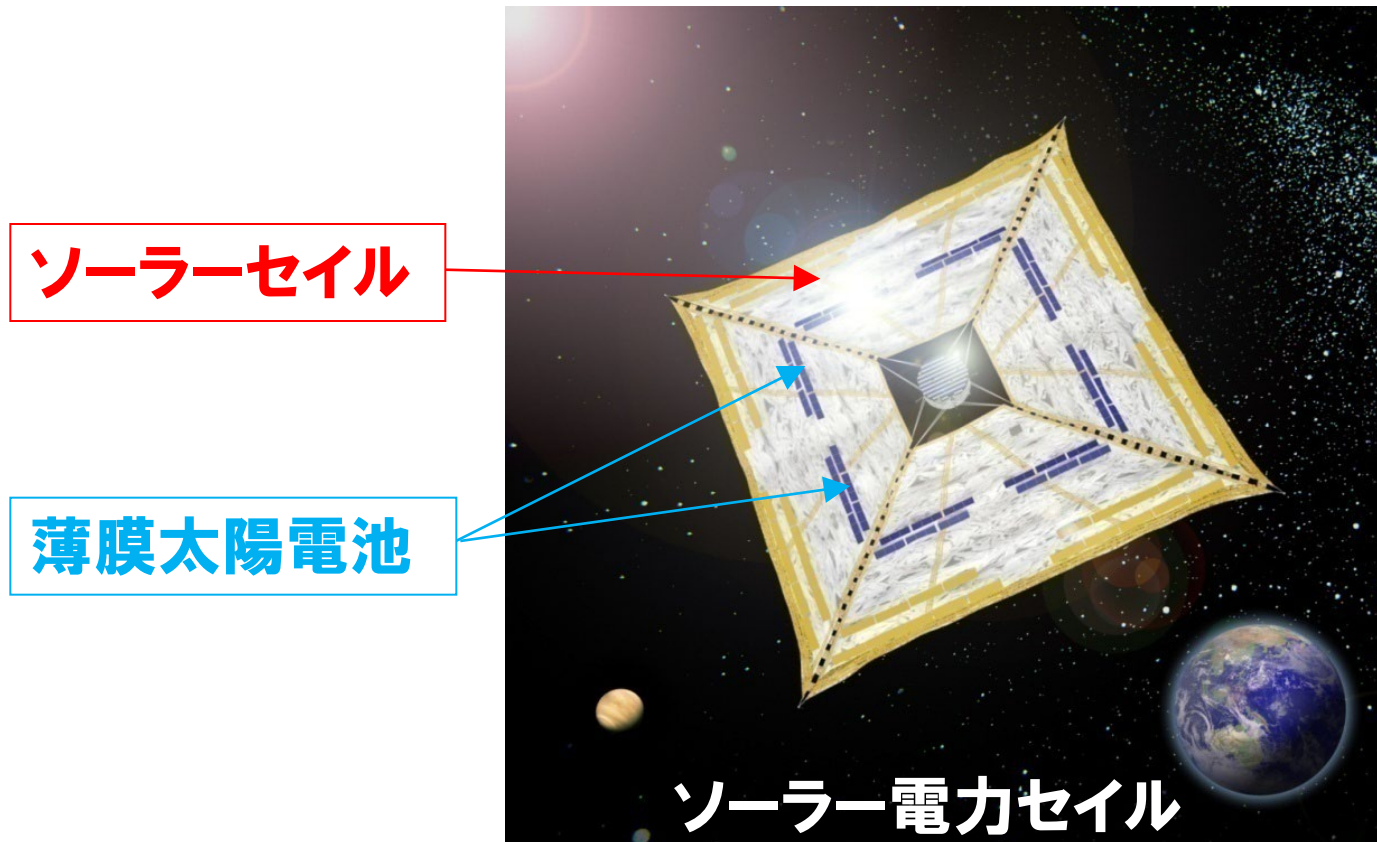
国際宇宙ステーション



太陽から離れると太陽光が弱くなり, 発電量が減る.
(土星では地球の1/100, 木星では地球の1/25)

ソーラー電力セイル

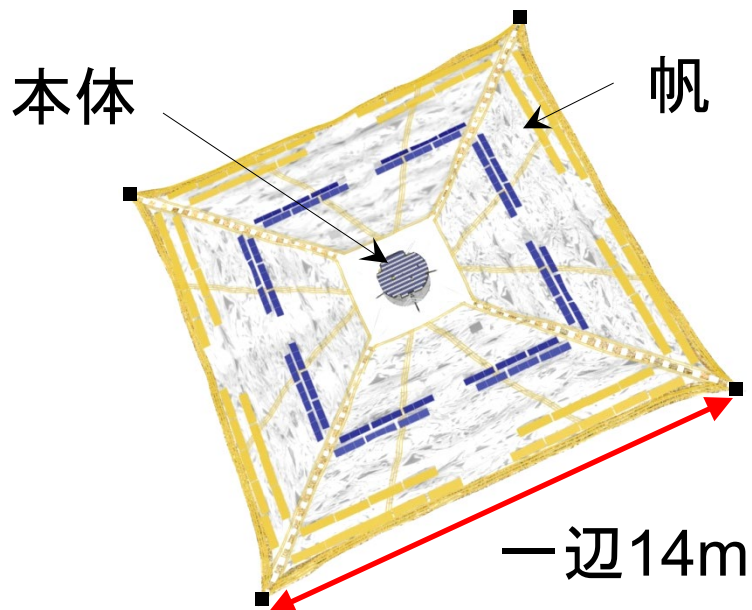
ソーラーセイルの帆に薄膜太陽電池を貼り付けることで
太陽光による加速と発電を同時に実現する日本オリジナルのアイデア。
(**燃料**と**電力**の課題を同時に解決できる)



「ソーラー電力セイルの実験機」として「IKAROS計画」がスタート

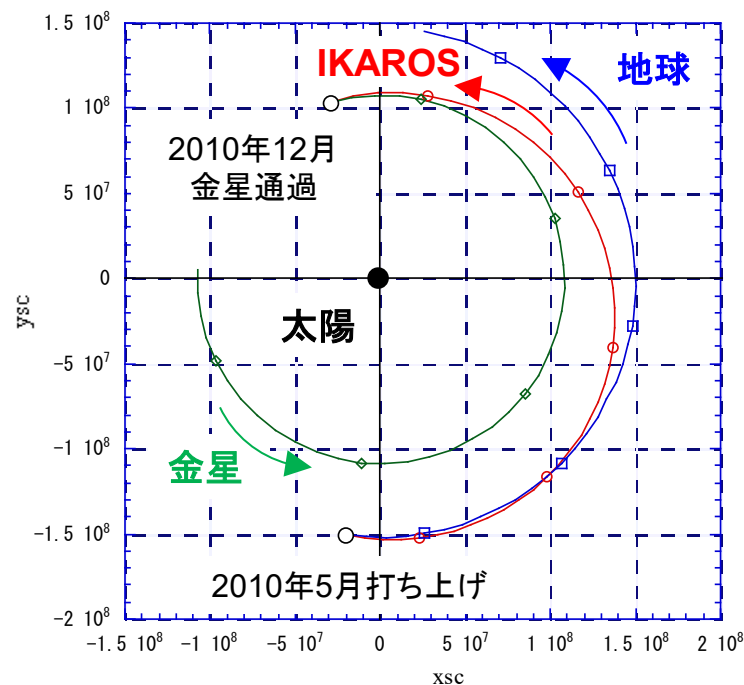
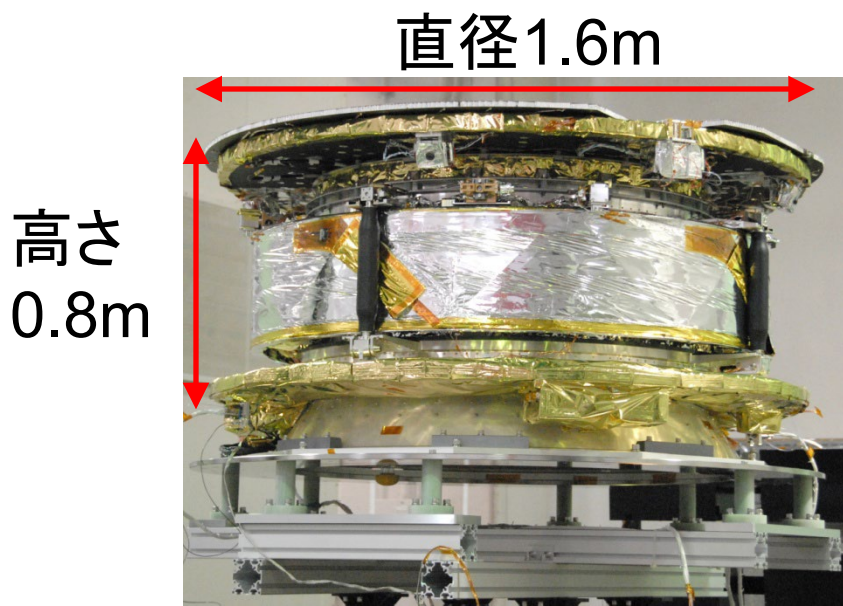
- **IKAROS**
- **OKEANOS**
- **OPENSプログラム**
- **月面科学プログラム**
- **Moon to Mars Innovation
(宇宙探査イノベーションハブ)**

IKAROSの諸元



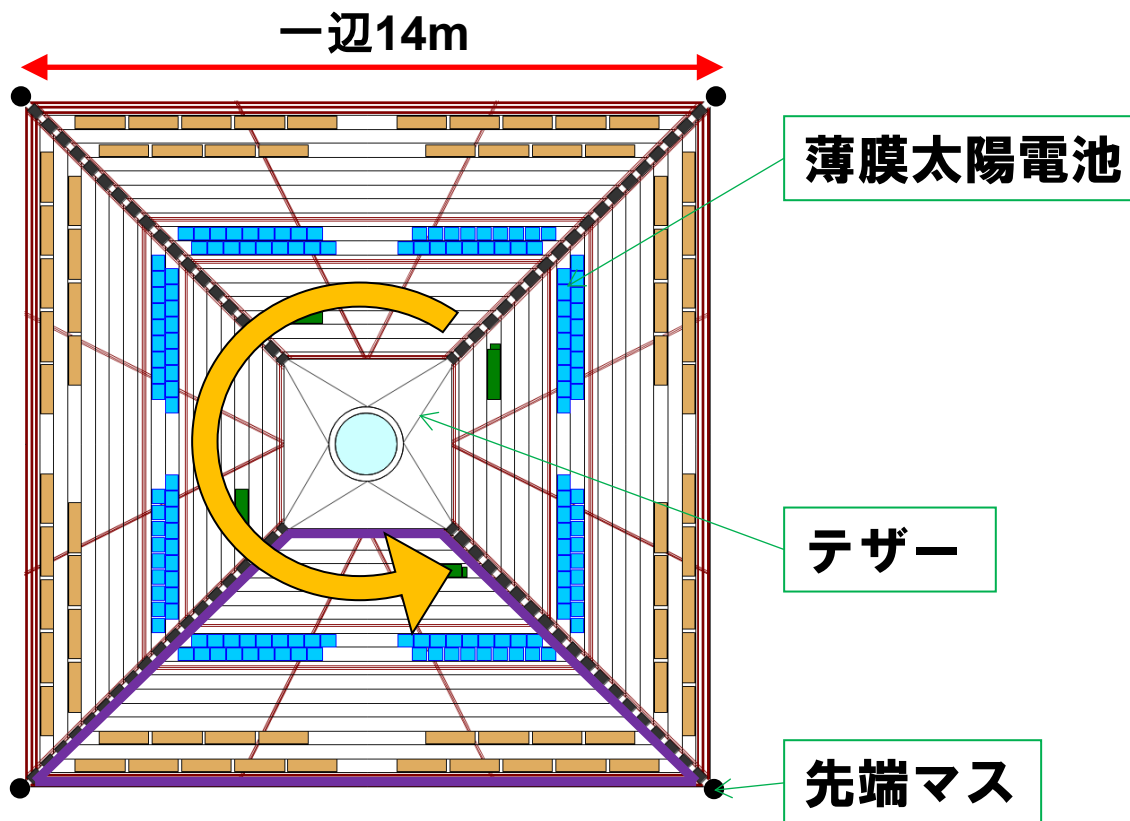
全体重量: 310kg
(帆: 15kg)

2010年5月に金星探査機「あかつき」と相乗りで打ち上げられた。

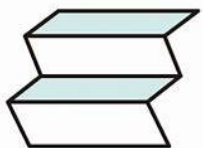
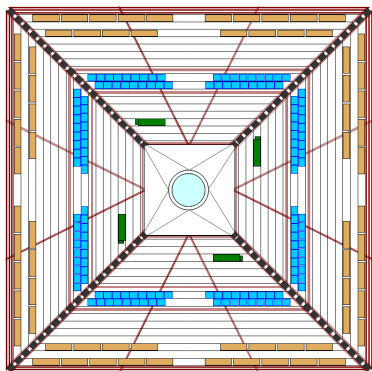


IKAROSの帆

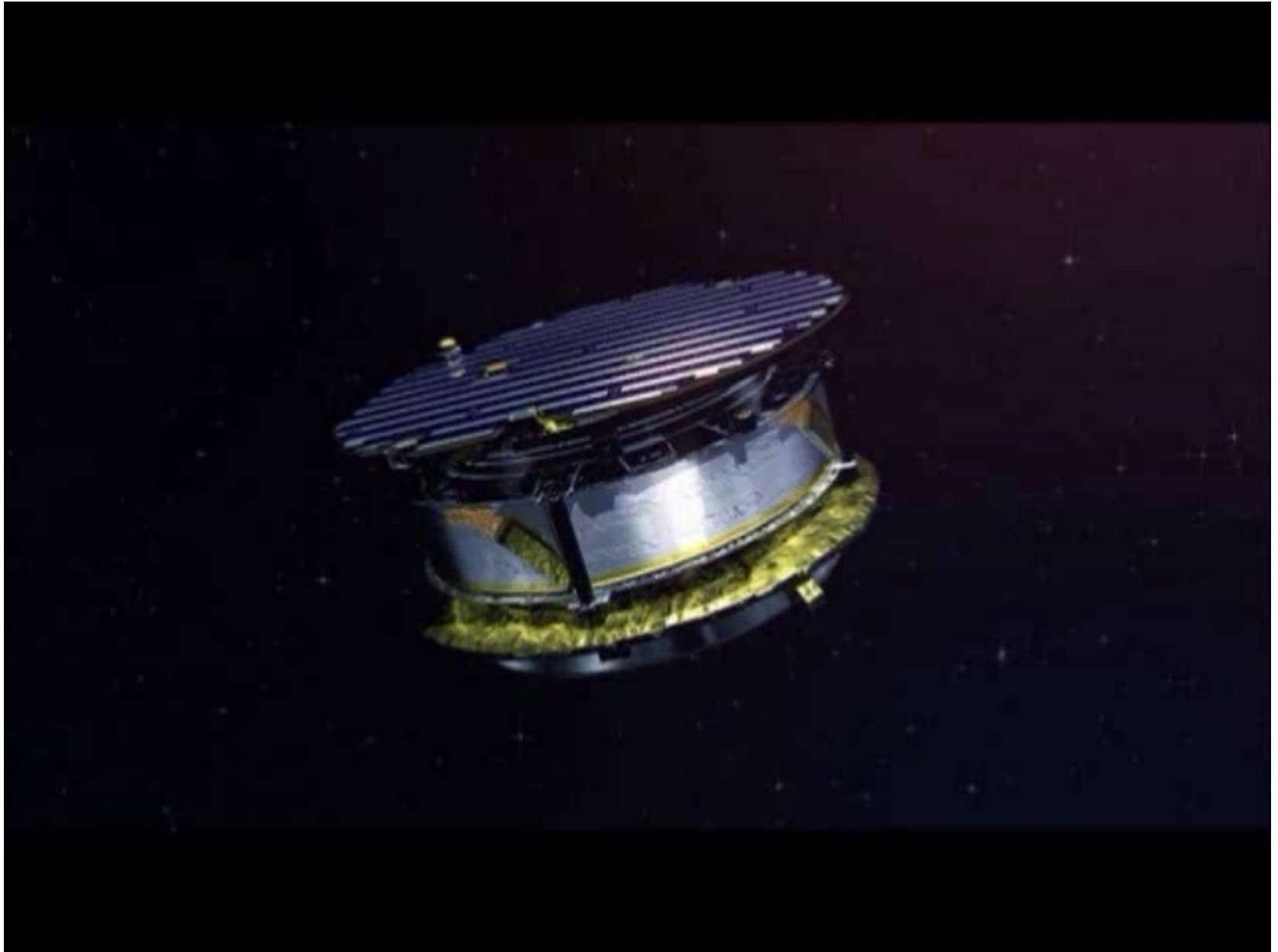
- ・一辺14mの正方形で、厚さ7.5 μ m(髪の毛の1/10以下の薄さ).
- ・膜の一部に薄膜太陽電池などを貼り付けてある.
- ・本体と帆をテザー(ひも)で接続し、全体がスピンして遠心力でセイルを張る.
- ・先端マス(おもり)を膜の各頂点に取り付けセイルを張りやすくする.



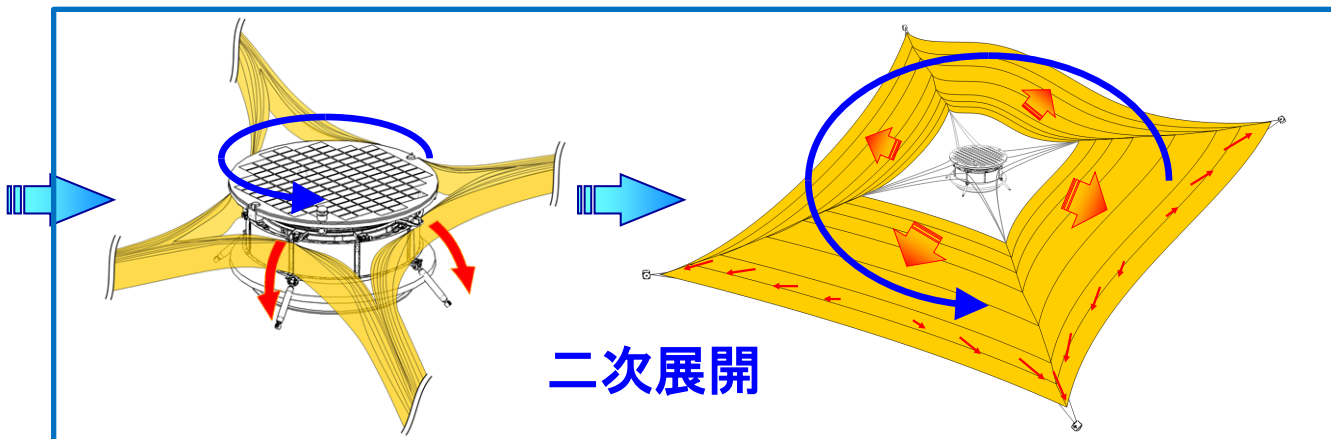
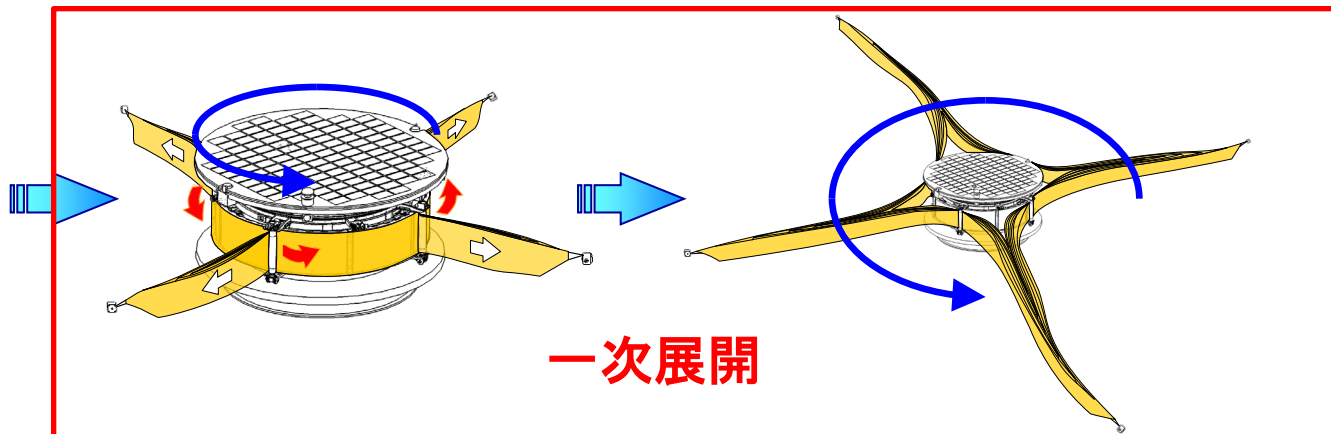
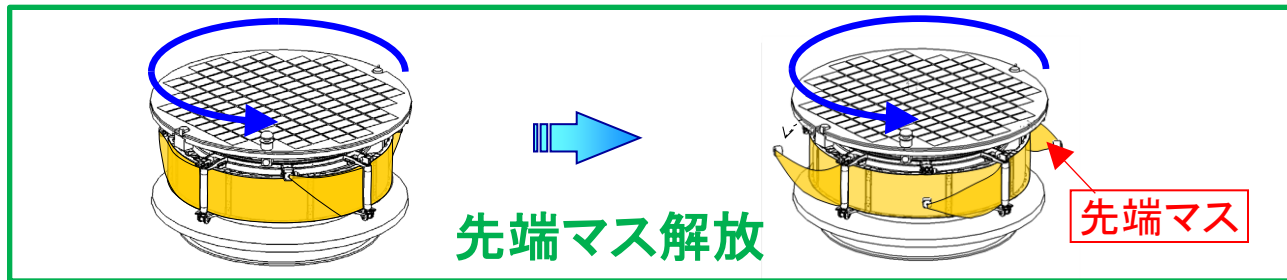
IKAROSの膜の収納手順



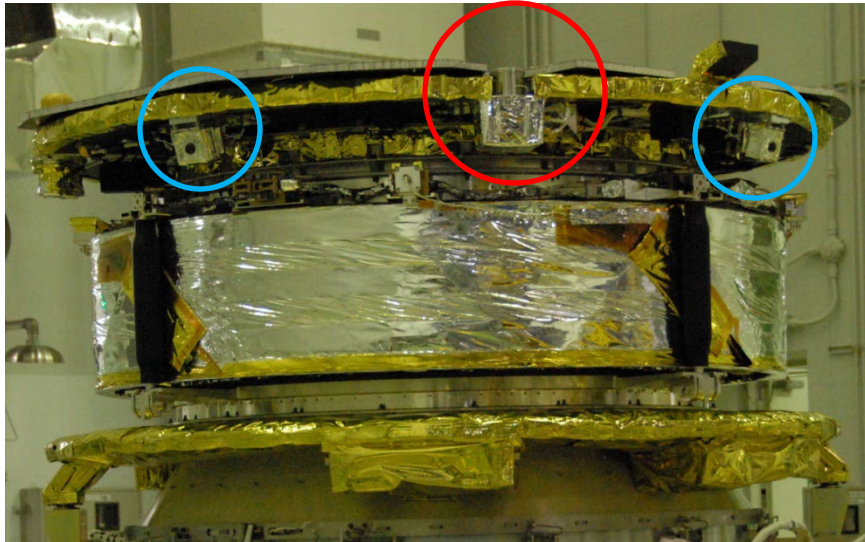
膜面展開方法



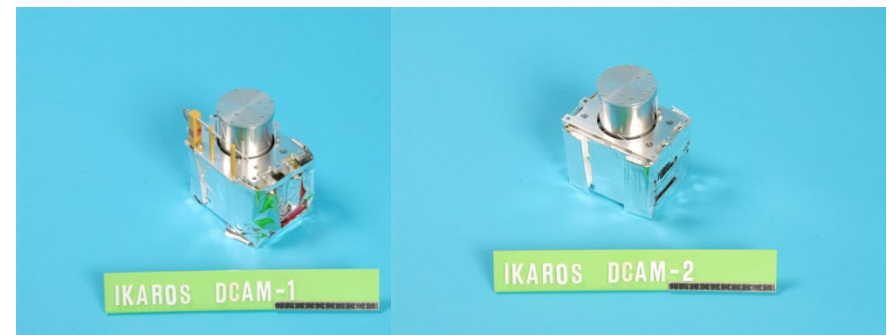
膜面展開手順



IKAROSのカメラ

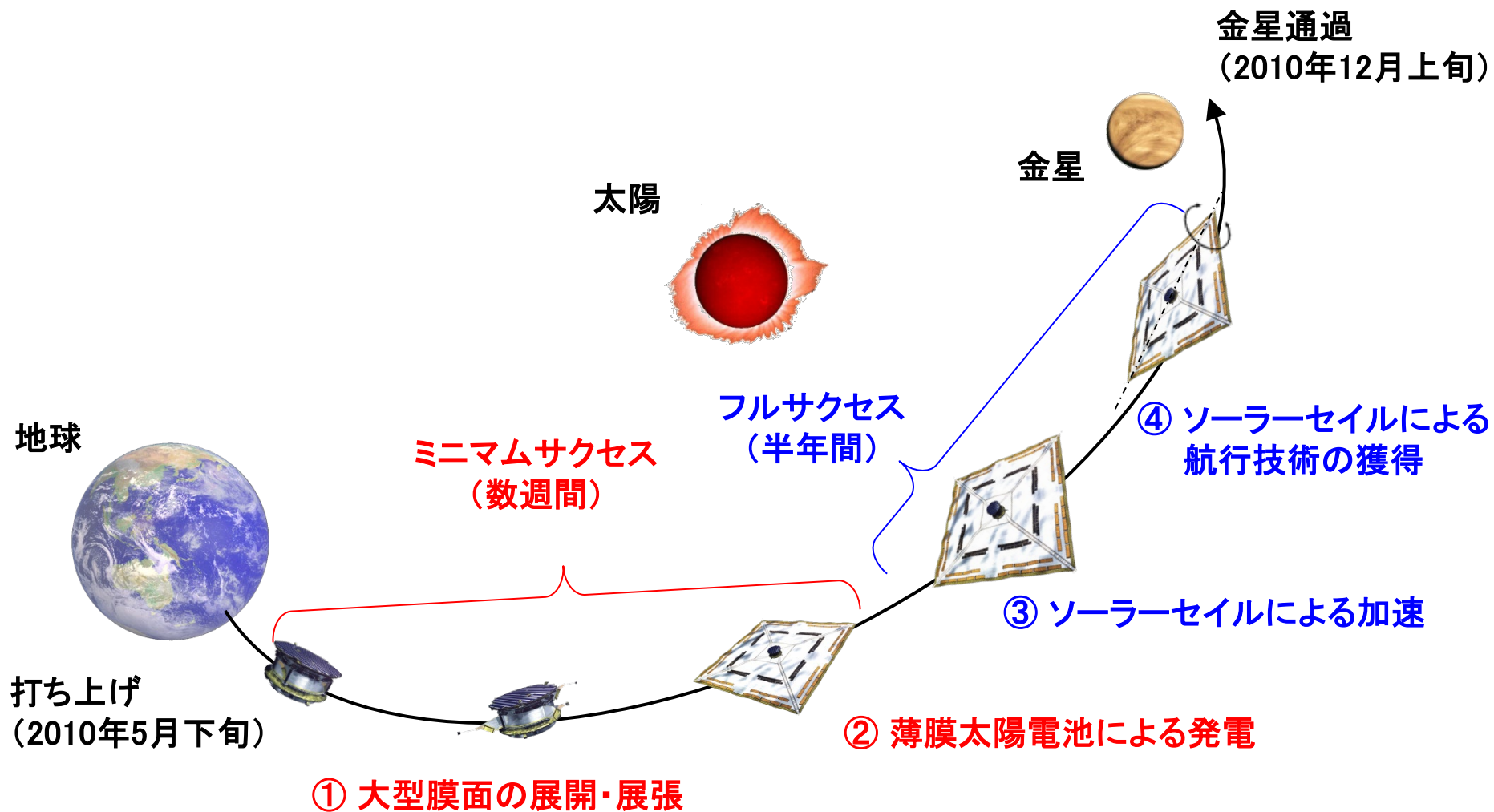


モニタカメラ(4台)



分離カメラ(2台)

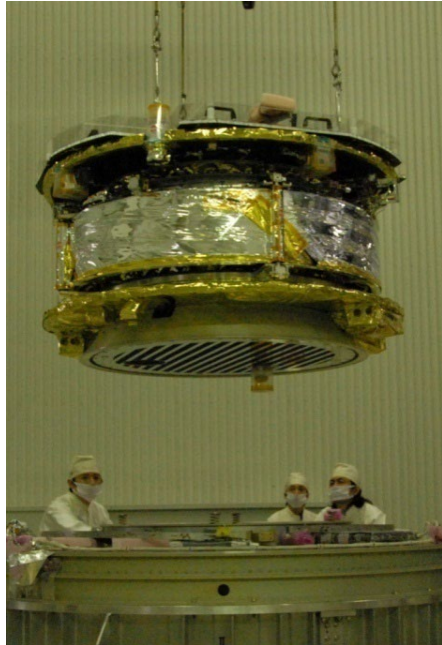
IKAROSのミッション



いずれも成功すれば世界初の快挙
ソーラーセイル, ソーラー電力セイルの実証

IKAROSの搭載・打ち上げ

2010年5月21日(金)6時58分22秒(日本標準時),
H2Aロケット17号機により金星探査機「あかつき」と相乗りで
種子島宇宙センターから打上げられた.



IKAROS搭載 H2Aロケット17号機



打ち上げ

先端マス解放後のモニタカメラ画像

2010年5月26日に先端マス解放を実施

モニタカメラ1

先端マス



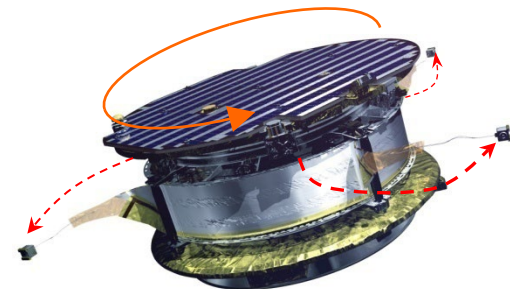
モニタカメラ2



モニタカメラ3

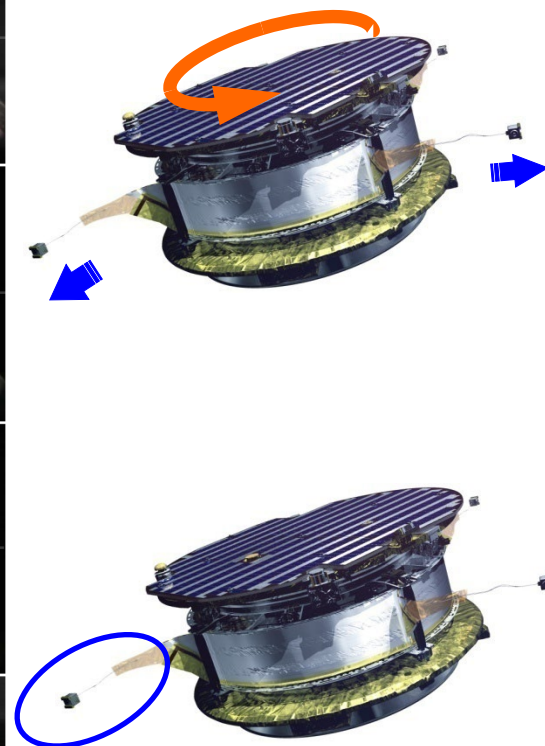
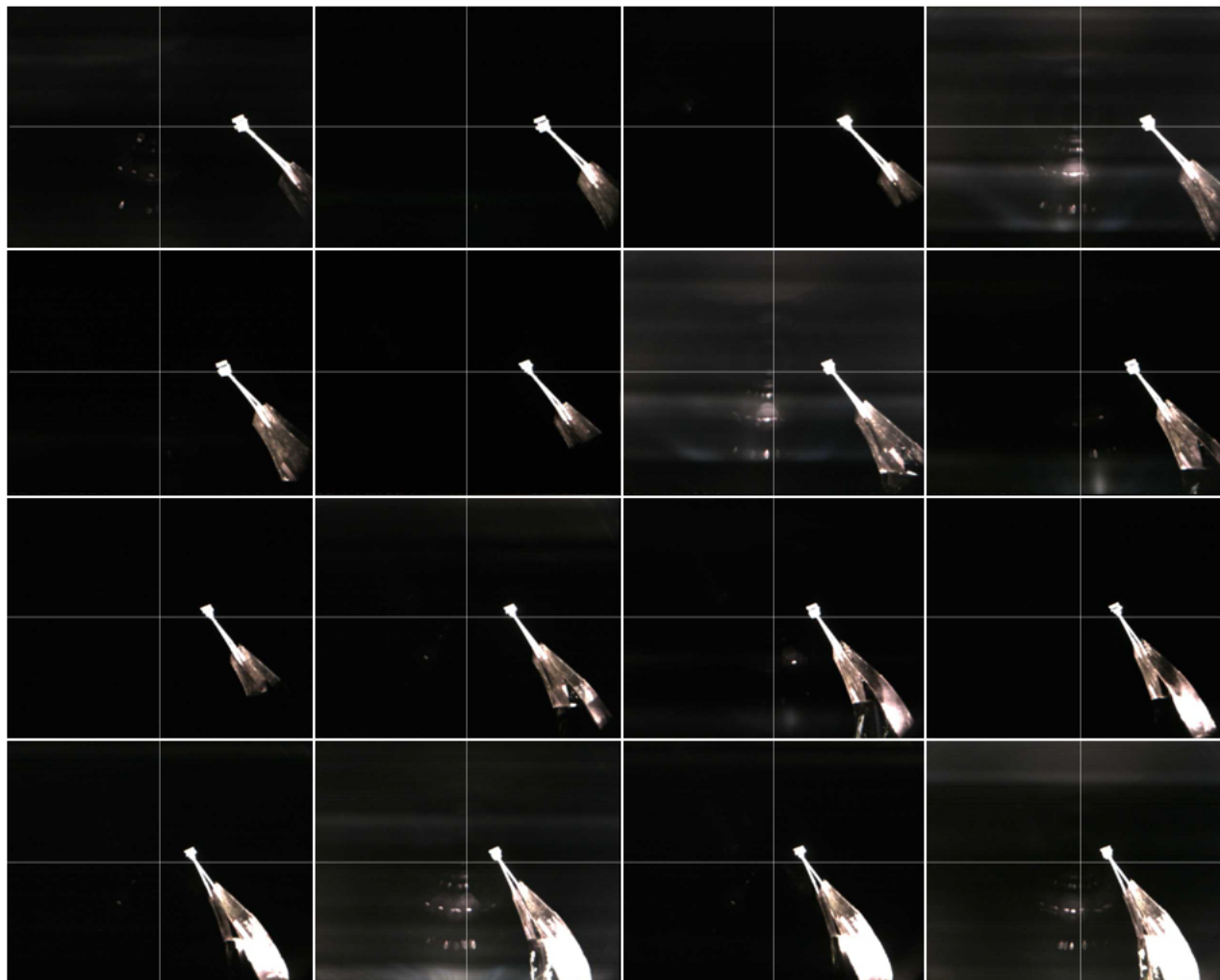


モニタカメラ4



一次展開中のモニタカメラ画像（初期）

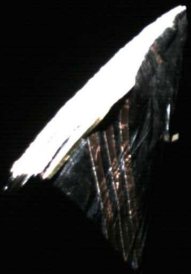
2010年6月2日に一次展開を開始



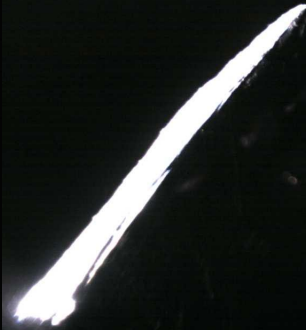
(3 秒毎)

一次展開中のモニタカメラ画像

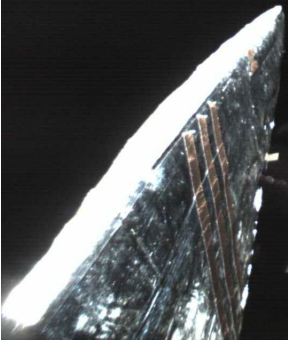
モニタカメラ1



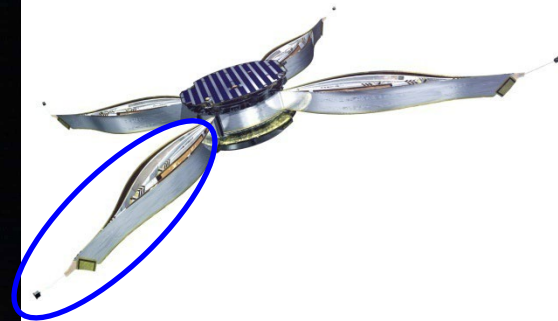
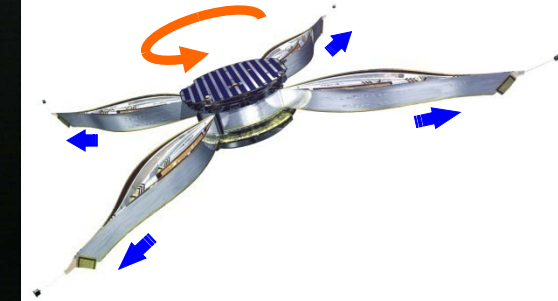
モニタカメラ2



モニタカメラ3



モニタカメラ4



一次展開後のモニタカメラ画像

2010年6月8日に一次展開を終了

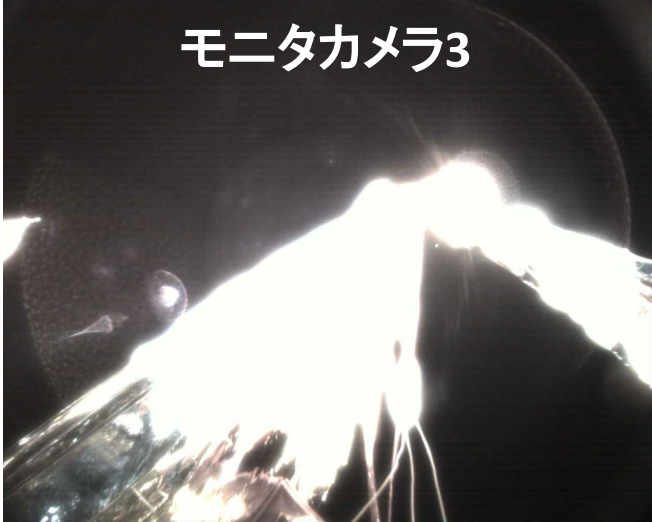
モニタカメラ1



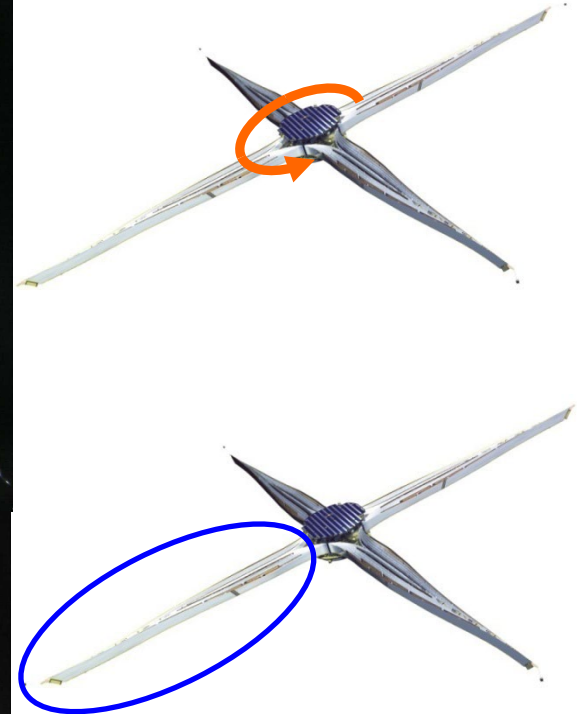
モニタカメラ2



モニタカメラ3



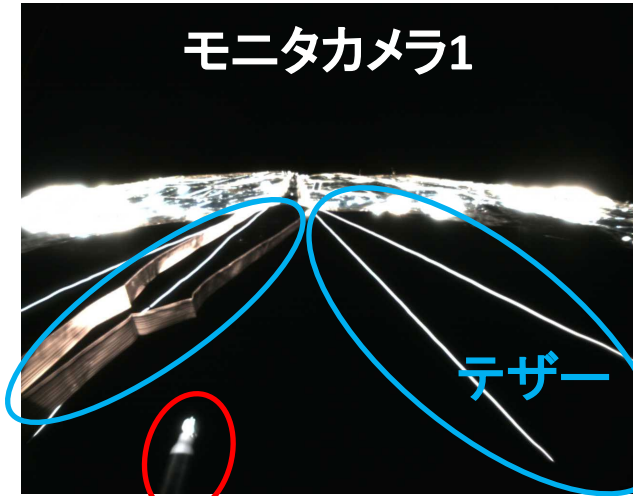
モニタカメラ4



二次展開後のモニタカメラ画像

2010年6月9日に二次展開を実施

モニタカメラ1



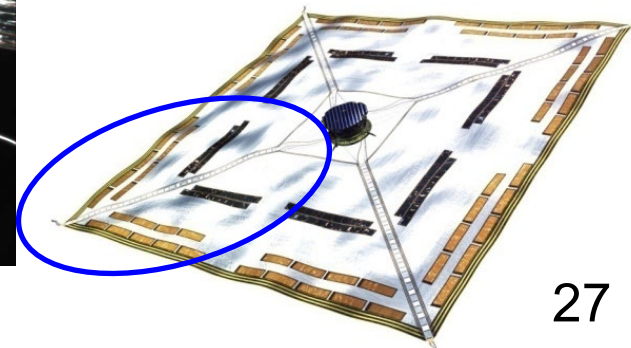
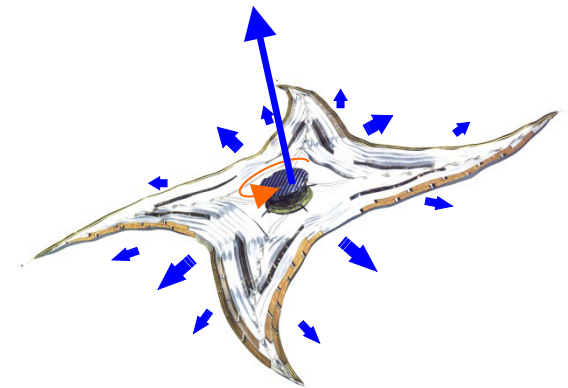
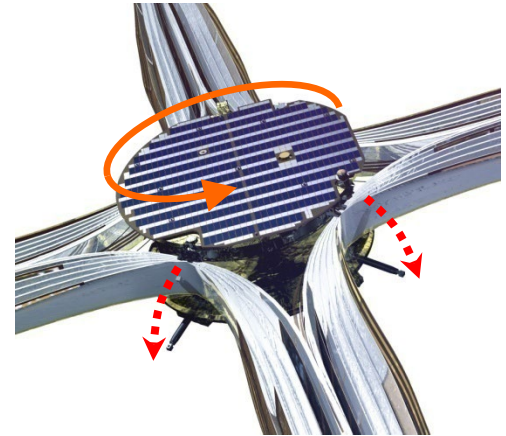
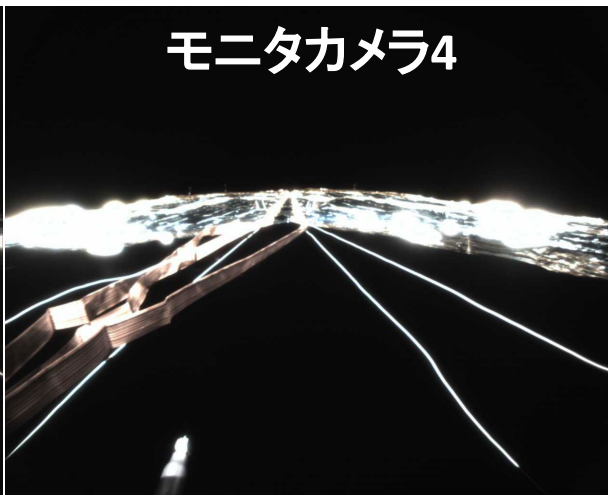
モニタカメラ2



モニタカメラ3

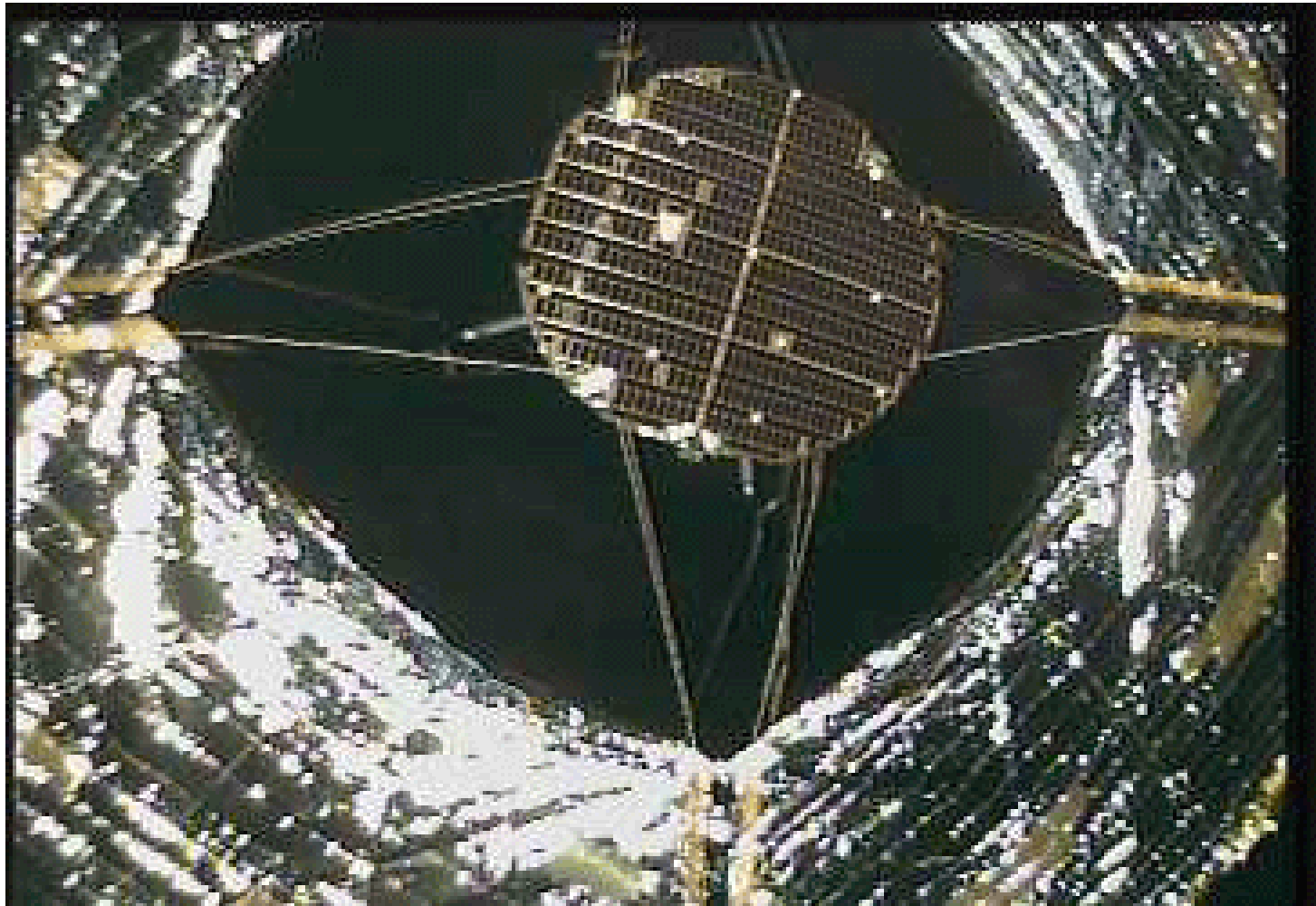


モニタカメラ4

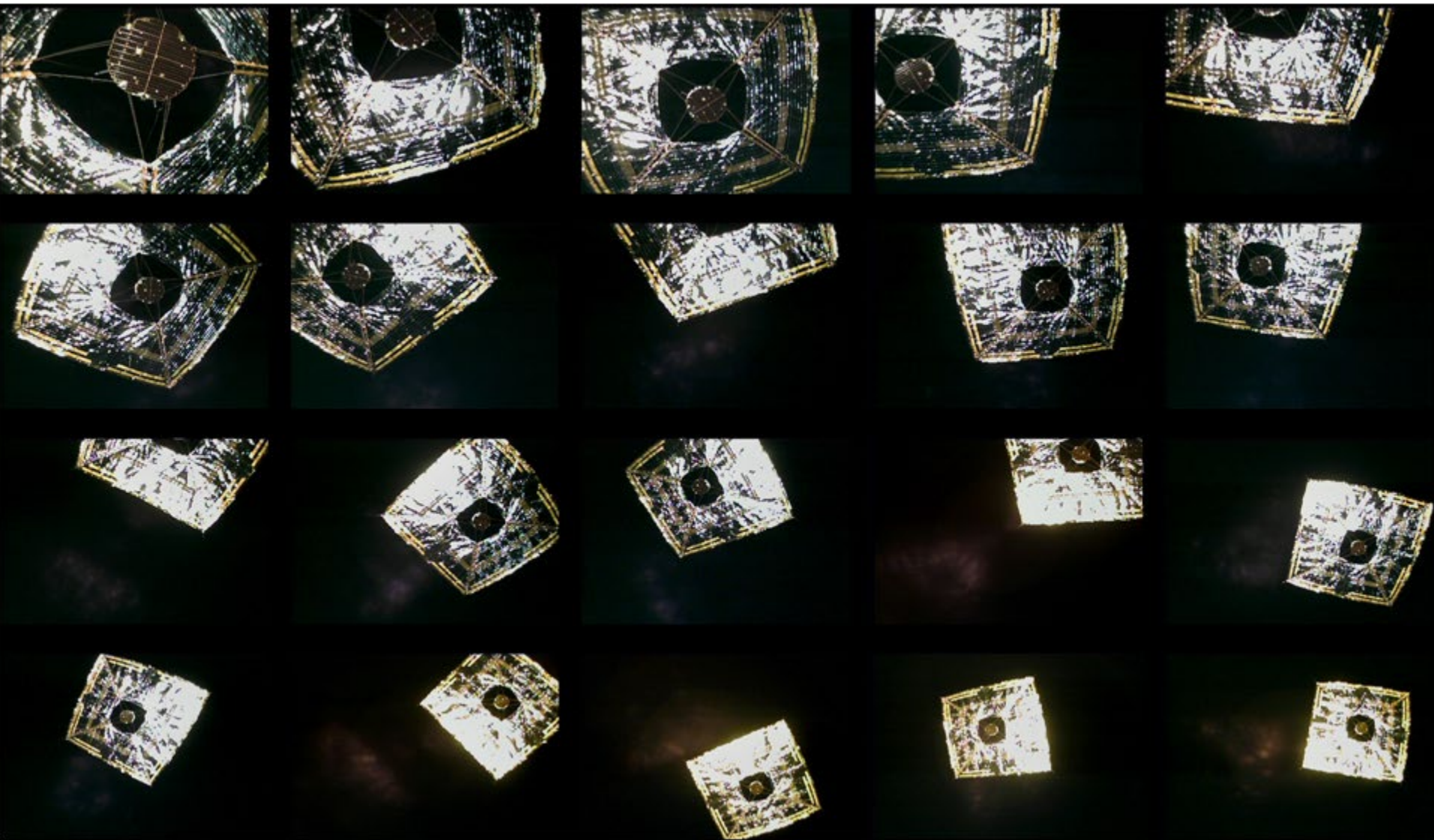


分離カメラ実験

2010年6月14日に分離カメラによる撮像実験を実施

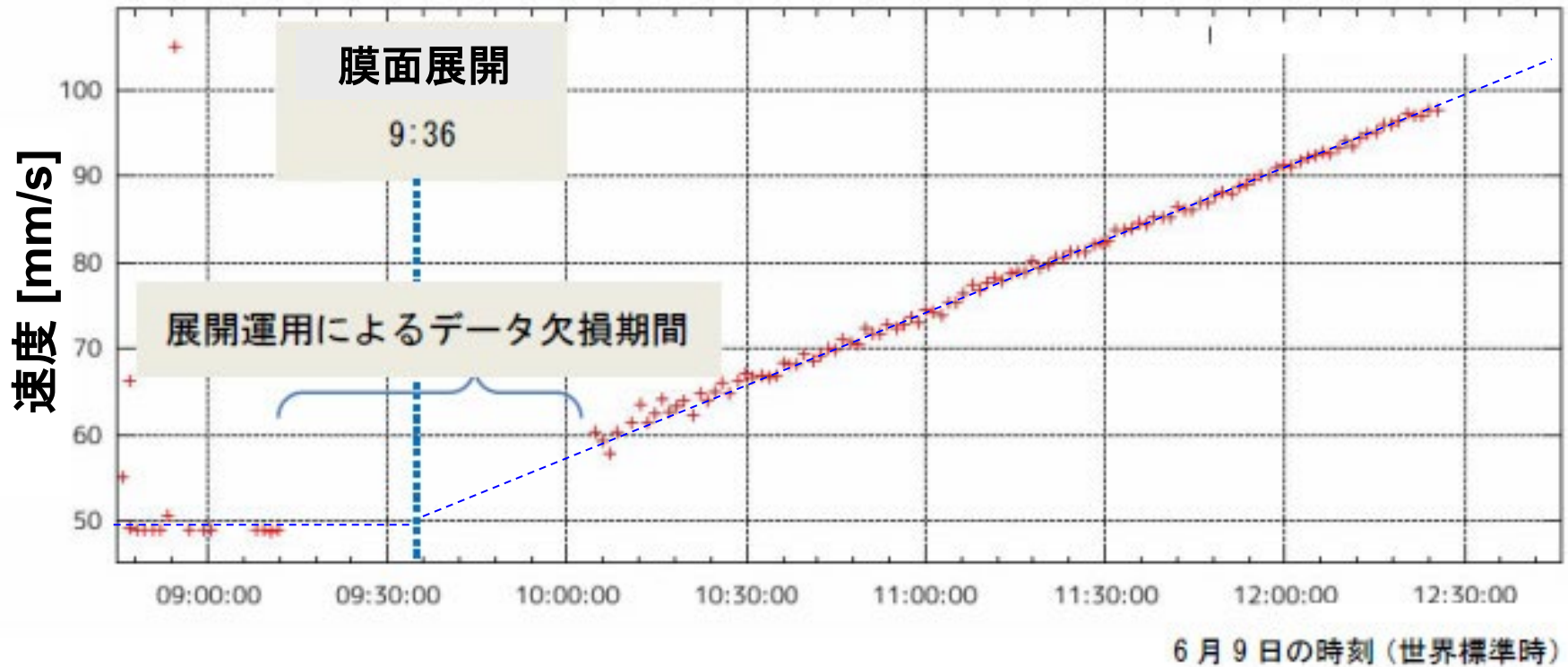


分離カメラ実験の画像



ソーラーセイルによる加速

2010年6月9日に速度変化からソーラーセイルによる加速を確認

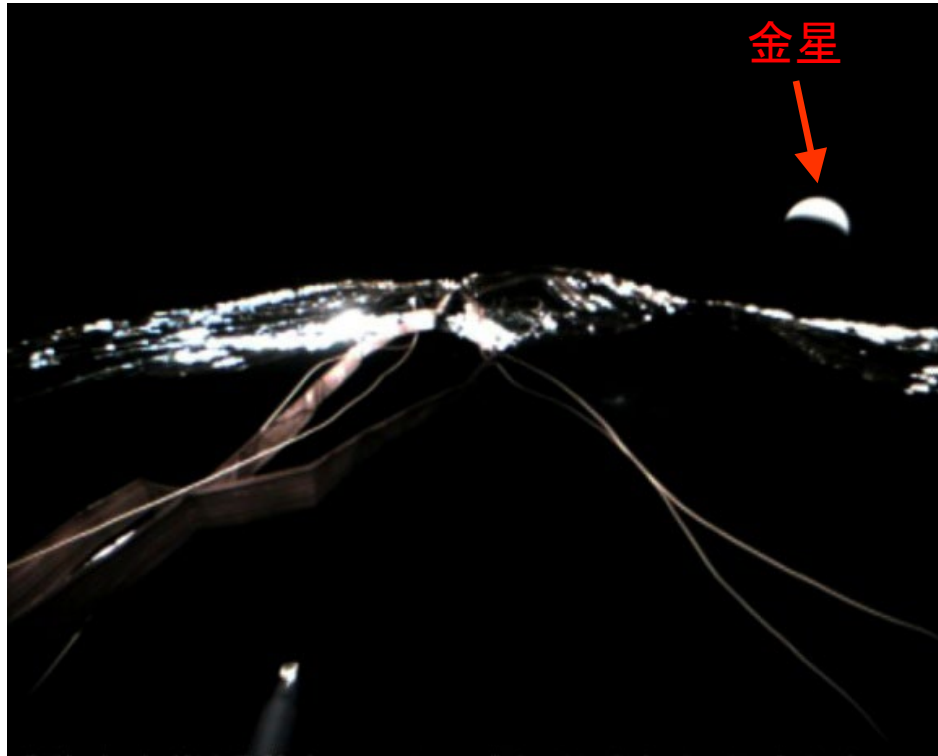


ドップラーシフトから算出された太陽光圧による推力=1.1mN
(設計値とほぼ一致)

世界初のソーラーセイルの誕生！

金星通過

2010年12月8日に金星から約8万kmの距離を接近通過(フライバイ)



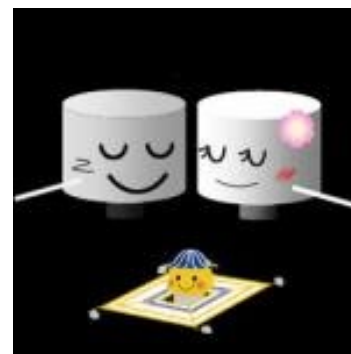
世界記録に認定

IKAROSと分離カメラがギネス世界記録™に認定された。

1. 最初の惑星間ソーラーセイル宇宙機「IKAROS」
(First interplanetary solar sail spacecraft)
2. 最小の惑星間子衛星「DCAM1とDCAM2」
(Smallest interplanetary subsatellite)



※ギネス世界記録™はギネスワールドレコードリミテッドの登録商標



停波作業

2025年5月15日に停波作業を行い、IKAROS運用を終了した。

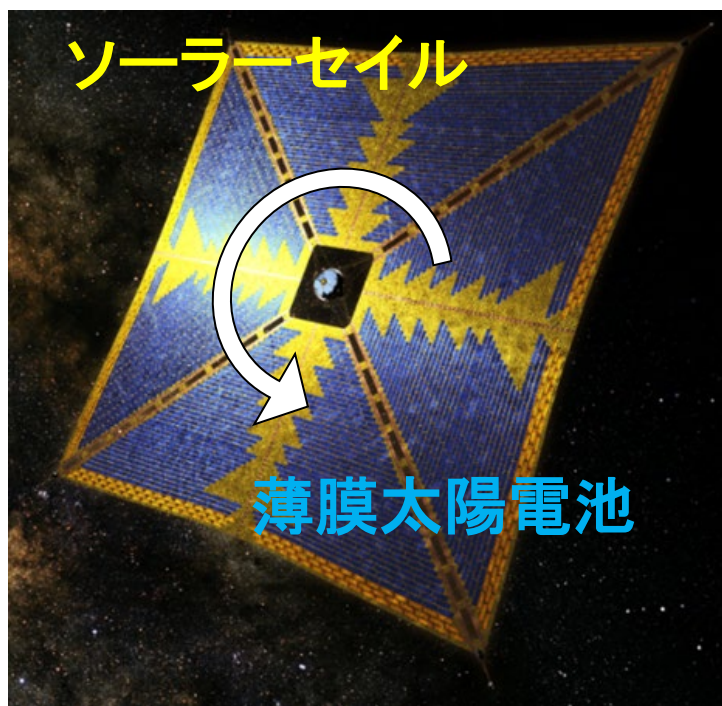


長い間、IKAROSを応援くださり、誠にありがとうございました！！
IKAROSの先を見据えたプログラムはこれからが本番です。
今後ともよろしくお願いいたします。

- IKAROS
- **OKEANOS**
- OPENSプログラム
- 月面科学プログラム
- Moon to Mars Innovation
(宇宙探査イノベーションハブ)

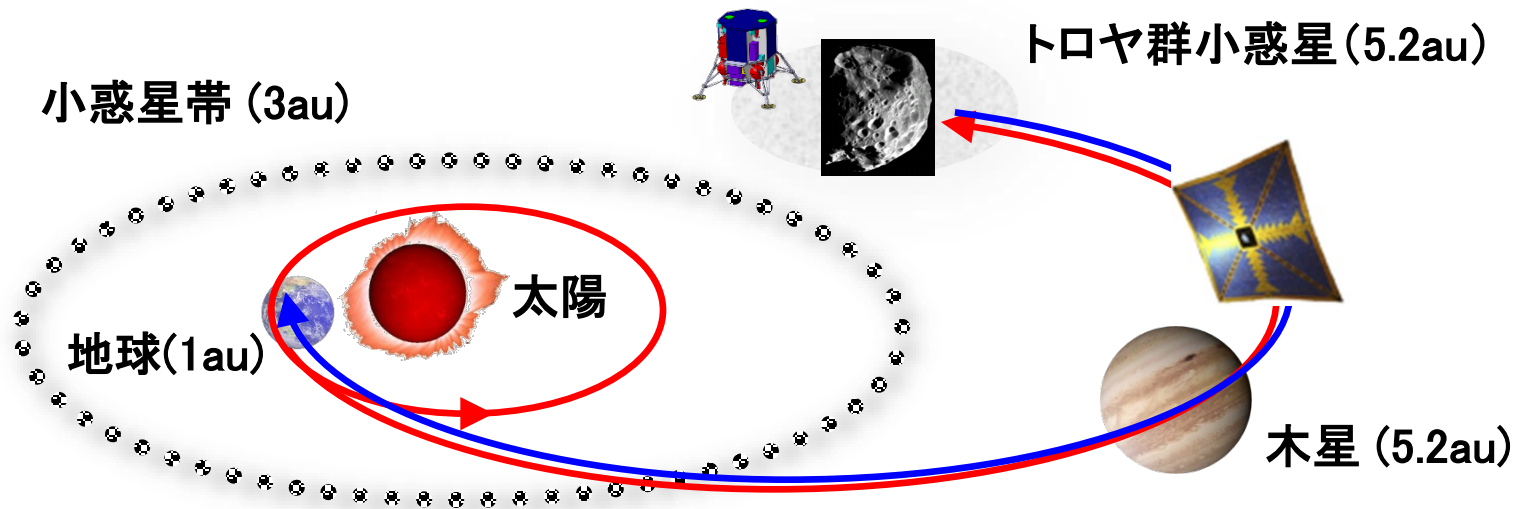
OKEANOS

- ・IKAROSの約10倍の面積(2000m²)の膜のソーラーセイルに加え、はやぶさの約2倍の性能のイオンエンジンを駆動し、**ハイブリッド推進**を行う。
- ・膜全体に薄膜太陽電池を貼り付け、大電力を確保する。



燃料: 大型のソーラーセイル(燃料なし) + 高性能なイオンエンジン(燃料節約)
電力: 大面積の薄膜太陽電池

OKEANOSによるトロヤ群小惑星サンプルリターン

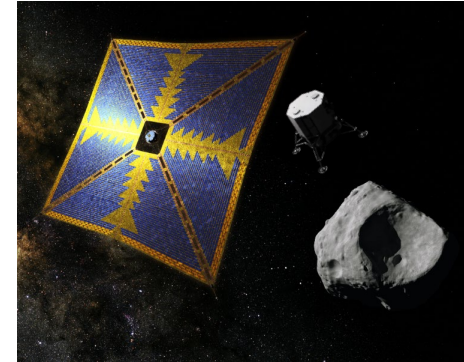
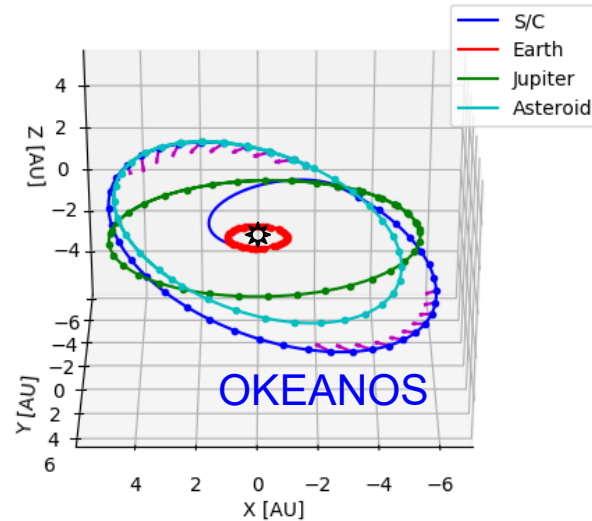
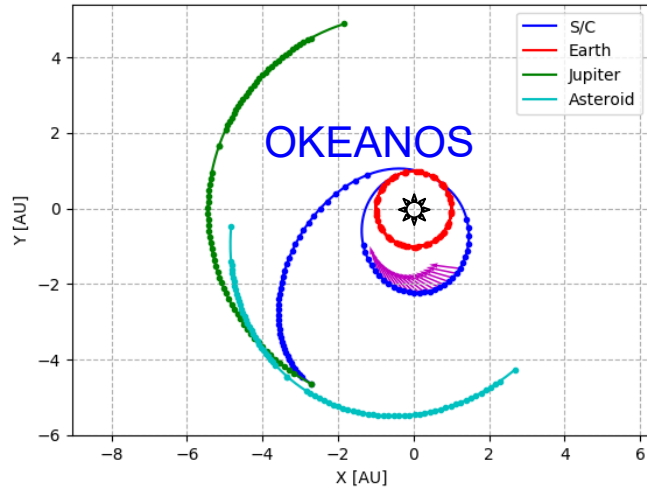


H3ロケットで打ち上げ
地球スイングバイ
(クーリング観測)
木星スイングバイ
トロヤ群小惑星ランデブー
(トロヤ群小惑星観測)
トロヤ群小惑星出発
木星通過
地球帰還

- ・赤外線背景放射観測
- ・ダスト観測
- ・ガンマ線バースト観測
- ・磁場観測

- ・リモート観測(親機)
- ・着陸観測(子機)
- ・試料採取・分析(子機)

OKEANOSによるトロヤ群小惑星サンプルリターン



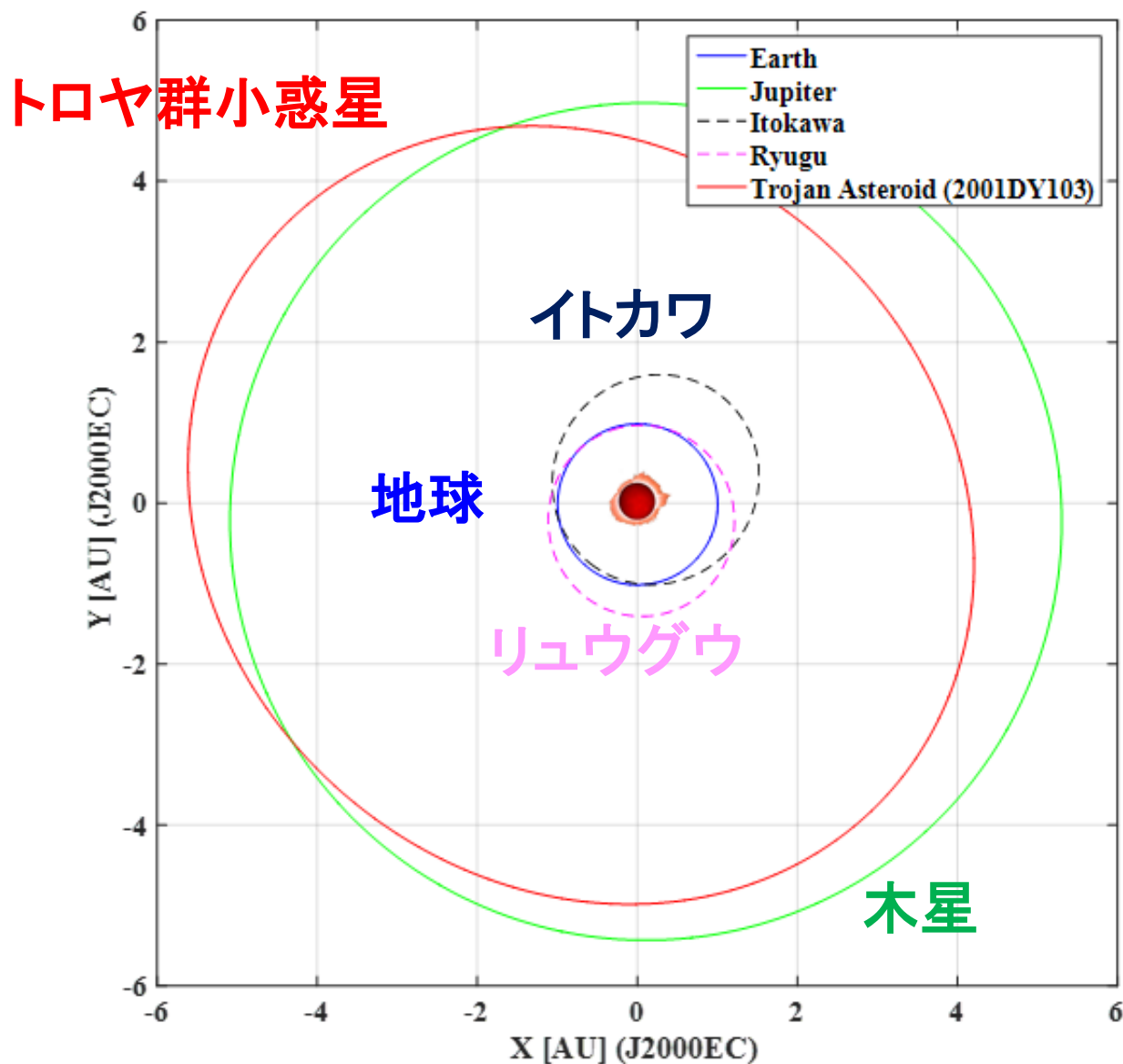
質量: 1300kg+150kg
太陽電池: 2000m²

フェーズ	開始	終了	ΔV
2-year EDVEGA	2026/01/20	2027/11/04	954 m/s
地球－木星	2027/11/04	2030/08/15	-
木星－1998WR10	2030/08/15	2039/01/20	2498 m/s
1998WR10－木星	2040/07/20	2054/05/06	2209 m/s
木星－地球	2054/05/06	2057/12/19	-

13年(往路)3.5km/s(高性能イオンエンジン)

17年(復路)2.2km/s(高性能イオンエンジン)

イトカワ・リュウグウ・木星・トロヤ群小惑星



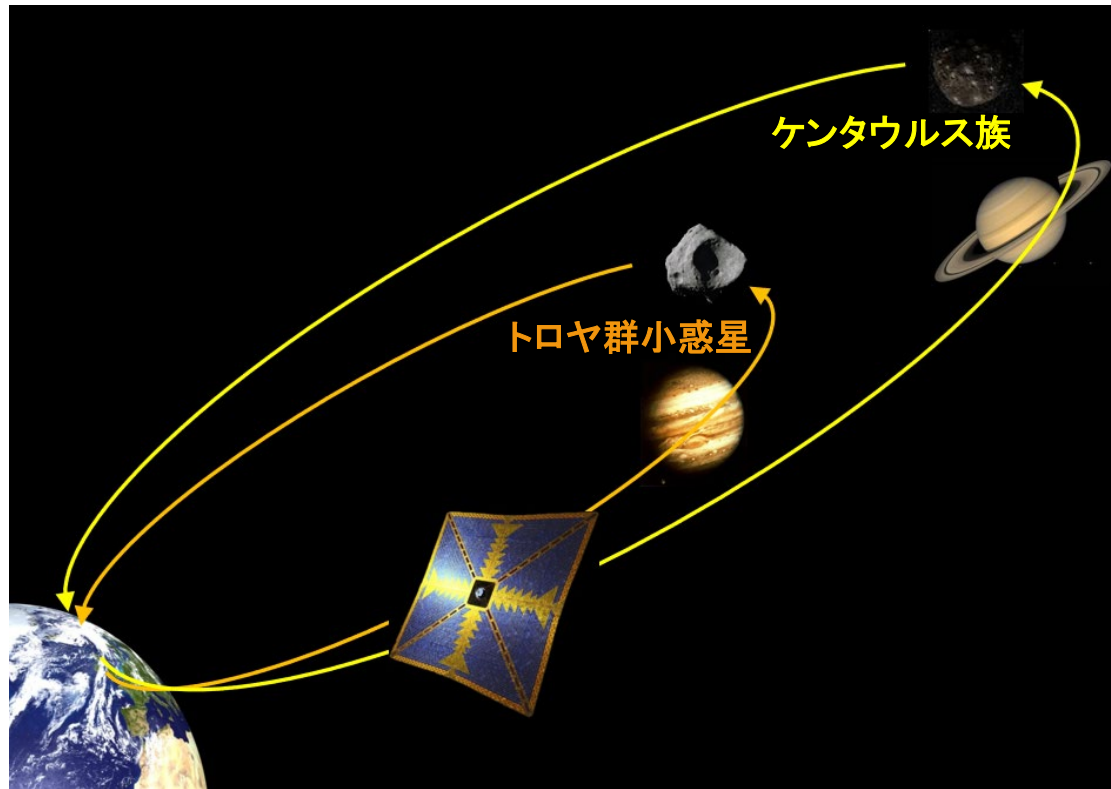
OKEANOSのイメージ



ミッションの主な特徴

- ・**世界初**のソーラーセイルとイオンエンジンのハイブリッド推進
- ・**世界最高**性能のイオンエンジン
- ・**世界初**の小惑星帯以遠での宇宙赤外背景放射観測
- ・**世界初**のトロヤ群小惑星ランデブー
- ・**世界初**のトロヤ群小惑星サンプル分析
- ・**世界初**の外惑星領域往復
- ・**世界最高**速度の地球帰還カプセル

外惑星領域小天体の着陸・サンプルリターン



大型ソーラー電力セイル＋高性能イオンエンジンの組み合わせ

→ 外惑星領域(木星圏・土星圏)小天体の着陸・サンプルリターンの唯一の解？

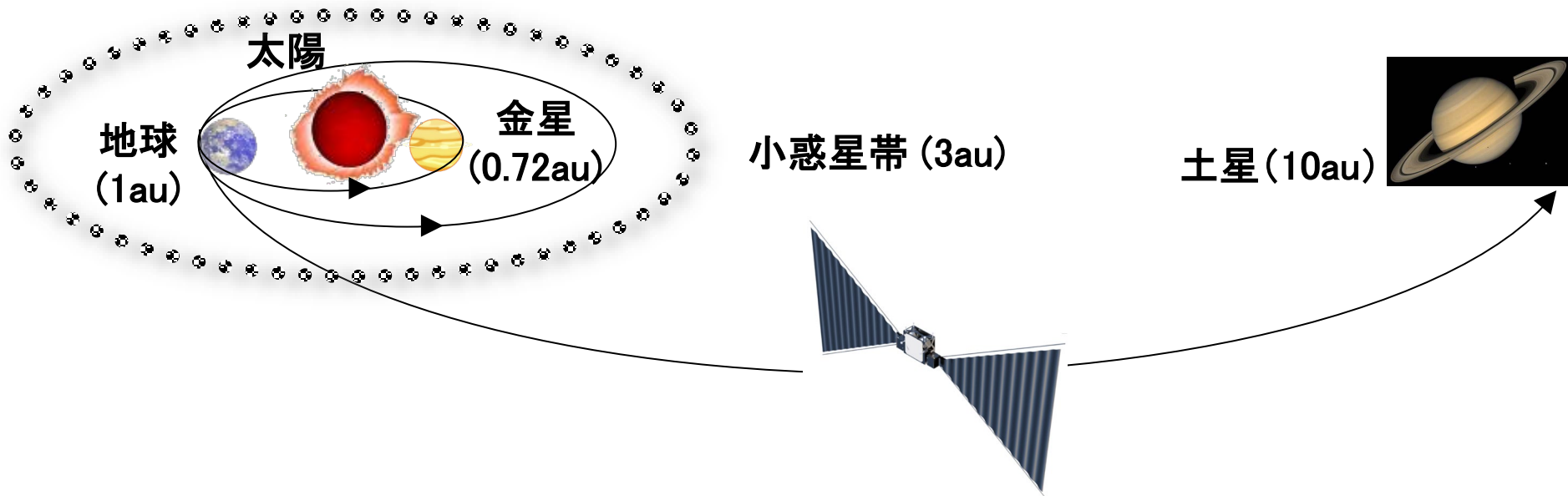
OKEANOSは戦略的中型計画の最終候補になったが採択には至らなかった。

→ コストオーバーが原因(300億円に対し数10億円超)。

→ コストダウンに対応した新しい解を見つける。

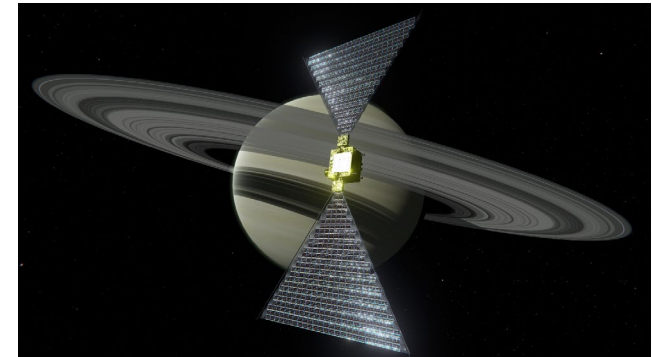
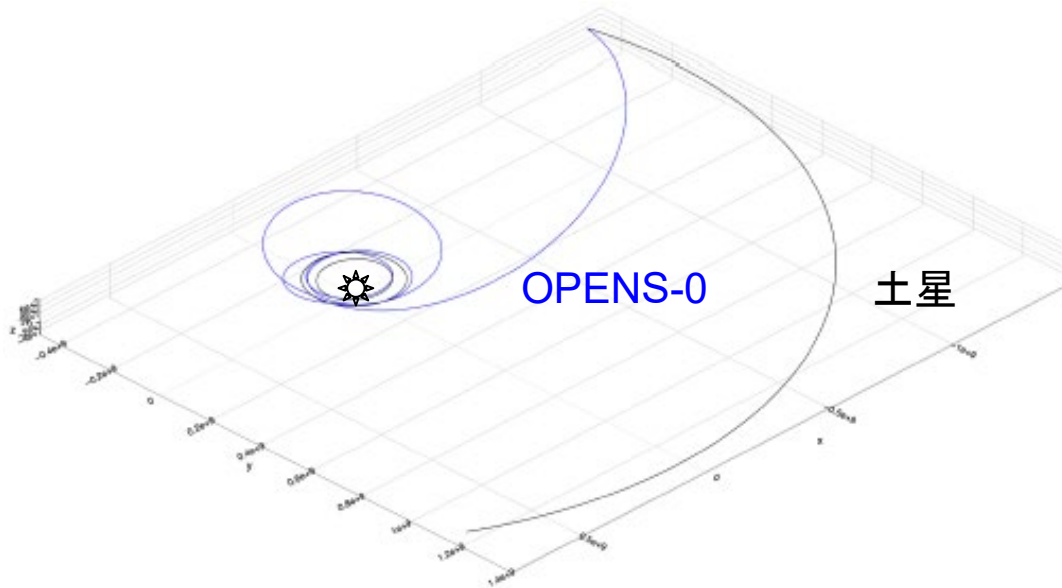
- IKAROS
- OKEANOS
- **OPENS**プログラム
- 月面科学プログラム
- Moon to Mars Innovation
(宇宙探査イノベーションハブ)

OPENS-0による土星フライバイ



イプシロンSロケットでの打上げ
地球スイングバイ
金星スイングバイ
地球スイングバイ
(化学推進による ΔV)
地球スイングバイ
土星フライバイ

OPENS-0による土星フライバイ



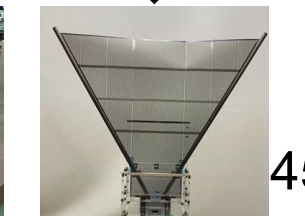
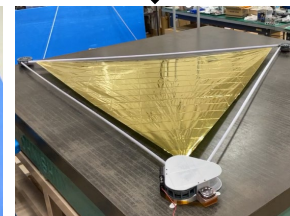
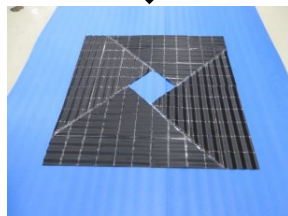
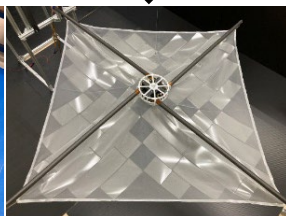
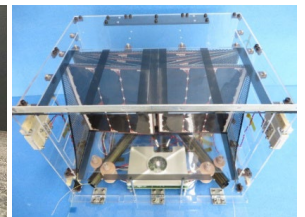
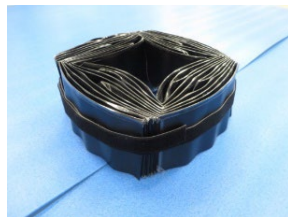
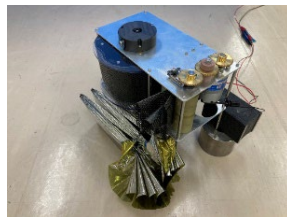
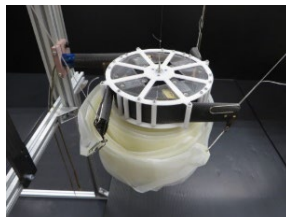
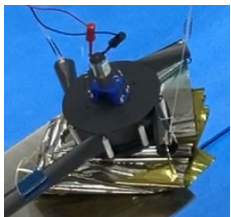
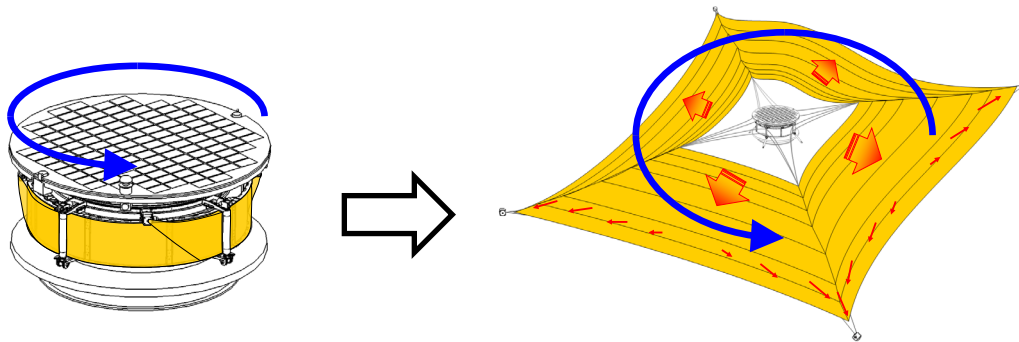
質量: 150-200kg
太陽電池: 26m²

フェーズ	開始	終了	ΔV
地球－地球	2030/05/10	2031/05/11	-
地球－金星	2031/05/11	2031/11/17	-
金星－地球	2031/11/17	2032/10/10	-
3-year DVEGA	2032/10/10	2035/09/17	540 m/s
地球－土星	2035/09/17	2040/12/31	-

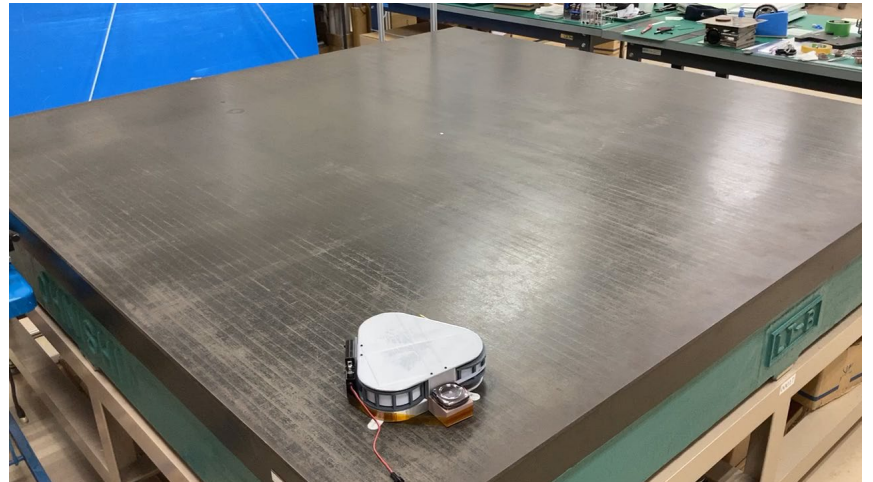
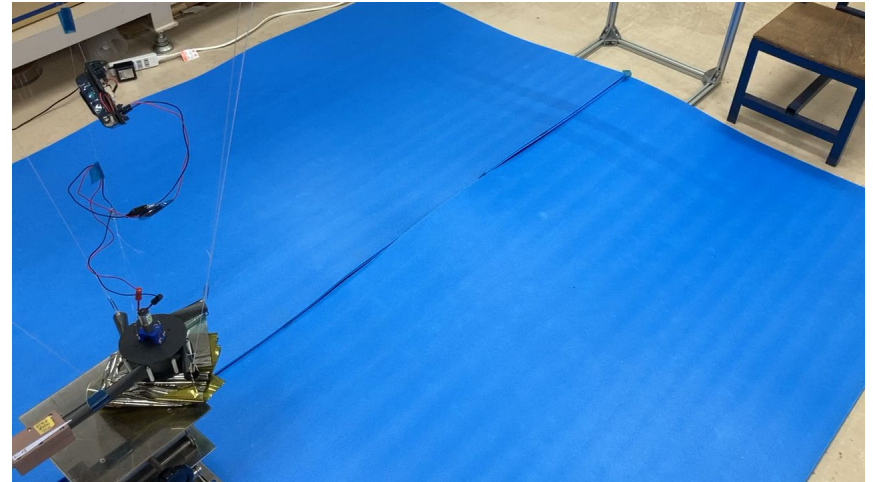
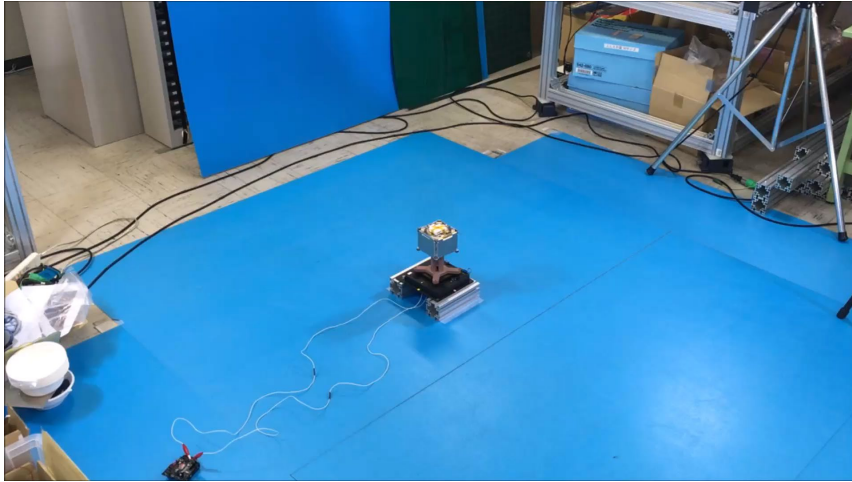
11年(片道), 540m/s(化学推進)

太陽電池膜の開発

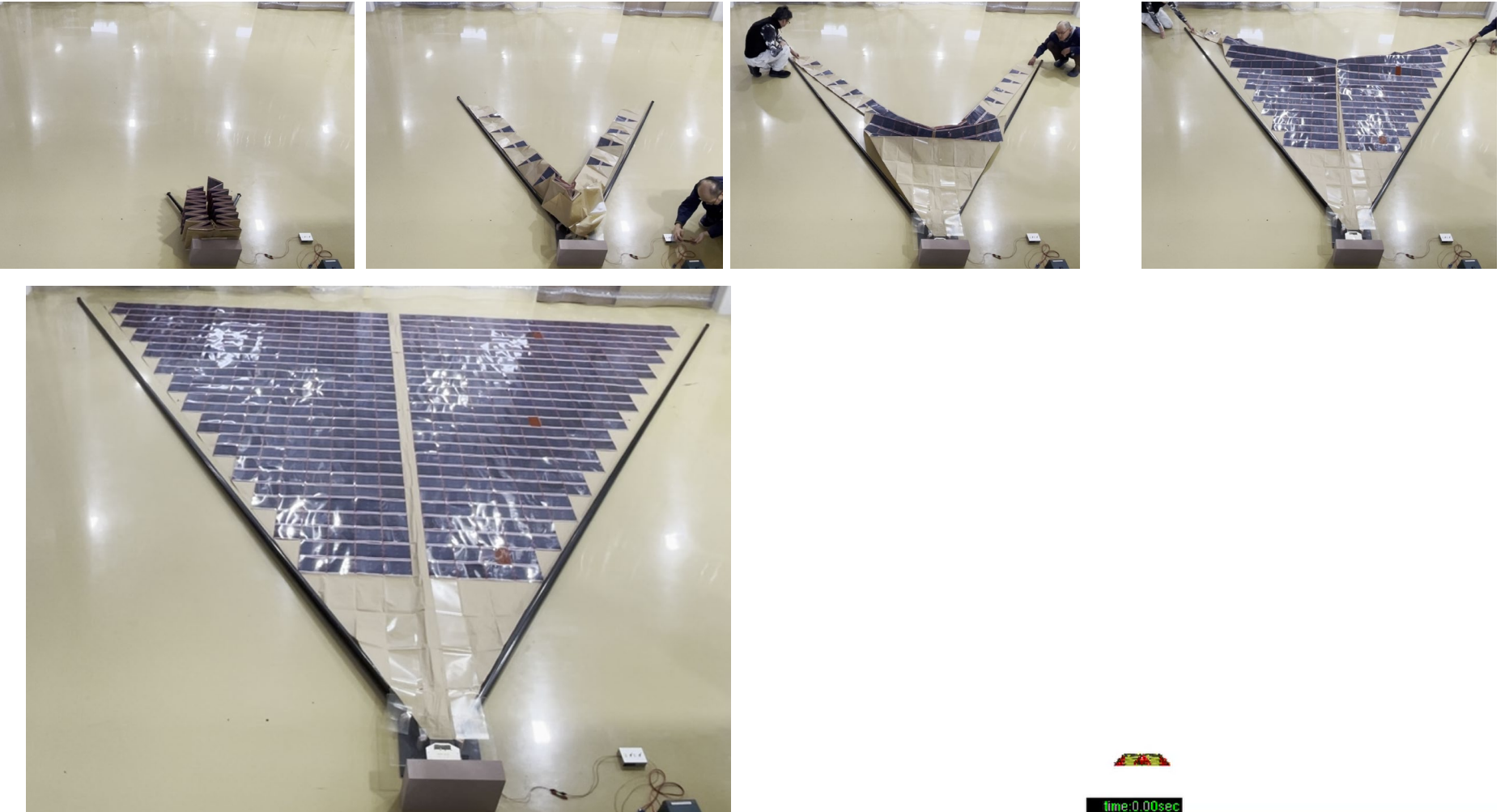
- ・太陽電池で土星探査を実現した探査機はこれまでにない.
 - ・OPENS-0は150-200kgの小型探査機のため, 小電力(60W@10au)で実現可.
 - ・太陽電池パドルを太陽電池膜に変更することを提案し, 採択された.
 - ・膜面積は100m²以下であればブーム方式で実現可能.
- (ブーム方式はスピン方式より重い, 3軸姿勢制御にできるため観測等に有利)



ブーム方式膜展開構造



OPENS-0用の太陽電池膜

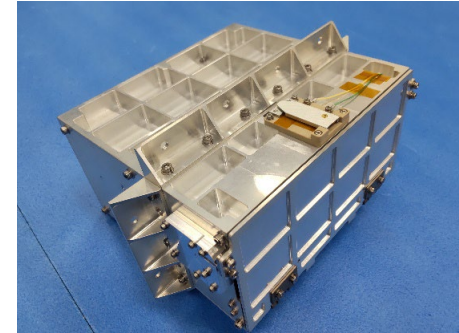


2本のブームを伸展し、薄膜太陽電池を貼り付けた三角形三軸織物を展開する。
膜面積: 13m² 発電能力: 200W/kg(世界最高)

HELIOS-Rによる太陽電池膜の実証

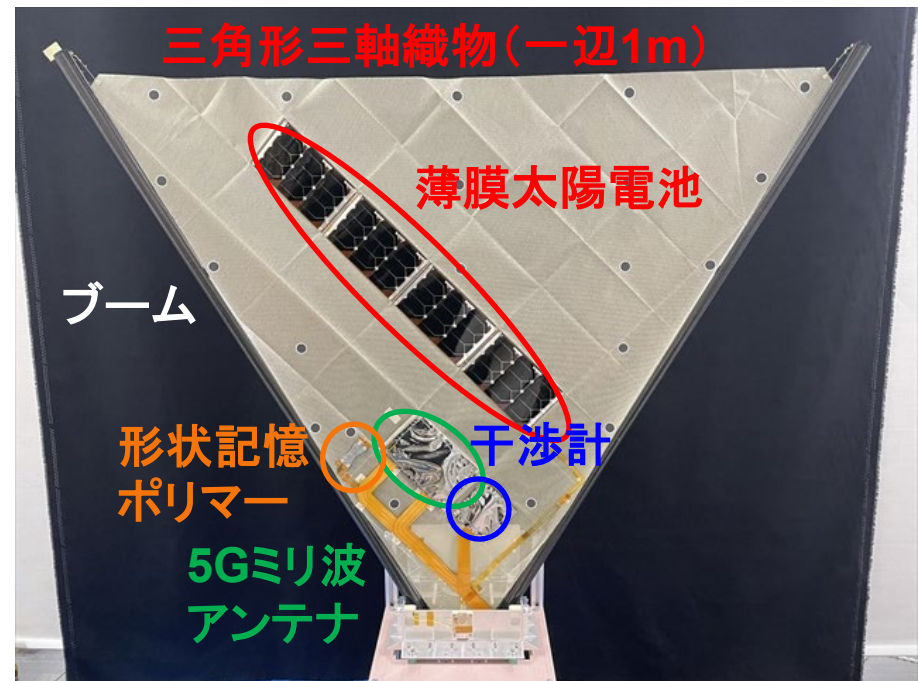
革新的衛星技術実証4号機のミッションコンポーネントHELIOS-Rで太陽電池膜を含む高機能膜・多機能膜の実証を行う。

- ブームによる三角形三軸織物の展開
- 薄膜太陽電池による発電(大電力発電)
- 5Gミリ波アンテナによる通信(大容量通信)
- 干渉計による観測(高分解能観測) ※探査ハブ
- 形状記憶ポリマーによる膜形状制御



打ち上げ: 2025年12月14日

運用: 1年間



ビジネス(小型宇宙機の高機能化・多機能化)

OPENS-0からOPENS-1へ

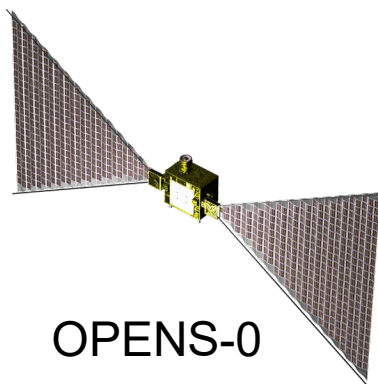
OPENS-0は公募型小型計画のECO&FASTクラスに採択された。

IKAROSのソーラー電力セイル技術の継承先が見つかり、ほっとした。

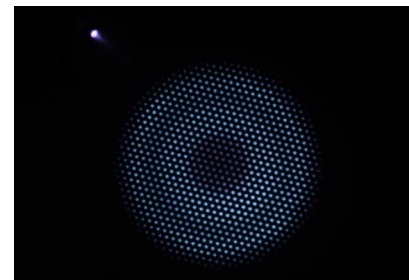
太陽電池による世界初の土星圏探査に挑戦することに、わくわくしている。

ソーラー電力セイルの真価は外惑星領域でイオンエンジンを駆動してこそ発揮される。
(フライバイではなく、ランデブーやサンプルリターンを目指す)

OPENS-0相当に $\mu 10$ イオンエンジンを搭載するミッションについて検討を始めた。



OPENS-0

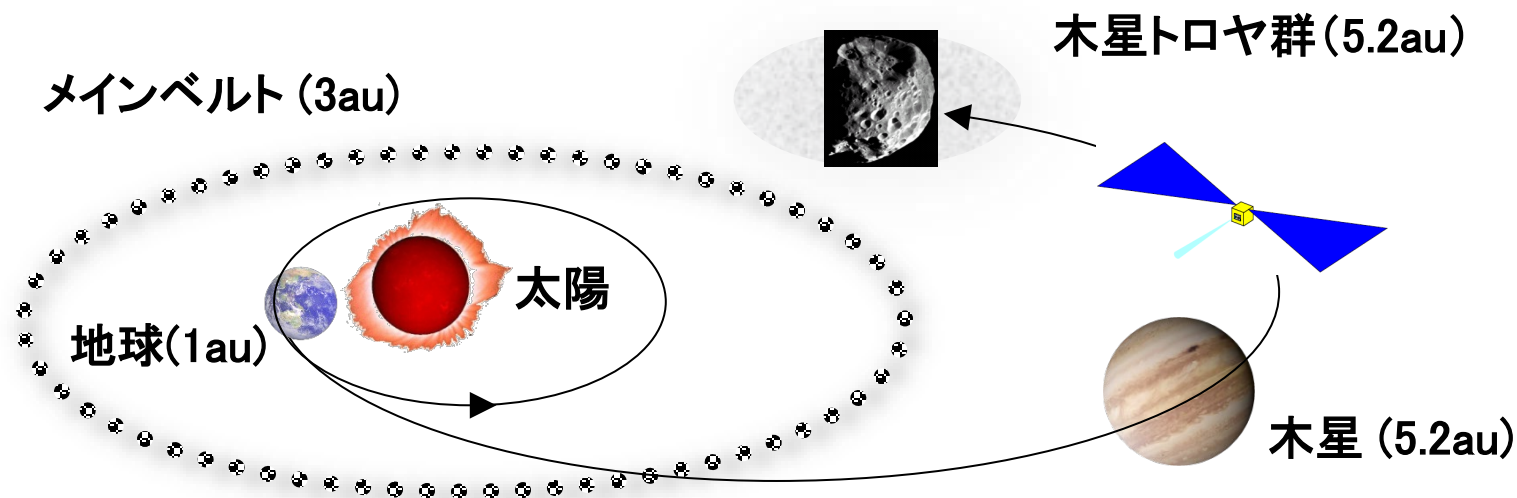


$\mu 10$ イオンエンジン



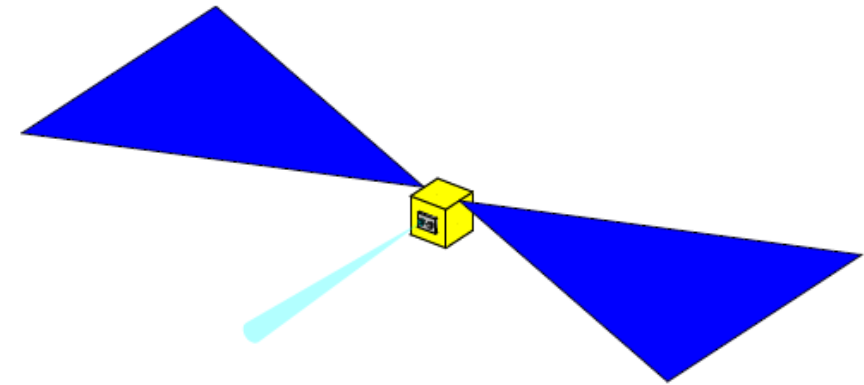
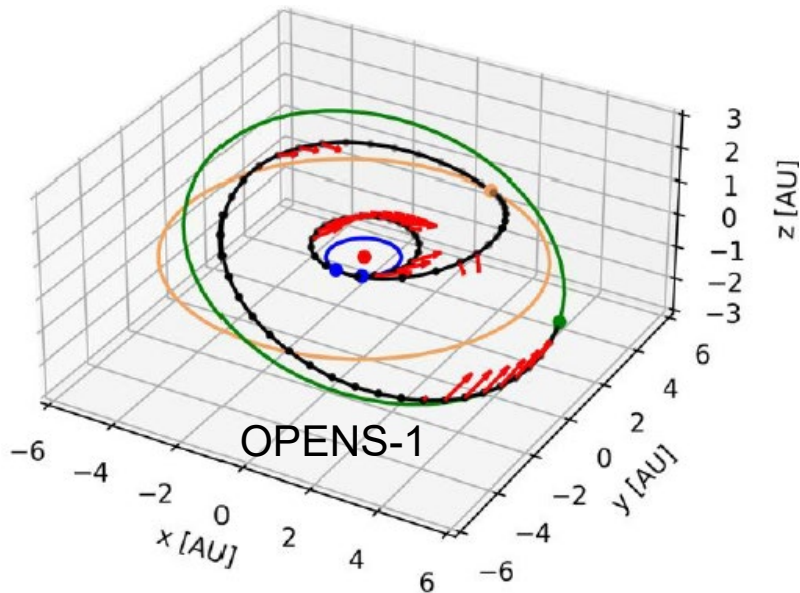
OPENS-1,2

OPENS-1による外惑星領域小天体ランデブー



イプシロンSロケットでの打上げ
(イオンエンジンによる ΔV)
地球スイングバイ
(イオンエンジンによる ΔV)
木星スイングバイ
(イオンエンジンによる ΔV)
木星トロヤ群ランデブー

OPENS-1による外惑星領域小天体ランデブー



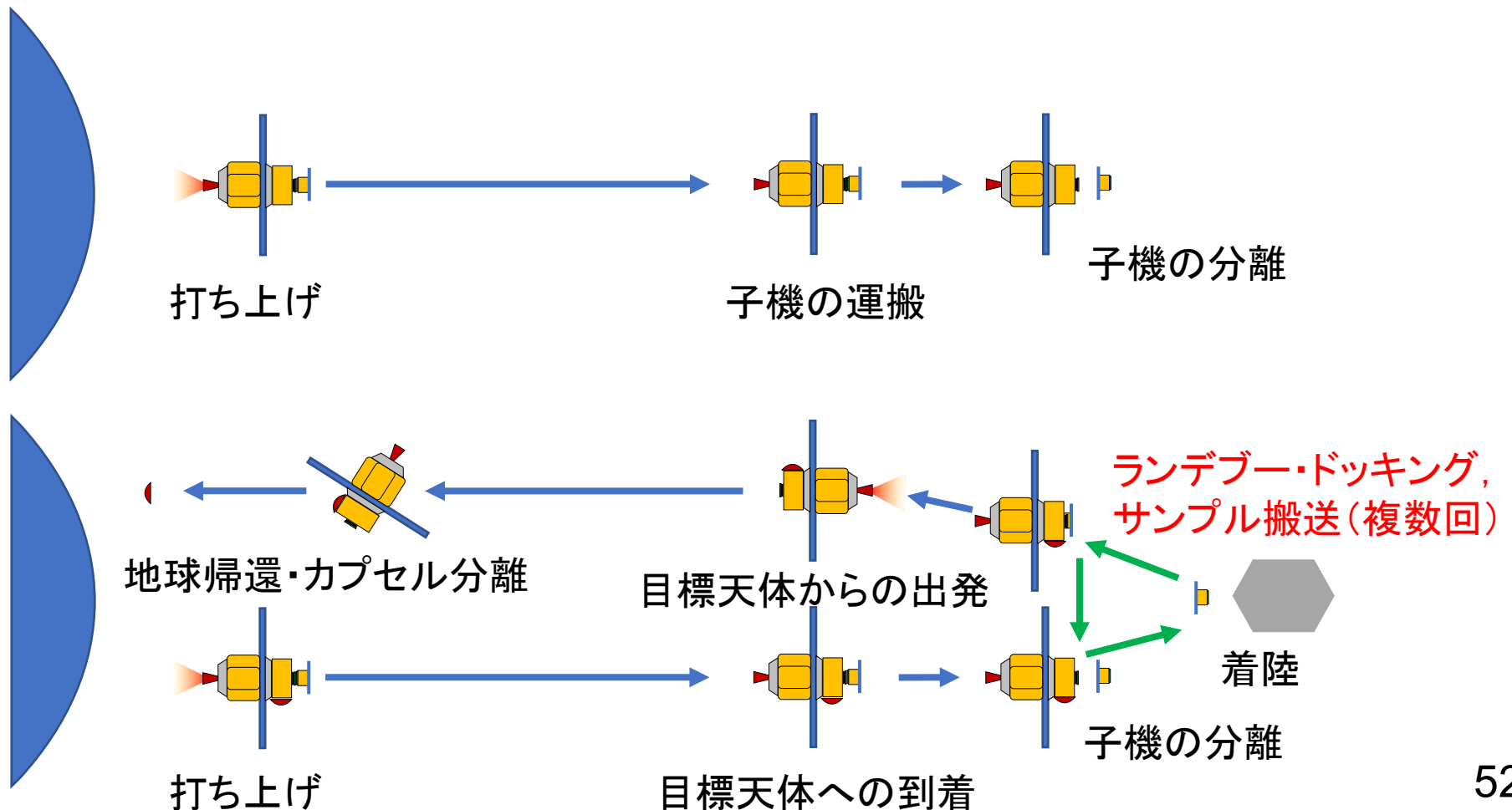
質量: 250kg
太陽電池膜: 34m²

フェーズ	開始	終了	ΔV
2-year EDVEGA	2032/07/19	2034/06/03	797 m/s
地球－木星	2034/06/03	2036/10/26	180 m/s
木星－2000 XN9	2036/10/26	2044/10/09	1437 m/s

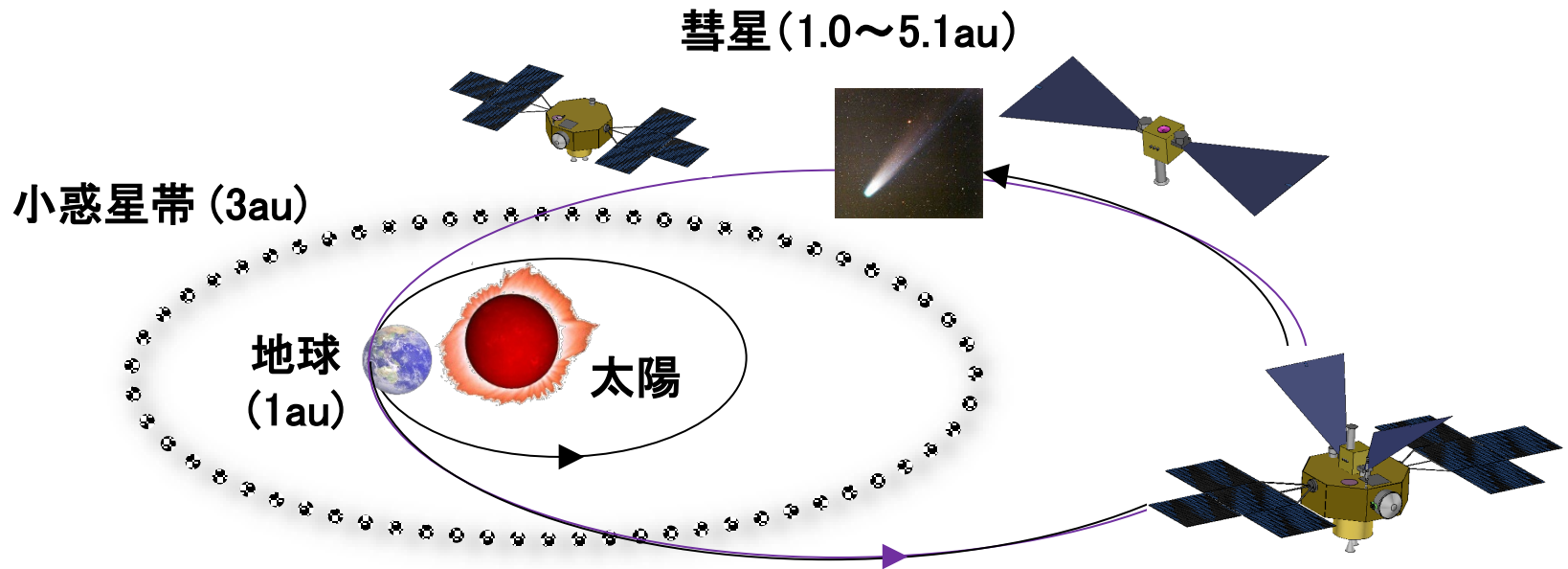
12年(片道), 2.4km/s ($\mu 10$ イオンエンジン)

深宇宙OTVのコンセプト

深宇宙OTVは次世代小天体サンプルリターンで検討されている運び屋。
深宇宙OTVは化学推進系を用いて、深宇宙の目的地まで子機を運搬(・往復)する。
深宇宙OTVは共通設計とすることで、様々な深宇宙ミッションに貢献する。



深宇宙OTV・子機による彗星サンプルリターン



H3ロケットで打ち上げ

(化学推進による ΔV)

地球スイングバイ

(化学推進による ΔV)

彗星ランデブー

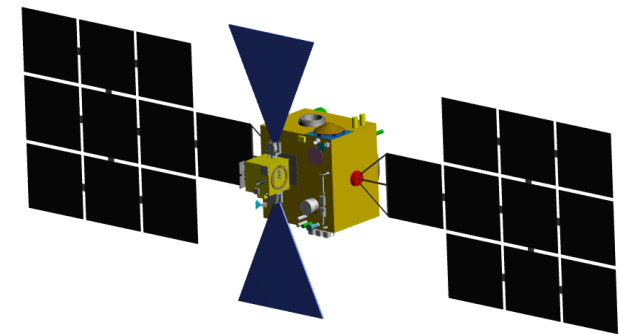
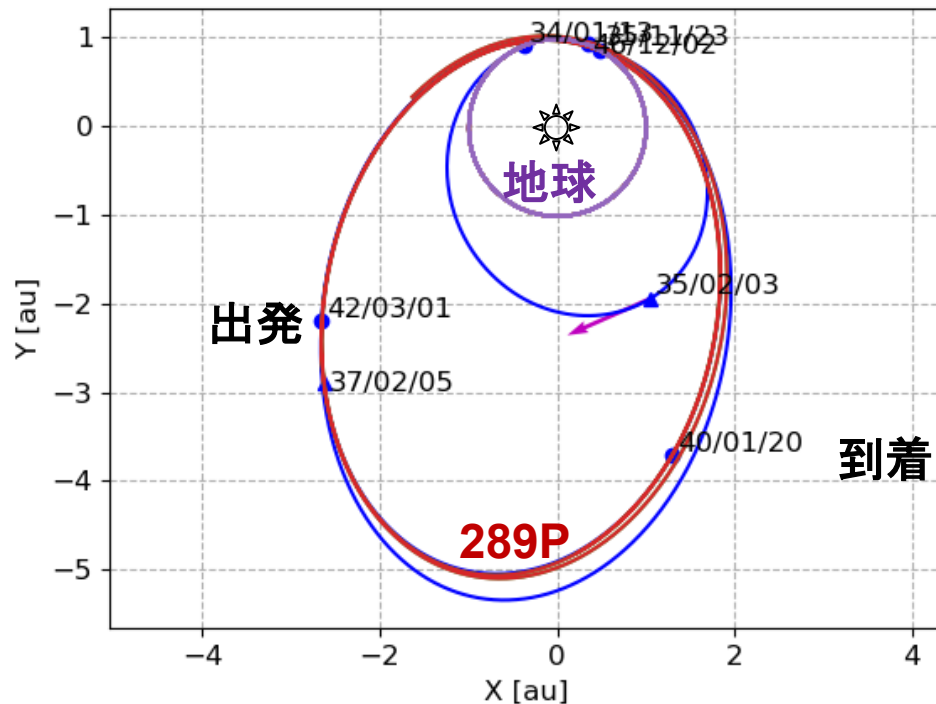
(子機による着陸・試料採取・その場分析・RVD・試料引き渡し×3回)

彗星出発

(化学推進による ΔV)

地球帰還

深宇宙OTV・子機による彗星サンプルリターン



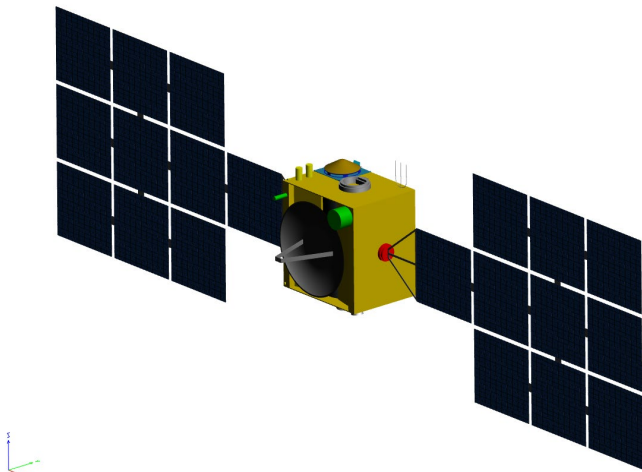
質量: 2000kg+100kg

フェーズ	開始	終了	ΔV
2-year DVEGA	2034/01/13	2035/11/23	1.6 km/s
地球—289P/Blanpain	2035/11/23	2040/01/20	
289P/Blanpain—地球	2042/03/01	2046/12/02	

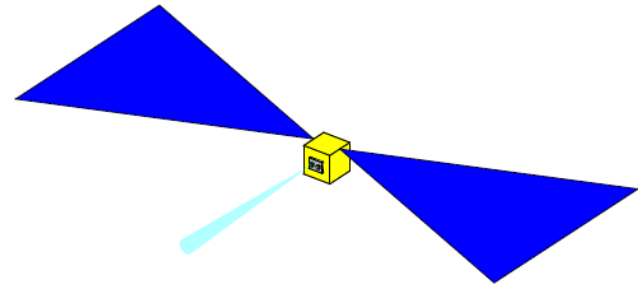
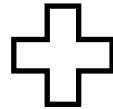
13年(往復), 1.6km/s(化学推進)

OPENS-1からOPENS-2へ

深宇宙OTVは化学推進を用いるため、外惑星を往復することはできない。
OPENS-1相当の子機を深宇宙OTVに搭載する。
親機が往路、子機が復路を担当することで、外惑星領域小惑星を往復する。

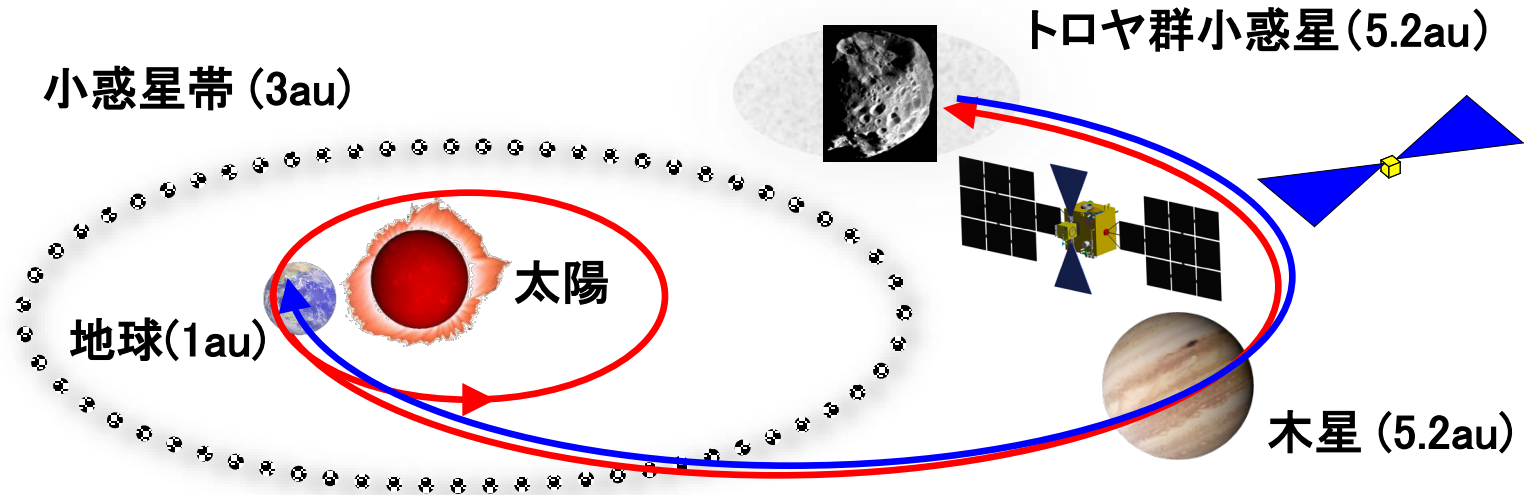


深宇宙OTV(親機)



OPENS-1相当(子機)

OPENS-2によるトロヤ群小惑星サンプルリターン



<往路: 深宇宙OTV>

H3ロケットでの打上げ

(化学推進による ΔV)

地球スイングバイ

地球スイングバイ

木星スイングバイ

(化学推進による ΔV)

木星トロヤ群ランデブー

<復路: 子機>

(木星トロヤ群着陸・サンプル採取・その場分析)

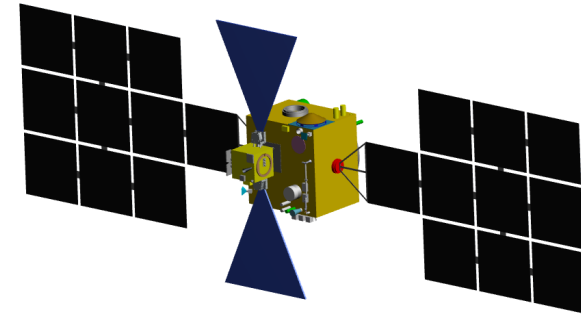
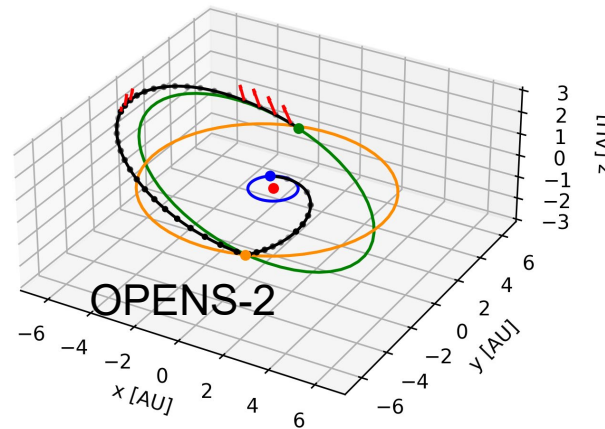
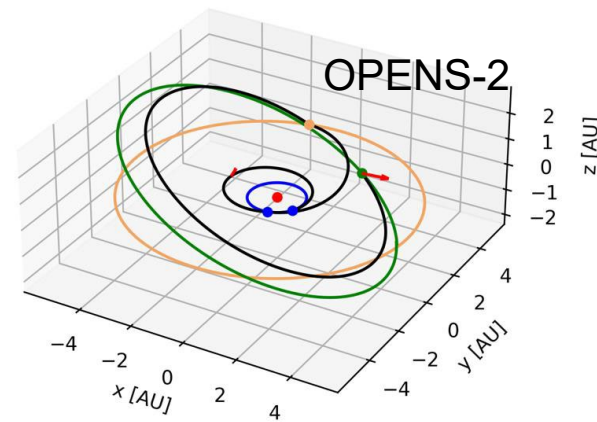
木星トロヤ群出発

(イオンエンジンによる ΔV)

木星スイングバイ

地球帰還

OPENS-2によるトロヤ群小惑星サンプルリターン



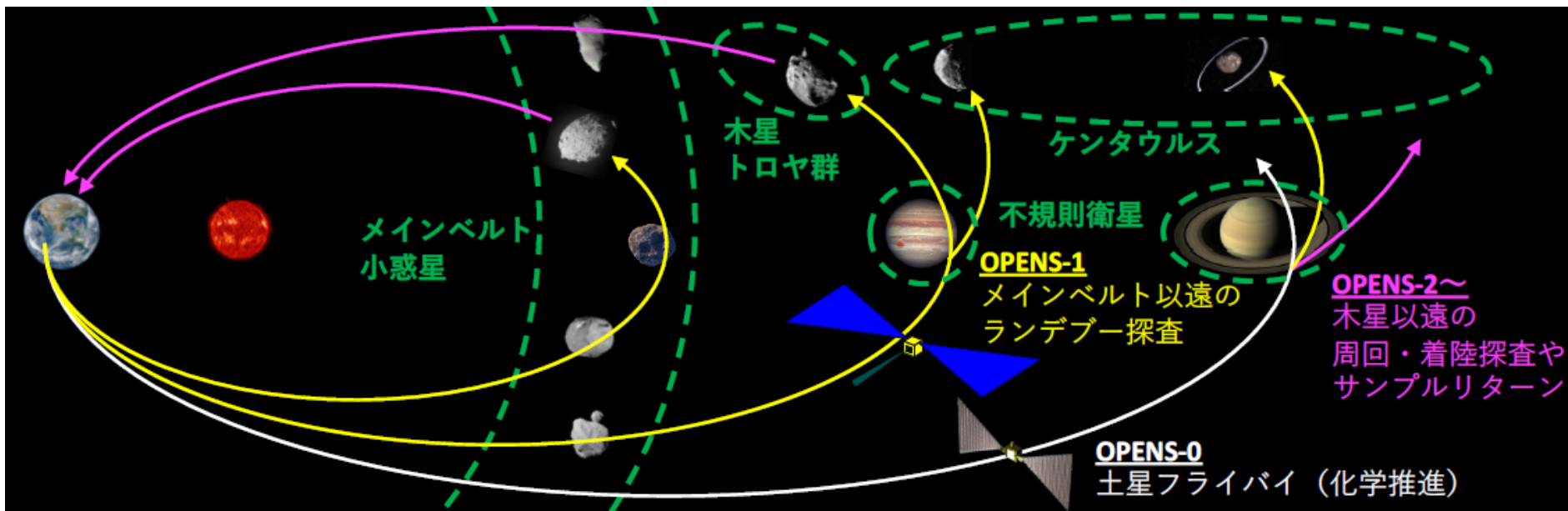
質量:2000kg+250kg
太陽電池膜:34m²

フェーズ	開始	終了	ΔV
2-year DVEGA	2033/08/24	2035/07/05	2085 m/s
地球－木星	2035/07/05	2037/10/14	
木星－1999 XG91	2037/10/14	2046/07/14	
1999 XG91－木星	2047/08/23	2055/12/29	1769 m/s
木星－地球	2055/12/29	2058/01/28	

13年(往路, 親機)2.1km/s(化学推進)

10年(復路, 子機)1.8km/s($\mu 10$ イオンエンジン)

HELIOS-RとOPENSプログラムのまとめ



HELIOS-R: 高機能・多機能膜(太陽電池膜を含む)の実証

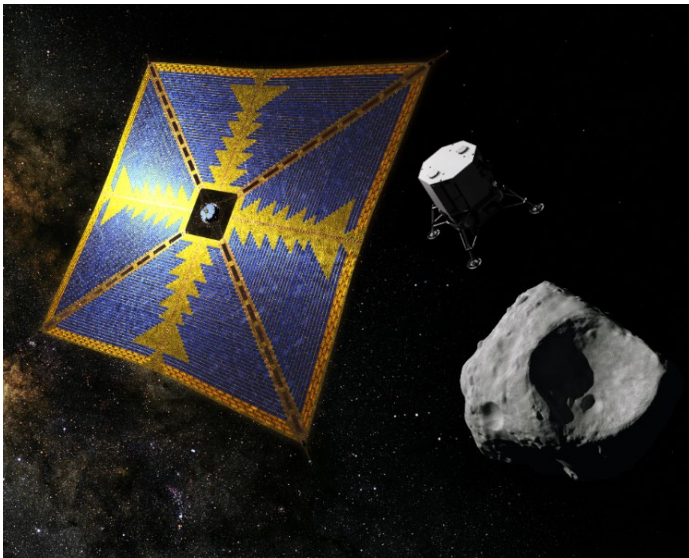
OPENS-0: 土星フライバイ

OPENS-1: 外惑星領域小惑星ランデブー

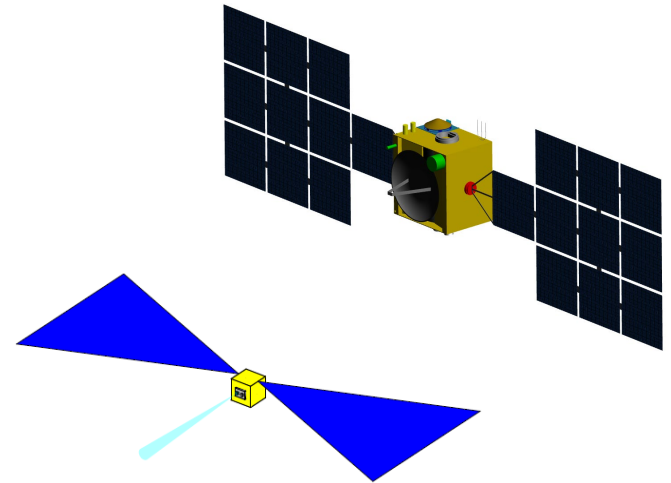
OPENS-2: 外惑星領域小惑星ランデブー・着陸・サンプルリターン

OKEANOSとOPENSプログラムの比較

OKEANOSは単独ミッションのためコスト・リスクが高くなるが、
OPENSは小型化・プログラム化(共通設計)によりコスト・リスクが下げられる。
OPENS-2は外惑星領域小天体の着陸・サンプルリターンの新しい解となる。



往路: 13年(親機, 高性能イオンエンジン)
復路: 17年(親機, 高性能イオンエンジン)



往路: 13年(親機, 化学推進)
復路: 10年(子機, $\mu 10$ イオンエンジン)

君も太陽系をヨットに乗って旅しよう！



- IKAROS
- OKEANOS
- OPENSプログラム
- 月面科学プログラム
- Moon to Mars Innovation
(宇宙探査イノベーションハブ)

月面科学プログラムの検討活動

- 2021年7月にJAXA国際宇宙探査センターより「月面での科学研究・技術実証ミッションにかかるフィジビリティスタディ」の募集が行われた。
- この中で「世界をリードする科学成果の月面活動からの創出」のテーマとして、月面3科学が設定された。
 - 月面からの天体観測（月面天文台）
 - 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還（月面SR）
 - 月震計ネットワークによる月内部構造の把握（月震計NW）
- 私たちは、この募集に対し、科学と技術を同時に実現する月面科学プログラムの検討を掲げ、採択された。
 - 月面3科学すべての第一級成果の創出
 - 月面活動の基盤となるキー技術の実証
- 以下のように活動を実施した。
 - 2022年4月～2023年3月：フィジビリティスタディ活動
 - 2023年10月～2026年3月（予定）：フロントローディング活動

月面科学プログラムの概要

- 2030年代からの**本格科学ミッション**と、それに向けた2020年代からの**プリカーサミッション**を実施する。
 - **プリカーサミッション** (2回程度)
月面3科学それぞれに対し、いち早く基本的な観測を行い成果を上げる。
各観測システムを**パッケージ化(自立化)※**することで、国際協力において日本が主導権をとれるようにする。
※ 海外の輸送機会では熱制御・通信等の機能は観測機器自身が有する必要あり

月面3科学を実現するためのキー技術を実証することで、国際宇宙探査における日本の**自在性・優位性(月面全域で長期間運用)**を確保する。
 - **本格科学ミッション** (様々な機会)
月面3科学それぞれに対し、国際協力も踏まえて一級の成果を得る。

月面天文台

科学目標

月面裏側で宇宙電波干渉計を実施し、宇宙の暗黒時代における中性水素信号をとらえる。
→ 宇宙のすべての構造の源となる、初期の密度ゆらぎの直接の検出を目指す。

他の観測との比較

宇宙の暗黒時代のシグナルは1-50MHz帯で観測できる。

→ 地球上では電離層で電波が届かない。人工電波の影響を受けにくい月裏側で行う。

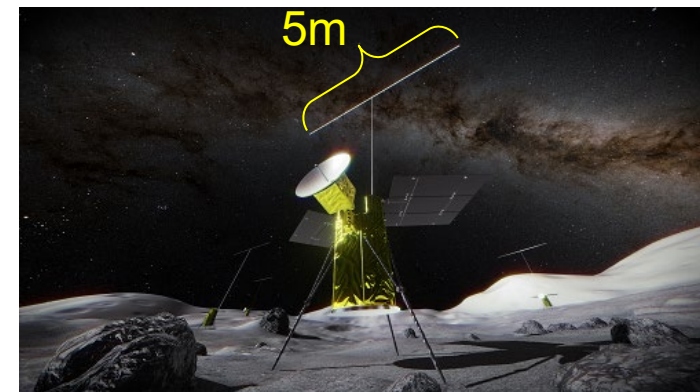
多数のアンテナでの長期間精密観測するためアンテナを天体に設置することが必須。
米国・欧州・中国でも電波干渉計が検討されている。

プリカーサミッションの観測シナリオ案

プロトタイプアンテナを月面に配置して初期観測を行う。

本格科学ミッションの観測シナリオ案

月の裏側に3～10基の自立アンテナパッケージを配置し、
電波干渉計を構成して観測を行う。



月面サンプルリターン

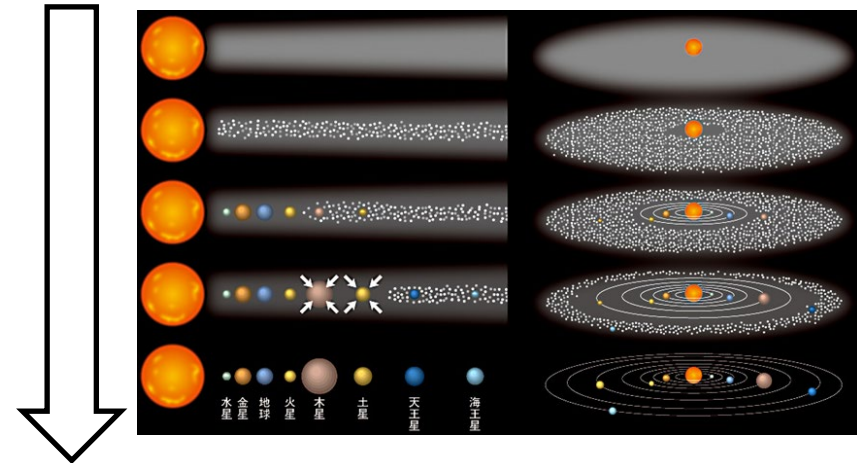
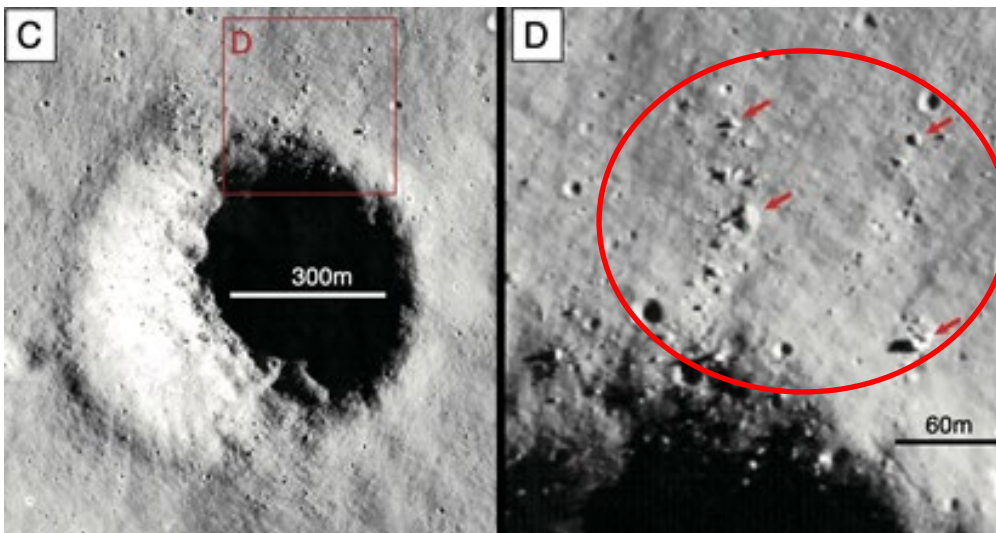
科学目標

月面の衝突盆地付近で露出した岩を採取し、その場分析・サンプルリターンを行う。

→ 月に衝突した年代が分かる。

年代ごとに月に衝突する頻度が分かる(月の起源や歴史)。

月の周辺の環境が分かる(太陽系の進化の歴史)。



※きちんと素性が分かっている岩であることが重要

月面サンプルリターン

他の観測との比較

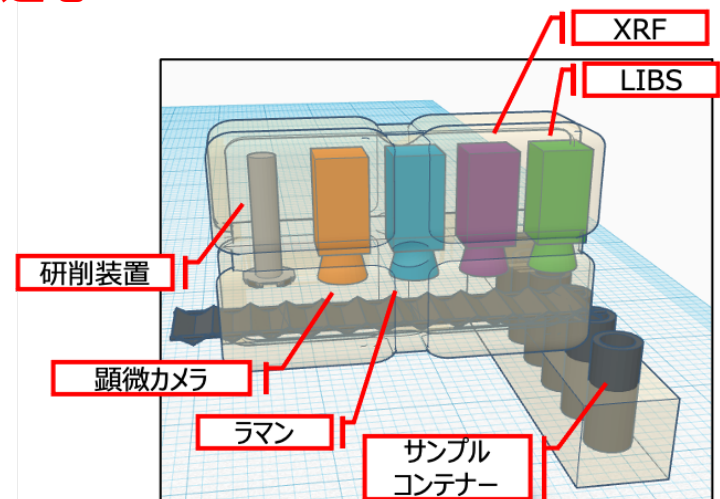
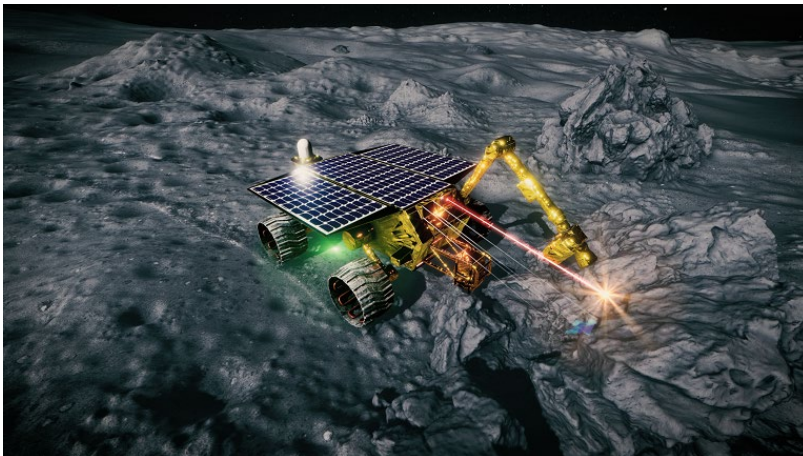
アポロ試料や月隕石は「転石」であるため、月面の地形・地質との対応関係が不明。
米国・欧州・中国・インド・ロシアがサンプル採取を検討しているが、
極域（高緯度領域）や海領域での資源探査・環境調査が主ターゲットとなりつつある。

プリカーサミッションの観測シナリオ案

衝突溶融岩の露頭からサンプルを採取・研削し、その場分析パッケージで詳細分析する。
（ベルトコンベアー上で各種分析ユニット内を移動しながら統一的に分析する）

本格科学ミッションの観測シナリオ案

衝突溶融岩の露頭において、その場分析による試料選別を行い、地球に持ち帰る。
海外にその場分析パッケージを提供し、他国を引き込む。



月震計ネットワーク

科学目標

月にも地震が発生する(月震). 月震計を月の全球に配置し, 月震の伝わり方を調べる.
→月の内部構造(コアやマントルの有無・大きさ)が分かる. 月の形成・進化が分かる.

他の観測との比較

アポロの月震計では月裏側未観測, 感度・帯域が不十分. ネットワーク規模(測線長)が短く, 月中心までの構造解明には不十分. 米国・欧州・中国が月震計を搭載予定.

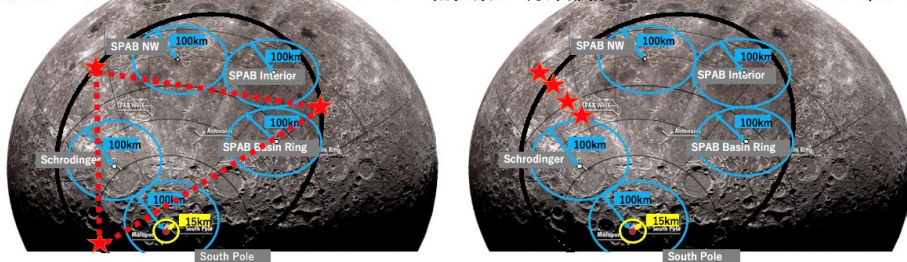
プリカーサミッションの観測シナリオ案

高帯域・高感度の光学式月震計パッケージを設置し, 年単位の観測を行う.

本格科学ミッションの観測シナリオ案

月面の全球で国際協力により合計5地点以上の長期間(1年以上)のNW計測を行う. 日本側は自国の観測点(2点程度)および光学式月震計の提供を行い, イニシアティブをとるとともに, データの相互公開, センサーの性能情報交換, 研究協力を行う.

配置案1: アポロ観測網を越えるネットワーク 配置案2: 月深部構造にフォーカスしたアレイ (50~100km間隔)



月面3科学を実現するキー技術

- **輸送技術**

月面裏側や低緯度・傾斜地を含む月面全域で観測を実現するためには、ランダによるピンポイント着陸とローバによる自律的な移動を組み合わせた運搬が必要。

- **ロボティクスを用いた探査技術**

月面天文台アンテナ、月震計、ローバのランダから月面への展開、および、サンプルの採取・研削作業などを実現するためには、軽量ロボットアームで自在な作業が行うことが必要。

- **エネルギーマネジメント技術**

夜間の観測や長期間の観測を行うためには越夜・サバイバル技術が必要。極域の場合、太陽電池タワーで電力を確保できるが、極域以外では、ラジオアイソトープ(RI)の活用が必要。

※ キー技術は、月面3科学だけでなく、有人月探査・本格的な月面活動にも適用でき、火星探査や外惑星探査にも発展可能。

プリカーサミッションの戦略

キー技術実証を行いながら月面3科学をまとめて科学観測を行う。

- 月面3科学に必要なキー技術は重複するため、まとめることで効率的に技術実証できる。
 - 輸送技術(月面への輸送技術+月面における輸送技術)
極域以外への目的地へ輸送機会を確保することが難しい。
月面3科学の観測エリアを合わせることで、同一の着陸機、ローバで目的地に到達できる。
 - ロボティクスを用いた探査技術
ロボットアームを可能な限り共通化することでシステムを軽量化できる。
 - エネルギーマネジメント技術
越夜のための太陽電池タワー、熱制御などを共通化することで軽量化できる。
- 月面3科学の観測を同時に行うことで、相乗効果も期待できる。

※ 月面3科学をまとめて実施するためには、100kgオーダのペイロードが必要になるが、これらを国際宇宙探査の枠組みで輸送するのは難しい。

日本独自のミッション(LEAD)にて実施する

月探査推進ミッション(LEAD)

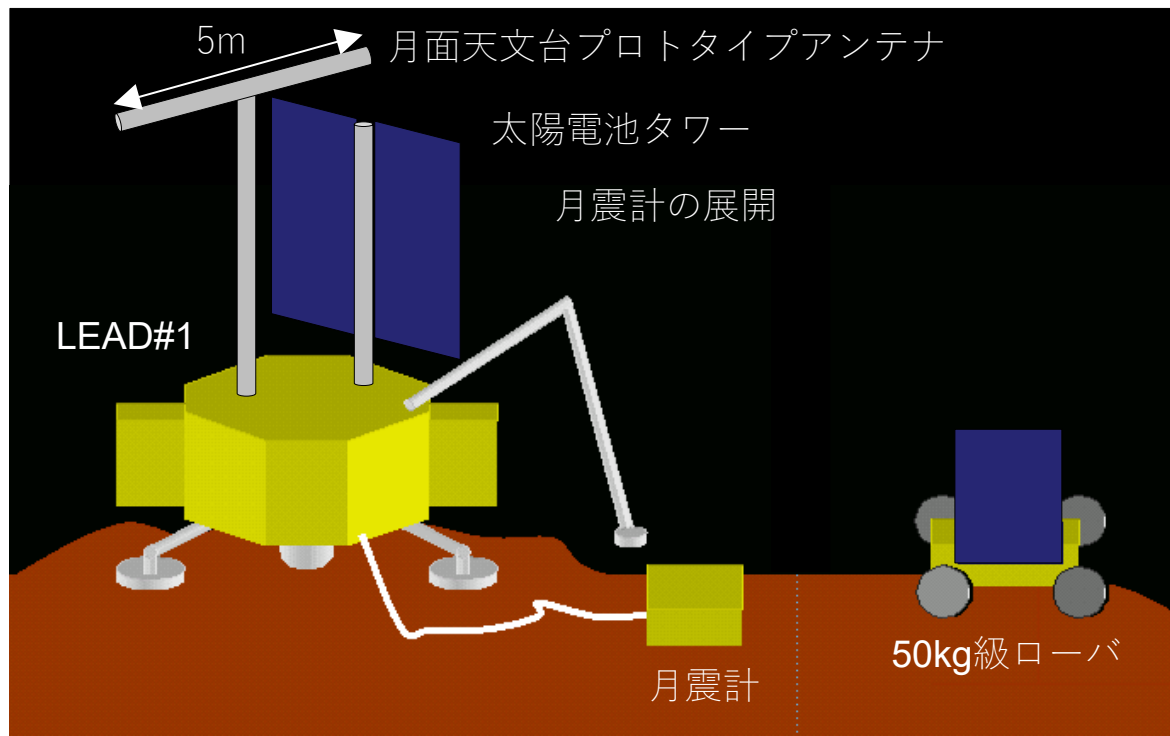
- LEADの目的
 - ポストSLIM, ピンポイント着陸技術の継承
 - 中型月着陸船(10tonを超える規模)に向けたステップ
 - 適切な規模・継続的な輸送機会
- LEADの規模
 - H3ロケットで打ち上げ可能な規模
 - 月面へのまとまった量(>100kg)の輸送
- LEADを活用するメリット
 - 技術実証・科学観測に都合のよい場所へのピンポイント着陸
 - 観測システムの月面への設置や生存機能(熱制御・通信など)のサポート



プリカーサミッション(1回目)

LEAD#1で南極域にピンポイント着陸(150kg)

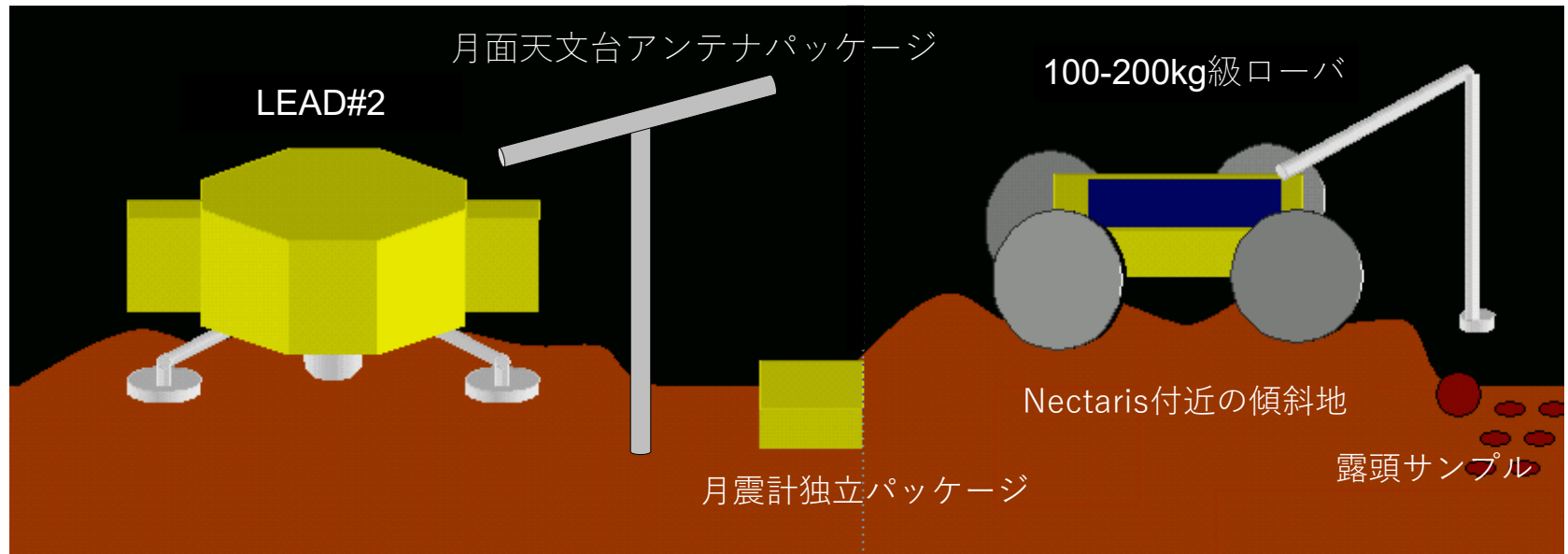
- 50kg級ローバ
 - 自動運転・傾斜地走行(数100m)
 - サンプル採取・研削・その場分析
- 月震計の適切な設置
- 月面天文台プロトタイプアンテナの展開
- 極域での越冬(太陽電池タワー・熱制御・RIヒータ(RHU)等)



プリカーサミッション(2回目)

LEAD#2で低緯度のネクタリス盆地付近(TBD)にピンポイント着陸(200-300kg)

- 100-200kg級ローバ
 - 自動運転・不整地・傾斜地走行(数km)
 - 露頭サンプルの採取・研削・その場分析(パッケージ)
- 光学干渉式月震計(パッケージ)の設置
- 月面天文台アンテナ(パッケージ)の設置(オプション)
- 低緯度環境でのサバイバル(熱制御・RI等)



キー技術の実証ステップ

	プリカーサミッション(1回目) 2028年ごろ	プリカーサミッション(2回目) 2031年ごろ
輸送技術	<u>小型ランダ</u> ・極域でのピンポイント着陸 <u>50kg級ローバ</u> ・自動運転 ・不整地走行(数100m) ・小型アビオ	<u>100-200kg級ローバ</u> ・自動運転 ・不整地・傾斜地走行(数km)
ロボティクス を用いた 探査技術	<u>50kg級ローバ用ロボットアーム</u> ・サンプル採取・研削 ・その場分析 <u>ランダ用ロボットアーム</u> ・月震計の設置 ・月面天文台プロトタイプアンテナの展開 ・50kg級ローバ展開	<u>100-200kg級ローバ用ロボットアーム</u> ・サンプル採取・研削 ・その場分析(パッケージ) ・光学干渉式月震計(パッケージ)の設置 ・月面天文台アンテナ(パッケージ)の設置 (オプション)
エネルギー マネジメント 技術	<u>極域での越夜</u> ・太陽電池タワー・送電 ・熱制御 ・RIヒータ(RHU)	<u>低緯度環境でのサバイバル</u> ・熱制御 ・RI

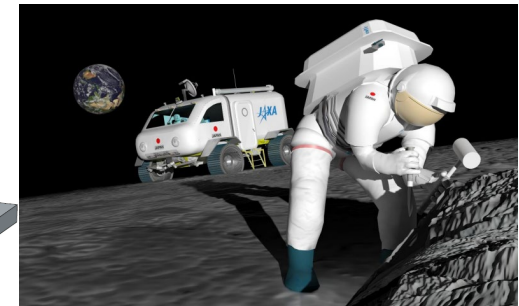
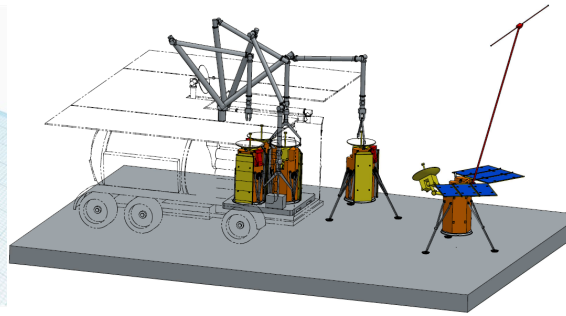
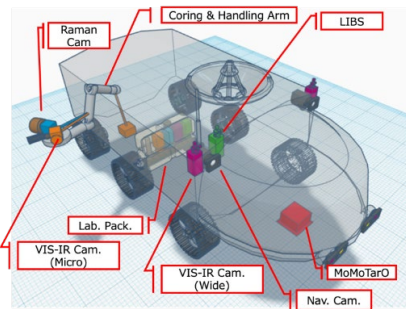
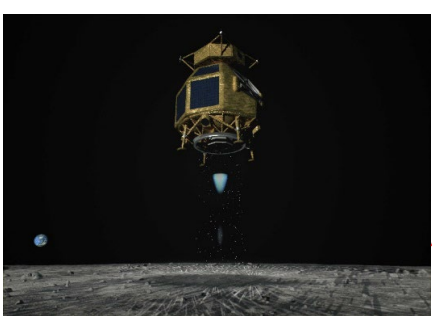
キー技術の月面活動への適用

- 月面全域において、LEAD小型ランダのピンポイント着陸と小型ローバ(50-200kg級)の自動運転を組み合わせた日本独自の長期ミッション(越夜含む)を実現できるようになる.
- 月面活動のメインは中型ランダと有人圧ローバの組み合わせになるが、これらは規模が大きいため、国際宇宙探査の枠組みでの実施となる(日本だけでは決断できない). 国際宇宙探査は極域が中心で、低・中緯度に行く機会が少ない.
- LEAD小型ランダや小型ローバの余剰スペースに海外のペイロードを搭載し、月面への設置や熱制御・通信などの生存機能をサポートするサービスを提供することで、月面探査で日本のプレゼンスを高めることができる.

月面活動の自在性, 優位性を確保する

本格科学ミッション

- 様々な打ち上げ・輸送機会・国際協力により観測を行い、一級の成果を得る。
 - 月面天文台アンテナ(パッケージ)や光学干渉式月震計(パッケージ)の広域展開
 - サンプル採取・研削・その場分析(パッケージ)・リターン
 - 輸送手段
 - 月面までの輸送: 中型ランダ, LEAD小型ランダ, CLPSなど
 - 月面での輸送: 有人与圧ローバほか各種ローバ
- 有人月探査＝国際協力ミッションの一環で中型ランダ＋有人与圧ローバによる輸送が主
日本単独ミッションとして, LEAD小型ランダ＋小型ローバによる輸送も視野に入れる。



月面3科学の観測ステップ

	プリカーサミッション(1回目) 2028年ごろ	プリカーサミッション(2回目) 2031年ごろ	本格科学ミッション 2030年代
月面 天文台	月面における1-50MHz帯の電波観測実証とともに電波計測環境の測定を行う。 同周波数帯での天の川銀河を含む宇宙電波スペクトルをはじめて月面から測定する。 また、月の浮遊ダスト・地下構造測定実験を行う。 このため、電波観測プロトタイプ・アンテナをランダーから展開し、夜間に観測を行う。	<u>月面天文台アンテナパッケージ</u> にて、月面における1-50MHz帯の電波干渉実験に挑む。 宇宙の暗黒時代の中性水素21cm線グローバルシグナルの初期観測を行う。また、月の電離層測定を行う。 夜間に継続的な観測を行う。	少なくとも3基のアンテナパッケージを月の裏側に配置し宇宙の暗黒時代の中性水素21cm線グローバルシグナル観測を行う。月の電離層や月の地下構造の場所による違いを調べる。これを段階的に発展させ、 10基程度のアンテナパッケージからなる観測 を実現しグローバルシグナルの検出をめざす。 将来的な、宇宙の暗黒時代の物質分布測定のため、国際協力により、さらに多素子のアンテナパッケージからなる電波観測の実現を目指す。
月面SR	広域観測に基づき、分析を行う対象となる岩塊の選別手法を確立する。 岩塊を研削し、その場で簡易分析する。	<u>始原地殻岩または衝突溶融岩の露頭からサンプルを採取・研削し、その場分析パッケージ</u> で詳細分析する。	始原地殻岩または衝突溶融岩の露頭において、その場分析による試料選別を行い、 地球に持ち帰る。 他国SR計画と協力し月面各地から冥王代試料を持ち帰る。
月震計 NW	広帯域・高感度な月震計を設置し、年単位の観測を行う。	<u>光学干渉式月震計パッケージ</u> を設置し、年単位の観測を行う。	国際協力で 月面の全球へ合計5地点以上の、長期間(1年以上)のNW計測 を行う。日本側は 自国の観測点(2点程度) および光学干渉
月面3科学それぞれに対し、いち早く基本的な観測を行い成果を上げ、各観測システムをパッケージ化(自立化)することで、国際協力において日本が主導権をとれるようにする。			

月面科学プログラムのまとめ

2022/9/27

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033-
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

<月周回インフラ>

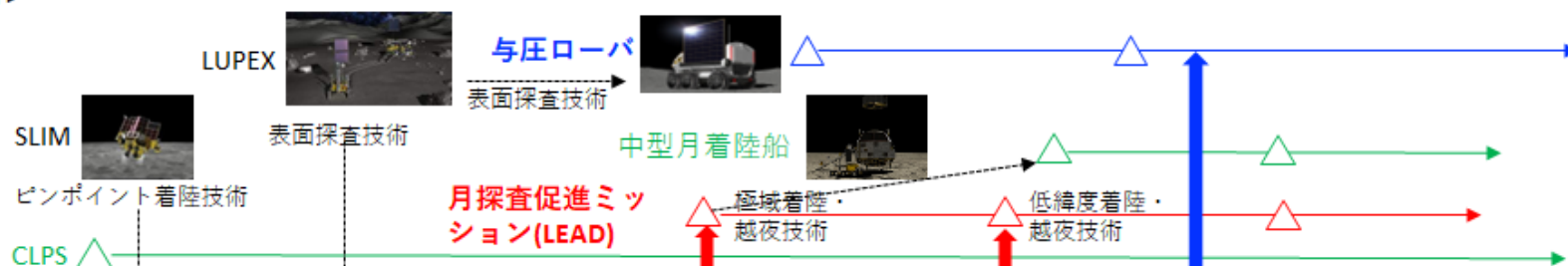
Gateway



月面裏側との通信の利用

その他通信インフラ

<月面輸送機会等>



<キー技術>

月面への輸送

月面走行・輸送

ロボティクス

越夜技術

<月面3科学>

月面SR

月面天文台

月震計NW

極域ピンポイント着陸・輸送力/推力増強

50kg級小型ローバ(小型アビオ・傾斜走行・自動走行)

200kg級ランダ(小型アビオ 広域走行)

ロボットアーム・ペイロード展開・試料採取

熱設計・(可変)熱制御材料・蓄エネルギー

RI熱源・電源

極域・その場分析技術

ローバ搭載センサ・その場分析・試料収集

プロトタイプアンテナ

独立アンテナパッケージ

高感度月震計(光学センサ含む)

小型・独立パッケージ化

分析パッケージ

可能なら
LEAD#2に搭載

有人活動支援(建築等)
や3科学以外の科学へ

...
有人与圧ローバによる
サンプラリターン
&無人運用時探査

火星探査へ

与圧ローバや中
型着陸船・CLPS
による広域展開

- IKAROS
- OKEANOS
- OPENSプログラム
- 月面科学プログラム
- Moon to Mars Innovation
(宇宙探査イノベーションハブ)

月面3科学による月面環境計測

月面天文台

- ・月面電磁環境の把握, 浮遊ダストによる帯電の状況など

月面SR

- ・水や金属などの資源探査
- ・長距離移動や建設のための地質・地盤調査

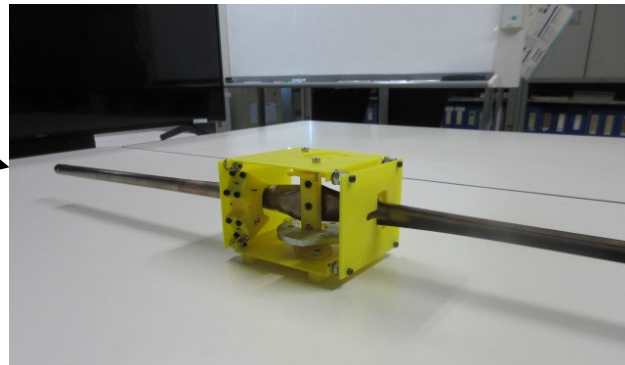
月震計NW

- ・地盤調査, 浅部構造調査(人工震源)

探査ハブ研究

- ・月面天文台

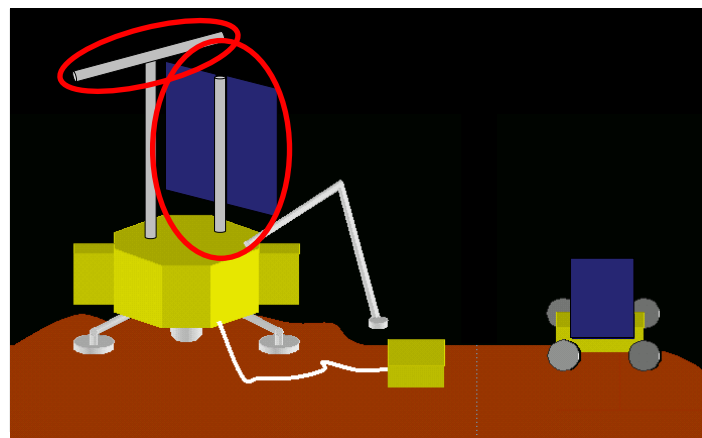
自己伸展型軽量ダイポールアンテナ



- ・月面SR

レーザ誘起絶縁破壊発光分光計

岩石研削装置



- ・月震計NW

小型震源装置

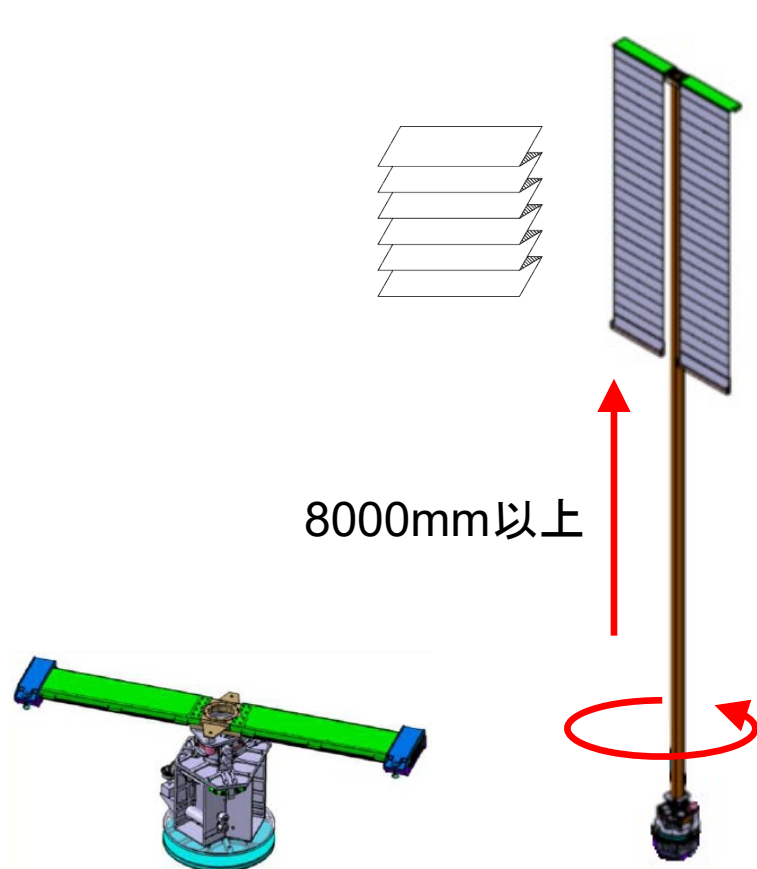
- ・キー技術

月面着陸機用太陽電池タワー



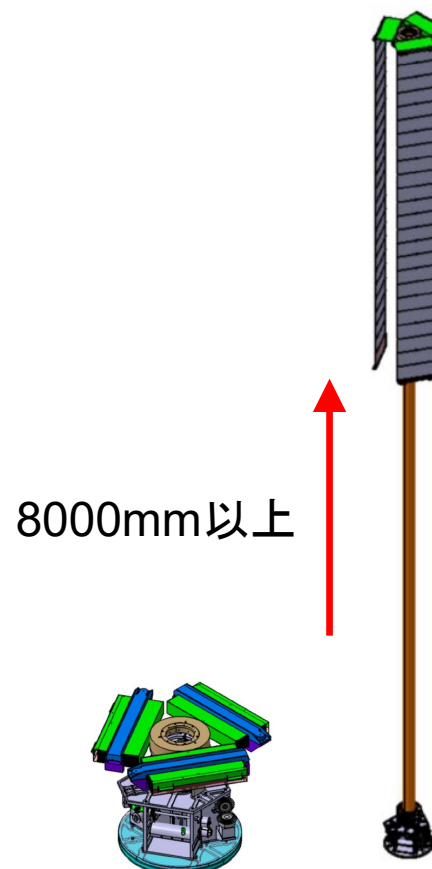
月面着陸機用太陽電池タワー

- **ブーム伸展機構**で**ブーム**を伸展し、蛇腹折り(Z折り)の**太陽電池膜**を展開する.
- 太陽電池膜で太陽光発電を行い、月面着陸機に電力供給を行う.
(**位相調整機構**でブームを回転させることで太陽電池膜が太陽を追尾する)



8000mm以上

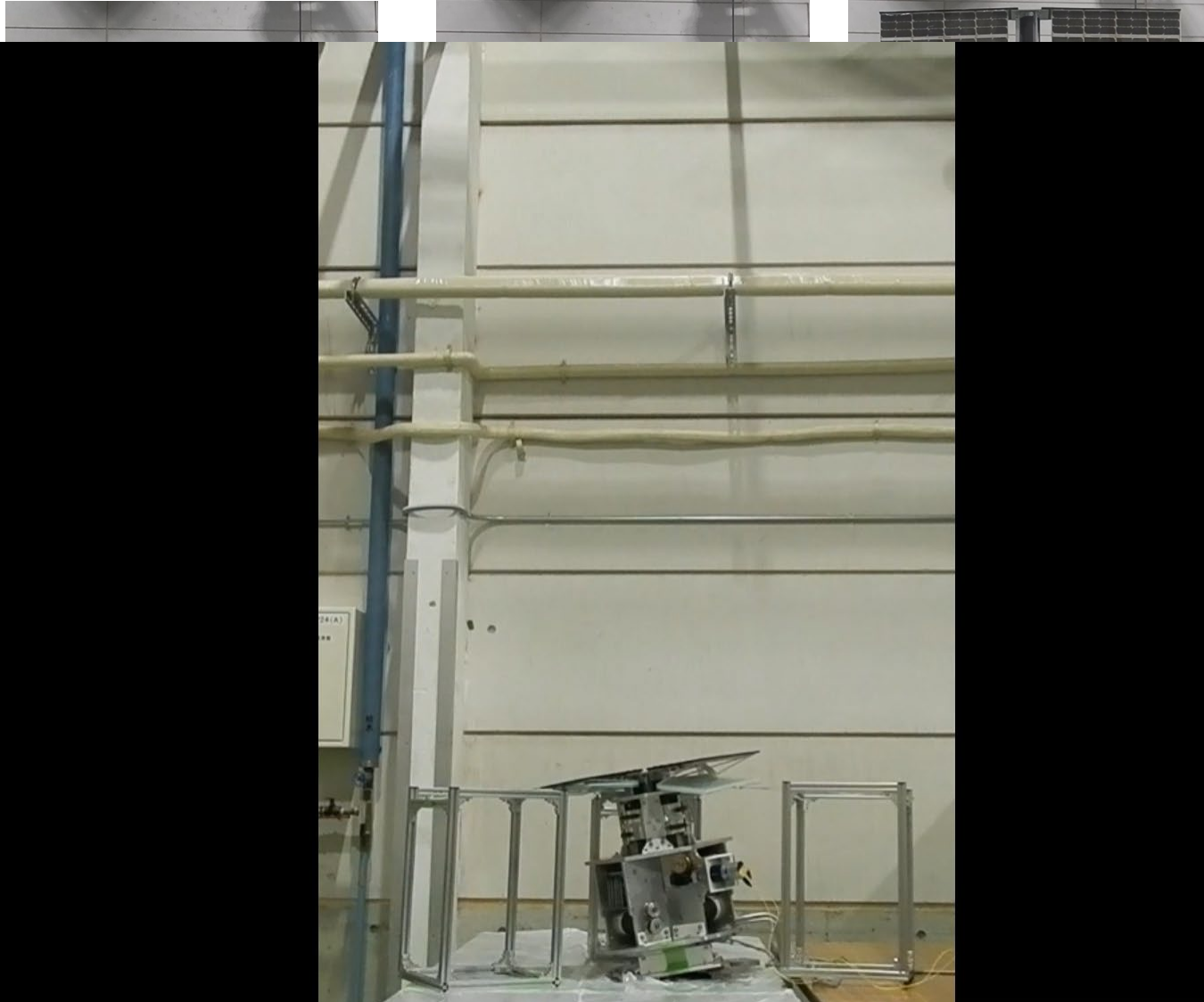
800W以上, 30kg以下



8000mm以上

100W以上, 25kg以下

月面着陸機用太陽電池タワー

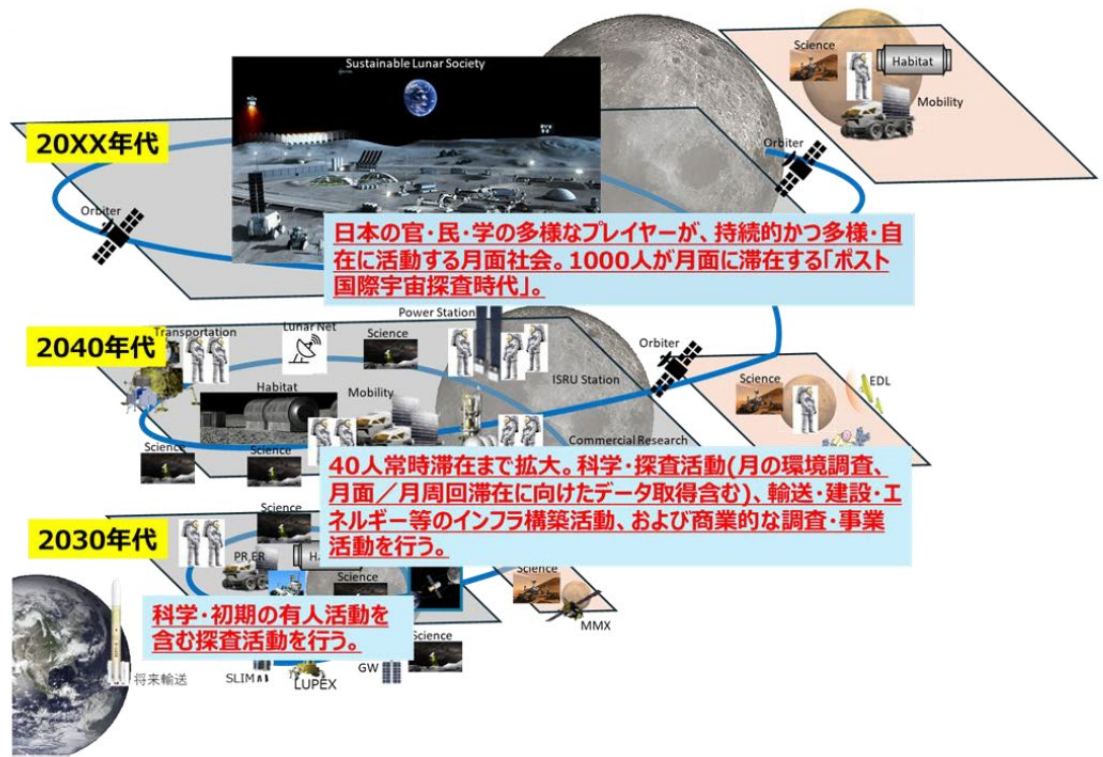


10deg傾き
60倍速



日本の国際宇宙探査シナリオ案2025

4.5章 月面3科学が先導する科学機器の展開シナリオ 7.1章 月面科学に係る技術



2040年代の月面拠点・火星探査活動のあるべき姿

「学・官による**科学探査および活動基盤**となる枠組構築・**インフラ整備の推進**と、民間による主体的な**事業活動の創出**による、産・学・官の連携の相乗効果を活用することで**持続的な月・火星探査活動を実現**する。」

宇宙戦略基金・アルテミス計画での選定

宇宙戦略基金 探査等(第二期)のテーマ

- ・月極域における高精度着陸技術

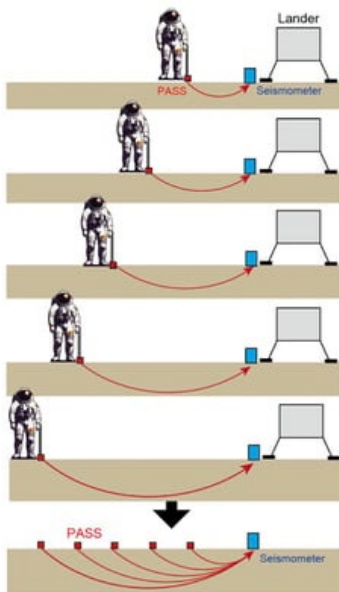
LEADに該当

- ・月面インフラ構築に資する要素技術

月面SRの提案が選定された

アルテミス4の搭載機器

小型震源装置(月震計NWから派生)の提案が選定された。



今後の探査活動について思うこと

探査も単発プロジェクトではなく、プログラムとして対応する時代になった。
科学と技術をセットで実施する。

- ・深宇宙探査

IKAROS→OKEANOS→OPENSプログラム, 深宇宙OTV

- ・月面探査

月面科学プログラム→国際宇宙探査

- ・火星探査

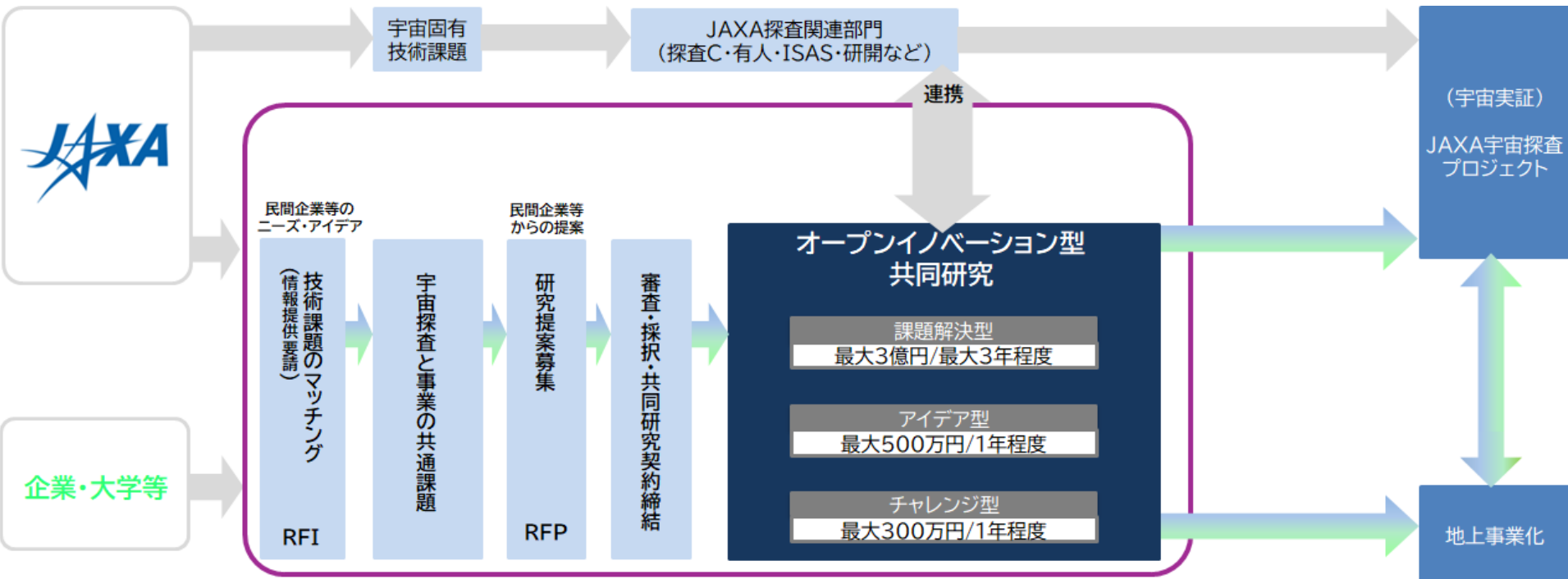
3ステップのプログラム

探査を宇宙事業化する可能性が広がる。
宇宙探査イノベーションハブの活動が重要になる。

従来研究制度のフロー

Dual Utilization

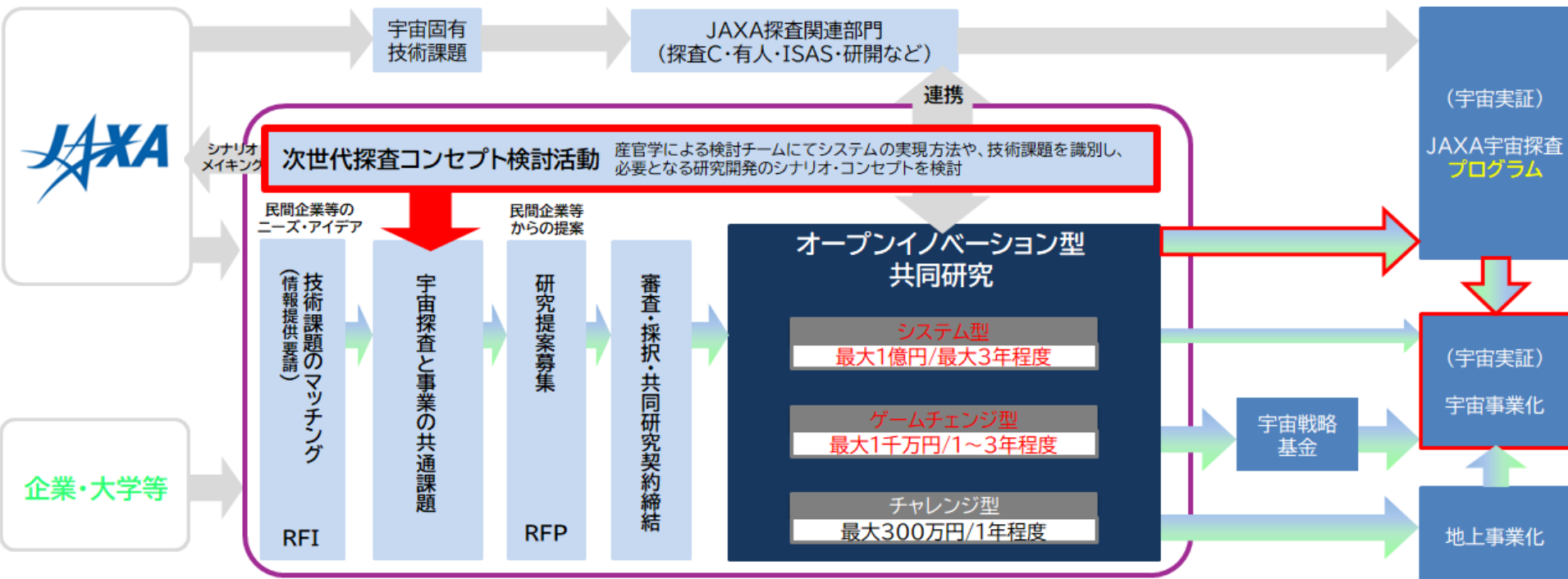
- RFI(情報提供)をもとにRFP(研究提案募集)を実施してオープンイノベーション型共同研究を実施する。
- 地上事業化と宇宙探査プロジェクトにつなげていく。



新研究制度「Moon to Mars Innovation」のフロー

Space Dual Utilization

- 宇宙事業化も視野に入れる。
- 宇宙探査プログラムに広く使われることを目指す。
- 次世代探査コンセプト検討活動を実施し、研究テーマに反映する。



宇宙探査イノベーションによる太陽系開拓時代へ



「太陽系宇宙空間を自由闊達に飛翔し、
人類の活動領域拡大を目指すことを表しています。」

Bon Voyage！（良い旅を！）