

S2-010

ソーラー電力セイルによる外惑星領域 探査計画とIKAROSの運用状況



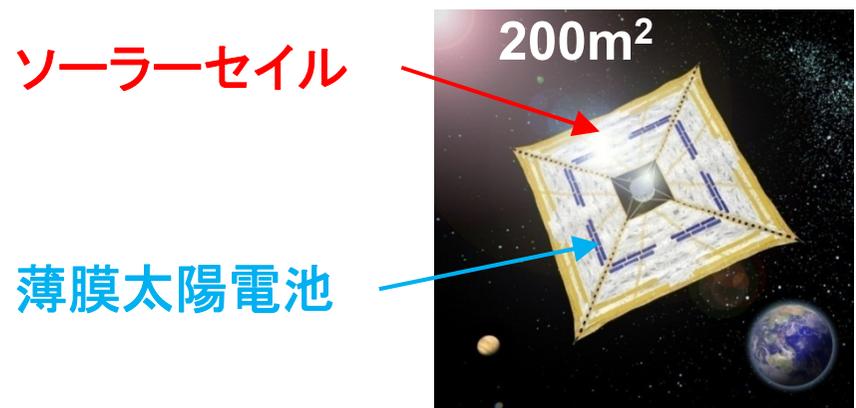
- 森治, 白澤洋次, 三柵裕也, 津田雄一, 佐伯孝尚, 尾川順子, 加藤秀樹, 川口淳一郎 (JAXA), 船瀬龍 (東大), ソーラーセイルWG

ソーラー電力セイルとは？

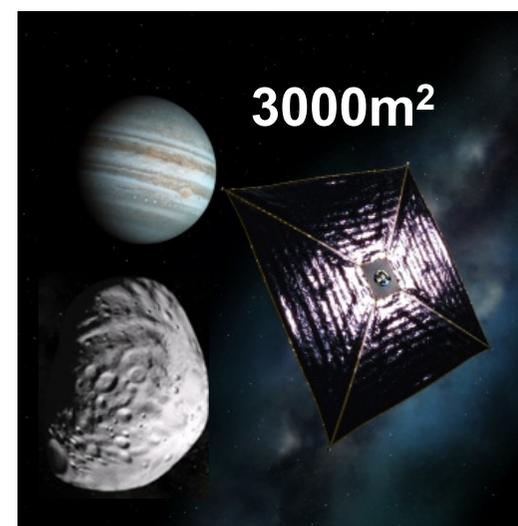
ソーラーセイルのセイル(帆)の一部を薄膜太陽電池とすることで、太陽光を受けて加速するだけでなく、太陽光発電も同時に行う日本独自のアイデア。
→「IKAROS」で世界で初めて実証した。

薄膜太陽電池で得た大電力を用いて、高性能イオンエンジンを駆動すれば、光子加速と合わせたハイブリッド推進が可能となり、次世代の推進機関として幅広く応用できる。

→「ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査計画」を提案する。



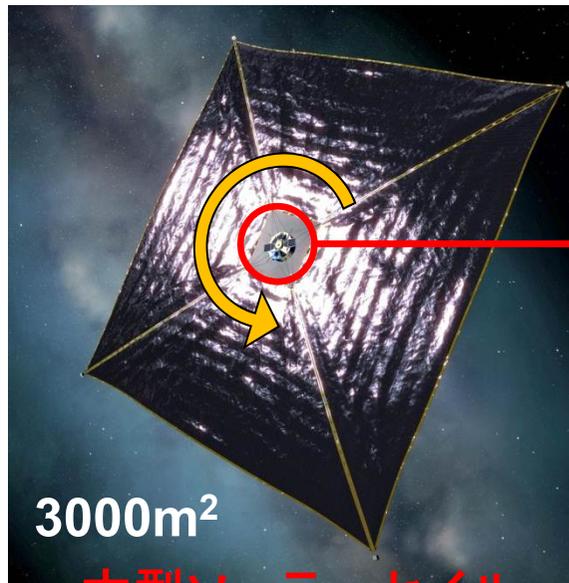
IKAROS



ソーラー電力セイルによる
外惑星領域探査計画

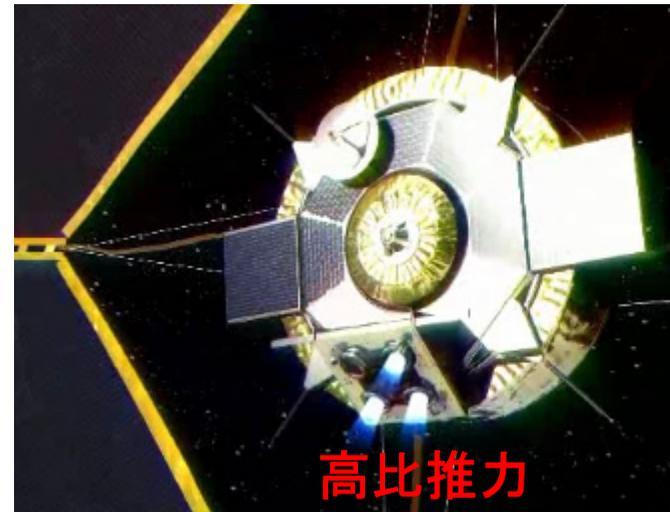
ソーラー電力セイル探査機

- ・**大型ソーラーセイル**(面積: 3000m^2 , IKAROSの15倍)で光子加速するだけでなく,**高比推力イオンエンジン**(比推力: 6000~10000秒, はやぶさの2~3.3倍)も駆動し, 外惑星領域で大きな増速量(10km/s規模)を達成.
⇒通常の化学推進を用いると燃料が莫大になる.
- ・セイル全体に**薄膜太陽電池**を貼り付け外惑星領域で大電力(7kW@5.2AU)発電.
⇒その他の発電技術(太陽電池パドル, 原子力電池)では, 実現が困難.
- ・全体重量1.5tonのスピン方式(0.1rpm以上)となる見通し.



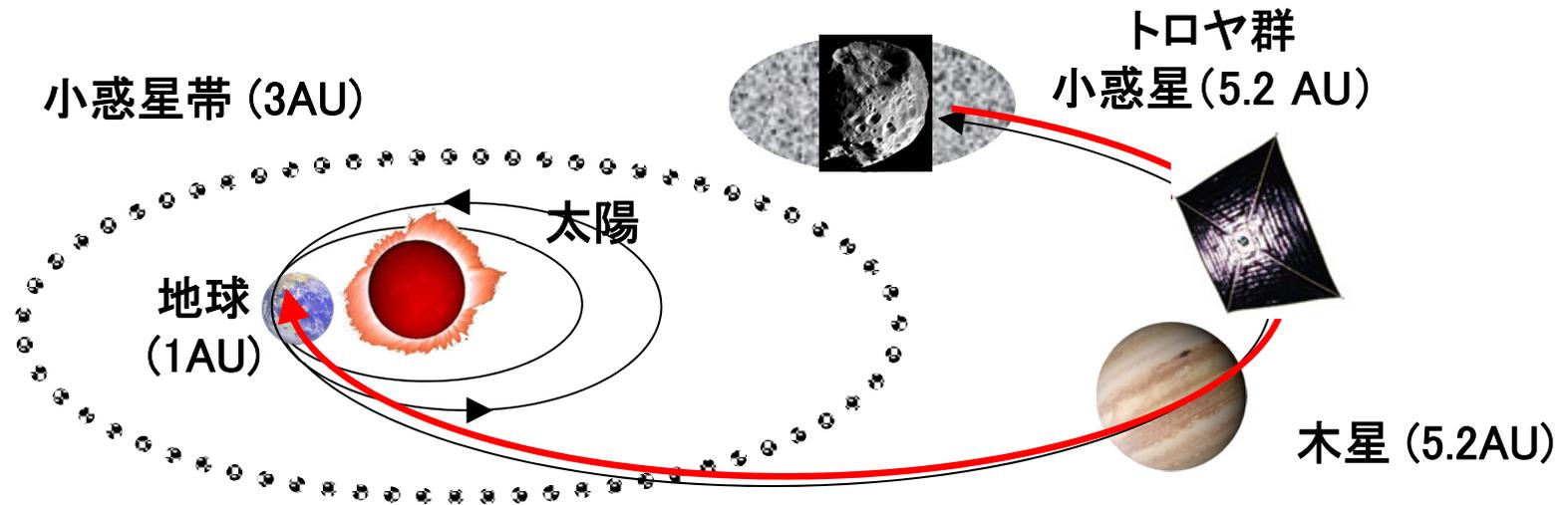
3000m²

大型ソーラーセイル
& 薄膜太陽電池



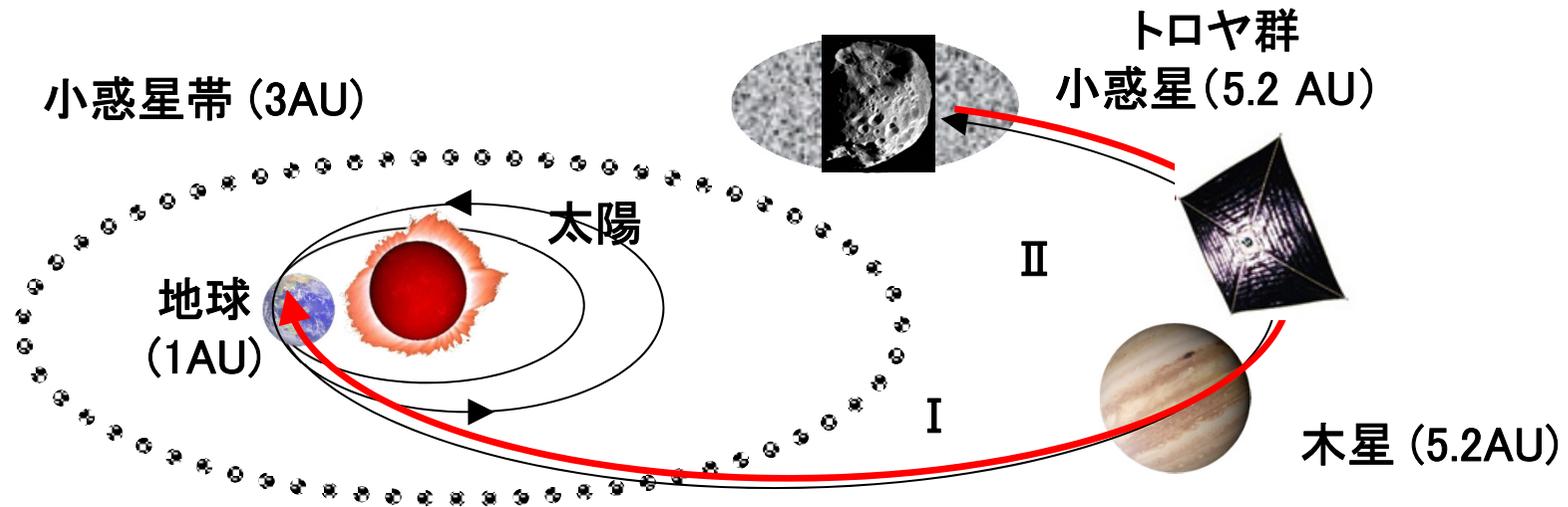
高比推力
イオンエンジン

ミッションシーケンス



- ・2023年ごろ: 打ち上げ
- ・2025年ごろ: 地球スイングバイ
- ・2029年ごろ: 木星スイングバイ
- ・2037年ごろ: トロヤ群小惑星到着
(子機分離・着陸)
- ・2039年ごろ: トロヤ群小惑星出発
- ・2047年ごろ: 木星スイングバイ
- ・2049年ごろ: 地球帰還

本計画で追求する理学成果



I. クルージングフェーズ

- ①赤外線背景放射の掃天観測
- ②黄道光の立体的観測・分光観測
- ③太陽系ダスト分布のその場計測
- ④小惑星帯フライバイ観測
- ⑤ガンマ線バーストの偏光観測
- ⑥木星磁気圏観測

II. ランデブーフーズ

- ⑦トロヤ群小惑星の探査
- ⑧トロヤ群小惑星のサンプル,
小惑星帯以遠のダスト採取

※③, ⑤はIKAROSオプション機器のALDNとGAPで事前実証

宇宙創成初期に形成された第一世代の星を調べる

小惑星帯・短周期彗星・カイパーベルト帯などからのダストの生成率や軌道進化に関する理解を深める

探査機－地球間の距離を利用して発生方向を特定
海外の木星探査機との同時観測

太陽系形成論における巨大惑星の軌道移動の解明

本計画の主な特徴

- **世界初**の光子推進と電気推進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**の外惑星領域往復
- **世界最高**速度の地球帰還カプセル
- **世界初**の小惑星帯以遠での赤外背景放射観測
- **世界初**のトロヤ群小惑星探査
- **世界初**のトロヤ群小惑星サンプル採取
- **世界初**の小惑星帯以遠のダスト採取

年次計画案

2020年代初頭の打ち上げを目指す。
2015年度中のミッション提案(MDR実施)に向けて、
システム設計・要素技術研究を実施中。

<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
▲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	

計画策定の前提

- ・ソーラー電力セイル技術以外にも、今後の深宇宙探査に必須となる技術を併せて実証したい。技術的制約を踏まえながら、理学成果も最大限追求し、**太陽系科学**、**天文学**、**宇宙物理学**の大きな進展に寄与したい。
- ・ソーラー電力セイルを用いて初めて実現可能なミッションとしたい。
トロヤ群小惑星ランデブーのみ(サンプル採取は実施しない)
米国提案型：化学推進系と太陽電池パネルの組み合わせ
メインベルトサンプルリターン
はやぶさMK2型：イオンエンジンと太陽電池パネルの組み合わせ
- ・往路を**フルサクセス**、復路を**エクストラサクセス**としたい。
片道約10年であるため、復路を保証するのは厳しいが、最新の静止衛星の寿命は15年であり、必ずしも不可ではない。

ミッション解析状況

- 木星スイングバイ: **活用する** or **活用しない**
直接軌道でも, 年数は変わらない(低推力のため)
木星スイングバイによって燃料を減らせ, 軌道傾斜角も変更可.
- 帰還: **親機** or **子機(電気推進)** or **子機(化学推進)**
子機は, 電気推進だとシステム重量大, 化学推進だと燃料重量大.
親機のクルージング燃料は往復で200kg以下.
→復路の燃料はバックアップにもなる.
- 着陸: **子機** or **親機**
親機の場合, 燃料重量大. サンプリング(伸展マスト等)も困難.
子機の場合, サンプルの引き渡しが課題.

ミッション案

- フルサクセス: 子機でサンプリングして, その場分析を行う.
- エクストラサクセス: 親機にサンプルを渡して, 地球に帰還し分析する.

候補天体

- ・条件

システム重量: 1.5ton (H2A202で打ち上げ)

イオンエンジン電力: 4kW@5.2AU (セイル面積: 3000m²)

打ち上げ: 2022年～2024年

小惑星直径: 80km以上 (少なくとも50km以上)

小惑星滞在期間: 1年以上

イオンエンジン運転時間: 40000時間以内

- ・候補天体

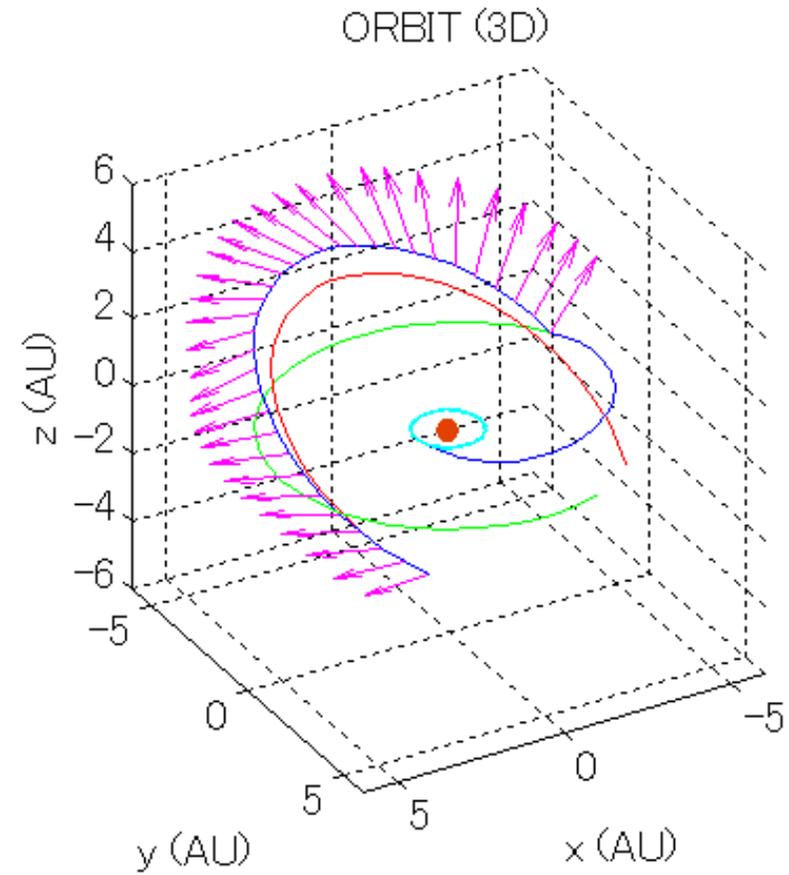
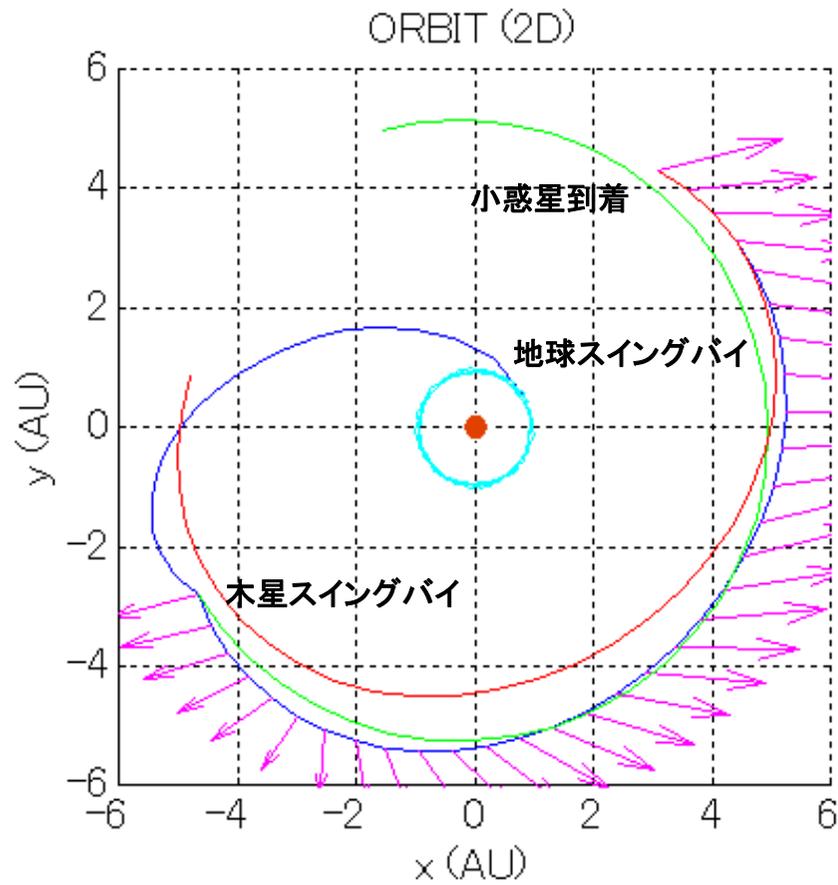
第一候補: **Cebriones** (81.84km, L5)

他の候補: **Thersites**, **Halaesus** (いずれも, 50km以上, L4)

※ これらについて, 観測キャンペーンを実施中.
2013年12月～2014年7月

軌道例(往路)

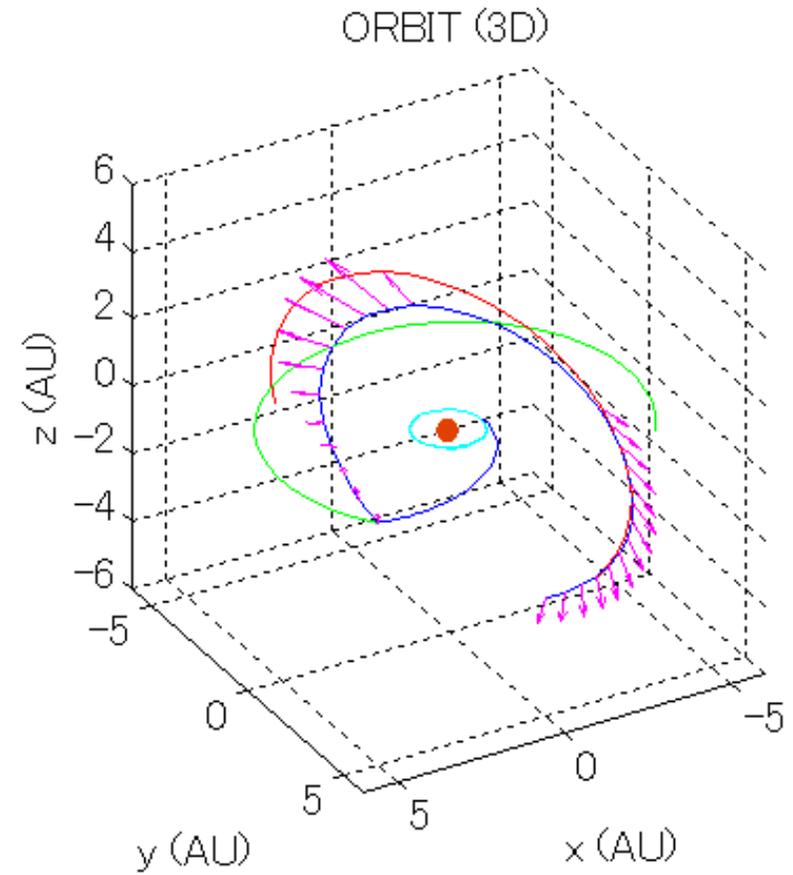
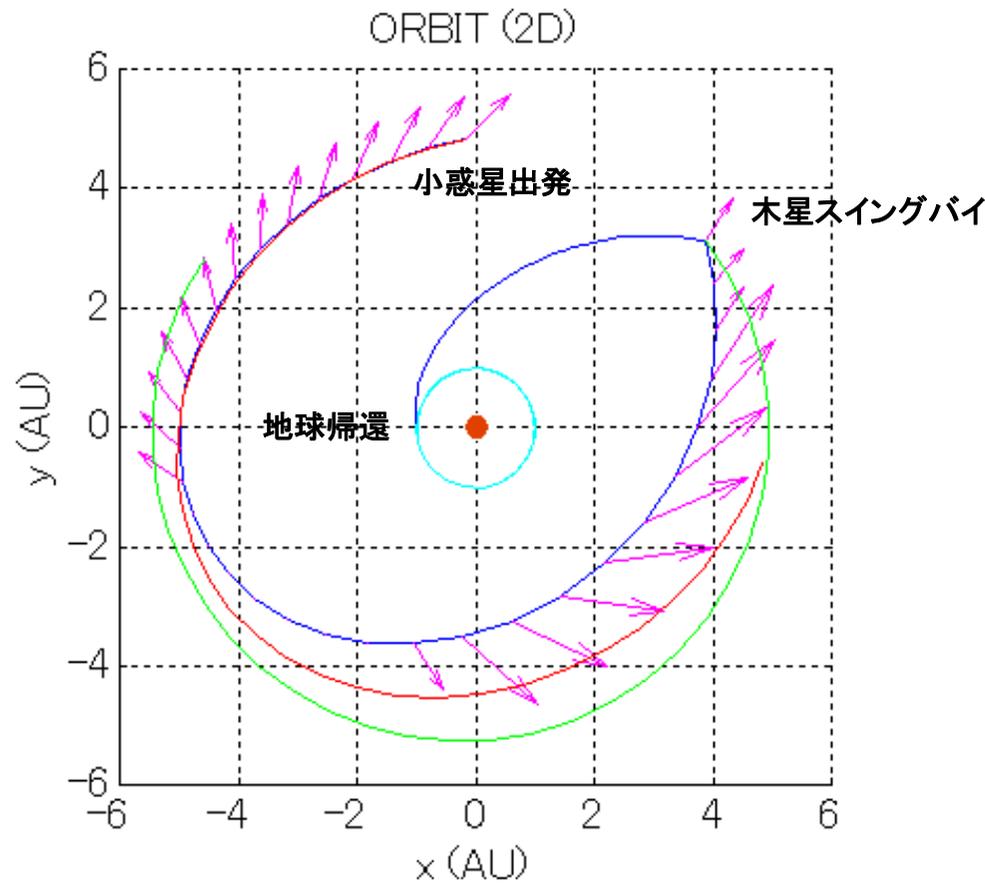
地球スイングバイ → 木星スイングバイ → 小惑星到着



— Spacecraft — Earth — Jupiter — Asteroid → Thrust

軌道例(復路)

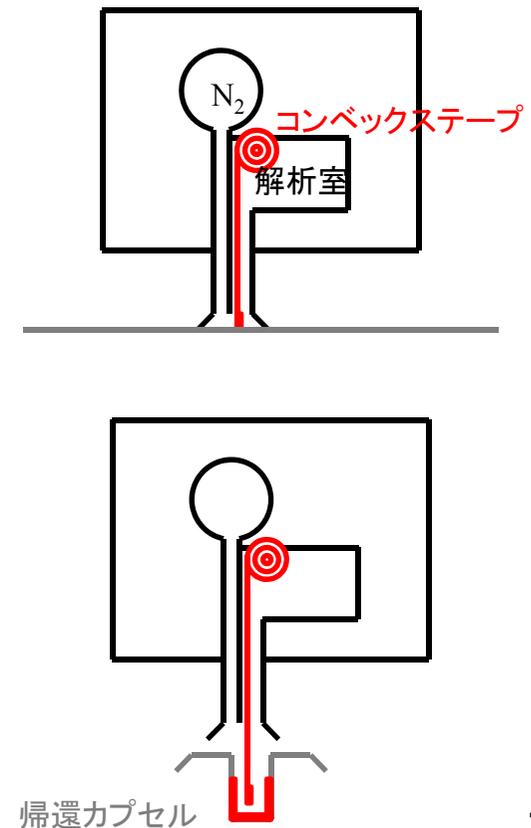
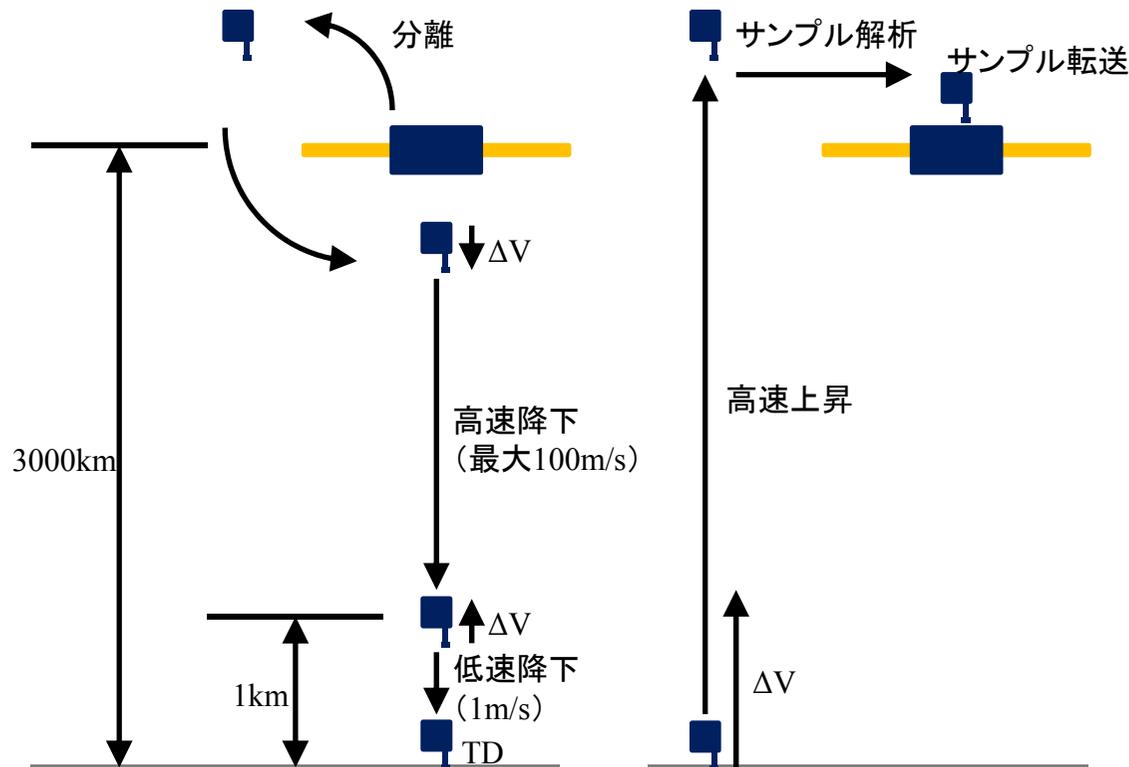
小惑星出発 → 木星スイングバイ → 地球帰還



— Spacecraft — Earth — Jupiter — Asteroid → Thrust

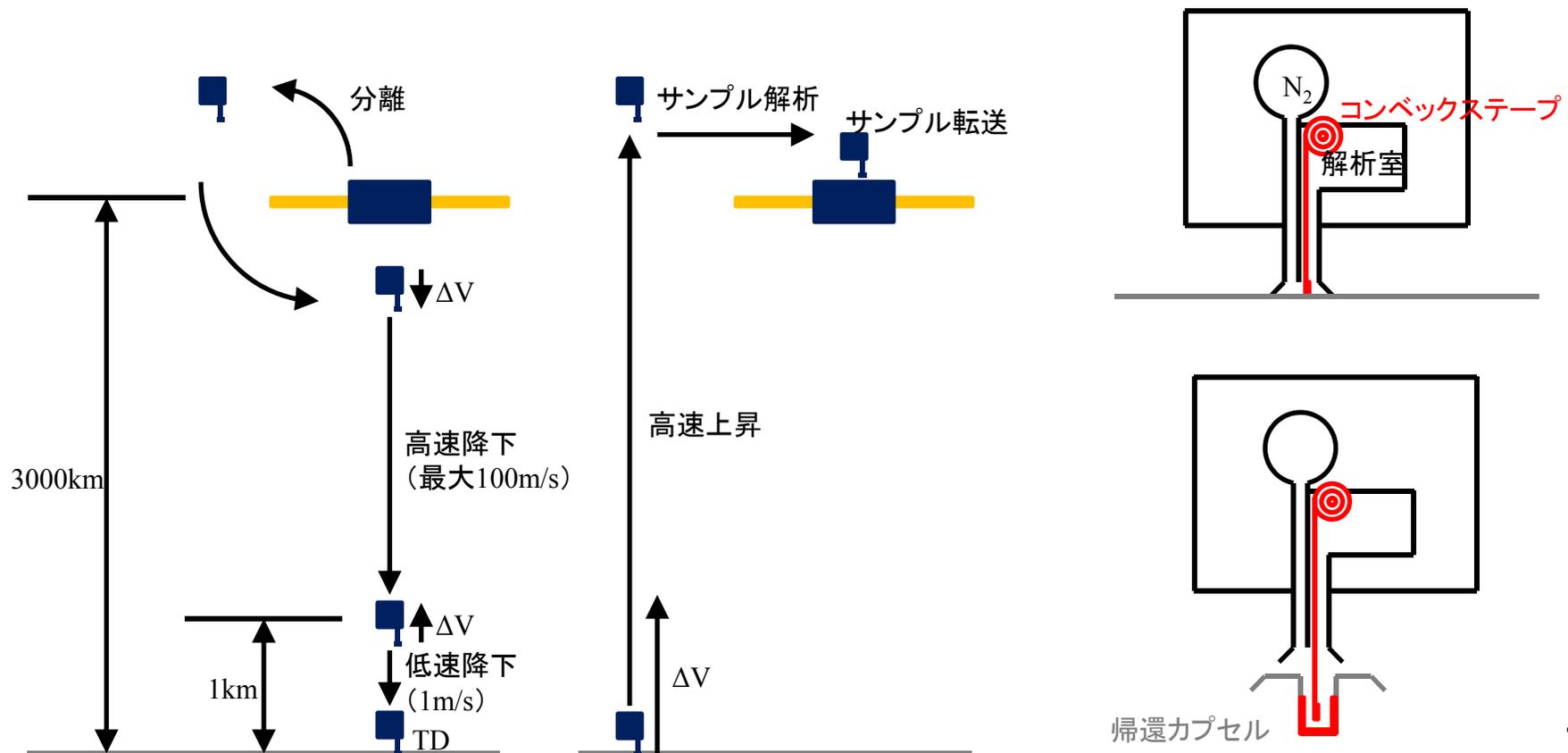
子機による着陸

- ・子機は、1x1x1m, 200kg程度.
- ・電力を一次電池で供給する.
- ・伝搬遅延が大きいため自律的に障害物回避, 着陸, サンプリングを行う.
- ・高度3000km~1kmにおいて, 最大100m/sの高速降下を行い, 急減速した後, 高度1km~地表において1m/sの低速降下に移行する.

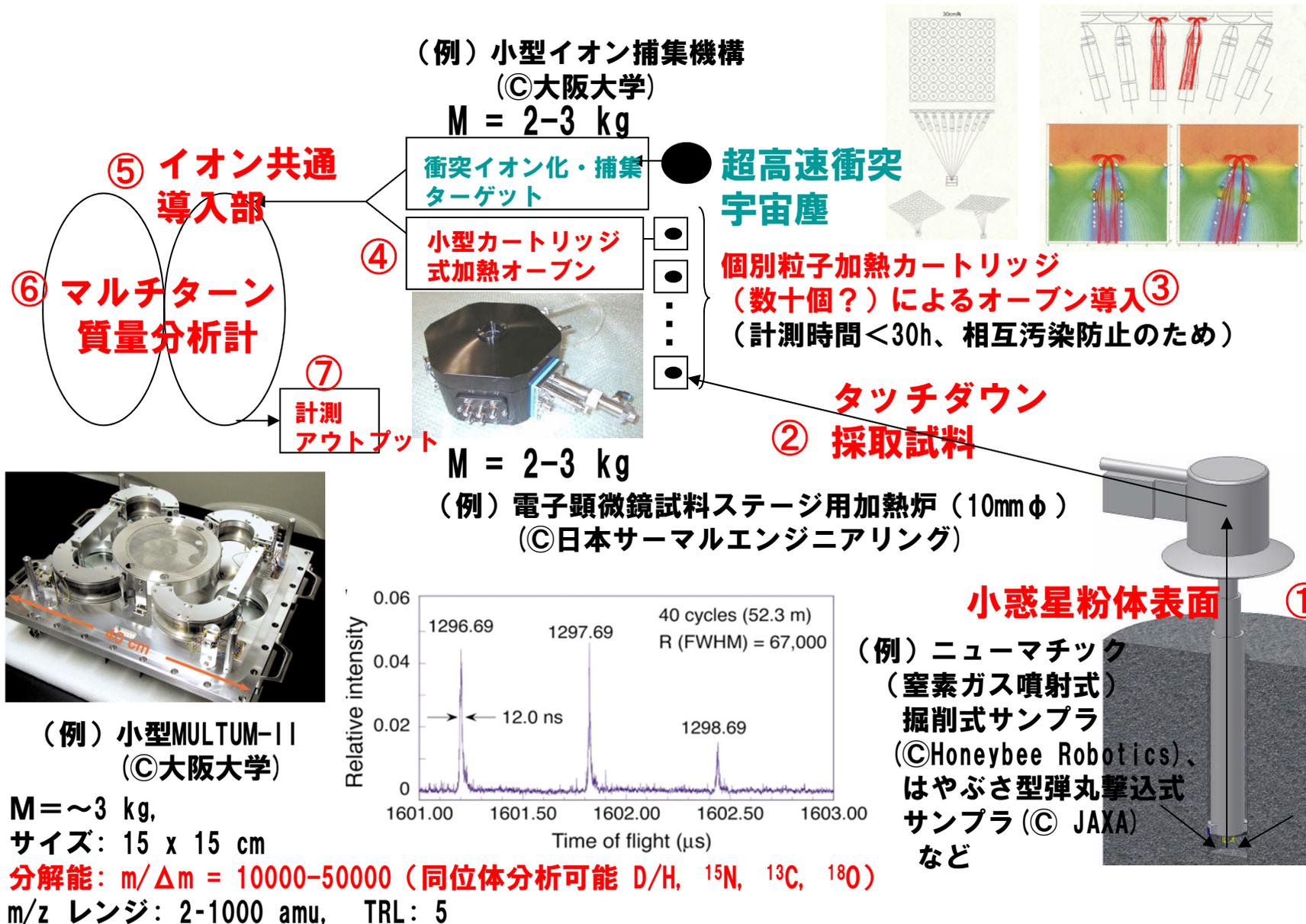


子機によるサンプリング

- ・子機は脚を有さず、RCSにより数sec～数十secの瞬間的なタッチダウンを行う。
- ・pneumaticドリルとコンベックステープを組み合わせた方法を検討する。
タッチダウンの瞬間にN₂を噴射することにより、小惑星表面を掘削し、地中のサンプルを質量分析器に導入する。
親機とランデブーした後、コンベックステープを伸展し、サンプルを帰還カプセルに挿入する。
- ・バックアップとして弾丸によるサンプリングも検討する。



その場質量分析システムの概念

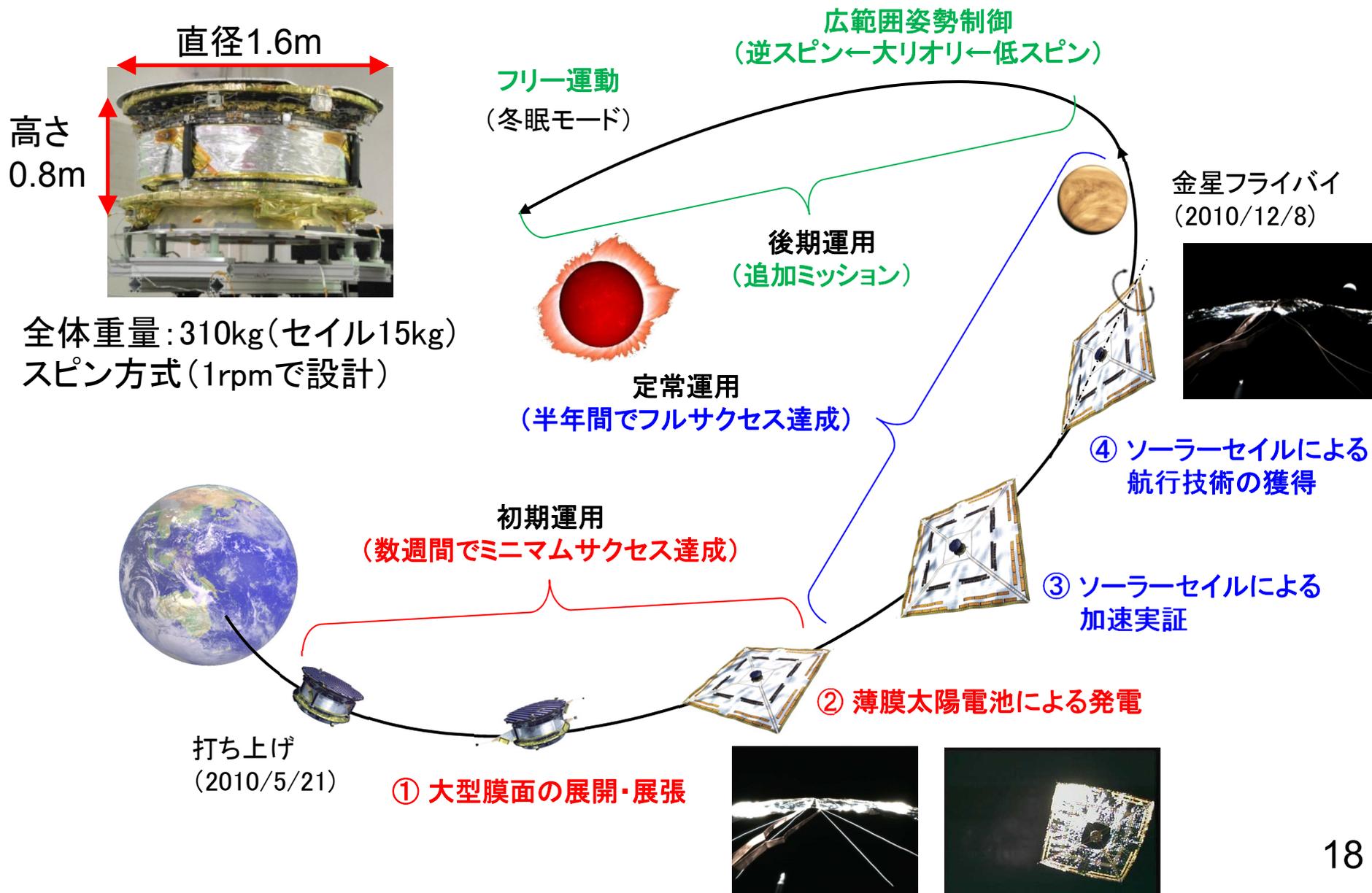


まとめ

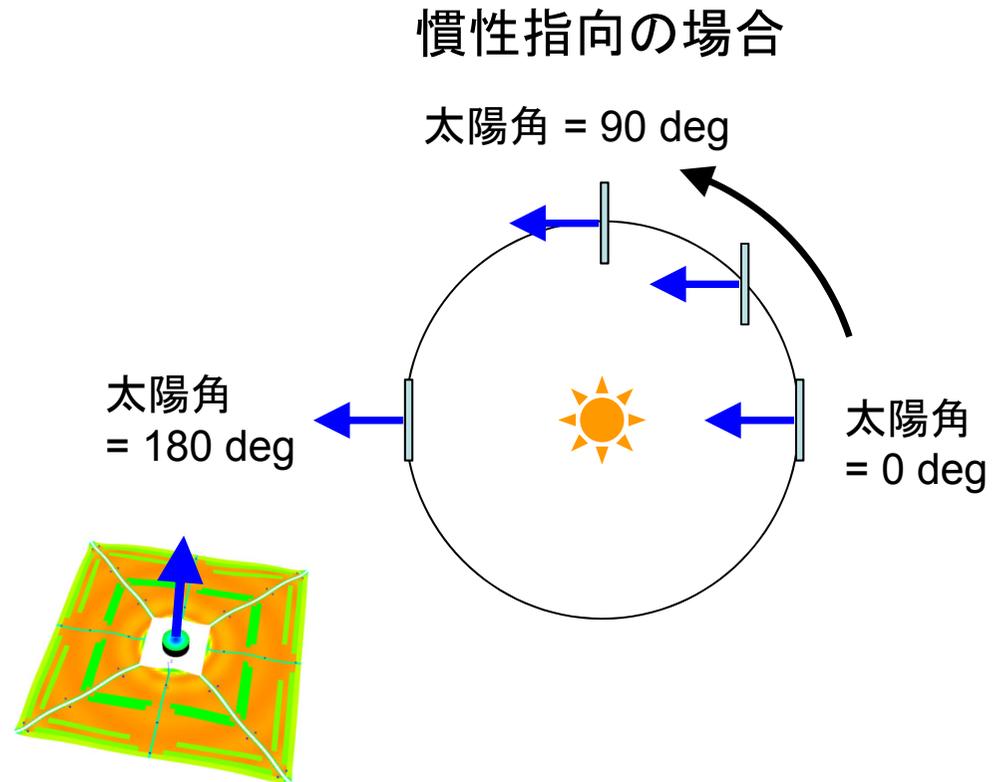
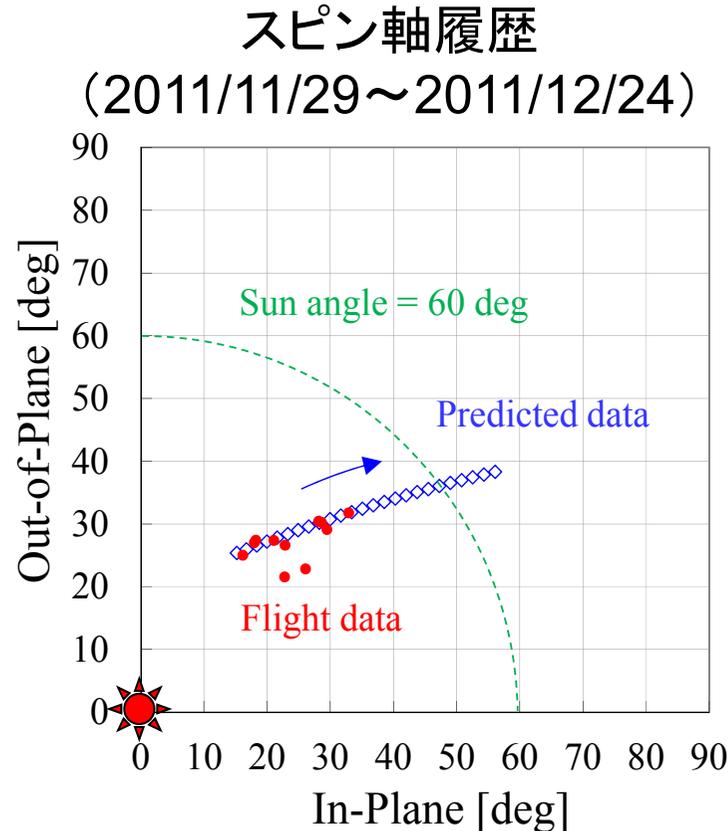
探査機	打ち上げ	メインエンジン	探査対象
はやぶさ	2003年	イオンエンジン	イトカワ(S型)
IKAROS	2010年	ソーラーセイル	(金星フライバイ)
はやぶさ2	2014年 予定	イオンエンジン	1999 JU3(C型)
ソーラー電力 セイル探査機	2022年 想定	大型ソーラーセイル 高比推力イオンエンジン	トロヤ群小惑星(D型) クルージング観測 (木星フライバイ)

はやぶさやIKAROSで実証した技術を発展させて、日本独自のソーラー電力セイルによる外惑星領域往復探査技術を確立し、将来の太陽系探査を日本が先導する。

IKAROSミッションシーケンス



冬眠モードへの移行



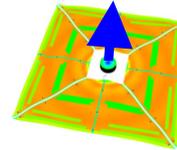
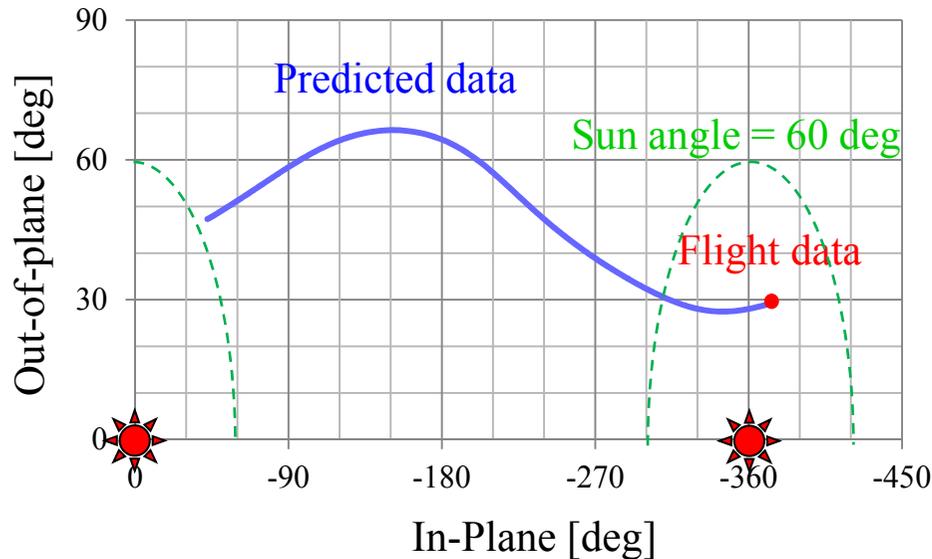
残推薬がわずかとなったため、2011年12月1日以降ガスジェットによる姿勢制御を実施せず、フリー運動とした。

↓
太陽角が増大し60deg以上となったことで、必要な電力が確保できなくなった。

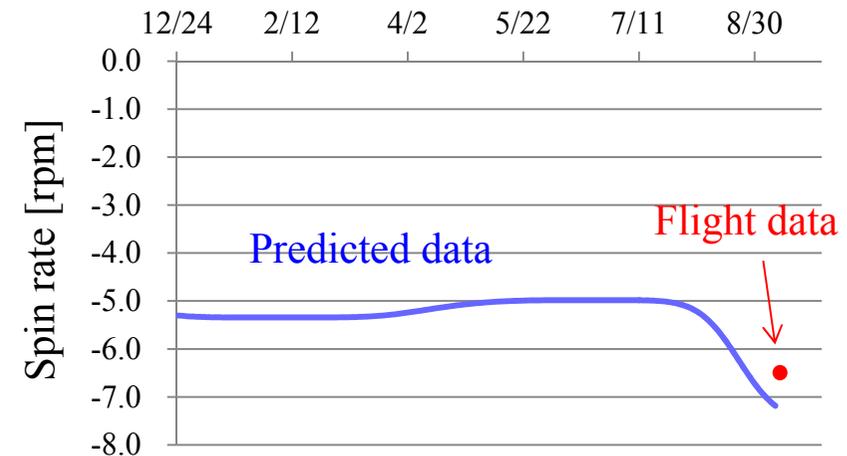
↓
2011年12月末までに**冬眠モード**(搭載機器シャットダウン)に移行した。

探索ミッション(1回目)

スピン軸履歴
(2011/12/24~2012/9/8)



スピンレート履歴
(2011/10/18~2011/12/26)
Date



冬眠モード移行後のIKAROSの姿勢運動の予測

IKAROSはソーラーセイルによって姿勢・軌道が変化する。

冬眠明けに再び追跡するためには、冬眠中も含めた正確な挙動の予測が必要。
これまでのデータを用いて、2012年9月6日にIKAROSの電波の捕捉に成功した。

IKAROS冬眠明けからしばらく経過。

フライトデータと予測値はほぼ一致しているが、若干の誤差がある。

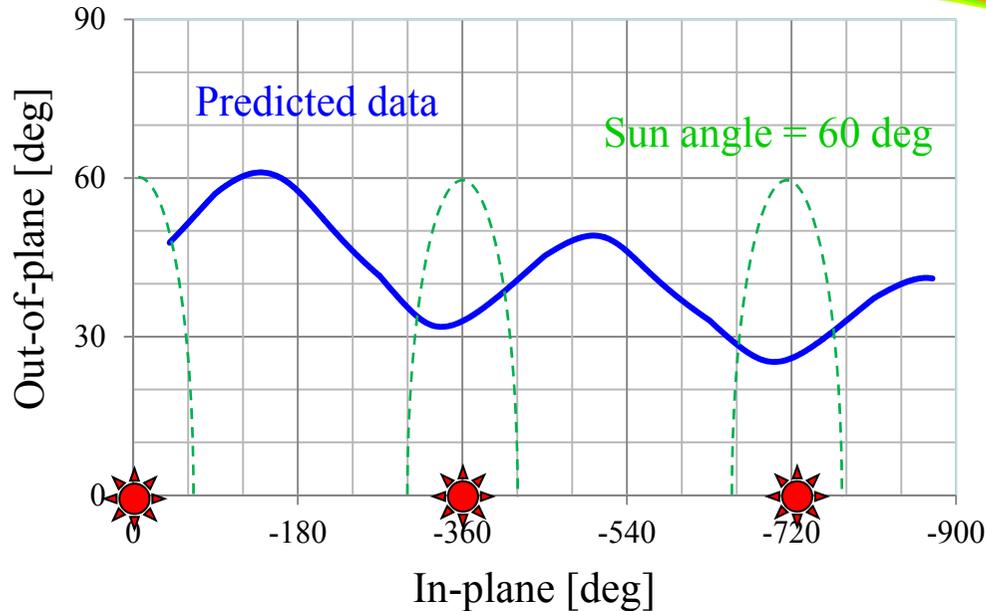
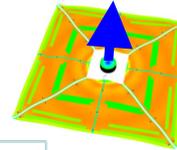
これがIKAROS探索に時間を要した一因。

この誤差をなくすよう姿勢運動モデルを修正した。

探索ミッション(2回目)

スピン軸履歴

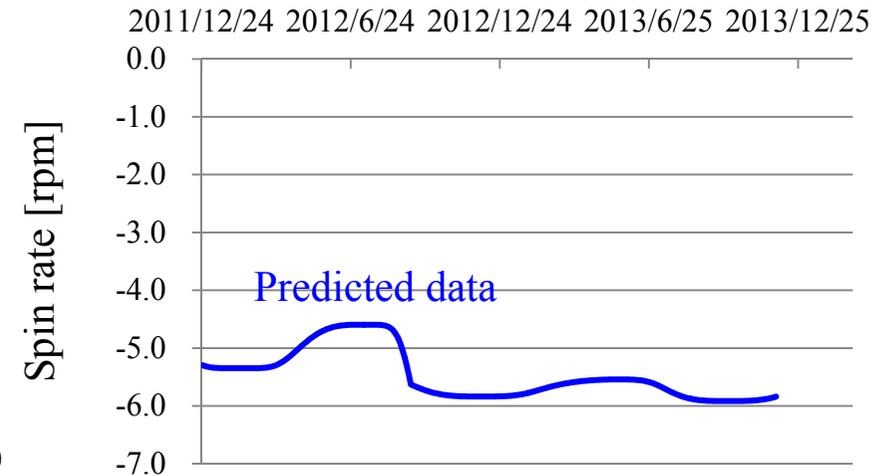
(2011/12/24~2013/11/28)



スピンレート履歴

(2011/10/18~2013/11/28)

Date



修正モデルを用いたIKAROSの姿勢運動の長期予測

IKAROSは2012年11月までに2回目の冬眠モードに移行した。
上記データを用いて、2013年6月20日にIKAROSの電波の捕捉に成功した。
2回目の冬眠明け直後、
姿勢運動モデルの修正の効果が確認できた。

今後の運用方針

- ・2013年3月にプロジェクト終了確認会を開催し、IKAROSデモンストレーションチームは解散した。今後は、IKAROS運用チーム(ISAS所属)として運用を実施。
- ・姿勢の予測データを踏まえると次回の冬眠明けは、2014年4月ごろ、地球最接近は2016年8月ごろ。
- ・今後、挑戦したいミッションは以下の通り。

運用技術の向上

スピンモジュレーションを除去したデータデコード(通信系関係者と共同で実施)

セイル・薄膜太陽電池の性能評価

2011年秋以降のカメラ画像データ(メモリに保存済み)の取得

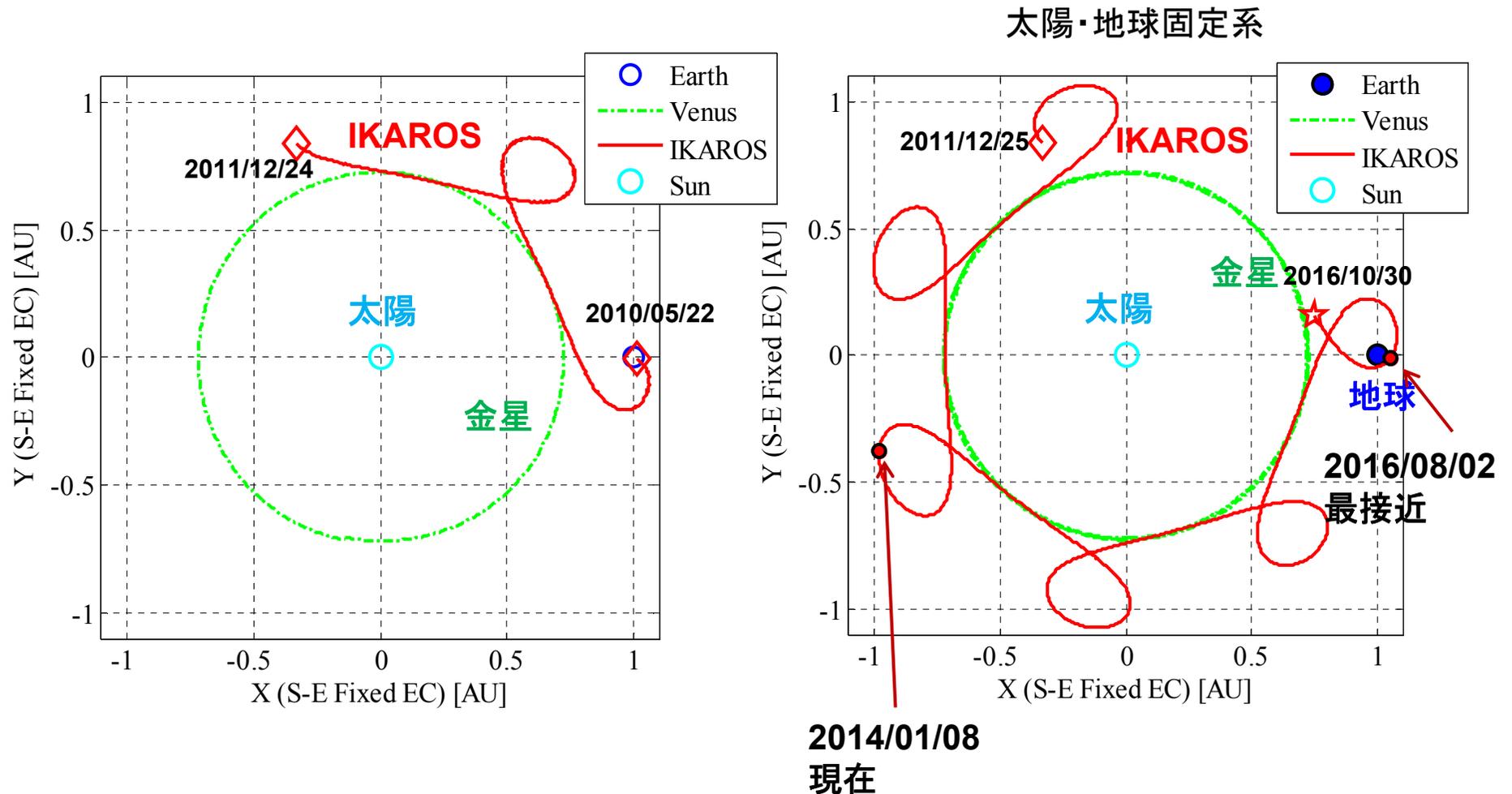
2011年夏以降の薄膜太陽電池発電データの取得

IKAROSの運動&状態確認

姿勢・軌道, HK(各種温度等)データの取得

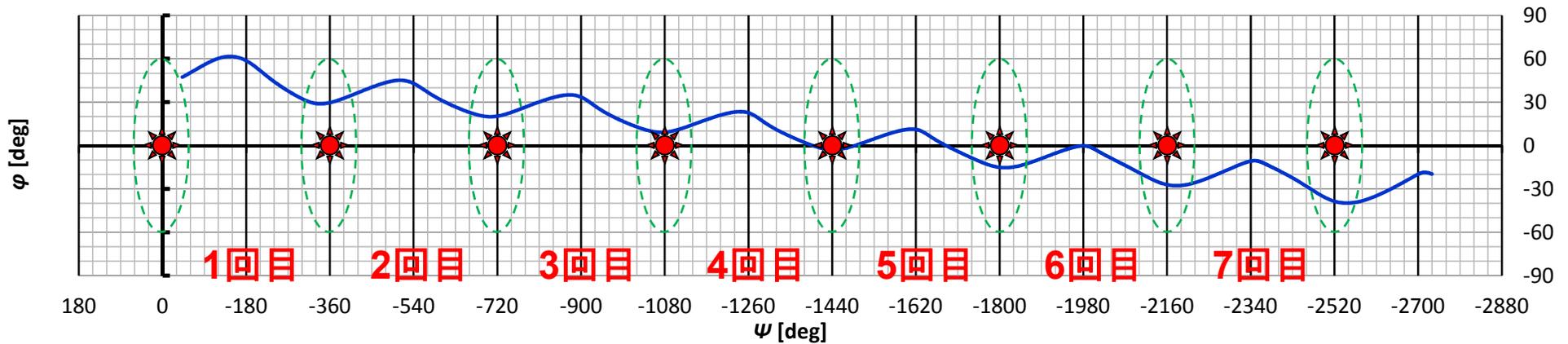
軌道運動

- ・今後、徐々に地球距離が減少し、テレメトリ取得の可能性が高まる。
- ・地球に最接近するのは、2016年8月となる(最接近距離:1千万km程度)。

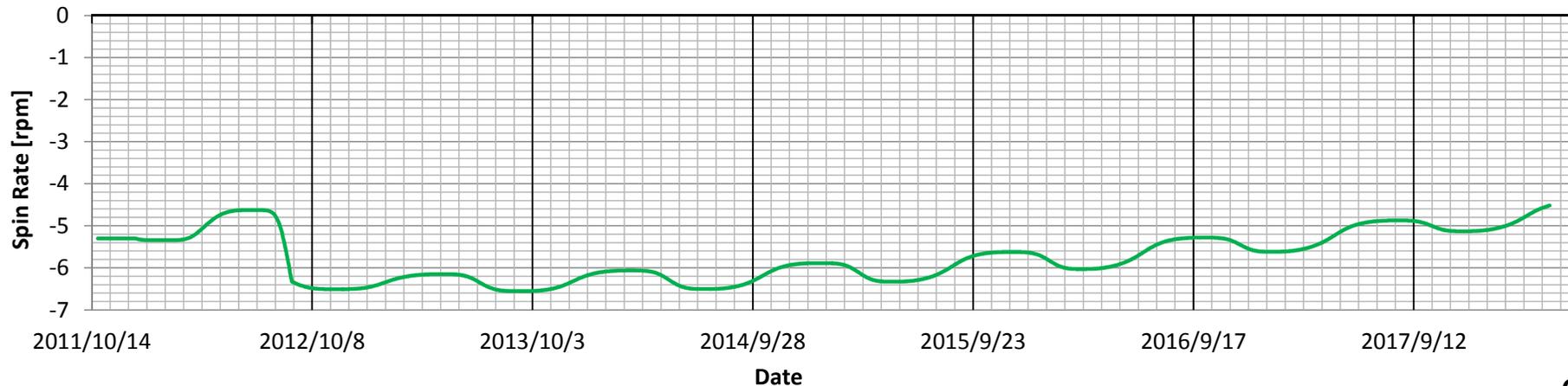


姿勢運動

スピン軸予測
(2011/12/24~2017/10/30)



スピンレート予測
(2011/10/18~2017/10/30)



発表リスト

- P2-145: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査 ミッション検討
- P2-146: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星への着陸探査と試料採取:
科学目標・技術検討・候補天体探索
- P2-147: ソーラー電力セイルによる科学観測 - クルージング編
- P2-148: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査に向けた大型セイル設計・製作
- P2-149: ソーラー電力セイル用高比推カイオンエンジンの研究開発
- P2-150: ソーラー電力セイルへの適用を目指した推進系統合型燃料電池の評価
- P2-151: ブーム・膜複合宇宙展開構造の研究開発
- P2-152: 次期ソーラー電力セイルに向けた大型膜面の収納・展開・展張法の検討
- P2-153: ソーラー電力セイル用薄膜軽量発電システムの開発III
- P2-154: ソーラー電力セイルによる木星圏サンプルリターン計画にむけた超高速再突入
カプセルの研究開発
- P2-155: ソーラー電力セイル用膜面フェーズドアレーアンテナのためのアクティブ集積
アンテナアレーの試作