

S2-010

ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群 小惑星探査とその先の小天体探査



○森 治 (JAXA), ソーラーセイルWG

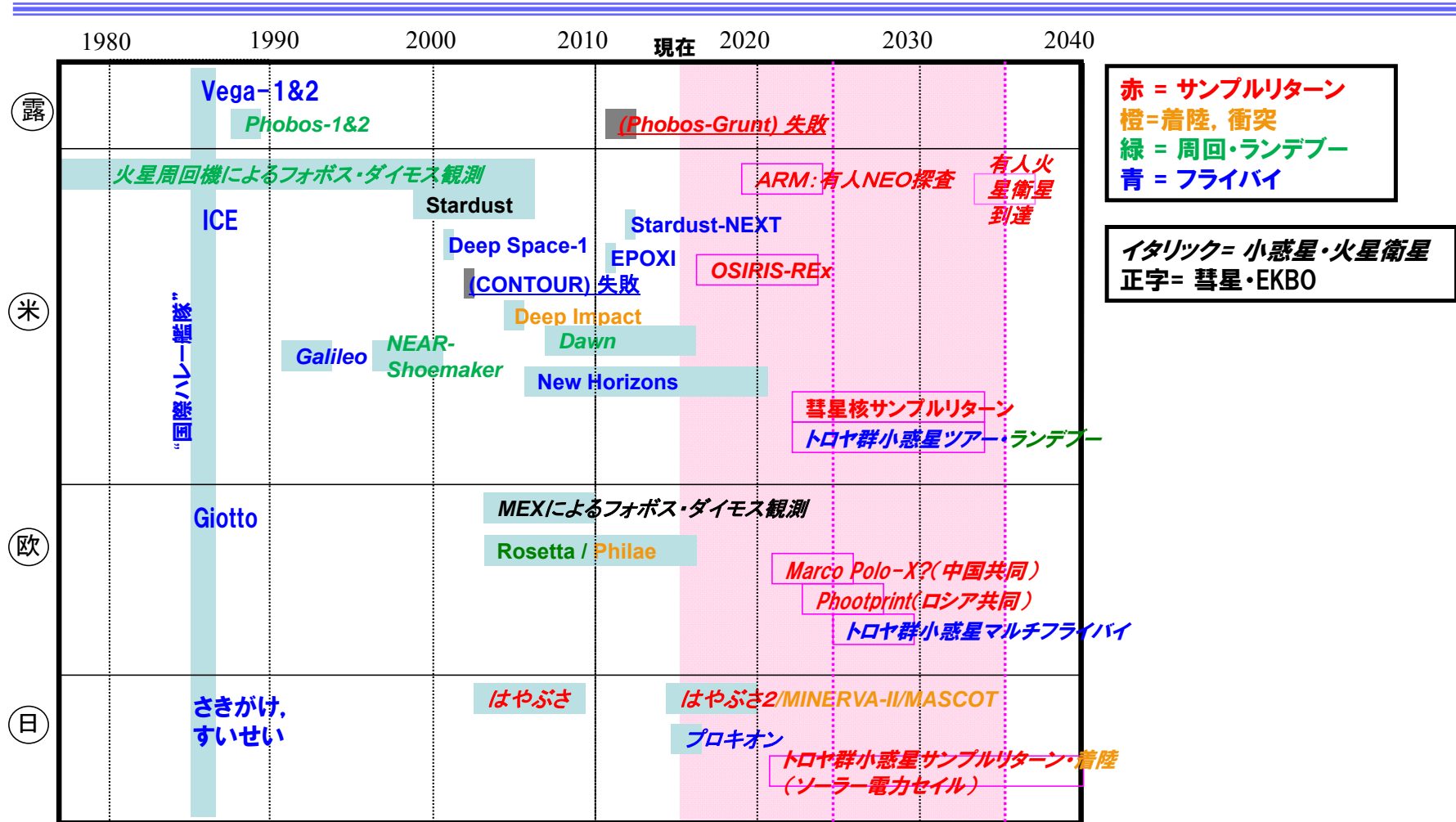
これまでの小天体探査実績（運用中を含む）

	1980	1990	2000	2010
フライバイ	1985<ジャコビニ・ツィナー彗星> ICE 1986<ハレー彗星> ベガ1号・2号, さきがけ, すいせい, ジオット, ICE	1991<ガスプラ> ガリレオ 1992<グリグ・シェレルブ彗星> ジオット 1993<イダ> ガリレオ 1996<マテルダ> ニア・シューメイカー 1999<プレイユ> ディープ・スペース1	2001<ボレリー彗星> ディープ・スペース1 2002<アンネフランク> スター・ダスト 2008<シュテインス> 2010<ルテティア> ロゼッタ ● 2004<ビルト2彗星> スター・ダスト 2005<テンペル1彗星> ディープ・インパクト	2015<冥王星> ニューホライズンズ 2011<テンペル1> NEXT 2010<ハートレイ2> EPOXI
衝突				2019<1999 JU3> はやぶさ2
ランデブー・着陸			2000<エロス> ニア・シューメイカー	2014<チュルモフ・ グラシメンコ> ロゼッタ 2011<ベスタ> 2015<セレス> ドーン
サンプルリターン			2005<イトカワ>はやぶさ (2010年帰還) ● 2004<ビルト2彗星> スター・ダスト(2008年帰還)	2018<1999 JU3> はやぶさ2

※年は天体に到着した(する)年を示す
 ※その他, 火星衛星のフライバイ等あり

はやぶさがNEOサンプルリターンを切り拓き, はやぶさ2でこれを継承・発展させる。

小天体探査の国際動向



赤 = サンプルリターン
 橙 = 着陸, 衝突
 緑 = 周回・ランデブー
 青 = フライバイ

イタリック= 小惑星・火星衛星
 正字= 彗星・EKBO

海外でもはやぶさを踏まえて、地球近傍小惑星対するサンプルリターンミッションが行われるようになった。しかし、木星トロヤ群小惑星を含む小惑星帯以遠の小惑星に対して、今後20年以内に着陸機を投ずるためにはソーラー電力セイルが唯一の現実的ソリューションである。日本の小天体探査の国際的優位性をはやぶさ2以降にも維持・発展できる。

太陽系天体毎の国際動向

	月	水星	金星	火星 圏	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				

* 2015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

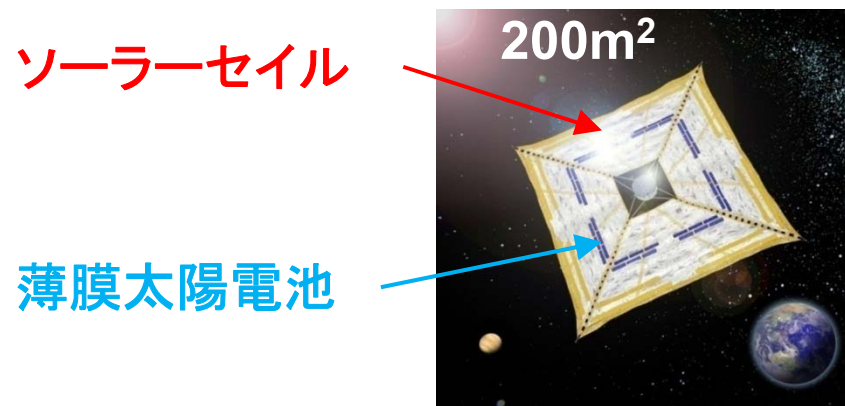
ソーラー電力セイルを用いることで木星圏に加え土星圏でも着陸・往復が可能となる。

ソーラー電力セイルとは？

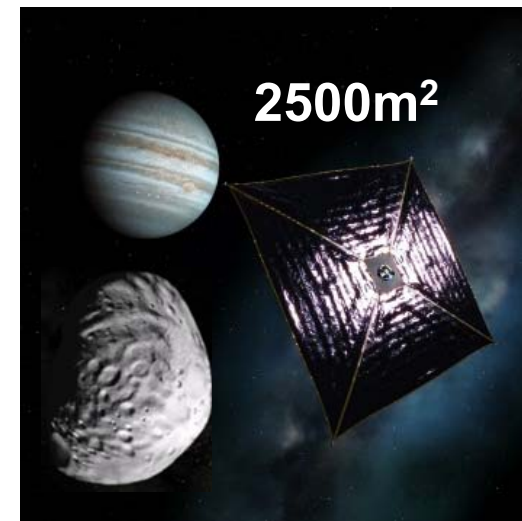
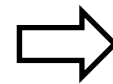
ソーラーセイルのセイル(帆)の一部を薄膜太陽電池とすることで、太陽光を受けて加速するだけでなく、太陽光発電も同時に行う日本独自のアイデア。
→「IKAROS」で世界で初めて実証した。

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。



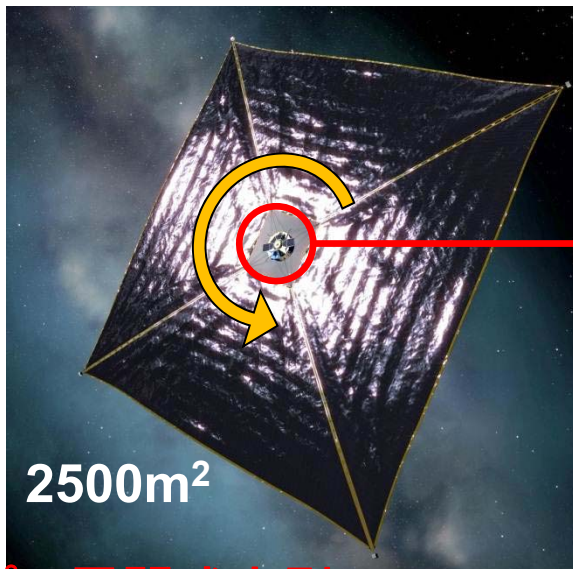
IKAROS



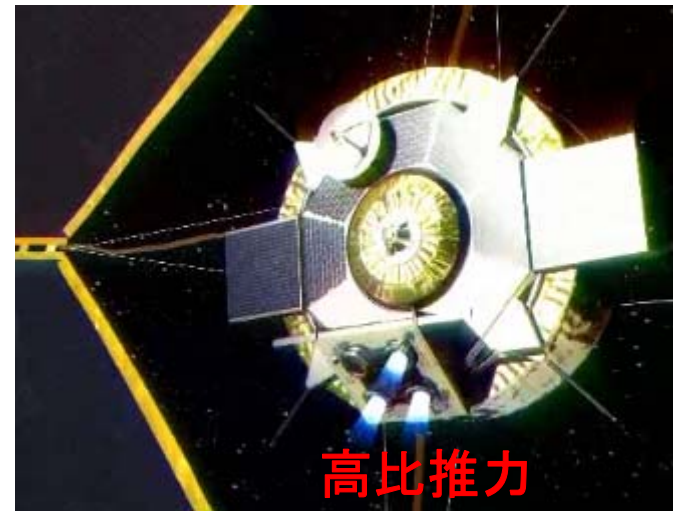
ソーラー電力セイルによる
外惑星領域探査計画

ソーラー電力セイル探査機

- ・**スピン展開式大型ソーラーセイル** (面積: 2500m^2 , IKAROSの10倍以上)
全体に**薄膜太陽電池**を貼り付け, 超軽量発電システム (1kW/kg)を構成.
外惑星領域で大電力 ($5\text{kW}@5.2\text{AU}$)を発電.
⇒フレームあり薄膜太陽電池パネルより軽量・大面積化が可能.
- ・**高比推力イオンエンジン** (比推力: 7000秒 , はやぶさの2倍以上)を駆動し,
外惑星領域で大きな増速量 (数 km/s)を達成.
⇒化学推進系では, 燃料が莫大になる.
- ・全体重量 $1.2\sim 1.3\text{ton}$, スピンレート (0.1rpm 以上).

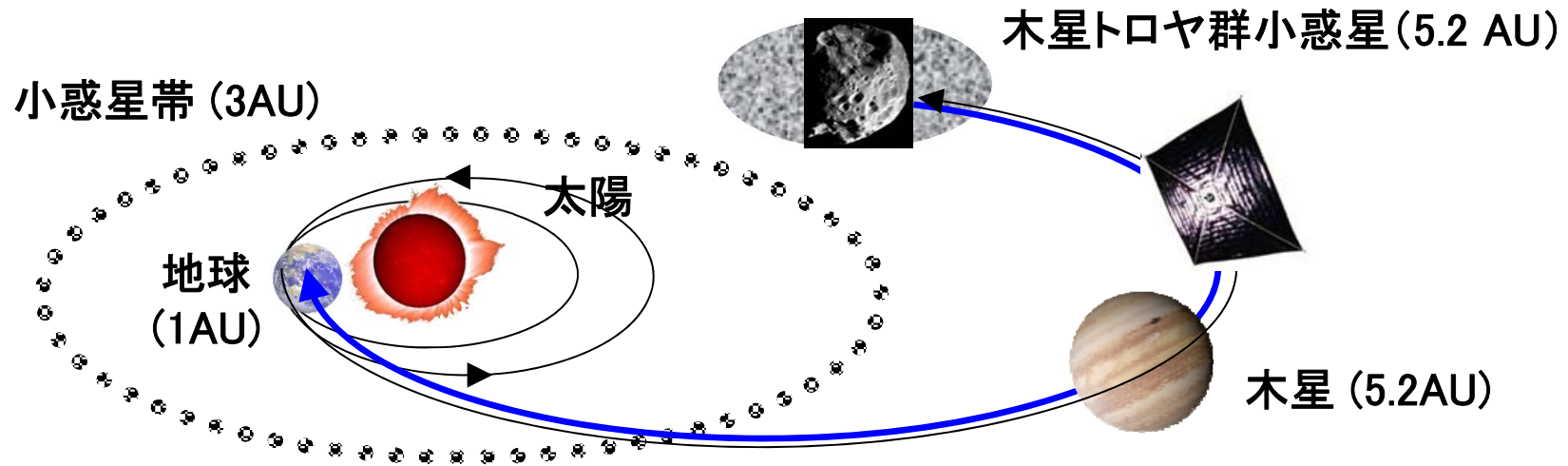


スピン展開式大型ソーラーセイル
& 薄膜太陽電池



高比推力
イオンエンジン

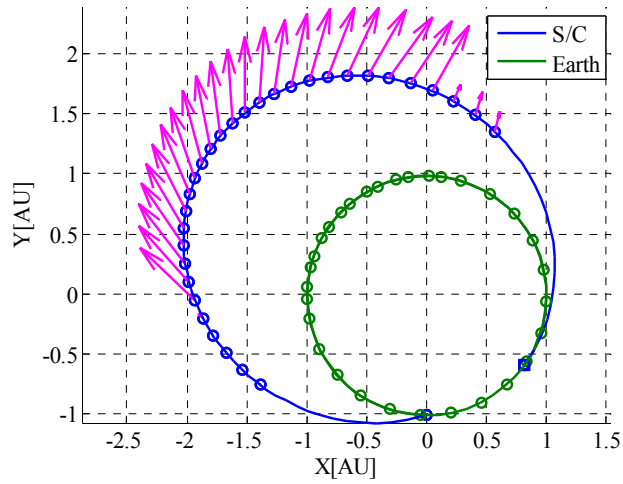
ミッションシーケンス例



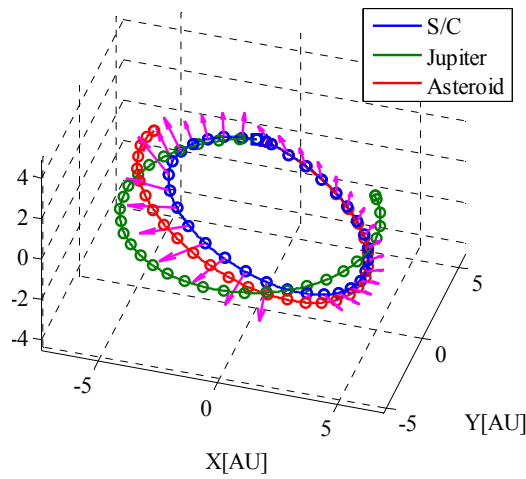
- ・2021年08月: 打上げ(※)
 - ・2023年06月: 地球スイングバイ
 - ・2025年12月: 木星スイングバイ(往路)
 - ・2036年07月: 木星トロヤ群小惑星到着
子機の着陸・試料採取・その場分析
 - ・2037年07月: 木星トロヤ群小惑星出発
 - ・2049年09月: 木星スイングバイ(復路)
 - ・2052年07月: 地球帰還
- オプション

※ 小惑星到着まで約15年を要するが、往路だけに限定すれば大幅な短縮が可能

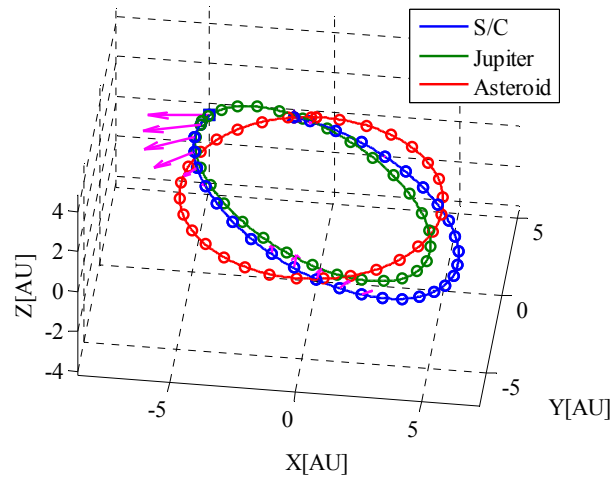
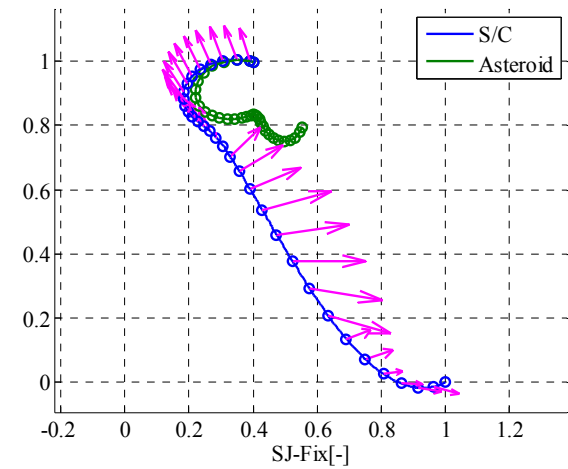
軌道例



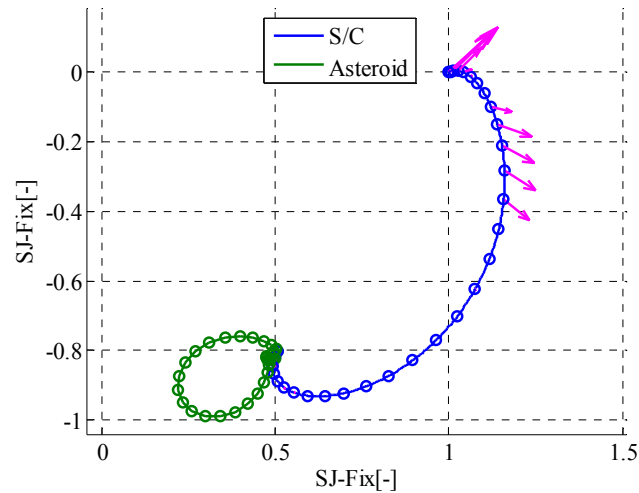
2 yr EDVEGA



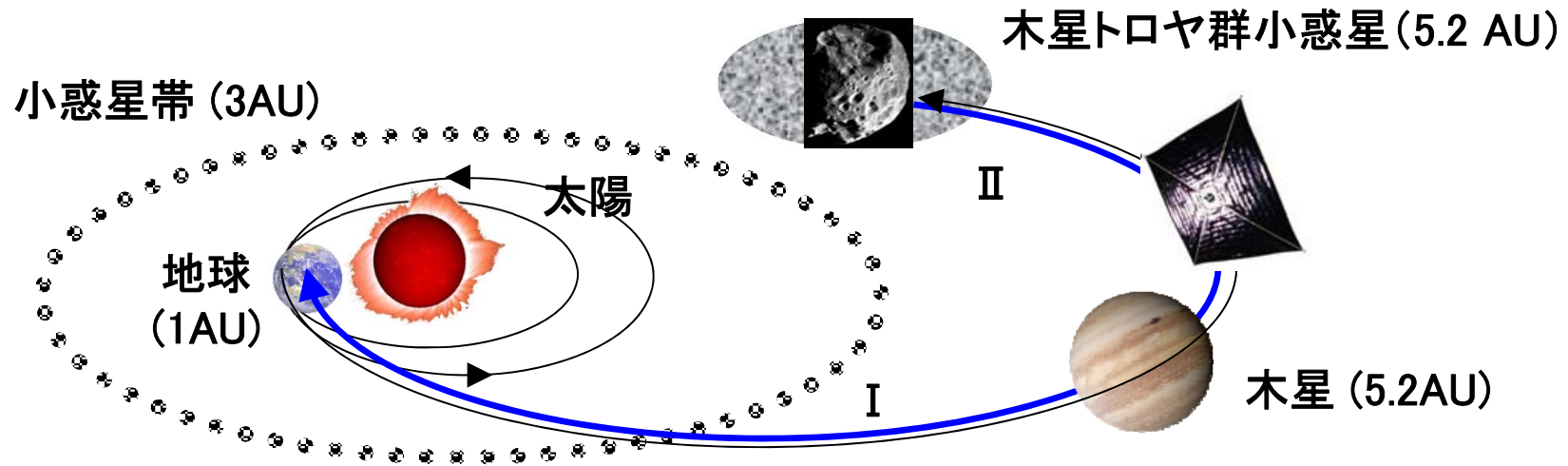
J2A



A2J



本計画で追求する理学成果



※③, ④はIKAROSオプション機器のALDNとGAPで事前実証

I. クルージングフェーズ

- ①宇宙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ガンマ線バーストの偏光観測

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

II. ランデブーフーズ

- ⑤木星トロヤ群小惑星の探査
- ⑥木星トロヤ群小惑星の試料分析

太陽系形成論における巨大惑星の軌道移動の解明

本計画で実証する新規技術

大型膜構造物の展開・展張	...	▶ 大型化(2500m ²), 熱融着膜化, 軽量化, シングルスピン方式
薄膜太陽電池システム	...	▶ 大電力化(5kW@5.2AU), CIGSの採用, 反り防止
姿勢制御デバイス	...	▶ 機能向上(スピン制御追加), 耐宇宙環境性向上, 長寿命化
低推力推進系による軌道操作	...	▶ 光子推進と電気推進のハイブリッド航行
高比推力イオンエンジン	...	▶ 高比推力化(7000秒), 長寿命化(40000時間)
低温2液推進機関	...	▶ 低温動作(-40°Cでも着火可)
USO・ΔVLBI軌道決定・航法	...	▶ 遠距離高精度軌道決定技術
サンプリング	...	▶ 内部試料採取・その場分析, <i>親機への引き渡し</i>
ランデブー・ドッキング	...	▶ RFセンサーを用いた子機の着陸・ <i>再結合</i>
<i>超高速リエントリー</i>	...	▶ <i>高速化(再突入速度:13~15km/s, Vinf:10km/s), 軽量化</i>

いずれも今後の深宇宙探査に必須の技術である。

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**の小惑星帯以遠での宇宙赤外線背景放射の観測
- **世界初**の木星トロヤ群小惑星の観測
- **世界初**の木星トロヤ群小惑星の試料分析
- **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

戦略的中型計画の理念ともよく合致する。

「世界第一級の成果創出を目指し、各分野のフラッグシップ的なミッションを日本がリーダーとして実施する」

計画策定のポイント: 航行技術

<背景>

- 外惑星領域航行では、電力確保が厳しく、必要な ΔV も大きくなるため、従来の太陽電池パネルと化学推進系の組み合わせでは大型ロケットを用いても、小惑星帯以遠の往復は困難である。
- 大型の惑星間輸送を担う主力推進機関は「原子力(原子炉を指す)」による電気推進エンジンを駆動する機関になると予想される。一方、中小型の宇宙機には原子力利用は重量的に非効率であり、太陽電池を動力源とする電気推進が採用される。

<意義>

- フレームのない大面積薄膜太陽電池を展開して十分な電力を発電し、高比推力イオンエンジンで大幅な推進薬節約を可能とするソーラー電力セイルが、中小型外惑星領域探査のもっとも有力な形態の1つとなる。
- ソーラー電力セイルは、土星圏までの外惑星領域往復を可能にする現状唯一の解となりうる。

計画策定のポイント: 探査技術

<背景>

- 始原天体探査では着陸探査をより充実させ、宇宙風化を受けていないフレッシュな内部試料を採取することが科学的に求められる。
- 数10km以上の天体に着陸する場合には推進消費量が増大するため、子機が着陸すること、往復探査は長い年月を要するため、その場分析にて科学成果を引き出すことが必要となる。

<意義>

- 本計画では、ソーラー電力セイル探査機が木星トロヤ群小惑星にランデブーして、子機を着陸させ、表面および内部試料を採取し、その場分析を行う(さらにオプションとしてサンプルリターンも行う)、というミッションシーケンスを実現するために必須となる技術実証をまとめて行う。

計画策定のポイント: 科学観測

<背景>

- 世界の小天体探査のターゲットは、地球近傍のS型/C型小惑星、火星衛星から、より遠方の始原性の高いD型/P型小惑星、彗星核、木星や土星の不規則衛星等へ向かうと考えられる。
- 特に、木星トロヤ群小惑星は太陽系の残り少ないフロンティアとしても注目されているが、欧米で検討されている木星トロヤ群小惑星探査ミッションでは、着陸・往復を含む直接探査実現の見通しが得られていない。

<意義>

- 彗星核と小惑星帯の狭間にある木星トロヤ群小惑星を直接探査することにより、太陽系形成理論の最新仮説である木星・土星といった巨大ガス惑星の惑星移動モデルを実証的に調べるミッションが可能となる。
- 深宇宙空間での巡航飛行環境を利用した複数の宇宙科学観測（宇宙赤外線背景放射の掃天観測、太陽系ダスト分布のその場計測、ガンマ線バーストの偏光観測）は、いずれも往路の早い段階から成果を創出することができ、第一級の科学成果が期待できる。

計画策定のポイント: 実験機と本番機

<現状>

- 世界標準の宇宙科学の成果出しには, Curiosity火星原子力ローバー, JWSTのように, 数千億円の投資が必要とされる時代を迎えている。我が国では, 残念ながら同規模の投資をすることは難しい状況にある。
- はやぶさ, あかつき, はやぶさ2の技術では, 木星圏たる外惑星領域探査が実現できない。 外惑星領域では, 通信・熱などの技術的な問題が如実に現れる。

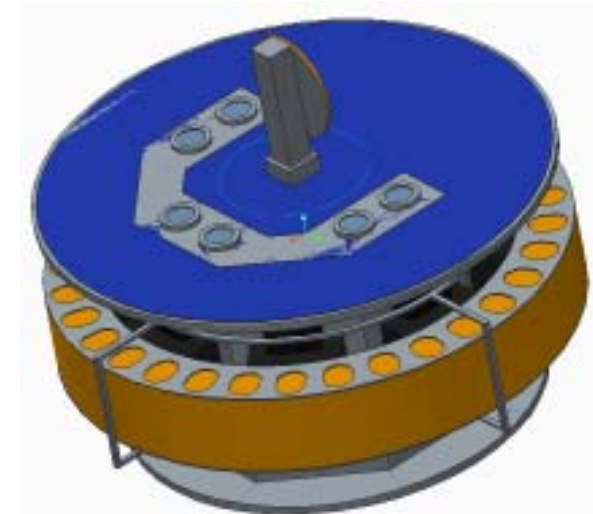
<戦略>

- 実験機と本番機を組み合わせることでリスクを軽減し, 投資と技術格差の二重のハンディを補う (はやぶさ・はやぶさ2と同様の考え方)。
- 本番機が実現できなくても, 実験機の意義は喪失しない (圧倒的なイノベーションなので, 本番機の打上げまでに技術の陳腐化はなく, 国際共同の道も開ける)。
- IKAROSは「技術要素実証機」という位置づけ。

※ 挑戦には実験機を経過させるフィロソフィーが必要であり, 実験機なくして世界初の成果を期待することはできない。

ソーラー電力セル探査機の設計

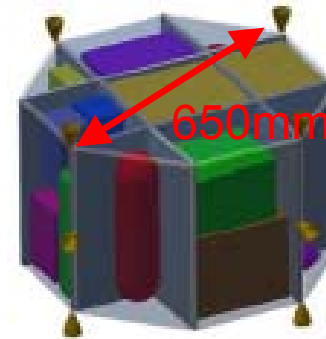
Minimum Delta-V Case(2002 VH107)			remark
Isp of ion engine system	sec	7172	
IES thrust	mN/unit	26.1	
Number of ion thruster	unit	6	
IES power(5.2AU, sun angle = 0deg)	W	2600	
Required power (5.2AU, sun angle = 0deg)	W	6494	
Delta-V(EDVEGA)	m/s	1500	2002 VH107
Delta-V(J2A)	m/s	1500	2002 VH107
Delta-V(A2J)	m/s	2000	2002 VH107
IES operation time	hr/unit	11588	
Ion engine system	kg	80.0	
Ion engine system tank	kg	6.8	
Sail deployment structure	kg	118.7	D=1.6m
Solar power sail & tip mass	kg	204.6	
Bus instrument	kg	150.0	
Chemical engine system(RCS)	kg	30.0	
RCS tank	kg	17.5	
Lander	kg	100.0	include margin
Mission instruments+Re-entry capsule	kg	50.0	
Structure	kg	180.0	wet * 0.15
Option	kg	47.8	
IES propellant	kg	85.2	
RCS propellant	kg	129.4	
Dry weight	kg	985.4	
Wet weight	kg	1200.0	



ソーラー電力セル探査機は約1.3tonで100kgの子機を木星トロヤ群小惑星に輸送する。
 (Rosettaは約3tonで同じ100kgの着陸機Philaeをより近傍の彗星へ輸送した)
 ⇒ソーラー電力セルにより中型計画規模での外惑星領域の直接探査が可能となる。

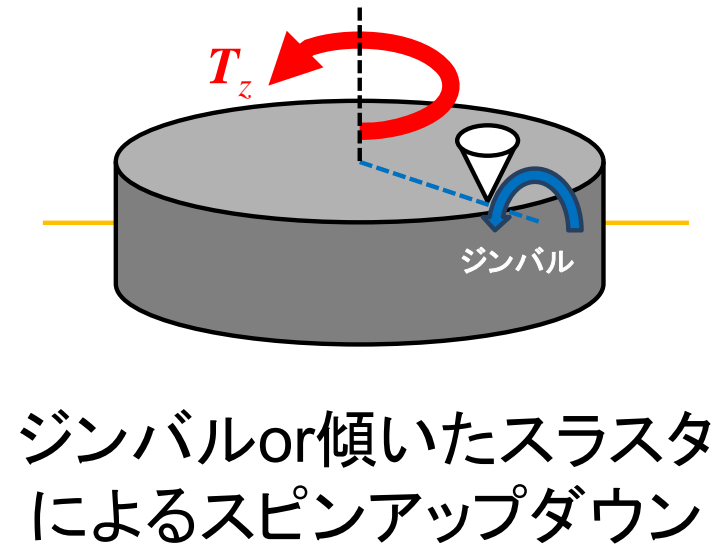
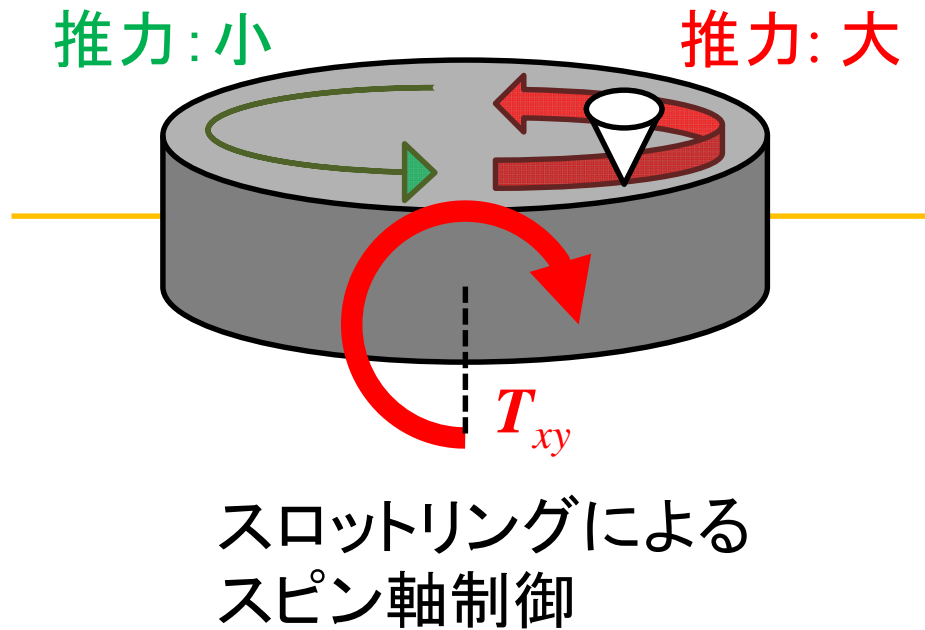
子機的设计

Subsystem			Weight [kg]	Power [W]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	Volume [cm ³]	
Power			8.87	7.5				9759	
	Primary Battery		6.87		204.7	179.2	145.9	5352.6	
	PCU		2.00	7.5	195.3	168.7	133.7	4406.6	
Communication			3.00	6.5				1739	
	Antenna		0.50						
	TX/RX		2.00	6.5	198	149	42	1239.1	
	Others (Amplifier etc.)		0.50		100	100	50	500.0	
C&DH			4.00	15.0				6600	
	DHU		4.00	15.0	220	200	150	6600.0	
RCS			24.40					7980	
	Biprop.	Fuel Tank	0.20		123.2	φ	φ	980.3	
		Fuel Tank Str.	0.22						
		Oxidizer Tank	0.23		108.0	φ	φ		
		Oxidizer Tank Str.	0.19						
		Thruster	1	1.00					
	Cold Gas	Valve, Piping, etc		10.00					
		Tank	0.36		56.7	φ	φ		
		Tank Str.	0.19						
		Thruster	12	6.00					
		Valve, Piping, etc		6.0		→			7000.0
AOCS			14.01	85.3				18560	
	AOUCU		2.69	12.43	219.1	171.4	129.4	4858.7	
	Sun Sensor		0.85	0.47	155	90	70	976.5	
	IRU		0.72	7.25	90	φ	85	540.7	
	ACM		4	1.88	38.0	φ	47.0	53.3	
	Star Tracker		0.85	3.50	80	100	180.5	1444.0	
	Driver		2.20	5.21	174.6	160.3	107.0	2995.3	
	ONC-AE		1.83	12.50	115.1	99.2	54.9	627.1	
	ONC-E		0.51	17.10	284.9	173.0	76.4	3768.3	
	ONC		0.72	↑	148.1	105	71	1104.1	
	Flash-LIDAR		3.25	25.00	115.1	171.4	111.1	2192.4	
Separation Mechanism			2.00						
Wire Harness			3.81		→			4613	
Structure			13.81						
Structure			9.8						
Landing Gear			4.0						
TCS			2.55					1239	
	Heater		2.00		198	149	42	1239.1	
	MLI		0.55						
Science			20.00		→			28000	
Instrument			54.44					65897.8	
Dry Mass			96.46						
Fuel			1.65						
Wet Mass			98.1					78491	

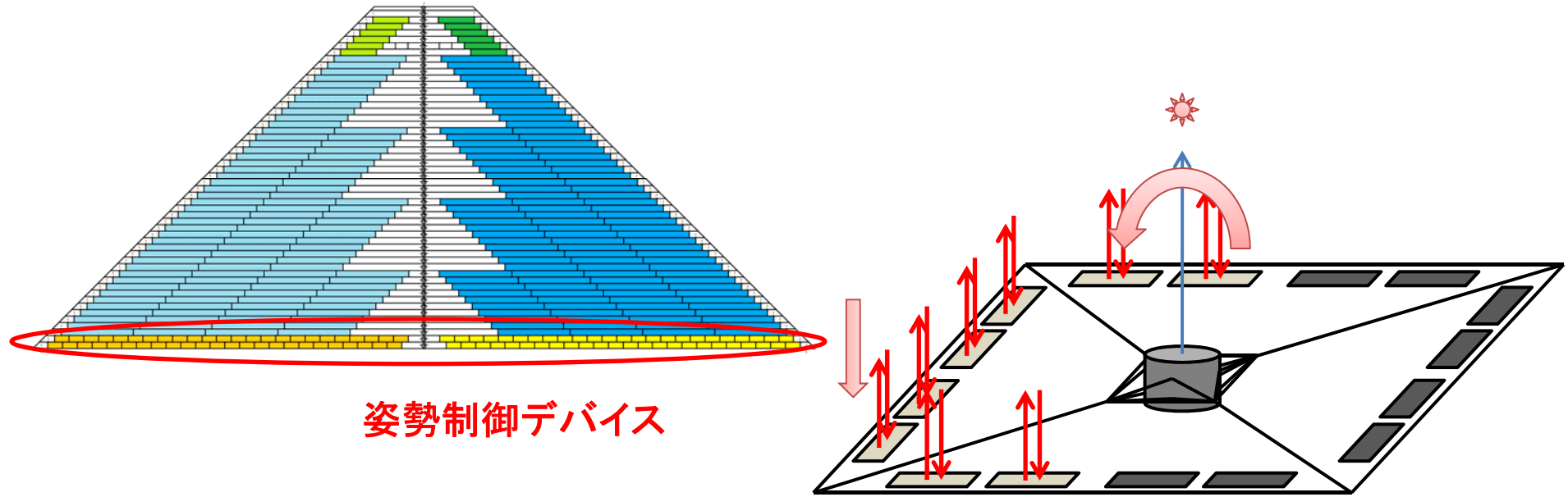


- Philaeと異なり, 化学推進系を搭載.
- 子機はDLRと共同開発を検討中 (2014年7~9月にJoint Studyを実施).

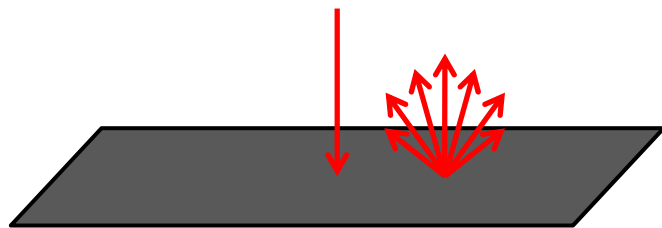
イオンエンジンによる姿勢制御



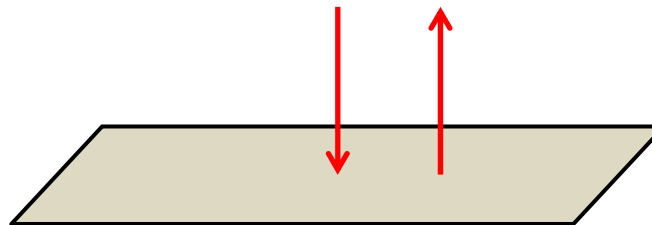
姿勢制御デバイスによるスピン軸制御



姿勢制御デバイス



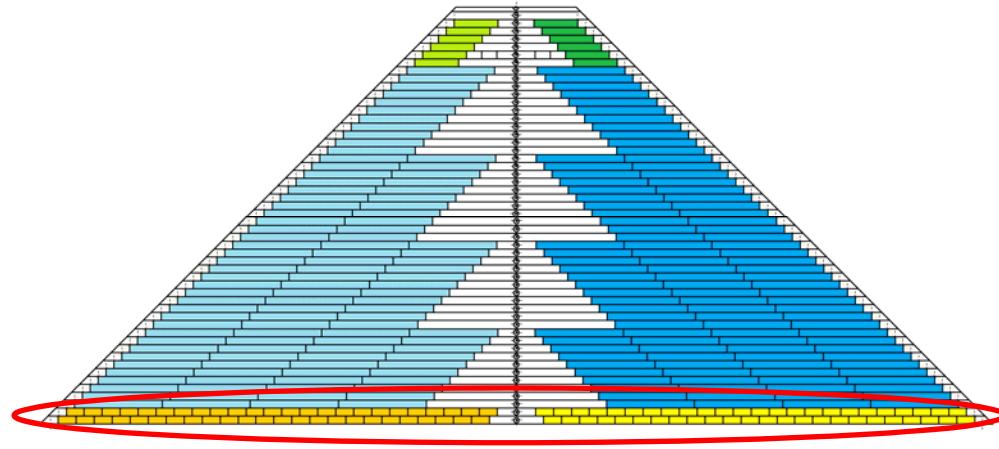
OFF



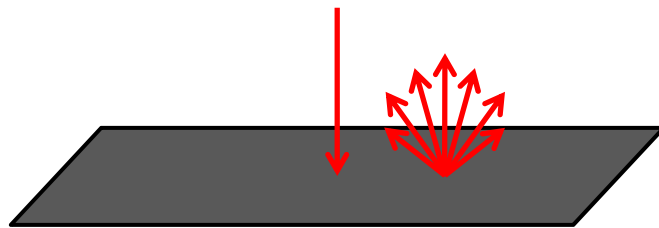
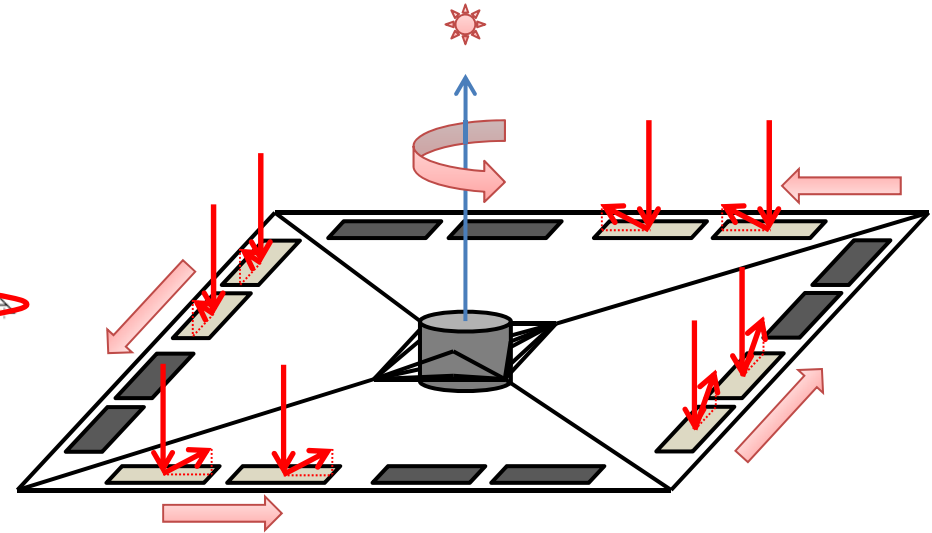
ON



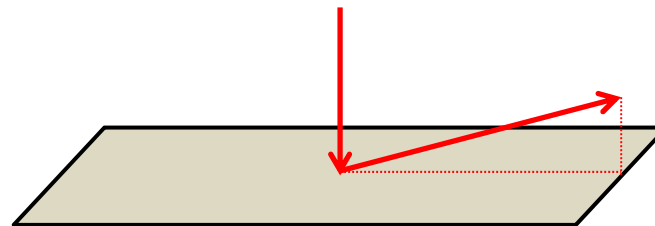
姿勢制御デバイスによるスピンアップダウン



姿勢制御デバイス



OFF



ON

試料採取・その場分析

試料採取

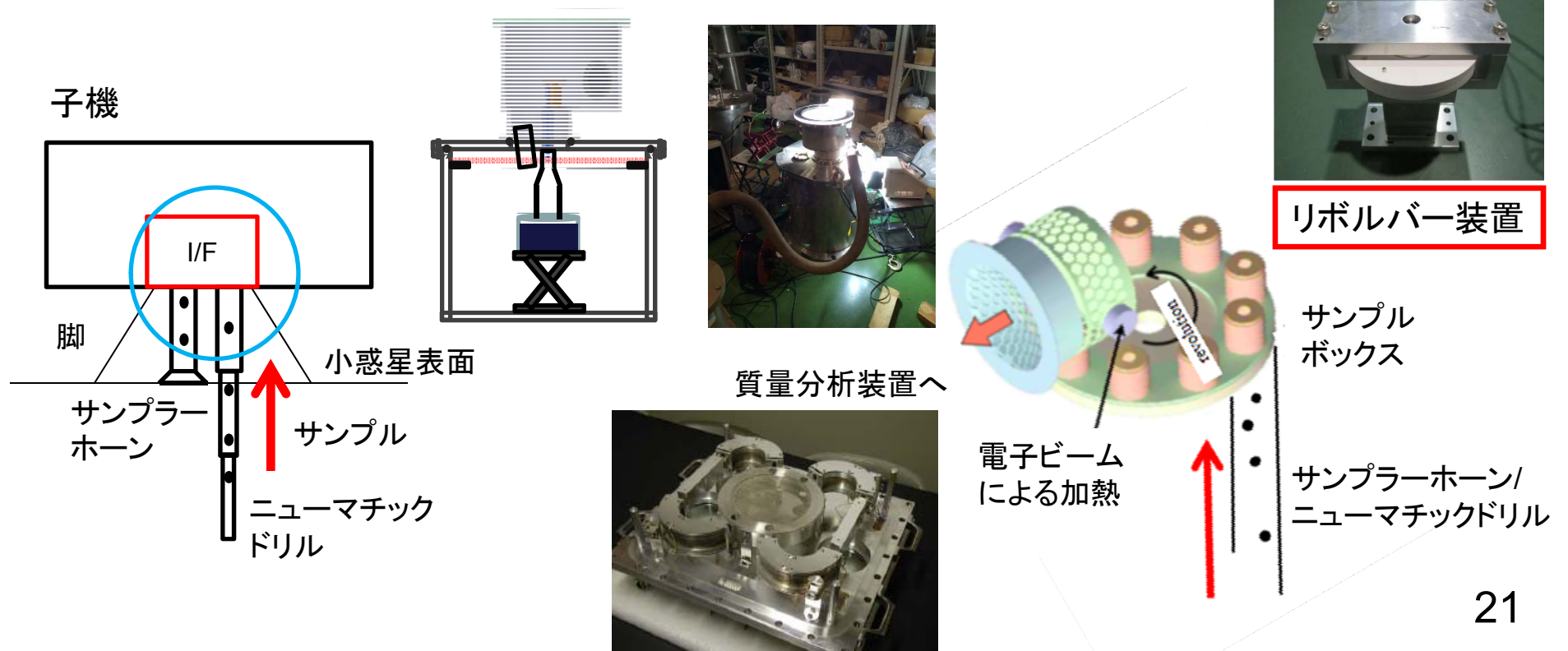
①表面試料

はやぶさと同様、弾丸を撃ち込んで試料を吹き飛ばし、リボルバー装置に引き込む。

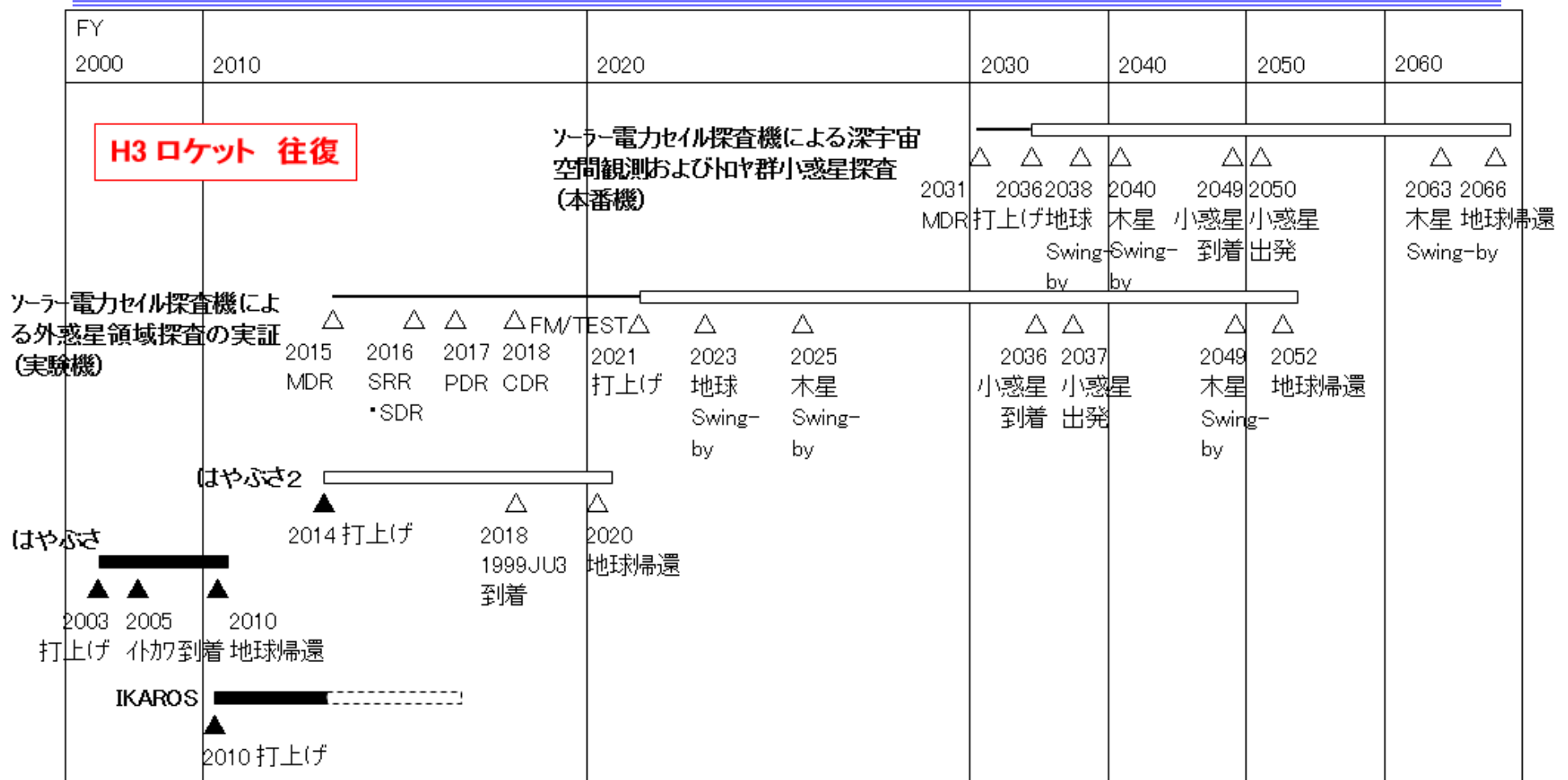
②内部試料

ニューマチックドリルによって、ガス圧で小惑星表面を掘削した後、①を行う。

その場分析 マルチターン質量分析計を用いる。

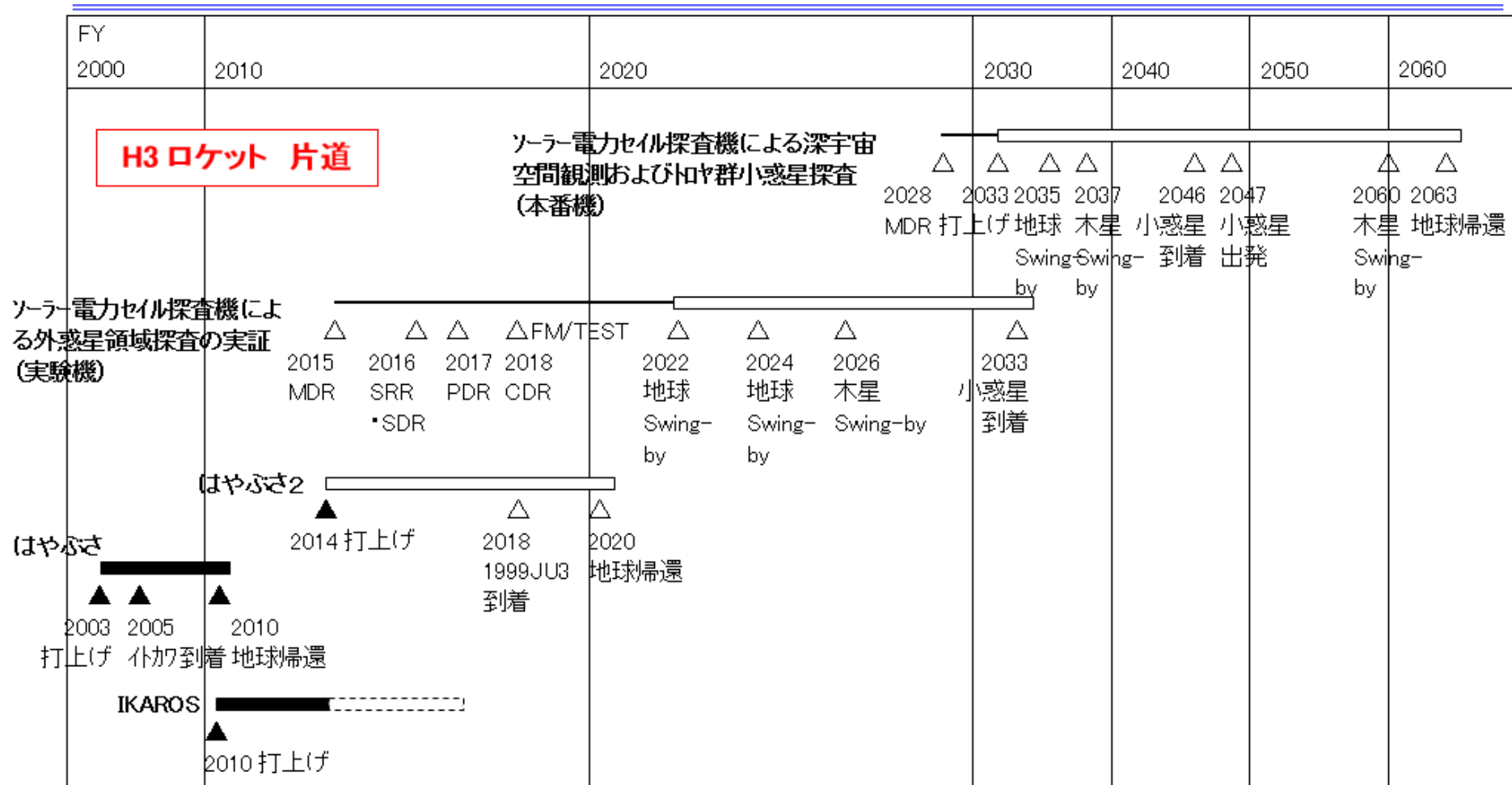


年次計画案(往復)



- 実験機は2015年にMDR, 2016年にプロジェクト化, 2021-22年の打上げとする。この間, はやぶさ2の運用期間と重なり, はやぶさ2の成果を実験機の開発に反映する。
- 本番機は, 実験機がトロヤ群小惑星に到着した以降に打上げる。実験機で開発済みという前提で本番機を製作し, 実験機の運用結果を必要に応じてフィードバックする。

年次計画案(片道)



- 往復の場合、燃料最小化をはかるため、往路の飛行期間は長期化し、木星トロヤ群小惑星到着までに約15年を要する。
- 片道の場合、往路へ投ずる推進剤に特化できるため大幅な短縮ができ、Rosetta(約11年)よりも飛行時間を短くできる可能性がある。

まとめ

探査機	打上げ	ミッション	航行技術	探査技術	科学観測
はやぶさ	2003年	技術実証	イオンエンジン	親機着陸・ サンプルリターン (表面試料)	地球近傍小惑星 (S型)
IKAROS	2010年	技術実証	ソーラーセイル	フライバイ	クルージング観測
はやぶさ2	2014年	科学観測	イオンエンジン	親機着陸・ サンプルリターン (表面・内部試料)	地球近傍小惑星 (C型)
ソーラー電力セイル 実験機	2020年代 初頭	技術実証	高比推力イオンエンジン 大型ソーラーセイル	子機着陸・その場分析・ サンプルリターン (表面・内部試料)	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 本番機	2020年代 中盤	科学観測	高比推力イオンエンジン 大型ソーラーセイル	子機着陸・その場分析・ サンプルリターン (表面・内部試料)	トロヤ群小惑星 (D型/P型) クルージング観測

- 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とし、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。
- ソーラー電力セイルは日本独自のアイデアで、はやぶさ、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。

発表リスト(ソーラーセイルWG関連)

- P-254: ソーラー電力セイルによる科学観測 - クルージング観測
- P-255: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群サンプルリターン
(探査機システムと軌道)
- P-256: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査 着陸機のシステム検討
- P-257: トロヤ群小惑星ソーラー電力セイル探査機のセイル設計
- P-258: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星の直接探査
(その場観測・着陸探査・試料採取分析)
- P-259: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査 サンプル採取手法
- P-260: 木星トロヤ群探査に向けた大型ソーラー電力セイル膜面展開構造・機構に
関する検討
- P-261: ソーラー電力セイル用超軽量大型薄膜太陽光発電システムの開発
- P-262: ソーラー電力セイル用高比推力イオンエンジンの研究開発
- P-263: ソーラー電力セイルに用いる子機RFセンサのための送信用X帯/K帯/Ka帯
GaAs・MMIC増幅器の研究
- P-264: ソーラー電力セイルによるトロヤ群サンプルリターン探査にむけた超高速
再突入カプセル設計案