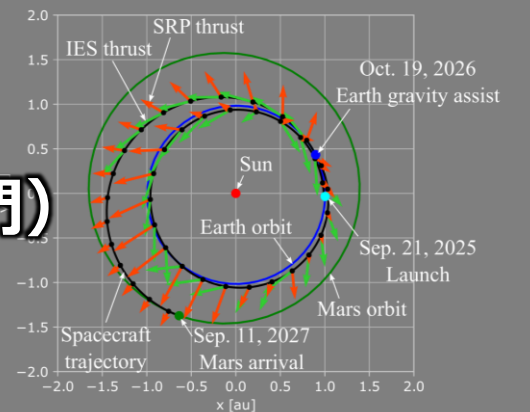


ソーラー電力セイルによる深宇宙探査の 軌道設計と超小型宇宙機への応用研究

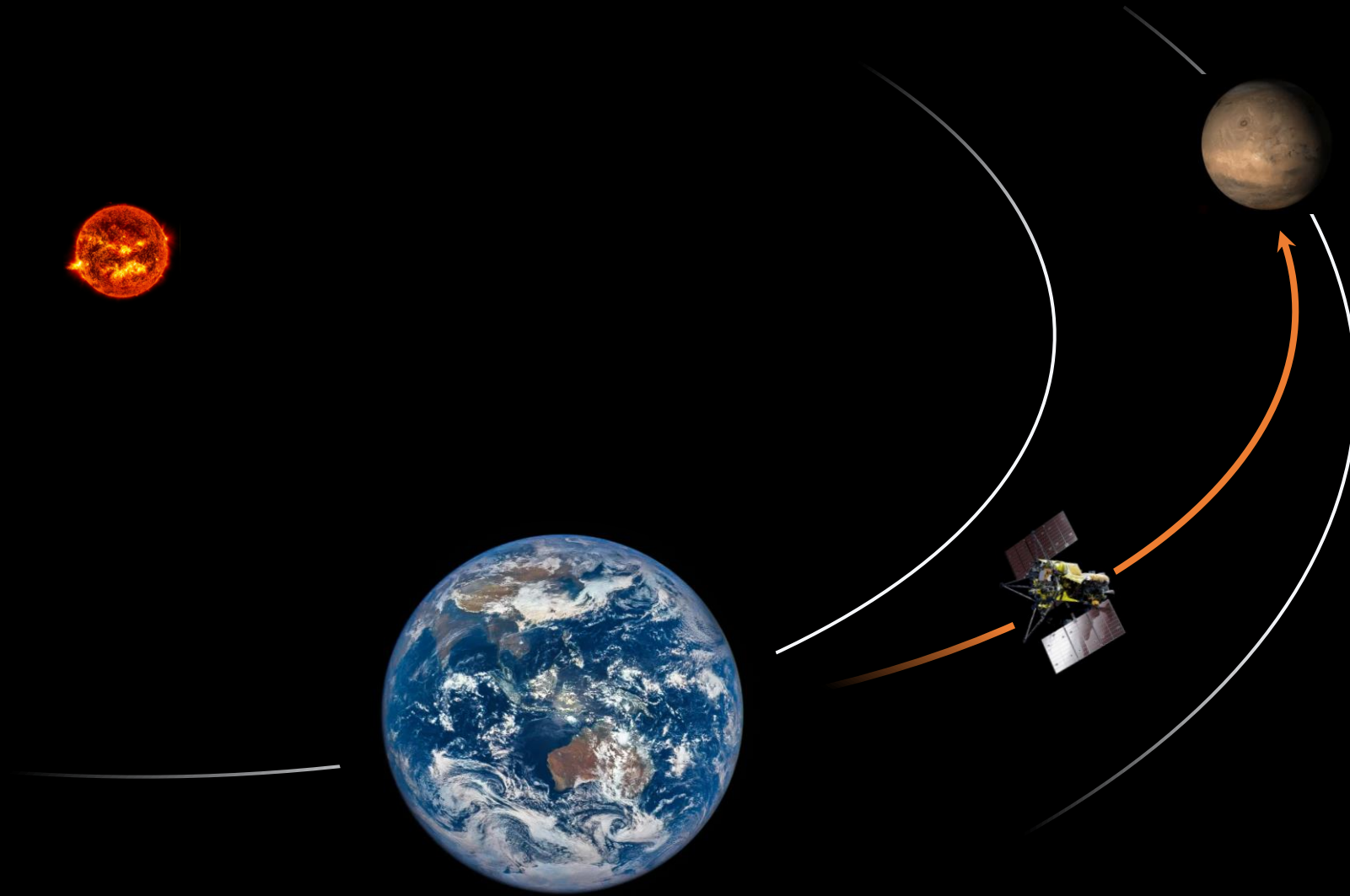
高尾 勇輝

JAXA 宇宙科学研究所

(現所属：九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門)



探査機の軌道はどうやって作っている？

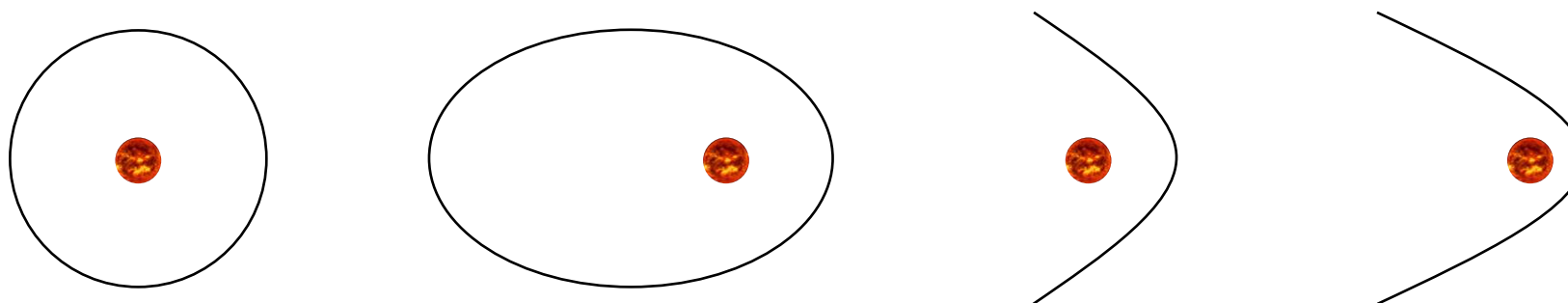


太陽系の全ての天体は太陽の重力に捉われており、**真っすぐ進むことができない**

軌道設計の基礎

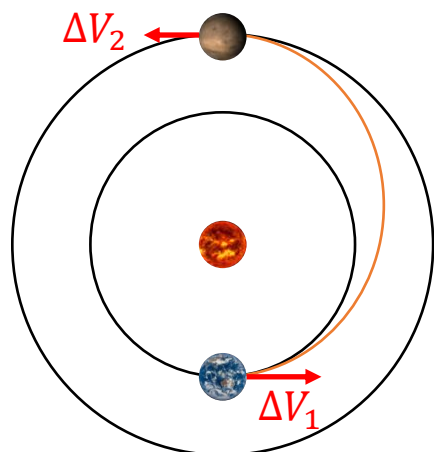
万有引力とケプラーの法則

惑星の軌道運動は、太陽を一つの焦点とする円錐曲線（円・楕円・放物線・双曲線）を描く。

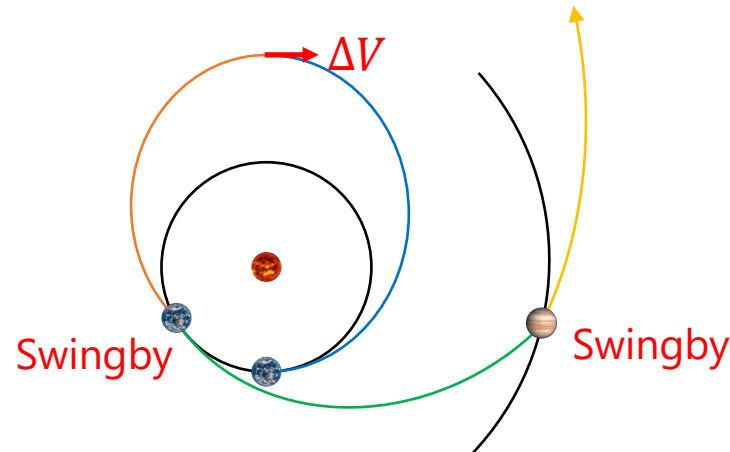


深宇宙探査機の軌道は、多くの場合は円と楕円の繋ぎ合わせで作ることができる。

最も初歩的な例：ホーマン遷移軌道



応用編：天体スイングバイ



曲線の繋ぎ目における不連続な速度変化を、推進機やスイングバイで補填するということ。

宇宙推進の歴史と変遷

瞬時的加速
低燃費

連続的加速
高燃費

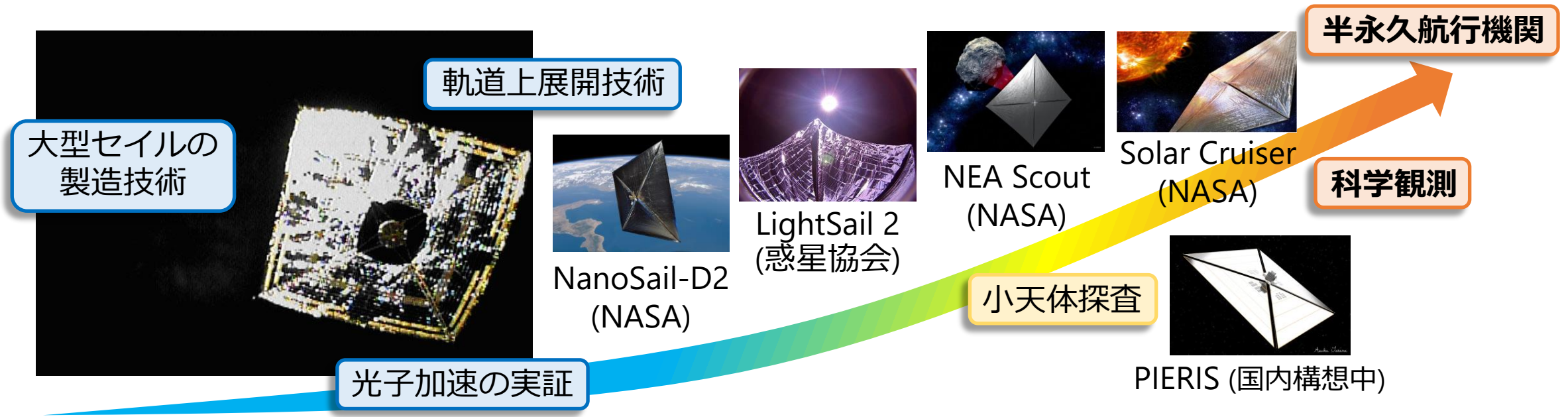
	化学推進	電気推進	ソーラーセイル
1970s	Mariner 9		
2000s	Galileo	Deep Space 1	<div style="border: 1px solid orange; padding: 5px;"> 巨大な帆を広げ、太陽光の輻射圧を浴びて推進力を生む、 推進剤を必要としない宇宙帆船 </div>
	Rosseta	Dawn	
2010s	Juno あかつき		NanoSail-D2
2020s	OSIRIS-REx		IKAROS 
	Lucy	DART	LightSail2
	Europa clipper MMX 	Psyche Gateway	DESTINY+ 

時間をかけてでも多くのペイロードを輸送できる低推力推進への期待は大きい。

ソーラーセイルの過去・現在・未来

1873年にマクスウェルが**光の輻射圧**の仮説を唱え、
1919年にツィオルコフスキーが**太陽帆**として発表した、**100年来の夢の宇宙船**。

2010年にJAXAが打ち上げたIKAROSにより、史上初のソーラーセイルが実現。



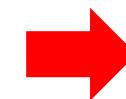
2010

第5回宇宙科学奨励賞 津田氏
第11回宇宙科学奨励賞 佐藤氏

2020

2030

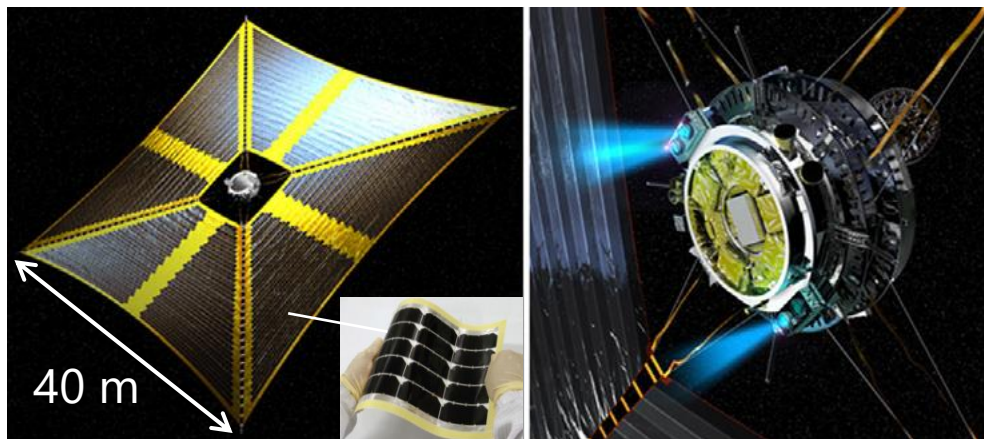
夢の宇宙船は**実証**から**実用**段階へと歩みを進めており、
2020年代はその過渡期にあたる重要な時期。



日本としての
戦略は？

日本が誇るソーラー電力セイルの技術

OKEANOS – Oversize Kite-craft for Exploration and AstroNautics in the Outer Solar system



ソーラーセイルに多数の薄膜太陽電池を貼付して軽量ながらも大電力発電の機能を持たせた日本独自のコンセプト = **ソーラー“電力”セイル**

太陽から遠く離れた領域において高比推力イオンエンジンの運転を可能にし、木星トロヤ群小惑星からのサンプルリターンを実現する唯一の輸送技術

戦略的中型計画として提案しプリフェーズA2まで進んだものの、選定には至らなかった

日本が最先端を切り拓き、受け継がれてきた技術を失わせるわけにはいかない

本講演における主要な成果

戦略的中型計画への再挑戦

OKEANOSで明らかになった課題を克服し、第一級の科学成果創出を狙うミッションとして再提案していく。

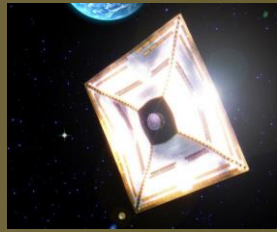
超小型宇宙機としての新たな可能性

リソース制約の厳しい超小型宇宙機において、電力・機動力・高燃費を与えるソーラー電力セイルは有用性が高い。

超小型ソーラー電力セイルとしての新たな可能性

高機動力・超高燃費システムを実現するハイブリッド推進

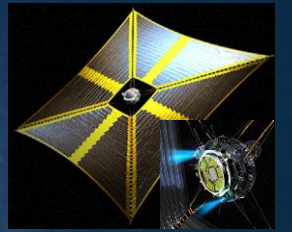
ソーラーセイル



- 無限の燃費を持ち、得られる推力は比較的小さい
- 機体が軽いほどよく加速する

電気推進

- 燃費と推力のバランスに優れた推進方式
- 性能に応じた電力供給が必要



×

軽量かつ大電力発電が可能な超小型ソーラー電力セイル

→ { 超小型宇宙機の軽さ } を活かすことで { 光子加速の性能 } を最大限に発揮できる
 { 潤沢な電力 } { 電気推進機の性能 }

高機動性 × 超高燃費 × 大電力 → 超小型宇宙機による深宇宙探査の技術革新

高い機動力を活かした
相乗り放出機会における打上制約の打破

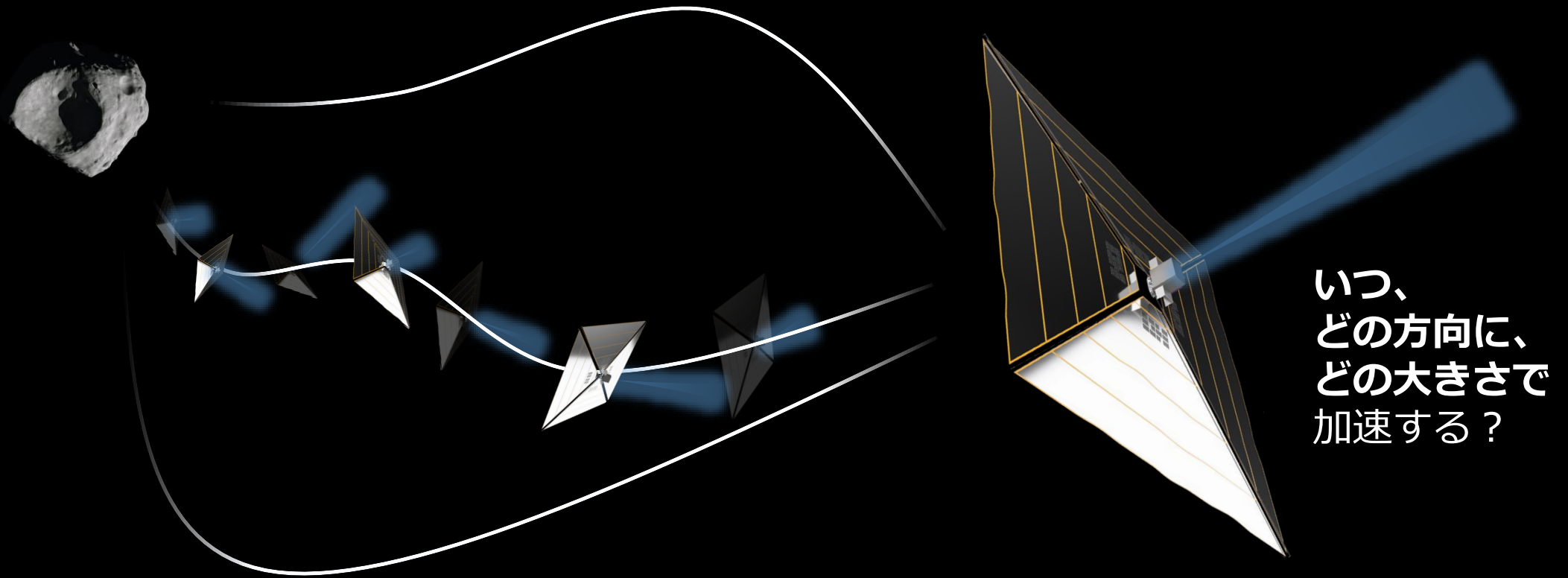
推進剤搭載量の大幅な削減

生存能力の上昇に伴う
活動自在性の向上

地球・月圏外への到達可能領域の拡大

サイエンスペイロードの充足

連続低推力推進の軌道はどうやって作る？



いつ、
どの方向に、
どの大きさで
加速する？

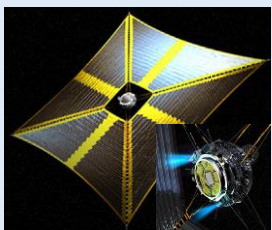
連続的に加速を行う推進方式では、状態変数と制御量の設計解空間が無限の自由度を持つ

ソーラーセイル×電気推進の2つの連続低推力を扱うハイブリッド推進の軌道設計

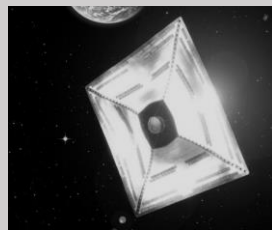
||

無限×無限の超高次元問題

超小型ソーラー電力セイルの軌道設計問題



OKEANOS
(中型・電気推進)



IKAROS
(小型・ソーラーセイル)

将来ミッションへ

Step 1

- ✓ ソーラー電力セイルの超小型宇宙機への拡張

電気推進

従来型の
経験的解法

Step 2

- ✓ ハイブリッド推進によるエネルギー増幅の理論体系の構築

ハイブリッド推進

数学的厳密解を与える
理論的解法

Step 3

- ✓ 超大規模問題に挑む大域的軌道最適化とミッション化検討

ハイブリッド推進

進化計算を導入した
発見的解法

【1】超小型ソーラー電力セイルによる外惑星探査ミッション設計

ソーラー電力セイルの適用により、超小型探査機の到達可能領域を拡大する研究

軌道設計に関する多くの研究は、宇宙機の推進性能に何らかの仮定を置いている。

ソーラーセイルの加速性能は0とする

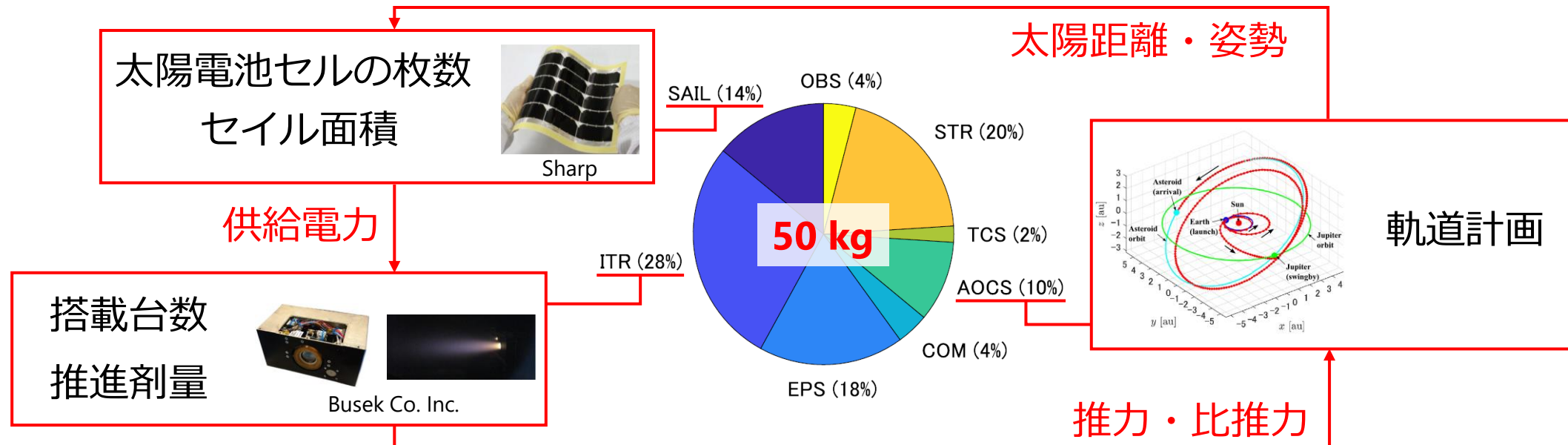
イオンスラスタの推力は0、比推力は0とする

搭載可能なサイズ？

質量は成立する？

電力は足りる？

50kg級超小型ソーラー電力セイルによる外惑星探査の成立性を示すシステムベースの研究



【1】超小型ソーラー電力セルによる外惑星探査ミッション設計

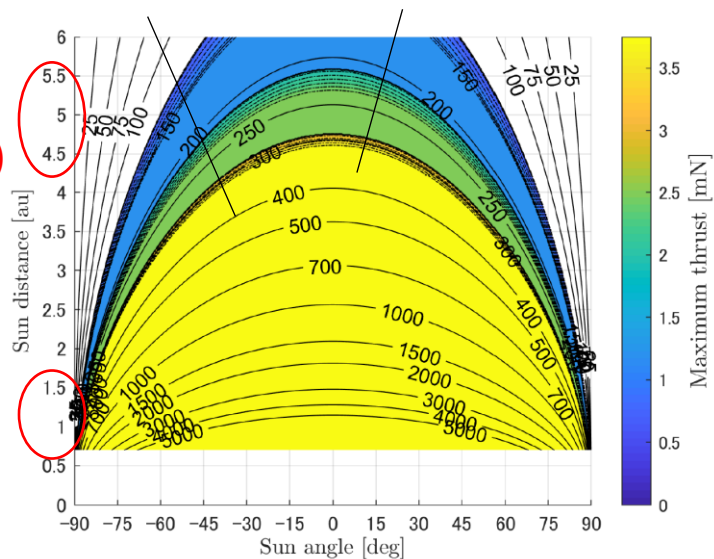
ソーラー電力セルモデル

セル面積に応じた発生電力とイオンスラスタ推力の関係を可視化

等高線 = 発生電力 [W] カラーマップ = 推力

木星圏
(限られた推力)

近地球領域
(潤沢な推力)

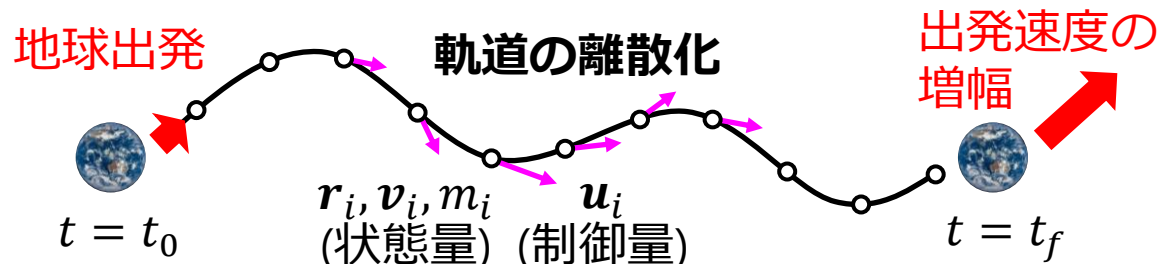


姿勢の可動範囲



軌道設計における制約条件へ

地球スイングバイによるエネルギー増幅



有限次数の設計変数: $x = [\dots, r_i, v_i, m_i, u_i, \dots, t_0, t_f, \dots]$

$$\Rightarrow \max_x m_N \quad \text{s.t.} \quad \hat{x}_i = f(\hat{t}_i, \hat{x}_i, \hat{u}_i), \quad \|u_i\| \leq T_{\max}$$

燃料消費の最小化

$$\frac{x_i \cdot u_i}{\|x_i\| \|u_i\|} \geq \cos \alpha_{\max}, \dots$$

運動方程式

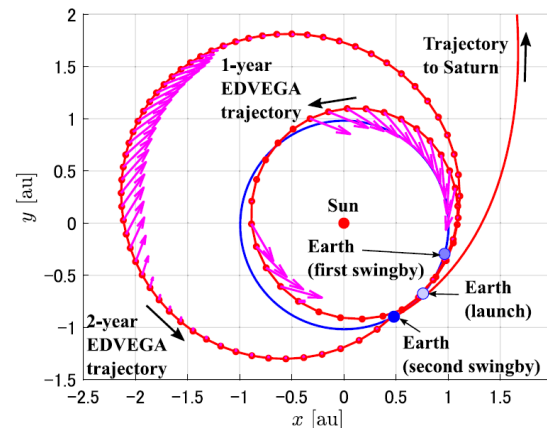
最大推力

最大姿勢

土星遷移軌道の例

- $\Delta V = 1863 \text{ m/s}$
- 推進剤 = 4.27 kg
- 飛行時間 = 7.9 year

50kgの超小型探査機システムで土星圏へ



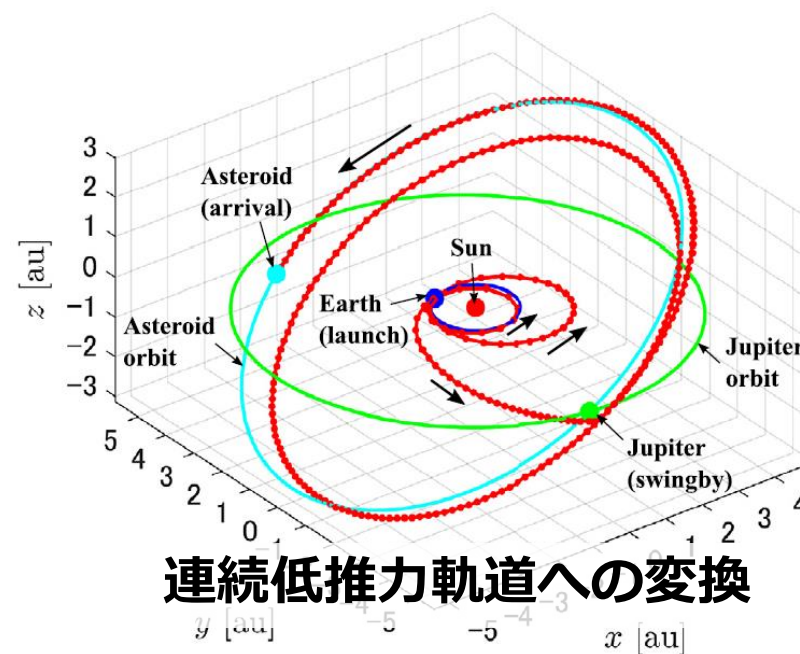
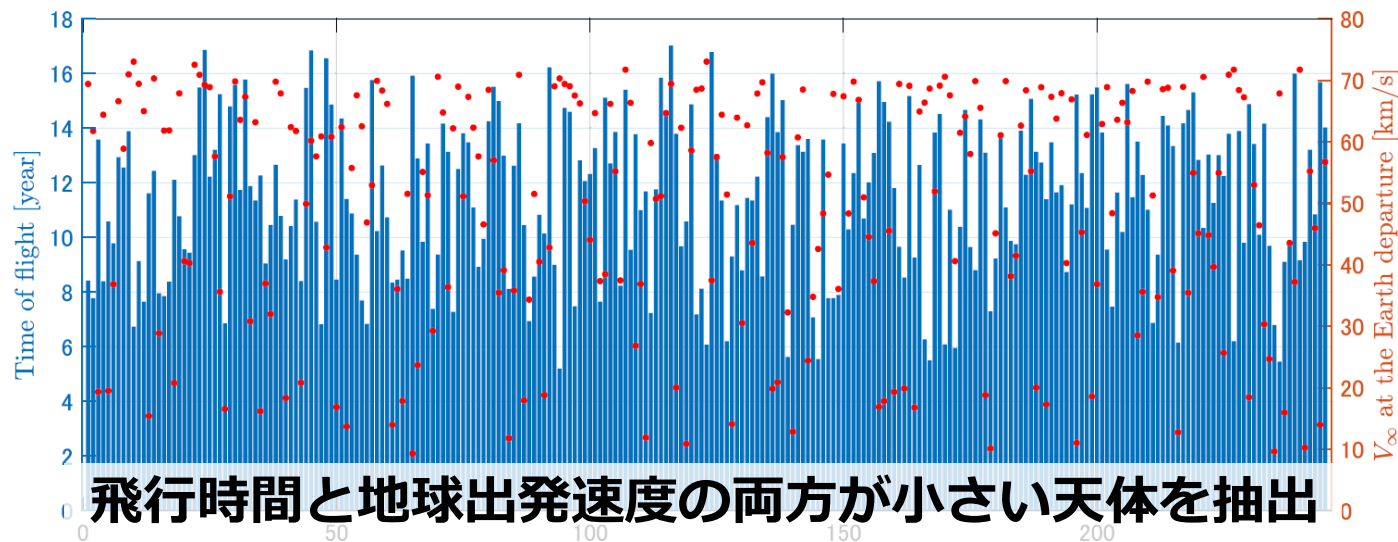
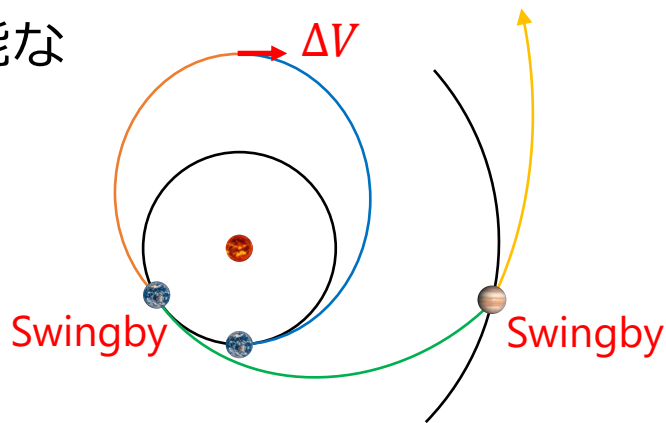
【1】超小型ソーラー電力セイルによる外惑星探査ミッション設計

ケンタウルス族

木星軌道と海王星軌道の間に広く分布し、小惑星と彗星の両方の特徴を持つ天体群の総称。未だ近接観測された例はなく、理学的に高い関心を集める。

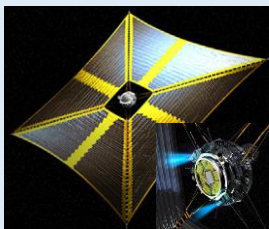
幾千もの天体から到達可能な候補を絞り込む必要性

Lambert問題の接続
(楕円の繋ぎ合わせ)
による高速サーチ

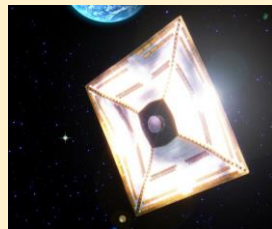


超小型探査機で挑む
前人未踏領域

超小型ソーラー電力セイルの軌道設計問題



OKEANOS
(中型・電気推進)



IKAROS
(小型・ソーラーセイル)

将来ミッションへ

Step 1

- ✓ ソーラー電力セイルの超小型宇宙機への拡張

電気推進

従来型の
経験的解法

Step 2

- ✓ ハイブリッド推進によるエネルギー増幅の理論体系の構築

ハイブリッド推進

数学的厳密解を与える
理論的解法

Step 3

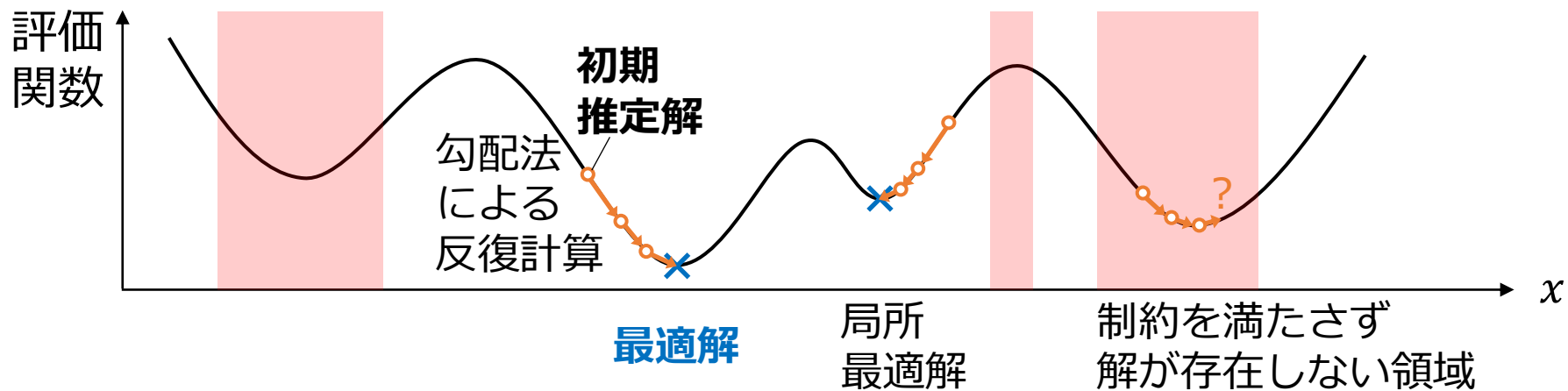
- ✓ 超大規模問題に挑む大域的軌道最適化とミッション化検討

ハイブリッド推進

進化計算を導入した
発見的解法

【2】ハイブリッド推進の最適制御理論

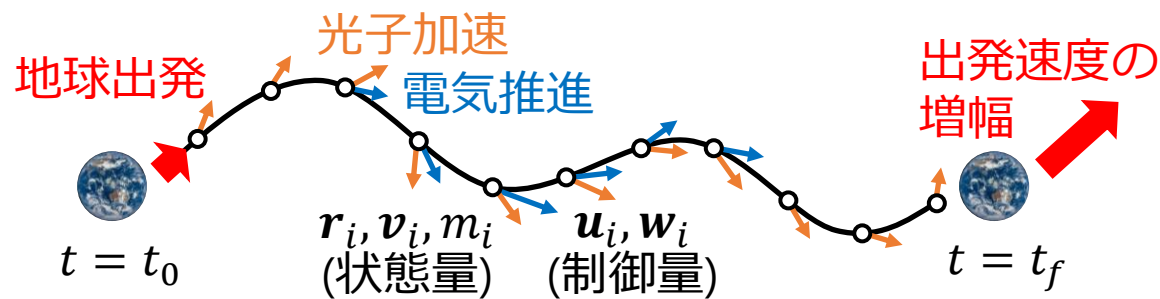
パラメータ最適化では、ある程度質の良い答え（初期推定解）が分かっている必要がある



実際の軌道最適化では
数百次元の設計解空間を探索



局所最適解はおろか、制約を満たす
物理的成立解を見出すことさえ困難



2つの連続低推力を扱うハイブリッド推進では
設計解空間がさらに倍増し、解の探索が困難



厳密な最適解を理論で導く

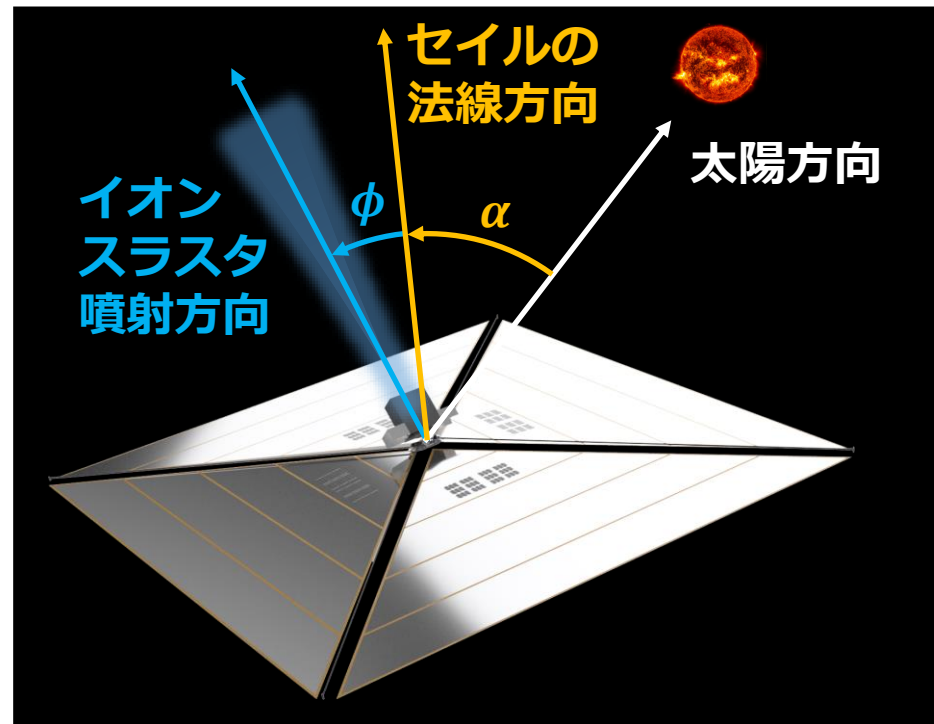
【2】ハイブリッド推進の最適制御理論

地球スイングバイによるエネルギー増幅— ΔV Earth Gravity Assist (ΔV -EGA)

評価関数 $J = \frac{1}{2} \mathbf{v}(t_f)^T \mathbf{v}(t_f)$ 地球再会合時
速度の最大化

制約条件 $\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{r}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{g}(t) + \mathbf{a}(t) \end{bmatrix}$ 運動方程式

$\alpha \in [\alpha_l, \alpha_u], \phi \in [\phi_l, \phi_u]$ 姿勢可動域
ジンバル可動域



Pontryaginの最大値原理

$$H = \lambda_r^T \mathbf{v} + \lambda_v^T (\mathbf{g} + \mathbf{a})$$

$$\dot{\lambda}_r = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}} \right)^T \quad \dot{\lambda}_v = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{v}} \right)^T \quad \frac{\partial H}{\partial \alpha} = \frac{\partial H}{\partial \phi} = 0$$

最適制御則

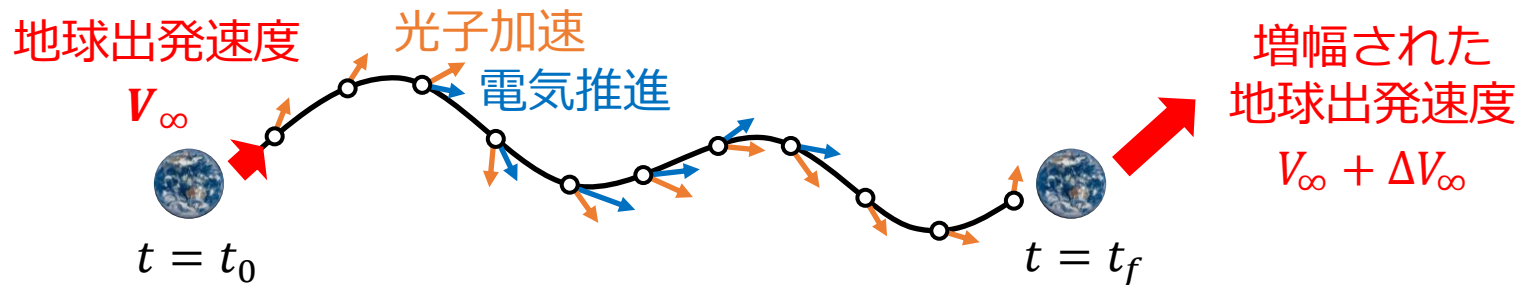
$$\alpha(t), \phi(t) = \arg \max_{\alpha(t), \phi(t)} \frac{\mathbf{v}(0)^T}{\|\mathbf{v}(0)\|} \Phi_{vv}^T(t_f) \Phi_{vv}(t_f - t) \mathbf{a}(\alpha(t), \phi(t))$$

ソーラー電力セイルの
Steering則を解析的に導出

【2】ハイブリッド推進の最適制御理論

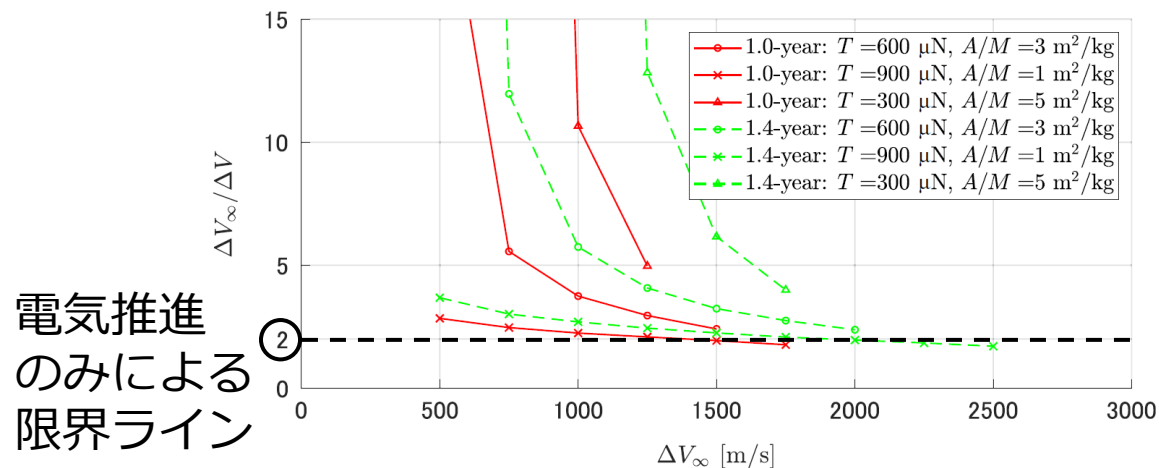
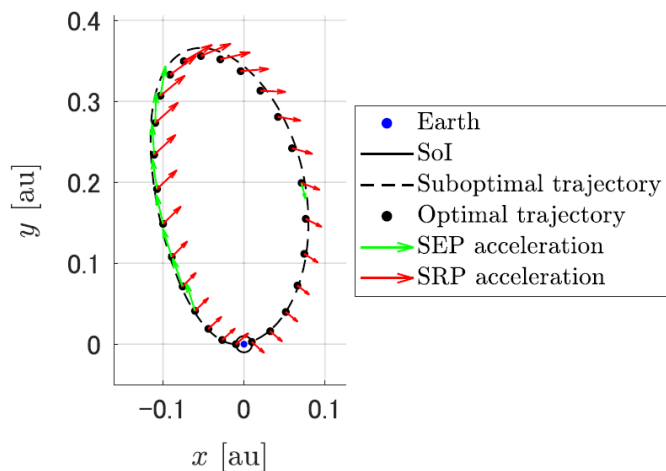
ΔV -EGA:

深宇宙で噴射した ΔV に対して、地球再会合時の出発速度を大きく増幅することができる



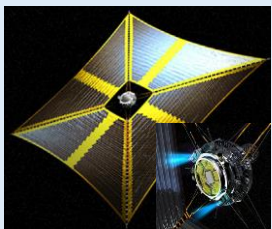
電気推進のみの場合の効率 $\Delta V_\infty / \Delta V \leq 2$ 、つまり ΔV の効果を最大2倍まで増幅できる

ハイブリッド推進の優れた機動力と燃費を活かすことで、従来の性能限界を大きく打破する新たな軌道を提案

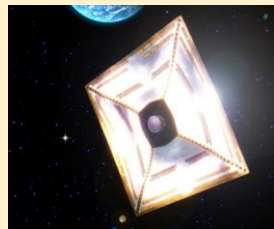


電気推進
のみによる
限界ライン

超小型ソーラー電力セイルの軌道設計問題



OKEANOS
(中型・電気推進)



IKAROS
(小型・ソーラーセイル)

将来ミッションへ

Step 1

- ✓ ソーラー電力セイルの超小型宇宙機への拡張

電気推進

従来型の
経験的解法

Step 2

- ✓ ハイブリッド推進によるエネルギー増幅の理論体系の構築

ハイブリッド推進

数学的厳密解を与える
理論的解法

Step 3

- ✓ 超大規模問題に挑む大域的軌道最適化とミッション化検討

ハイブリッド推進

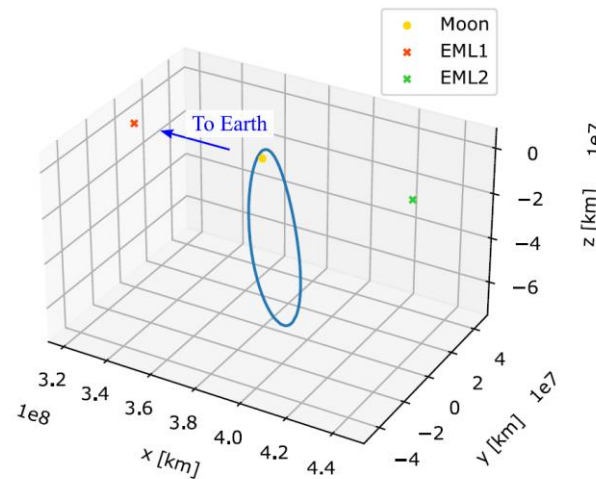
進化計算を導入した
発見的解法

【3】月近傍利用ミッションと大域的軌道最適化

Artemis計画の進展に伴い、月近傍領域における超小型宇宙機の放出機会の拡大が期待



月軌道プラットフォームGatewayの想像図



Gateway建設予定の
Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO)

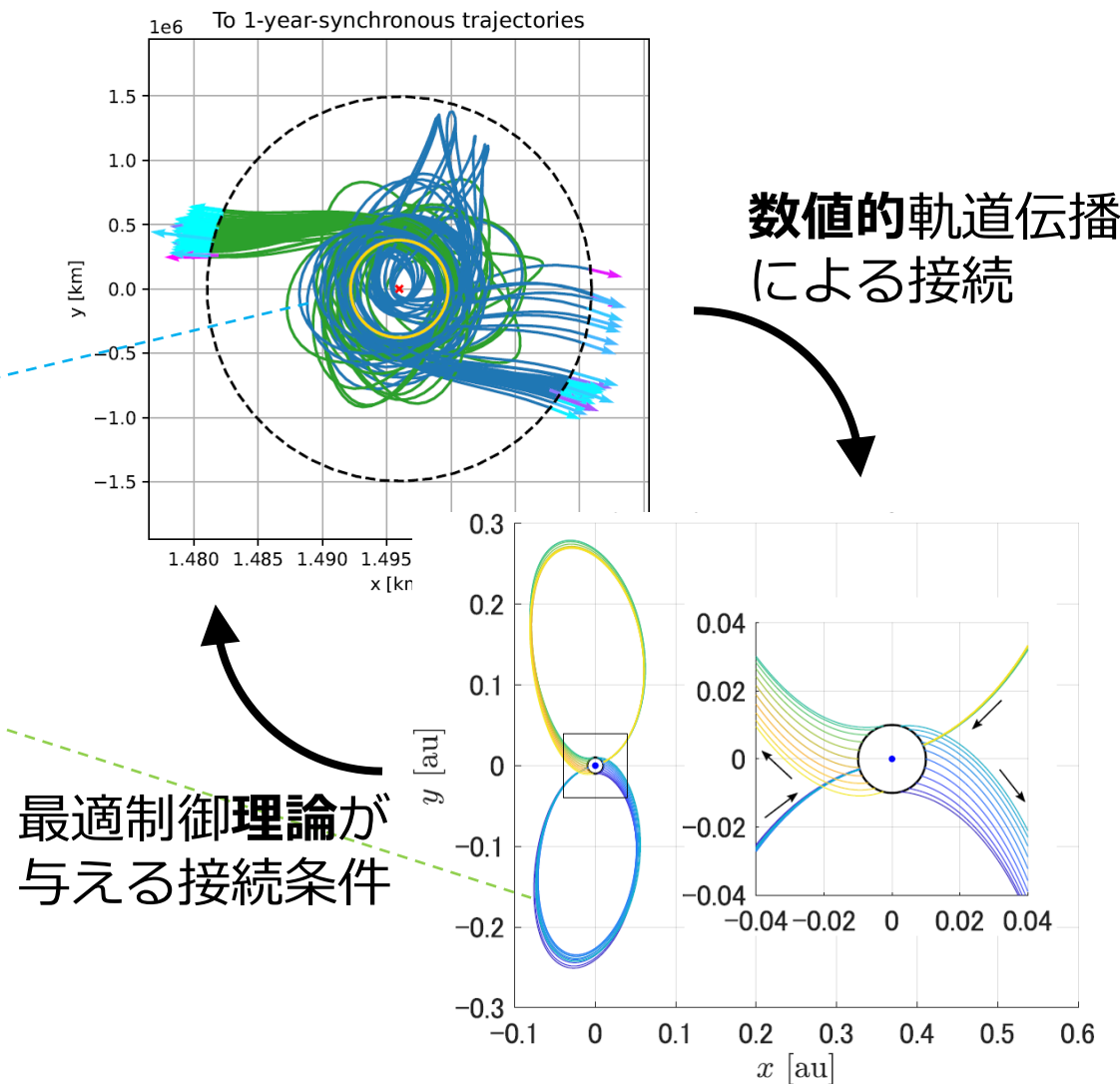
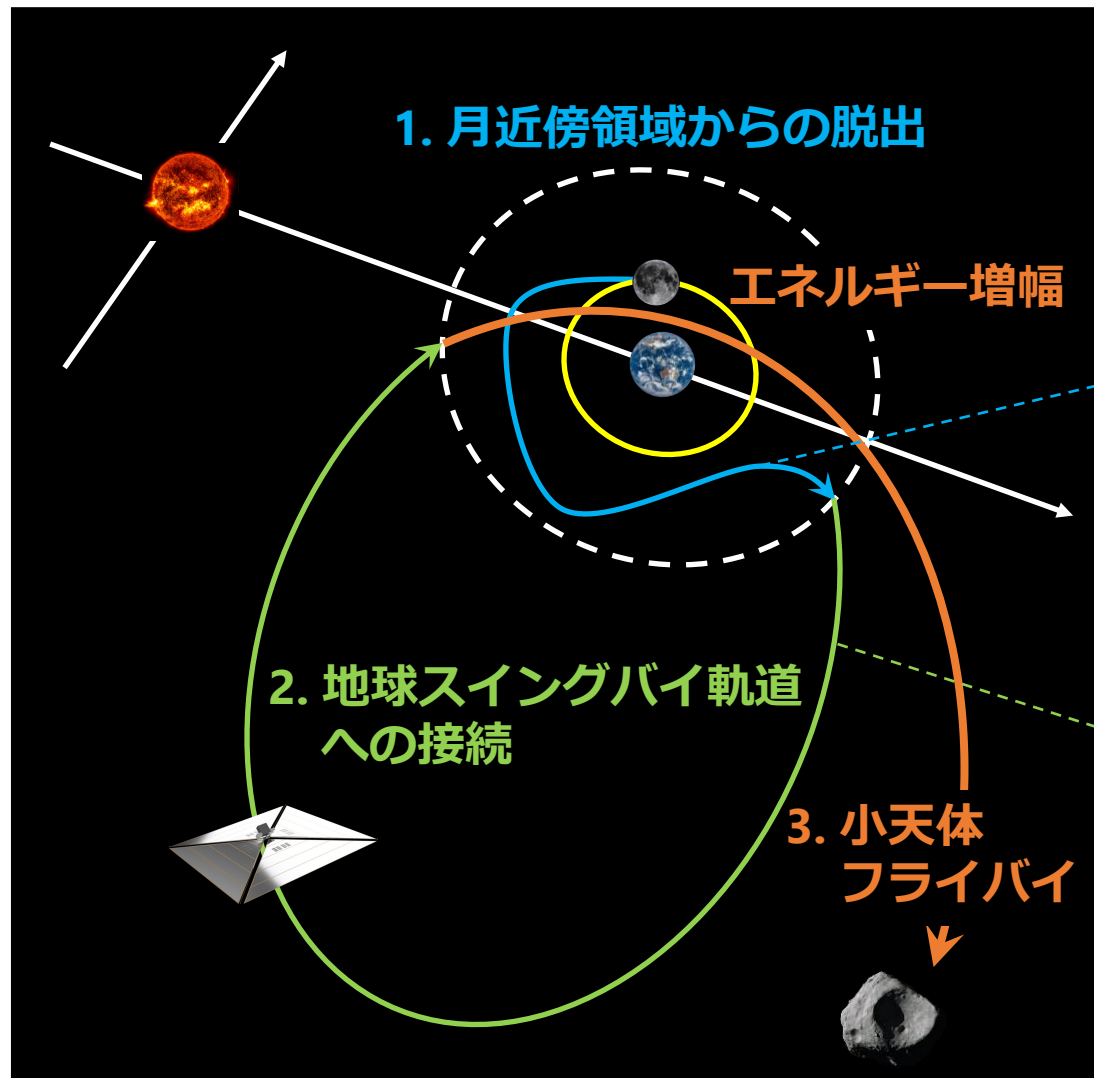


OMOTENASHI EQUULEUS 本研究が狙う領域

超小型ソーラー電力セイルの優れた機動力と燃費を活かし、自力で惑星間領域へ脱出し深宇宙探査へ臨むミッションを検討

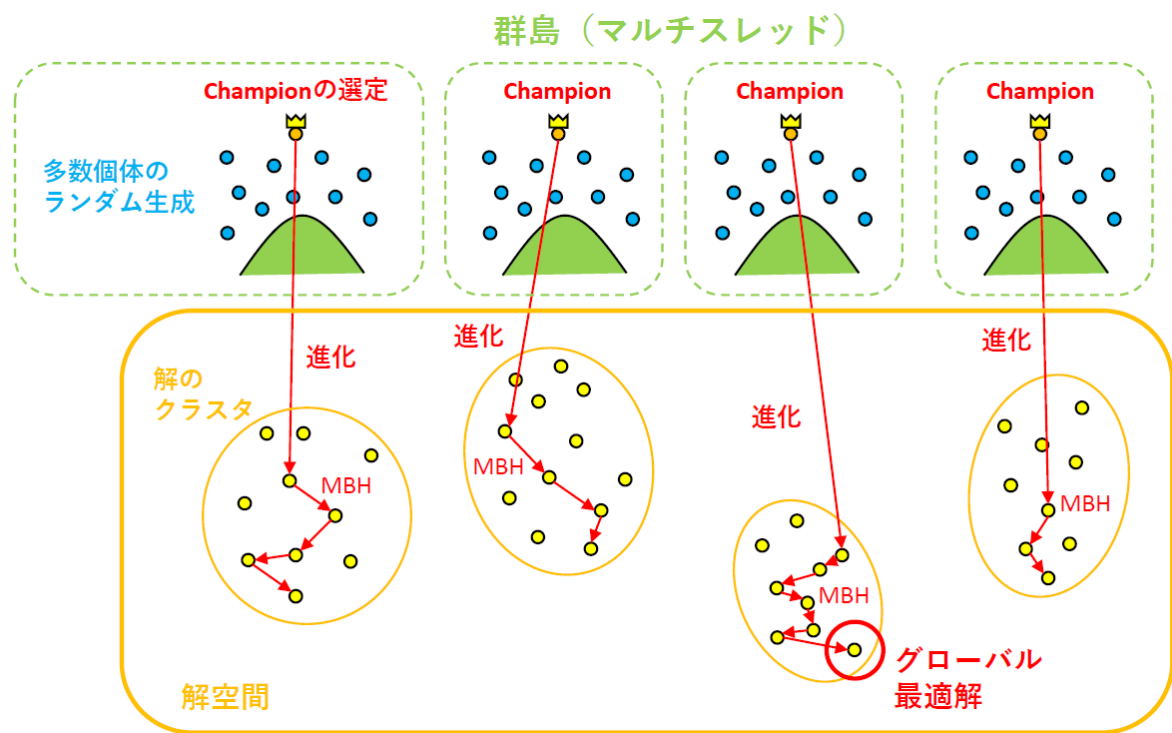
【3】月近傍利用ミッションと大域的軌道最適化

月近傍領域は、太陽・地球・月の重力が同時に作用する4体問題で記述される複雑系

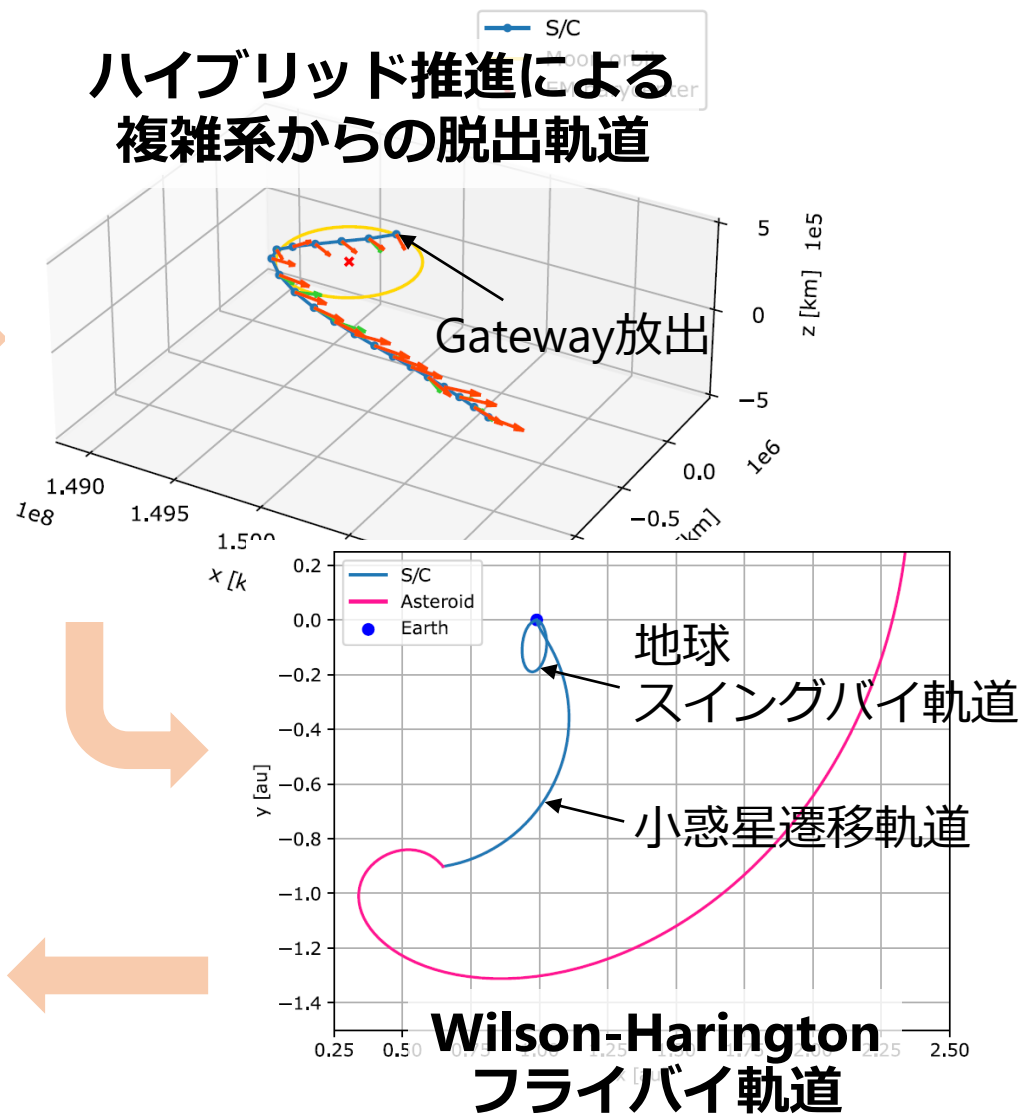


【3】月近傍利用ミッションと大域的軌道最適化

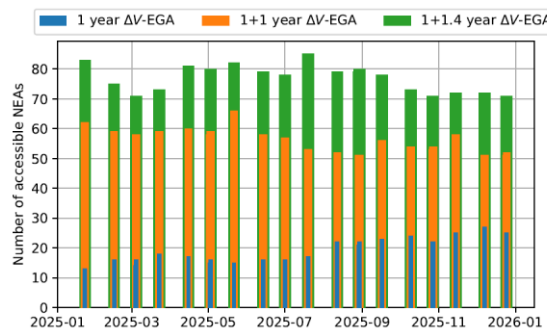
複雑系の網羅的探索を可能にする、生物進化を模した発見的解法による大域的最適化



ハイブリッド推進による 複雑系からの脱出軌道

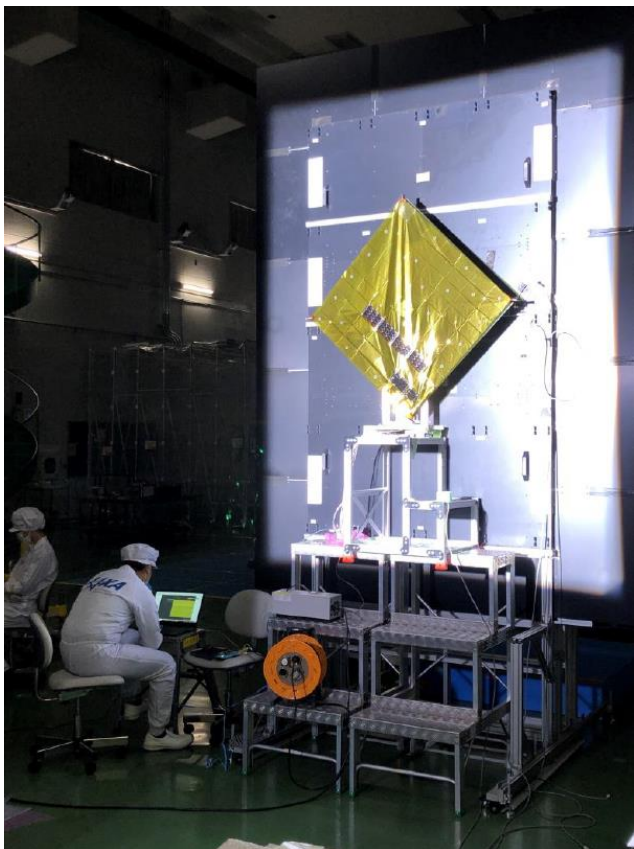


能動的軌道制御により、
打ち上げウィンドウに
依存せず多くの天体へ
アクセス可能に

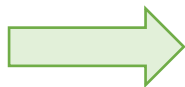


ソーラー電力セイルが持つ可能性と今後の取り組み

太陽電池膜としての活用



発電・アンテナ機能を有する
軽量膜展開構造物HELIOS
(革新衛星4号機で打ち上げ予定)



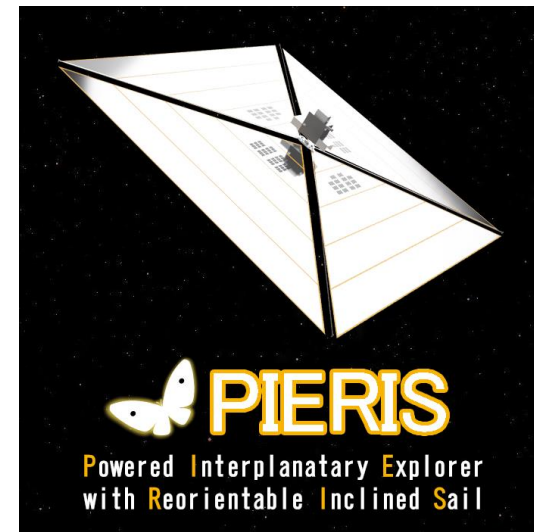
産業応用



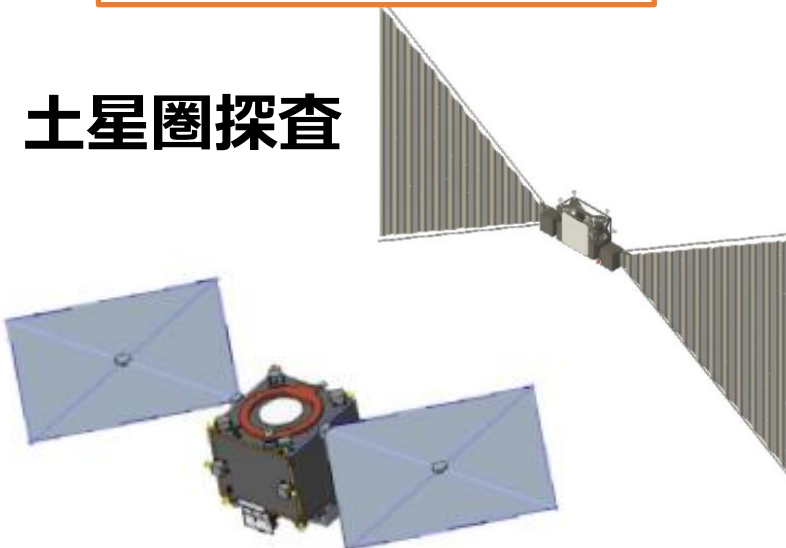
深宇宙探査の発展



超小型宇宙機の技術発展



土星圏探査



次世代小天体
サンプルリターン



九州大学での取り組み

GPU超並列計算や
深層学習を使った
大規模軌道最適化と
探査機システム設計

謝辞

本研究は決して一人で進めることはできなかったものであり、多くの方々のお力添えをいただきました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

- ▶ 修士課程・博士課程においてご指導を賜り、研究の心得を教えていただいた川口淳一郎先生。
- ▶ ポスドク時代の受入研究者として常に親身に寄り添っていただき、また本賞にご推薦いただいた津田雄一先生。
- ▶ 研究・プロジェクトの両面で多くを教わり、いつも温かく支えてくださっている森治先生、佐伯孝尚先生。
- ▶ とともに多大なる熱量を費やしソーラー電力セイルの研究開発をご一緒させていただいている中条俊大様、宮崎康行先生、そして超小型ソーラー電力セイル検討チームの皆様。
- ▶ 大学院時代から現在に至るまで公私ともに大変お世話になり、私が尊敬する先輩である松本純様、菊地翔太様、大木優介様。そして川口研究室・津田研究室の皆さん。
- ▶ 宇宙科学ミッションに携わることの喜びと苦難を教えていただいた、OKEANOSプロジェクト・HELIOSプロジェクト・はやぶさ2プロジェクトの皆様。
- ▶ 宇宙科学振興会および本賞選考委員会の皆様。

今日に至るまでに培われてきた唯一無二のご縁を大切に、日本の宇宙科学の発展のため今後とも励んで参ります。