

高頻度な小惑星探査を実現する軌道設計・ 最適化手法の確立と実装

尾崎 直哉
JAXA宇宙科学研究所



自己紹介：尾崎 直哉（おざき なおや）

略歴

1989年：兵庫県神戸市に生まれる

2005年：明石工業高等専門学校 機械工学科入学

2010年：東京大学 工学部 航空宇宙工学科 編入学（中須賀研究室）

2013年：東京大学大学院 修士・博士課程（中須賀・船瀬研究室）

ESA欧州宇宙運用センター(ESOC) 客員研究員

NASAジェット推進研究所(JPL) 客員研究員

2018年：JAXA宇宙科学研究所 ポスドク研究員（川勝研究室）

2019年：JAXA宇宙科学研究所 テニユアトラック特任助教

2023年～： JAXA宇宙科学研究所 准教授

宇宙プロジェクト歴：

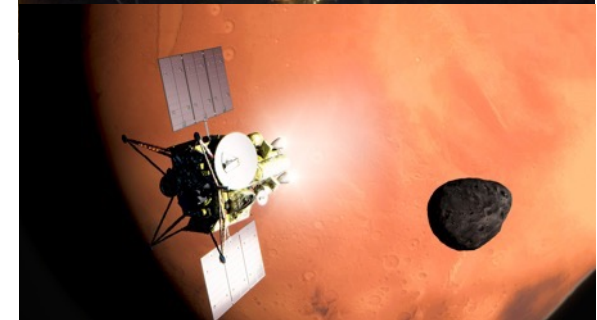
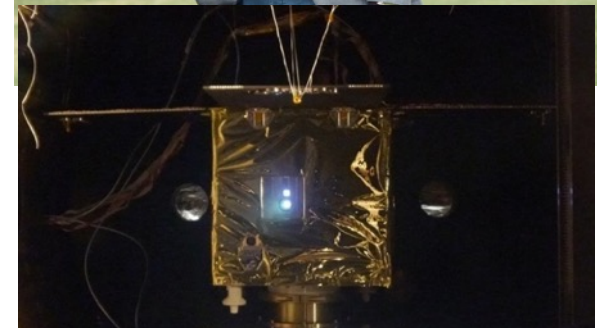
2013～2016年：PROCYON (2014年打上げ)

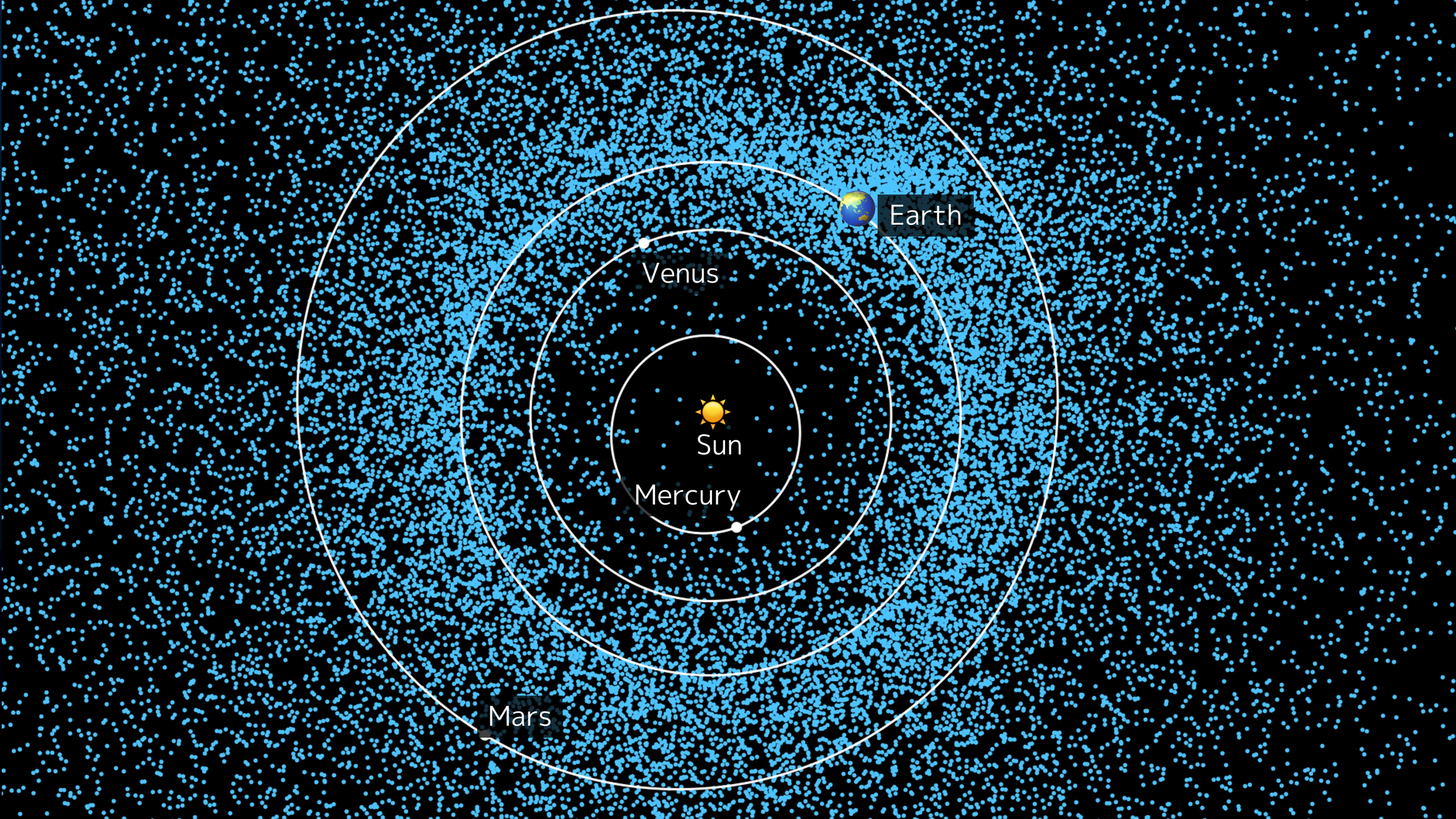
2015年～：EQUULEUS

2018年～：MMX

2019年～：DESTINY+, Comet Interceptor(, and more)

**「軌道設計」と
「（超小型衛星を中心にした）
宇宙機システム」を武器に研究
活動を進めてきました。**





Sun

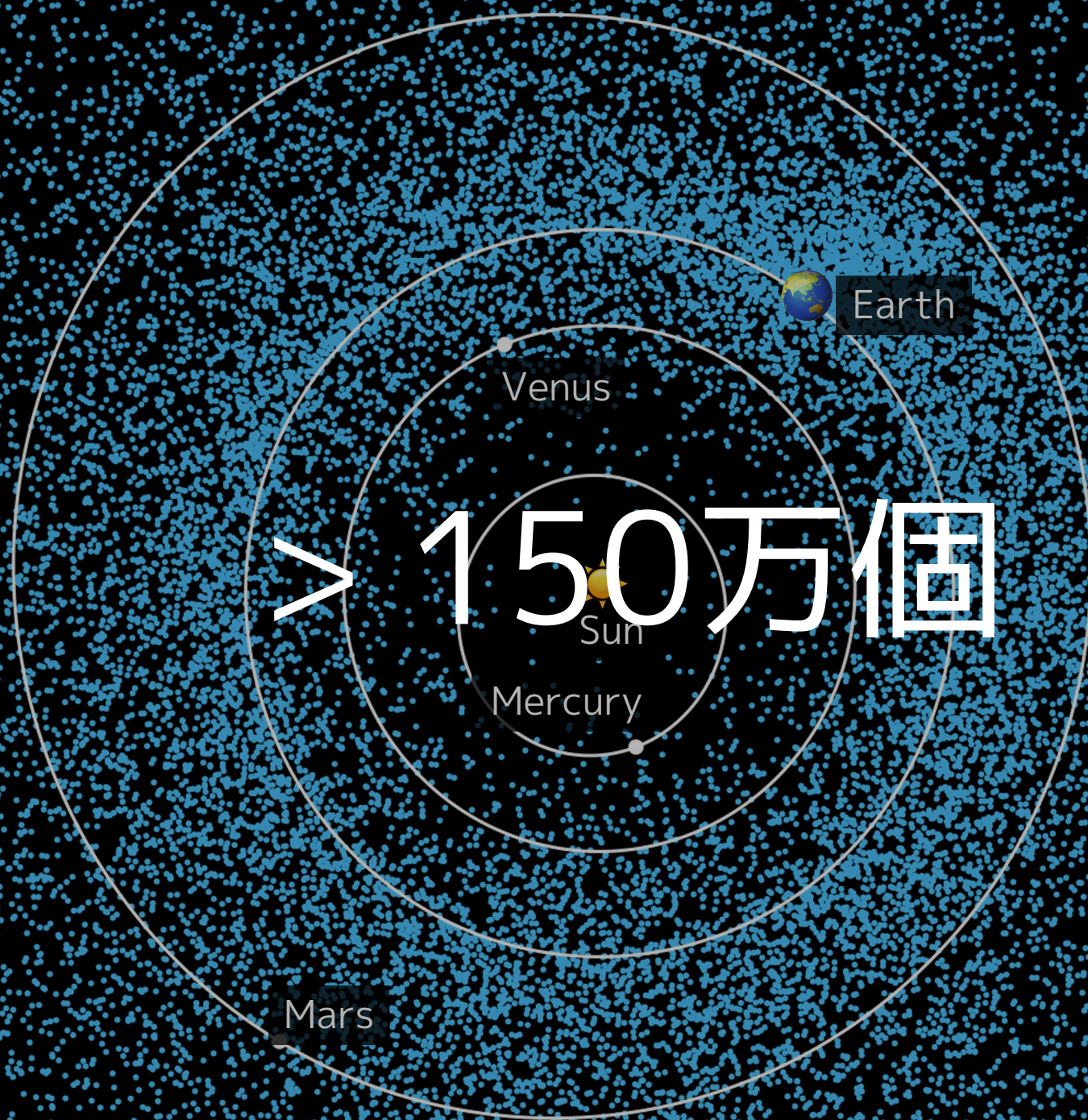
Mercury

Venus



Earth

Mars



> 150万個



2025年6月24日 ルービン天文台
稼働スタート

Photograph by Tomás Munita



2027年9月以降 宇宙望遠鏡NEO
Surveyor 打上げ

© NASA

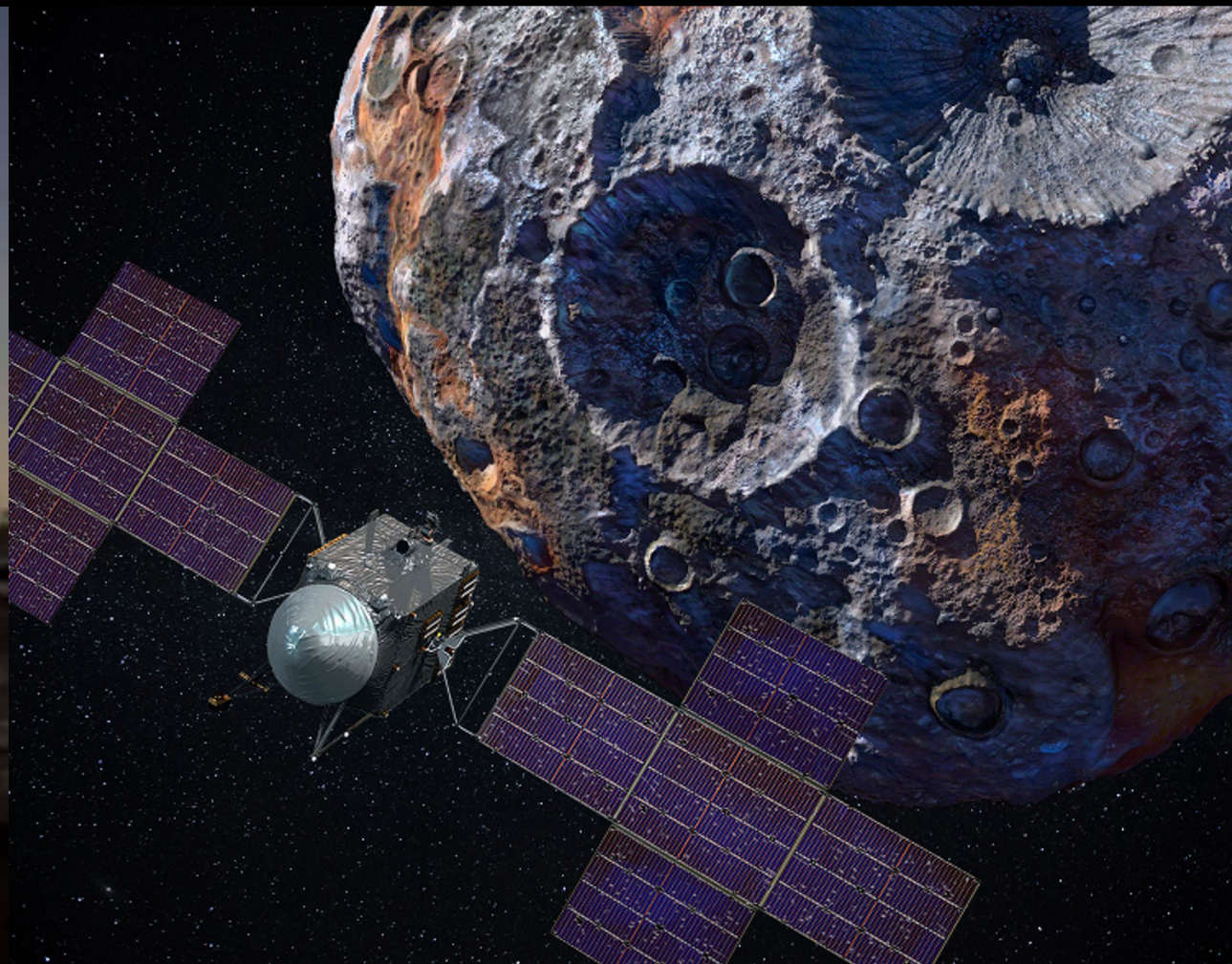
小惑星探査の新たな需要




プラネタリーディフェンス
(地球防衛)



小惑星資源探査





我々は、ほとんどの小惑星の真の姿を知らない。



我々は、ほとんどの小惑星の真の姿を知らない。

DESTINY+

Demonstration and Experiment of Space Technology for
Interplanetary Voyage, Phaethon flyby, and dUSt analysis

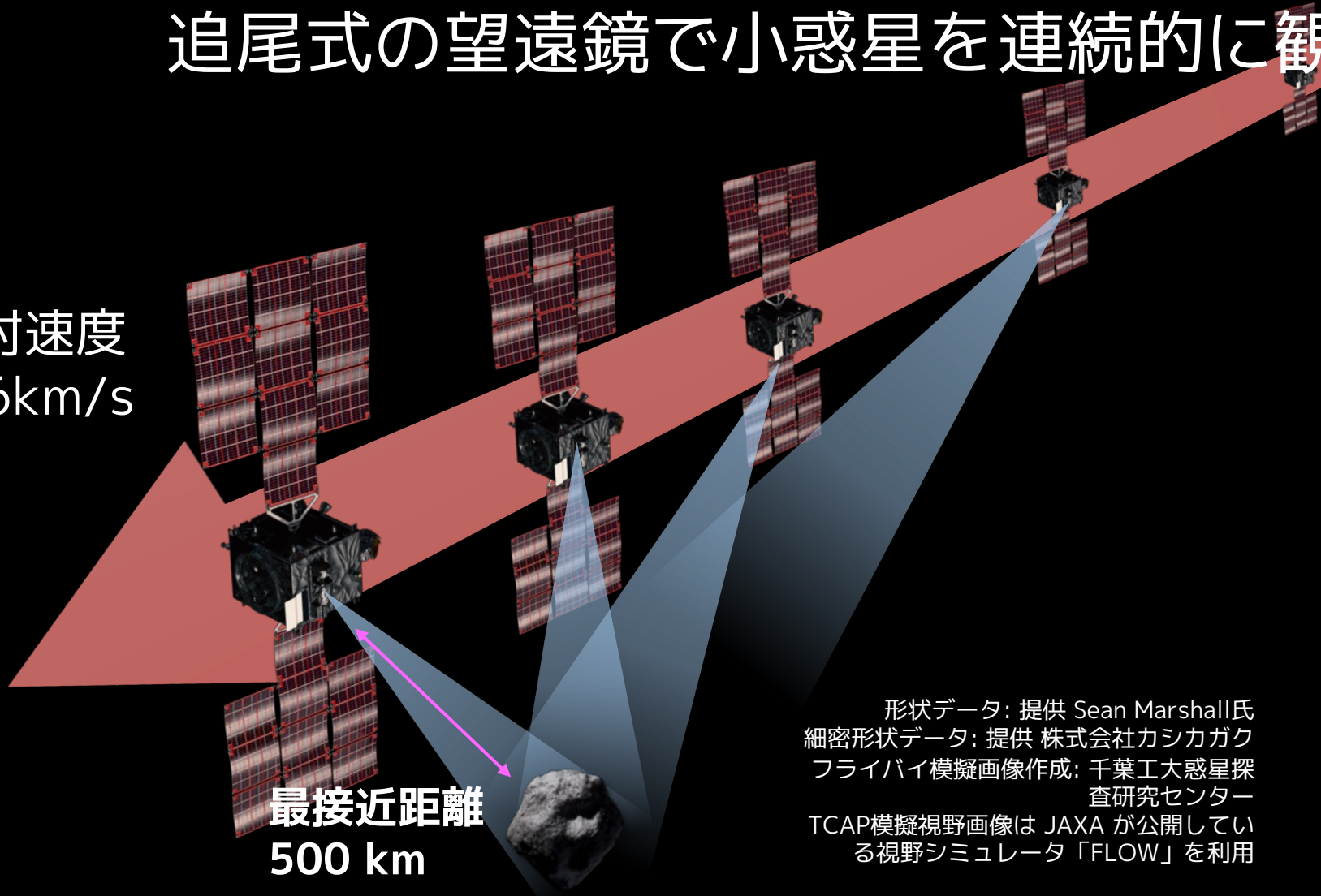


2028年打上げ予定

DESTINY+が目指すフライバイ探査

追尾式の望遠鏡で小惑星を連続的に観測する。

相対速度
<36km/s



最近距離
500 km

Phaethon (直径5-6 km)

形状データ: 提供 Sean Marshall氏
細密形状データ: 提供 株式会社カシカガク
フライバイ模擬画像作成: 千葉工大惑星探査研究センター
TCAP模擬視野画像は JAXA が公開している視野シミュレータ「FLOW」を利用

Phase Angle: 30.805 [deg]
Destiny+ UT 2028/01/05 01:45:00

JAXAが目指す新しい小惑星探査戦略

2026年03月05日現在，152万個以上の小惑星が発見されている。じっくり観測できるのと引き換えに時間の掛かる**（はやぶさ方式の）サンプルリターン探査**に対して，ワンチャンスだけど複数の天体に行きやすい**マルチフライバイ探査**を組み合わせると，より効果的に小惑星探査ができる！

事前探査を通じた価値向上

たくさん
観測

DESTINY+

(マルチフライバイ)

はやぶさ

(サンプルリターン)

じっくり
観測

特定の天体に対する発見の一般化

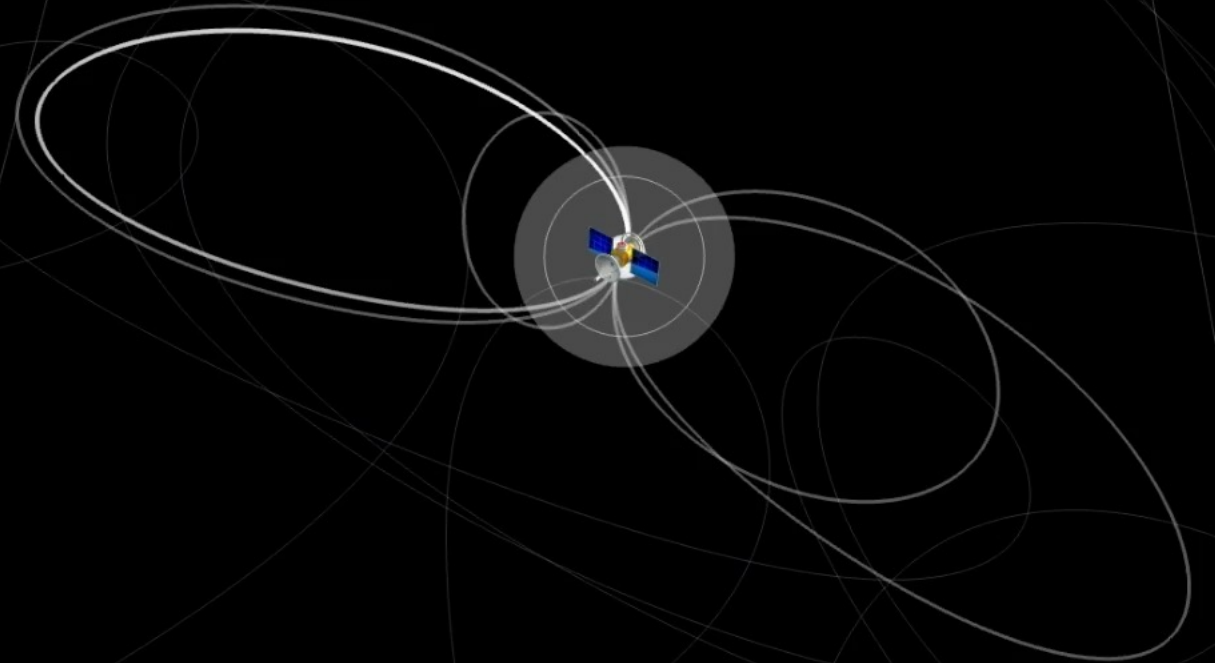
小惑星フライバイサイクラー軌道

Ref. Ozaki, Yanagida, et al., *JGCD*, 2022.

Spacecraft View

Animation made by CIT/PERC

Image is for illustration purposes.

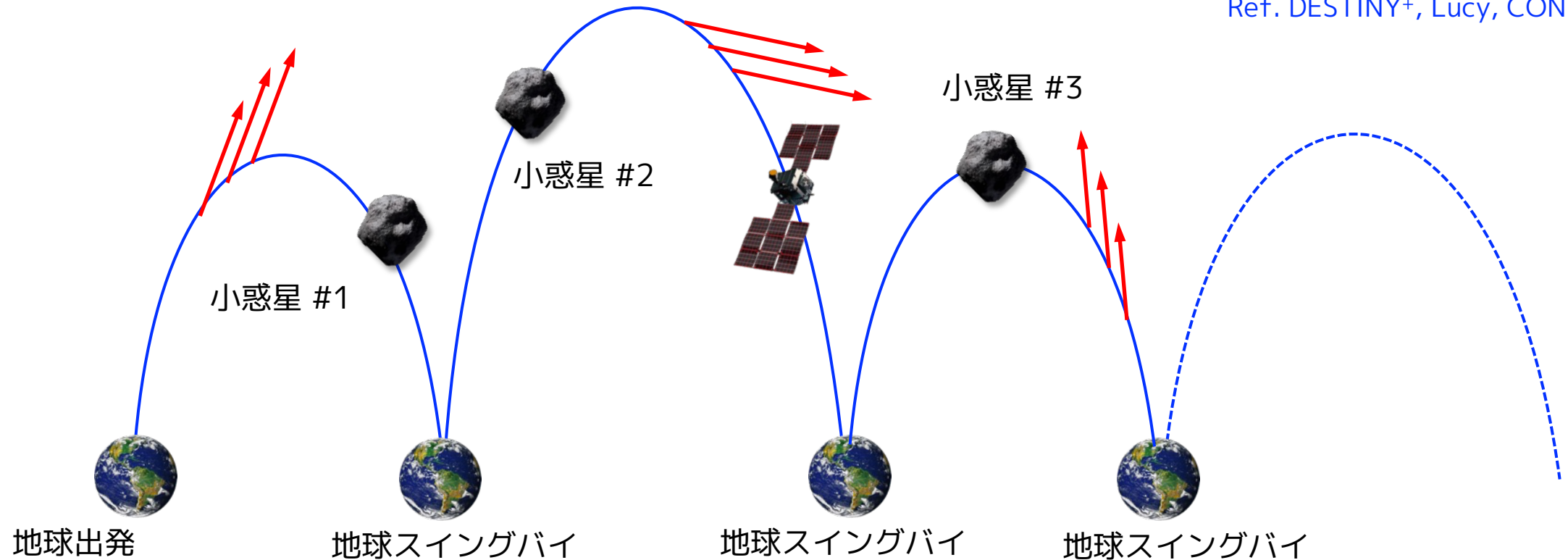


Animation made by Shoya Dozono

小惑星フライバイサイクラー軌道

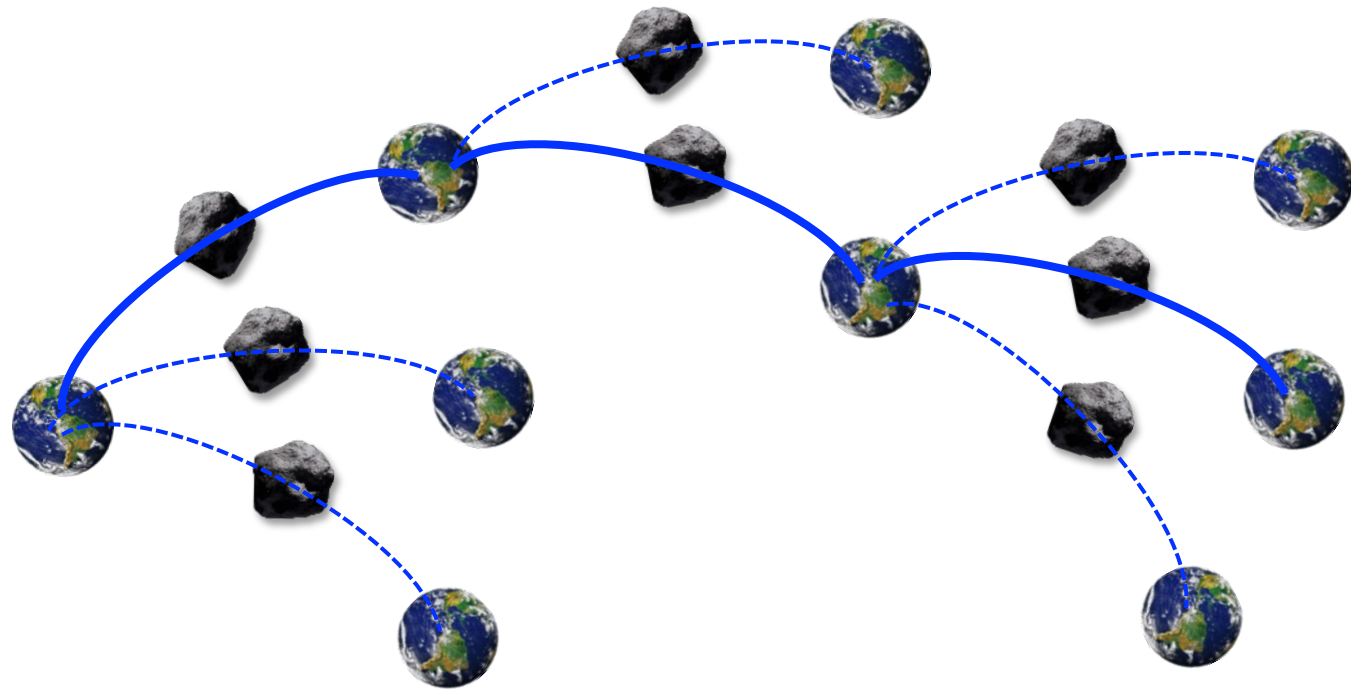
Naoya Ozaki, Kanta Yanagida, et al., " Asteroid Flyby Cyclor Trajectory Design Using Deep Neural Networks," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022.

Ref. DESTINY+, Lucy, CONTOUR

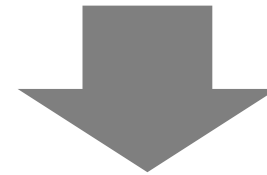


上記に示すような方式を採用することで、数年あたり1個の小惑星をフライバイすることが可能.

小惑星マルチフライバイ軌道設計 = フライバイシーケンスの組合せ最適化問題



✗ 組合せごとに非線形最適化問題を解くと、膨大な計算コストが掛かる（or 現実的な計算時間で取り組むために、組合せを限定せざるを得ない）



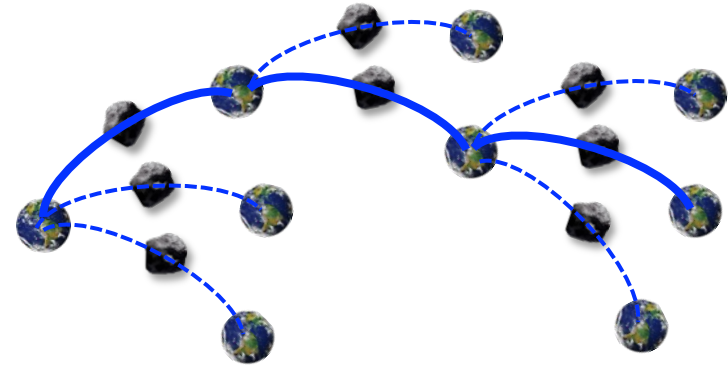
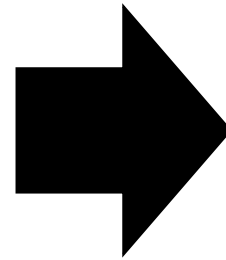
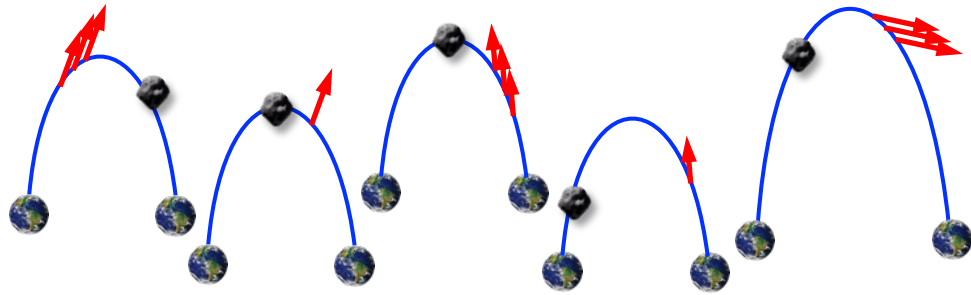
✓ 非線形最適化を サロゲートモデル（機械学習モデル） で近似的に表現することで、木探索に掛かる時間を短縮する

小惑星フライバイサイクラー軌道設計問題

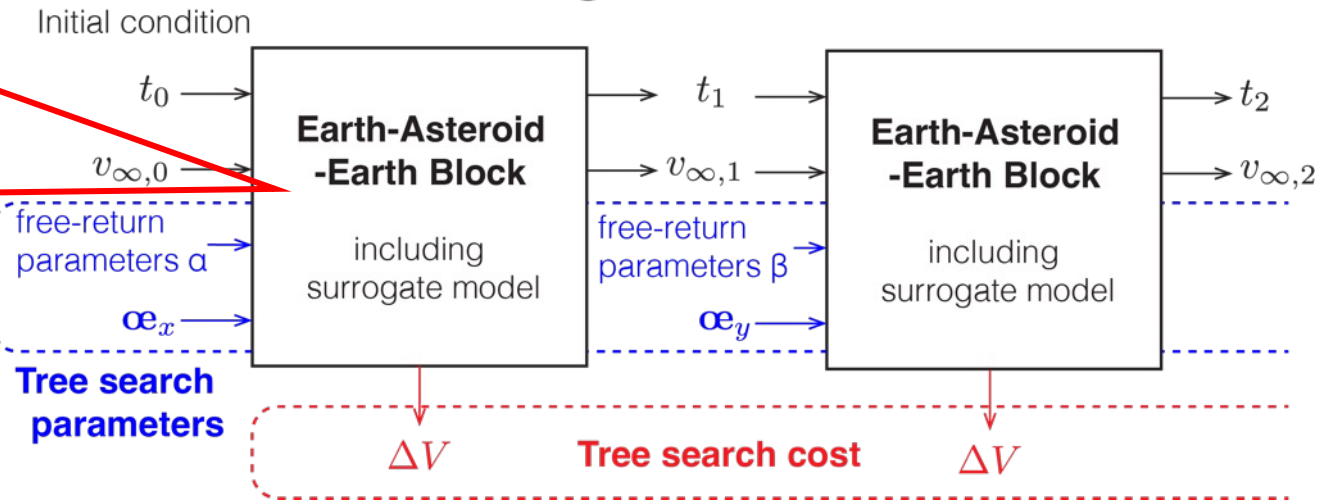
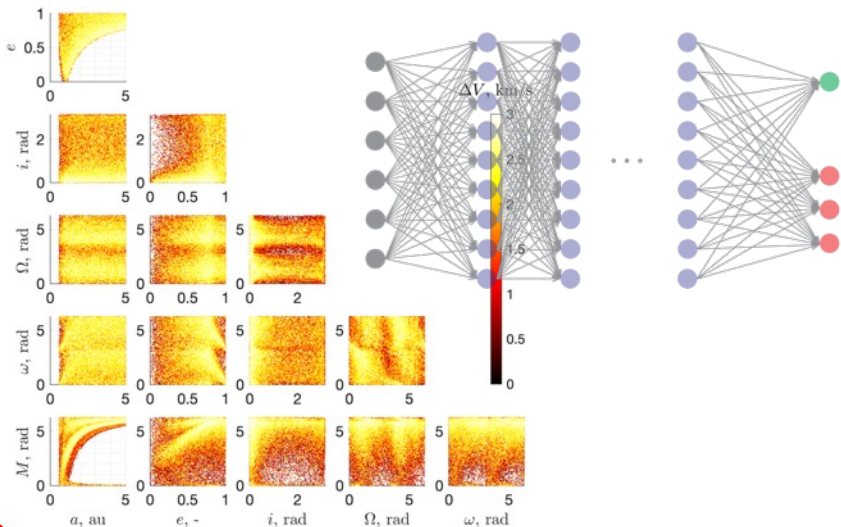
Naoya Ozaki, Kanta Yanagida, et al., " Asteroid Flyby Cyclers Trajectory Design Using Deep Neural Networks," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022.

地球=小惑星=地球間の軌道最適化問題を機械学習を用いたブラックボックスモデルで表現

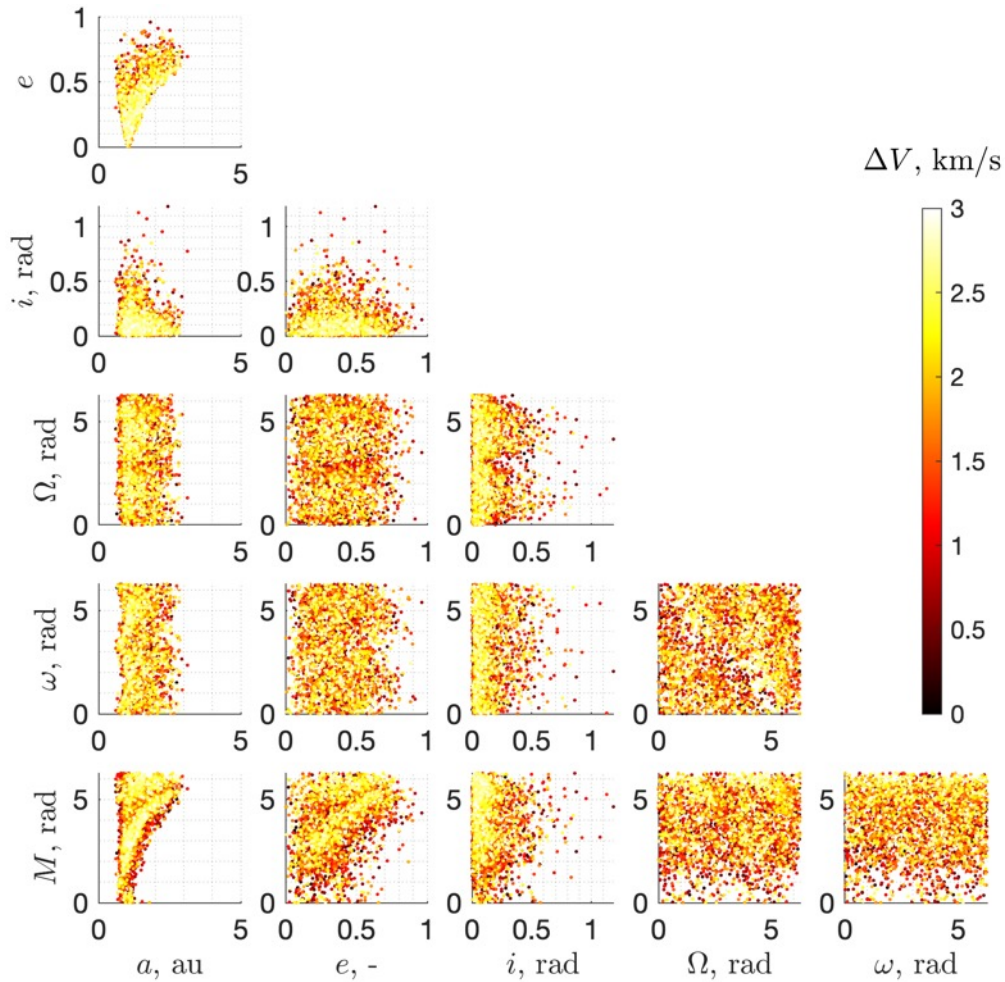
サロゲートモデルとビーム探索法を組み合わせ、効率的に木探索を行う。



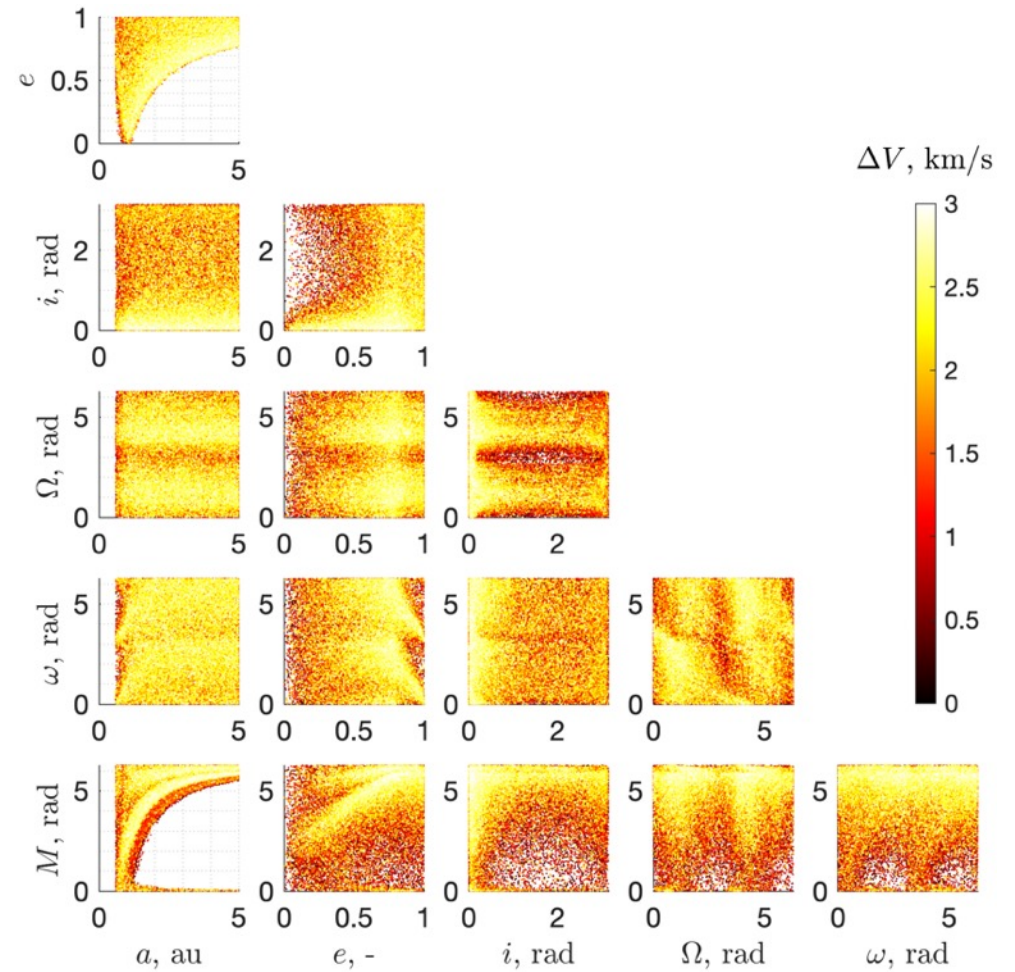
DNNによるサロゲートモデル



効率的な学習データ生成方法の提案

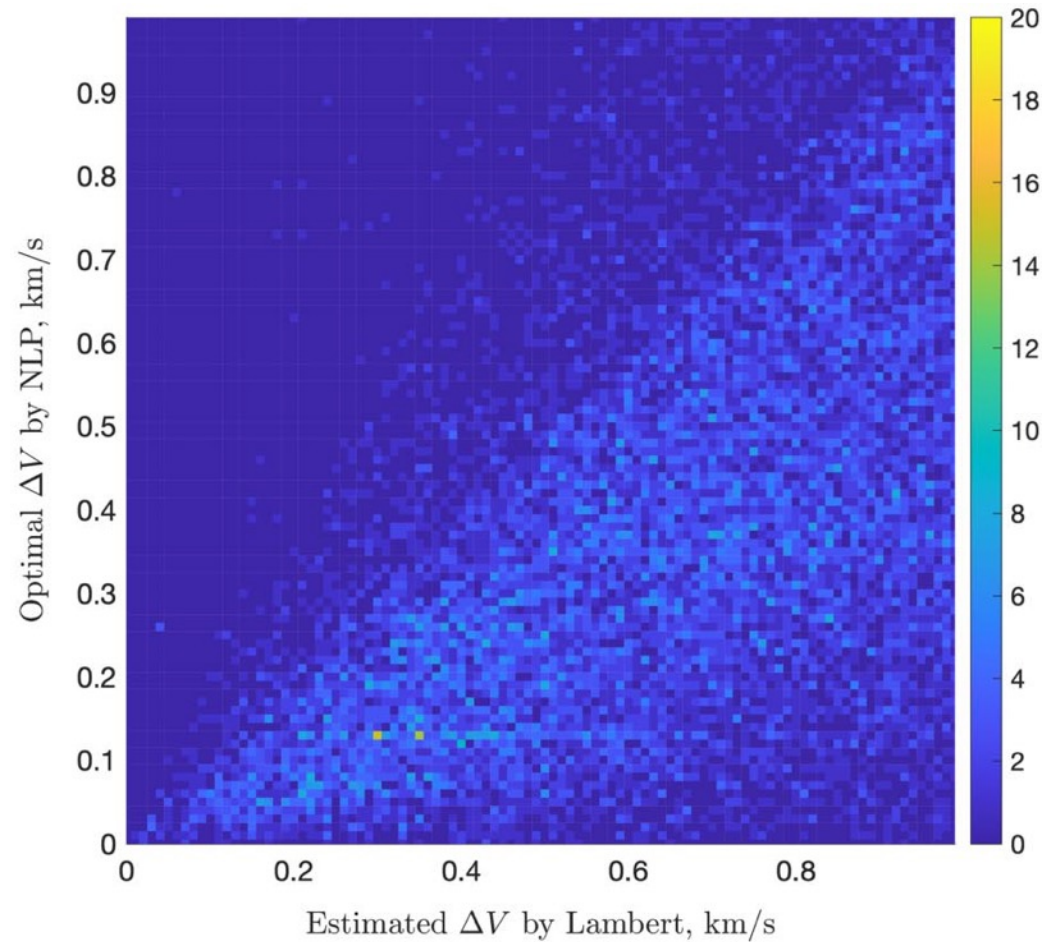


実際の小惑星による最適軌道データのみ

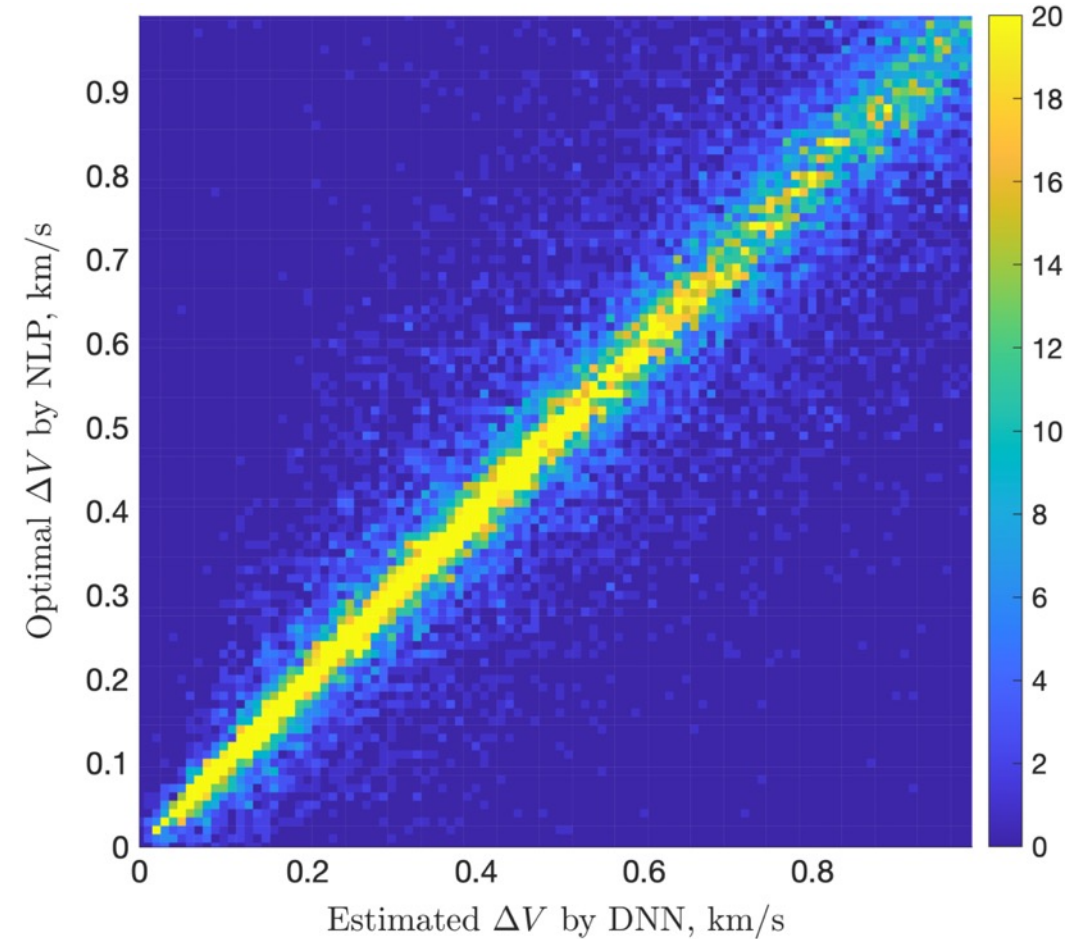


KKT条件を満たす擬似小惑星データで
拡張したデータ

サロゲートモデルを用いた ΔV 推論の精度

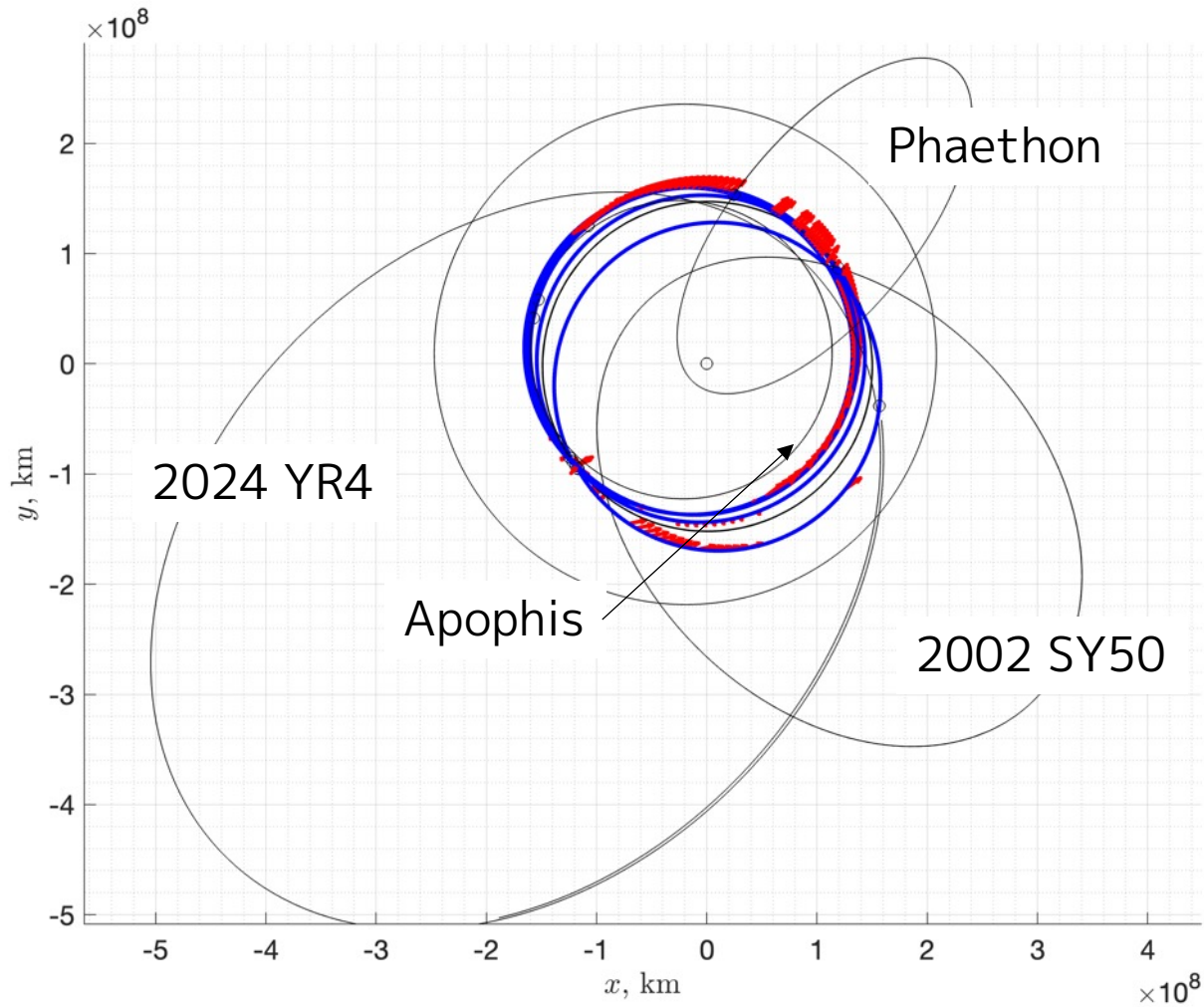


ランバール問題（解析的アプローチ）による推論

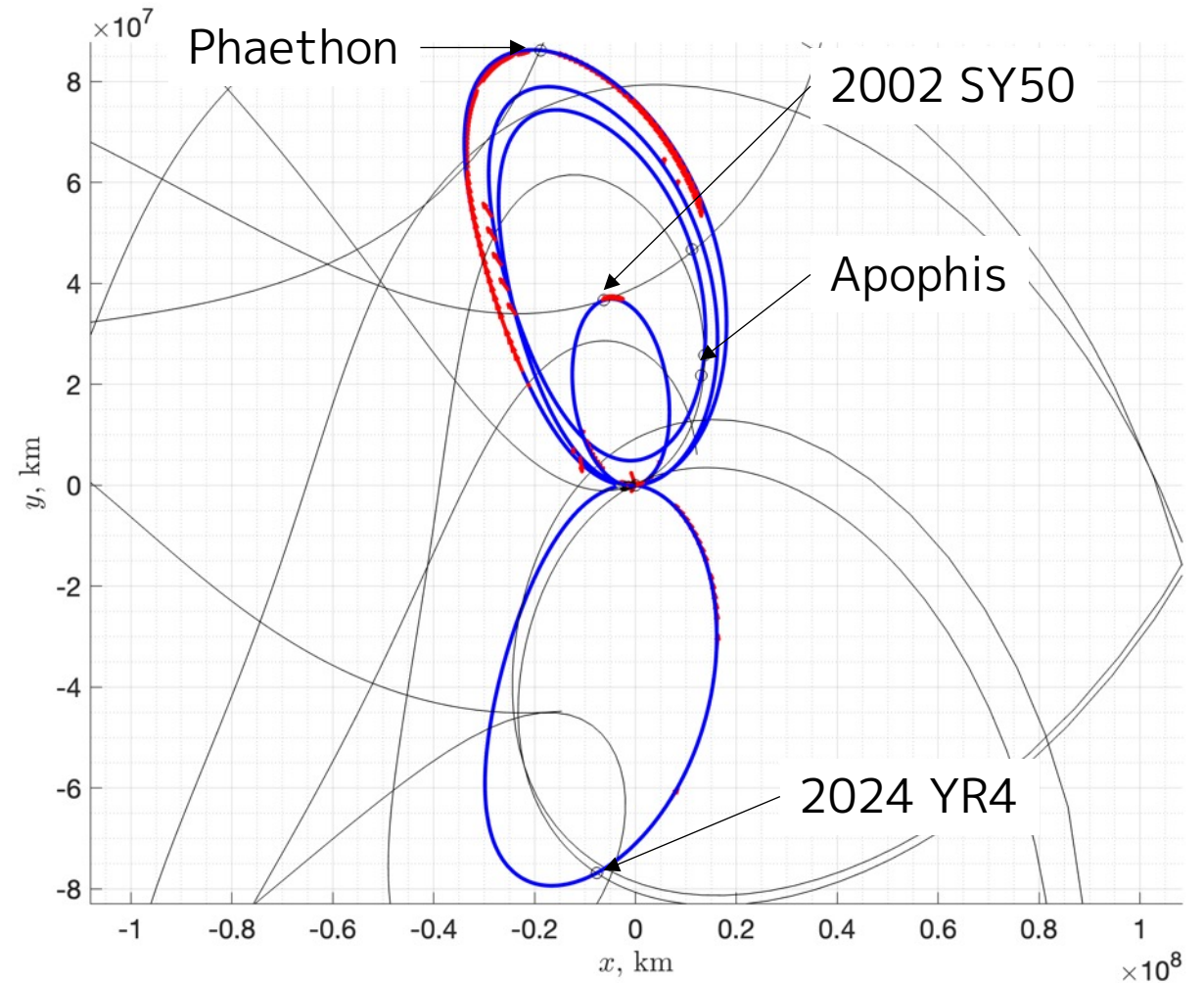


提案するサロゲートモデルによる推論

DESTINY+ の小惑星フライバイサイクラー軌道設計例

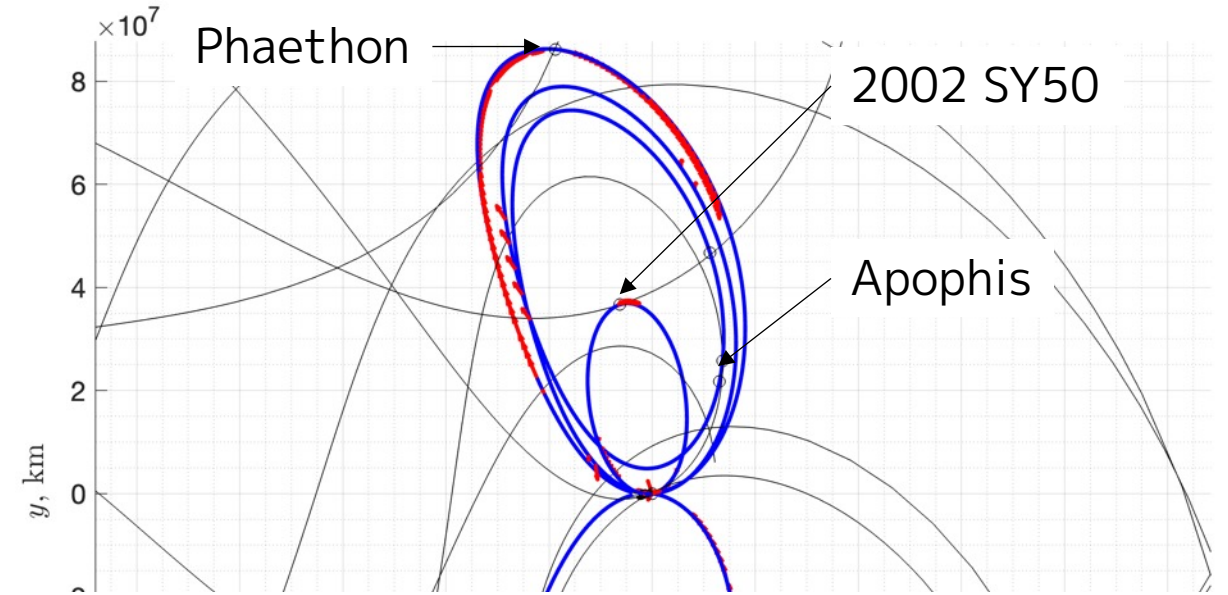
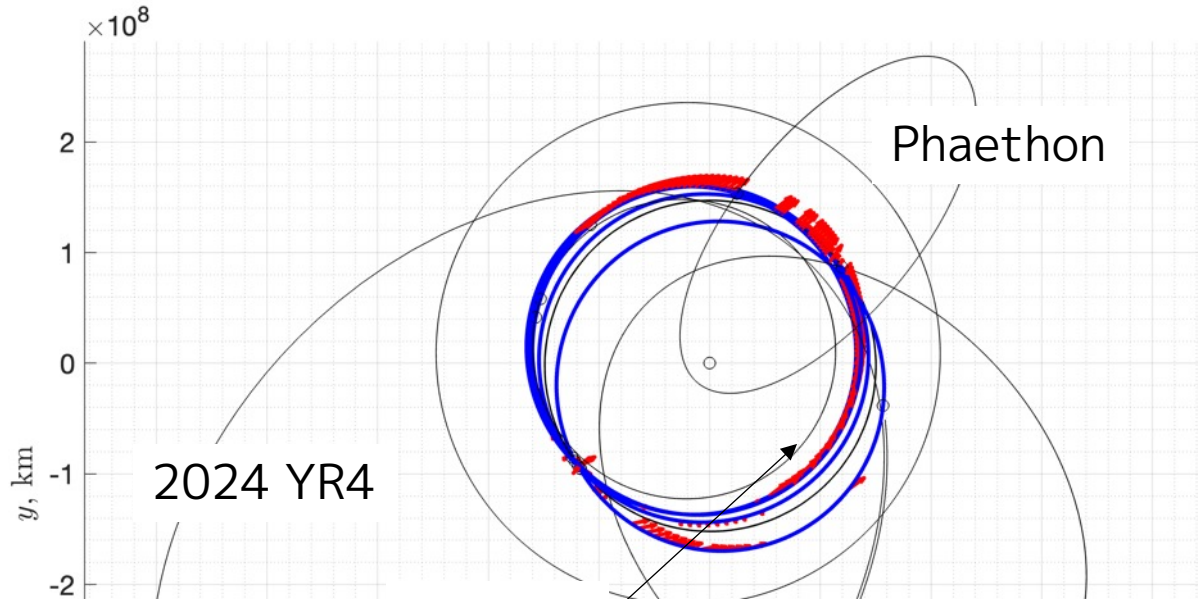


太陽中心・慣性座標系の軌道図



地球中心・太陽-地球固定回転座標系の軌道図

DESTINY+ の小惑星フライバイサイクラー軌道設計例



本研究の成果

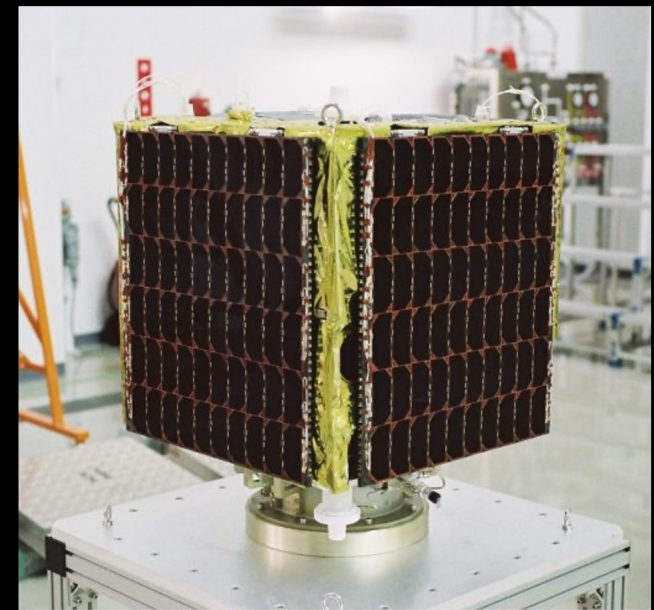
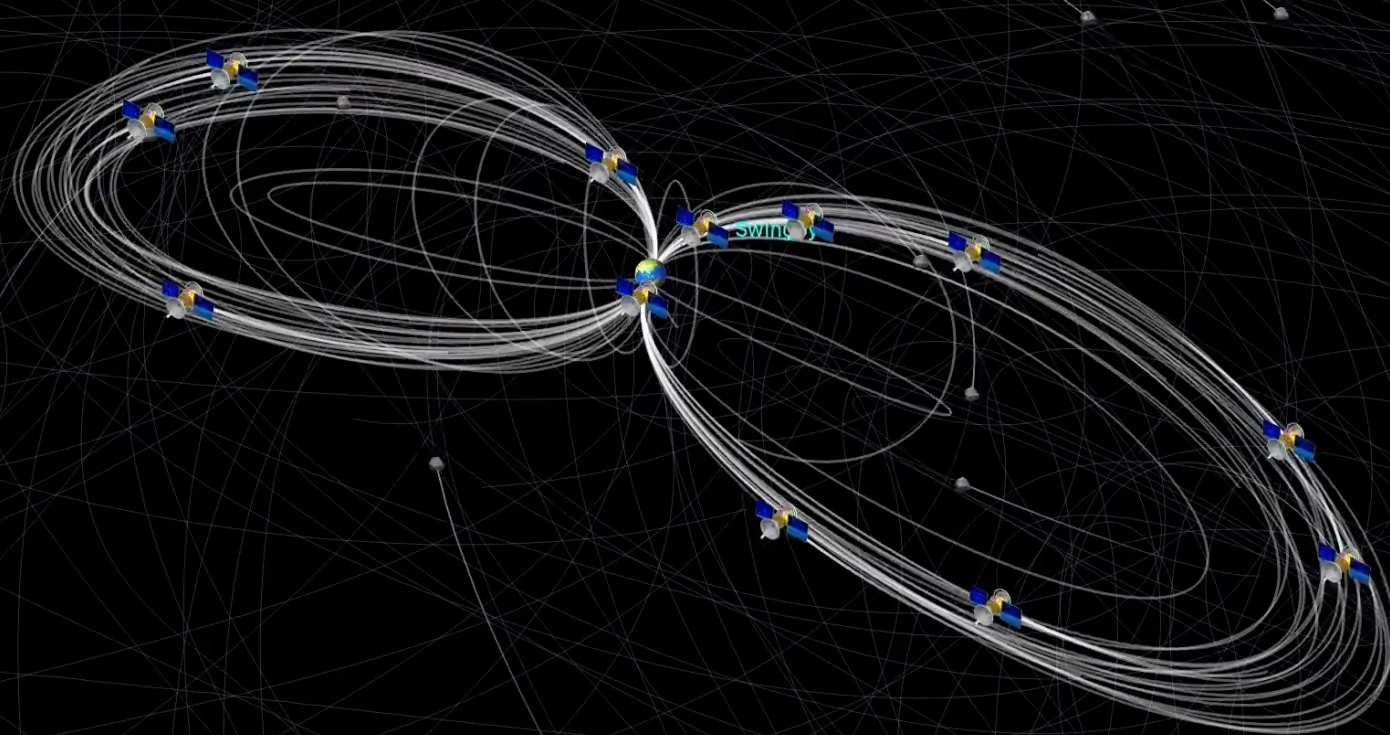
- ✓ 小惑星フライバイサイクラーの軌道設計手法に関する研究に取り組んでいたからこそ、RAMSESとDESTINY+のDual Launchの軌道設計のフェージビリティをクイックに確認できた
- ✓ 提案手法を用いることで、より網羅的な小惑星フライバイシーケンスの探索が可能となり、超小型探査機でも実現できる規模の小さな ΔV の解が見つかった

深宇宙コンステレーション構想

小惑星フライバイ
サイクラー軌道

×

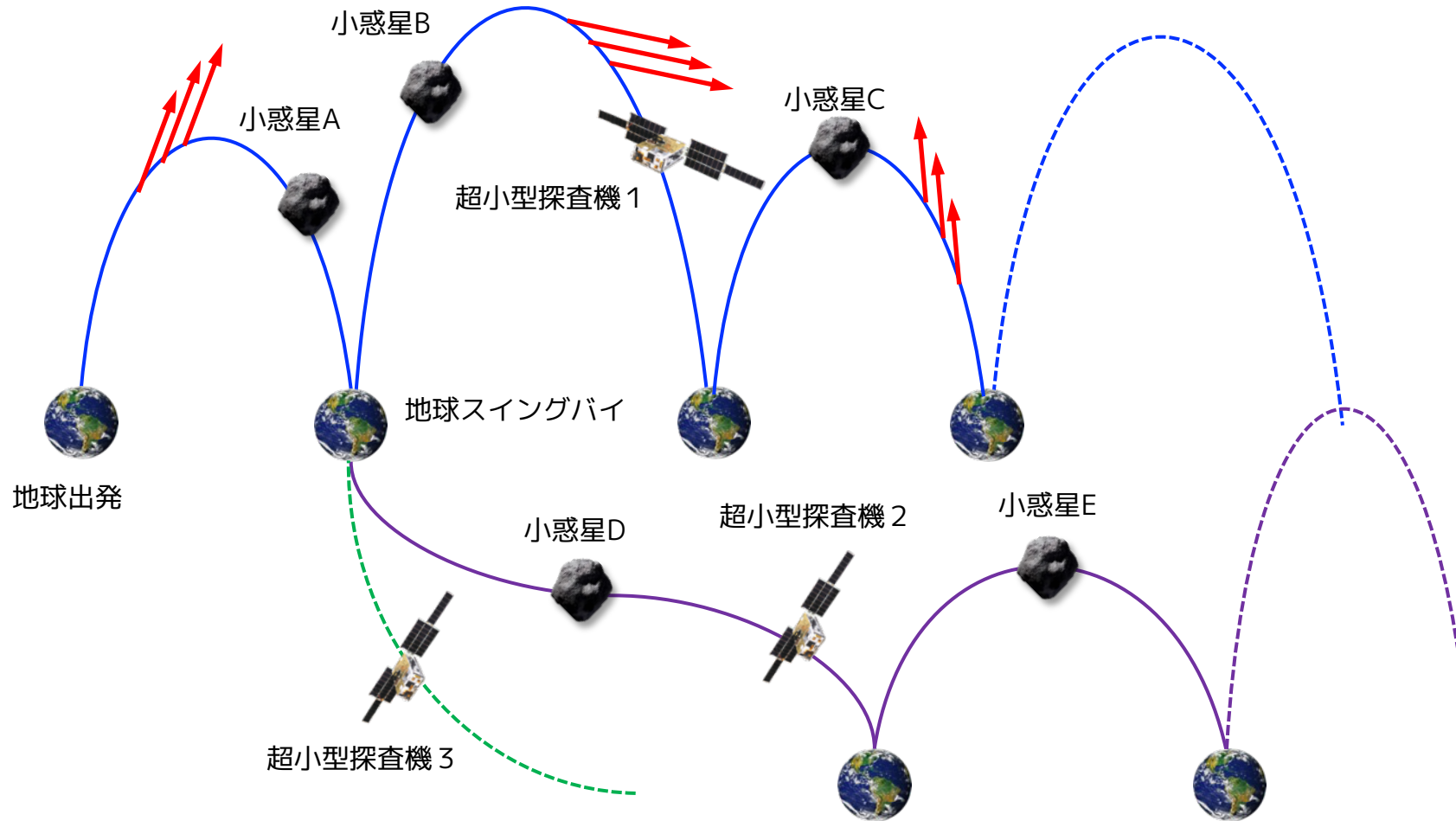
超小型探査機
コンステレーション



PROCYON

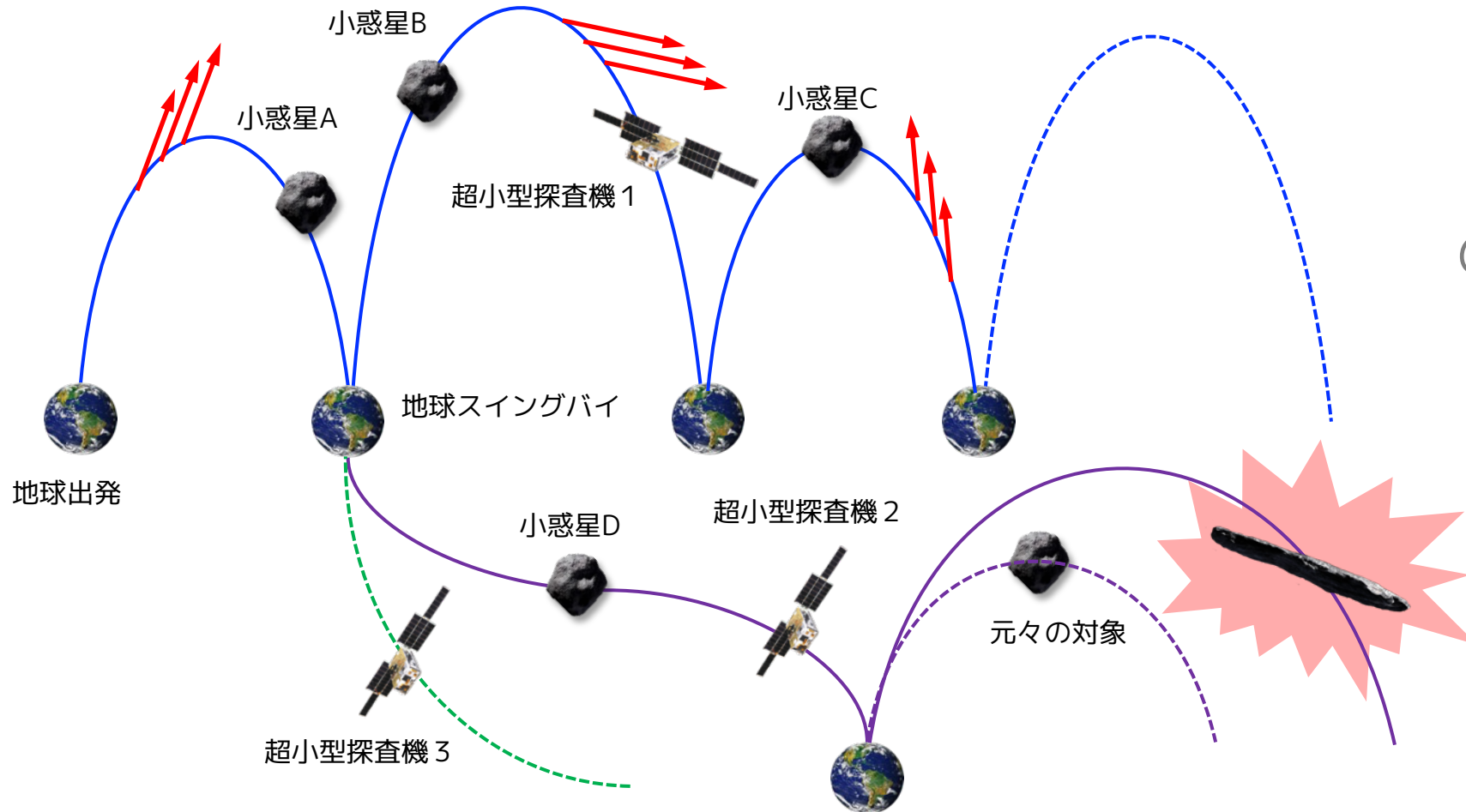
Animation made by Shoya Dozono

深宇宙コンステレーションによる 超高頻度な小惑星探査



約10機構成のコンステレーションを作ることができれば、1ヶ月に1個の頻度での小惑星探査ができる！

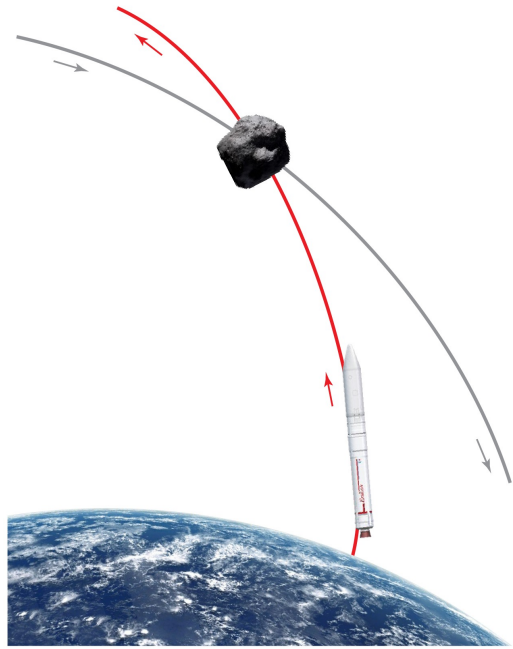
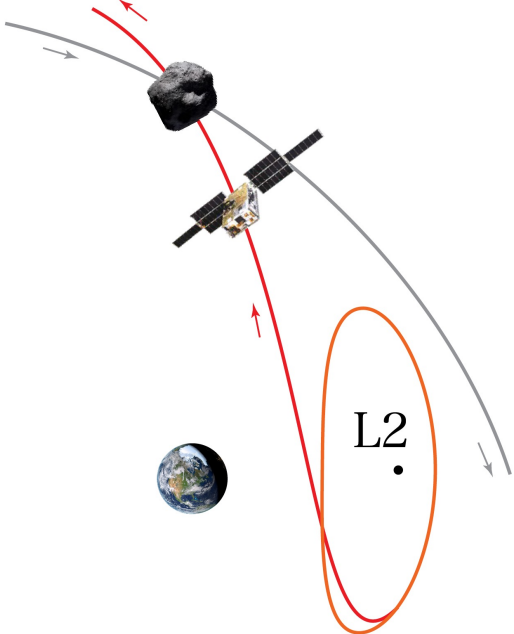
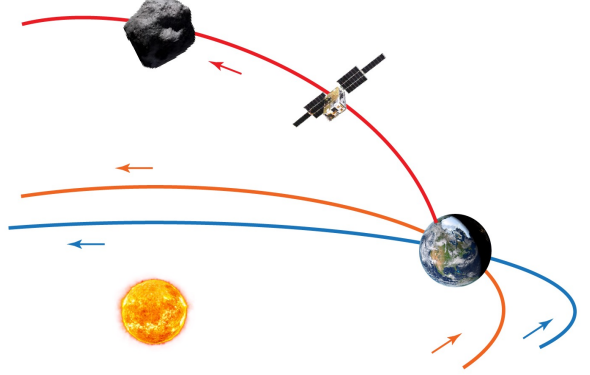
深宇宙コンステレーションによる 超高頻度な小惑星探査



約10機構成のコンステレーションを作ることができれば、1ヶ月に1個の頻度での小惑星探査ができる！

地球スイングバイを用いて、新たに発見された天体への即応的な探査が可能となる！

日本が独自に即応型探査を実現するためのシナリオ

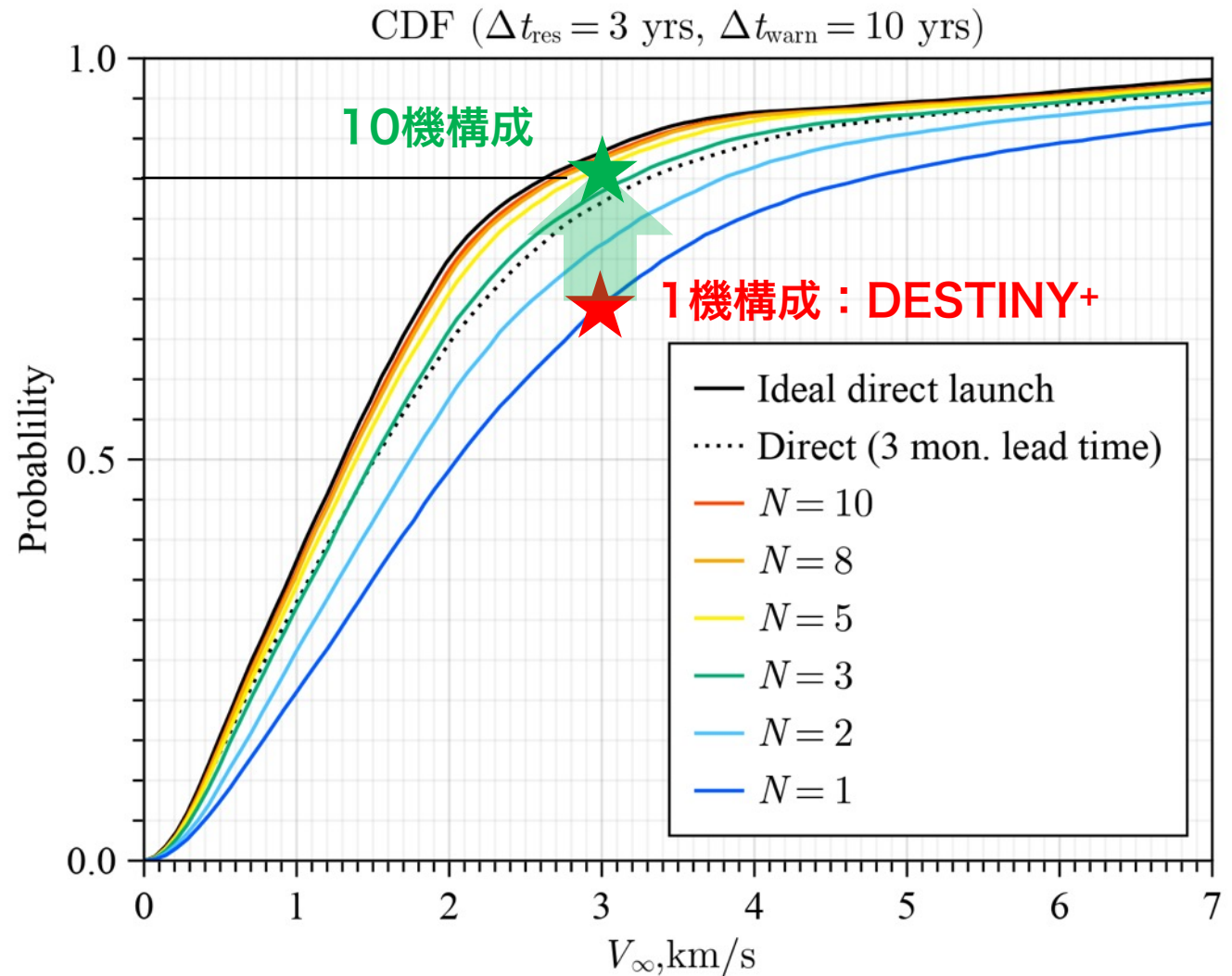
	地球からの直接 打上げ方式	ハロー軌道待機方式	地球スイングバイ方式 (小天体フライバイ サイクラー方式)
概要	<p>対象天体が来たタイミングでロケットを打ち上げて狙う</p> 	<p>探査機をハロー軌道で待機させておき、対象天体が来たら脱出し、対象天体を狙う</p> 	<p>探査機を定期的に地球スイングバイする軌道に上げておき、対象天体が来たら、地球スイングバイのタイミングで軌道変更し、対象天体を狙う</p> 

危険小惑星にフライバイ可能な確率

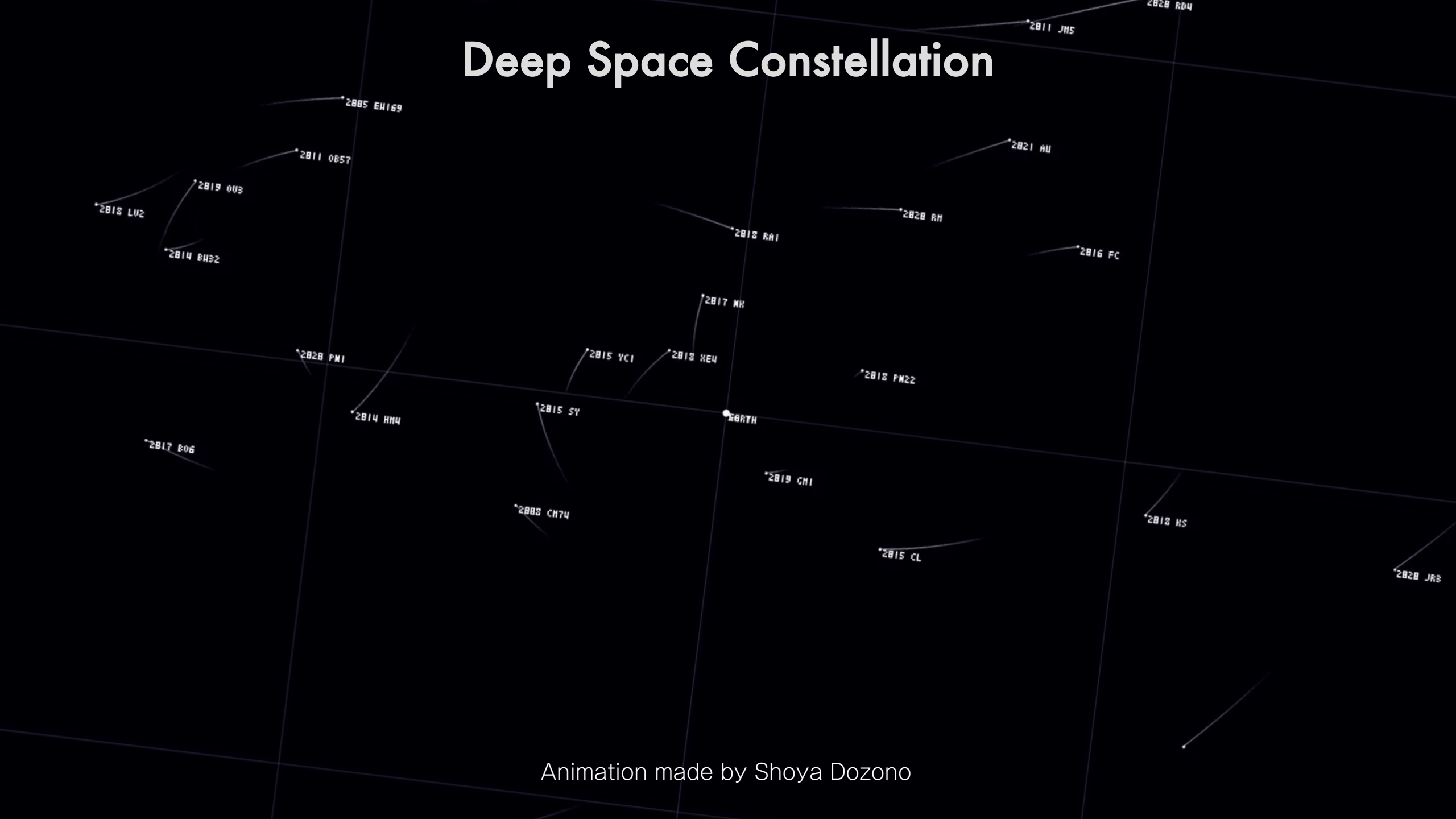
(尾崎、日本航空宇宙学会誌、2025)

すでに発見済みの危険小惑星に対して、即応的にフライバイ可能かどうかの評価を実施した。

- ✓ 小惑星フライバイサイクラーの待機軌道の V_∞ が大きいほど到達可能確率が高まる
- ✓ 現実的な設計解案としては、 $V_\infty = 3 \text{ km/s}$, 5機構成以上のコンステレーション（この解析で考慮していない制約を考慮すると10機構成であれば確実）で、 $\Delta t_{\text{res}} = 3 \text{ yrs}$ というレスポンスタイムで85%の危険小惑星に対して即応型フライバイ探査ができる



Deep Space Constellation



Animation made by Shoya Dozono