

RAMSESとDESTINY+の Apophis探査について

2026年 4月23日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
プラネタリーディフェンスチーム
宇宙科学研究所

はじめに

- ESA-JAXAジョイントミッションであるRAMSES（ラムセス）とDESTINY+はH3ロケットにて相乗りにより2028年度打上げを計画している。（第98回宇宙開発利用部会、第68回宇宙・探査小委員会にて報告済み）
- 両ミッションは2029年度に地球に最接近する小惑星Apopphis（アポフィス）を共同観測する予定
- 相乗り打上げによる共同観測の計画により、運用面での相乗効果や相乗効果により期待される科学的成果について報告する



小惑星Apophis (アポフィス) 概要

- **2029年4月13日 地表から約32,000kmの距離に接近**

Planetary Defense (地球防衛)の重要監視対象

- 地球最接近時に地球の潮汐力の影響で小惑星表層の物質移動や地震の可能性が示唆 (Ballouz+, 2024)

Planetary science (惑星科学)の重要研究対象

アテン族の地球近傍小惑星

公転周期 0.89 年, 自転周期 263 ± 6 時間
歳差運動周期 27.38 ± 0.07 時間

地上観測による推定形状とサイズ

- ✓ 細長く非対称な形状.
 - ✓ 直径 325 ± 15 m (450 x 170 m)
- 小惑星イトカワと類似した形状とサイズ

天体表層の反射分光特性

- ✓ スペクトル分類 Sq型
 - ✓ 絶対等級 19.7 ± 0.4
 - ✓ アルベド 0.23
- 小惑星イトカワと類似した物質

地上からでは点光源としてしかApophisを観測できないが、DESTINY+のフライバイ観測により【空間分解】情報が得られる。最接近距離50kmの場合、追尾望遠カメラ（天体形状・地形情報）で35cm・分光カメラ（表層物質情報）で4mの分解能が見込まれる。

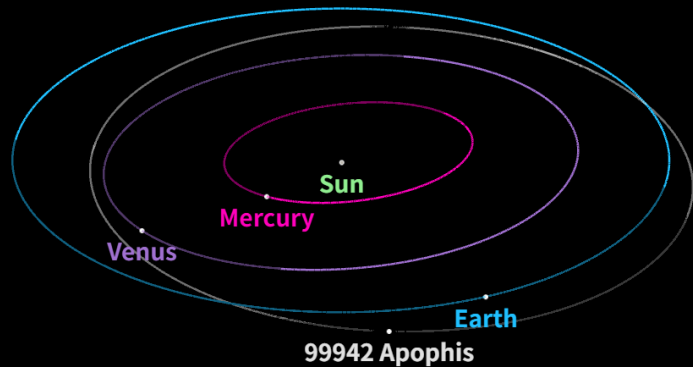


図1: Apophis軌道図

出典: Small-Body Database Lookup
https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html/#?sstr=apophis&view=VOP

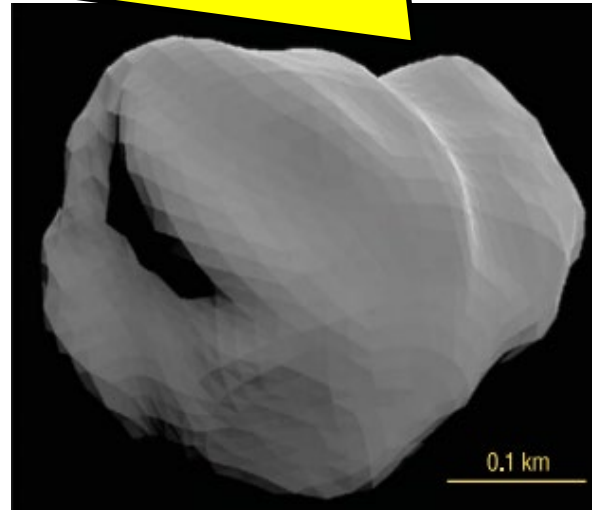


図2: Apophisの3D形状モデル

出典: DellaGiustina et al.(2023)

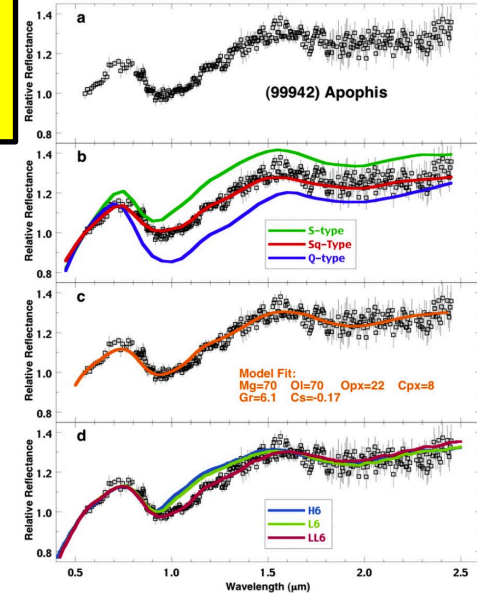


図3: Apophisの小惑星型 (Sq) と組成 (LL普通コンドライト)

出典: Binzel et al (2009)

RAMSES (ラムセス) ミッション概要



■ ESAとJAXAのジョイントミッション

JAXAは3アイテム（薄型太陽電池パドル、熱赤外カメラ、打上げ機会（H3））提供

RAMSESのコアミッション目標

1. Apophisの地球接近遭遇の事前（および事後）の高解像度での特徴付け
軌道/ 自転状態と向き(精度1%)/ 天体形状と表面変化(分解能10cm)/ 内部構造/ 1mm以下のダストの存在/ 固着力(cohesion)/ 質量、密度、空隙率(精度1%)
2. 地球接近遭遇の間における高い時間分解能（1分）でのApophisの監視

アウトカム

地球重力の影響により発生しうること

- ①公転軌道の変化、②自転軸や速度の変化、③地滑り、地震、変形

「小惑星が地球に接近すると何が起きるのか？」を知ることができる

- 小惑星軌道・自転の変化 → 小惑星の軌道予測の精度向上
- 小惑星物質強度の推定 → 探査機衝突による小惑星軌道変更量の精度向上

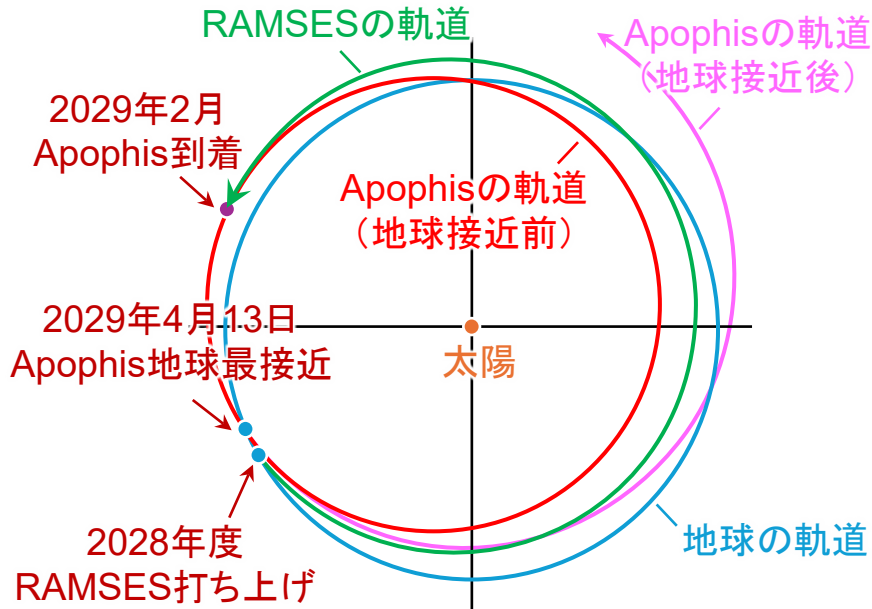


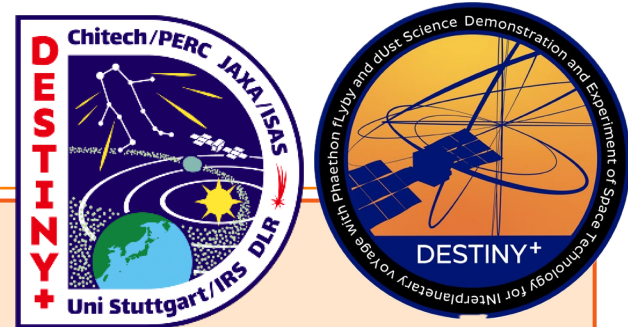
図4 RAMSES 想定軌道

RAMSESが目指すランデブー探査



図5 ランデブー探査概要図

DESTINY+ミッション概要



理工一体ミッションであるDESTINY+の目的

1. 小型深宇宙探査機技術の獲得
2. 流星群母天体のフライバイ観測および惑星間ダストのその場分析

〈工学ミッション〉

1. 電気推進の活用範囲の拡大
2. 先進的なフライバイ探査技術の獲得

〈理学ミッション〉

1. 地球外からの炭素や有機物の主要供給源たる地球飛来ダストの実態解明
2. 地球飛来ダストの特定供給源である ふたご座流星群母天体(3200 Phaethon (フェートン) の実態解明

DESTINY+が目指すフライバイ探査

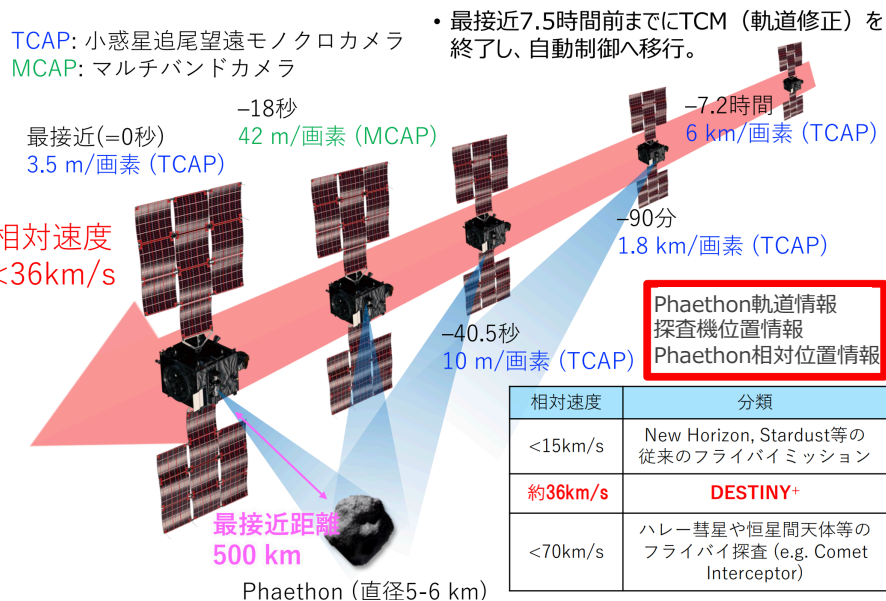


図6 フライバイ探査概要図

略称	名称	機器概要・観測対象・実証内容
TCAP	望遠カメラ Telescopic Camera for Phaethon	駆動鏡を用いた追尾機能有の望遠カメラ (千葉工大と共同研究) <観測対象> Phaethonのグローバル形状 Phaethonのセミグローバル地形 <100 m/pix Phaethon表層のローカル地形 <10 m/pix
MCAP	マルチバンドカメラ Multiband Camera for Phaethon	複眼カメラによる多バンド同時撮像カメラ (千葉工大と共同研究) <観測対象> Phaethon表層の物質分布 可視近赤外スペクトル <100 m/pix
DDA	ダストアナライザ DESTINY+ Dust Analyzer	ドイツとの国際協力によりDLR/シュツットガルト大学が開発。ダスト粒子毎の質量、速度、飛来方向、化学組成のその場分析を行う <観測対象> 惑星間ダスト及び星間ダストの物理化学特性 Phaethon由来ダスト及びダストトレイルの物理化学特性
RTP	可逆展開ラジエータ Reversible Thermal Panel	軌道上で電力を用いない開閉型のラジエータ <実証内容> 軌道上での展開収納動作確認と熱制御系実証
DSM	放射線計測 Dosimeter	探査機の放射線環境の計測 <実証内容> 新規の薄膜太陽電池評価のための放射線環境をモニターする
MDP	ミッションデータ処理装置 Mission Data Processor	ミッション機器(DDA, TCAP, MCAP)および実証機器(DSM, RTP)のデータハンドリングをとりまとめる

表1 主な搭載機器

DESTINY+は、観測対象天体であるPhaethonに加え、**打上げロケットのH3への変更により、Apophisや2024 YR₄などプラネタリーディフェンスに資する小天体をプリカーサ的に探査することを検討している。** **プラネタリーディフェンスへの貢献の新たな可能性**

RAMSESとDESTINY+ の相乗り計画概要

- RAMSESとDESTINY+はH3-24S形態に相乗りにより2028年度打上げ予定。
相乗りコンフィグレーションはSide-by-Side構造
- 相乗対応ディスペンサ・射場設備改修はJAXA開発。
- 打上げシーケンス上、**DESTINY+を先に分離**。
- DESTINY+はRAMSESより先にApophisを検出・同定し、観測情報をRAMSESへ共有予定。

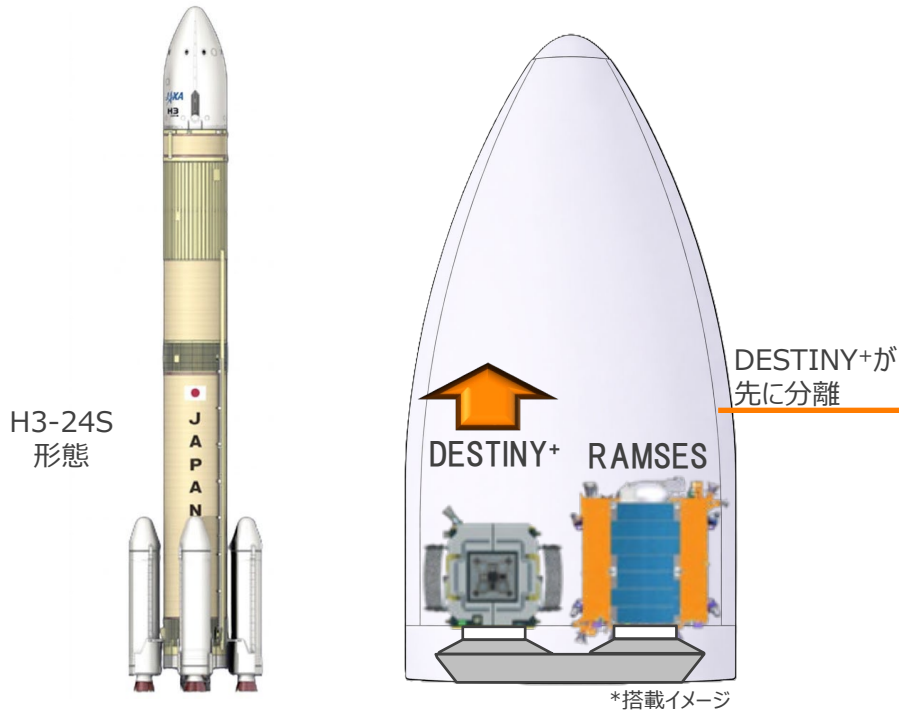


図7 H3相乗りコンフィグレーション

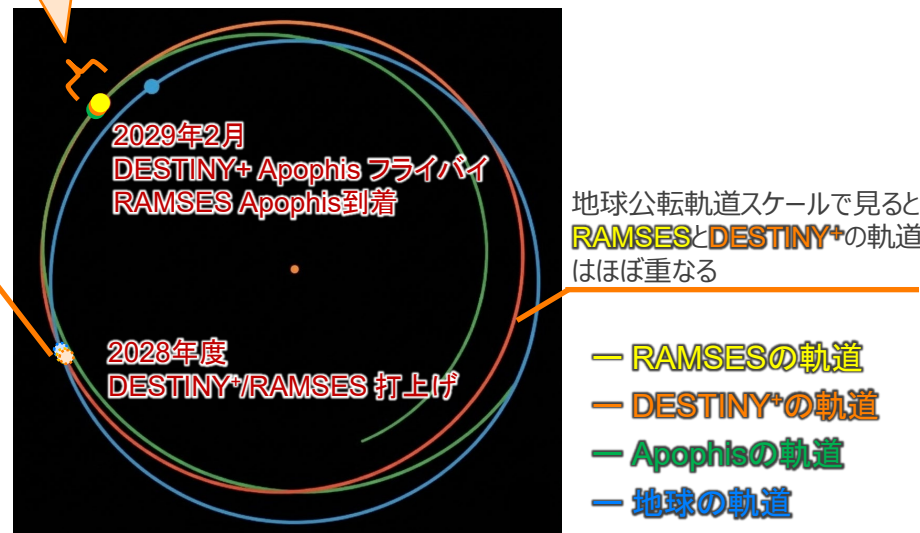
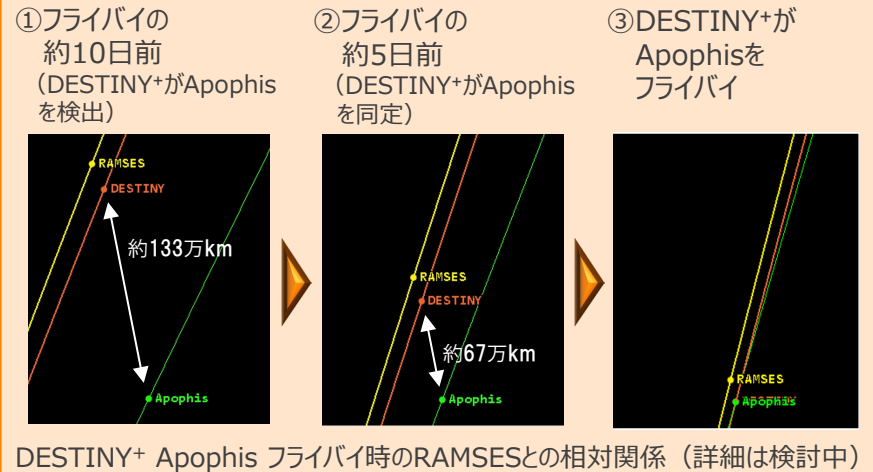


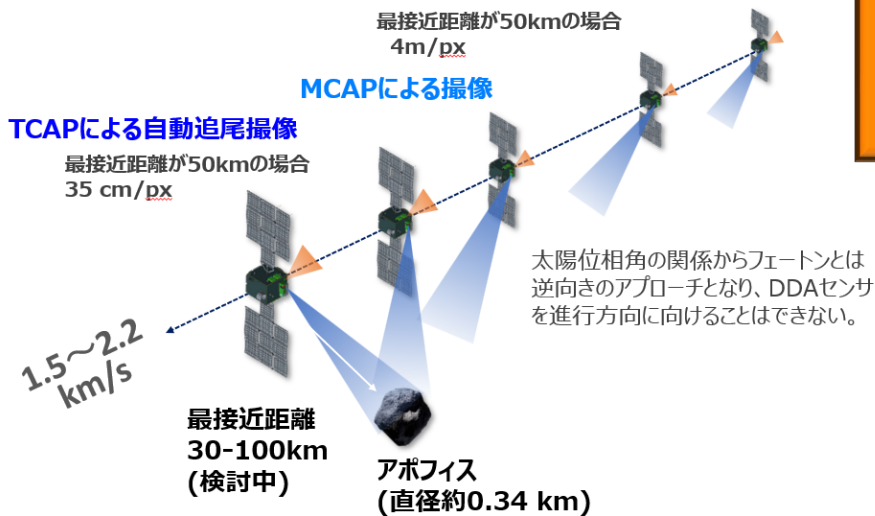
図8 RAMSES/DESTINY+相乗り 想定軌道

RAMSES及びDESTINY+のApophis観測計画

技術的成立性の観点も考慮し、**DESTINY+ が2-3週間オーダーでRAMSESより先にApophisに到着し、観測を実施予定**。詳細は引き続き全ロケットウィンドウでのロケット飛行解析を含め、継続確認実施予定。

DESTINY+

Phaethonフライバイのリハーサルとして、Apophisフライバイを実施する。相対速度が異なるが再接近距離の調整により、TCAP駆動鏡の角速度を合わせる方針で計画中。
DESTINY+での観測は自転周期が遅いため半面程度のみ。



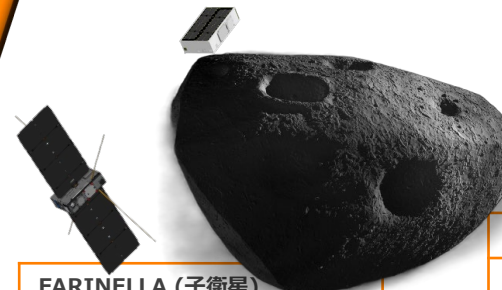
Apophis 最接近フライバイプロファイル(検討中)

RAMSES

DESTINY+の先行観測結果を共有し、Apophisの正確な位置・軌道情報によるランデブー運用の確実化、Apophisの形状情報等により、子衛星を含む事前の観測計画の詳細化を実施。その後のランデブー探査の成果最大化を目指す。

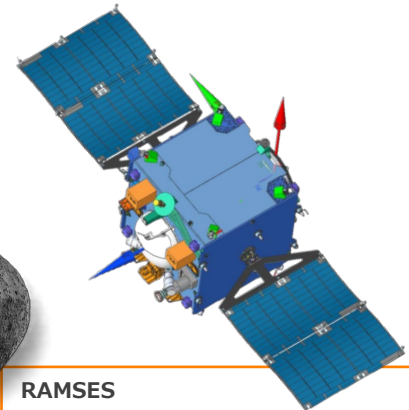
Don Quijote (子衛星)

Apophisへ着陸。重力計、地震計、磁力計による観測



FARINELLA (子衛星)

自律的にApophisをブライアラウンド後、着陸。低周波レーダ、揮発性物質・ダスト観測器、可視光カメラによる観測



RAMSES

Asteroid Flaming Camera (可視光カメラ)、TIRI (熱赤外カメラ)、HAMLET (可視近赤外分光カメラ)、CHANCES (望遠カメラ)、PALT (レーザ高度計)、RPS (プラズマ観測器) による観測

RAMSESが目指すランデブー探査

DESTINY+とRAMSESによる科学的共同成果（1/2）

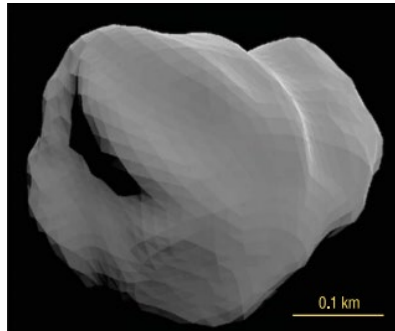
DESTINY+がRAMSESに先行してApophisのデータを取得することの利点と重要性

- (1) RAMSESによる探査のための事前情報を提供 → RAMSESの探査計画や運用の安全性への寄与
- (2) Apophisの地球接近以前の状況を把握 → Apophisが地球に接近することによって形状・自転等がどのように変化するかを知るための基本的情報の提供
- (3) プラネタリーディフェンス活動に向けた重要な実験 → フライバイによって天体の物理的性質がどこまで分かるかを初めて確認

(1) RAMSESによる探査のための事前情報を提供

- DESTINY+のTCAPによる探査機で世界初Apophis画像撮影（形状、大きさ、表面の状況、衛星の有無）
→ Apophisの形状や表面の状況、自転軸の方向、衛星の有無が分かることになり、RAMSESのランデブー運用（子機の着陸地点選定含む）の準備およびより安全な運用の立案に役立つ。
- DESTINY+のMCAPによる撮影（多色（4バンド）によるデータ）
→ RAMSESによる撮影と相互比較することによりデータ精度の保証に寄与する。
- DESTINY+のDDAによるダストの観測（ダストの数、質量、電荷、軌道）
→ RAMSESのプラズマ機器やcubesatに搭載されたダスト検出器や磁力計による観測のための事前情報となる。但し、前述の通りセンサが進行方向を向かないため、検出数が少ない見込み。

Apophisの形状モデル



Da.N.DellaGiustina et al. (2023)

Apophisの自転

周期、タンプリング（あり）、
自転軸向き（不明）

これらのデータがどのように変化するか？

DESTINY+とRAMSESによる科学的共同成果（2/2）

（2）Apophisの地球接近以前の状況を把握

- Apophisは地球に接近すると、地球の潮汐力や磁気圏の影響を受けて変化する可能性があるが、そのような変化をする前の状況をDESTINY+で確認できる。
→ Apophisの変化を正確に把握することに寄与

（3）プラネタリーディフェンス活動に向けた重要な実験

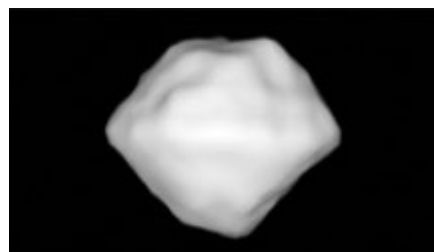
- プラネタリーディフェンスの実戦（実際に地球に衝突する天体が発見された場合）における対応策の検討となる。
 - まず、DESTINY+がフライバイによって得た観測情報から、Apophisの物理的情報を推定する。
 - RAMSESのランデブー探査により、Apophisの物理的情報は正確に把握できる。
 - これらの結果を比較する。
- 瞬時の探査ともいえるフライバイで天体の性質をどこまで正確に把握できるのかの検証を行うことができることになるが、これは天体の地球衝突回避の戦略を考える上で重要な情報となる。

注（背景）：天体の性質を詳しく知るためにはランデブー探査を行う必要があるが、今後、天体の地球衝突まで時間が十分に無い場合などフライバイ探査しか行えないケースが想定されるため、プラネタリーディフェンスとしてはフライバイでどこまで分かるのかを確認しておくことは重要。

DESTINY+マルチフライバイ観測により期待される科学成果

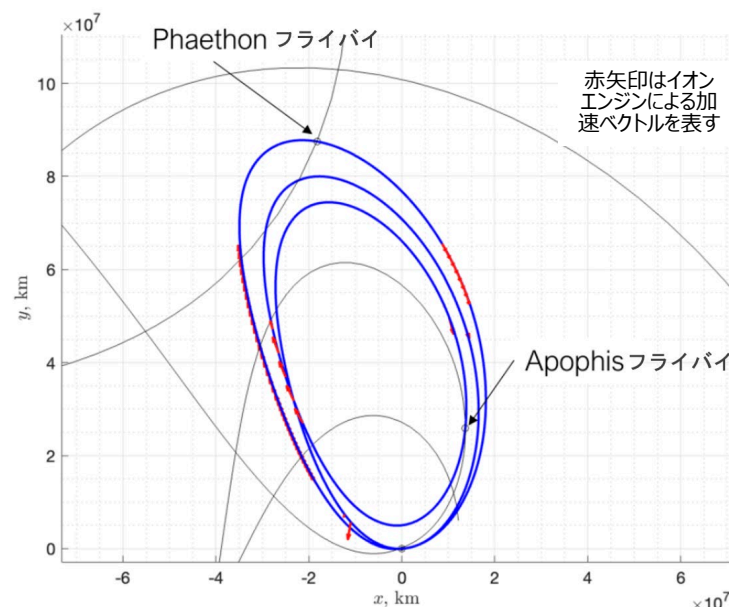
H3ロケットへの変更により、DESTINY+ではApothisとPhaethonのマルチフライバイ観測が可能となった。ApothisとPhaethonは、力学進化・熱履歴・組成の点で対照的な二天体で、太陽系の異なる起源領域に由来する可能性があり（小惑星帯の内側と外側）**一つの探査機で、小天体進化の“両極”を調査可能である意義は極めて大きい。**

- 小天体の組成多様性の理解
炭素質(B型)小惑星Phaethonと岩石質(S型)小惑星Apothis表層の分光観測
- 小天体進化過程の理解
太陽近接での熱進化を経たPhaethonと地球接近での潮汐・力学進化を受ける
- Apothisの形状・表層地形・反射分光特性の観測
- 小惑星周辺のカスト環境の理解
活動的小惑星Phaethonと非活動的小惑星Apothis近傍のカストフラックス観測
- 上記の異なる進化を経た小天体の表層環境
カメラ撮像による表層の陥没地形の保存状態や岩塊の分布、宇宙風化の比較
- 地球防衛研究への貢献
上記の観測で得られた知見に基づく異なる進化を経た地球接近小惑星の実態理解



組成：炭素質/B型
サイズ：約5.1-5.8km
(ほぼ球形-やや楕円体)

Phaethon形状モデル



太陽と地球を固定した回転座標系におけるDESTINY+の軌道図

(-15,0)に太陽・(0,0)に地球が位置し、青線のDESTINY+は時計回りに動く。

まとめ

- H3ロケット相乗り28年度打上げに向けRAMSESとDESTINY+は開発を進めている
- DESTINY+ がRAMSESより約2-3週間先にApophisをフライバイする計画
- DESTINY+が先にフライバイすることにより、RAMSESの運用面への貢献や同時期観測による科学的成果創出の観点から相乗効果は大きく、両探査機によりプラネタリーディフェンスに対する科学的・技術的観点の多数の知見も得られる
- DESTINY+単体でもH3ロケット打上げによりマルチフライバイが可能となり、ApophisとPhaethonなど同一の探査機で多数の小惑星を比較できることによる更なる科学的成果創出が期待される
- Apophis探査に関する各種国際会議を始動しており、科学成果創出に向け、更にコミュニティを醸成していく