



地球に接近する小惑星アポフィス探査計画 RAMSESへの参画について

2025年8月22日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
理事 佐藤 寿晃・藤本 正樹
プラネタリーディフェンスチーム

1. はじめに

- 第90回宇宙開発利用部会(2024年9月27日)「プラネタリーディフェンスの取組とアポフィス観測について」ご報告。
- 2024年11月 地球表面から約32,000km(静止軌道の内側)まで接近する小惑星Apophisの探査を目的としたESAのRapid Apophis Mission for Space Safety (RAMSES)への協力可能性の検討(熱赤外カメラ(TIRI:Thermal InfraRed Imager)、薄膜軽量太陽電池パドル(SAP:Solar Array Paddle)の提供及び可能な打上げ機会等)を加速することをJAXA-ESA 将来大型協力に関する共同声明で合意。
- 2024年12月 宇宙基本計画工程表に「2029年に地球に最接近する小惑星Apophisに対し、我が国として希少な観測機会を確保し成果を創出するため、国際協力による探査計画に向けた検討、調整を進める」ことが明記され、国際協力に向けた検討を更に加速。
- 2025年5月宇宙基本計画工程表改訂に向けた重点事項でも「2029年に小惑星Apophisが地球に最接近することを踏まえ、国際的なプラネタリーディフェンスの活動として、国際協力の枠組みへの参画を検討する。」ことが明記。
- 政策的位置づけ及び宇宙機関間の国際協力の観点から、技術的成立性含む検討を進めてきた。その結果を踏まえつつ、RAMSESミッション達成により決められている打上げ時期(2028年度)に向けて、早期にRAMSESへの参画の方向性を決めることが重要。

1. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス関連の取組み状況

■ プラネタリーディフェンス関連ミッション

①はやぶさ2拡張ミッション

はやぶさ2の宇宙アセットを有効活用し、新たな技術と科学を創出するミッション。ミッション意義は① 太陽系長期航行技術の進展②高速自転小型小惑星探査の実現③ Planetary Defenseに資する科学と技術の獲得が目的。
2026年7月に小惑星2001 CC21(Torifune)のフライバイ探査を行うべく、5月27日にイオンエンジン運用を実施。



©JAXA

②赤外線センサ(TIRI)/Hera

ESA(欧州宇宙機関)が実施するS型小惑星Didymosとその衛星Dimorphosにランデブする探査計画。NASAのDARTの衝突後の状態を現地観測することで、史上初の本格的プラネタリーディフェンスの実証を行うとともに、惑星の形成・進化の過程の理解に迫ることを目指す。JAXAははやぶさ2以降強みとする赤外線カメラ(TIRI)を提供。
2025年3月12日21:50(JST)に火星スイングバイを実施し、TIRIは火星および衛星Deimos、続いて衛星Phobosの観測に成功。2026年12月到着に向けて運用中。



©ESA

③深宇宙探査技術実証機(DESTINY+)

2028年H3ロケットで打ち上げ予定。地球への生命起源物質の供給源と考えられている地球飛来ダストの輸送経路を知るため、惑星間塵及び流星群ダストの分布と Phaethon周辺におけるダストの物理化学組成やPhaethonの実態を明らかにすることが目的。
打上げ時期延期に伴う付加価値整理の一環として、Phaethonフライバイリハーサルも兼ね、2029年地球に最接近として近年注目され始めている小惑星Apophisをはじめ、複数天体へのフライバイを計画。



©JAXA

1. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス関連の取組み状況

■ 国際議論(国連 IAWN・SMPAG)への参画

- 国連において2029年は「小惑星認識と惑星防衛の国際年」と設定。
- 国連宇宙空間平和利用委員会の決定に基づきUNOOSA(国連宇宙部)が事務局を務める会合IAWN※1・SMPAG※2にJAXAも参画。
- 2025年1月29日に2024 YR4をきっかけにIAWNで初めて衝突の可能性について公表(2032年12月22日に地球に衝突する確率1.3%)したことで、世界中が2024 YR4の地球への衝突の可能性に注目しプラネタリーディフェンスへの関心が更に高まった。
- また、SMPAGでは2024 YR4への対応策の議論や2029年に地球に接近する小惑星Apophisに向けて計画されている多くの探査機・衛星ミッション間の調整を行う新しい仕組みを提案がなされた。
- 2月24日にIAWNより地球に衝突する可能性が潜在的にない旨の最終通知がなされたが、6月3日時点月への衝突確率が4.3%となっている。

※1 IAWN (International Asteroid Warning Network:地球に接近・衝突する天体を発見そして軌道を確定し、さらに地球に衝突する場合にはその予測をすることが主目的とし、天文台など天体を観測できる機関を中心に構成)

※2 SMPAG(Space Mission Planning Advisory Group:地球に衝突する天体が発見された場合、どのように衝突回避をするか、被害を最小限にするかを検討することが主目的とし、各国の宇宙機関がメンバーで構成)

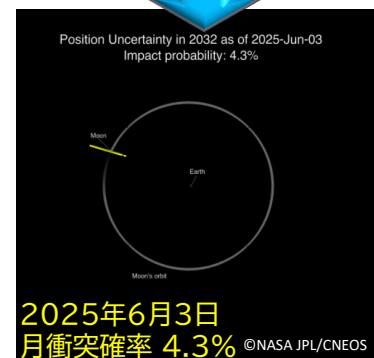
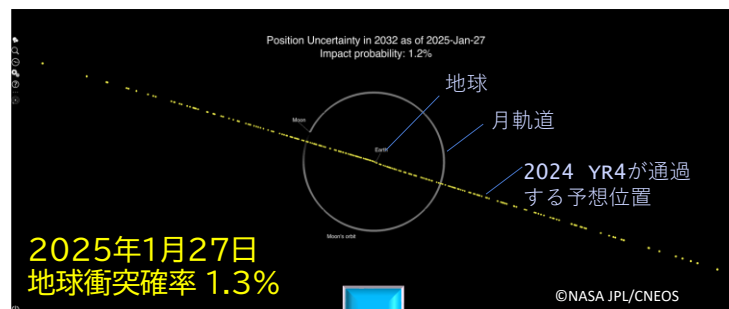


図1 2024 YR4の軌道予測

■ 国内における連携等

- IAWNおよびSMPAGにおける議論を受けて、国立天文台ハワイ観測所との連携により、2024 YR4の観測の実現議論に参加。国立天文台は、すばる望遠鏡による2024 YR4の撮影画像に成功し、2024 YR4の軌道予測へ大きく貢献。
- JAXAは独自の探査機軌道計算ソフトウェアに新しい機能を追加し、2024 YR4の地球衝突確率を独立に計算しを実施。JPLやESAの結果と矛盾のない値を算出し結果を確認。

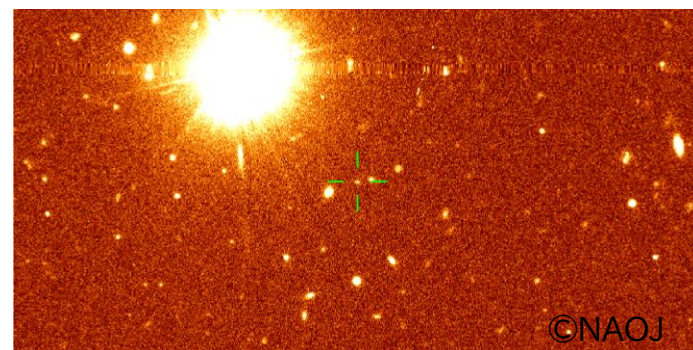


図2 すばる望遠鏡による2024 YR4の撮影画像

すばる望遠鏡が撮影した画像から、小惑星 2024 YR₄(緑十字でマーク)を中心に南北1分角、東西2分角の領域を切り出したもの。rバンド(波長 550-700 ナノメートル)で 120 秒間の露出で撮影。観測は 2025年2月20日20時40分から21時00分(ハワイ現地時)に、快晴(0.5 秒角のシーイング)の天候の下で行われた。

2. プラネタリーディフェンスを巡る国際動向について

- Apophisは2029年4月13日(金) 21:46UTCに、地心から0.00025auまで接近(地表から約32,000km)。直径が約340mもの天体が静止軌道よりも近い距離を通過するのは観測史上初であり、このような貴重な機会は1000年に一度、ないし今後7,500年間は訪れないという見解もある。
- 各宇宙機関や国内外の民間企業・大学においてApophis探査をめぐるミッションの検討が活発化してきている
- 地球に衝突すると大災害となる300m級サイズであり、現在の技術で回避できる最大サイズであるということこからもApophisは注目されている

宇宙機関におけるミッション例

機関名/ミッション名	技術活動種別	活動状況	主要機器/技術	活動内容
NASA/OSIRIS-APEX	接近観測/探査	継続中	低重力空間での長期探査技術	アポフィスへの接近観測を約18か月実施予定。OSIRIS-Rexで使用された撮像装置、分光計、レーザー高度計などの機器を使用して潮汐力の影響を分析。また、小惑星の表面にスラスターを噴射することで表面の岩石や塵をかき混ぜ、より詳細な化学組成を調査する予定。
ESA/RAMSES	接近観測/探査	計画中	高解像度解析	アポフィスへの接近観測を実施予定。地球の接近前後の地球の潮汐力の影響を分析することにより、小惑星の組成や構造などの物理的特性把握を調査する。高解像度カメラをはじめ、機器はHeraに搭載されたものを最大限活用することで実装効率を向上させ、探査機の開発や深宇宙での運用における高速開発と低コストミッションの実現を進展を目指す。
NASA・CNES/DROID	接近観測/探査	計画中	分散型レーダー内部分布観測(DROID)	NASA JPLとCNESが連携し、アポフィスの内部構造を調査する探査ミッション。CNESはキューブサット、広角カメラなどを提供。地球最接近前にアポフィスとランデブーし、観測。DROIDの測定により、内部の構造と特性、天体の形状、形態、回転が判明し、解決可能な変化があれば観測。OSIRIS-APEXによって収集されたデータを補完および強化する役割を果たす。

大学・民間におけるミッション例

ミッション名/機関名	技術活動種別	活動状況	主要機器/技術	活動内容
ApophisExL/ALE, 東京大学	ランデブー観測/衝突	計画中	ALEが「低エネルギーマルチインパクト実験」装置提供	小型人工物体をアポフィス表面に衝突させ、その際のクレーター形成やレゴリスの挙動を観測。
Project Apophis/ロフトワーク・FabCafe・千葉工大	接近観測	計画中	検討中	アポフィスの詳細な観測を行うための探査衛星を打ち上げるとともに、宇宙・非宇宙産業の共創を促進し、広範な分野でのコラボレーションを推進する。観測情報の発信やイベントの開催を通じて、研究成果を広く共有する。
APOPHIS INTERCEPTOR	フライバイ観測	計画中	アポフィスの画像情報 アポフィスに向かう軌道の環境観測	2つの16U小型衛星を高度楕円軌道に配置し、アポフィスの近接観測を実施。ドイツのヴュルツブルク大学などによるNEAlightプロジェクト内でコンセプト提案。
Blue Origin	多段階観測	提案	検討中	Blue OriginのBlue Ring宇宙機を用いて、アポフィスの地球最接近前、最接近中、最接近後の詳細な調査を可能にすることを提案。

2. プラネタリーディフェンスを巡る国際動向について

■ 小惑星Apophis探査をめぐる科学的成果への期待

Apophis T-4 Years

- ✓ 2025年4月9日-10日に東京大学にプラネタリーディフェンスの国際的メンバーが集結しワークショップを実施
- ✓ 議論結果のサマリーに、**DESTINY+、RAMSES、OSIRIS-APEXがApophis探査において必要不可欠であることが**言及されており、国際的にも重要な探査機と位置付けられている。

SUMMARY COMMUNIQUE 【抜粋】

4. With a collective international voice, we endorse as essential Apophis science investigations the stated mission objectives and complementarity of the flyby by DESTINY+ and the successive rendezvous missions RAMSES and OSIRIS-APEX. These are the highest priority missions for Apophis and should be fully funded and supported to ensure successful achievement of their science objectives. We strongly encourage additional partners supporting these cornerstone investigations.

(和訳)国際的な共同の声をもって、我々はDESTINY+によるフライバイ、そしてそれに続くランデブーミッションであるRAMSESとOSIRIS-APEXの、表明されたミッション目的と相補性を、アポフィス科学調査に不可欠なものとして支持します。これらはアポフィスにとって最優先のミッションであり、その科学的目標の成功を確実にするために、十分な資金提供と支援がなされるべきです。我々は、これらの礎となる調査を支援する追加のパートナーを強く奨励します。

Apophis T-4 Workshop Science Organizing Committee

Richard Binzel, Co-Chair
Massachusetts Institute
of Technology

Patrick Michel, Co-Chair
Centre National de la
Recherche Scientifique

Seiji Sugita, Co-Chair
University of Tokyo

Brent Barbee
NASA Goddard Space Flight Center

Naomi Murdoch
Institut Supérieur de l'Aéronautique
et de l'Espace-SUPAERO

Julia de Leon
Instituto de Astrofísica de Canarias

Mike Nolan
University of Arizona

Michael Küppers
European Space Astronomy Centre

Cristina Thomas
Northern Arizona University

Monica Lazzarin
University of Padova



3. RAMSESミッション概要

- 欧州宇宙機関(ESA)主導の2029年4月のアポフィスの地球接近遭遇における特性評価のためのHeraに続く新しいプラネタリーディフェンス(地球防衛)ミッション(候補)
- 2029年4月13日に地球から約32,000km地点(静止軌道より内側)を通過する予測がされている小惑星 Apophisにランデブーし、地球最接近前後におけるApophisの高解像度観測を実施し、地球の重力によるその物理的特性の変化を研究。将来のプラネタリーディフェンス活動に必要な知見と能力を向上させることに貢献。



RAMSESの上位のミッション目標(コアミッション目標)

1. アポフィス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10 cm) /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)でのアポフィスの監視

地球重力の影響により発生し得ること

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得るのか？を知ることができる

- ・小惑星軌道・自転の変化 → 小惑星の長期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3 RAMSES計画概念図

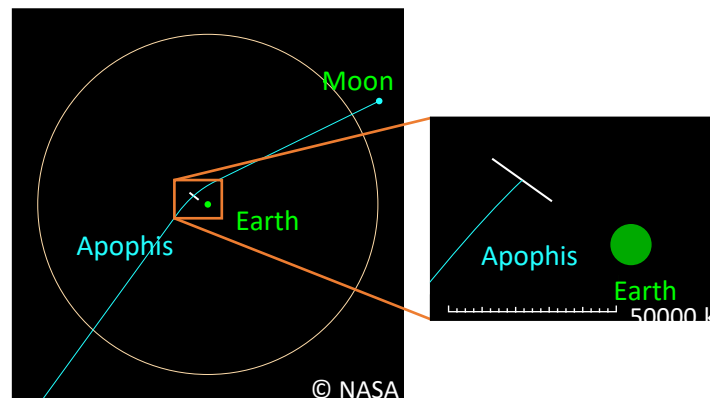


図4 Apophis予測軌道

3. RAMSESミッション概要

- 二重小惑星探査計画Heraの設計を積極的に活用し、基本設計審査から打ち上げまで3年半という超短期開発
- 2025年1月 システムPDR(基本設計審査会)終了
- 今年11月のESA閣僚級会合にて承認されればミッションとして全予算が確定し、本格的な開発が開始される

打上げ時期	2028年度	
質量	約1.3t	
寸法	約1.9m×約1.8m×約2.1m(探査機構体部)	
観測計画	Apophis到着	2029年2月
	地球最接近前	2029年3月1日～4月11日 Apophis距離 20～1 km
	地球最接近中	2029年4月12日～14日 Apophis距離 5 km
	地球最接近後	2029年4月15日～
	ミッション終了	2029年8月
	拡張運用	自律制御実験、制御降下、商用深宇宙 テストベンチ、等

【搭載観測機器】

カメラ（可視光：ESA、赤外：JAXA、等）、レーザー高度計、レーダー（小惑星の内部構造）、重力計、電波科学（質量・重力場の推定、高精度軌道決定）

小型分離探査機、着陸機、等

【搭載CubeSat】

Tyvak International（イタリア）

Heraミッション「Milani」「Juventas」の技術活用/表面から発生するダスト（塵）の分析/低周波レーダーによる内部構造探査

Emxys（スペイン）

形状・地質調査（表面構造や物性/自律的にアポフィスへ接近後、着陸を試みる

/着陸成功すればアポフィスの地震活動（微弱地震）の測定

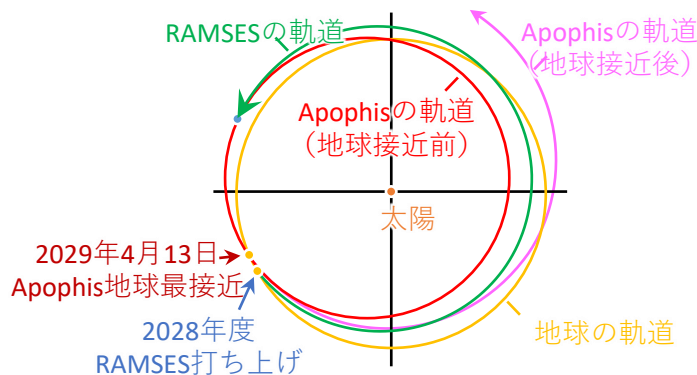
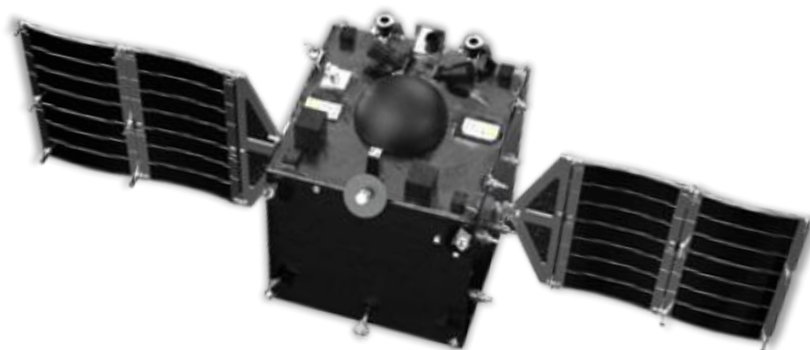


図5 RAMSES 想定軌道



©ESA

図6 RAMSES 探査機概略図

4. RAMSES参画の政策的・国際的位置づけ

- ESA Strategy2040「Protect our Planet and Climate」でもプラネタリーディフェンスが重要と位置付けられている
- 「宇宙基本計画工程表」「宇宙基本計画工程表改訂に向けた重点項事項」でプラネタリーディフェンス(地球防衛)活動の明記
- JAXA-ESA将来大型協力に関する共同声明を受け、ESAのRAMSESへの参画検討を加速

『宇宙基本計画工程表(令和6年12月24日 宇宙開発戦略本部決定)』

【太陽系科学】

- ▶ 地球接近天体(NEO: Near Earth Object)からの脅威に備えるための国際的なプラネタリーディフェンス活動への貢献も見据え、**国連国際惑星防護年である2029年に地球に最接近する小惑星アポフィス(Apophis)に対し、我が国として希少な観測機会を確保し成果を創出するため、国際協力による探査計画に向けた検討、調整を進める。**

【国際宇宙協力の強化】

- ▶ 地球接近天体(NEO)からの脅威に備えるための国際的なプラネタリーディフェンスの活動として、COPUOSの下に設置された国際小惑星警報ネットワーク(IAWN:: International Asteroid Warning Network)や宇宙ミッション計画アドバイザリーグループ(SMPAG:: Space Mission Planning Advisory Group)に参加し、地球接近天体の発見や追跡観測、軌道推定により、地球に衝突する可能性がある天体の把握及び天体の地球衝突回避・被害の最小化などの検討を国際協力により推進する。

『宇宙基本計画工程表改訂に向けた重点事項(令和7年5月30日 宇宙開発戦略本部決定)』

【③宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造】

- ▶ **また、2029年に小惑星アポフィスが地球に最接近することを踏まえ、国際的なプラネタリーディフェンスの活動として、国際協力の枠組みへの参画を検討する。**

『JAXA-ESA 将来大型協力に関する共同声明』(2024年11月20日)(和訳抜粋)

(将来大型協力)

両機関長は、JAXA-ESAの機関間協力の継続及び拡大の重要性を認識し、さらにより社会の実現に貢献するであろう将来大型協力ミッションを模索する必要性について共通の認識を共有した。両機関は、1年間にわたり大型協力ミッションの可能性について議論及び検討を行ってきた。

今回の会合において、両機関長は、次の通り、これらの大型協力ミッションを築き上げるための両機関間の今後の道筋を確認した。

I. 両機関は、2029年が国連の「小惑星認識と惑星防衛の国際年」に指定されていることを考慮し、地球近傍天体による潜在的な脅威への備えに貢献する**地球防衛**のための活動を国際的に推進する意義を認識した。JAXAが協力している、地球防衛と科学目的の二重小惑星探査ミッションであるESAのHeraは、2024年10月に打ち上げられ、2026年に目標の小惑星に到達する計画である。**両機関は、2029年4月13日に地球に最接近する小惑星アポフィスを探査することを目的としたESAのRapid Apophis Mission for Space Safety (RAMSES)のための協力可能性の検討を加速することに合意した。**これには、**熱赤外カメラと太陽電池パドルの提供及び可能な打上げ機会等**が含まれる。(以降、II~IV省略)



JAXA 理事長 山川 宏
ESA 長官 ジョゼフ・アッシュバッカー

5. RAMSES協力に向けた検討結果について

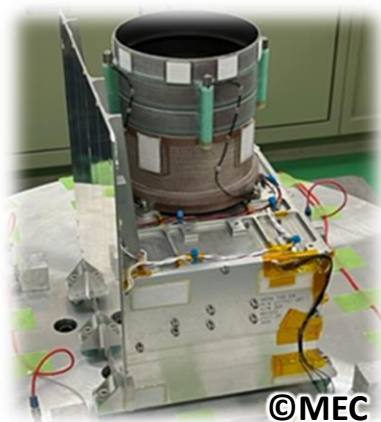
- JAXA-ESA 将来大型協力に関する共同声明で掲げられている、TIRI、SAP及び可能な打上げ機会の提供について、技術的観点含め検討実施。
- 各技術の日本の強み・提供した場合の産官学への波及効果は表1に示す。3アイテム提供によるRAMSESへの参画は、**国内の産官学全てに大きな波及効果を持つ。**
- プラネタリーディフェンス活動において**ESA-JAXAの初の本格的な連携**となる。この連携により、日本のプラネタリーディフェンスにおける国際的な存在感が増し、更なる国際協力参画の加速への足掛かりとなることが期待される。

表1 提供アイテムに対する日本の強みと波及効果

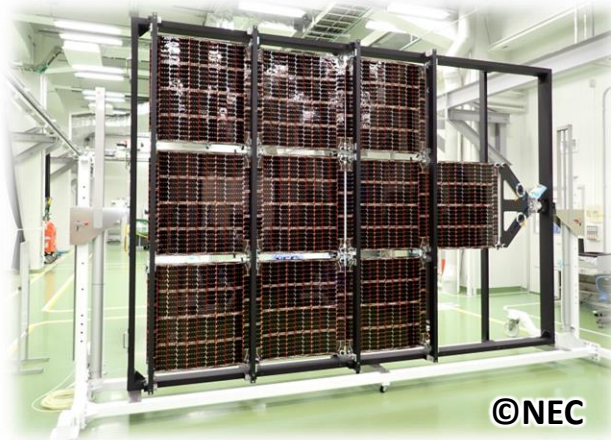
アイテム	日本の強み	提供による波及効果
TIRI	✓ はやぶさ2搭載から始まり、ESAのHeraミッションに搭載され、JAXAが世界に先駆けて実施した実績あり(世界最先端)	✓ 科学成果の新たな創出、プラネタリーディフェンス活動の知見の蓄積【学】 ✓ 「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ(TIR)及びHera搭載(TIRI)に続いてJAXAが世界に先駆けて実施した実績による国際標準(スタンダード)の獲得【官】
SAP	✓ 世界最高レベルの出力密度(W/kg)を誇る ✓ DESTINY+で開発したSAP設計を活用し、開発期間の短縮と信頼性確保を両立 ✓ Heraで搭載していたものより高効率で薄く且つ柔軟性のある太陽電池セルを利用した太陽電池パドルで、大幅な軽量化により2つの観測機器の追加搭載につながり、科学成果拡大に貢献	✓ ミッションの根幹に関わるバス機器提供による、機関間の信頼関係を大幅に強化【官】 ✓ 宇宙実証実績の獲得【官】 ✓ 産業振興(国内企業の国際競争力の向上、海外からの信頼獲得)【産】
可能な打上げ機会	✓ 自国で輸送技術を保有 ✓ 相乗り打上げ対応の実績多数あり	H3ロケットでJAXA衛星(DESTINY+)の相乗りを想定した場合: ✓ JAXA衛星によるApoheis探査できる機会の創出【官】 H3ロケット活用を想定した場合: ✓ 日本のロケットの国際的認知度の向上【官】 ✓ 産業振興(国内企業の国際競争力向上、海外からの信頼獲得)【産】

5. RAMSES協力に向けた検討結果について

- TIRI、SAPは技術的に成立する見通しを確認し、RAMSESのシステムCDR(詳細設計審査)への対応に向けて更に詳細な検討を進める予定。
- 可能な打上げ機会に関してはH3ロケットを想定し検討を実施。打上げ機会を最大限活用する観点から、DESTINY+との相乗りを前提とした。一部詳細検討は残るものの、技術的に成立できる見込みが高いことを確認。相乗り成立に向けた詳細検討を更に進める予定。



熱赤外カメラ
(Thermal Infrared Imager, TIRI)



薄膜軽量太陽電池パドル
(Lightweight Solar Array Paddle, SAP)



打上げ機会
(H3ロケット)

6. RAMSES計画への参画について

- Apophisの地球最接近(2029年4月13日)に伴い、プラネタリーディフェンス活動としてのミッションへの参画(貢献)に対して国内外の関心が高まっている。
- 7500年に一度の極めて貴重な機会を最大限に活用するため、多くの宇宙機関・民間企業主体のミッションが急速に立ち上がりつつあり、米国を中心に小天体活動を推進する民間企業の動きが加速。今後の世間的な関心と相まって、民間主導の小天体活動が更に加速することも予想される。
- Apophis探査計画に対する宇宙機関としての計画に注目が集まりつつある中、日本が強みを持つ3アイテム提供(TIRI、SAP、H3ロケット)によるRAMSES計画への参画は、観測機器・バス機器・打上げ手段の重要な3要素に渡るESA-JAXA初の本格的な連携となり、国際的なプラネタリーディフェンス活動において日本の存在感が増すとともに、各技術の活用により産官学への大きな波及効果も期待される。また、日本から打上がることにより、国民のプラネタリーディフェンスに対する機運が高まることも期待される。
- 宇宙基本計画工程表の方針として示されている「2029年に小惑星アポフィスが地球に最接近することを踏まえ、国際的なプラネタリーディフェンスの活動として、国際協力の枠組みへの参画」の実現に向け、ESAから示されている3アイテム(TIRI、SAP、H3ロケット)の提供により参画することとし、CDRに向けた更なる詳細な検討と11月のESA閣僚級会合に向けてJAXAの貢献度合いを踏まえたESAとの連携(JAXAの位置づけ等)について調整を進めていきたい。