

アポフィス観測の国際状況

2024年7月29日

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

1. プラネタリーディフェンス概要
2. プラネタリーディフェンスにおける国際動向
3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス関連の取組み
4. 国際的なJAXAの対応状況
5. 小惑星(99942) Apophis概要
6. Apophisを取り巻く国際的な動きについて
7. Apophis観測で期待される成果
8. まとめ

1. プラネタリーディフェンス概要

小惑星や彗星のような天体が地球に衝突すると大きな自然災害となる

実例

■2013年2月15日
チェリャビンスク隕石



(Web記事より)

- ・約17mの天体衝突によると推定
- ・南北180km、東西80kmにわたって建物に被害
- ・約1500人が負傷

■1908年6月30日
ツングースカ大爆発



(Web記事より)

- ・50～60mの天体衝突によると推定
- ・約2000平方kmにわたって、樹木がなぎ倒された

■6550万年前
恐竜を含む生物の大絶滅



(©JAXA)

- ・約10kmの天体衝突によると推定
- ・恐竜を組む多くの生物種が絶滅
- ・地質年代が中生代から新生代に転換

地域的被害

地球規模の被害

このような災害を事前に防ぎたい
プラネタリー・ディフェンス
(スペースガード)

※活動は1990年代初めから始まる



そのためには:

- ・地球接近天体の発見・追跡 = [観測]
- ・地球接近天体の素性解明 = [探査]
- ・天体の地球衝突回避・被害の最小化 = [技術、国際協力、法的整備、人々の理解]

1. プラネタリーディフェンス概要

プラネタリーディフェンス(PD)で行うこと

- 地球に衝突しうる天体の把握 = STEP1
- 天体の地球衝突回避・被害の最小化 = STEP2

STEP1

地球接近天体(NEO)の発見

発見したあと、何度も追跡観測を行い、
軌道を正確に推定

※35,000余りのNEOが発見



地球への衝突が予測できる

※8件の地球衝突が予測

NEOの物理的特性把握

地球衝突回避の検討のための情報

※10個のNEOの探査

STEP2

地球衝突回避被害の最小化

小惑星の軌道を変更する

※DART探査機による小惑星軌道変更実験

被害を最小化する

※国際会合等における議論

国際的ルールの方策/国際協力

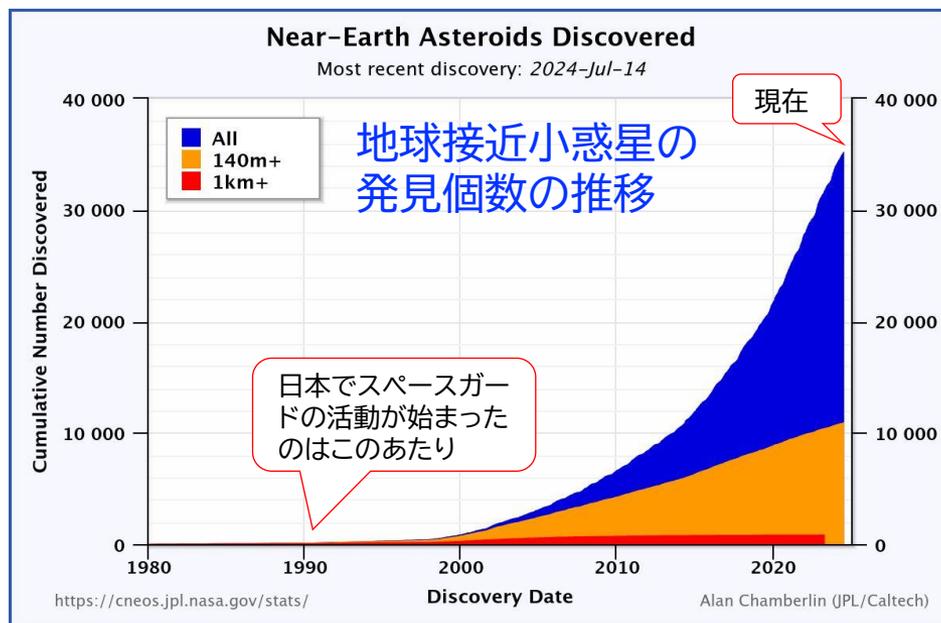
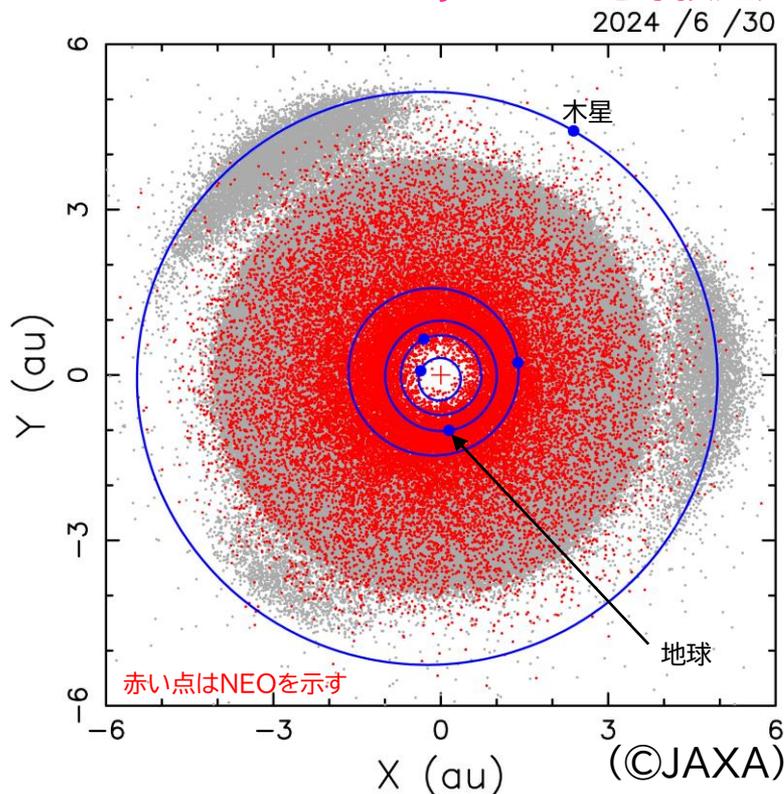
※国連宇宙空間平和利用委員会における議論

1. プラネタリーディフェンス概要

地球接近小惑星(NEO)の発見状況

NEO: Near Earth Object = 地球接近天体(定義: 近日点距離が1.3au未満)

2024年7月現在



(©JPL)

小惑星: 約138万個、うちNEOは約35,000個

データは国際天文学連合 マイナープラネットセンターより
<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>

NEOの発見数の割合(理論値に対して)

直径10km	100%
直径300m	約50%
直径50m	約7%

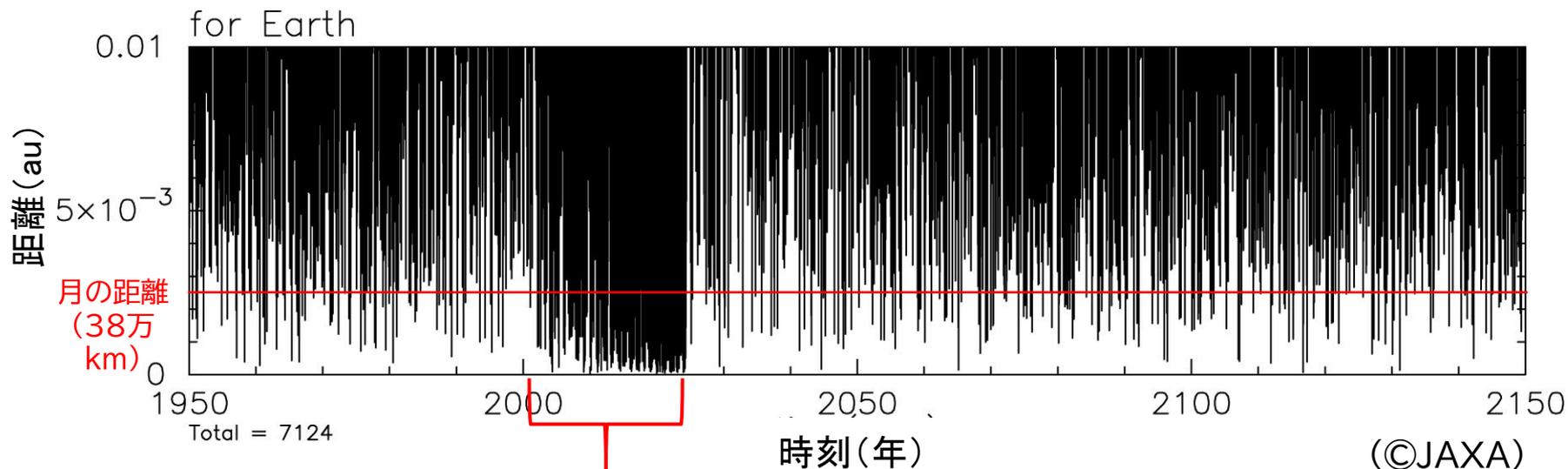
JPLのWebより

<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>

1. プラネタリーディフェンス概要

小惑星の地球接近状況(その1)

- 2024年初めの時点で発見されていた小惑星約134万個(うちNEOは約34,000個)の地球接近状況を確認した。(小惑星の軌道要素はMinor Planet Centerより)
- 1950年から2150年までの200年間に地球に0.01au(約150万km)以下に接近する場合を図に示す。(図の縦線がどこまで接近したかを示す。0は地球中心。)



NEOの観測が積極的に行われるようになったため、地球に接近する小惑星がたくさん発見されている。

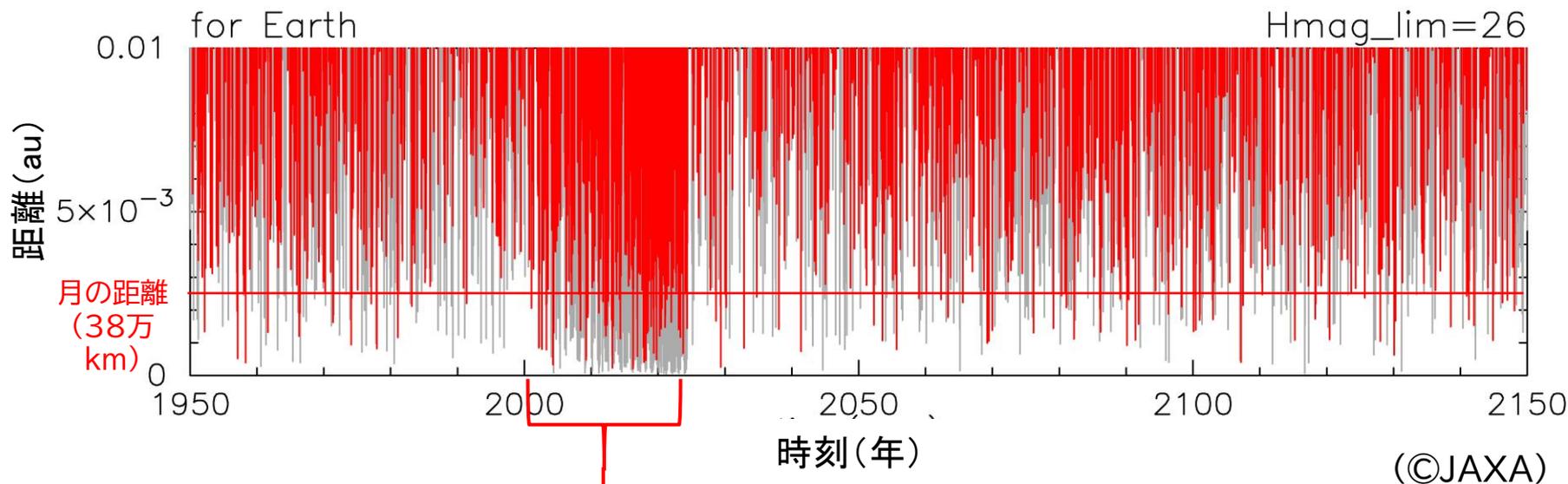
← NEO観測が積極的に開始された直後の2004年にアポフィスが発見

注) ただし、発見された小惑星が頻りに地球に接近するわけではないので、今後の小惑星接近は多くなっていない。
つまり、これは未発見の小惑星がたくさん存在することを意味している。

1. プラネタリーディフェンス概要

小惑星の地球接近状況(その2)

- 計算された地球に接近する小惑星のうち、チェリャビンスク隕石レベル以上の被害が生じると思われるケースを赤色で示す。
- 小惑星の大きさは正確に分からない場合が多いので、ここでは小惑星の絶対等級が26.0等かそれより明るいものを赤色で示した。(小惑星のアルベドを0.25とすると、絶対等級26.0等は大きさ17mの小惑星に相当する。)



この期間に大きさが17m以上の小惑星で月の距離よりも近いところまで接近しているものが多数存在する。

⇒ 今後も、このような小惑星の接近があるはず。

【参考】地球衝突が予測され実際に衝突した天体

	小惑星 (仮符号)	衝突日	大きさ(推定)	発見から衝突 までの時間	衝突場所	発見者
1例目	2008 TC3	2008年10月7 日	2、3m	約20時間	スーダン北部	Catalina Sky Survey
2例目	2014 AA	2014年1月2日	2、3m	約21時間	大西洋？	Catalina Sky Survey
3例目	2018 LA	2018年6月2日	数m	約8時間	アフリカ南部	Catalina Sky Survey
4例目	2019 MO	2019年6月22 日	約3m	約12時間	プエルトリコ付近	ハワイ、マウナロア、 ATLAS望遠鏡
5例目	2022 EB5	2022年3月11 日	約2m	約2時間	大西洋、ヤンマイエン 島南西部	ハンガリー、ピスケーシュ タトゥ観測所
6例目	2022 WJ1	2022年11月19 日	0.5 - 1m	約3時間半	カナダ、オンタリオ州 Brantford	米国、アリゾナ、 Mt. Lemmon Survey
7例目	2023 CX1	2023年2月13 日	1m	約6時間半	フランス、ノルマン ディー	ハンガリー、コンコリー天 文台
8例目	2024 BX1	2024年1月21 日	1m	約3時間	ドイツ、ベルリン西部	ハンガリー、ケーシュテ テー観測所

注)発見から地球衝突までの時間が短いですが、これは発見された天体の大きさが数mと小さいためである。より大きな天体の婆には、より早期に発見され早期の衝突予測が可能である。

【参考】NEOの探査近状況(小惑星)

これまで、7つの地球接近小惑星に探査機が接近し探査した。
うち2つは、日本によるイトカワとリュウグウの探査である。

○ NEO



大きさは直径(端から端まで)で、単位はkm。値は理科年表(2019年版)ないし各プロジェクトによる。トータティスの値はJPLのWebより。

(黄色は探査した探査機名。画像は各ミッションより)

【参考】NEOの探査近状況（彗星）

これまで、3つの地球接近彗星に探査機が接近し探査した。

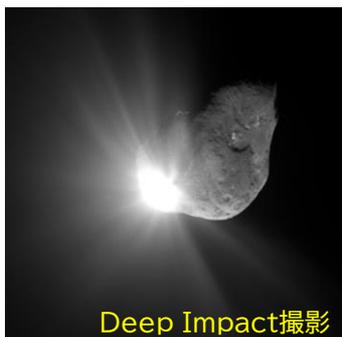
○ NEO

Halley彗星



14.4×7.4×7.4 km

Tempel 1彗星



7.6×4.9 km

Borrelly彗星



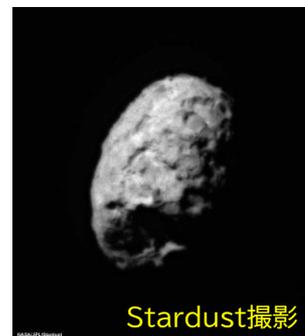
4.0×1.58 km

Hartley 2彗星



0.69×2.33 km

Wild 2 彗星



5.4×3.8×3.0 km

Churyumov-Gerasimenko彗星



4.1×3.3×1.8および
2.6×2.3×1.8 km が合体

大きさの値は理科年表(2021年版)による。(黄色は探査した探査機名。画像は各ミッションより)

2. プラネタリーディフェンスにおける国際動向

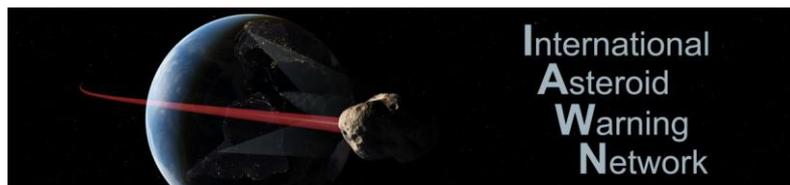
- 天体の地球衝突問題を扱うスペースガードの活動は 1990 年代から本格化し、2000 年前後からは国連でも本格的な議論が始まりPDとして国際的な活動に発展してきた。
- 国際的な活動としては、国連宇宙空間平和利用委員会の決定に基づきUNOOSA(国連宇宙部)が事務局を務める **IAWN** (International Asteroid Warning Network:)と**SMPAG** (Space Mission Planning Advisory Group:) が 2014 年に設置され活動を行っている。
- 天体衝突は、発生頻度は低いが将来も繰り返される重大なリスクである。ただし、ウイルスによるパンデミックとは違い、事前に予報が可能であり、理論的には衝突回避も可能である。
- **PDは、いかに早く、危険天体を検出し、衝突回避の対応を取れるかが最も重要であり、各国宇宙機関に課せられた責務は大きい。既に NASA、ESA は連携して行動しており、JAXA の早期の参入が望まれている。**

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
- 天文台など天体を観測できる機関が中心
- <https://iawn.net>

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
- 各国の宇宙機関がメンバー
- <http://www.cosmos.esa.int/web/smpag>



(各Webより)

2. プラネタリーディフェンスにおける国際動向

2.2 米国(NASA)の活動状況

- 最も積極的に地球衝突問題に取り組んでいる(NEOの観測は米国が主体)
- Planetary Defense Coordination Office (PDCO)
- PHO(Potentially Hazardous Object)の早期発見、追跡・物理観測、情報発信、衝突回避の検討、FEMA(Federal Emergency Management Agency)に情報提供

2023年4月、米国は「地球近傍天体災害と惑星防衛に関する国家準備戦略と行動計画」(国家惑星防衛戦略)を発表。NASAのPD戦略は、米国国家惑星防衛戦略に対応するものであり、NASA内の機関レベルの活動に焦点を当て、地球近傍天体(NEO)の個体数調査、リスク評価、地球へのNEOの影響防止または軽減アプローチの開発に関する取組みを記載している。



目標1: NASAのNEO検出、追跡、特性評価能力の強化

目標2: NEOのモデリング、予測、情報統合に関するNASAの協調の改善

目標3: NEOの調査、衝突、破壊ミッションのための技術開発

目標4: NEOの準備に関する国際協力へのNASAの貢献の拡大

目標5: FEMAや他の機関と調整し、NEOの影響の緊急手順や行動プロトコル強化と日常的な訓練

目標6: 惑星防衛に関する継続的な省庁間調整へのNASAの貢献の向上

目標7: NASAの惑星防衛活動の組織改善

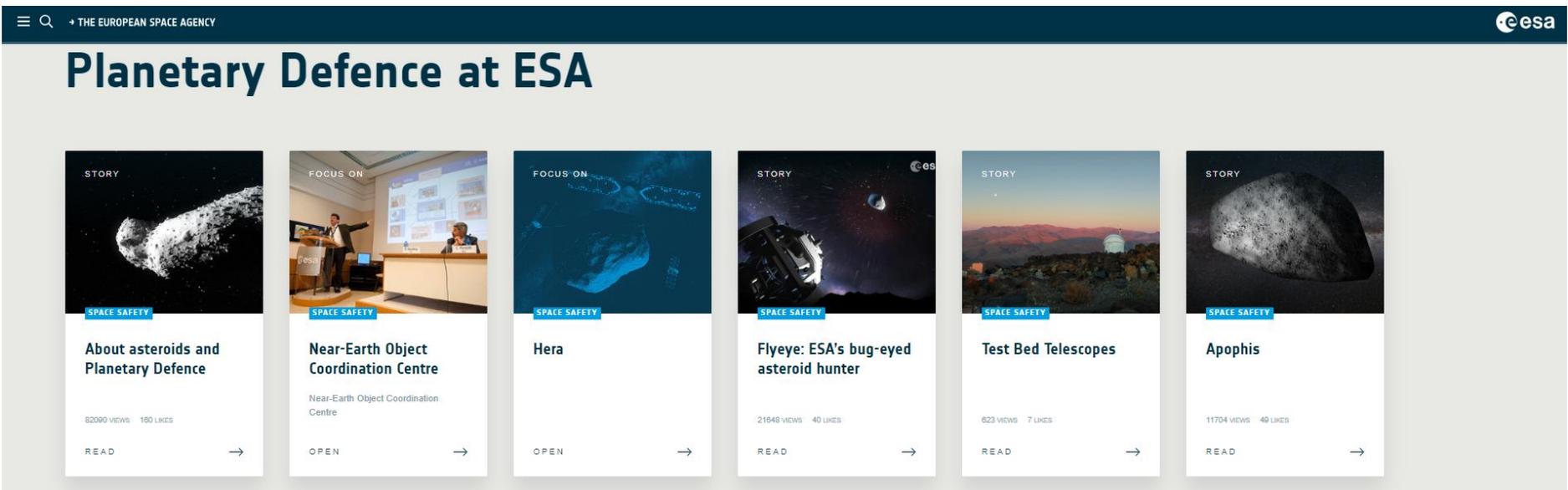
目標8: 惑星防衛に関する戦略的コミュニケーションの強化

(©NASA)

2. プラネタリーディフェンスにおける国際動向

2.3 欧州(ESA)の活動状況

- イタリアにあるESRINにNear-Earth Object Coordination Centerを2013年に設置し、欧州のNEO情報網の中央拠点とした
- 2018年にPlanetary Defence Officeを設置し、主に観測、データ提供、リスク軽減を実施。
- 宇宙ベースの火球カメラやNASAのDART計画と連携したHeraミッションを開発中
- さらに2029年のApophis接近を念頭にRAMSESミッションを計画(詳細後述)
- NEO情報提供システムの構築・運用、欧州の専門家やアマチュアの観測をモニタリング、MPC (Minor Planet Center)・EARN(European Asteroid Research Node)・NEODys (Near Earth Object Dynamic Site) などと連携



ESAの取り組み(ESA HPより抜粋)

3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(1/6)

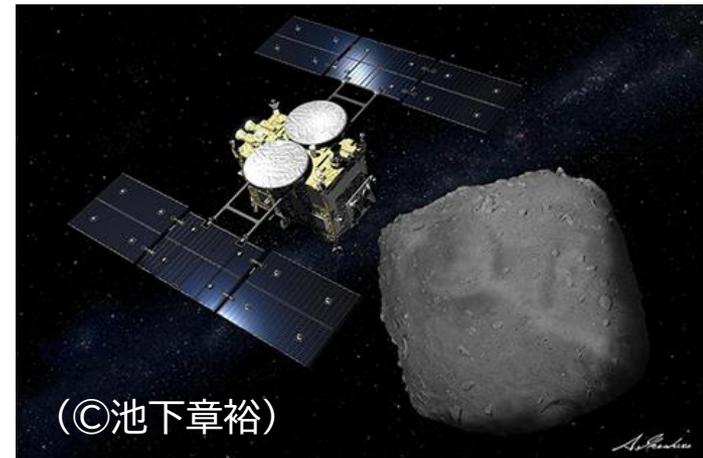
3.1 はやぶさ2拡張ミッションにおけるプラネタリーディフェンスの活動(ISAS)

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。地球帰還完了後、宇宙に残存する探査機本体により、深宇宙長期航行技術に資する技術的・科学的知見の獲得を目指す。また、最終的に新たな太陽系天体への到達を目指す。目標天体到達までの所要飛行期間は11年に及ぶ見込み。

マルチスイングバイ・長期航行技術を磨きつつ、S型小惑星2001 CC21にフライバイし、C型と思われる小惑星1998 KY26にランデブーを目指す。

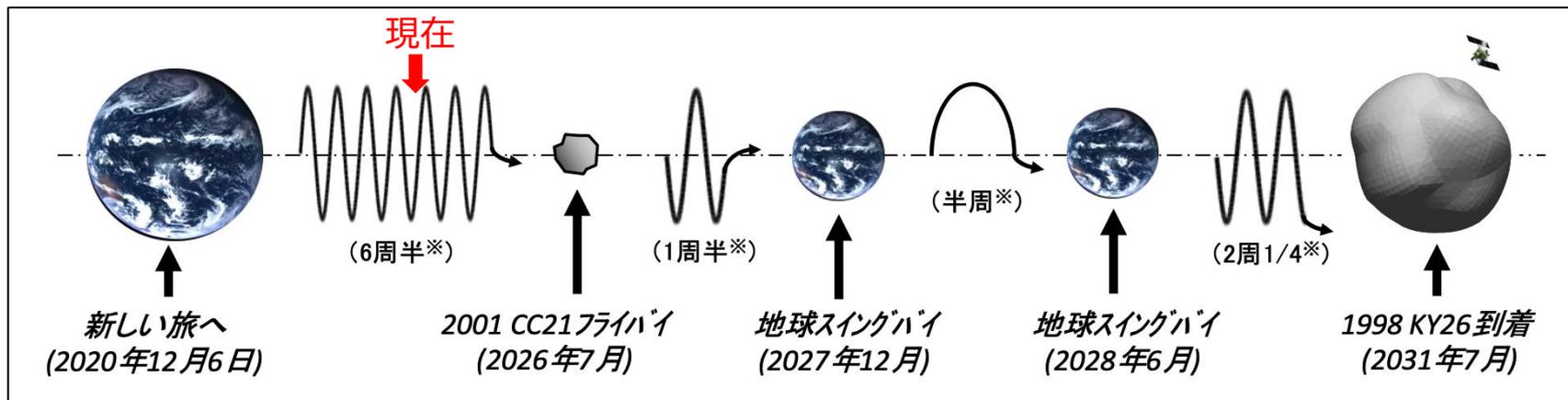
ミッション意義:

- (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



(©池下章裕)
はやぶさ2ミッションは小惑星リュウグウを探査した。

はやぶさ2拡張ミッションのシナリオ



3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(2/6)

3.1 はやぶさ2拡張ミッションにおけるプラネタリーディフェンスの活動(ISAS)



以下の2項目においてプラネタリーディフェンスに貢献する。

注) はやぶさ2拡張ミッションの愛称は「はやぶさ2#」であるが、#(SHARP)はSmall Hazardous Asteroid Reconnaissance Probe(小さくて危険な小惑星を調べる探査機の意味)のアクロニムである。

(1) 小惑星高速フライバイのナビゲーション

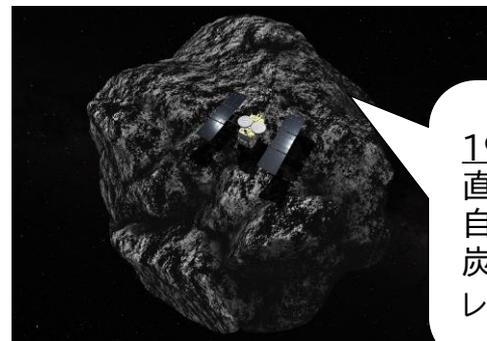
2026年7月に、大きさが500m程度の小惑星2001 CC21のフライバイ探査を行う。このときに、小惑星に可能な限り接近して相対速度5km/sで通過するが、高精度のナビゲーションが必要となる。高精度のナビゲーションを行うことができれば、小さな小惑星に探査機を高速で衝突させることができる技術を獲得したことになり、小惑星の地球衝突を回避するプラネタリーディフェンスに貢献できる。



2001 CC21
直径:約500m
自転周期:約5時間
L型 → S型?
形状不明

(2) 微小小惑星の探査

2031年7月に、小惑星1998 KY26にランデブーをしこの小惑星を詳細に探査する。この小惑星は、大きさが30m程度であり、このようなサイズの天体が地球に衝突する確率が100年~200年に1度と推定されている。現実的に近い将来に衝突がありうるタイプの小惑星を調べることは、衝突による被害対策のために重要な情報を提供することになる。



1998 KY26
直径:約30m
自転周期:約10.7分
炭素質の可能性
レーダー観測で形状推定

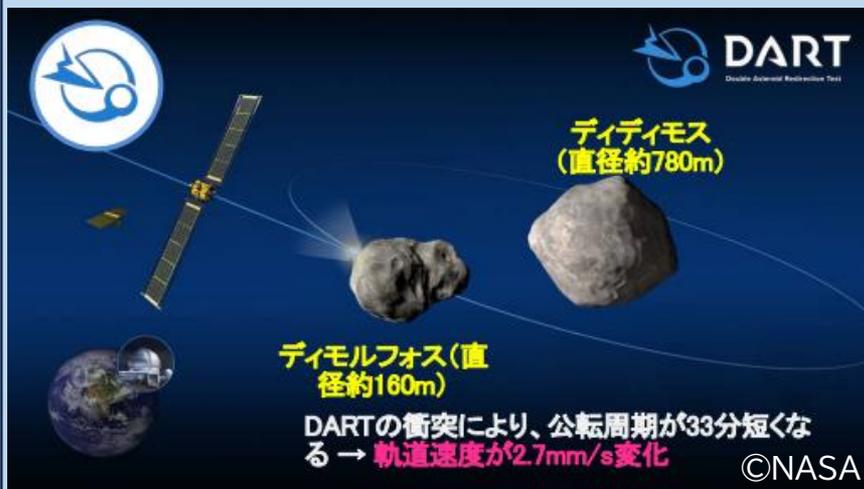
3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(3/6)

3.2 ESAのHeraミッションに参加・赤外線カメラ提供(ISAS)

AIDA※1: DART(NASA) + Hera(ESA) ※1 Asteroid Impact & Deflection Assessment
～米国・欧州が国際共同で行う初のプラネタリーディフェンスのための探査計画～

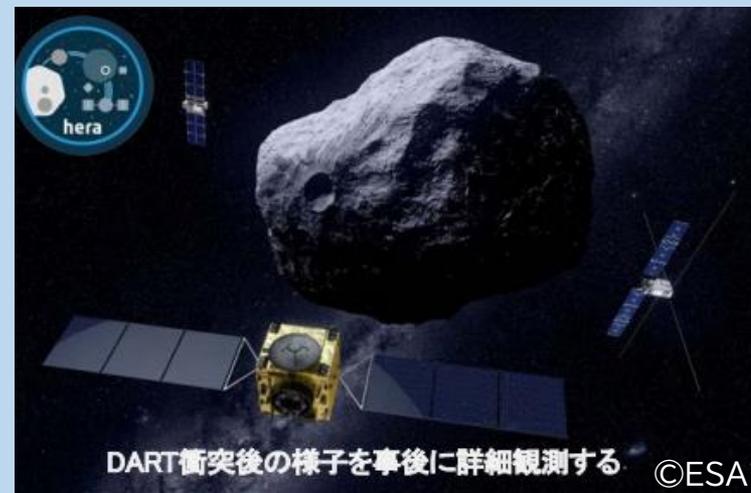
【目的】
探査機を衝突させて小惑星の軌道を変更する実験を行い、軌道の変化や小惑星の状態の詳細観測実施

DART(Double-Asteroid Redirection Test)



- NASAが主導した小惑星衝突実験。重さ500kgのDART探査機を秒速6km/sディモルフォスに衝突軌道変化を調べる。
- 2021年11月24日打ち上げ、2022年9月26日衝突

Hera



- ESAが主導する地球近傍の二重小惑星の探査計画。NASAのDARTの衝突後の状態を現地観測することで、史上初の本格的な宇宙防災「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。
- 2024年10月打ち上げ、2026年12月に現地到着予定

3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(4/6)

3.3 JAXAの観測施設における小惑星の観測 (追跡ネットワーク技術センター/研究開発部門)

➤ 地球に接近する小惑星等の発見・追跡観測を行っている

美星スペースガードセンター(BSGC) (JAXA追跡ネットワーク技術センター)



1m 望遠鏡

0.5m 望遠鏡

- ・2000年に建設。日本宇宙フォーラムの所有であったが、2017年4月にJAXAに移管される。
- ・観測業務は、NPO法人日本スペースガード協会が行っている。
- ・スペースデブリの観測が主。小惑星も観測。



JAXA研開部門の観測施設

入笠山光学観測施設



調布低軌道物体観測装置



豪州遠隔観測施設(Siding Spring天文台内)



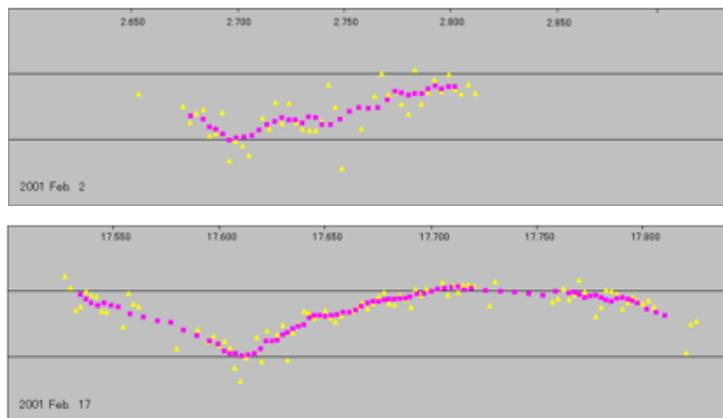
豪州第二遠隔観測施設(Zadko天文台内)



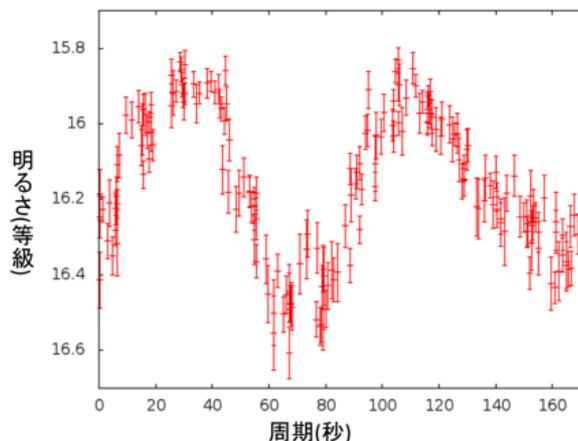
3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(5/6)

3.4 美星スペースガードセンターでのNEO観測(追跡ネットワーク技術センター)

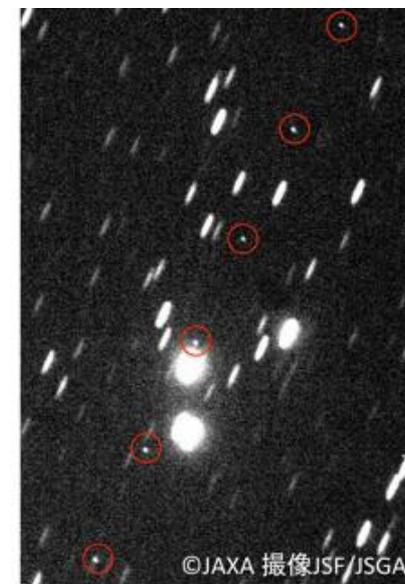
- 1100個以上の小惑星(NEO以外)を発見(仮符号取得)、うち約500個は番号登録
- 1500個以上のNEOの追跡観測(JAXA移管(2017)後は390個、そのうち他に先駆けた追跡観測天体数は52個)
- イトカワ((25413)Itokawa)の光度変化観測により、イトカワが細長い形である事を世界に先駆けて示唆
- 2018EZ₂の高速自転の検出(JAXA研開部門で発見したNEOを即時詳細観測)
- BSGCでの観測データによる査読付き科学論文13編
<https://darts.isas.jaxa.jp/astro/bsgc/publications.html>



イトカワの光度曲線



2018EZ₂自転に伴う光度変化を表す光度曲線



2018EZ₂の発見翌日に
連続撮影した6枚の画像の合成

3. JAXAにおけるプラネタリーディフェンス 関連の取組み(6/6)

3.5 重ね合わせ法によってNEOを発見(研究開発部門)

- 重ね合わせ法による移動天体の観測。短かい露出時間で撮影した画像をシフトしながら重ね合わせることで、移動速度が速い暗い天体を撮影する手法を開発

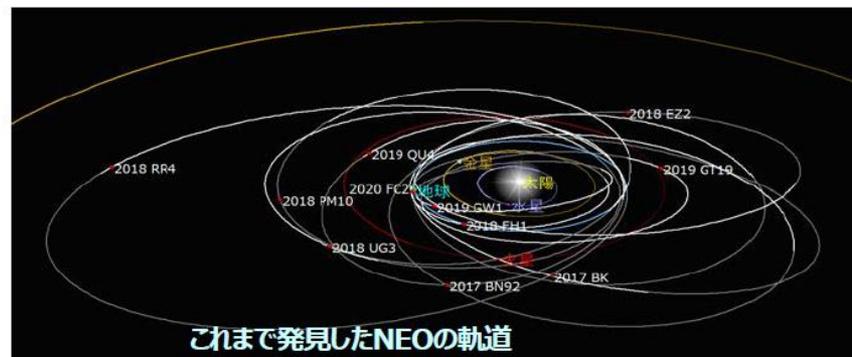
仮符号	発見日時 (UTC)	発見等級	分類群	離心率	軌道長半径 (AU)	軌道傾斜角	発見時距離 (AU)	絶対等級	サイズ (m)
2017 BK	2017.1.17 14:51	17.5	Apollo	0.489	1.909	6.6359	0.051	24.0	67
2017 BN92	2017.1.31 16:04	17.1	Apollo	0.483	1.921	1.0734	0.014	25.6	32
2018 EZ2	2018.3.12 10:06	18.2	Apollo	0.510	1.951	4.9718	0.010	26.6	20
2018 FH1	2018.3.18 12:36	18.7	Aten	0.177	0.938	3.5468	0.013	26.6	20
2018 PM10	2018.8.9 10:36	18.3	Amor	0.427	1.780	9.2065	0.010	27.0	17
2018 RR4	2018.9.11 12:21	18.0	Apollo	0.621	2.637	3.1793	0.015	27.1	16
2018 UG3	2018.10.31 12:51	19.4	Apollo	0.423	1.662	6.1673	0.030	24.5	53
2019 GW1	2019.4.4 11:36	17.5	Aten	0.114	0.934	13.2945	0.009	26.1	25
2019 GT19	2019.4.12 13:06	18.2	Apollo	0.370	1.273	7.7488	0.010	27.5	13
2019 QU4	2019.8.28 10:06	18.1	Apollo	0.332	1.426	10.1313	0.017	24.8	46
2020 FC2	2020.3.17 13:36	18.5	Apollo	0.398	1.644	6.8153	0.006	28.0	11

10m級の
NEO



使用望遠鏡:口径18cm、25cm

(画像クレジット:JAXA)



4. 国際的なJAXAの対応状況

- 国際的な議論に対し広範囲に対応を実施
- 議論の活発化・拡大に伴いプラネタリーディフェンスへの組織としての対応の必要性により本年4月より検討体制強化(プラネタリーディフェンスチーム設置)

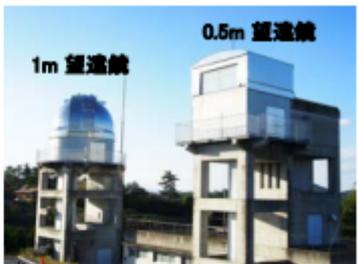
天体の地球衝突は起こる→災害を防ぐ活動=プラネタリーディフェンス

例 ■ 2013年2月15日
ロシア・チェリャビンスク隕石

■ 1908年6月30日
ツングースカ大爆発




JAXA 美星スペースガードセンター



1m 望遠鏡
0.5m 望遠鏡

スペースデブリと地球接近小惑の観測

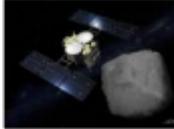
JAXAは2023年4月からメンバー

JAXAは発足時の2014年からメンバー

JAXA 小惑星探査ミッション



「はやぶさ」が小惑星イトカワを探査

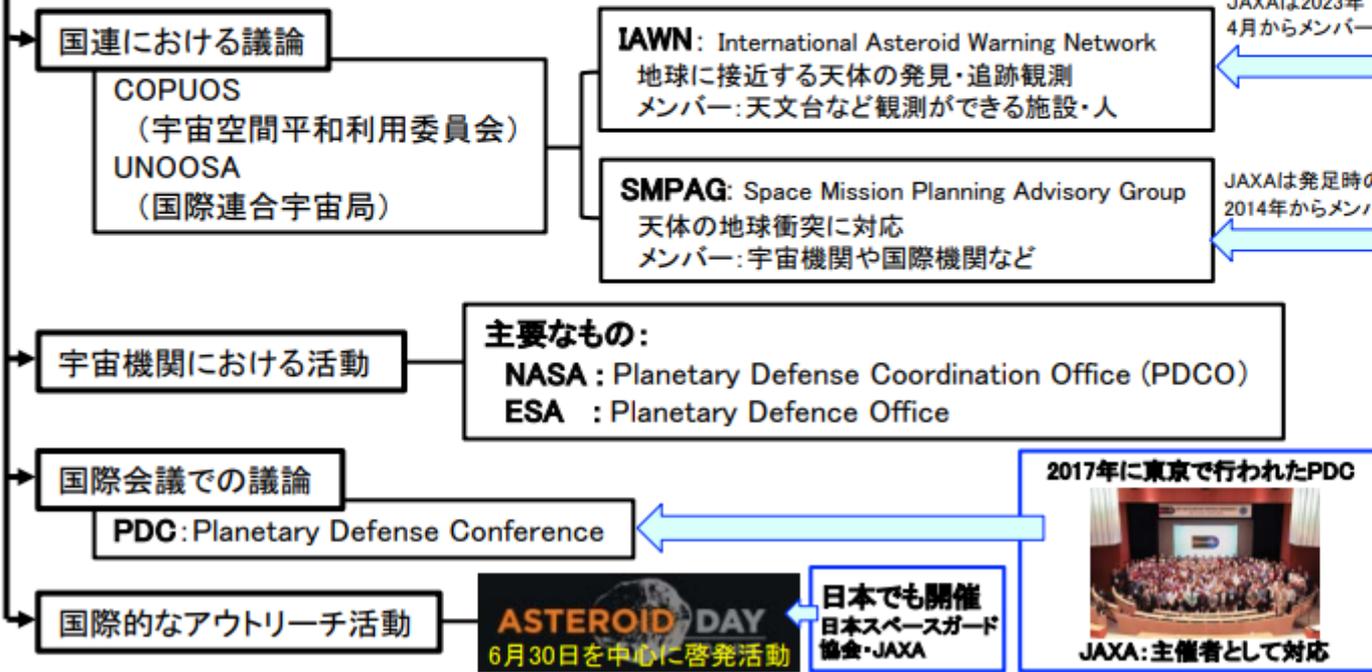


「はやぶさ2」が小惑星リュウグウを探査
延長ミッションで小惑星2001 CC21と1998 KY26を探査予定

ESA Heraミッションに参加

DESTINY+計画

すべて地球接近小惑星



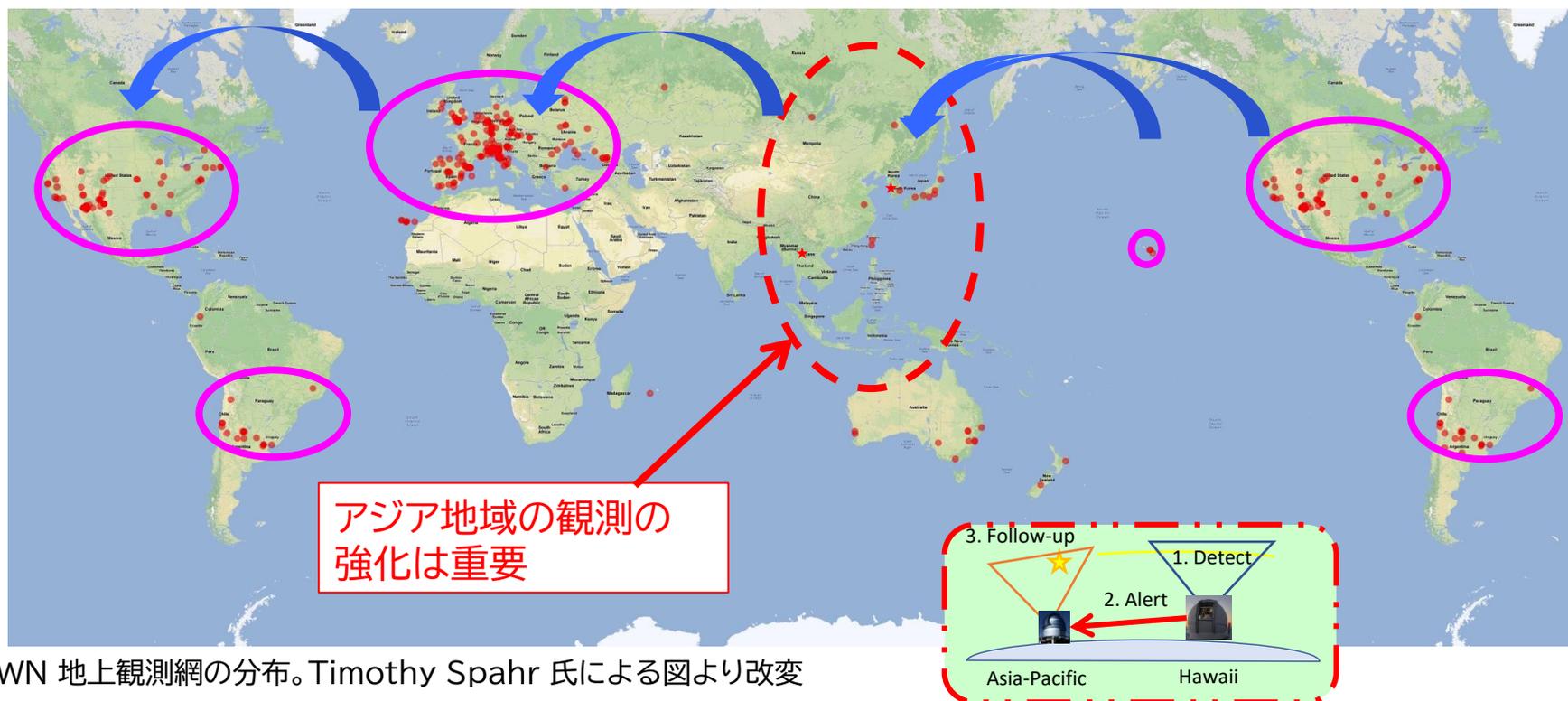
4. 国際的なJAXAの対応状況

過去に行った試み

アジア・太平洋地域にある望遠鏡を有効活用し、プラネタリー・ディフェンスに貢献するために「**アジア太平洋小惑星観測ネットワーク、Asia-Pacific Asteroid Observation Network (APAON)**」を組織した。なお、日本国内の小惑星観測者も日本国内チームとして組織した。

【経緯】

- ・2013年12月のAPRSAF(Asia-Pacific Regional Space Agency Forum)にて提案し参加を呼びかけ
- ・2014年のIAWNやSMPAGの会合で紹介
- ・2015年1月に試験観測としての観測キャンペーンを開始
- ・11の国と地域が参加(次ページ参照)
- ・2018年頃から、活動休止中→ 国際的なPD活動の活発化に伴い、国内チームから活動再開を検討

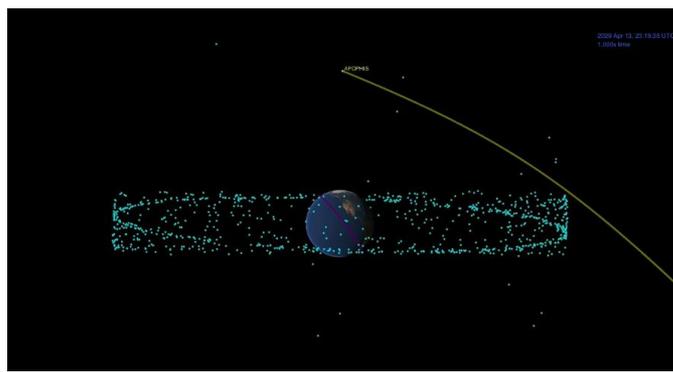


IAWN 地上観測網の分布。Timothy Spahr 氏による図より改変

5.小惑星(99942) Apophisの概要

2029年4月13日(金)の地球接近が注目されている小惑星 プラネタリーディフェンスとしても非常に注目

- 2004年12月に再発見されたときから、2029年4月の地球接近(地球衝突の可能性)が注目された。(発見は、2004年6月。2004年3月にも撮影されていた。仮符号 2004 MN4)
- 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
- 300mサイズの重要性
 - 今後、多くの発見が予想される小惑星で最大のサイズ(地球に衝突すると大災害となる)
 - 現在の技術で衝突回避ができる最大のサイズ
 - 地球接近はこのサイズの天体を理解する天然の実験(人間の技術では実現不可能)

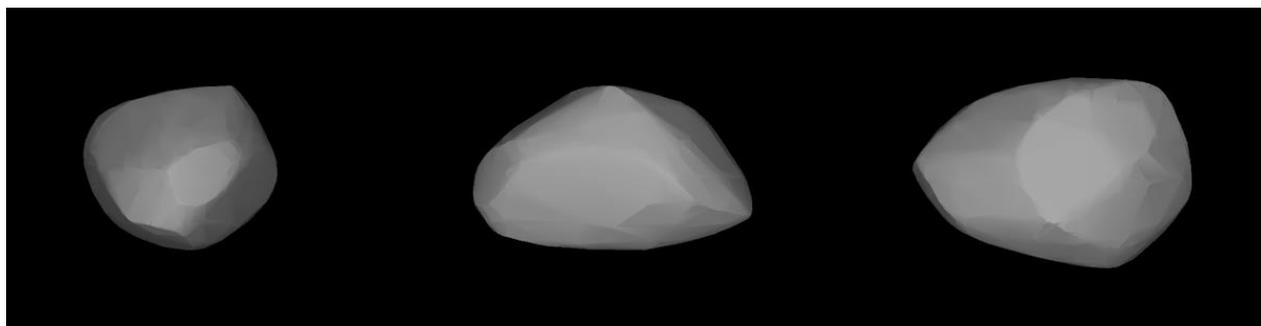


軌道データ	値	物理データ	値
軌道長半径	0.92	絶対等級	19.09
軌道離心率	0.19	直径	340m
軌道傾斜角	3.34 度	自転周期	30.56 時間
近日点距離	0.746 au	アルベド	0.35
遠日点距離	1.099 au	スペクトル型	Sq
公転周期	0.886年 (323.7日)		

2029年4月13日前後のアポフィスの軌道

5.小惑星(99942) Apophisの概要

小惑星(99942) Apophisの形状



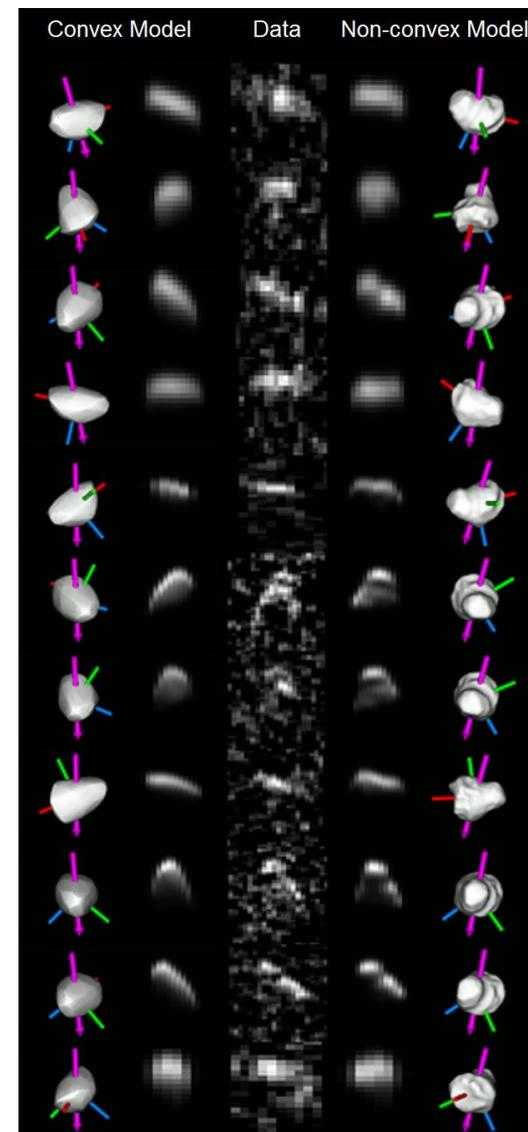
①変光観測による形状モデル

(Astronomical Institute of the Charles University: Josef Ďurech, Vojtěch Sidorin)

②レーダーによる観測

Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012-2013

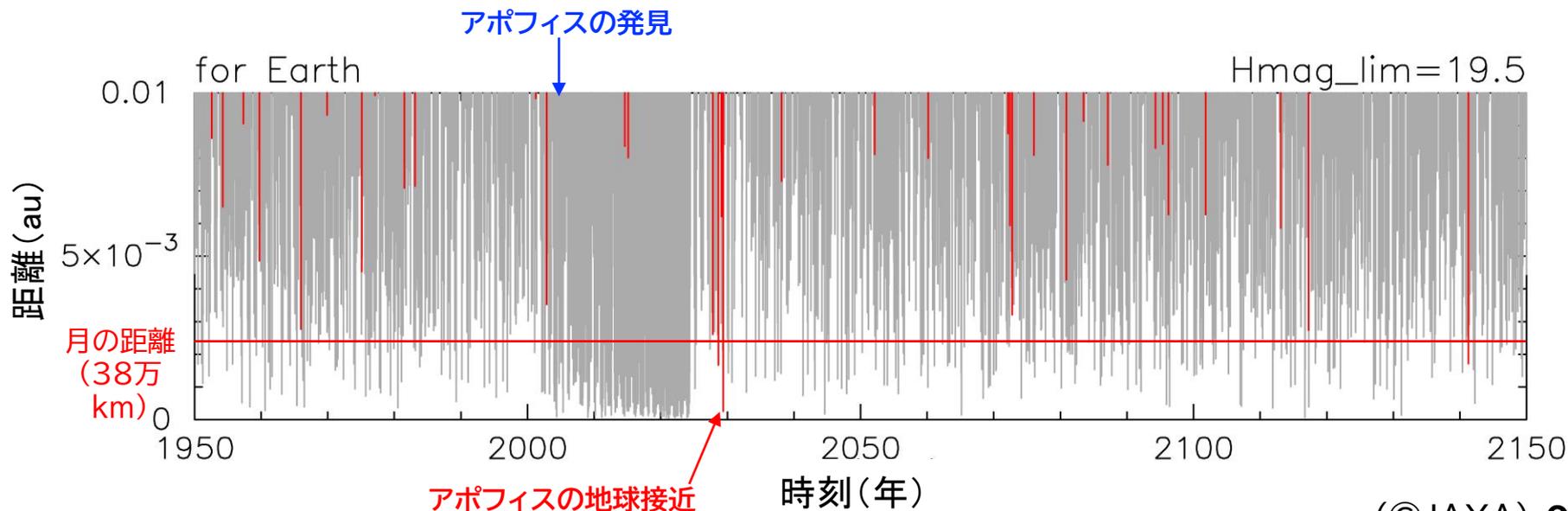
Marina Brozovic et al. ICARUS 300 (2018) 115-128



5.小惑星(99942) Apophisの概要

小惑星(99942) Apophisの2029年の地球接近について

- 地球に接近する小惑星のうち、アポフィスと同等かより大きい小惑星の地球接近を赤色で示す(下図)。(小惑星の絶対等級が19.5等かそれより明るいものを赤色で示した。小惑星のアルベドを0.25とすると、絶対等級19.5等は大きさ330mの小惑星に相当する。)
- アポフィスが発見されたのは2004年であり、このときの地球接近距離は約1400万kmであった。発見時に25年後の2029年の地球衝突の可能性が指摘されて注目されていた。
- アポフィスのような300mサイズの小惑星はまだ50%程度しか発見されていないため、今後の地上観測や、NASAが2027年に打ち上げを予定しているNEO Surveyorの観測が始まると、アポフィスと同様な例が多数発見されると予想される。



6. Apophisをめぐる国際的な動き

【米国】NASAを中心(副長官がとりまとめ)に検討がなされている

機関	状況
NASA	<ul style="list-style-type: none"> OSIRIS-APEXは実施(Apophisの地球最接近の数週間後にランデブー)するが、その成果最大化のための事前観測を実施する方針 一方でランデブーは探査機開発に5年はかかるので、独自に事前のランデブー探査実施は厳しいという見解もあり。 JanusはSIMPLExで選定、小型衛星2機(可視と赤外のカメラ)。PIはDan Scheeres。Psycheの打ち上げ遅延により目的地に行けなくなって中断状態。機体は完成しており、Launcherがあれば、Apophisに2機のフライバイが実施可能。
JPL/CNES	<ul style="list-style-type: none"> DROIDの提案。カメラとRadarと電波科学。探査機はExLab提供。ロケット調達は課題。
ExLab	<ul style="list-style-type: none"> JPLの技術支援あり、衛星バスの廉価提供
BlueOrigin	<ul style="list-style-type: none"> 商用ベースの探査機BlueRing(13のペイロード搭載可能)を提供。 太陽距離0.7-1.5AUなら行けるOTV相当。Apophis探査への対応も想定し活動中。
FLARE	<ul style="list-style-type: none"> APLのDARTメンバによるフライバイ観測提案。カメラ(DRACOのRGB版)と6U子機(電波科学による重力計測)。
LLNL	<ul style="list-style-type: none"> 2機の小型衛星(RA's CATS)によるフライバイ観測提案。

【欧州】

機関	状況
ESA	<ul style="list-style-type: none"> RAMSES(ランデブー)を中心として開発を検討実施中 欧州主導の計画RAMSESに米国から観測機器を提供するというものが検討されている ドイツ:高い関心があり、科学・技術を提案中 ベルギー:SATIS(24U CubeSat・フライバイ探査)は未だ検討中 イタリア:子衛星技術を活用したい考え(ロケット相乗りが必要。)

【中国】

機関	状況
CNSA	<ul style="list-style-type: none"> Apophis探査に関する具体的な計画は表明されていない。一方、Tianwen-2での小惑星サンプルリターンや2027年の衝突実験機打上げ計画などプラネタリーディフェンスミッション計画は示されている。

➤ 韓国、インドもApophis探査には高い関心を持っている

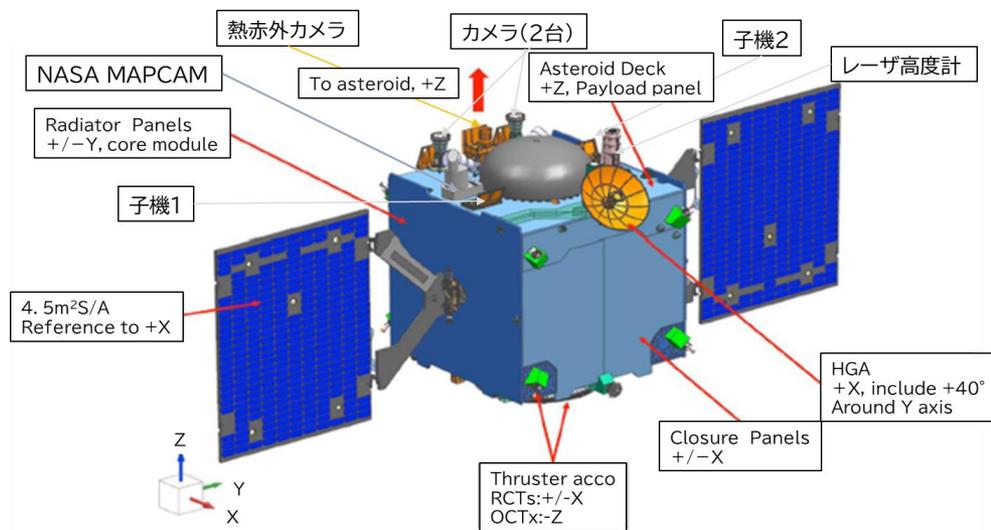
【参考】RAMSES (ESA) 概要

(The Rapid Apophis Mission for Space Safety)

2029年2月のApophis到着に向けて2028年4月頃打上げを計画

- ✓ Pre-encounter Phase (PRE) : 2029年3月1日-4月11日
- ✓ Close-encounter Phase (CEP): 2029年4月12日-14日

- 短期間での開発のために、HeraやComet Interceptorと同じバス、同じ搭載機器が基本(質量:1.3ton以下、電力1kw以下)
- 子機として12Uのキューブサットがあり、そこに様々なセンサの搭載が検討されている。
- NASA(OSIRIS-APEX)とのシナジーへの期待。



搭載されている装置(予定も含む)

カメラ(可視光・赤外・多色分光)、レーザー高度計、レーダー(小惑星の内部構造)、電波科学(質量・重力場の推定、高精度軌道決定)、磁力計・プラズマ分光計(地球磁気圏からの影響)、ラジオメーター(熱的性質、表面物性)、メスバウアー分光計(表明組成)、小型分離探査機、着陸機

P. Martino
Apophis T-5 Workshop
ESTEC, 23 Apr 2024
より

【参考】OSIRIS-APEX (NASA) 概要



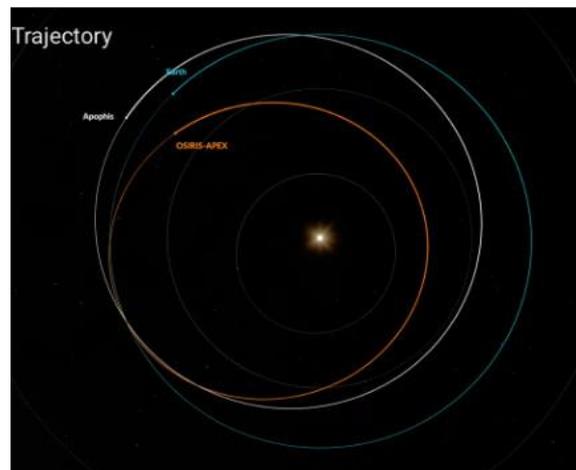
(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification and Security – Apophis Explorer)

2016年9月に打ち上げられたOSIRIS-RExは、小惑星ベヌーのサンプルを2023年9月に地球に持ち帰ったが、探査機はその後OSIRIS-APEXとして延長したミッションを行っている。

- ✓ Apophisの地球接近(2029年4月13日)直後にApophisにランデブーする予定。
- ✓ Apophisが地球潮汐力の影響を受けた後の状況を詳細に調査する。



引用元:<https://www.asteroidmission.org>



到着直前の2029年2月の位置関係と軌道



スラスタ噴射によって表面の砂礫を吹き飛ばして表面下を調査する

搭載されている装置

カメラ(可視光、赤外)、赤外分光計、X線観測、レーザー高度計

Credit: NASA's Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab

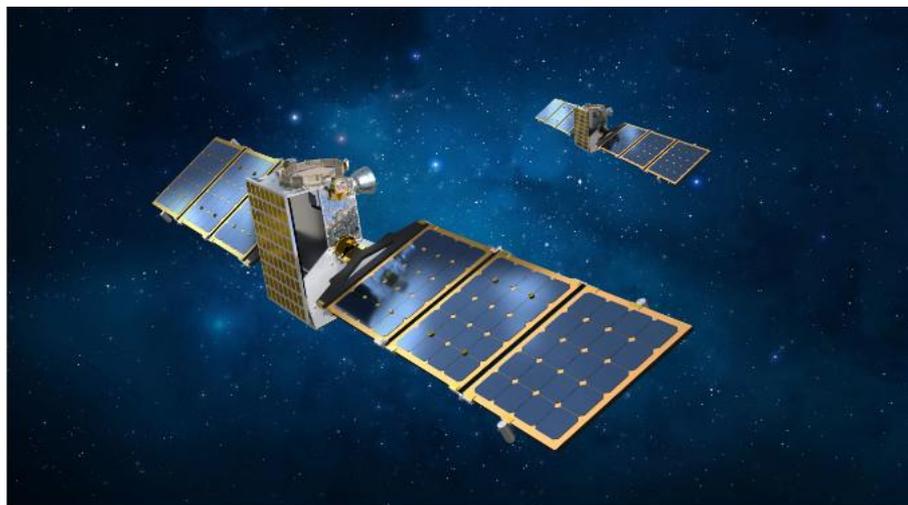
引用元:<https://science.nasa.gov/mission/osiris-apex/>

【参考】Janus (NASA) 概要

(ローマ神話のヤヌスJanusより。2つの顔をもち、物事の始めや門・扉の守護神)

NASAのSmall Innovative Missions for Planetary Exploration (SIMPLEx) プログラムの1つ。当初は、Psyche探査機打ち上げに相乗りして、2機の小型探査機を2つのバイナリー小惑星にフライバイさせる予定であった(探査予定小惑星は、1996 FG3と1991VH)。しかし、Psycheが延期されて打ち上げられたため、予定した小惑星には向かえないことになり、現在は打ち上げ機会を待っているところ。

✓ タイミングのよい打ち上げがあれば、Apophisにフライバイ可能



探査機質量:約36kg(1機あたり)

搭載されている装置:カメラ(可視光、赤外)

Janus illustration – Lockheed Martin

引用元:<https://science.nasa.gov/mission/janus/>

6. Apophisをめぐる国際的な動き

Apophisの注目度の高まりに伴い国際的な議論も活発化

■ 国連

本年科技小委で、地球近傍天体(NEO)の科学的価値やそれらがもたらす潜在的な危険に関する認識を高めることを目的としてアポフィスが地球最接近する2029年を「国連国際惑星防護年」とすることが2024年6月の国連COPUOS本委員会において基本合意。

■ COSPAR

COSPAR2024の各宇宙機関会合(NASA、ESA、JAXA、ASI、KASA)でアポフィス観測の対応について議論を実施。



欧米共にApophis探査に関する検討が進んでいるところ、日本の積極な参画・貢献が国際的に期待されている

7. Apophis探査で期待される成果等

7.1 サイエンス的意義・価値

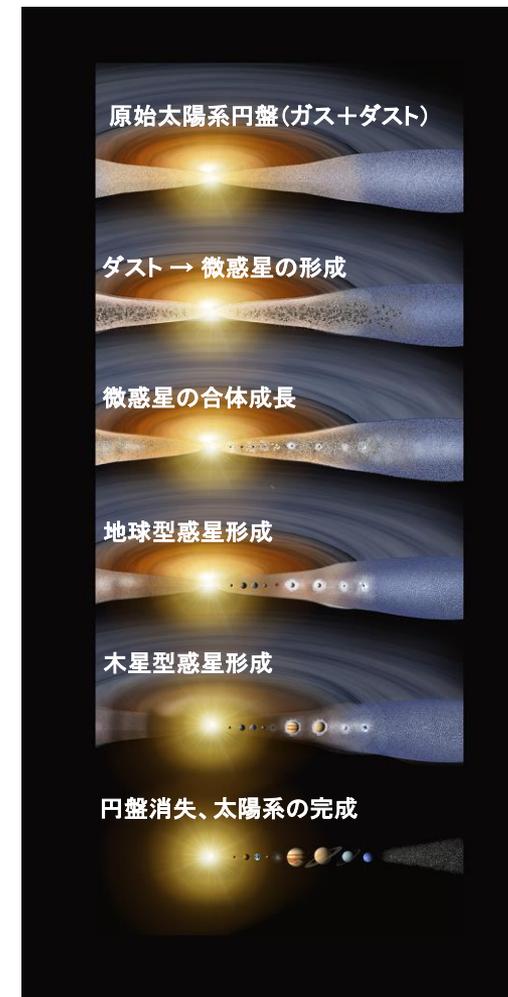
2029年4月にApophisの地球接近は、地球に接近する天体のサイズおよび接近距離において観測史上初めての現象である。地上からの望遠鏡による観測に加えて、探査機をApophisに送って探査を行う場合、サイエンスとしては、

- (1) 地球潮汐力※が及ぼす影響の観測
- (2) 300mクラスの小惑星の詳細な探査

の2点において非常に注目される。

(※地球からの引力の強さが天体の場所によって異なることで、天体を変型させたり分裂させたりする力)

- 300mというサイズは、レーダーや地震計により直接的に内部構造全体が把握できる可能性があるサイズであり、さらに地球潮汐力によって生じる変化により、構成する物質の強度なども知ることができる。
- 取得されたデータより、現在考えられている惑星誕生のシナリオ(右図)が正しいのか、あるいは修正が必要になるのかという議論に発展していく可能性がある。
- Apophisのような小惑星が地球に衝突すると地域的には壊滅状態となるが、Apophisを理解することがそのような災害への対策に繋がる。



太陽系の惑星誕生のシナリオ
(©JAXA)

7. Apophis探査で期待される成果等

(1)「地球潮汐力が及ぼす影響の観測」についての詳細:

- 最大の注目点は、大きさが340mもある天体が地表から約3万kmの地点を通過するときに地球潮汐力により内部構造、表面、自転・軌道においていかなる変化があるかである。
- これまでの知見:
 - 「はやぶさ2」の小惑星リュウグウ探査や、OSIRIS-RExの小惑星ベヌー探査によって、小さな小惑星の表面は想定よりもはるかに強度が弱いことが判明
 - 微小重力下では地球上(1G)とは力学特性が大きく異なることも判明
 - 1994年に木星に衝突したシューメイカー・レビー第9彗星では、1992年に木星に接近したときに木星の潮汐力によって分裂したと推定
- 地球潮汐力で小惑星に変化が何らかの変化が生じることが予測され、その事象の観測により、小惑星の物理的性質の解明ができる。
 - 天体本体の理解→構成物質の動きやすさ(破壊強度、摩擦力、固着力)
 - 天体本体への影響→破壊、形状・地形変化、物質移動、スペクトル変化
 - ダイナミクスへの影響→軌道運動、自転

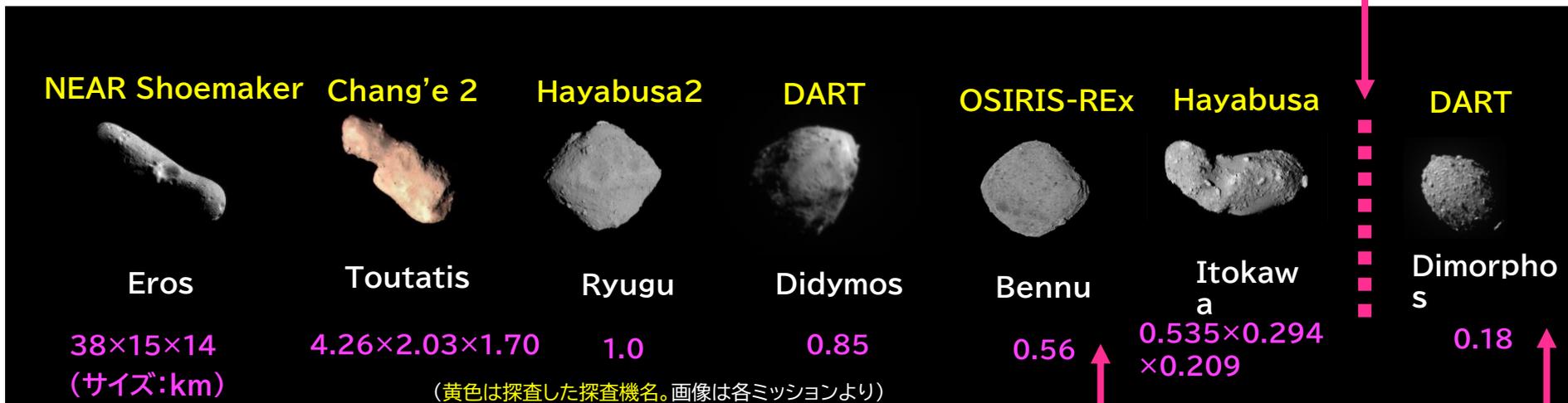
7. Apophis探査で期待される成果等

(2) 「300mクラスの小惑星の詳細な探査」についての詳細:

- 300mサイズの重要性
 - このサイズの小惑星には、これまで探査機が訪れていない
 - 内部構造を詳細に確認できる可能性がある
 - インパクト(探査機の衝突)によって軌道が変更できるかできないかの境目である(プラネタリーディフェンスにとって重要)
- Apophis探査によって得られる可能性のあるデータ
 - 可視光による高分解能の画像 → 表面の地形・地質構造、物質の種類
 - 赤外線による高分解能の画像 → 表面の熱物性、空隙率、組成
 - 小惑星の地震波のデータ → 小惑星の内部構造
 - レーダーによるデータ → 地下の物質の状況
 - 小惑星の質量、形状、体積、密度 → 小惑星の構造
- 探査機がApophisにランデブーしていると、これらのデータが、地球接近前、接近時、接近後で得ることができ、地球潮汐力による変化を連続的に知ることができる
- 赤外線センサでの小惑星観測の実績蓄積(小惑星リュウグウ、ディディモス、ディモルフォス、アポフィスの観測)により国際的なスタンダードを獲得も期待。なお、Heraと同様にRAMSES搭載にJAXAの赤外線カメラを搭載した場合、OSIRIS-APEXの赤外線カメラとでアポフィスという同じ天体の観測を行うことで、それぞれが観測したリュウグウとベヌーの結果の相互比較がより正確に行うことができ、小惑星の科学に貢献できる。

7. Apophis探査で期待される成果等

参考:これまで探査機が接近した地球接近小惑星



Apophisは、ItokawaとDimorphosの間のサイズ



- 小惑星のサイズ横断的に知見が得られることは、太陽系の誕生から現在に至る進化の理解のために重要である。
- 300mというサイズは、探査機を衝突させて小惑星の軌道を変更できるかできないかの境目であり、プラネタリーディフェンスとしても注目される。



Hayabusa2#の探査予定小惑星

7. Apophis探査で期待される成果等

7.2 Apophis探査の意義・価値

- 現時点で考えられるPD活動に対するSWOT分析の結果は下表のとおり。
- Apophisの大接近に伴い、PD機運向上と国際協力ミッションへの参加の観点で「機会」ととらえられる一方で、他国が国際協力する場合は「脅威」としての性質も持つ。
- 国際的なApophis探査への参画により、PDに関する知見や人材育成などの基盤構築とともに、PD活動におけるアジア太平洋でのリーダーシップポジションの獲得も期待できる。
- 反対に、適切な対応なしでは、日本不在での国際的PD体制構築のリスクや、PDへの社会的関心が大きく高まる中、国民の期待に応えられない状況に陥るリスクもある。

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	<p>強み(Strength)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小惑星探査での世界トップの実績(はやぶさ、はやぶさ2、Heraセンサ等) ・未発見小惑星の効果的な観測技術(研開技術) ・ESA・NASAとの長年の協力実績と信頼関係 ・アジア太平洋の協力ネットワーク 	<p>弱み(Weakness)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>PDに関する政府レベルの位置づけがない</u> ・PDとして組織的な活動は未実施 ・観測能力の不足(観測設備の質・量) ・人員不足
外部環境	<p>機会(Opportunity)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>Apophis接近による全世界的なPD機運の高まり</u> ・<u>海外機関からの協力呼びかけ</u> 	<p>脅威(Threat)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・米欧はPDに対して組織的に対応 ・中国は独自に小惑星サンプルリターン及びPDミッションを計画中(どちらも2025年打上げ) ・<u>ISRO(印)、KASI(韓)もApophis探査ミッション参加に関心</u>

7. Apophis探査で期待される成果等



7.3 Apophis探査からのプラネタリーディフェンス活動の展開

- 我が国がPDに関する研究開発に積極的に取り組み、国際的な検討へ貢献することは、宇宙先進国としての責務を果たすのみならず、新型コロナウイルスによるパンデミックと同様、顕在化した場合には社会に甚大な影響を及ぼすリスクに備える人類の安全保障として、国民の生命及び財産の保護にも資するものと考える。
- また、大気のない月面では小惑星衝突の影響がより大きく、PDは月面活動の保護の側面もあるほか、将来的には地球接近天体の積極的な利活用(資源や有人活動)の可能性もあり宇宙探査にも貢献する。さらに、小惑星の観測技術は、宇宙状況把握(SSA)とも重なりを持ち、国際的な定義※¹にPDは包含されている。
- PDに関する国際的な検討において日本が主体的な役割を果たすためには、この分野の知見の蓄積や専門的な役割を果たす人材育成などの基盤作りが重要。

※¹ SSAの定義(国際宇宙航行アカデミー(IAA)、国際宇宙連盟(IAF)、国際宇宙法学会(IISL)、ESA・Dr Holger Lrag):①SST:スペースサーベイランス アンド トラッキング、②SWE:スペースウェザー、③PDE:プラネタリーディフェンス (NEO)

8. まとめ

- 我が国がPDに関する研究開発に積極的に取り組み、国際的な検討へ貢献することは、宇宙先進国としての責務を果たすのみならず、人類の安全保障として、国民の生命及び財産の保護にも資する。
- PDに関する国際的な検討において日本が主体的な役割を果たすための専門的知見の蓄積や人材育成などの基盤作りが必要である。
- Apophis探査についてはPD活動の知見蓄積・人材育成の観点からの必要性だけでなく、サイエンス的な意義・価値も非常に高い。
- 本探査については、日本の強みを生かせる形で、海外宇宙機関との効率的な協力も視野に検討を進める。
- 国際動向も踏まえてPD活動が政策的に位置づけられれば我が国全体として活動の加速につながる。