二重小惑星探査計画（Hera）
プレスキット

2026年11月2日

JAXA宇宙科学研究所
Hera所内プロジェクトチーム

二重小惑星探査計画（Hera）全体概要

- ESAが主導する二重小惑星（ディディモスとディモルフォス）探査計画
- NASAのDARTと連携した国際協力プラネタリーディフェンス計画
- 打上げ：2024年10月7日（JST）
- 打上げロケット：スペースX社 ファルコン９
- 打上げ場所：アメリカ合衆国フロリダ州ケープカナベラル
- 二重小惑星系到着：2026年11月4日(JST：予定)
- ５種類の観測機器と2機の子機（6Uキューブサット）を搭載
  - 宇宙航空研究開発機構（JAXA・日本）は「はやぶさ２」で実績を有する熱赤外カメラTIRIを提供して参加しており，
    小惑星科学（衝突科学、地形・地質学、熱物性学、ダイナミクス等）で協力.

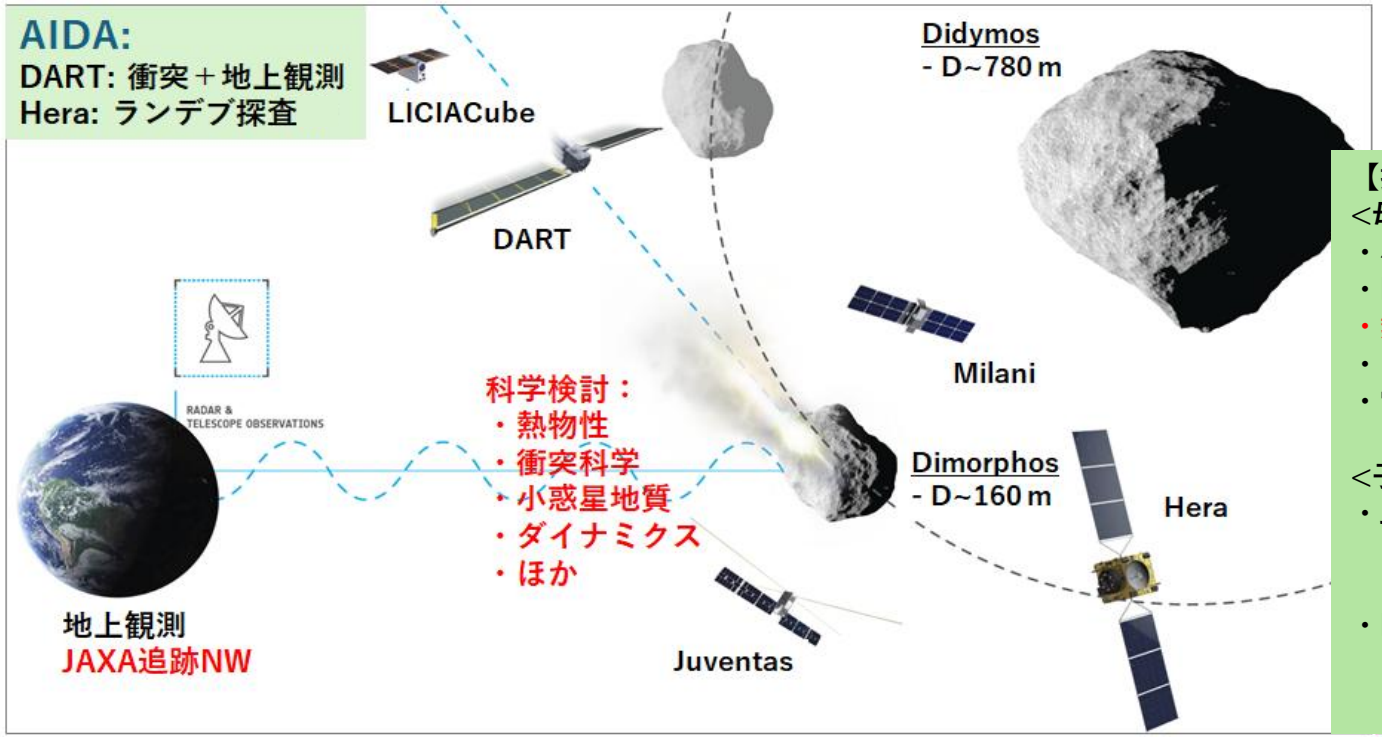
©ESA

Heraとは？

■国際共同による史上初のプラネタリーディフェンス計画(AIDA)

◆DART：衝突機　→探査機の高速度衝突による小惑星軌道修正の技術実証
＜実践：2022年9月27日（JST）に衝突＞

◆Hera：探査機　→事後の現地観測による衝突後の状態確認と衝突効率推定
＜検証：2026年11月4日（JST）に到着予定＞



【搭載機器】
＜母船＞[主に全球的特徴把握の探査]
・小惑星フレーミングカメラ(AFC)
・Hera用ハイパースペクトルカメラ(HS-H)
・熱赤外カメラ(TIRI)
・レーザ高度計(PALT)
・電波科学(RS)

＜子機(CubeSats)＞
・Juventas(ユベンタス)[主に内部構造の探査]
　・ユベンタス搭載レーダ(JuRa)
　・太陽系小天体用重力計(GRASS)、他
・Milani（ミラニ）[主に表層鉱物組成の探査]
　・小惑星分光撮像ミッション機器(ASPECT)
　・揮発成分その他熱重量分析器(VISTA)、他

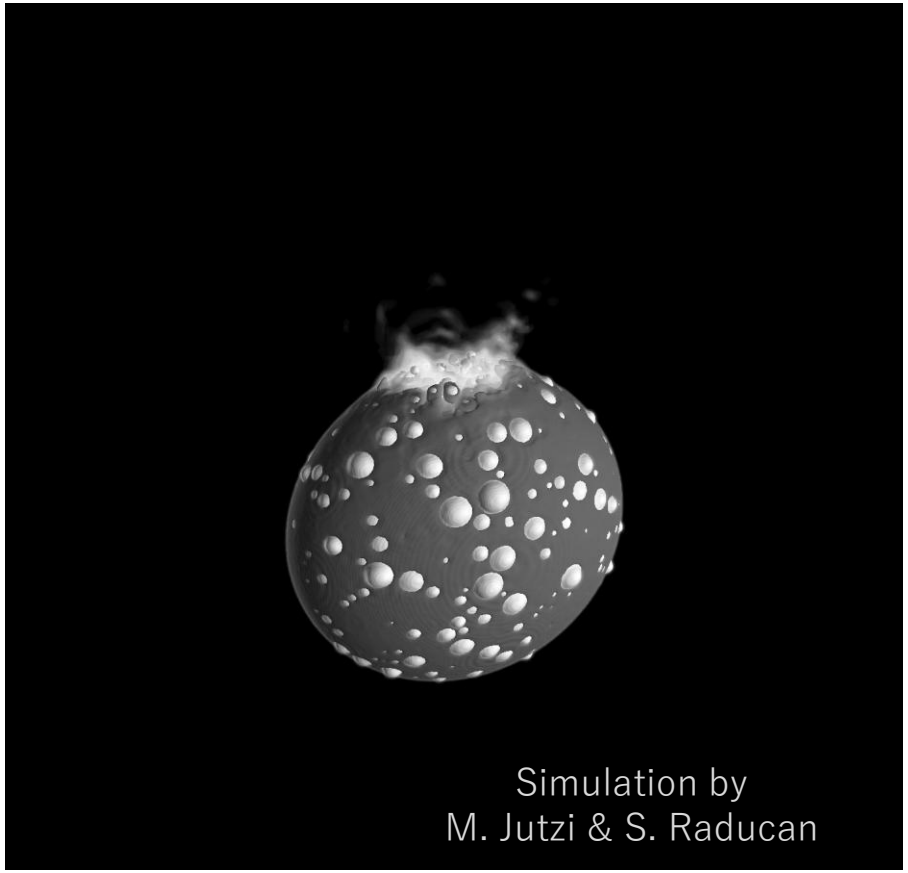




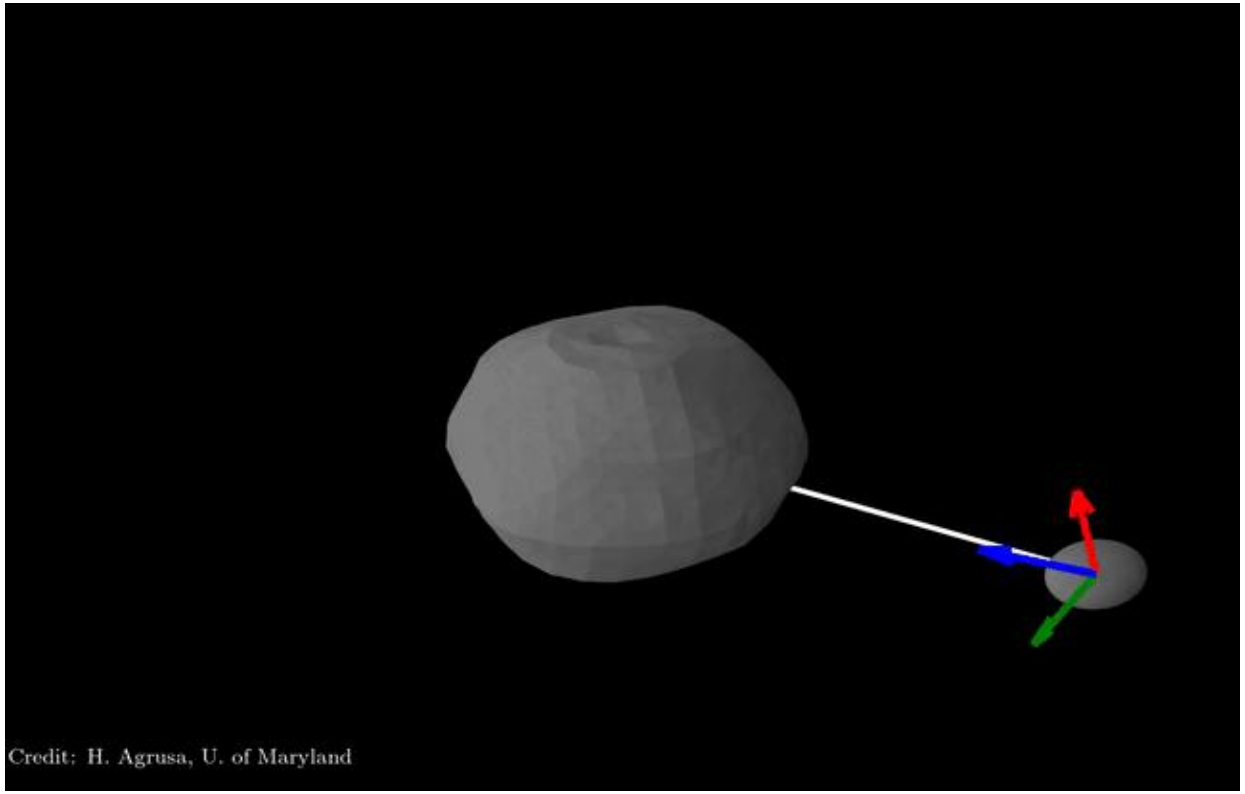
＊DART（Double Asteroid Redirection Test）
＊DART+Heraの連携はAIDA（Asteroid Impact ＆Deflection Assessment）と呼ばれる

DART衝突後の状況は？

■衝突痕はどうなった？



■軌道・自公転はどうなった？



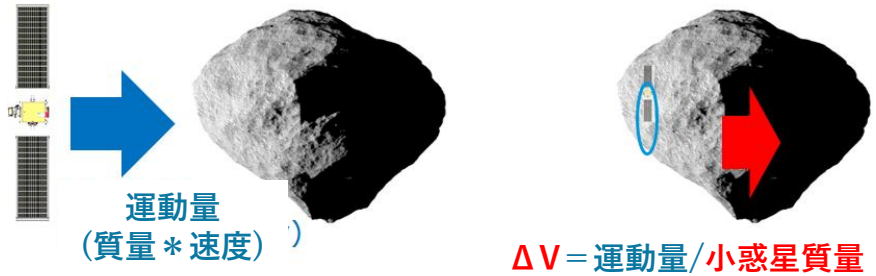
Hera:プラネタリーディフェンスの実証

■探査機衝突による軌道修正の効果

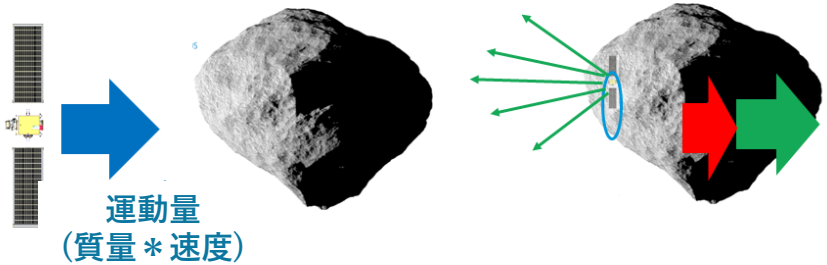
◆衝突時のイジェクタ量、小惑星質量が必要

◆Heraによる現地観測で小惑星の質量・径・密度・硬さ・構造、衝突痕を調査

→ 効率βを求め、他の小惑星にも適用可能に

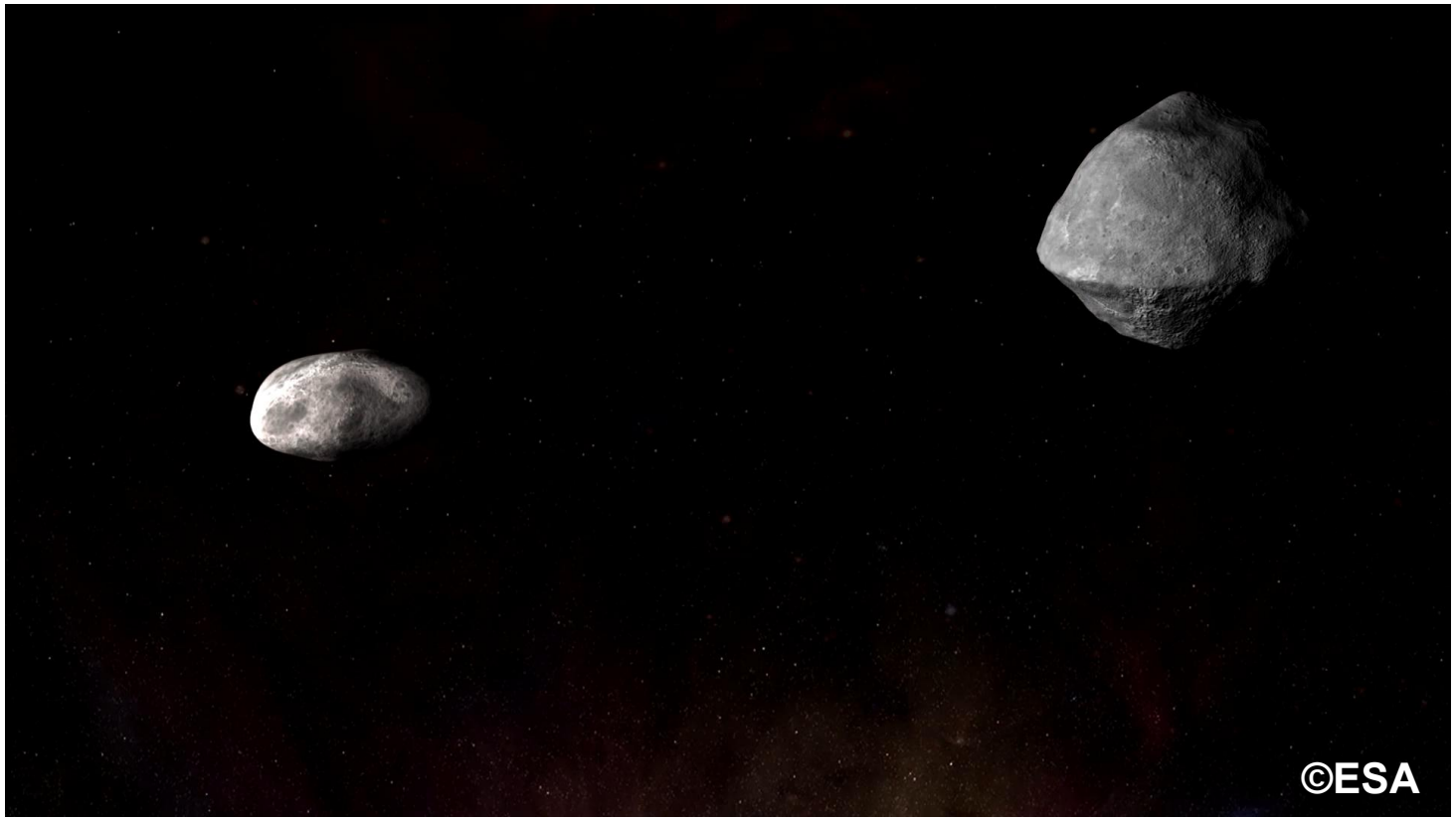


小惑星質量＊ΔV＝運動量＋運動量(Ejecta)
＝運動量＊β(効率)

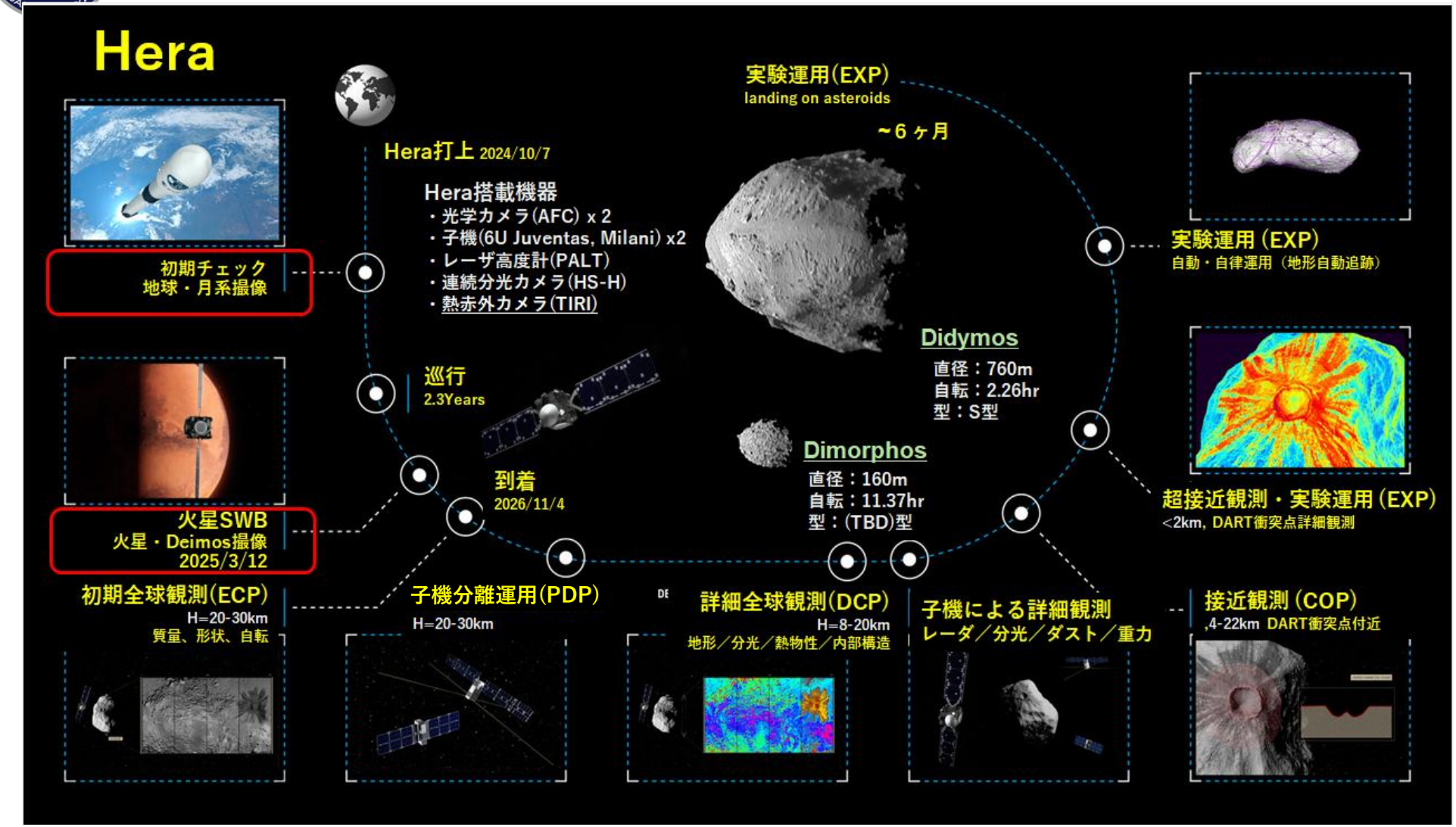


効率(β)＝小惑星質量＊ΔV/運動量

（原図　©ESA）



Heraミッションプロファイル



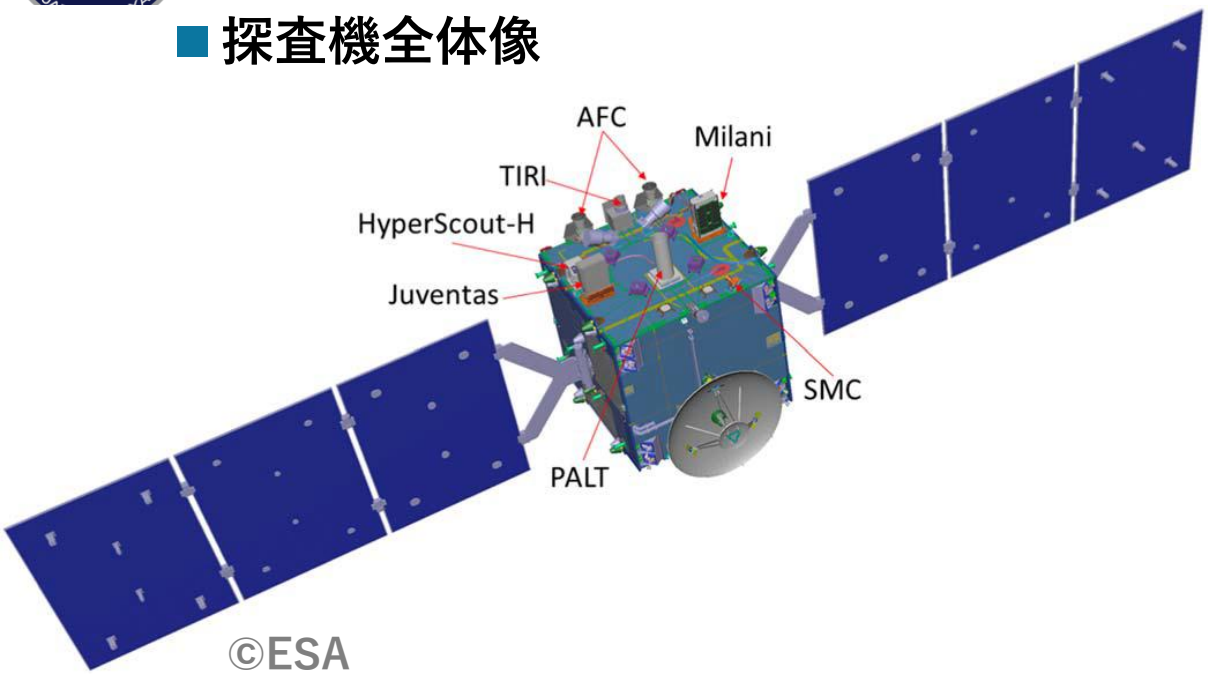
多くの史上初!!

- 史上初の二重小惑星の探査！
- 史上最小の探査天体！
- 史上初の小惑星レーダトモグラフィ（**JuRa**）による内部構造探査！
- 史上初のフルスケール探査機によるクレータ実験！
- 史上初の深宇宙での**CubeSat**による近傍詳細探査

HeraはDidymosに到着後に徐々に高度を下げて詳細な観測を行う。TIRIは高度20～30kmでは連星系全体を含む視野で観測し、徐々に高度を下げて局所的な高解像度観測へと移行する。最終的には数kmの高度からDARTによる人工クレータやその他の特徴的地形の詳細な観測を実施する。

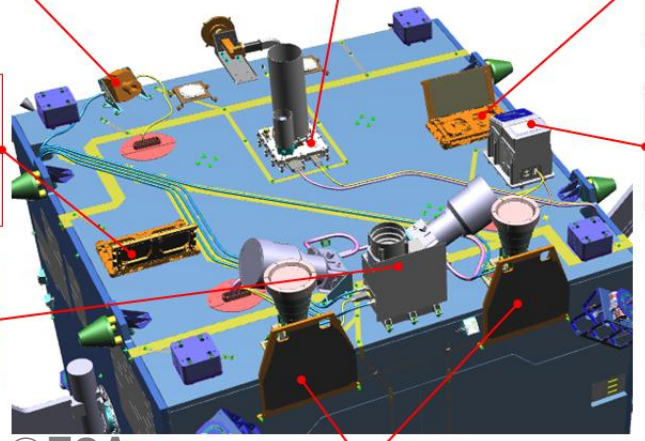
Hera探査機概要

■ 探査機全体像



©ESA

■ 搭載機器



©ESA

SMC: 小型モニタカメラ
- 子機分離時の撮像

PALT: レーザ高度計
・小惑星までの測距：0.5-14 km
・高度精度：0.5 m

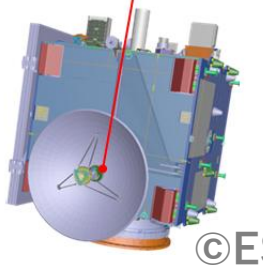
JUVENTAS CUBESAT
- JuRa（低周波レーダ）
- GRASS（重力計）
- 加速度計
- 電波科学

MILANI CUBESAT
- ASPECT（可視近赤外分光）
- VISTA （ダスト計測）
- 反射鏡
- 電波科学

Hyperscout-H: 分光カメラ
・可視近赤外分光
（665-975 nm）
・視野角：15.5° x 8.3°

TIRI: 熱赤外カメラ
- 熱撮像（8-14 μm）
- 多色バンド（7-14 μm）
- 視野角：13.0° x 9.9°

X-DST: 電波科学
・Xバンド



©ESA

AFC: 可視カメラ（２台）
・科学と航法誘導制御用
・視野角：5.5° x 5.5°

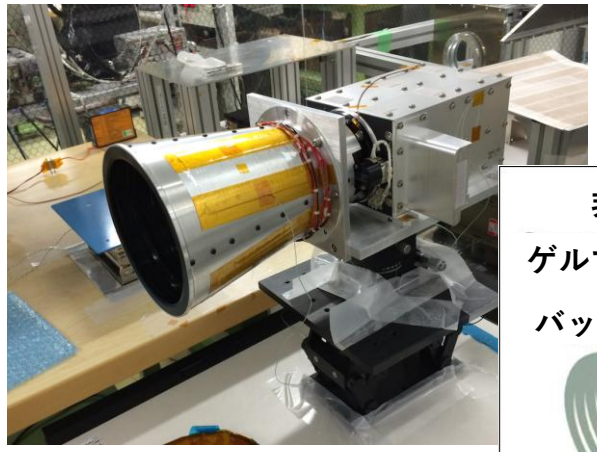
（機器名	主な目的・用途
【可視カメラ】 AFC	小惑星の形状や表面地形の撮像を行うモノクロ可視カメラ. 科学観測と航法誘導制御の両方で使用（2台搭載）. ドイツ／Jenoptik社製
【レーザ高度計】 PALT	小惑星までの距離を正確に測定することによって、重力場の計測を行う 探査機の小惑星との衝突防止など安全な運用に使用. ドイツ／Jenoptik社製
【熱赤外カメラ】 TIRI	小惑星表面の温度計測によって表層熱物性の調査、 熱赤外の多波長分光によって表層物質の種類を推定. 日本／JAXA-明星電気製
【分光カメラ】 HyperScout-H	小惑星表面の反射のスペクトル測定によって鉱物組成や宇宙風化の状態を調査, オランダ／cosine社製
【電波科学】 X-DST、 ISL	地上からのレンジ・ドップラ計測で探査機位置を決定し、小惑星の重力場を計測、 母船と子機の測距を行い、子機の運動から両小惑星の重力場を調査
【子機１】 Juventas(ユベンタス)	低周波レーダ (JuRa)で小惑星の内部構造を探索 重力計 (GRASS)で、局所的な重力場を計測. デンマーク／GomSpace社ほか製
【子機２】 Milani（ミラニ）	可視近赤外分光撮像(ASPECT)で表層の鉱物組成を詳しく調査 ダストモニタ(VISTA)で塵の浮遊量を調査. イタリア／Tyvak International社製

項目	Hera探査機の主な特徴
探査機重量	1150 kg（推薬込み）、667 kg（推薬無し）
探査機サイズ	1.6 x 1.6 x 1.6 m（本体）、11.5 m（太陽電池展開時）
発電量	1180 W (max)
通信	Xバンド (HGA、LGA)
姿勢制御	3軸制御
推進系	RCT：10 N x 8系統 (主従)、 OCT：10 N x 3系統 (主従)
打上げ	SpaceX Falcon 9、2024年10月7日（JST）打上げ

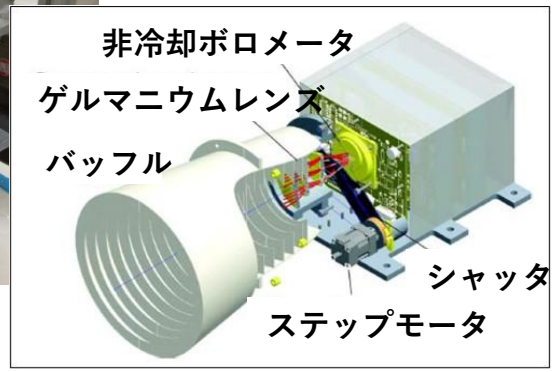
熱赤外カメラ: 「はやぶさ2」 から「Hera」へ

■ 「はやぶさ２」中間赤外カメラ TIR

・史上初の小惑星探査用熱赤外カメラ



©JAXA

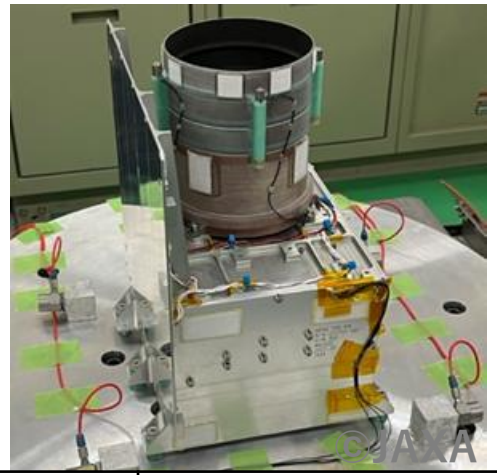


©JAXA

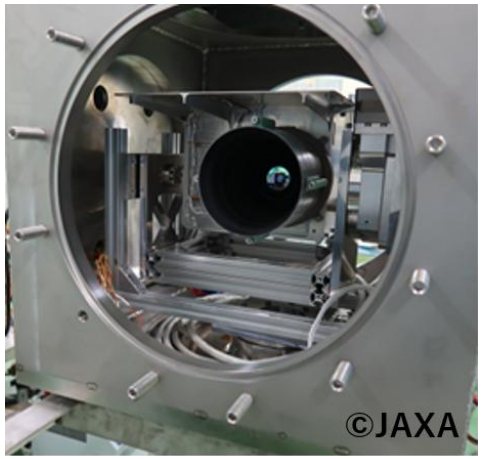
検出器（非冷却ボロメータ）	NEC-320A
画素数	328 x 248
観測波長	8-12 [μm]
視野角	16 x 12 [deg]
画素分解能	0.05 [deg/pix]
観測温度範囲	150-400 [K]
雑音等価温度差(@300K)	~0.3 [K]
AD変換階調	14 [bit]
開発メーカ	NEC

■ 「Hera」 熱赤外カメラTIRI

・より高解像度、多バンドへ高性能化



©JAXA



©JAXA

検出器（非冷却ボロメータ）	Lynred PICO1024 Gen2
画素数	1024 x 768
観測波長	8-14 [μm] + 6 狭帯域バンド
視野角	13.0 x 9.9 [deg]
画素分解能	0.013 [deg/pix]
観測温度範囲	150-450 [K]
雑音等価温度差(@300K)	<0.1 [K]
AD変換階調	14 [bit]
開発メーカ	明星電気

項目	機器仕様
機器寸法 [mm]	本体：W180 x D150 x H250 包絡：W230 x D190 x H260
機器重量 [kg]	3.94
消費電力 [W]	16

Hera: TIRIに期待される成果

TIRI ➡

- 両小惑星の全球の表層物質の空隙・硬度・粒径と組成の把握（温度・分光計測）
- 両小惑星の正確な形状推定（夜側も観測可能）
- 二重小惑星系の正確な自公転運動の計測（全系をカバーする広視野）

	温度測定（サーモグラフィ）	撮像(暗視含む)（夜側も視認）	広視野（全系観測）	多バンド（赤外分光観測）	補記（他機器による成果）
プラネタリーディフェンス	Dimorphos質量推定			全系の重心位置と公転軌道から質量比推定		子機の運動、GRASS
プラネタリーディフェンス	Dimorphos形状・大きさ		正確な形状測定 →平均密度推定			AFC、PALT
プラネタリーディフェンス	Dimorphos表面物質硬さ	熱慣性から表面状態推定				JuRa、子機着陸時の反撥（加速度計測）
プラネタリーディフェンス	衝突痕の特徴とイジェクタ噴出量の推定	物性(空隙率)の衝突痕内外の差異	クレータ直径/深さから土壌の硬さ推定 大規模な形状変化？		組成の衝突痕内外の差異	AFC、HS-H ASPECT
プラネタリーディフェンス	Dimorphos内部構造	衝突痕内部の物性	衝突痕内外の岩塊サイズ		衝突痕内部の組成	JuRa
プラネタリーディフェンス	運動変化	熱モデル構築し、自転・軌道の長期変動を予測		１自転・１公転の動きから歳差・章動を検出		
科学	Didymos (S型)・Dimorphos (S型・小型)の表層物質の性質	熱慣性から表面状態推定			バンド比から組成推定	AFC、HS-H ASPECT、JuRa
科学	Dimorphos形成過程（衝突・破壊・再集積）	両小惑星の物性の差異	一枚岩vsラブルパイル		両小惑星の組成の差異	AFC、ASPECT、JuRa
科学	微小重力下のクレータ則	熱慣性から物性・粒径の推定値	クレータ直径/深さ		バンド比から組成推定	
科学	宇宙風化	熱慣性から粒径推定			バンド比から組成推定	ASPECT、HS-H

巡行運用中のTIRIによる観測結果

■ 2024年10月10日初期チェック結果（地球・月撮像）

参照先：https://www.isas.jaxa.jp/topics/003865.html



暗視カメラ機能：熱赤外カメラTIRIの打上げ後の初画像(2024年10月10日)。地球の夜側も見える（月の夜側は極低温で検出限界以下で半月状に見える）

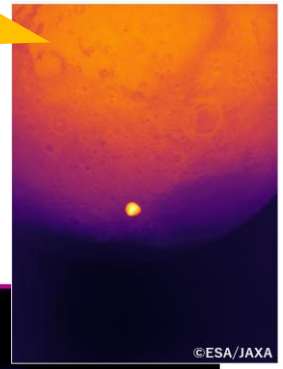
幾何学補正：熱赤外カメラTIRIの初期チェック期間中の連続画像。地球の自転や月の公転による位置変化が見える



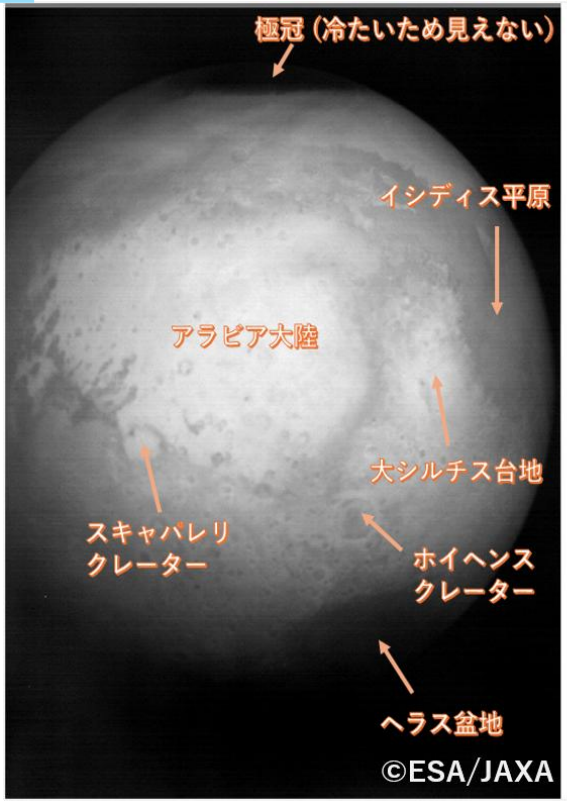
■ 2025年3月12日火星スイングバイ運用結果（火星・衛星デイモス*撮像） *ダイモスとも呼称

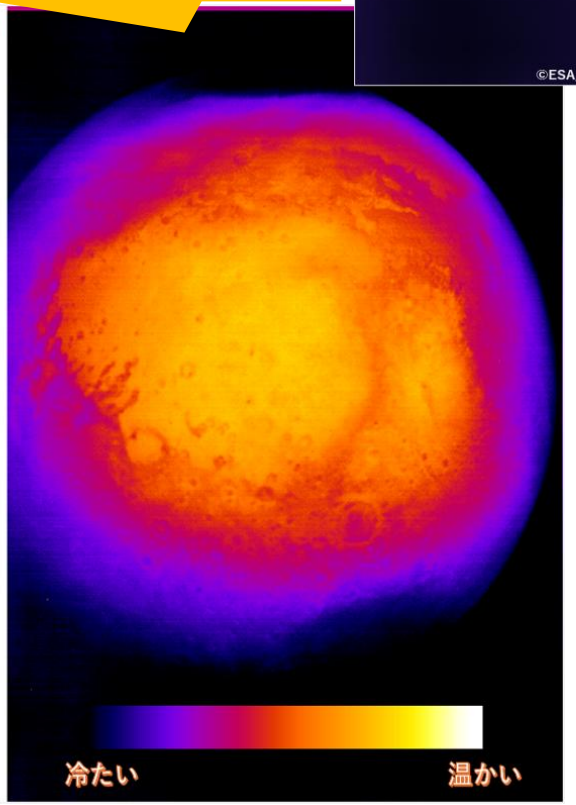
参照先：https://www.isas.jaxa.jp/topics/003967.html

熱赤外カメラTIRIによる火星スイングバイ中の火星と衛星Deimosの画像（2025年3月12日）。2天体が重なる場合の輝度変換に活用できた

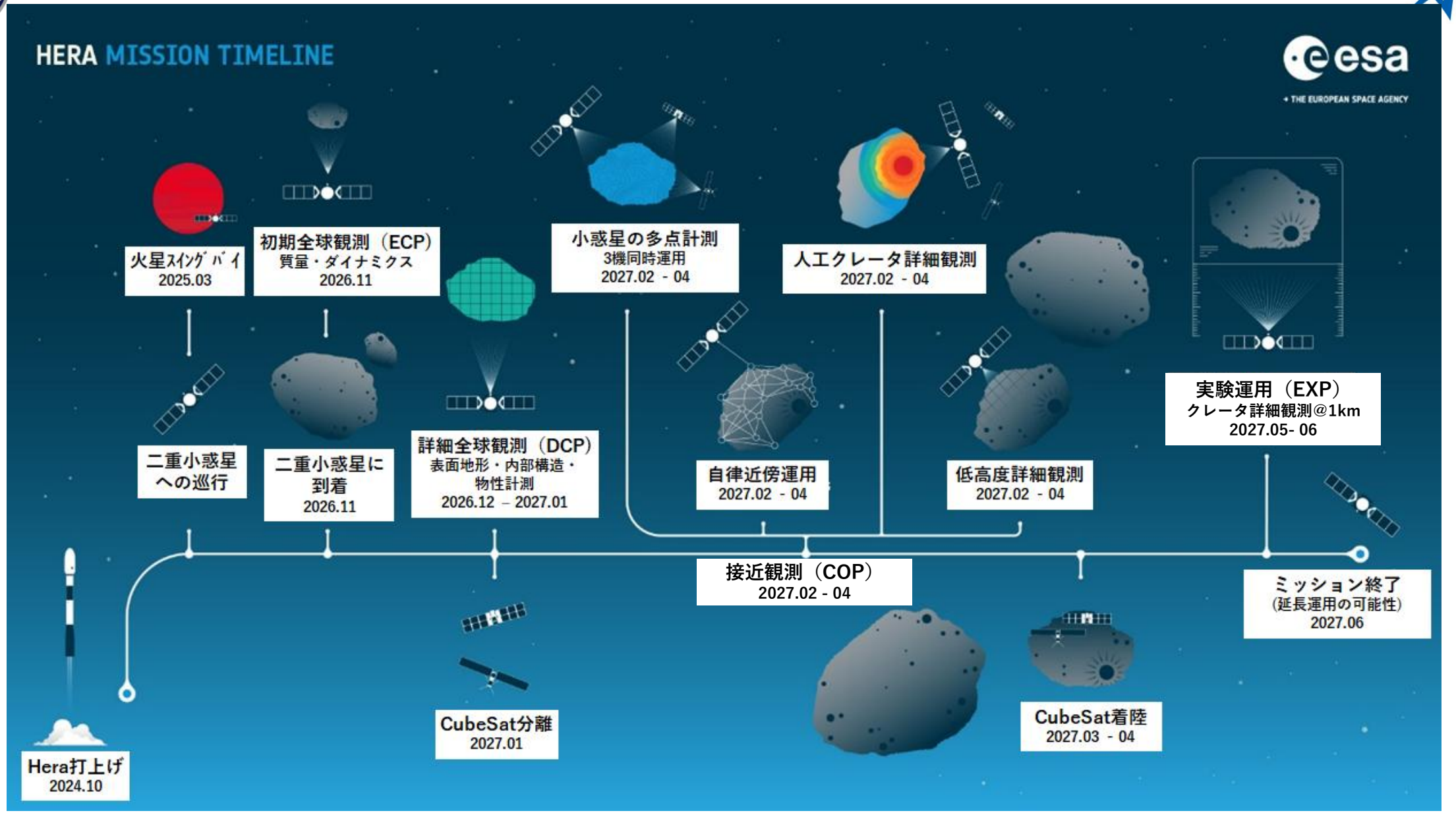


輝度補正：熱赤外カメラTIRIによる火星スイングバイで接近中の火星の画像（2025年3月12日）。左は表面地形、右は温度差を寒暖色で表したもので、既知天体である火星の低温～高温との輝度補正にも活用した





Hera到着後の運用・観測計画（11月2日時点）



Hera到着後の運用・観測計画（11月2日時点）

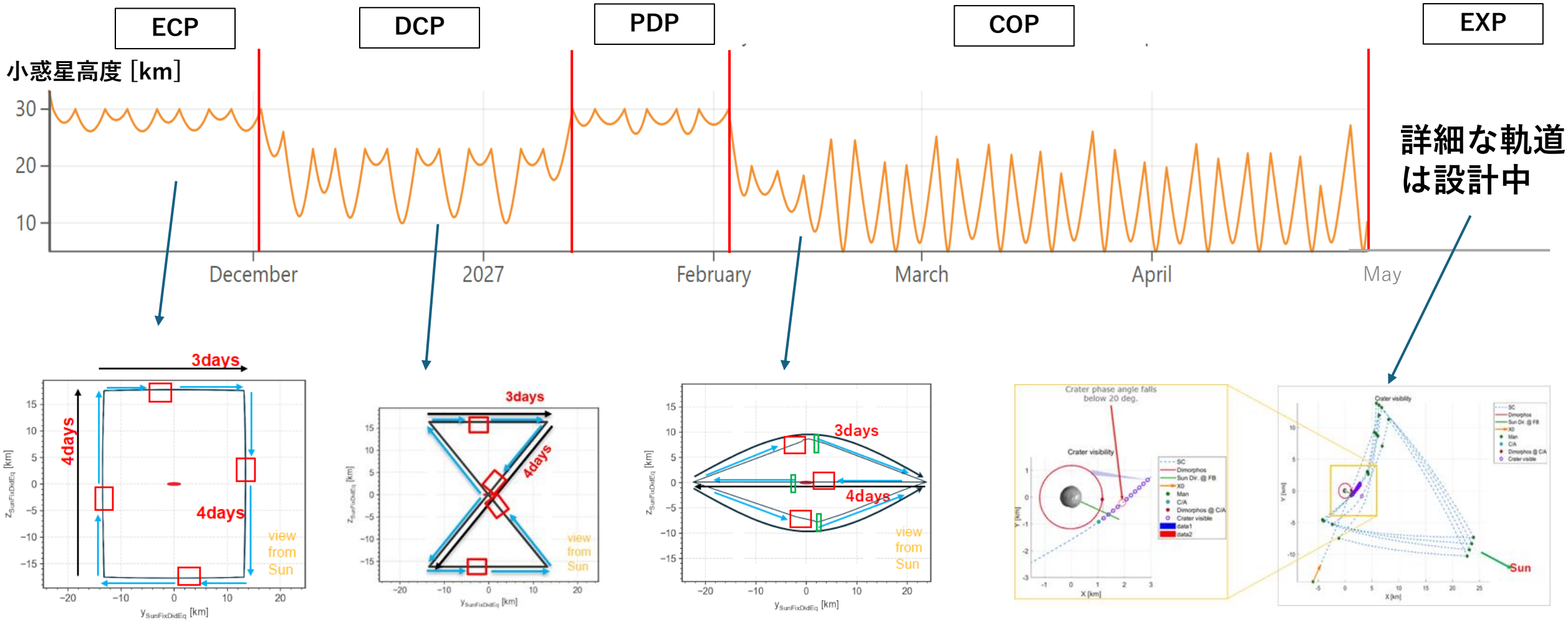
年月（JST ）	観測運用フェーズ	小惑星からの距離	観測計画
2026年11月04日	二重小惑星系到着・初期全球観測フェーズ（ECP）開始（約４週間実施）	20-30km	質量、形状、公転・自転運動をAFC、HS-H、TIRIで同時観測
2026年12月02日	詳細全球観測フェーズ（DCP）開始（約６週間実施）	8-20km	表層地形・内部構造・物性計測のための観測
2027年01月13日	2機の子機分離運用フェーズ（PDP）開始	20-30km	Juventas(1/16)分離 Milani(1/30)分離
2027年02月03日	接近観測フェーズ（COP）開始（約12週間実施）	4-22km	DART衝突によりできたDimorphosのクレータ観測、詳細な地形観測、2機の子機との3機同時運用での重力計測、自律接近運用のテスト
2027年04月28日	実験運用フェーズ（EXP）開始（約５週間実施）	2km以下	DART衝突によりできたDimorphosのクレータ形状観測
2027年06月	ノミナル運用期間終了（ミッション終了）	TBD	TBD（延長運用の実施は未定）

11月25日（JST）にドイツのベルリンで開催される
ESA主催のHera到着イベントで発表される予定

Hera到着後の運用・観測計画：TIRIの観測

■ 各フェーズでの観測計画。

■ 赤い四角：小惑星Didymosの連続観測、
青い線：一定時間間隔でAFC、HS-H、TIRIの同時撮像を実施
緑の四角：TIRIでもDimorphos上のクレータの連続撮像を行います。



まとめ

- HeraはESA主導の小惑星探査計画であり、二重小惑星DidymosとDimorphosを探査する.
- HeraはNASAのDARTと連携してプラネタリーディフェンスの技術実証を行うとともに、取得する貴重なデータから惑星科学研究にも貢献する。
- Heraは2024年10月7日にファルコン９で打ち上げられた。2026年11月に到着し、約半年間に渡って徐々に高度を下げながら二重小惑星DidymosとDimorphosの観測を行う。
- Heraには「はやぶさ2」TIRの後継機器であり、解像度と多バンド化に性能向上した日本の熱赤外カメラTIRIが搭載される。TIRIは熱撮像（サーモグラフィ）、暗視カメラ、多色分光カメラの機能を有する。
- TIRIは打上げ直後の地球・月の観測や、火星スイングバイ中の火星・衛星ディモスの観測を通じて機能・性能の評価を実施し、健全性が確認された。
- Hera搭載のTIRI以外の機器と連携し、TIRIでプラネタリーディフェンスに必要な情報取得、惑星形成過程の解明に向けた研究に貢献する。
- 「はやぶさ2」TIRと合わせて、複数小惑星の熱赤外撮像の日本独自かつ世界に先駆けてデータベースを構築してゆく。

略語集

略称	名称（英語）	名称（日本語）
AFC	Asteroid Framing Camera	小惑星フレーミングカメラ
AIDA	Asteroid Impact &Deflection Assessment	小惑星衝突・軌道修正評価
ASPECT	Asteroid Spectral Imaging Mission	小惑星分光撮像ミッション機器
COP	Close Observation Phase	接近観測フェーズ
DART	Double Asteroid Redirection Test	二重小惑星軌道修正テスト（ダート）
DCP	Detailed Characterization Phase	詳細全球観測フェーズ
ECP	Early Characterization Phase	初期全球観測フェーズ
ESA	European Space Agency	欧州宇宙機関
ESC	Early Characterization Phase	初期全球観測フェーズ
EXP	Experimental Phase	実験観測フェーズ
GRASS	Gravimeter for Small Solar system objects	太陽系小天体用重力計
HGA	High Gain Antenna	高利得アンテナ
HS-H	Hyper Spectral Imager on Hera	Hera用ハイパースペクトルカメラ
ISL	Inter Satellite Link	母船・子機間通信リンク
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	宇宙航空研究開発機構
JuRa	Juventas Radar	ユベンタス搭載レーダ
LRO	Lunar Reconnaissance Orbiter	ルナーレコネイサンスオービター
LGA	Low Gain Antenna	低利得アンテナ

略称	名称（英語）	名称（日本語）
LICIACube	Light Italian Cubesat for Imaging of Asteroids Cube	小惑星撮像用小型イタリア製キューブサット
MARA	Mascot Radiometer	MASCOT搭載の小型熱放射計
MASCOT	Mobile Asteroid Surface Scout	「はやぶさ２」搭載の小型着陸機
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米航空宇宙局
OCT	Orbital Control Thruster	軌道制御スラスタ
PALT	Planetary Altimeter	惑星探査用レーザ高度計
PDP	Payload Deployment Phase	子機分離フェーズ
RCT	Reaction Control　Thruster	姿勢制御スラスタ
RS	Radio Science	電波科学
SCI	Small Carry-on Impactor	衝突装置（はやぶさ２搭載）
SMC	Small Monitor Camera	小型モニタカメラ
SWB	Swing By	スイングバイ（重力を活用した軌道変更）
TIR	Thermal Infrared Imager (on Hayabusa2)	中間赤外カメラ（はやぶさ２搭載）
TIRI	Thermal Infrared Imager	熱赤外カメラ
VISTA	Volatile In Situ Thermogravimetry Analyser	揮発成分その場熱重量分析器（Heraではダスト計測で使用）
X-DST	X-band Digital Signature Transponder	X帯デジタル通信機

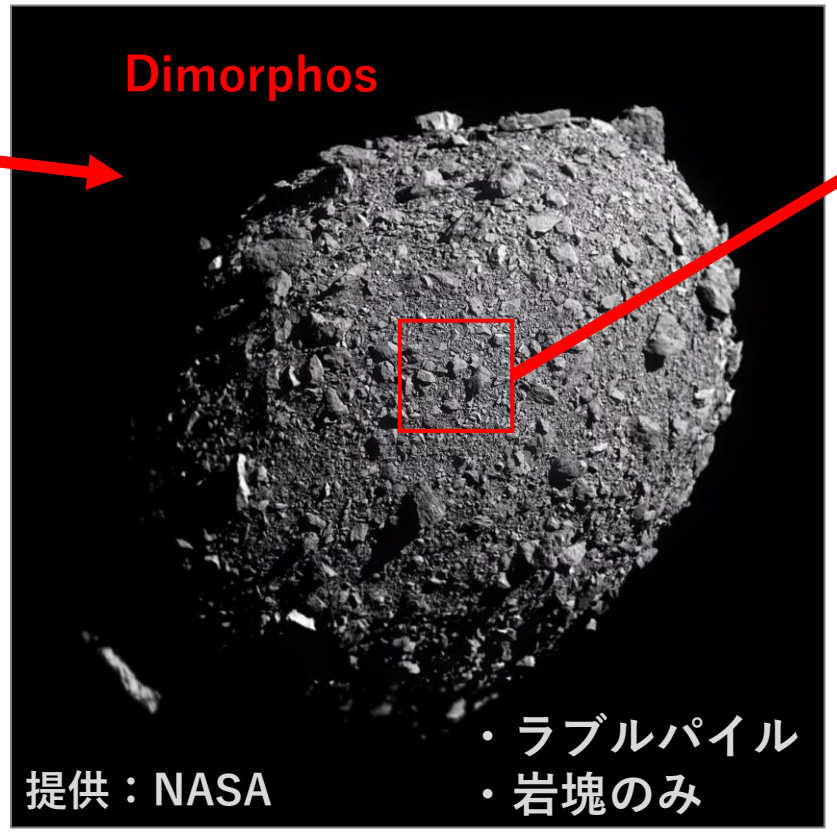
参考資料

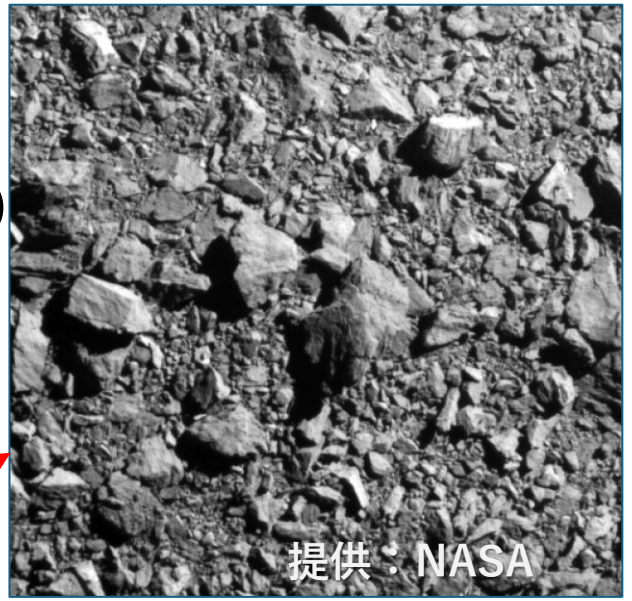
【参考】DART衝突

■DART衝突

- ◆ラブルパイル(瓦礫の寄せ集め)
- ◆公転周期変化：11h55mから11h22m（4.6%減少）









Heraへの日本の参加の経緯

◆ 長期にわたる日欧小惑星探査の連携・協力関係

- 「はやぶさ」後継ミッションの検討を共同で進めた。特に2005年頃からDon Quijote、MarcoPolo、OKEANOSの共同検討を継続的に実施してきている。

◆ 「はやぶさ２」への欧州参加・協力

- 「はやぶさ２」を推進するにあたり、欧州に小型着陸機MASCOTの10kgの搭載枠を提供した。MASCOTの科学搭載機器検討、開発全般、搭載I/Fに尽力し、成功に最大限協力した。
- MASCOTの延長で、帰還サンプル分析用に赤外顕微鏡MicrOmegaの提供(CNES)を受ける。
- MASCOT関係者および関係国の多数の欧州研究者を「はやぶさ２」の科学チームに招聘した。さらに、MMXへの欧州参加へと繋がっている。

◆ Heraへの招待と機器提供依頼

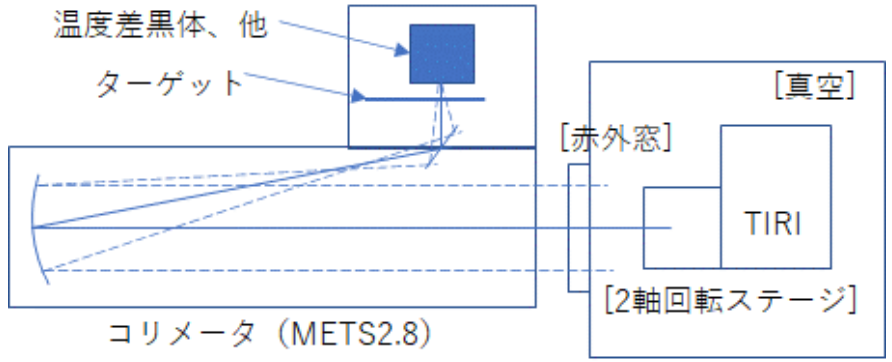
- 2019年11月のHera全体会議にて、追加搭載機器の候補として「はやぶさ２」での成功が評価された結果、熱赤外カメラの日本からの提供の可能性についてESAからISASに打診があった。
- 2021年2月、JAXA-ESA間でHeraに熱赤外カメラTIRIを搭載することで合意した。

【参考】較正試験

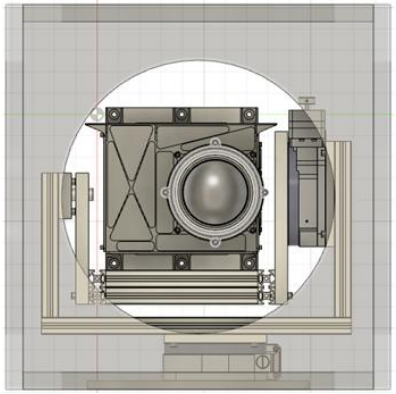
放射・幾何補正・試料測定

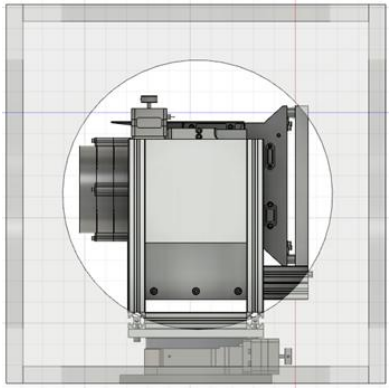
■コリメータ試験: ©JAXA

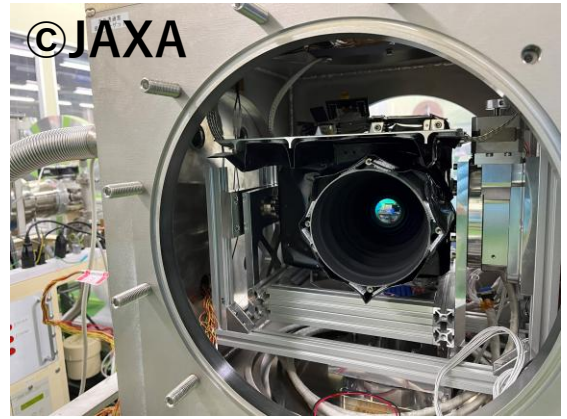
焦点調整、歪み、輝度補正、温度変換
温度範囲：-20～150℃



©JAXA

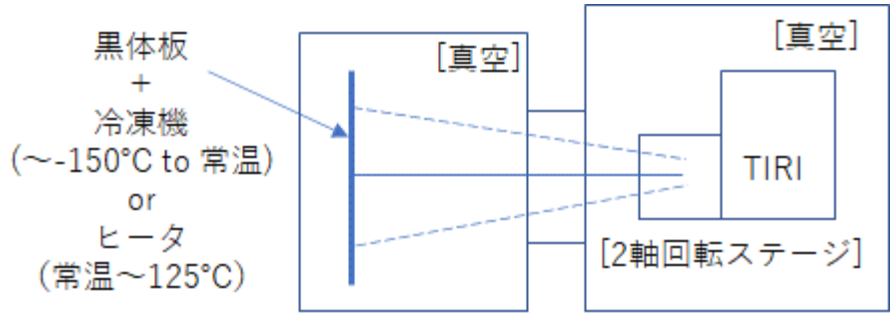






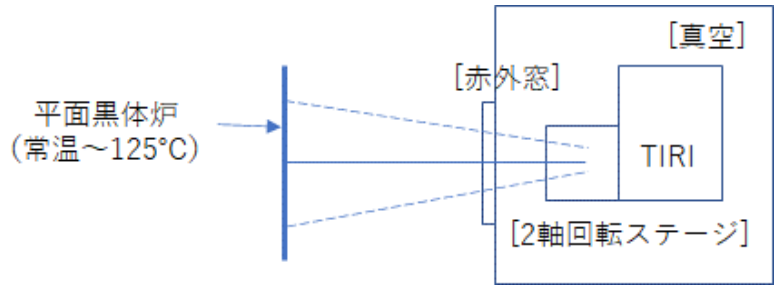
■低温プレート試験: ©JAXA

T=室温～-120℃



■高温プレート試験: ©JAXA

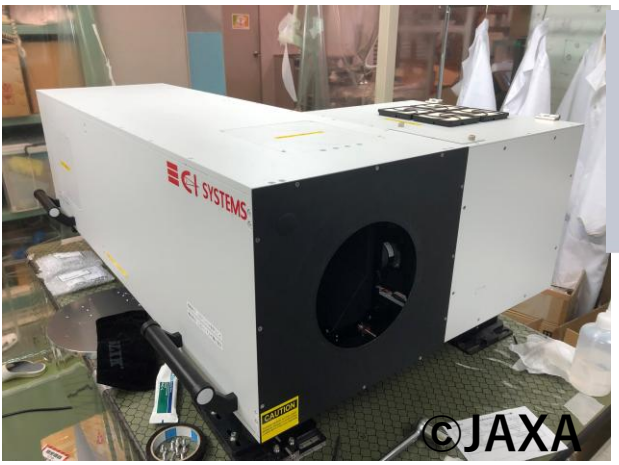
T=-20～+125℃



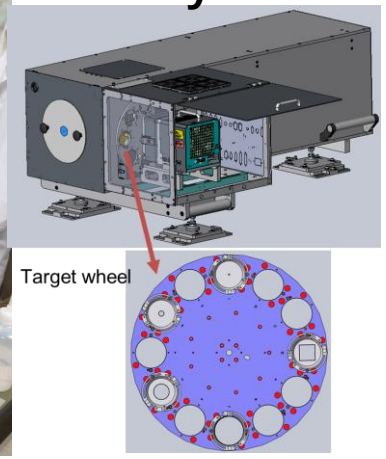
【参考】較正ターゲットと目的

ターゲット	温度範囲	ターゲット径	目的
コリメータ	-20℃ to +150℃	2.8°，1.5°，0.5°，0.1°	• 輝度較正 • 面積効果補正 • 歪み補正
平面黒体・高温プレート	+20℃ to +125℃	>13.3 ° 2.8°，6°，10°	• 輝度温度補正 • 面積効果補正 • 機器温度による出力依存性
低温プレート	-120℃ to +20℃	> 13.3°	• 輝度温度補正 • 機器温度による出力依存性
天然物試料（隕石・岩石・鉱物）	+50℃	2.8°	• 試料の組成による違い

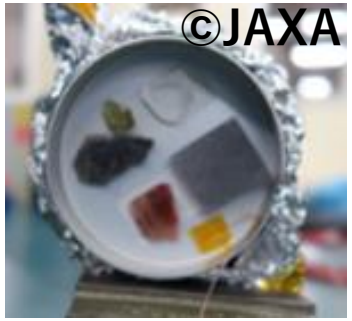
コリメータ



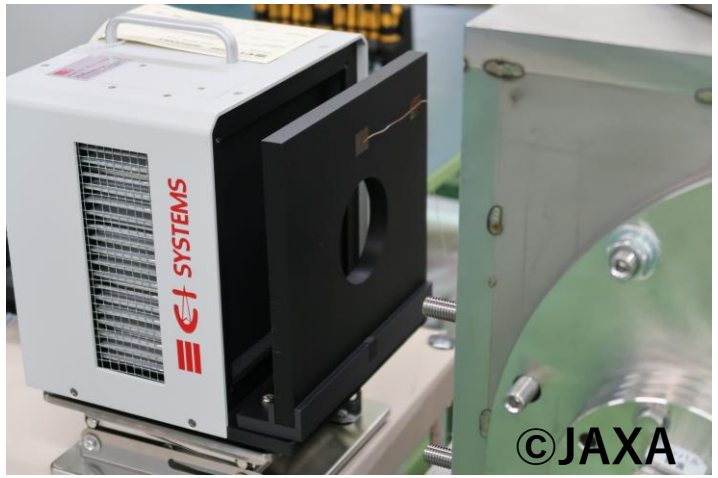
©IRSystems



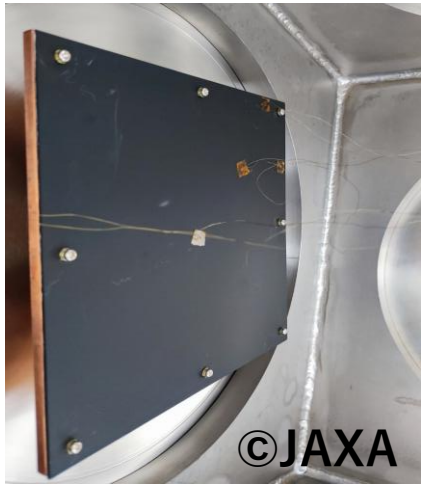
天然物試料



平面黒体



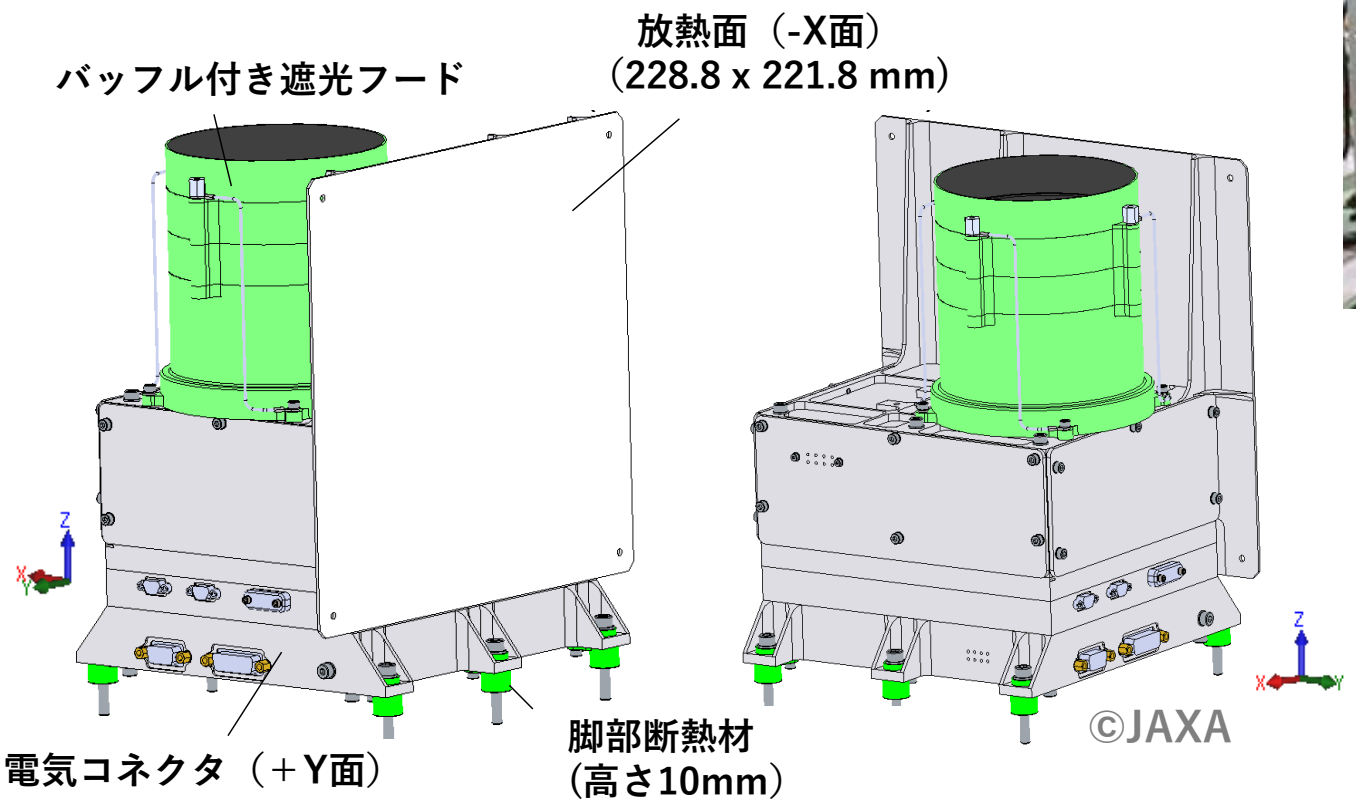
低温プレート

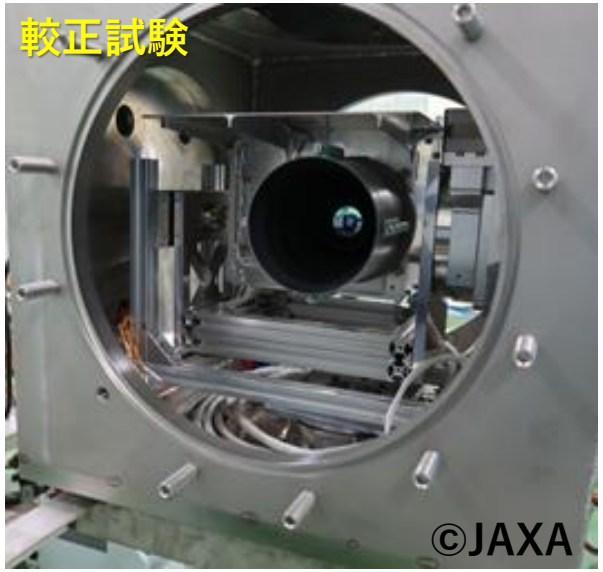


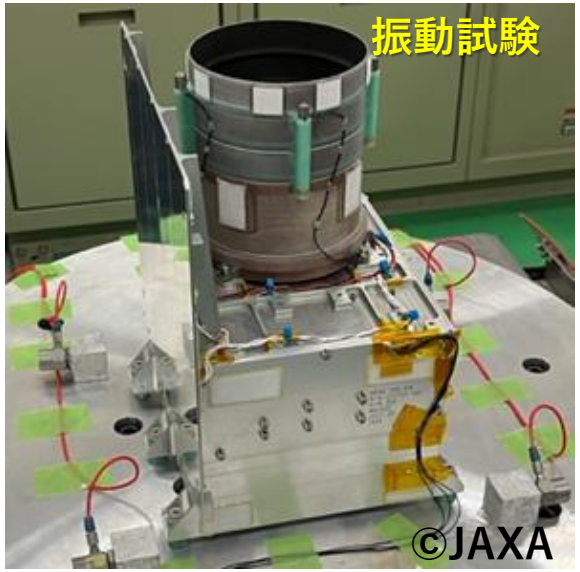
Hera搭載熱赤外カメラTIRI

■TIRI: 非冷却ボロメータ搭載の熱赤外カメラ

- ◆熱撮像：熱物性の探査
- ◆多色熱撮像：物質の情報







項目	機器仕様
機器寸法［mm］	本体：W180 x D150 x H250 包絡：W230 x D190 x H260
機器重量［kg］	3.94
消費電力［W］	16

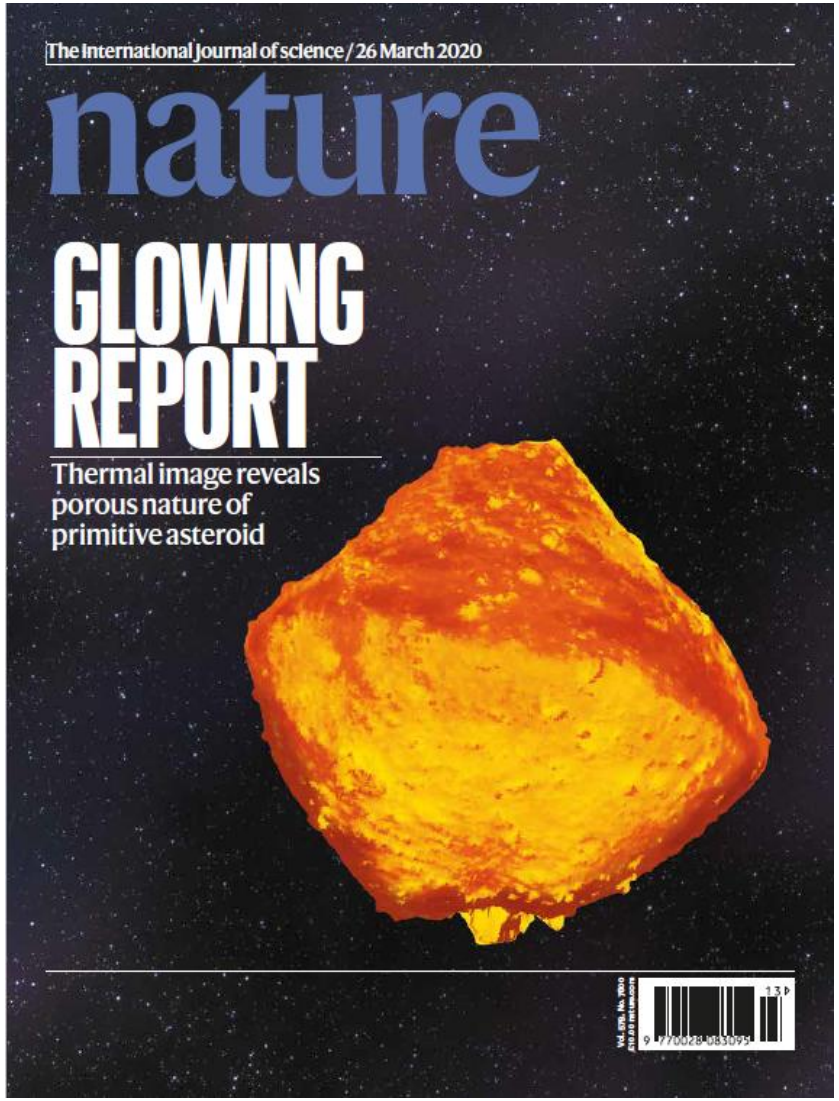
【参考】小惑星の熱撮像 ～「はやぶさ2」TIRの例 ～

「はやぶさ２」史上初!!小惑星熱赤外撮像の成果

■全球熱撮像
- ◆温度日変化：着陸地点の選定
- ◆熱慣性マップ：低熱慣性の岩塊で覆われ、高空隙な物質であることを示唆
  [Okada+, Nature 2020]
- ◆夜側の撮像: 完全な形状モデル作成

■局所熱撮像
- ◆個別の岩片と岩塊の熱物性を徹底調査
- ◆低温・高温のスポット発見
  [Okada+, Nature 2020;
  Sakatani+, Nature Astron. 2021]
- ◆表層の特徴的な地形の検知

■ Nature 579 (2020)表紙



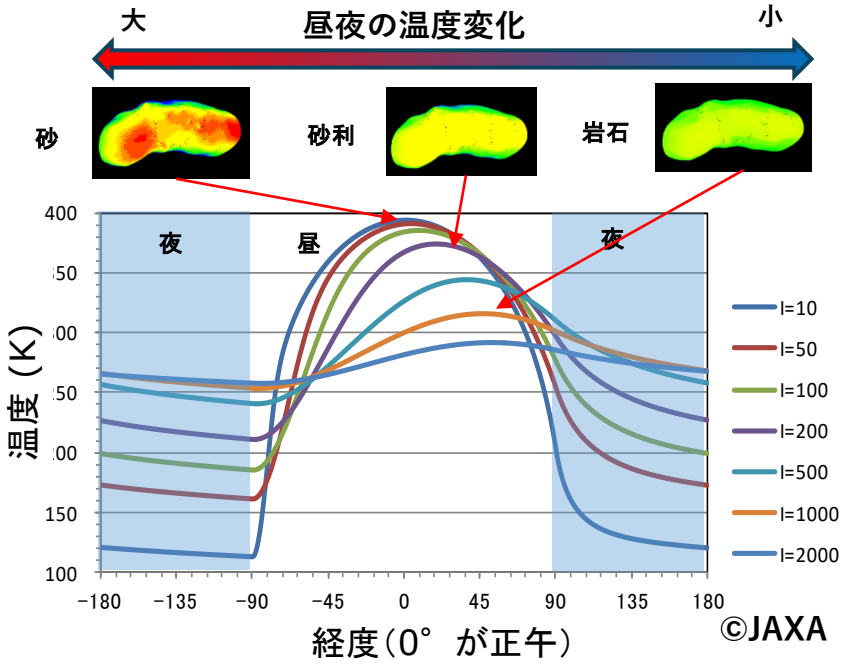
©Nature

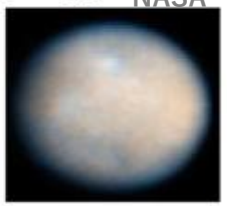
小惑星の熱撮像 ～「はやぶさ2」TIRの例 ～

■ 熱撮像の原理

熱慣性Γ
(Thermal Inertia)
$\propto (\kappa \rho c)^{0.5}$

κ：熱伝導率
ρ：バルク密度
c：比熱

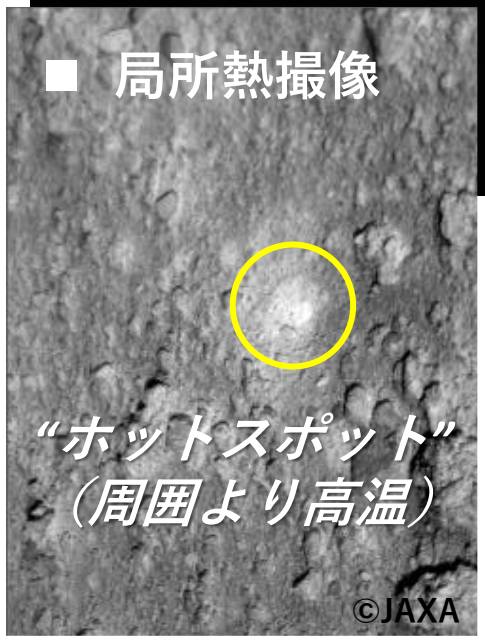


25143 イトカワ	433 エロス	月	1 セレス
Γ = 600 ©JAXA	Γ = 150 NASA	Γ = 50 NASA	Γ = 10 NASA
			
岩塊と砂利のみで覆われる	より細粒で厚いレゴリス層	非常に細粒からなるレゴリス層	低温で非常に細粒で低密度のレゴリス

■ 全球熱撮像



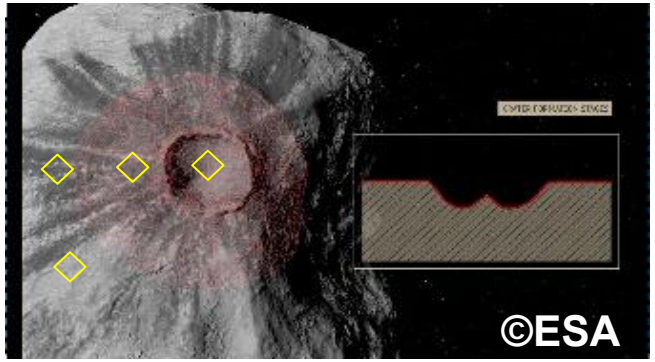
■ 局所熱撮像





小惑星の多色熱撮像

■場所による組成の差異を調べる
- ◆Didymos vs Dimorphos
- ◆DART クレータの内部 vs イジェクタ堆積物 vs 外部

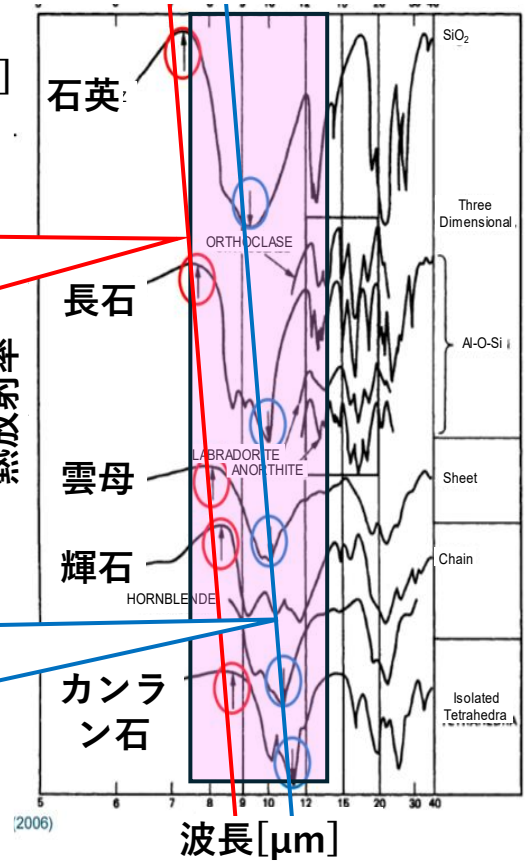


■ 波長vs熱放射率とCF・RFの関係

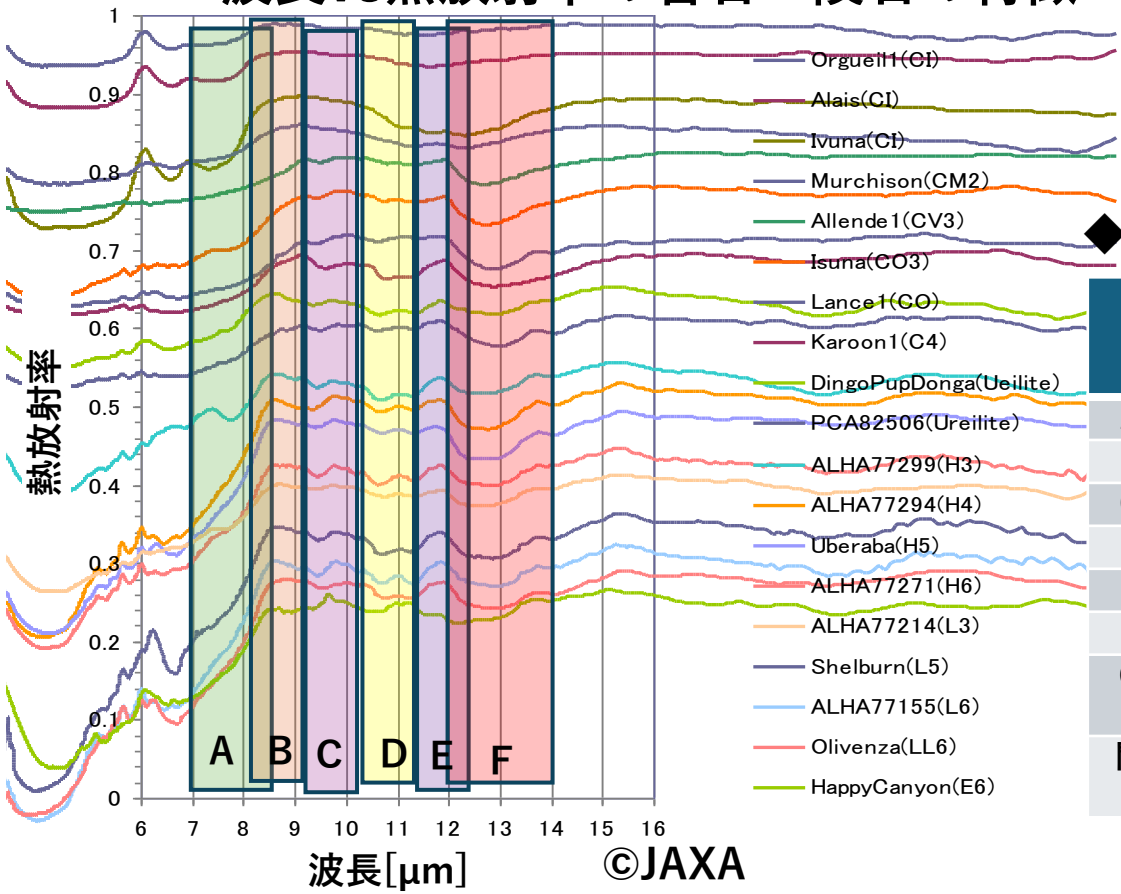
[Hunt+, 2015]

Christiansen Feature (CF)：波長が酸性度(SiO_2量)に依存する

Reststrahlen Feature (RF)：波長と深度が酸性度と結晶化度(粒径)に依存する



■ 波長vs熱放射率の岩石・隕石の特徴



©JAXA

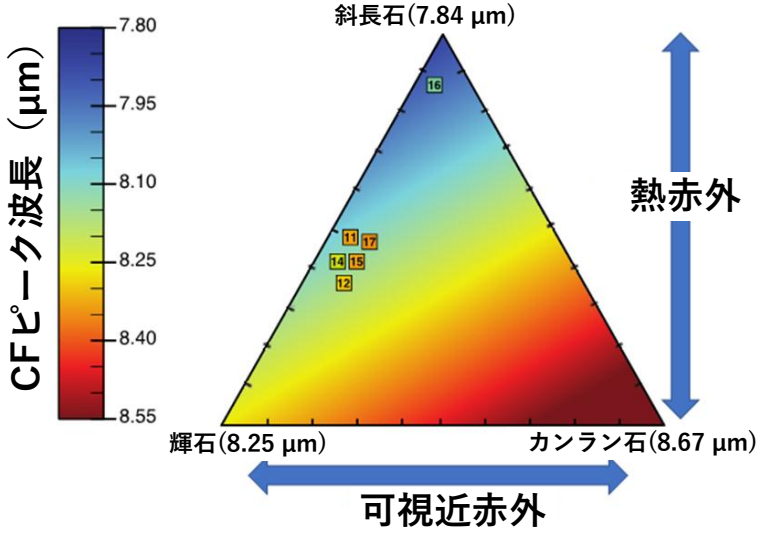
◆TIRIのフィルタ

#	中心波長[μm]	波長幅[μm]
A	7.8	1.8
B	8.6	1.0
C	9.6	0.8
D	10.6	0.8
E	11.6	0.8
F	13.0	2.0
G	8.0 – 14.0	6.0
閉	シャッタ・温度標準	

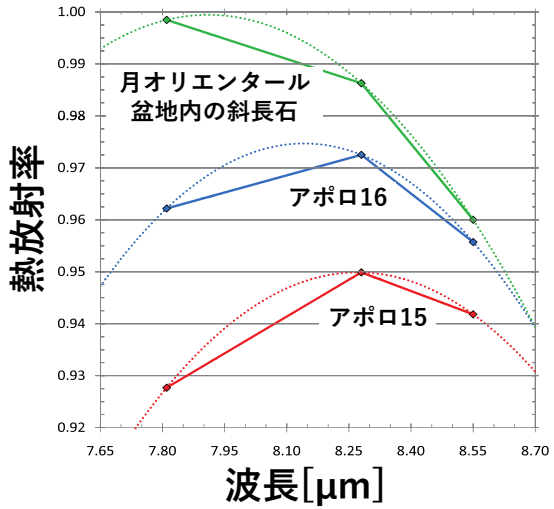
【参考】熱赤外多色分光観測の実例

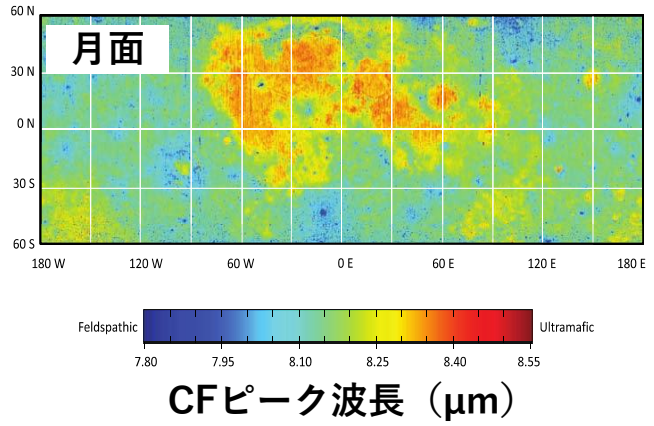
◆可視近赤外と熱赤外は相補的：

- 可視・近赤外分光
  - 鉱物中の鉄２価イオンの量（Fe^{2+}）
  - 宇宙風化（表層数10nm）に敏感
- 熱赤外分光
  - 岩石の酸性度（SiO_2量）
  - 熱変成度（結晶サイズ）

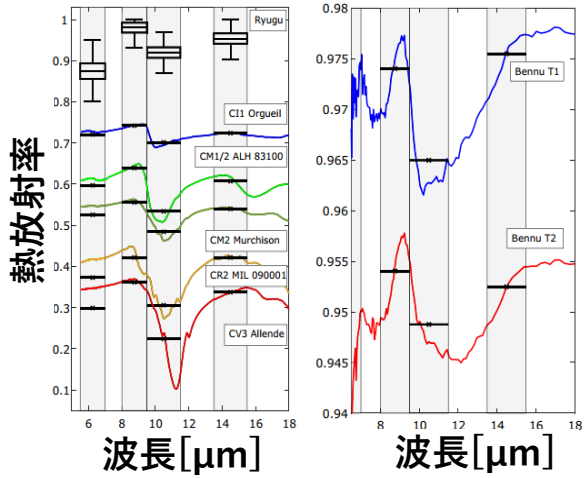


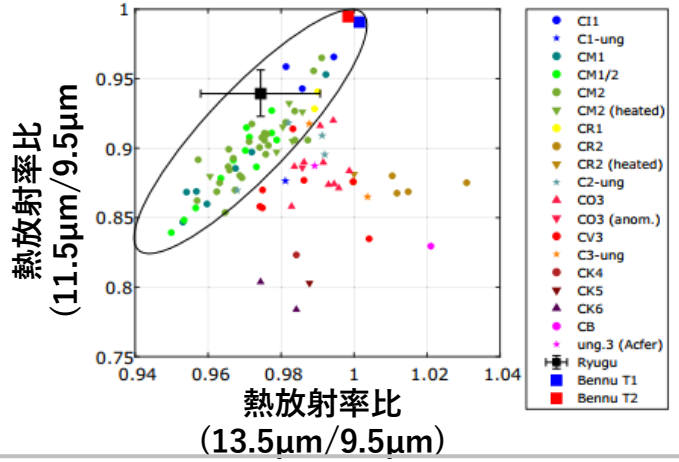
■月面
LRO/Diviner
[Greenhagen+, 2010]





■リュウグウ試料/隕石
Hayabusa2/MASCOT/MARA
[Hamm+, 2022]



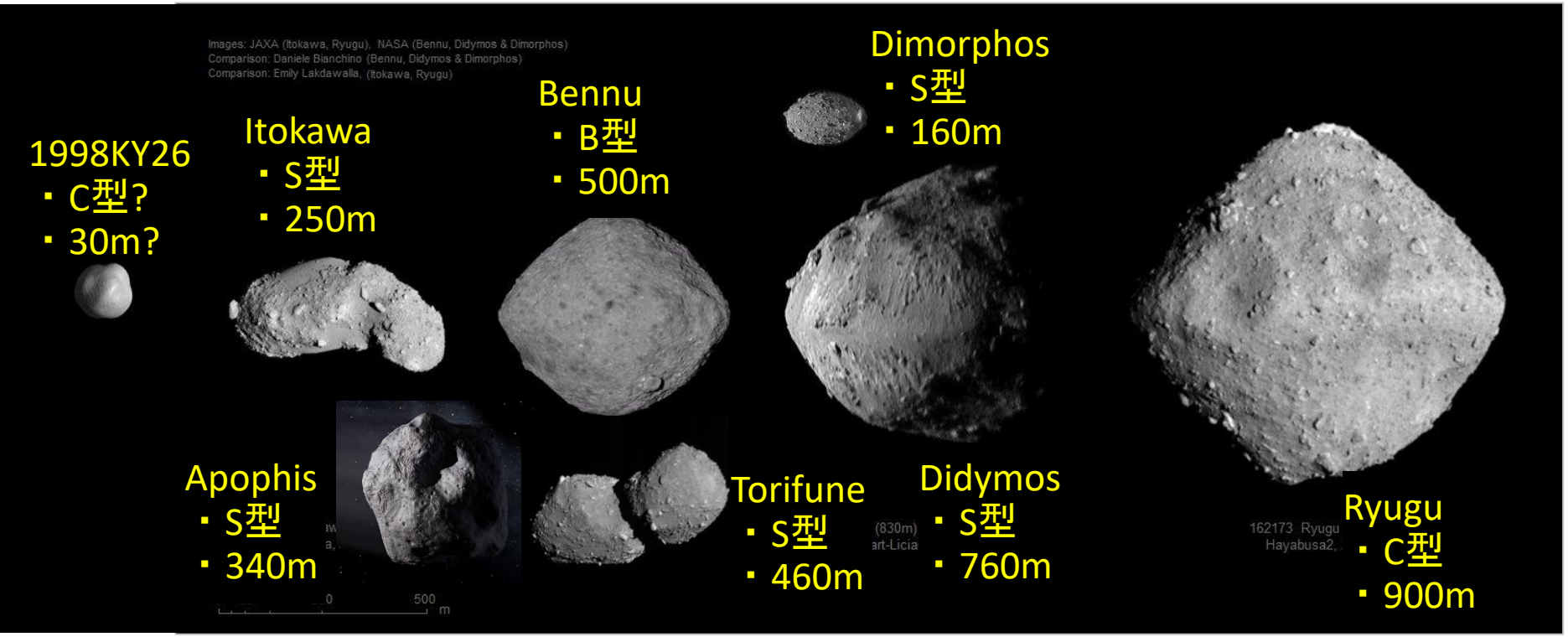


Hera: 惑星科学／比較小惑星物性学

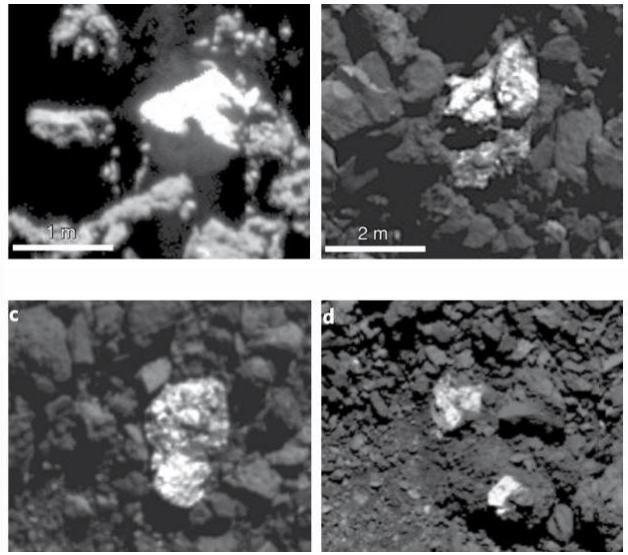
■小惑星の形成・進化過程
- 天体のサイズ依存性
- スペクトル型依存性
- 二重小惑星の形成過程
- 衝突科学／クレータ則

■小惑星の物性
- 岩塊は多孔質 or 稠密？
- 岩塊ごとの差異：硬さ、密度
- 熱モデル → 軌道・自転変動

■組成
- DidymosとDimorphosの差異？
- 地域分布？
- 特殊な岩石？
- 宇宙風化？



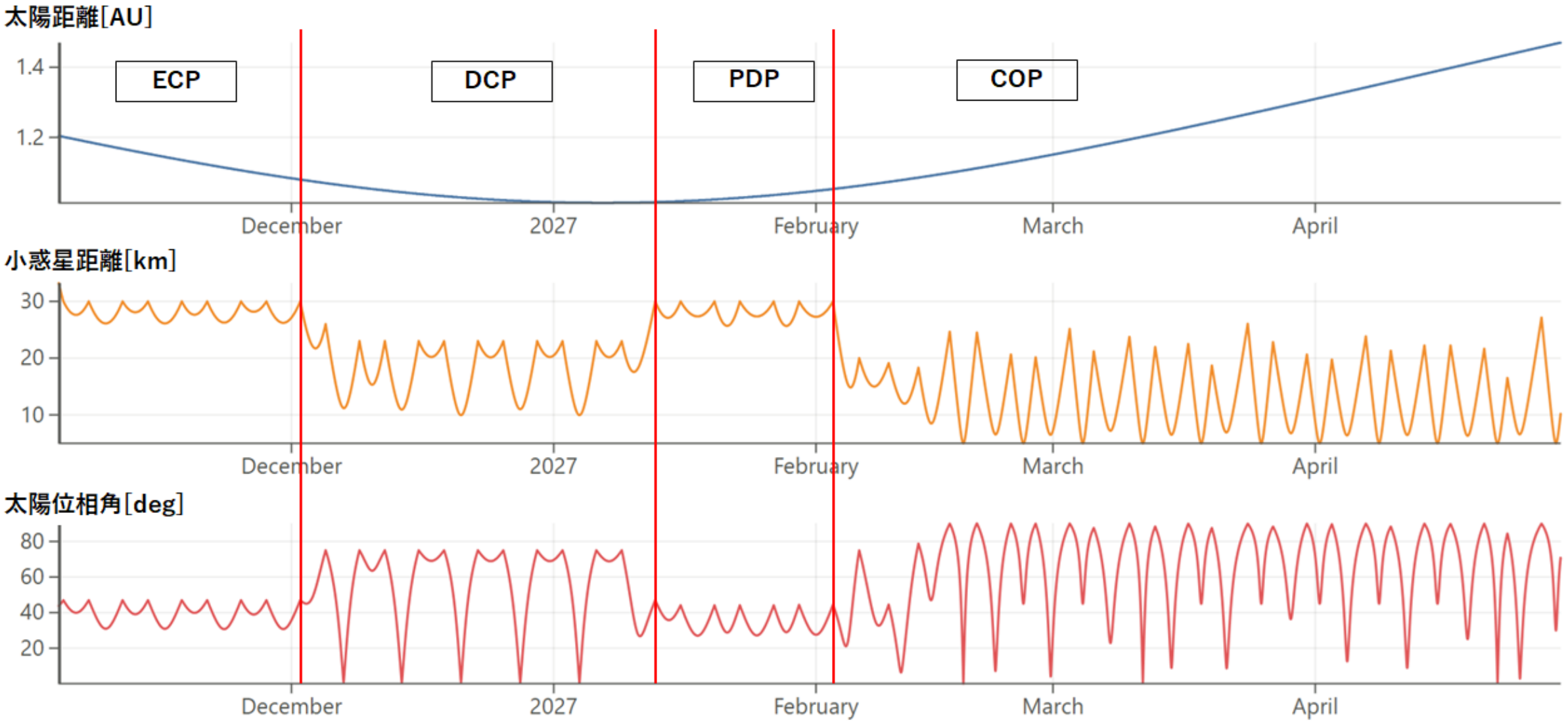
◆外来の岩塊？
リュウグウ，ベンヌともに発見されている



[Tatsumi+,2021]

Hera到着後の運用計画

■ ECPからCOPまでの太陽距離、小惑星距離、太陽位相角の変化



プラネタリーディフェンス

2024年10月1日

JAXA プラネタリーディフェンスチーム

概要

- 天体の地球衝突を扱うプラネタリーディフェンス（**惑星防衛**、スペースガード）の活動が国際的に活発になってきている。
- JAXAでは、今年度4月より、組織横断的な**プラネタリーディフェンスチーム**が設置され、プラネタリーディフェンスに関連する課題に対応している。

  （ただし、これまでもJAXAでは、プラネタリーディフェンスに関連する作業や対応は行っていた：探査、観測、国際対応など）
- プラネタリーディフェンスの動向として重要なこととしては、直近ではESAの探査機Heraの打ち上げがある。また、NASAもスペースから地球接近天体を発見するNEO Surveyorを2027年に打ち上げ予定である。
- 2029年の小惑星アポフィスの地球接近に向けて、国際的な議論が高まってきている。

プラネタリーディフェンスとは

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
ロシア・チェリャビンスク隕石



(©JSGA)

・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

地域的被害

■6550万年前
恐竜を含む生物の大絶滅



(©池下章裕)

・約10kmの天体衝突によると推定
・恐竜を含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]

プラネタリーディフェンスで行うこと

- 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

NEO = Near Earth Object
地球接近天体

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
※9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

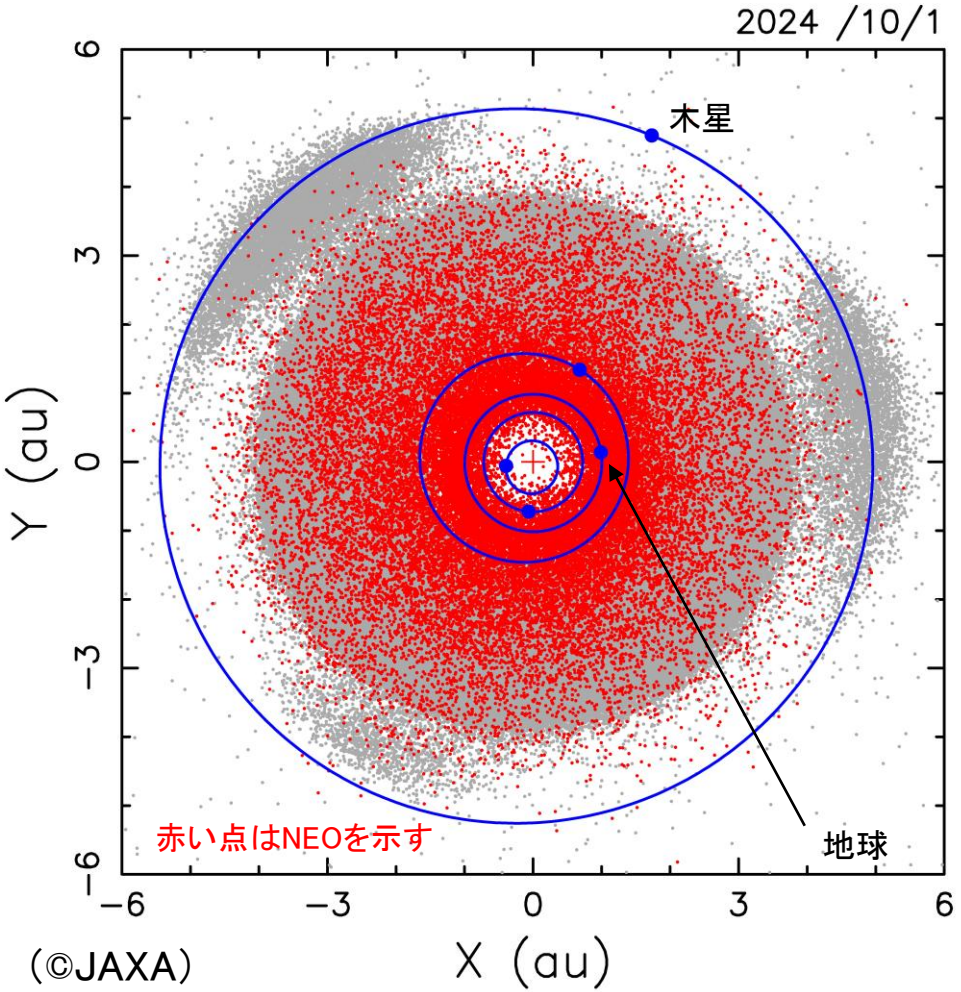
被害を最小化する
※国際会合等における議論

国際的ルールの策定/国際協力

※国連宇宙空間平和利用委員会における議論

小惑星・彗星の発見数

小惑星の分布



現在(2024年9月24日)、発見され軌道が求められている小天体:

小惑星:1,382,205個

彗星　:　4,560個

(確定番号付き小惑星:720,000個)

地球軌道に接近する小惑星:35,800個

(NEO:Near Earth Object)

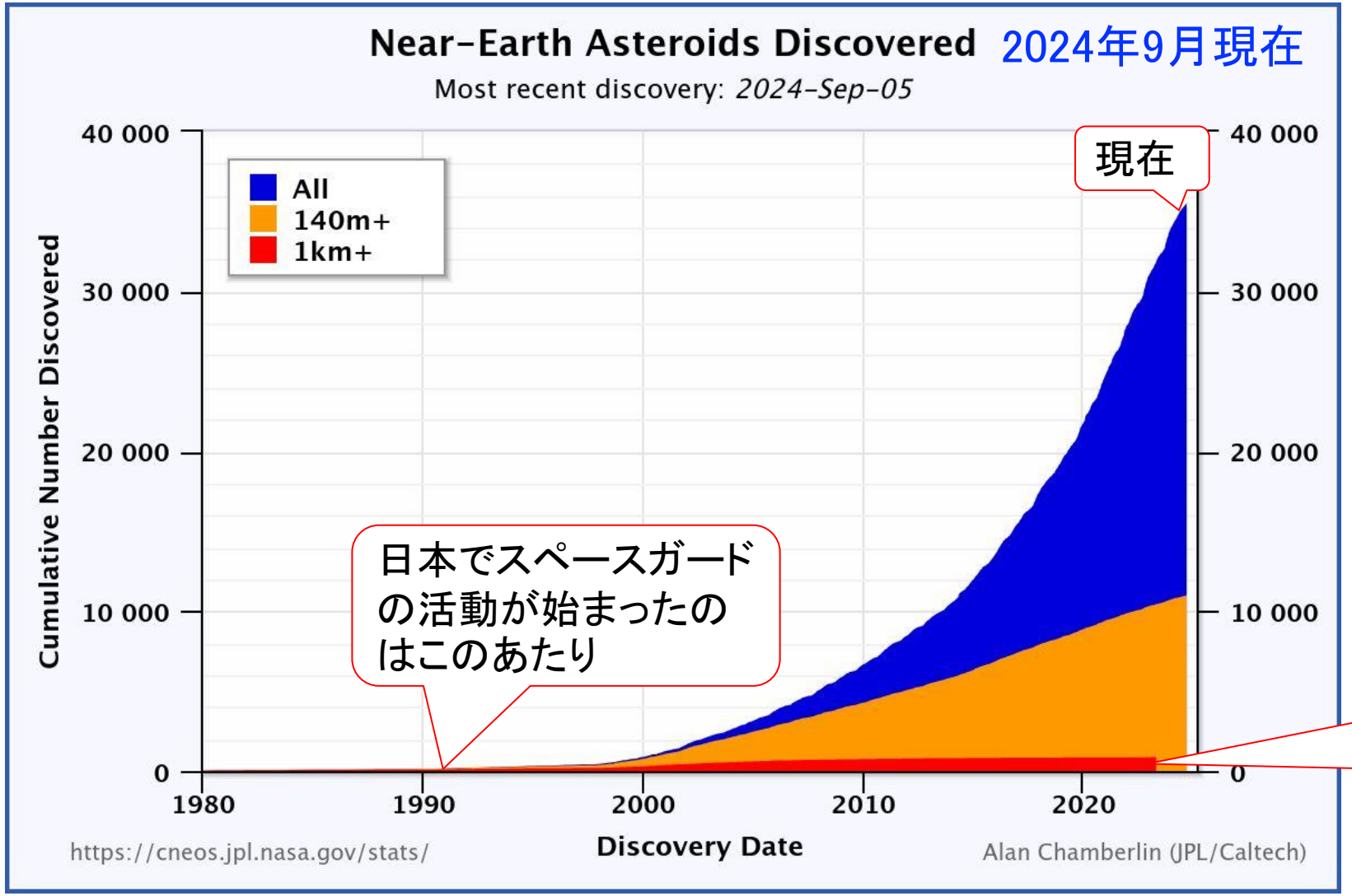
国際天文学連合 マイナープラネットセンターのWebより
https://minorplanetcenter.net/mpc/summary

地球衝突が予測され実際に衝突した天体

隕石予報ができる！

	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
9例目	2024 RW1	2024年9月4日	1m	約11時間	フィリピン	Catalina Sky Survey

地球接近小惑星（NEO）の発見数の推移



大きさが数百m、数十mの小惑星は、多数の未発見ものもがある。

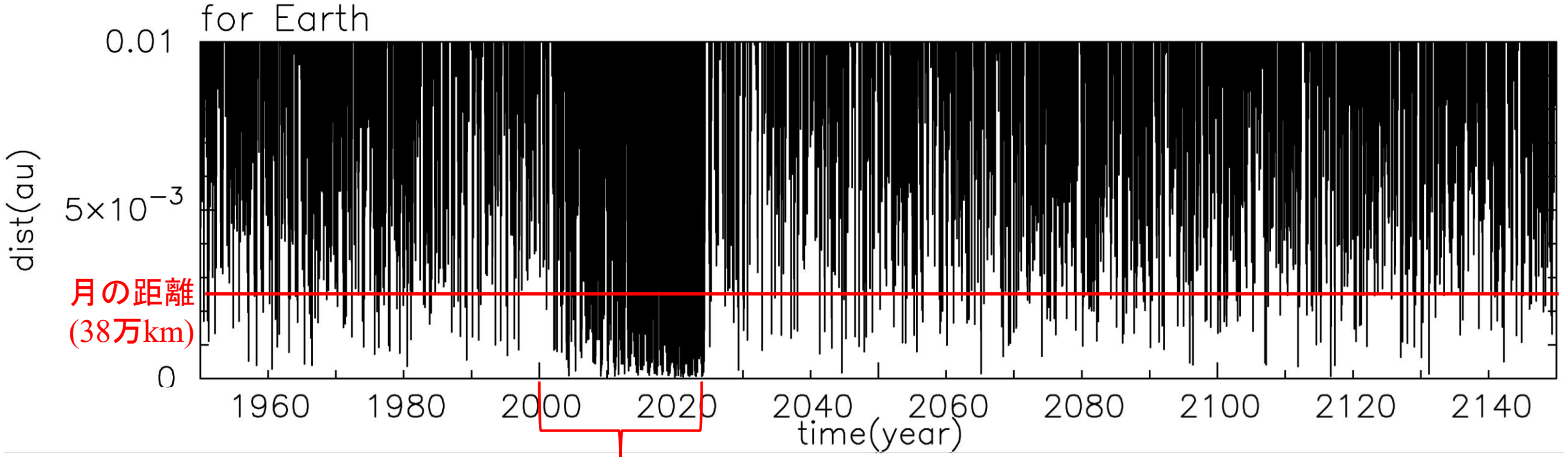
恐竜を滅ぼした大きさ10kmの小惑星はほぼ発見されていて、近い将来の衝突は心配しなくてよい。

大きさが1km以上のNEOの発見個数は増えていない

JPLのWebより https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html

小惑星の地球接近状況

- 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。）

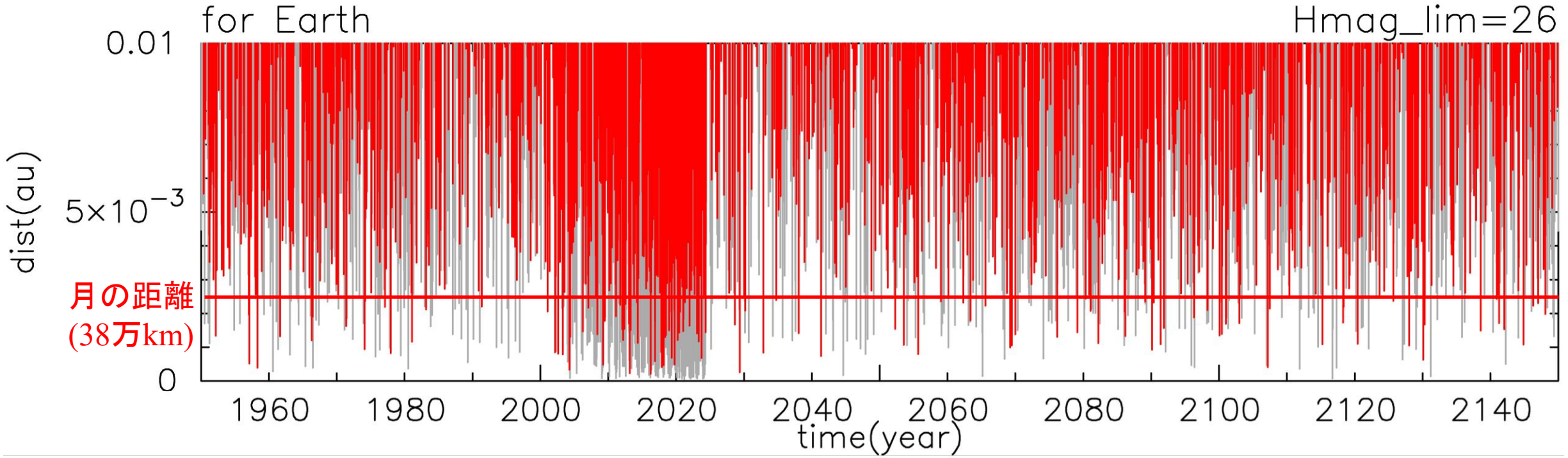


NEOの観測が積極的に行われるようになったため、
地球に接近する小惑星がたくさん発見されている。

（©JAXA）

チェリャビンスク隕石レベル以上の地球接近状況

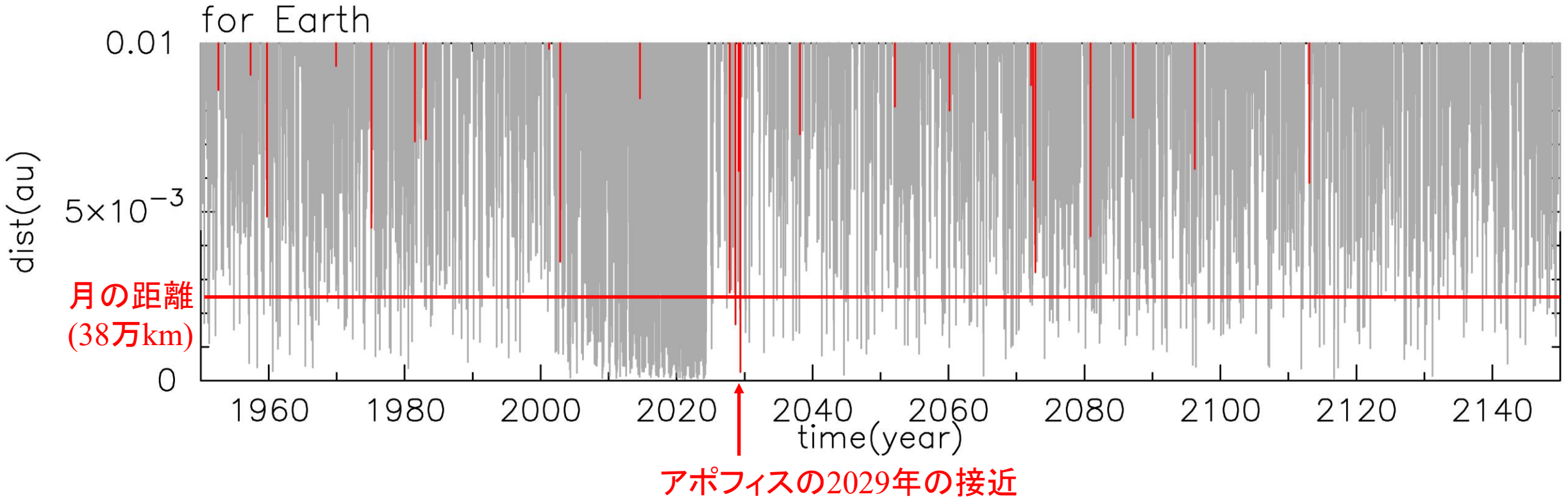
- チェリャビンスク隕石レベル以上の被害が生じると思われるケースを赤色で示す。
- 小惑星の大きさは正確に分からない場合が多いので、ここでは小惑星の絶対等級が26.0等かそれより明るいものを赤色で示した。（小惑星のアルベドを0.25とすると、絶対等級26.0等は大きさ17mの小惑星に相当する。）



（©JAXA）

アポフィスサイズの小惑星の地球接近状況

※絶対等級が19等より明るいもの（＝大きさがアポフィス（約340m）以上）を赤で示す。

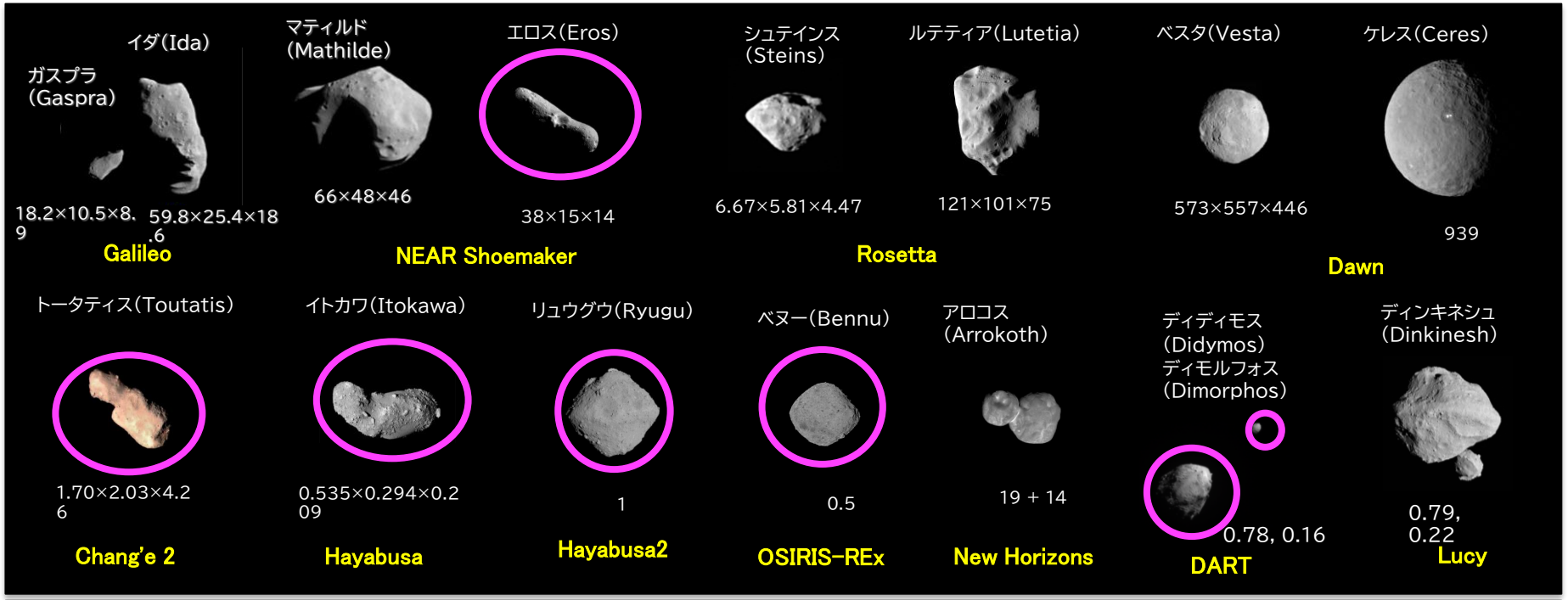


（©JAXA）

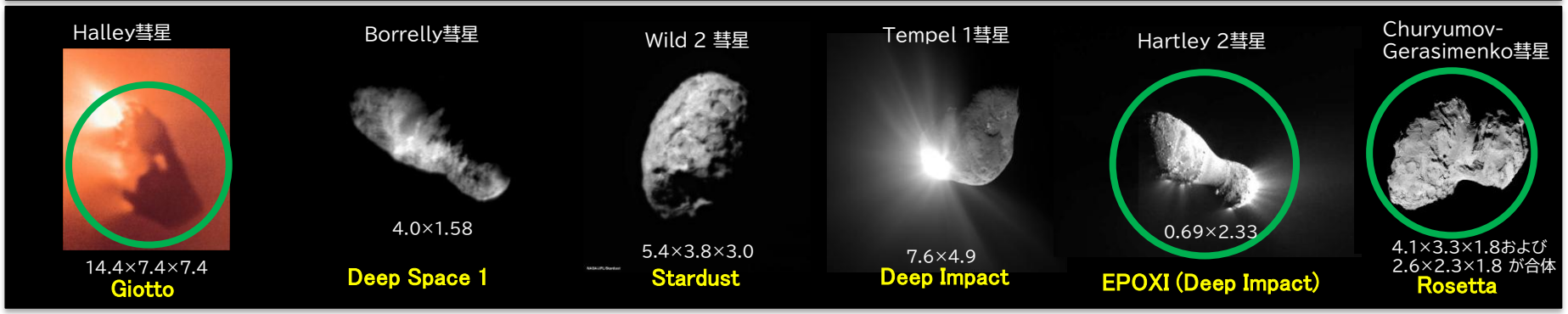
NEOの探査近状況

■ これまで7つの地球接近小惑星（ピンク）、3つの地球接近彗星（緑）に探査機が接近し探査。うち2つは、<u>日本によるイトカワとリュウグウの探査</u>である。

小惑星



彗星



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。

画像クレジット：
NASA：Galileo, NEAR Shoemaker, Dawn, OSIRIS-REx, New Horizonws, DART, Lucy, Deep Space 1, Stardust, Deep Impact, EPOXI
©ESA：Rosetta, Giotto
©JAXA：Hayabusa, Hayabusa2
©CNSA：Chang'e 2

NEOの地球衝突回避の方法

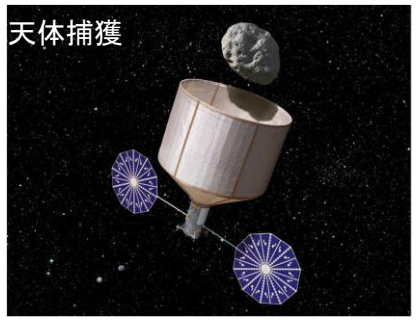
■衝突回避の方法
- インパクト：天体に物体を衝突させて軌道を変える←実証済
- グラビティー トラクター：引力で牽引する
- 核エネルギー：軌道を変える

} 可能性あり（右図に表示）

- レーザ光線、太陽光の照射：軌道を変える
- 太陽光圧、熱輻射の利用：軌道を変える
- マスドライバー：天体から物質を放出し、軌道を変える
- 天体捕獲：小さな天体の場合

※現時点で技術的に実証された方法は「インパクト」← DART

小惑星が小さい場合

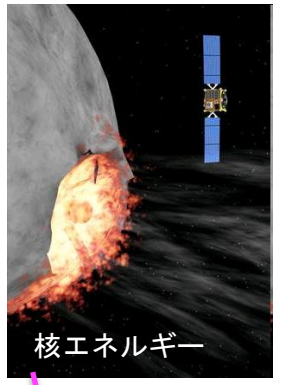


（提供：NASA）



（©ESA）

Credit: D. DURDA, FIAAA/B612 FOUNDATION



（©ESA）



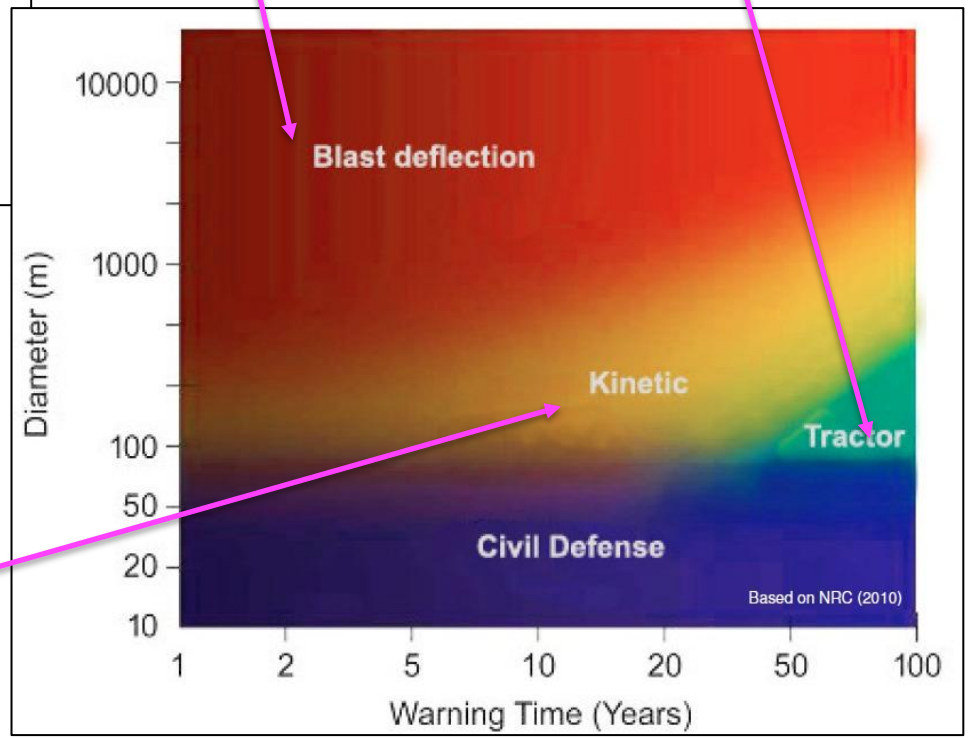
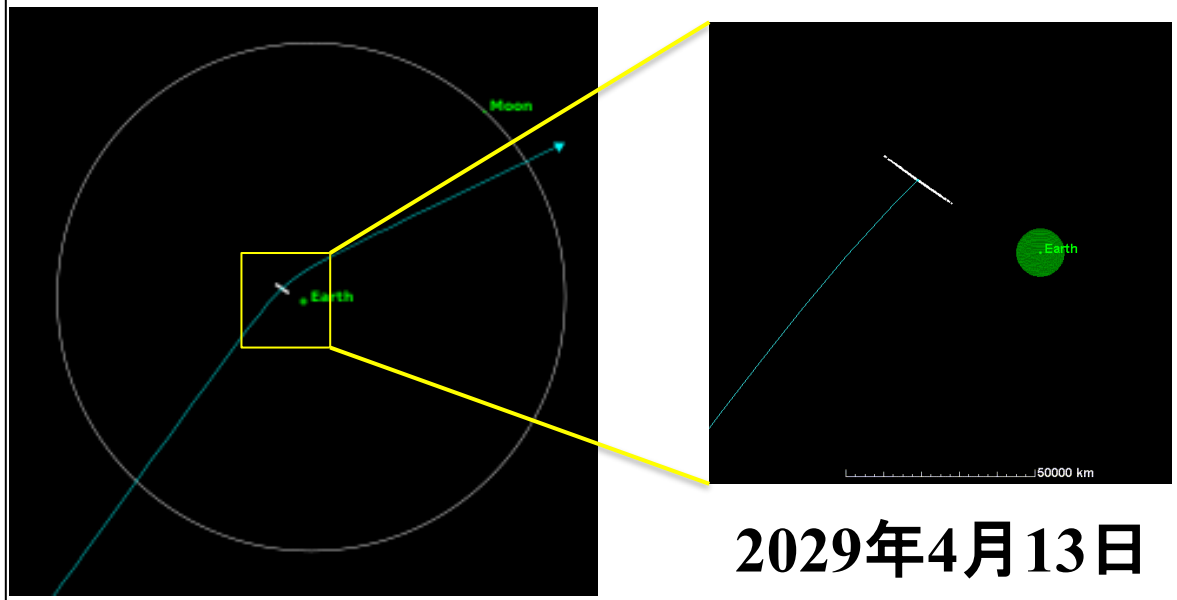


Image courtesy of Tim Warchocki

小惑星（99942）アポフィスの地球接近

- 2004年6月19日に発見され、6月20日と2晩観測された。
- 2004年12月18日に再発見されたときに軌道が計算されると、2029年4月13日に地球に衝突する可能性があることが判明。当時、大きさが約400mと推定されたため、大きな話題に。
- その後の観測により、2029年4月13日の地球衝突は否定されたが、2036年4月13日の地球衝突の可能性が指摘。最終的には、2036年の地球衝突も否定された。

- 2029年4月13日（金）、21:46UTC（日本時間で4月14日、06:46）に、地表から約32,000kmのところを通過。
- 推定直径340mの天体がこのように地球に近い場所を通過するのは観測史上初めて。
- 現在知られている天体については、今後7500年間は起こらないという見解あり。
- 地球接近時に何が起こるかが注目。

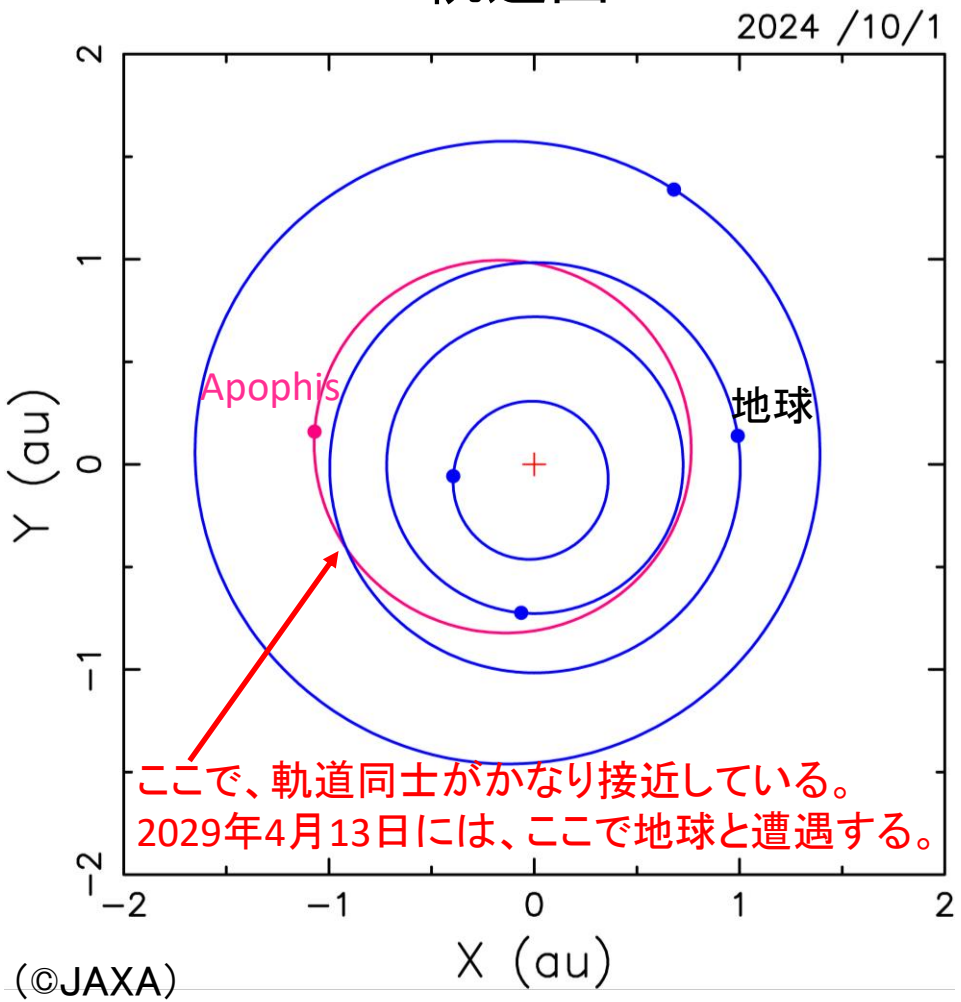


2029年4月13日

（提供：NASA）

小惑星（99942）アポフィスについての情報

軌道図

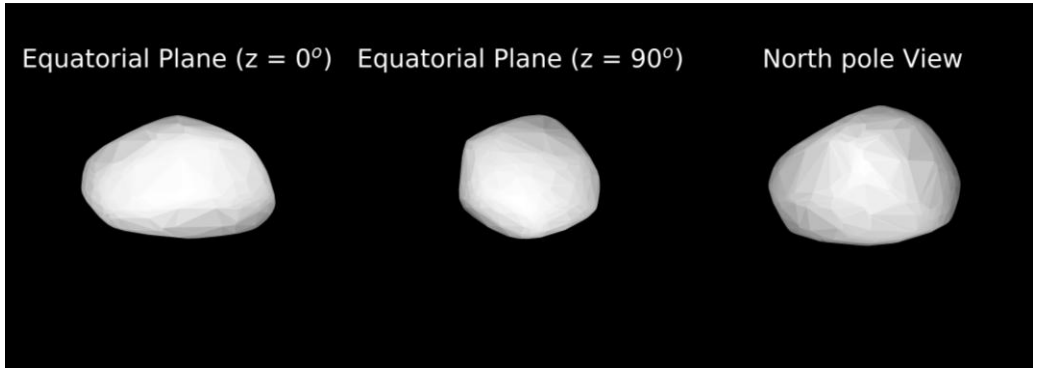


(©JAXA)

特徴

推定直径	340m
自転周期	30.56時間
スペクトル型	Sq
公転周期	324日

形状モデル



H.-J. Lee et al. A&A 661, L3 (2022)

アポフィス探査の計画・検討

米国

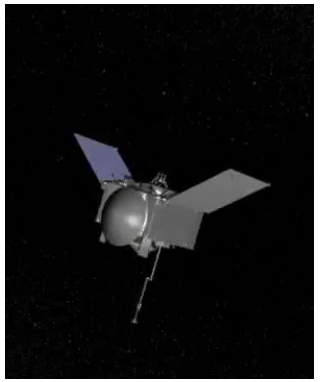
小惑星サンプルリターンミッション「オサイリス・レックス（OSIRIS-REx）」

↓

地球帰還後、ミッションを延長：

「オサイリス・アペックス（OSIRIS-APEX）」　OSIRIS Apophis Explorer

アポフィスに向かい、ランデブー（ただし、アポフィス地球最接近の後に到着）



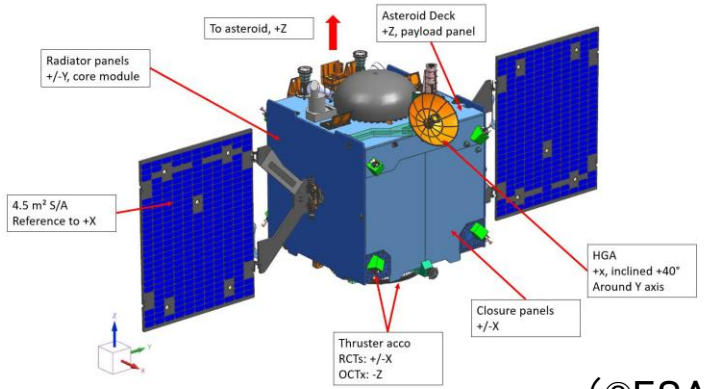
（提供：NASA）

ヨーロッパ

「ラムセス（RAMSES）」（ESA-JAXA共同ミッション）

アポフィスが地球に接近する前に到着する

- Hera探査機と同様な探査機
- 2028年打上げ

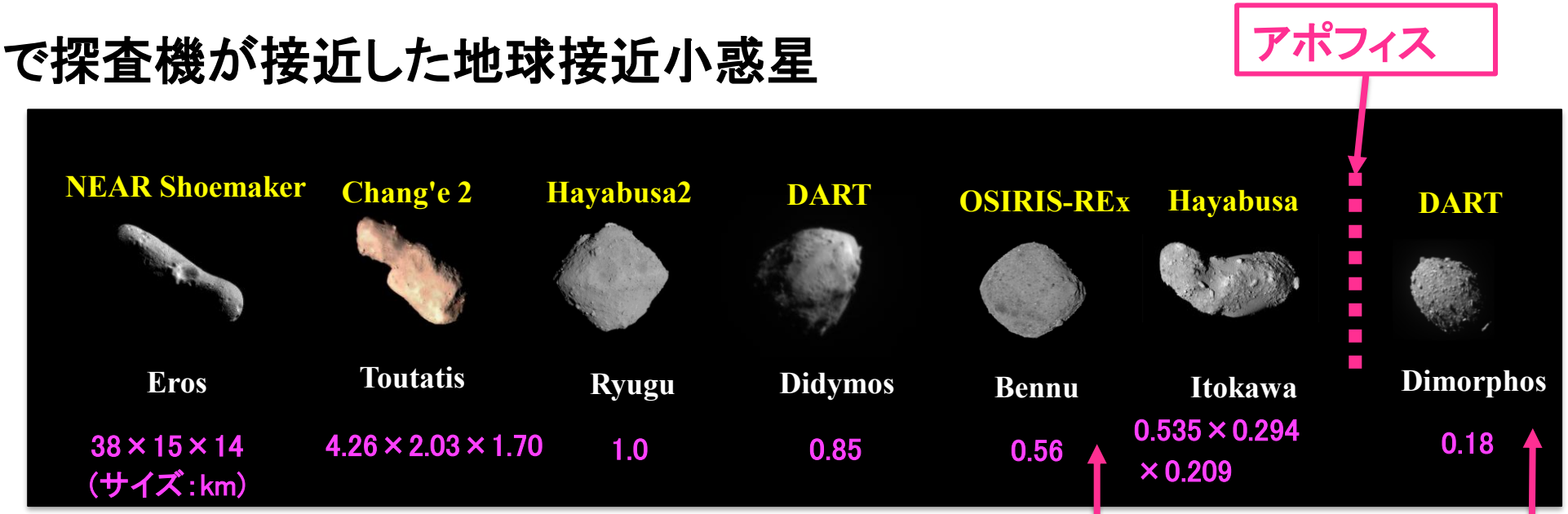


（©ESA）

アポフィスの重要性

・地球に接近したときに、地球の潮汐力でどのような変化が起こるか？
・大きさが300mくらいの天体がどのようなものか？

これまで探査機が接近した地球接近小惑星

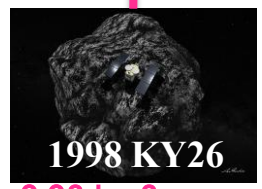


画像クレジット:
NASA: Eros, Didymos, Bennu, Dimorphos
©JAXA: Ryugu, Itokawa
©CNSA: Toutatis

Hayabusa2#の探査予定小惑星 →



(©池下章裕)



プラネタリーディフェンスに関するJAXAの活動

■組織
- 2024年4月からプラネタリーディフェンスチームが設立

■観測
- JAXA：重ね合わせ法による高速移動天体の発見観測
- 美星スペースガードセンター（BSGC）におけるNEO観測
- **APAON（Asia-Pacific Asteroid Observation Network）**

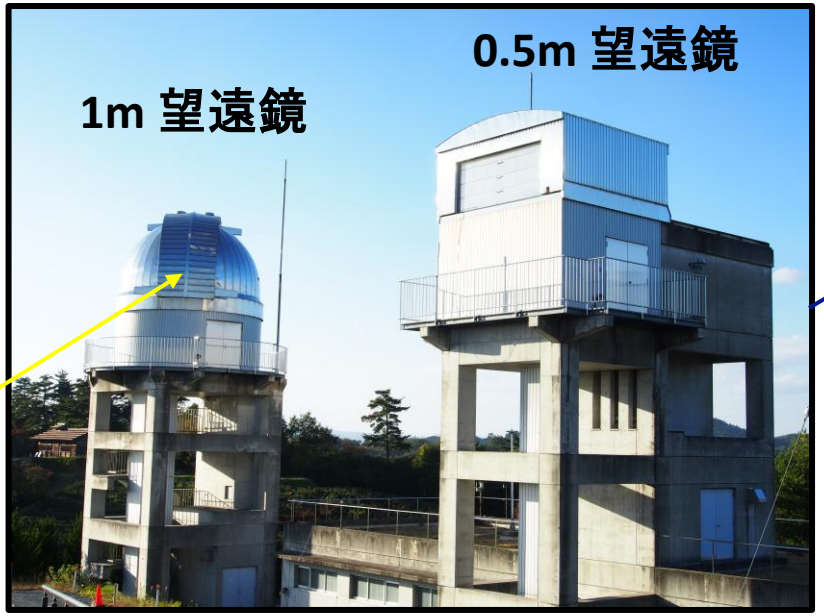
■ミッション
- 「はやぶさ」「はやぶさ2」「はやぶさ2拡張ミッション」
- Heraミッションへの参加
- 小惑星軌道変更の検討：「はやぶさ2」の初期検討において
- NEO観測衛星の検討

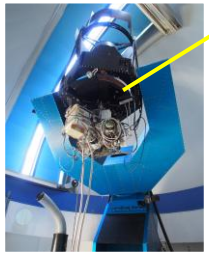
■国際対応
- SMPAG、IAWN、PDC、Asteroid Day

SMPAG: Space Mission Planning Advisory Group
IAWN: International Asteroid Warning Network
PDC：Planetary Defense Conference
（p.46参照）

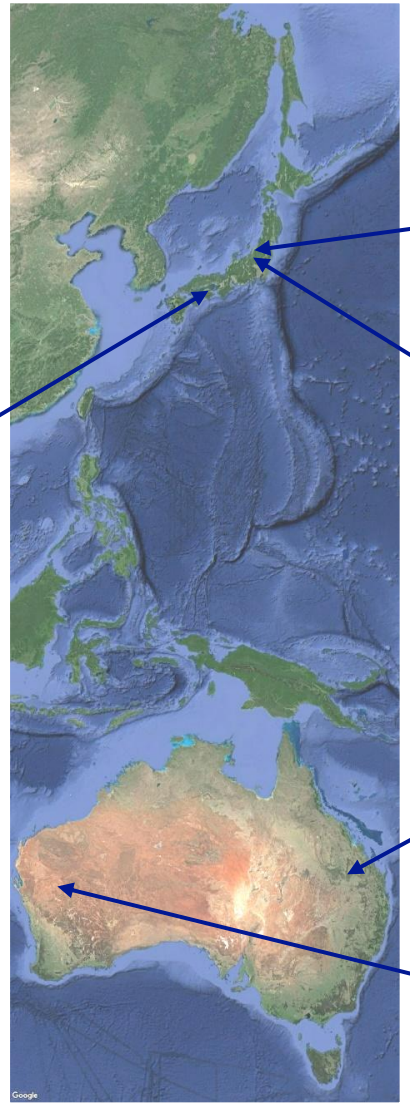
JAXAの小惑星観測施設

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）





・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

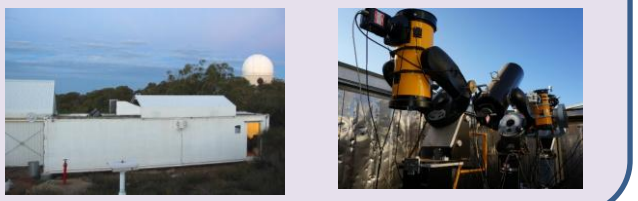
入笠山光学観測施設



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)



JAXAにおける重ね合わせ法によるNEOの発見

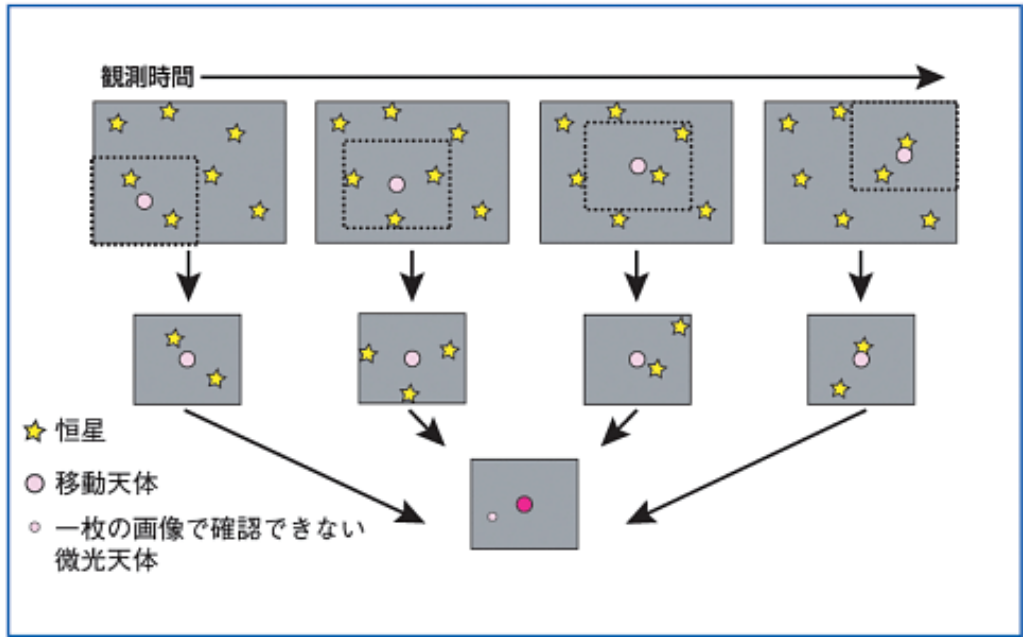
地球に接近して移動速度が速い微小天体を発見する方法を開発

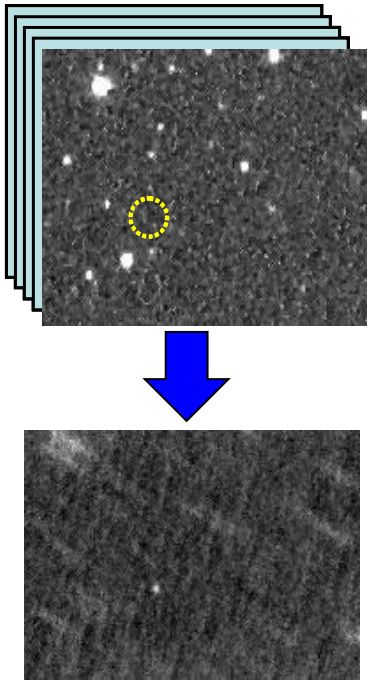
短時間露出で多数の画像を撮影し、いろいろな方向、移動速度で重ね合わせることで天体を検出する。高速にデータ処理をするために、FPGAを開発。



計算を行うFPGAのボード

「移動天体の検出方法」





（©JAXA）

口径20cm程度の望遠鏡で発見

JAXAで発見した小惑星

仮符号	発見日	等級	距離 (au)	直径 (m)
2017 BK	2017.1.17	17.5	0.051	67
2017 BN92	2017.1.31	17.1	0.014	32
2018 EZ2	2018.3.12	18.2	0.01	20
2018 FH1	2018.3.18	18.7	0.013	20
2018 PM10	2018.8.9	18.3	0.001	17
2018 RR4	2018.9.11	18.0	0.015	16
2018 UG3	2018.10.31	19.4	0.03	53
2019 GW1	2019.4.4	17.5	0.009	25
2019 GT19	2019.4.12	18.2	0.01	13
2019 QU4	2019.8.28	18.1	0.017	46
2020 FC2	2020.3.17	18.5	0.006	11

等級と距離は発見時のものである。

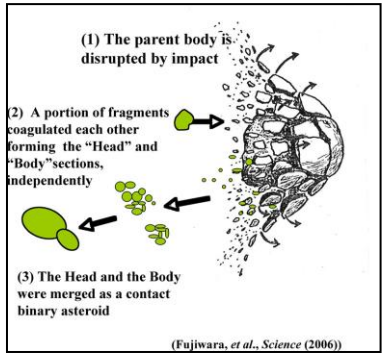
JAXAに関係した小惑星ミッション

はやぶさ 2003–2010 NEO



(©池下章裕)

"Rubble Pile" 構造

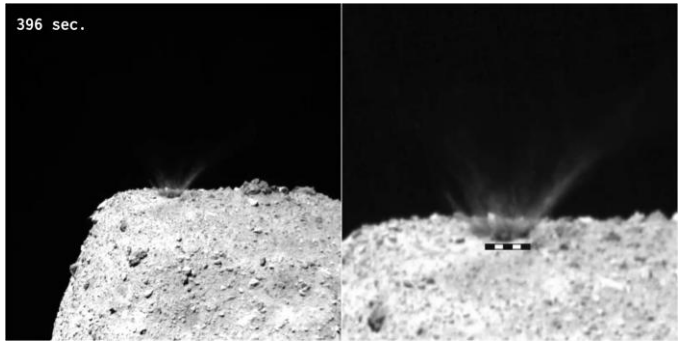


はやぶさ2 2014–2020 NEO



(©池下章裕)

人工クレータ



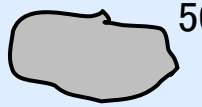
©Arakawa et al., Science 2020



(©JAXA)

はやぶさ2拡張ミッション

フライバイ 2026年

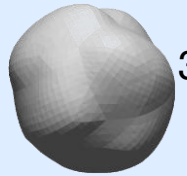


500m?

NEO

トリフネ

到着 2031年



30m?

NEO

1998 KY26

©Auburn University, JAXA

ESA：Heraミッション NEO

熱赤外カメラTIRIの提供

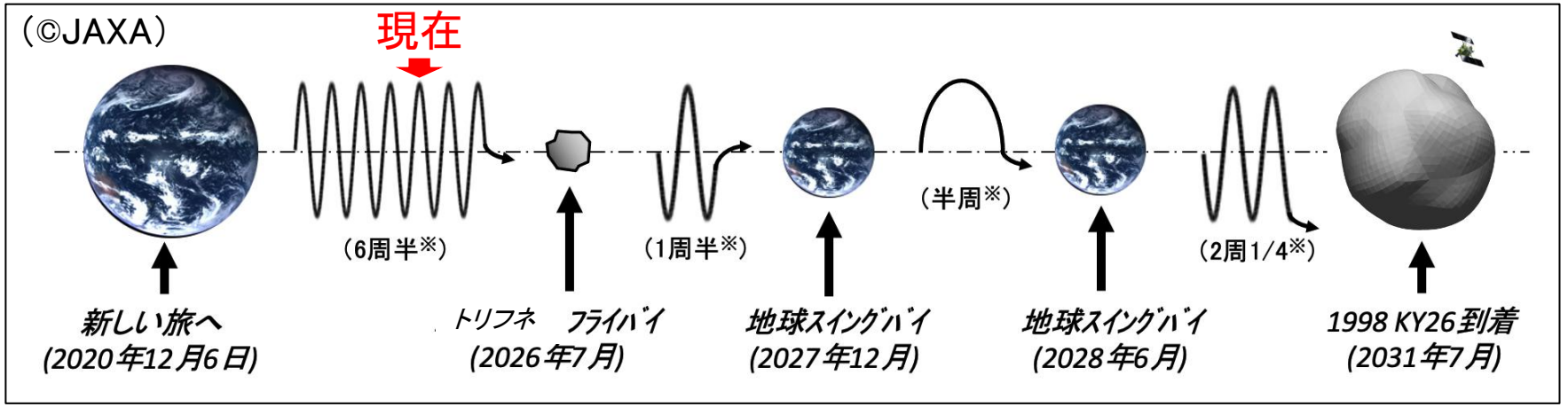
DESTINY⁺ミッション NEO



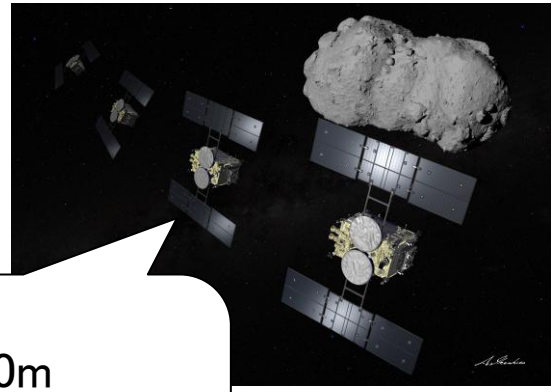
フェートンフライバイ探査

はやぶさ2拡張ミッション：はやぶさ2#

#：SHARP = Small Hazardous Asteroid Reconnaissance Probe



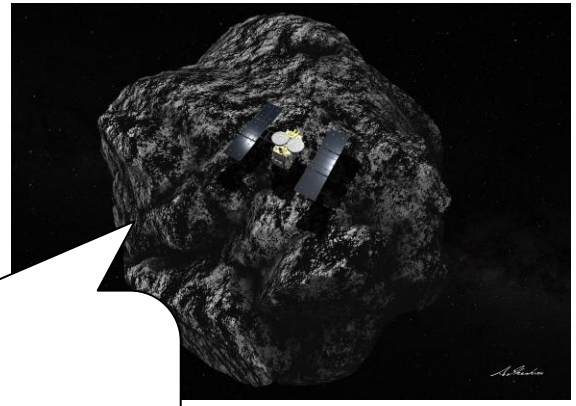
（©JAXA）



（©池下章裕）

←高速フライバイ技術
相対速度 約5km/s
‖
探査機を微小小惑星に
衝突させる技術の実証

トリフネ
直径：約500m
自転周期：約5時間
L型 → S型？
形状不明



（©池下章裕）

←微小小惑星探査
‖
このサイズの小惑星の地球衝頻度が100～200年に1度

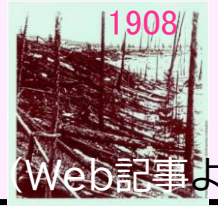
1998 KY26
直径：約30m
自転周期：約10.7分
炭素質の可能性
レーダー観測で形状推定

プラネタリーディフェンスの世界の動きとこれまでのJAXAの対応

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

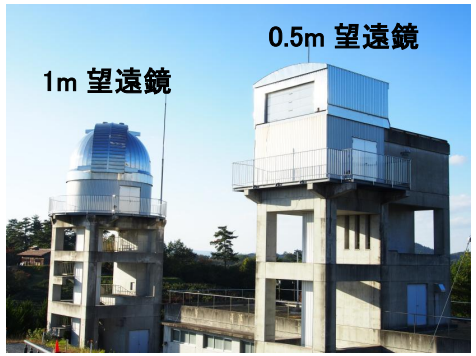




- 国連における議論
  - COPUOS
    （宇宙空間平和利用委員会）
    UNOOSA
    （国際連合宇宙局）
    - **IAWN**: International Asteroid Warning Network
      地球に接近する天体の発見・追跡観測
      メンバー：天文台など観測ができる施設・人
    - **SMPAG**: Space Mission Planning Advisory Group
      天体の地球衝突に対応
      メンバー：宇宙機関や国際機関など
- 宇宙機関における活動
  - **主要なもの**：
    NASA：Planetary Defense Coordination Office（PDCO）
    ESA　：Planetary Defence Office
- 国際会議での議論
  - **PDC**：Planetary Defense Conference
- 国際的なアウトリーチ活動
  - ASTEROID DAY
    6月30日を中心に啓発活動
    (©Asteroid Day)
  - **日本でも開催**
    日本スペースガード協会・JAXA

JAXAは2023年4月からメンバー

JAXA 美星スペースガードセンター



スペースデブリと地球接近小惑星の観測
(©JAXA)

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

(©池下章裕)

2017年に東京で行われたPDC



JAXA：主催者として対応