第4回新天体捜索者会議

プラネタリーディフェンスと小惑星観測ネットワーク

2024年11月17日

吉川真（JAXA 宇宙科学研究所）

概要

- プラネタリーディフェンスの活動が世界的に活発化してきている。（JAXAにも今年の4月に、ついに、プラネタリーディフェンスチームが設立された）
- 2029年のApophisの地球接近に向けて、ますます小惑星が注目される可能性がある。
- Rubin/LSSTやNEO Surveyorによって、小惑星の発見個数が莫大に増える可能性がある。
- 今後の小惑星観測をどのように進めて行くべきか？

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

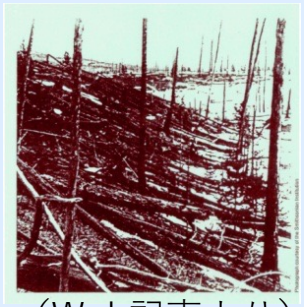
実例

■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
・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
・約2000平方kmの森林が被害

■6550万年前
恐竜を含む生物の大絶滅

（©池下章裕）

・約10kmの天体
・恐竜を含む多くの生物種が絶滅

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］

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
追跡観測

↓

地球への衝突が予測

NEOの物理的特性把握

↓

地球衝突回避の検討のための情報

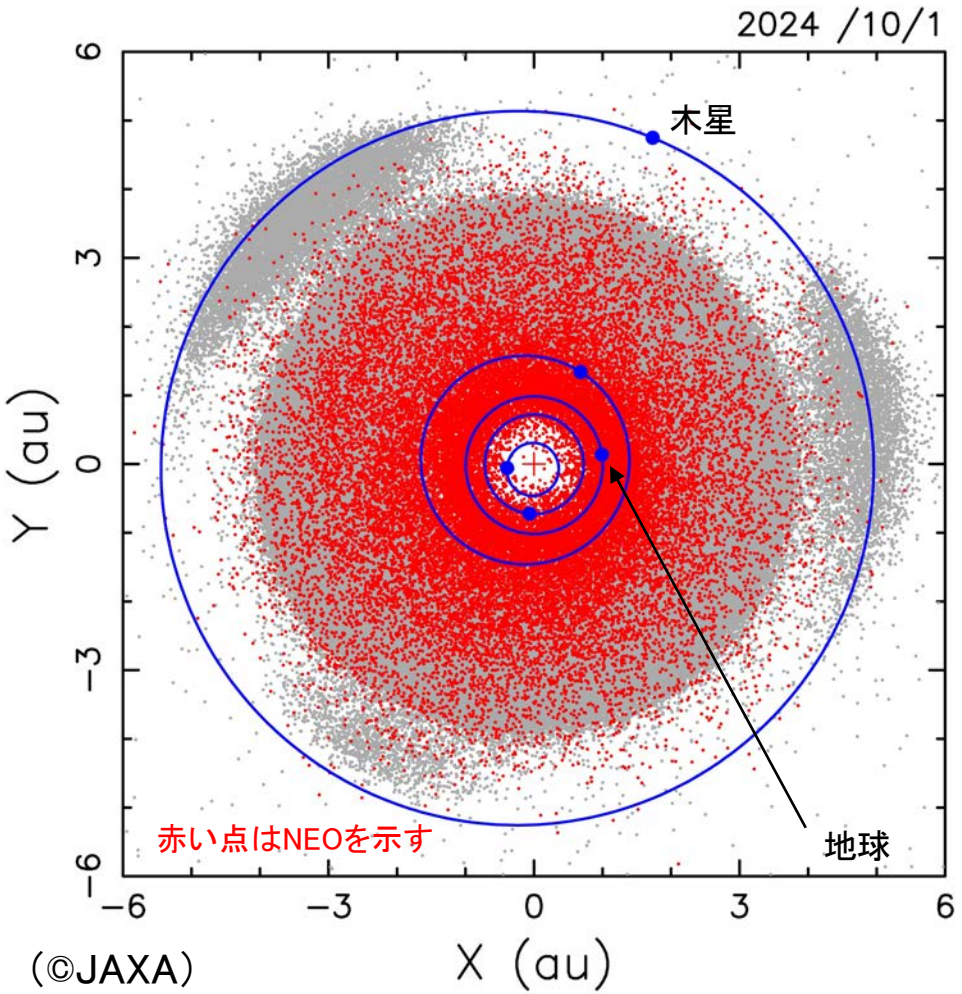
STEP2

地球衝突回避
被害の最小化

国際的ルールの策定
国際協力

小惑星・彗星の発見数

小惑星の分布



(©JAXA)

現在(2024年11月1日)、発見され軌道が求められている小天体:

小惑星:1,392,084個

彗星　:　4,565個

(確定番号付き小惑星: 740,000個)

地球軌道に接近する小惑星:36,371個

(NEO:Near Earth Object)

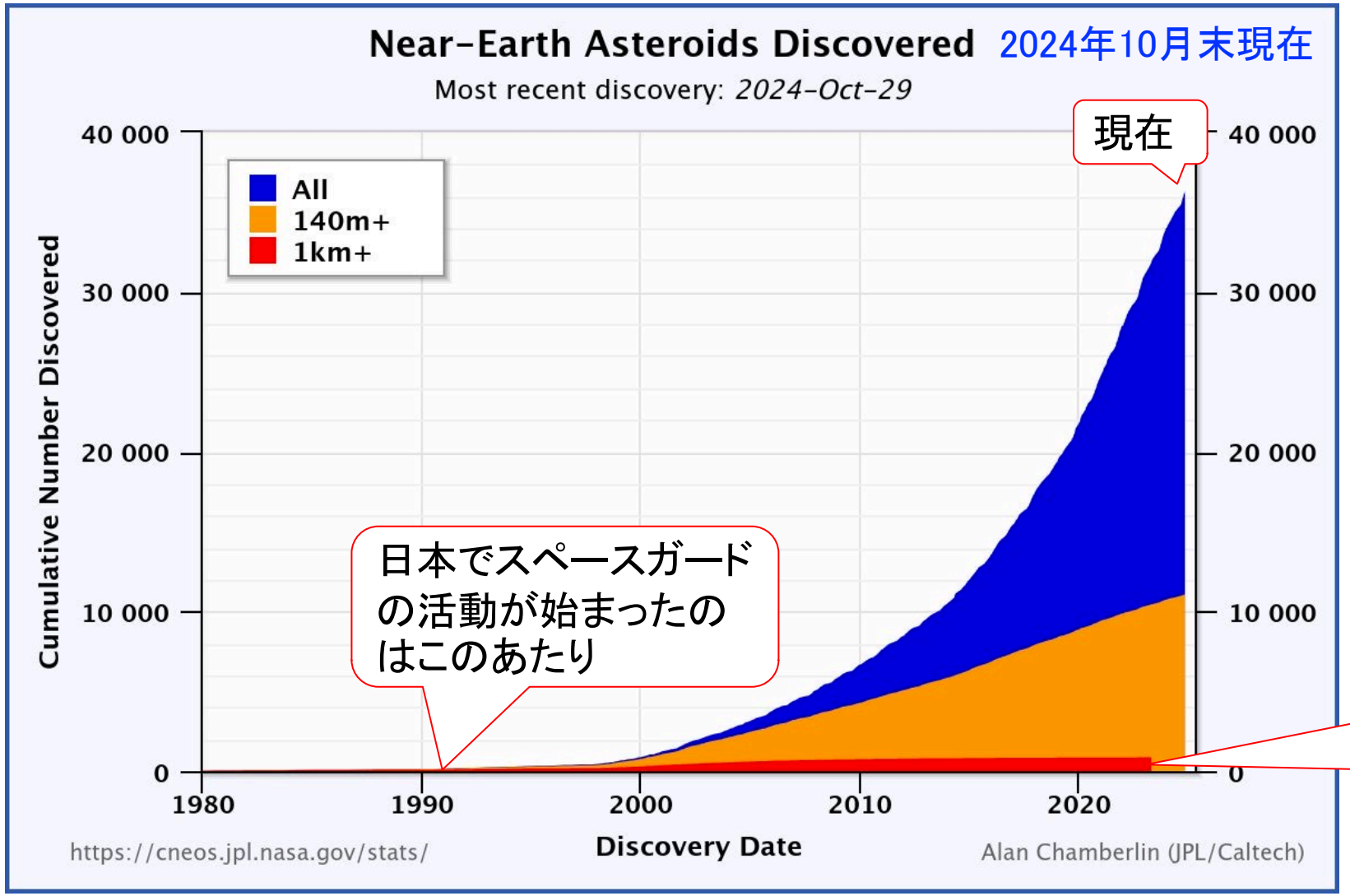
国際天文学連合 マイナープラネットセンターのWebより
https://minorplanetcenter.net/mpc/summary

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～衝突 （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	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
10例目	2024 UQ	2024年10月22日	1m	約2時間	太平洋、カリフォルニア海岸西	ATLAS-HKO

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。

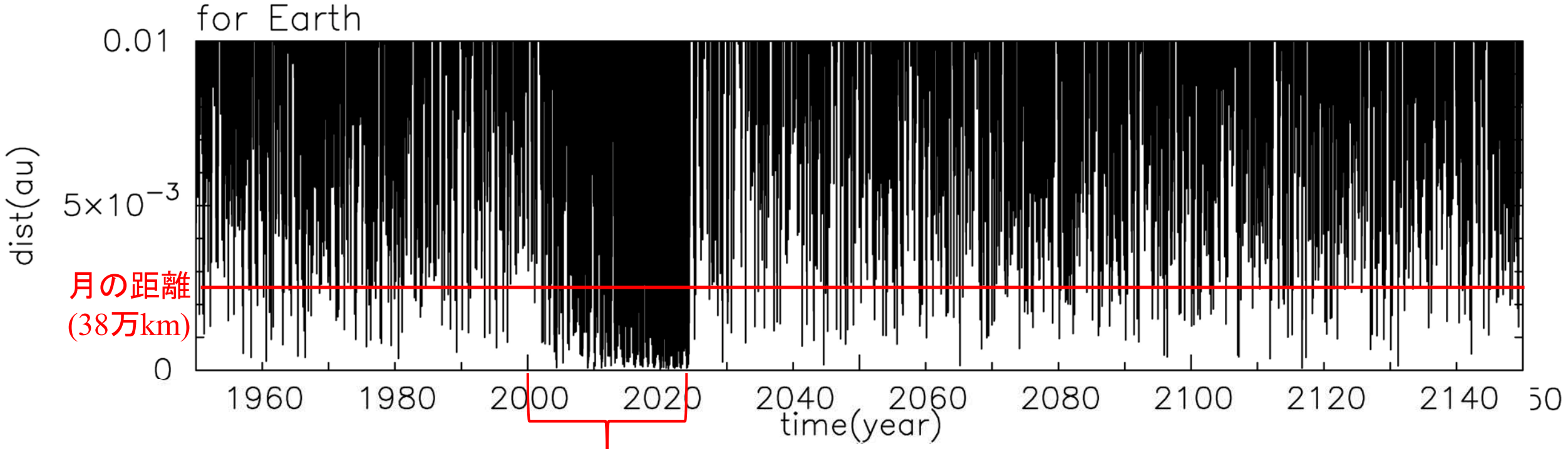
恐竜を滅ぼした大きさ10kmの小惑星はほぼ発見されていて、近い将来の衝突は心配しなくてよい。

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

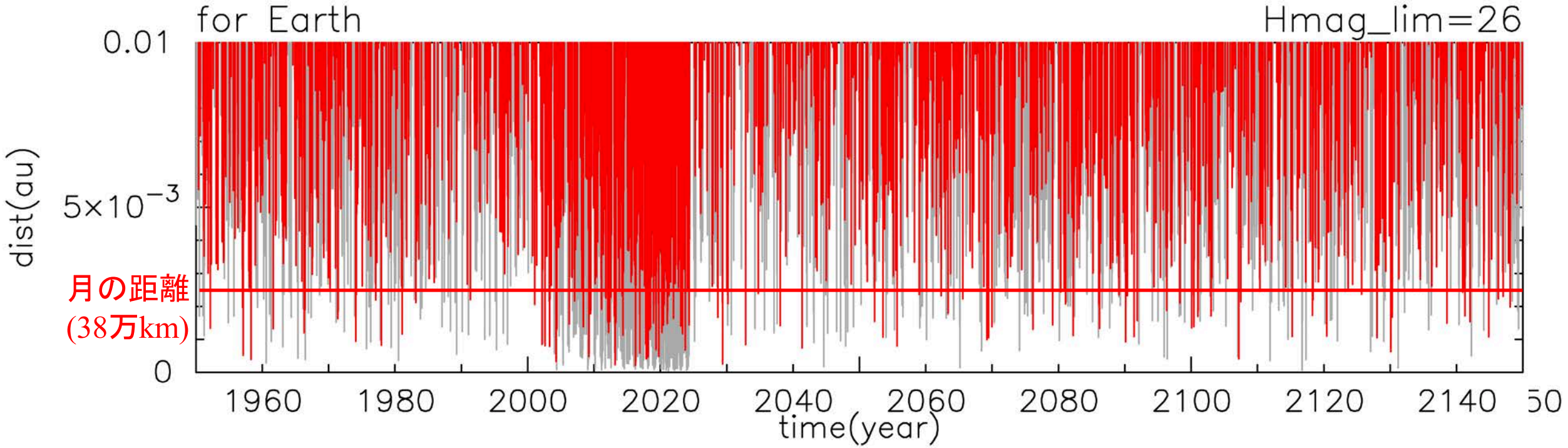
- 2024年初めの時点で発見されていた小惑星約134万個（うちNEOは約34,000個）の地球接近状況を確認した。（小惑星の軌道要素はMinor Planet Centerより）
- 1950年から2150年までの200年間に地球に0.01au（約150万km）以下に接近する場合を図に示す。（図の縦線がどこまで接近したかを示す。0は地球中心。）



（©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。）

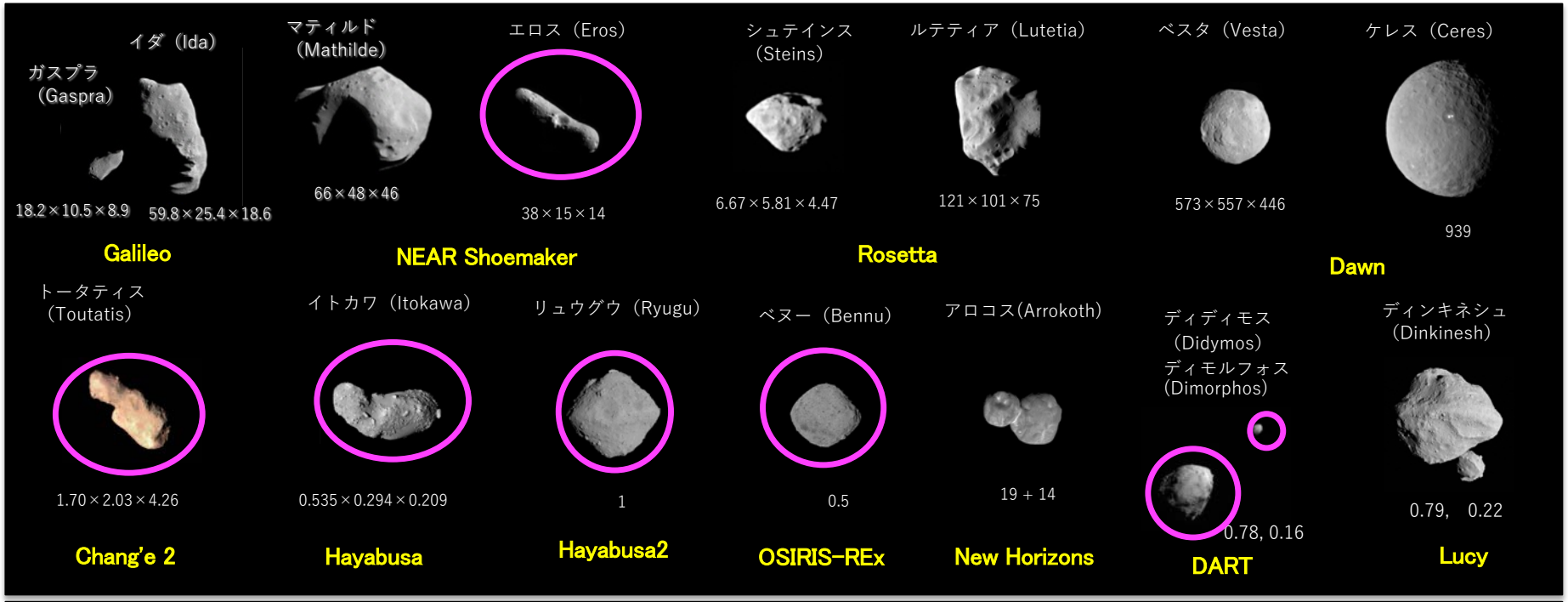


（©JAXA）

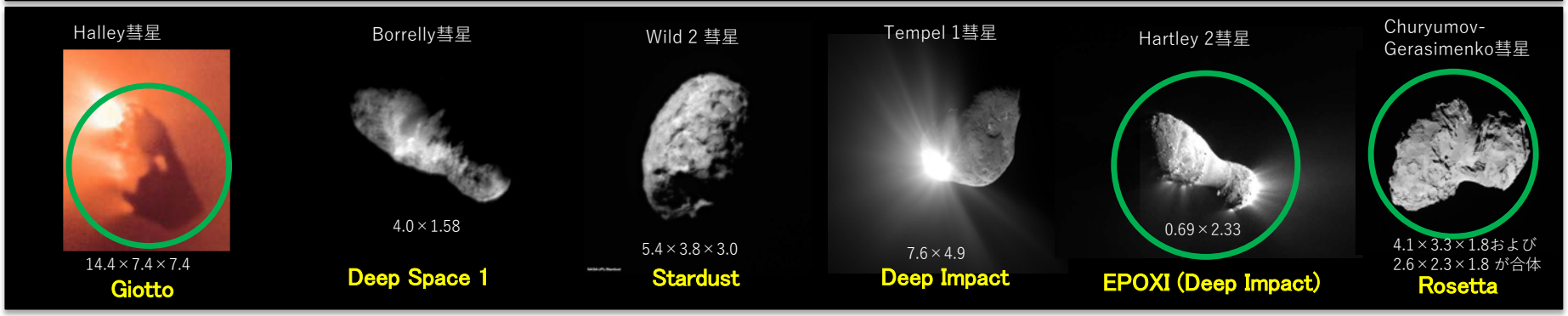
NEOの探査近状況

丸で囲んだ天体が地球接近天体

小惑星



彗星



黄色は探査した探査機名。画像は各ミッションより。

NEOの地球衝突回避の方法

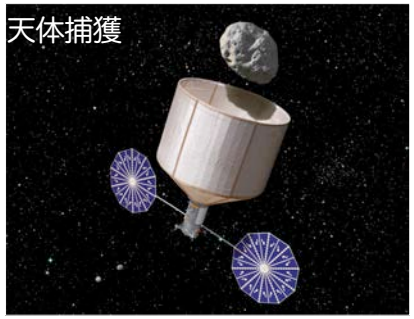
■衝突回避の方法
- インパクト：天体に物体を衝突させて軌道を変える←実証済
- グラビティー トラクター：引力で牽引する
- 核エネルギー：軌道を変える

} 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）

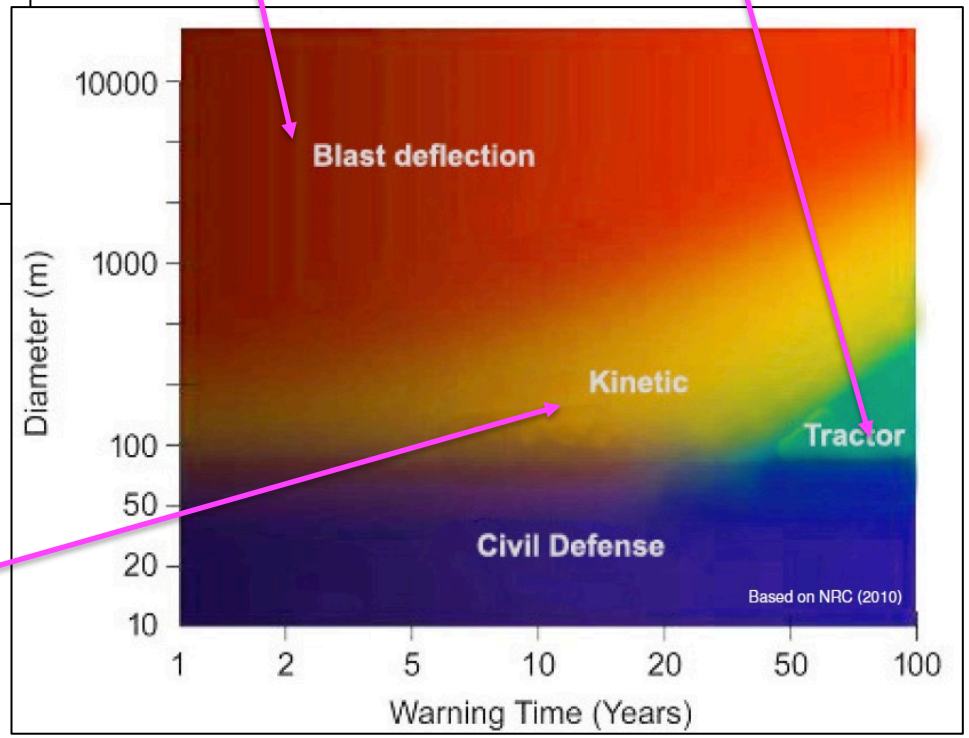


Image courtesy of Tim Warchocki

DART探査機の衝突時の映像

2022年9月26日

https://dart.jhuapl.edu/Gallery/　より

ディモルフォスがディディモスを周回する周期が、探査機の衝突によって変化

衝突前：11時間55分
衝突後：11時間22分 → 33分短くなる

軌道速度が2.7mm/s変化

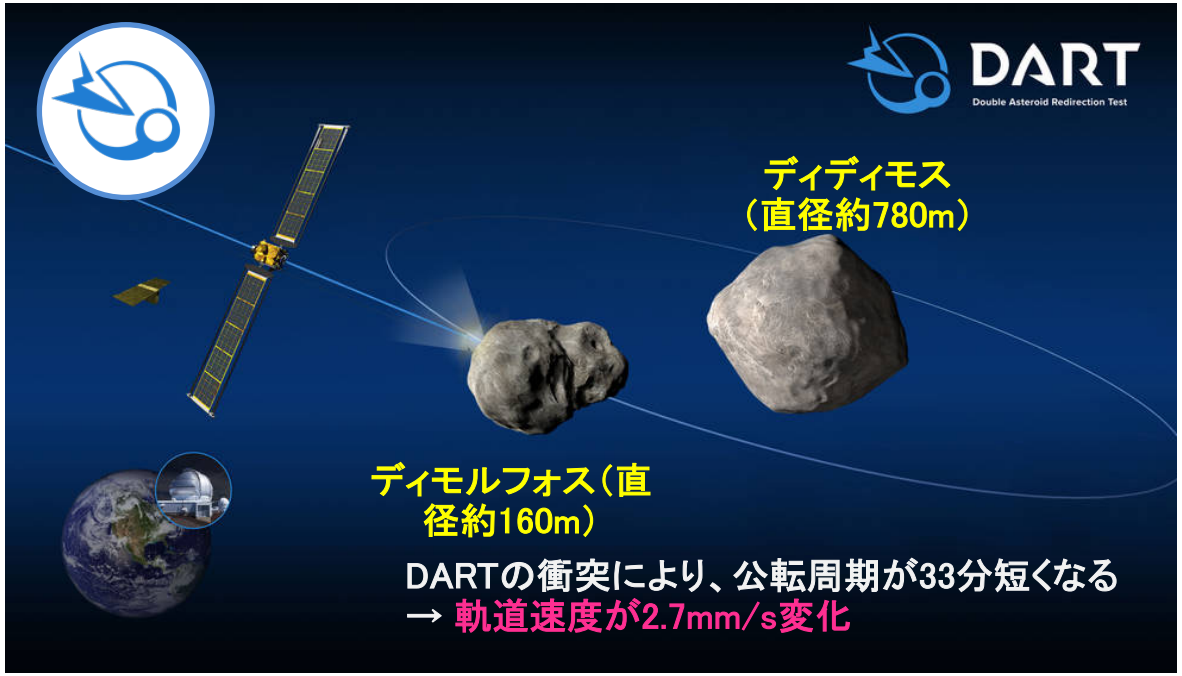
小惑星軌道変更計画：AIDA

米国・欧州が国際共同で行う初のプラネタリ・ディフェンスのための探査計画＝小惑星の軌道変更

AIDA（Asteroid Impact & Deflection Assessment）＝ DART（NASA）＋ Hera（ESA）

★DART（Double-Asteroid Redirection Test）

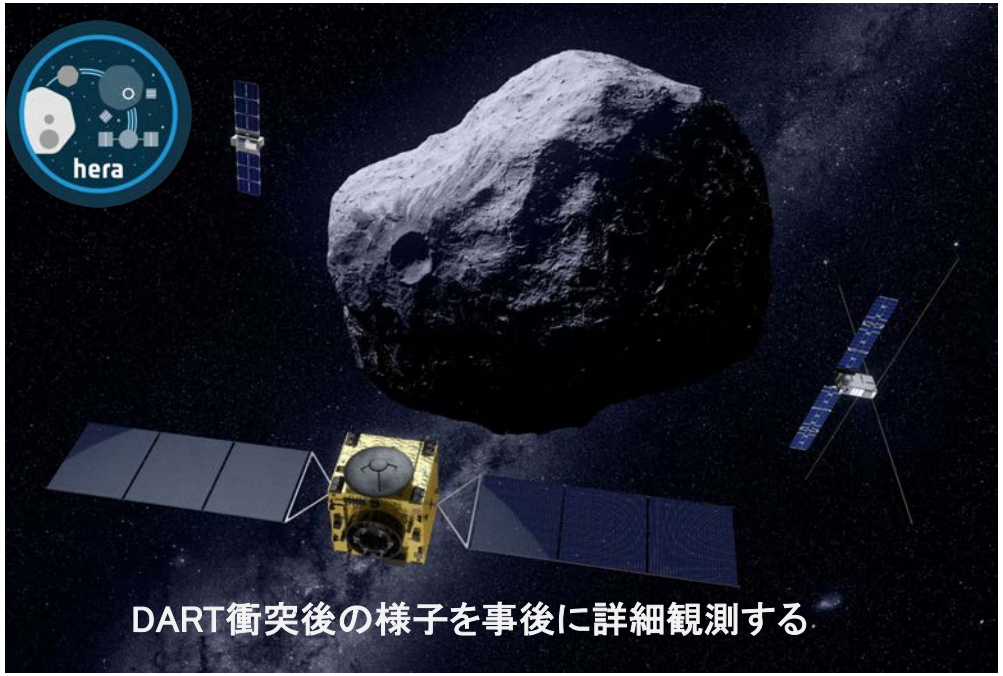
- 打上げ：2021年11月24日
- 衝突日：2022年9月26日
- 重さ500kgのDART探査機を秒速約6km/sで
  ディモルフォスに衝突させ、軌道変化を調べる



（NASA DARTミッションより）

★Hera

- 打上げ：2024年10月7日
- 到着日：2026年末（予定）
- DARTによる衝突の結果を詳細に調べる
- 日本（JAXA）も参加：赤外線カメラを提供



（ESA Heraミッションより）

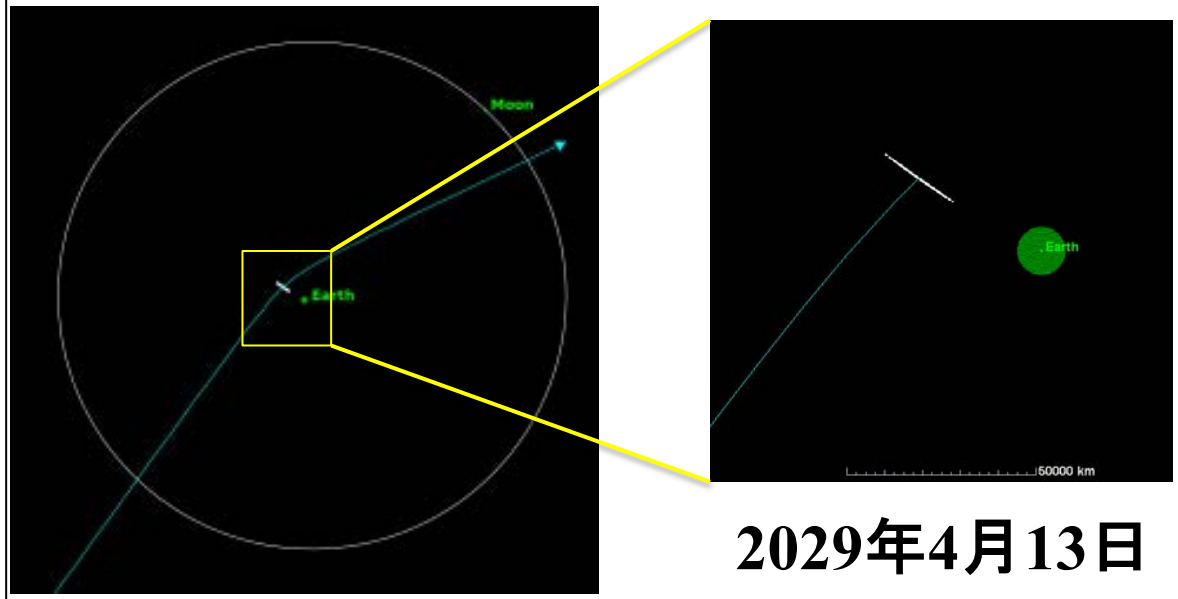
注目！　小惑星アポフィス

- 2029年4月13日（金）に地球に接近
- 接近距離が地表から約32,000km
- アポフィスの大きさが約340mと推定
- このサイズの小惑星がこの距離に接近するのは観測史上初めて
- 小惑星が動いていく様子が肉眼で見える（3等星くらい）

小惑星（99942）アポフィスの地球接近

- 2004年6月19日に発見　→　6月20日と2晩観測
- 2004年12月18日に再発見　→　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。
  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　→　2029年4月13日の地球衝突は否定　→　2036年4月13日の地球衝突の可能性が指摘　→　2036年の地球衝突も否定

- 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。

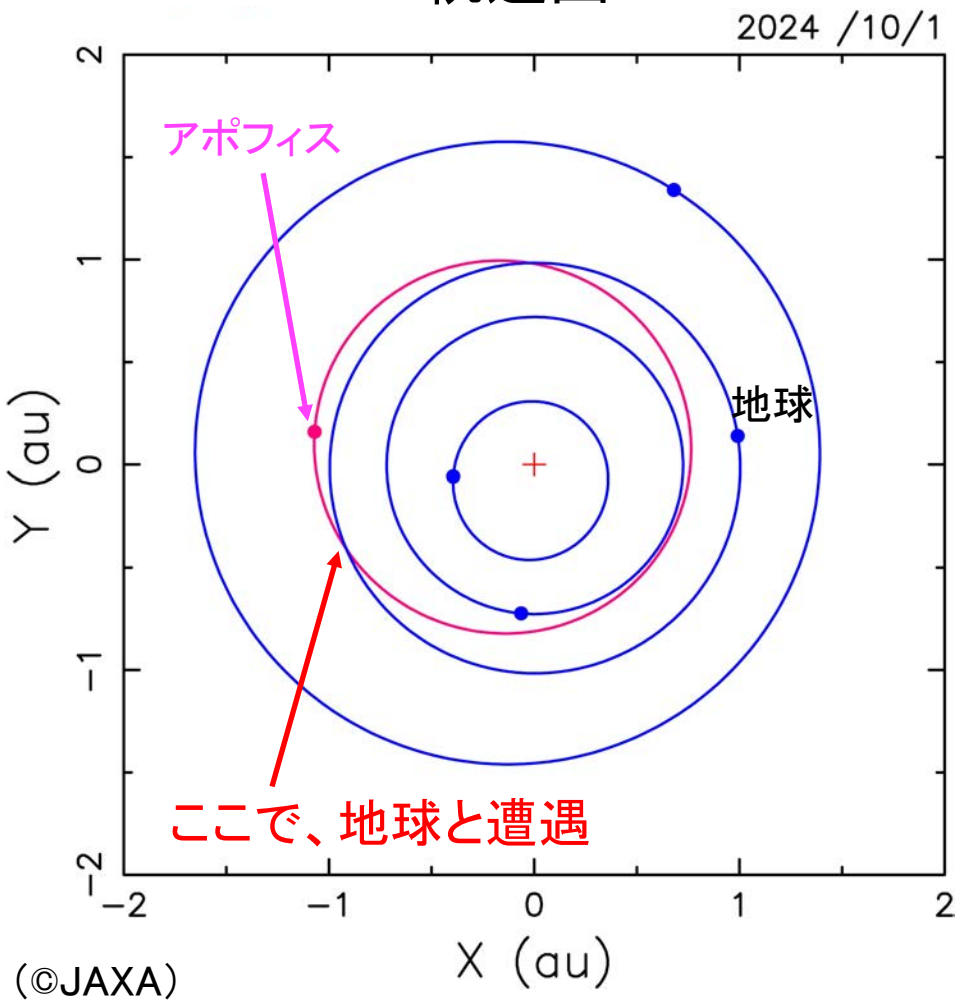


（提供：NASA）

2029年4月13日

小惑星（99942）アポフィスについての情報

軌道図

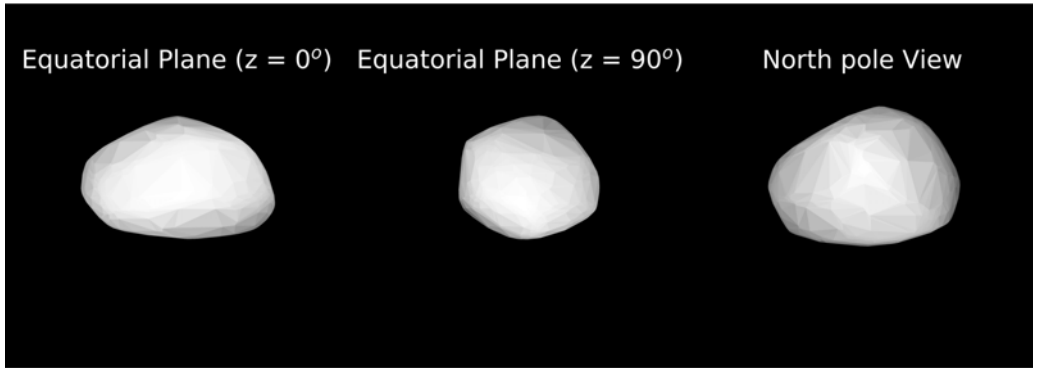


（©JAXA）

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

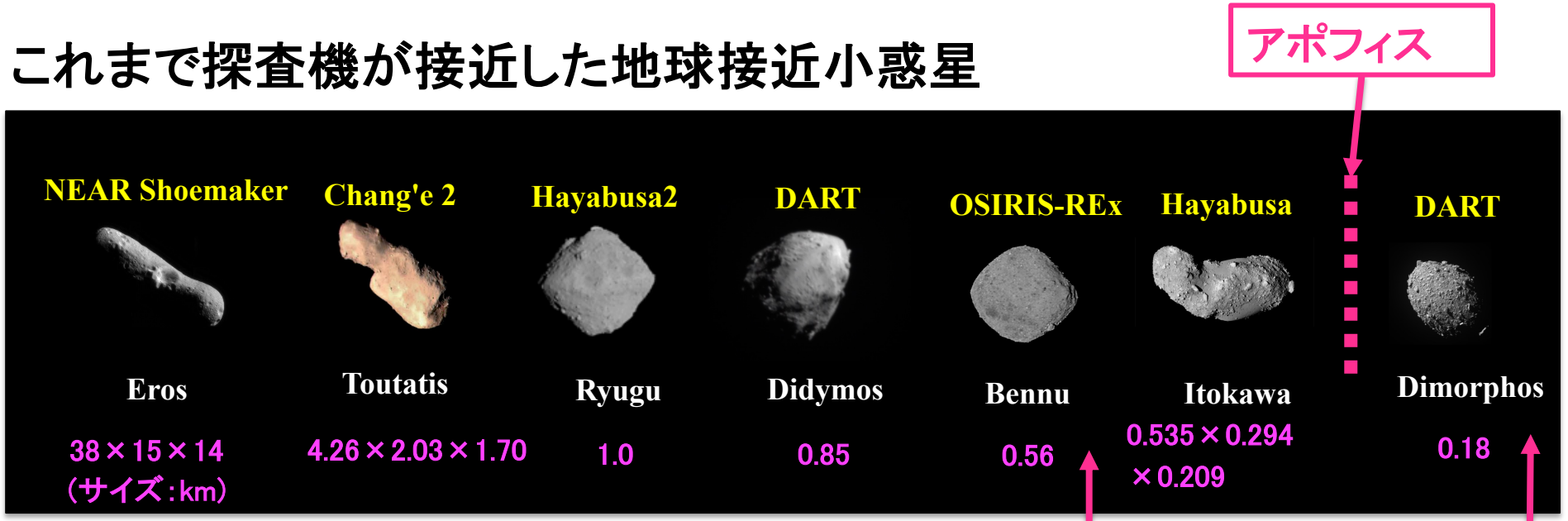


H.-J. Lee et al. A&A 661, L3 (2022)

アポフィスの重要性

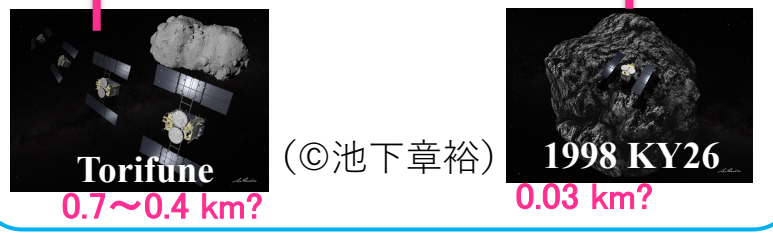
- 地球に接近したときに、地球の潮汐力でどのような変化が起こるか？
- 大きさが300mくらいの天体がどのようなものか？

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

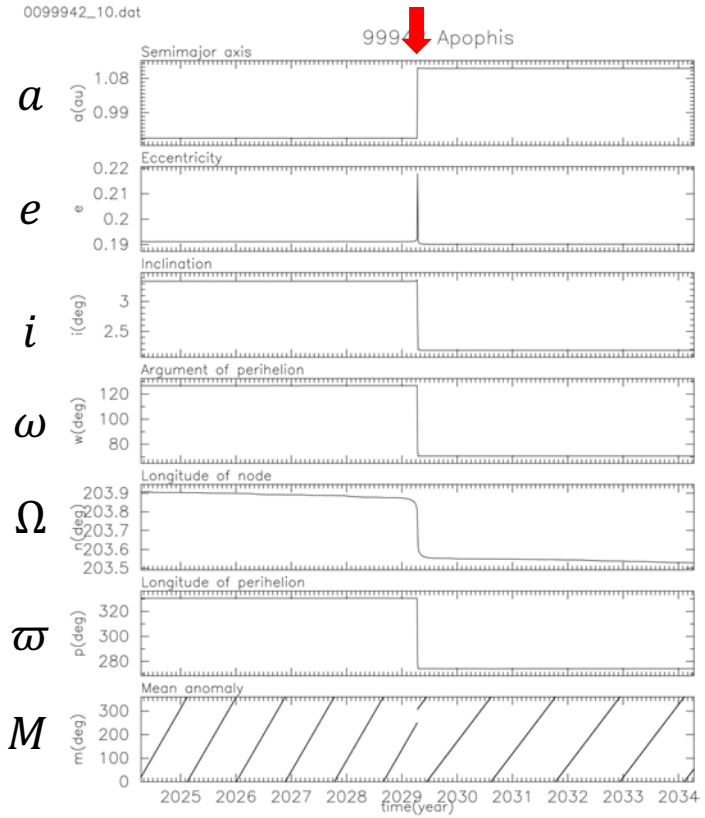
Hayabusa2#の探査予定小惑星 →



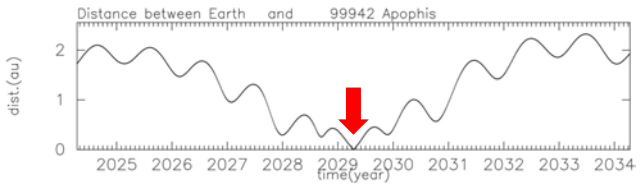
アポフィスの軌道変化

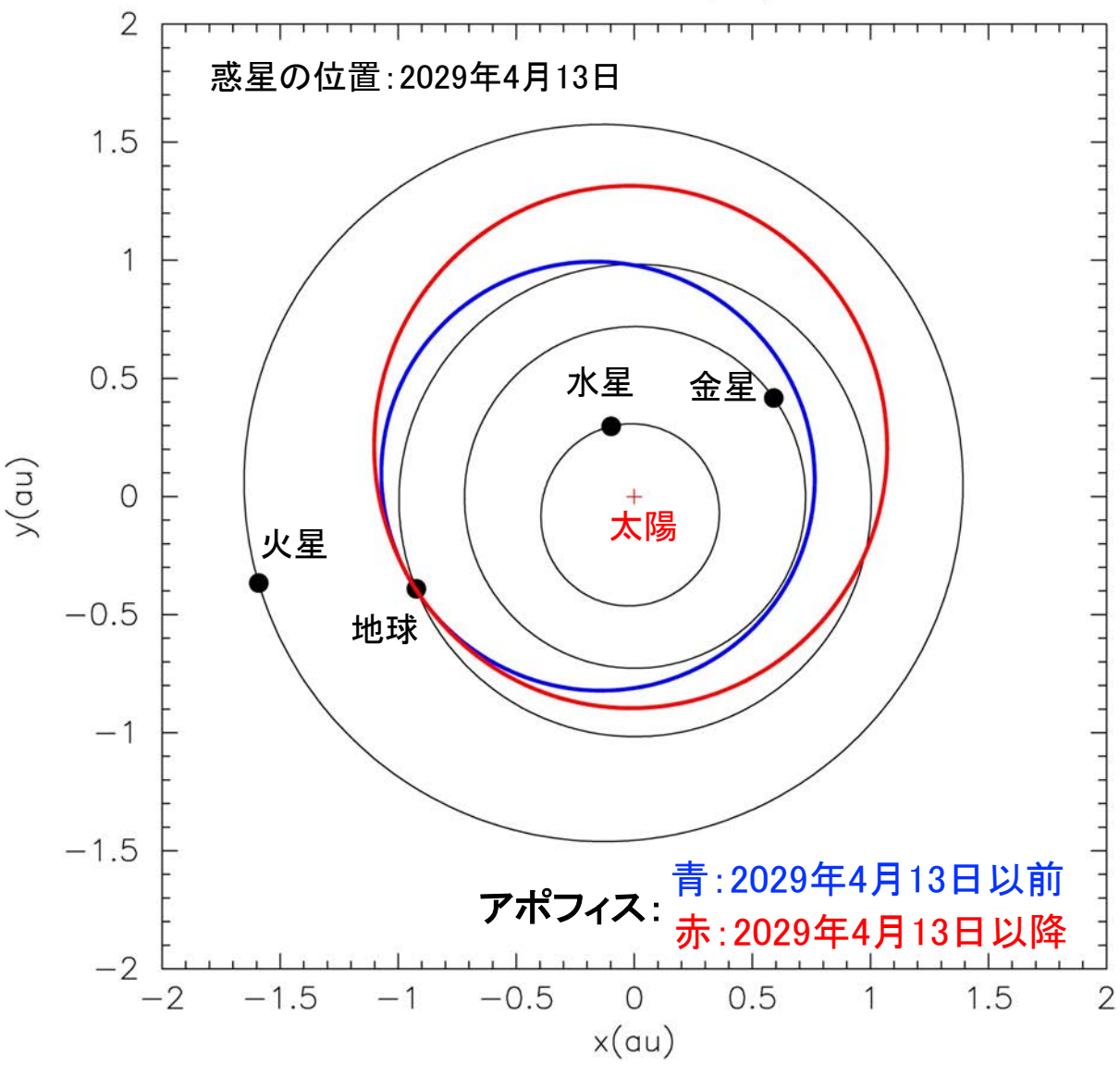
2029年4月13日の地球接近で軌道が大きく変化

軌道要素



地球との距離

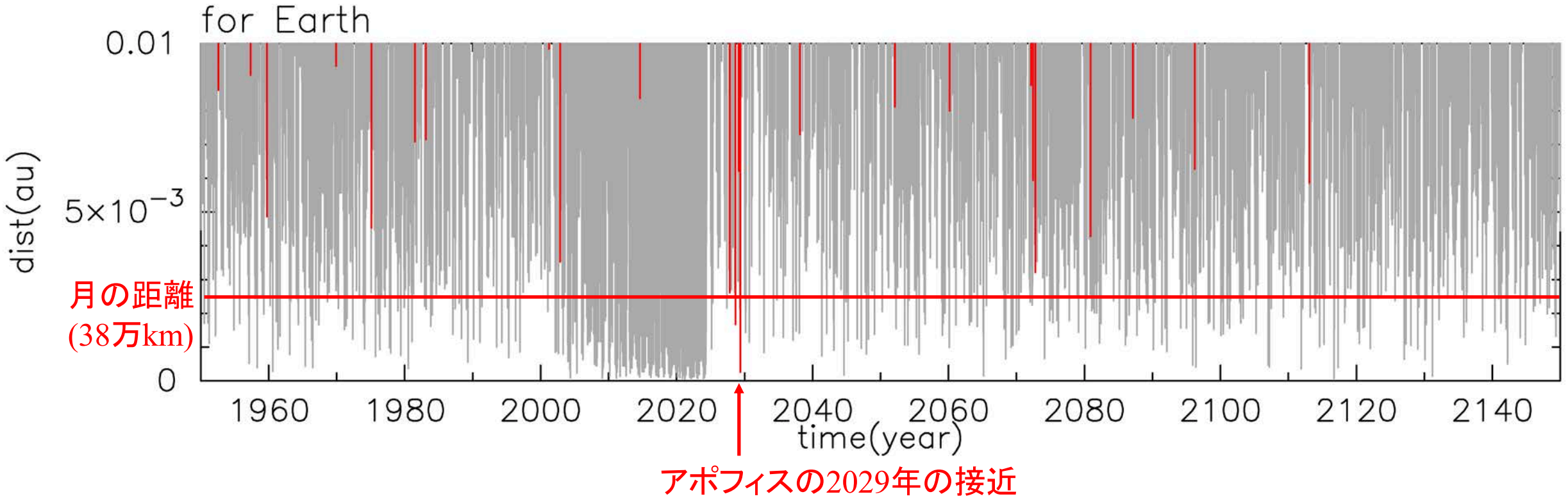




（©JAXA）

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）

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

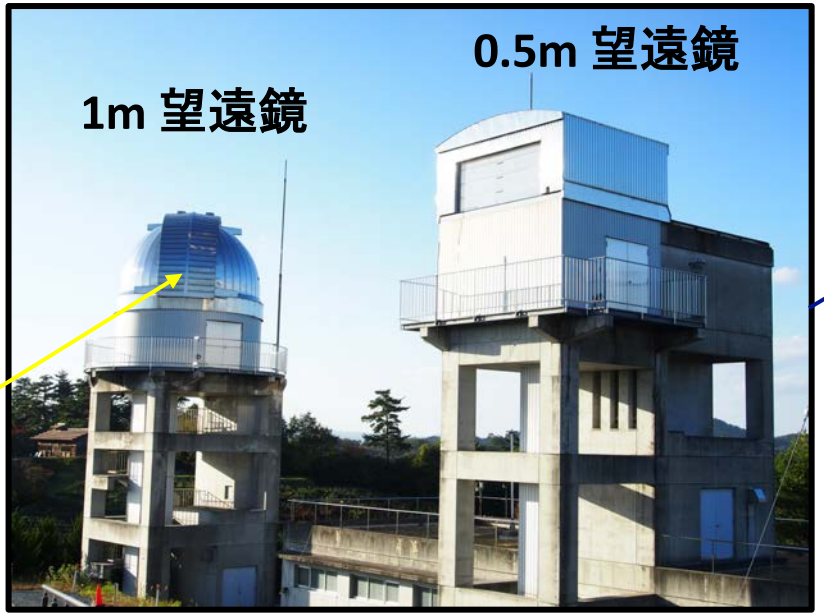
■軌道解析
- 小天体の軌道計算

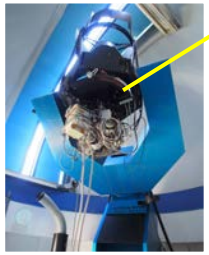
■国際対応
- SMPAG、IAWN、PDC、Asteroid Day

SMPAG: Space Mission Planning Advisory Group
IAWN: International Asteroid Warning Network
PDC：Planetary Defense Conference

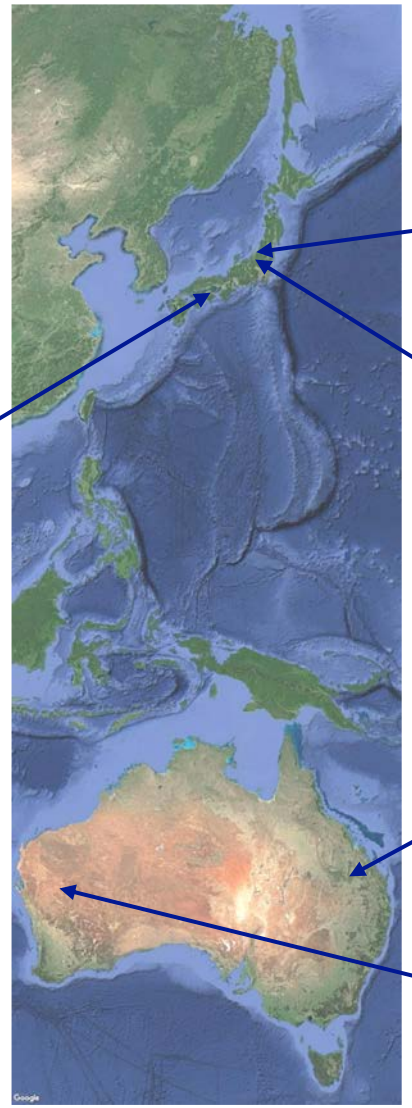
JAXAの小惑星観測施設

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）



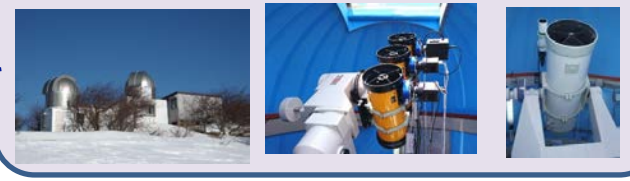


・2000年に建設。日本宇宙フォーラムの所有であったが、2017年4月にJAXAに移管される。
・観測業務は、NPO法人日本スペースガード協会が行っている。
・スペースデブリの観測が主。小惑星も観測。



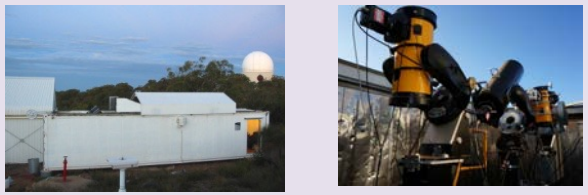
JAXA研開部門の観測施設

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)

（写真：©JAXA）

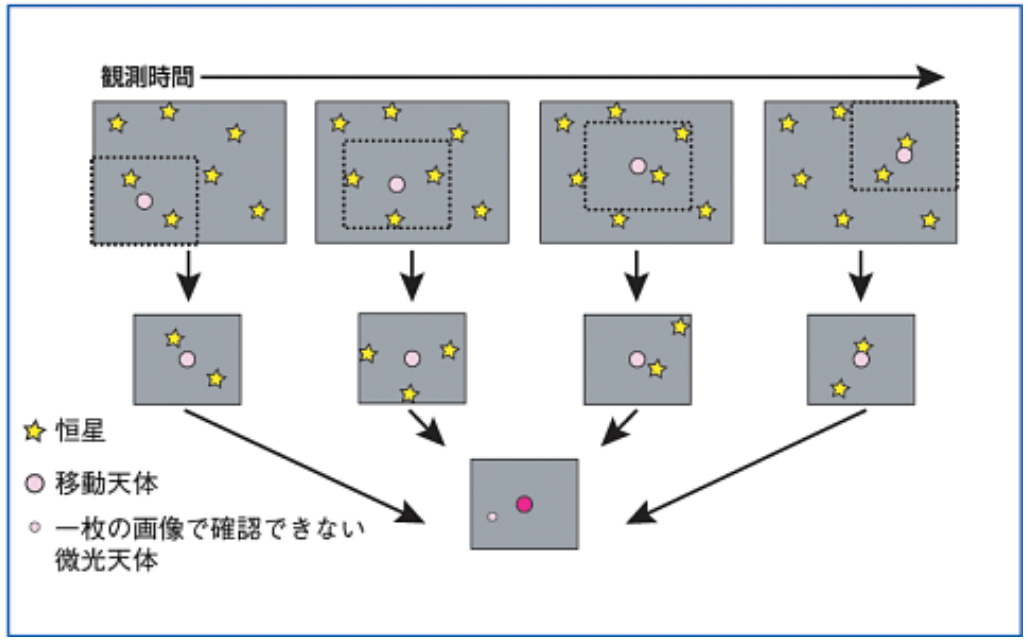
JAXAにおける重ね合わせ法によるNEOの発見

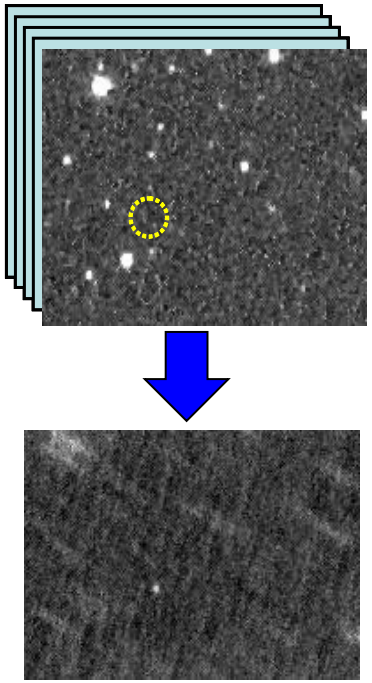
地球に接近して移動速度が速い微小天体を発見する方法を開発

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

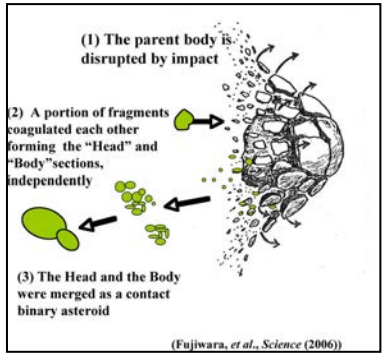
等級と距離は発見時のものである。

JAXAに関係した小惑星ミッション

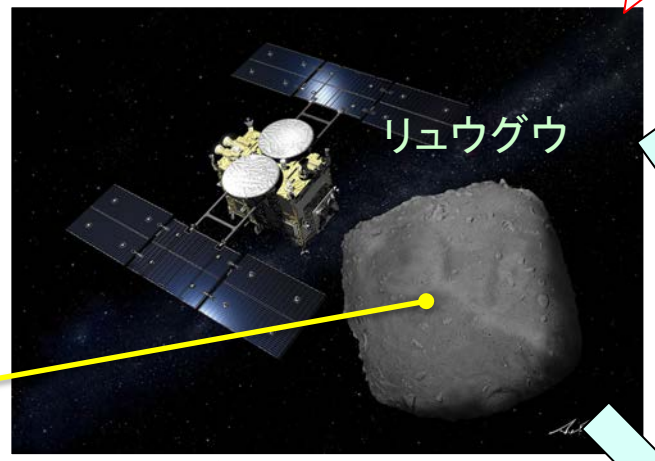
はやぶさ 2003–2010 NEO

(©池下章裕)

"Rubble Pile" 構造

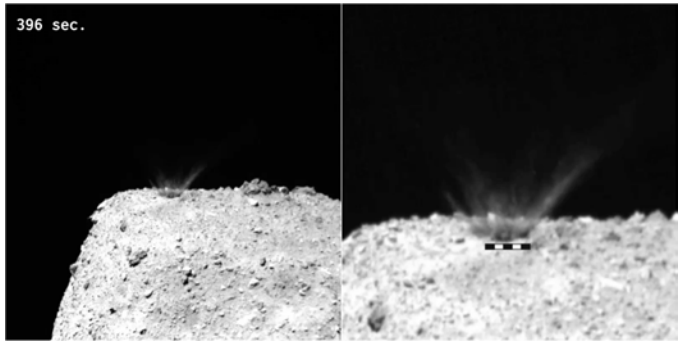


はやぶさ2 2014–2020 NEO



(©池下章裕)

人工クレーター

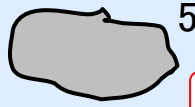


©Arakawa et al., Science 2020

(©JAXA)

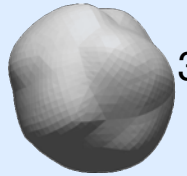
はやぶさ2拡張ミッション

フライバイ 2026年



トリフネ NEO

到着 2031年



1998 KY26 NEO

©Auburn University, JAXA

ESA：Heraミッション NEO

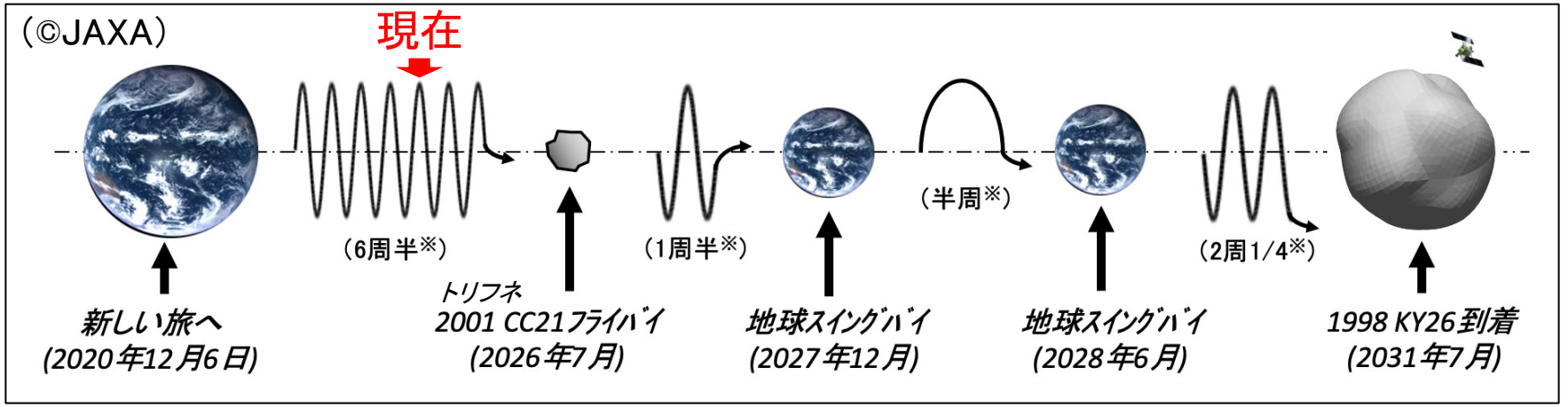
熱赤外カメラTIRIの提供

DESTINY⁺ミッション NEO

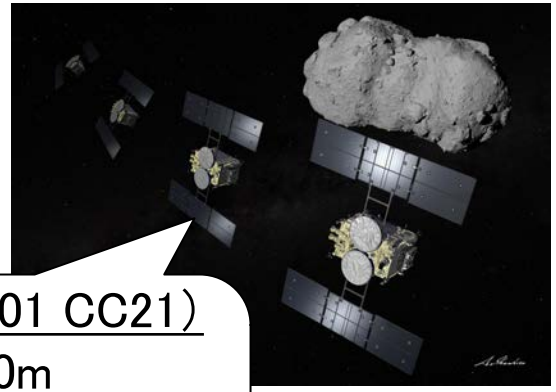
フェートンフライバイ探査

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（2001 CC21）
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

JAXAは2023年4月からメンバー

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

JAXAは発足時の2014年からメンバー

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

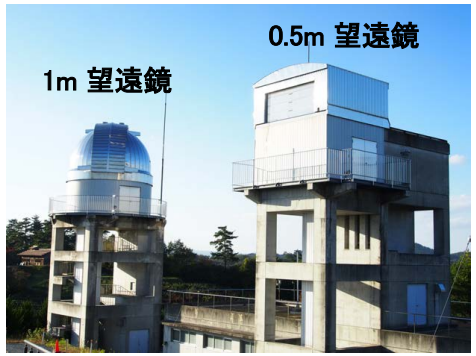
2017年に東京で行われたPDC

JAXA：主催者として対応

国際的なアウトリーチ活動

日本でも開催
日本スペースガード協会・JAXA

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の観測
（©JAXA）

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トリフネと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）

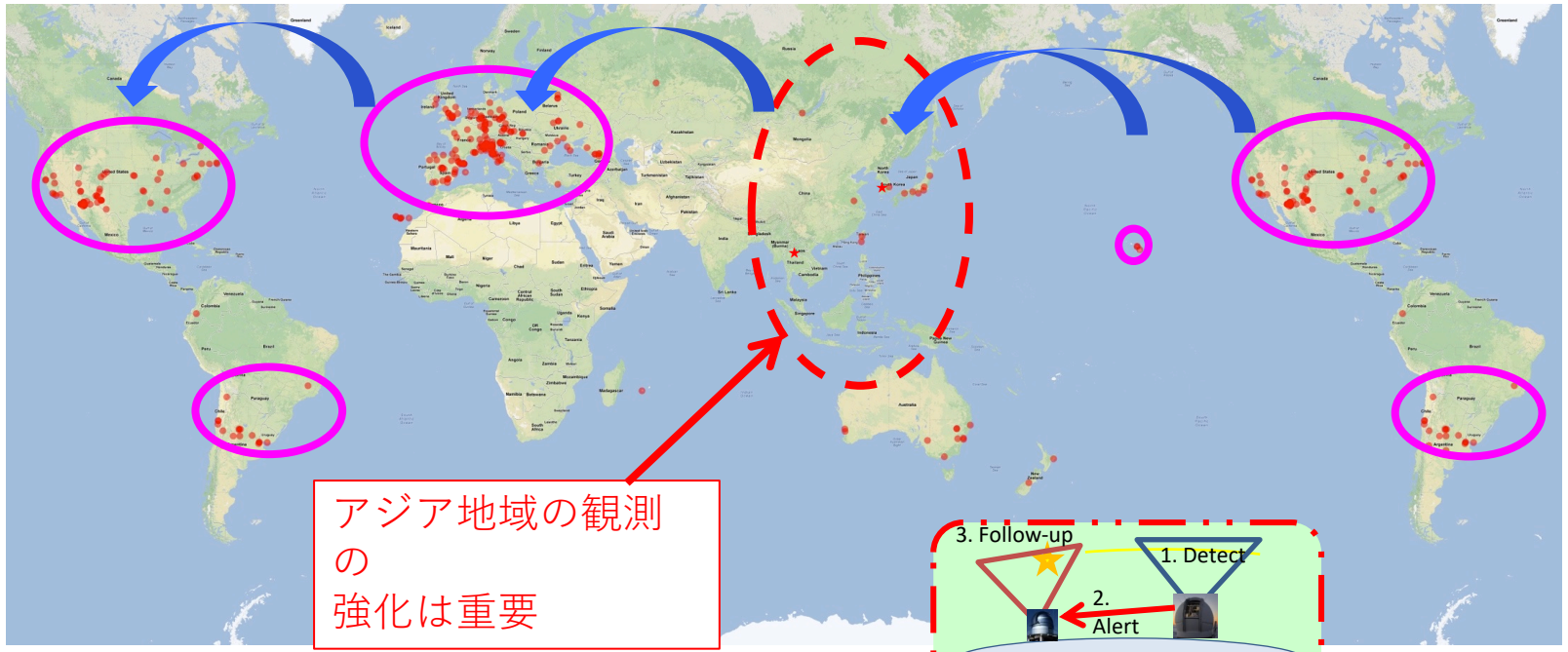
アジア太平洋小惑星観測ネットワーク（APAON）

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（APAON※1）」を組織。

日本国内の小惑星観測者も日本国内チームとして組織。

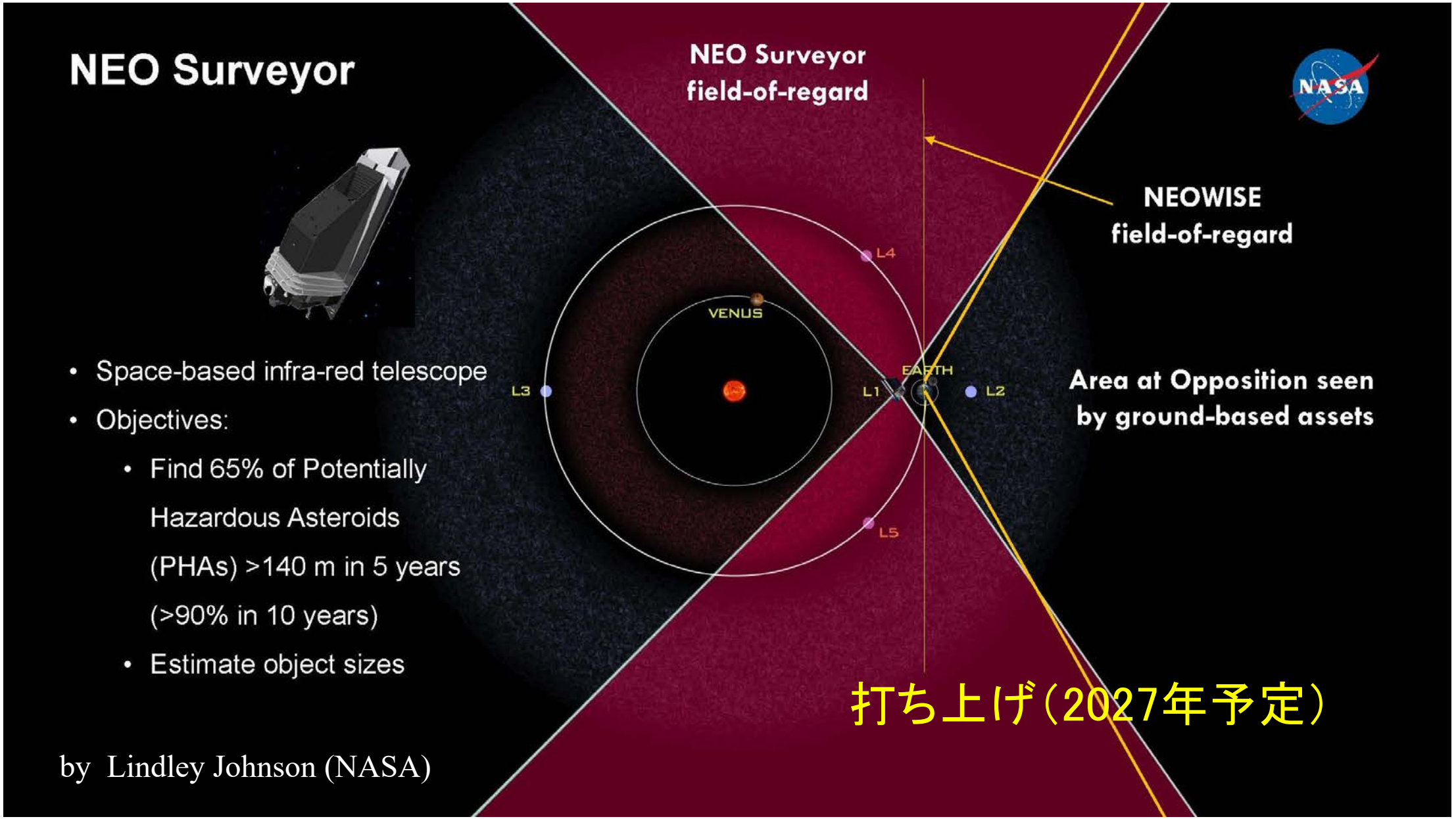
※1：Asia-Pacific Asteroid Observation Network
※2:Asia-Pacific Regional Space Agency Forum

【経緯】
2013年12月　APRSAF※2にて提案し参加を呼びかけ
2014年　　IAWNやSMPAGの会合で紹介
2015年1月　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。
2018年頃　　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

NASA：NEO Surveyor



打ち上げ（2027年予定）

Rubin/LSST

- 状況は？

今後、小惑星観測をどのように進めるか？

- Rubin/LSSTやNEO Surveyorで小惑星の発見個数が増える可能性あり。
- 国内（あるいはアジア・太平洋地域）での小惑星観測をどうしたらよいか。

- スマート望遠鏡の活用？
- 小惑星の発見、追跡、掩蔽？

太陽系小天体の重要性

科学

太陽系と生命の起源と進化

プラネタリーディフェンス（スペースガード）

天体の衝突から地球を守る

資源

鉱物や水資源としての活用

有人ミッション

月以降・火星以前の有人ミッションターゲット

技術

太陽系内を自由自在に移動

文化創造 次世代の育成

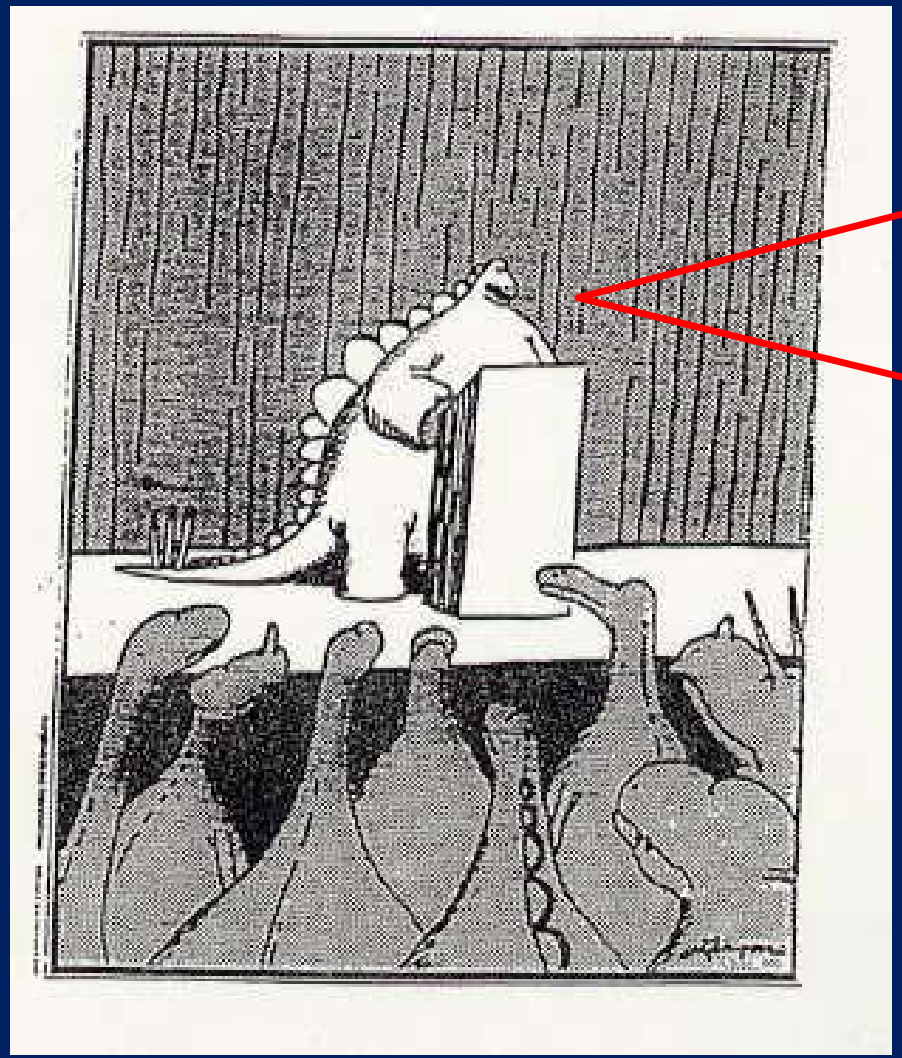
2029年

国連で審議中

2029年を・・・

International Year of
Asteroid Awareness and Planetary Defense

このようには、ならないように・・・



"Gentlemen, the situation is critical... the climate has changed, mammals are pressing us, and we have a too little brain for these big problems"

「皆さん、状況は危機的です…気候は変化し、哺乳類は私たちに圧力をかけてきています。そして私たちはこれらの大きな問題に対して脳が少なすぎます。」

The SGF – ACM'96 – July 8, 1996

今後、小惑星観測をどのように進めるか？

- Rubin/LSSTやNEO Surveyorで小惑星の発見個数が増える可能性あり。
- 国内（あるいはアジア・太平洋地域）での小惑星観測をどうしたらよいか。

- スマート望遠鏡の活用？
- 小惑星の発見、追跡、掩蔽？

APAONに加わっていただけるかた、ご連絡ください。

yoshikawa.makoto@jaxa.jp