

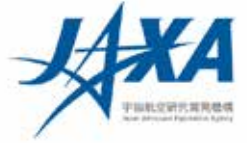
小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2020年7月22日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



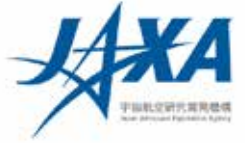
本日の内容



「はやぶさ2」に関連して、

- ・拡張ミッション

について説明する。



目次

0. 「はやぶさ2」概要・ミッションの流れ概要
1. プロジェクトの現状と全体スケジュール
2. 拡張ミッション提案の背景
3. 拡張ミッションの検討過程
4. 拡張ミッション案概要
5. 今後の予定



「はやぶさ2」概要



目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用を解明することで、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を維持・発展させて、本分野で世界を牽引する。

期待される成果と効果

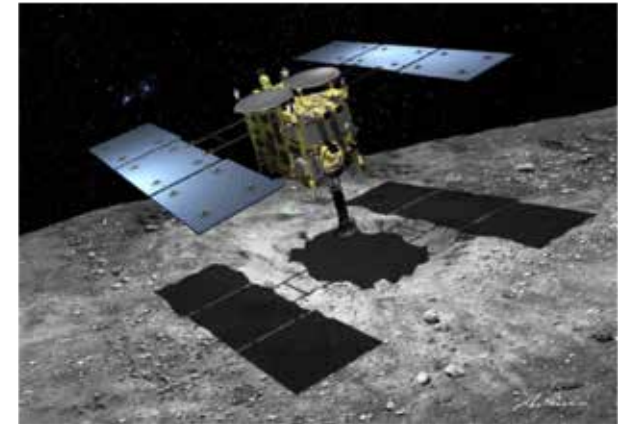
- ・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
- ・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
- ・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

特色:

- ・世界初のC型微小地球接近小惑星のサンプルリターンである。
- ・小惑星にランデブーしながら衝突装置を衝突させて、その前後を観測するという世界初の試みを行う。
- ・「はやぶさ」の探査成果と合わせることで、太陽系内の物質分布や起源と進化過程について、より深く知ることができる。

国際的位置づけ:

- ・日本が先頭に立った始原天体探査の分野で、C型小惑星という新たな地点へ到達させる。
- ・「はやぶさ」探査機によって得た独自性と優位性を発揮し、日本の惑星科学及び太陽系探査技術の進展を図るとともに、始原天体探査のフロンティアを拓く。
- ・NASAにおいても、小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-REx（打上げ:平成28年、小惑星到着:平成30年、地球帰還:令和5年）が実施されており、サンプルの交換が取り決められていることに加えて科学者の相互交流が行われており、両者の成果を比較・検証することによる科学的成果も期待されている。



(イラスト 池下章裕氏)

「はやぶさ2」主要緒元

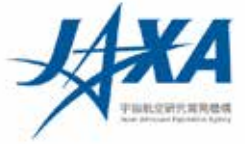
質量	約 609kg
打上げ	平成26年(2014年)12月3日
軌道	小惑星往復
小惑星到着	平成30年(2018年)6月27日
小惑星滞在期間	約17ヶ月
小惑星出発	令和元年(2019年)11月13日
地球帰還(予定)	令和2年(2020年)12月6日
探査対象天体	地球接近小惑星 Ryugu(リュウグウ)

主要搭載機器

サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



ミッションの流れ概要



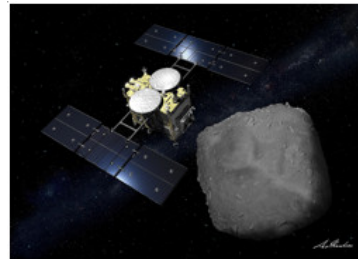
打ち上げ
2014年12月3日



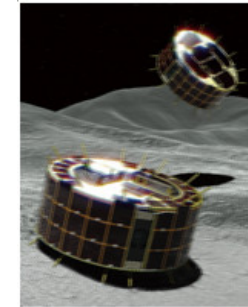
地球スイングバイ
2015年12月3日



リュウグウ到着
2018年6月27日



MINERVA-II-1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日



ターゲットマーカ分離
2018年10月25日

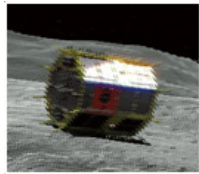


リュウグウ出発
2019年11月13日

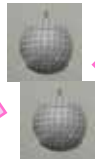


地球帰還
2020年12月6日

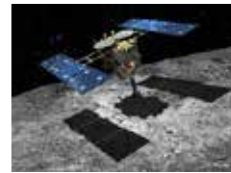
MINERVA-II-2
2019年10月3日



ターゲットマーカ分離
2019年9月17日



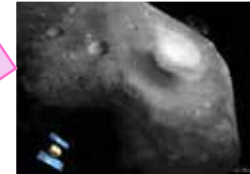
第2回タッチダウン
2019年7月11日



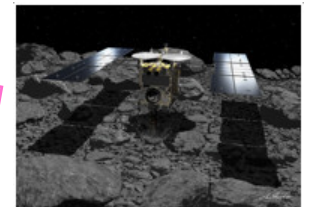
ターゲットマーカ分離
2019年5月30日



衝突装置
2019年4月5日



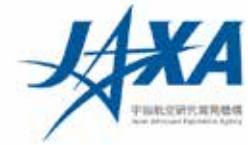
第1回タッチダウン
2019年2月22日



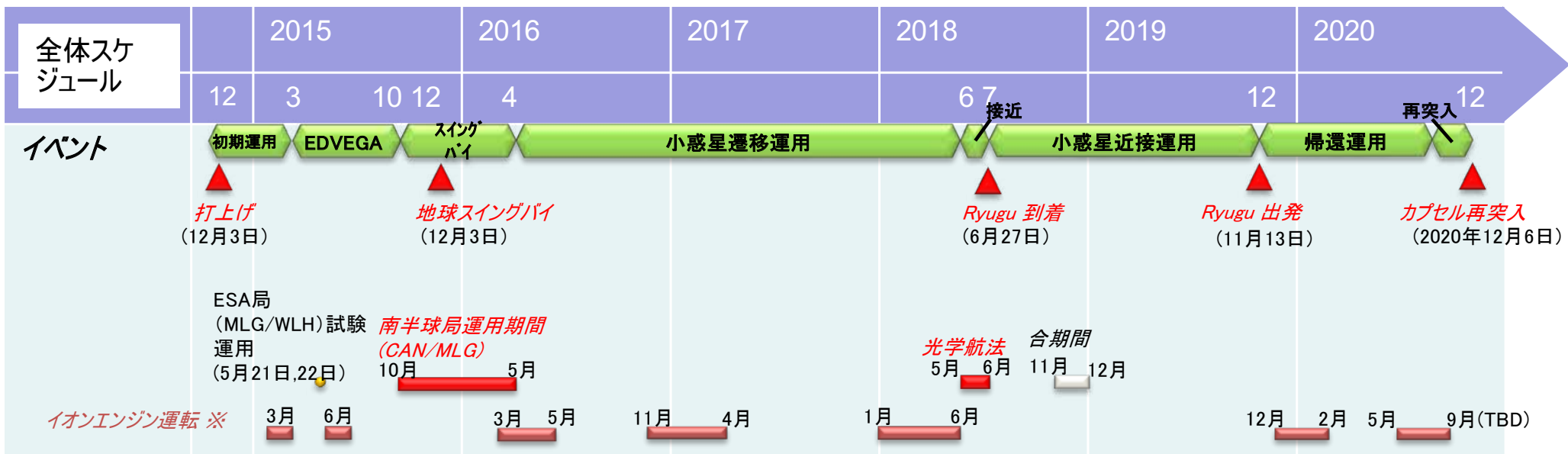
(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)



1. プロジェクトの現状と全体スケジュール



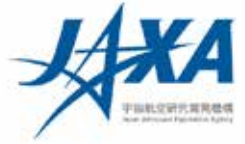
- 現状：－ 第2期イオンエンジン運転および再突入カプセルの地球帰還に関する作業は継続して行われている。
- － 拡張ミッションについての議論や検討を行っている。
- － サイエンス論文の投稿・出版がなされている。



(画像クレジット: JAXA)

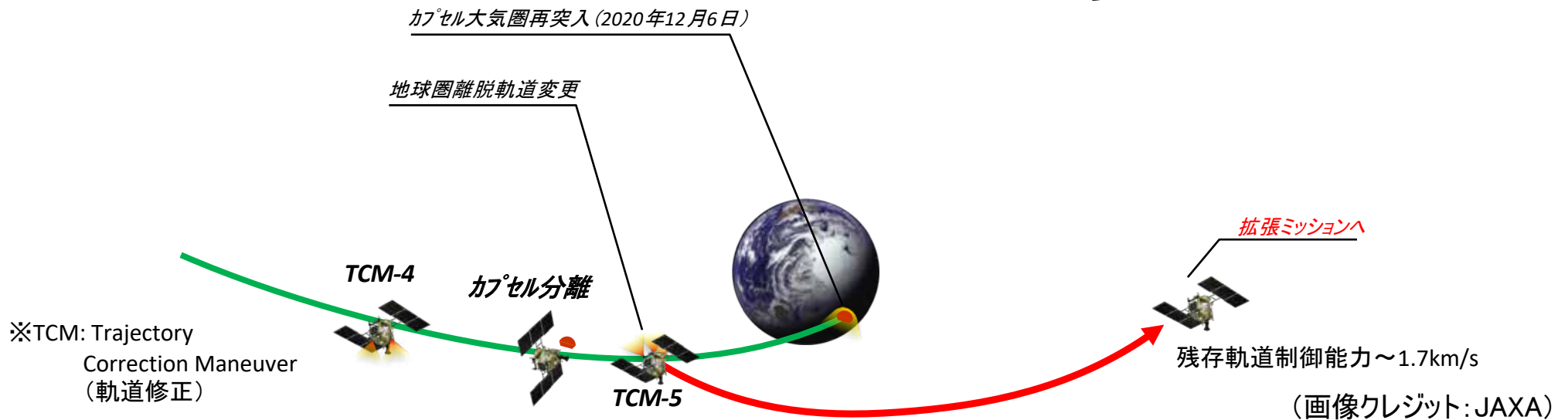


2. 拡張ミッション提案の背景



- 「はやぶさ2」は、地球圏離脱後、1.7km/s相当の軌道制御能力を残して深宇宙飛行を継続できる。
- 探査機の初期の目的は全て達せられており、延長して運用すれば挑戦的な軌道上運用技術を磨く稀有な機会となる。
- 他天体を目指せる場合、新しいミッションを仕立てるより遥かに良いコストパフォーマンスで、新たな科学成果を創出し得る。

地球圏離脱後のミッション
(**拡張ミッション**)を提案する。



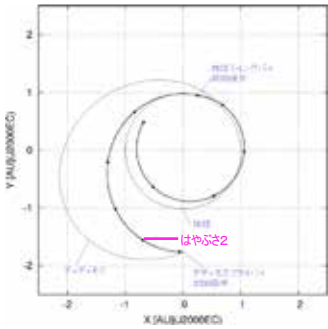


3. 拡張ミッションの検討過程

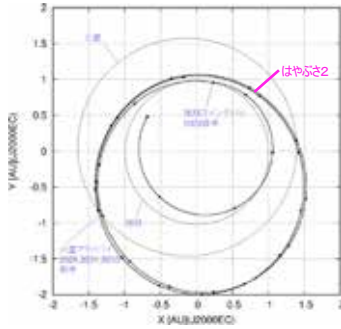


地球圏離脱後の軌道検討例

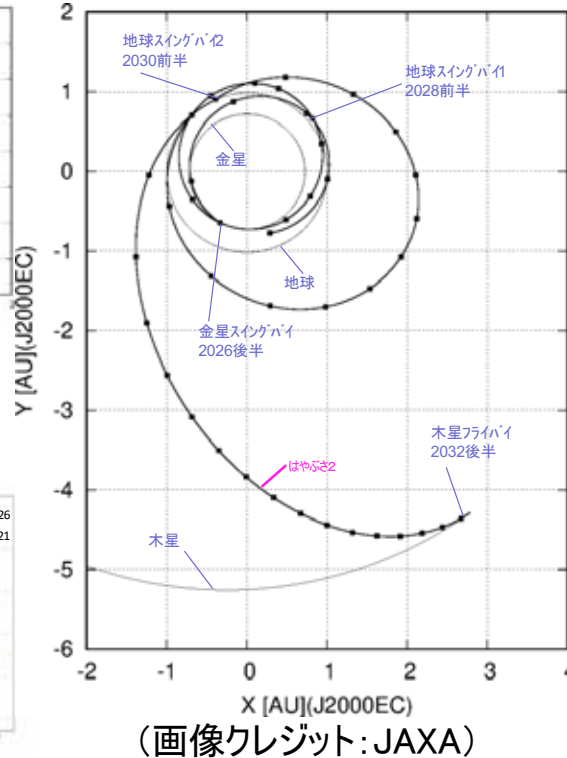
地球→地球→小惑星
(小惑星フライバイ/インパクト)



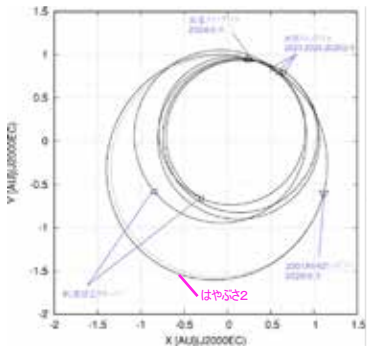
地球→地球→火星→火星→火星・・・
火星マルチフライバイ



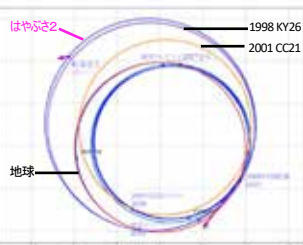
地球→金星→地球→地球→木星方面
金星フライバイ観測+遠方飛行実証



地球→金星→地球→地球→小惑星
(金星フライバイ+小惑星ランデブー)



地球→小惑星→地球→地球
→小惑星
(小惑星フライバイ+小惑星ランデブー)



- まず、「はやぶさ2」の残存軌道制御能力で、軌道成立性(天体力学)の観点で実現可能な軌道を探索した。
- 「はやぶさ2」は地球圏離脱後、地球の重力の影響(スイングバイの効果)で金星と地球の間の軌道に入る。
- その後、イオンエンジンと惑星スイングバイ(地球、金星等)を利用して、到達可能な天体を探索した。

◆探索対象天体

金星、地球、火星、小惑星、彗星
(「はやぶさ2」の太陽電池で稼働できるのは火星距離まで)

◆ミッションの形態

フライバイ探査: 高速で天体を通り過す。軌道設計は比較的容易。
ランデブー探査: 天体へ到着し留まる。軌道設計は難しい。

◆惑星 vs 小天体(小惑星・彗星)

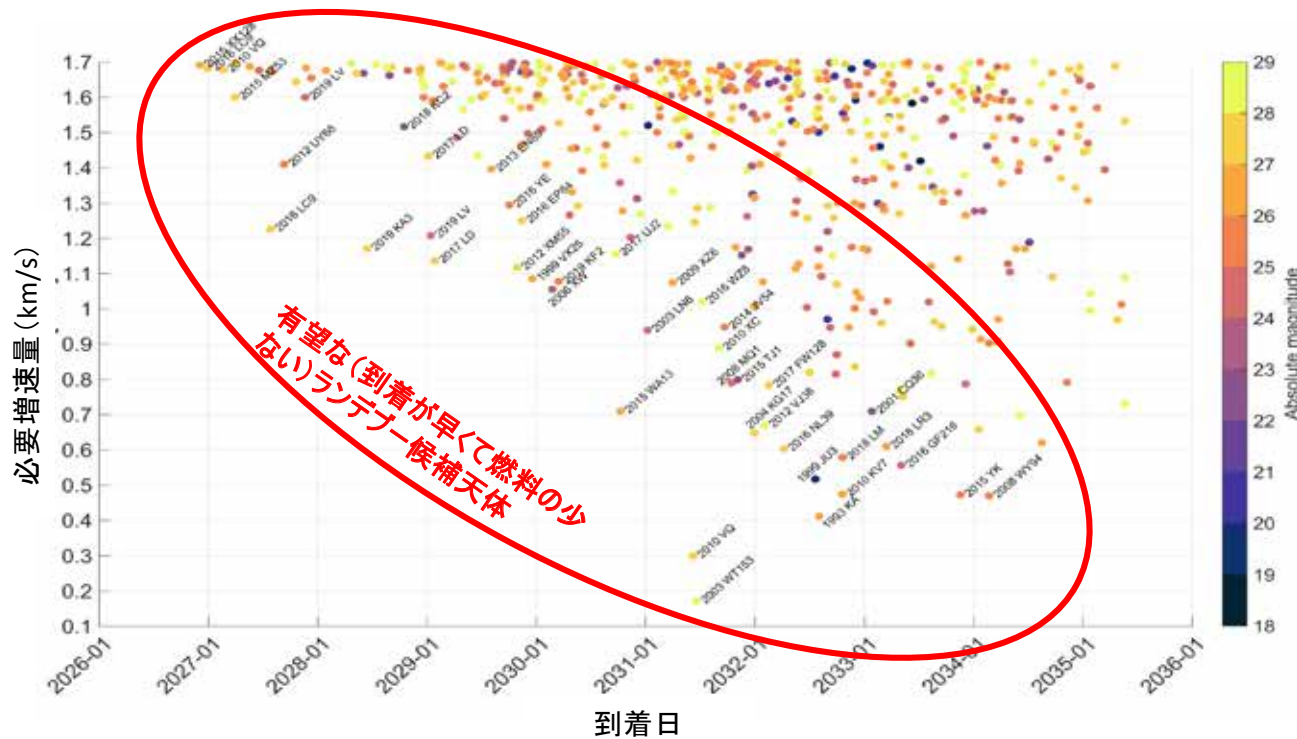
- 惑星は、フライバイのみ可能。スイングバイには利用できるが到着(軌道周回)は「はやぶさ2」の能力では不可能。
- 小天体は、フライバイ・インパクト・ランデブーなどが可能。



3. 拡張ミッションの検討過程



ランデブー可能小天体(小惑星・彗星)探索結果



候補天体の探索条件

- 地球軌道を通過する小惑星・彗星18002天体の中から、燃料が1.7km/s以下で到達可能な天体を探索。
- 「フライバイ」よりも「ランデブー」を優先して探索。

見つかった到達可能総天体数: 354

項目	個数
絶対等級22以下 (およそ直径 140 m 以上)	17
レーダー観測実績あり	30
地球再突入後 6年以内に到達可	2
7年以内に到達可	13
8年以内に到達可	31
バイナリ	0
準衛星・Minimoon	0
自転周期既知	23
今後レーダー観測可能	6
金星経由で到達可能	1

- ✓ 短期(1~5年)で到達可能な天体は(惑星・小天体含め)存在しない。
 - ✓ リエントリ+4~10年後の金星ないし地球スイングバイを経由することで、10年前後でランデブー可能な小惑星は多数見つかった。
 - ✓ これらの候補天体について、さらに運用成立性・科学的価値の観点で、絞り込みを実施した。
- (画像クレジット: JAXA)



3. 拡張ミッションの検討過程



- さらに以下の制約条件を満たし、工学・理学の観点でスコアの高い小惑星を絞り込み、上位2天体を選定した。

制約条件

- ・ 到着日: 2031/12/31 より前
- ・ ΔV : 1.6 km/s 以下
- ・ 到着日太陽距離が遠過ぎない
- ・ 軌道がよく分かっている

工学的成立性

小惑星の軌道確定度

地上からの観測性

軌道計画の成立性

探査機運用の成立性

理学的価値

大きさ

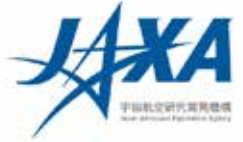
自転速度

形状

タイプ(型)

(これらを総合的に評価)





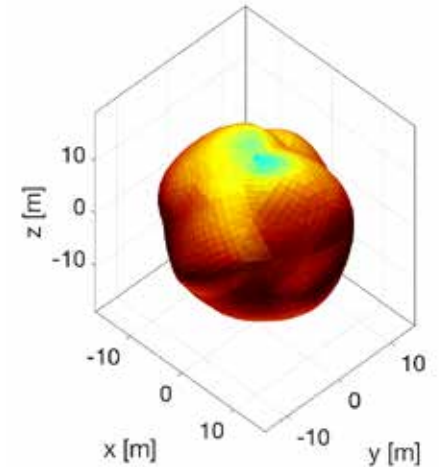
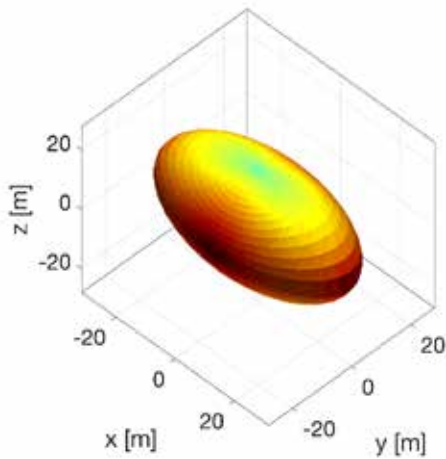
4. 拡張ミッション案概要

2つの候補天体について

<2001 AV43の物理特性>

<1998 KY26の物理特性>

- ・小さい(30~40m)
 - ・高速自転(自転周期 10分程度)
- ↓
- ラブルパイルなのか、1枚岩なのか？



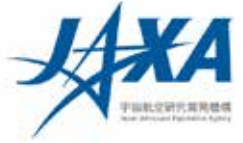
2029年11月11日に、地球に約30万kmまで接近 ←この接近のタイミングで「はやぶさ2」がランデブーする

C型小惑星の可能性があり、リュウグウやベヌーとの比較が興味深い

形状	細長い、アスペクト比:約0.5(変光観測より)
平均直径	約40 m程度
自転周期	10.2 min (0.17hr)
タンブリング運動	短期時間変化は確認されず
スペクトル型	S型の可能性、断定できず

形状	球状(レーダ観測より)
平均直径	約30 m程度
自転周期	10.7 min (0.178hr)
タンブリング運動	短期時間変化は確認されず
スペクトル型	炭素質小惑星の可能性あり

(画像クレジット: Auburn University, JAXA)



4. 拡張ミッション案概要

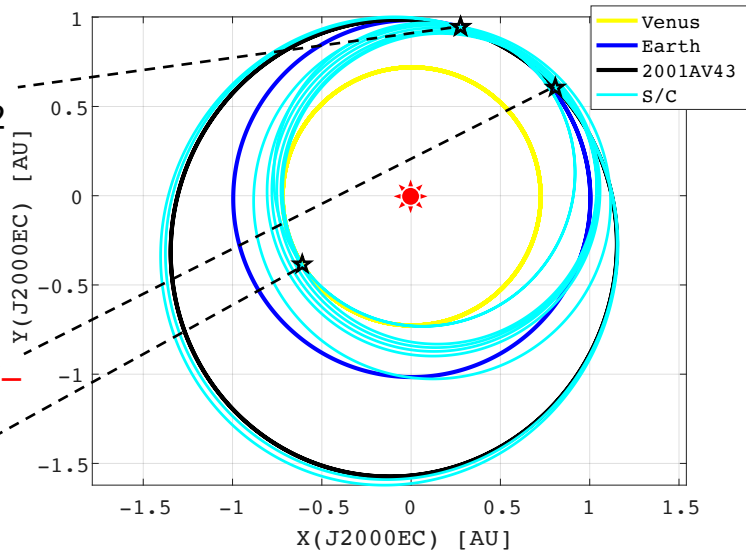
- 2001 AV43 および 1998 KY26へのミッション計画を作成した。
- 最終的にはこれら2つから1つを選ぶ。

EVEEAシナリオ 総加速量 1.25km/s
(Earth→Venus→Earth→Earth→Asteroid)

2020/12
拡張ミッション開始
2025/12, 2026/12
地球スイングバイ

2029/11
2001AV43ランデブー

2024/8
金星スイングバイ



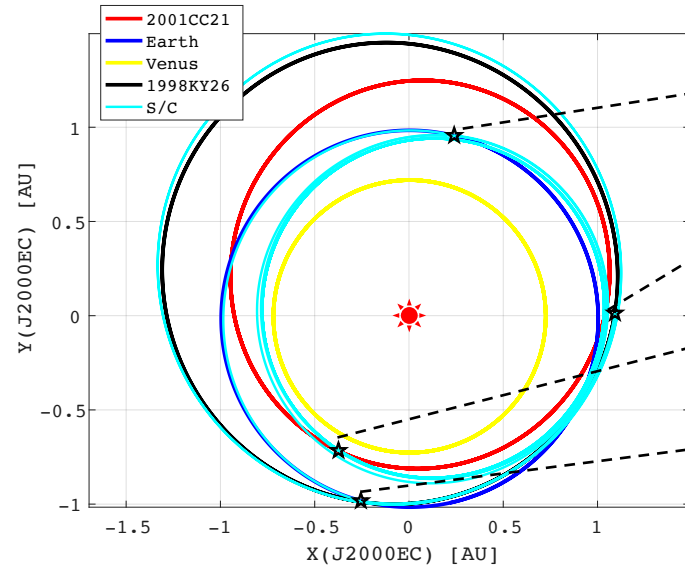
EAEEAシナリオ 総加速量 1.19km/s
(Earth→Asteroid→Earth→Earth→Asteroid)

2020/12
拡張ミッション開始
2027/12
地球スイングバイ

2031/7
1998 KY26ランデブー

2026/7
2001CC21フライバイ

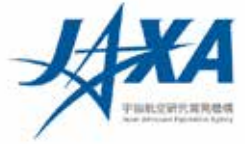
2028/6
地球スイングバイ



(画像クレジット: JAXA)

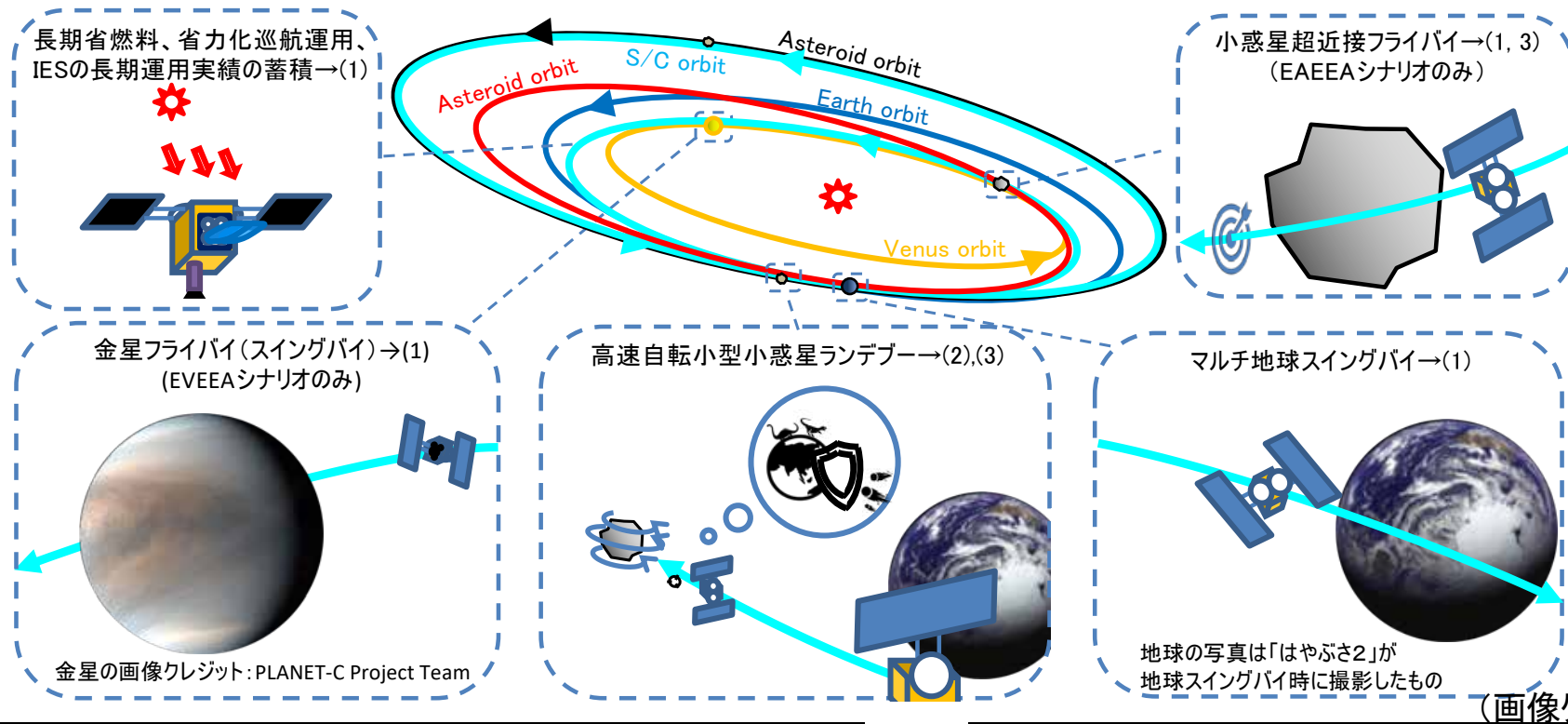


4. 拡張ミッション案概要



2001 AV43 あるいは 1998 KY26 を目指す意義

- (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





4. 拡張ミッション案概要



意義:(1) 太陽系長期航行技術の進展

- 地球帰還までのミッションでの工学成果を踏まえ、より自在な、より遠方への探査をめざす上で必要な運用技術を獲得する
 - 超低消費燃料運用や探査機システムの超長期維持技術
 - イオンエンジンの運用技術の実践、長期性能取得
 - イオンエンジンと組み合わせた太陽系マルチフライバイ航行技術
- 長期航行やフライバイを利用した理学観測を行う。
 - 黄道光や系外惑星の観測
 - 金星フライバイ時の観測 (EVEEAシナリオ)
 - 小惑星フライバイ時の観測 (EAEEAシナリオ)
 - 地球スイングバイ時の月観測



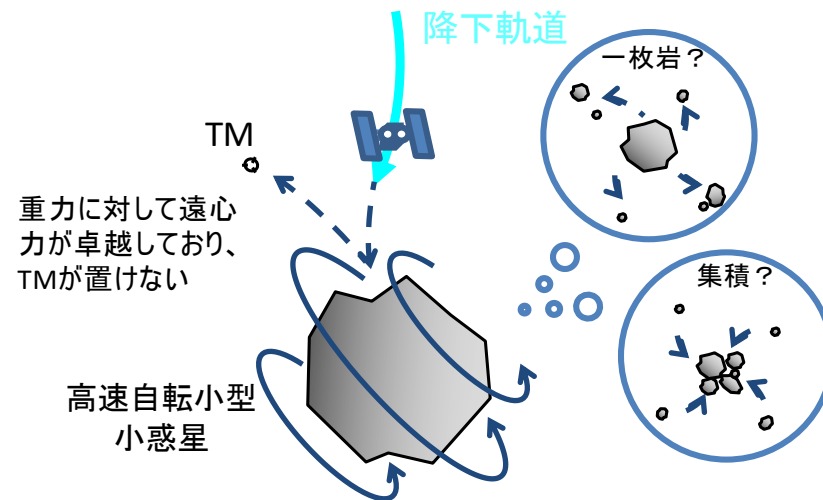
(画像クレジット: JAXA)



4. 拡張ミッション案概要

意義:(2) 高速自転小型小惑星探査の実現

- これまで探査されたことのない前人未踏の領域であり、探査対象として非常に魅力的
 - どのように形成されているか謎(一枚岩と言われているが、集積型の可能性も)
 - 小惑星表面では、重力に対して、遠心力の方が卓越した環境



(画像クレジット:JAXA)

- リュウグウとの比較観測により、リュウグウで得られた科学的知見をさらに深められる
- 特殊な力学環境へのアプローチなどから、新たな小惑星探査技術の獲得が期待される



4. 拡張ミッション案概要

意義:(3) Planetary Defenseに資する科学と技術の獲得

Planetary Defenseとは:

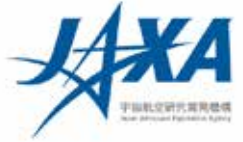
- 天体の地球衝突による災害を防ぐ活動(スペースガードとも呼ぶ)
- 約6600万年前に恐竜を含む多くの生物種が絶滅した原因として、約10kmの小天体の地球衝突が有力視されている。
- 恐竜絶滅ほどの規模までは考えなくても、大きさが数十メートルの天体の衝突であっても地域的には大きな被害を受ける。(例:1908年のツングースカ大爆発、2013年のチェリャビンスク隕石)
- 大きさが数十メートルの天体の地球衝突頻度は、100年～数百年に1度程度。



イラスト: 池下章裕

拡張ミッションでは:

- 衝突すれば地域的に大きな被害を引き起こす数10mサイズの小惑星の素性を解明できる。(世界初)
- 数10mサイズの小惑星近傍での探査技術を磨くことで、Planetary Defense技術に資する知見を得られる。(世界初)
- EAEEAシナリオの場合は、超近接フライバイ/インパクト技術も獲得できる。



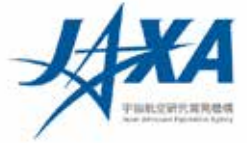
4. 拡張ミッション案概要

結論(まとめ)

- 「到達できる天体」と「価値の高い天体」の両面から、科学シナリオを構築。
- 見えてきたキーワードは、
 - イオンエンジン+スイングバイでの太陽系航行技術の蓄積
 - 高速自転天体 (Fast Rotator)
 - 地球接近小惑星にまつわる科学・技術
= Planetary Defense
- 最終的に、「運用成立性」「科学的意義」の観点で絞り込み、2つの小惑星が候補に残った。
 - この2つのシナリオそれぞれにつき、ミッション計画案を作成した。
 - 現在、2つのシナリオを実現性の高さの観点で最終評価中。今秋までにこの中から1つを選び、最終案とする予定。
- 約10年という長期ミッションになるため、飛行中に段階的に成果を積み上げていく方針である。



5. 今後の予定

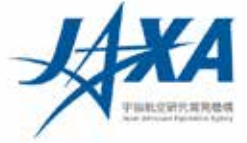


■ 運用の予定

2020年5月12日～9月	第2期イオンエンジン運転を9月頃まで継続
2020年10月～	リエントリー精密誘導
2020年12月6日	リエントリー

■ 記者説明会等

2020年8月(TBD)	記者説明会@オンライン(TBD)
--------------	------------------

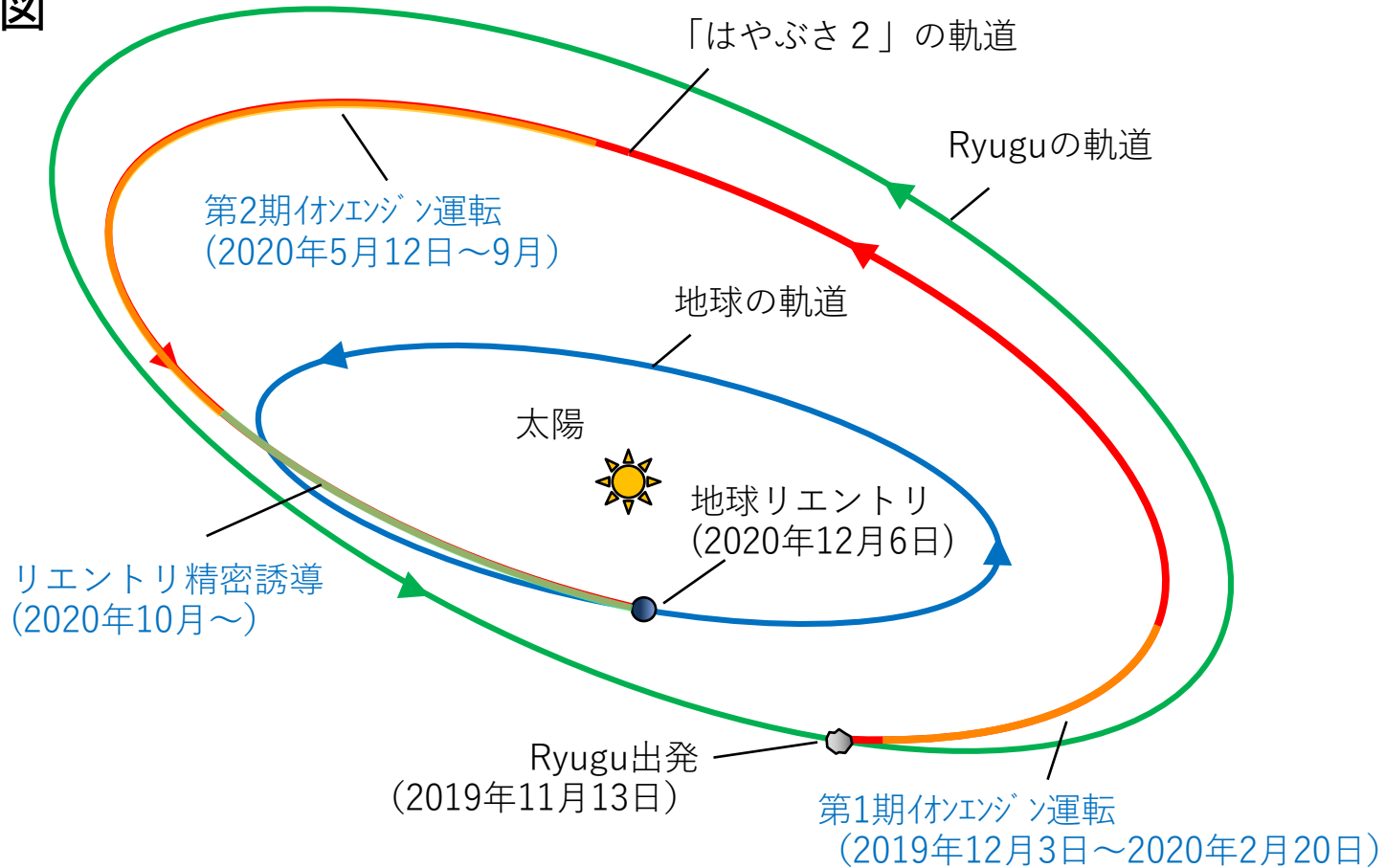


参考資料



帰還巡航運用計画

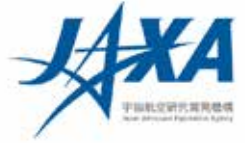
帰還フェーズ軌道図



(画像クレジット: JAXA)



地球帰還最終誘導フェーズ



※TCM: Trajectory Correction Maneuver (軌道修正)

イオンエンジンによる軌道修正
(9月中旬, 地球距離3700万km)

カプセル大気圏再突入(12月6日)

軌道微調整
(化学推進系使用, 以降同様)

地球圏離脱軌道変更

軌道微調整

ウーメラに向けた軌道変更

軌道微調整

カプセル分離

通過高度
200km以上

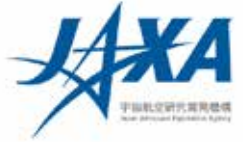
TCM-0,1,2時に狙う軌道

地球圏離脱軌道

最終誘導フェーズ
(10月以降)

- 各イベントの実施日は現状未定。
- TCM-0,1,2時は、地球から200km以上離れた点を通る軌道に入れる。
- カプセル分離後、TCM-5によって探査機本体は地球圏を再離脱する。

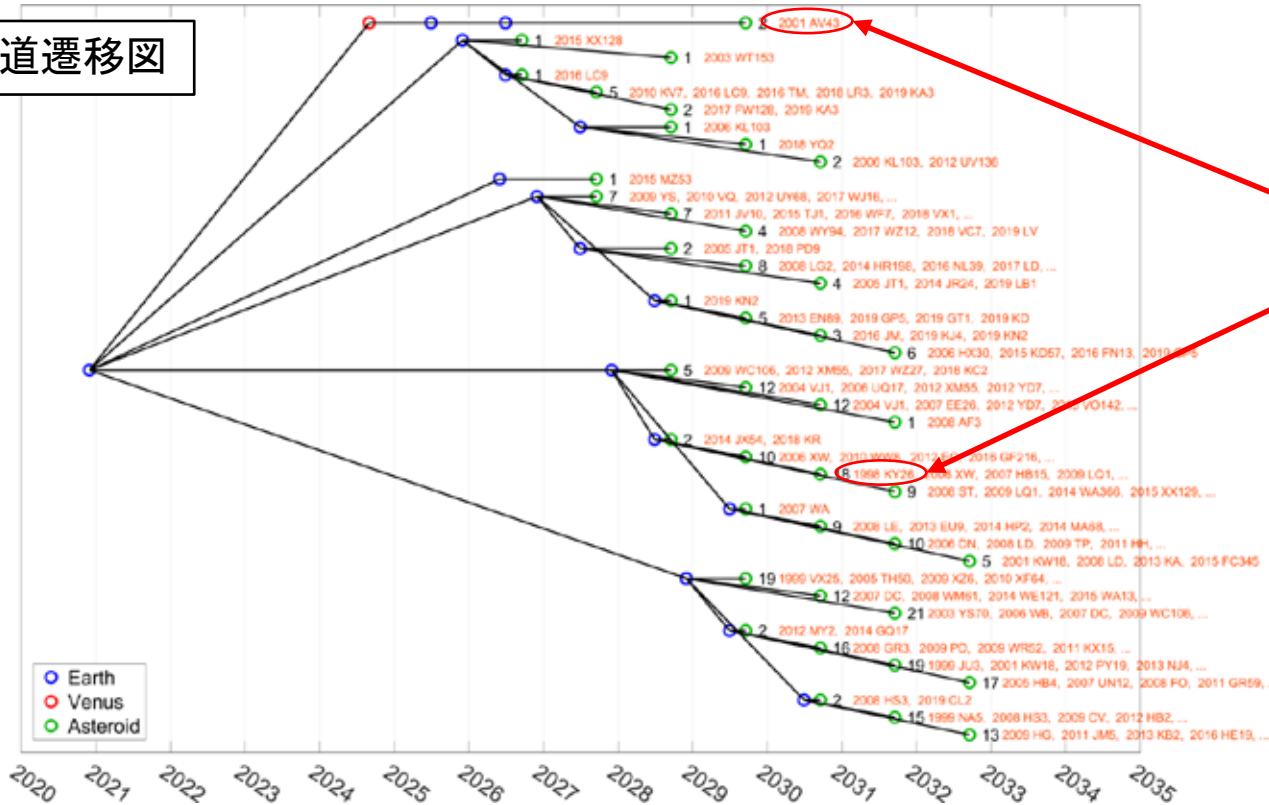
(画像クレジット: JAXA)



候補天体の探索

探査機の残存燃料や運用条件、探査天体の科学的検討を踏まえて、2030年前後までに到達できる天体を探索した結果、ランデブー可能な候補小天体が2つ見出された。

候補天体の軌道遷移図



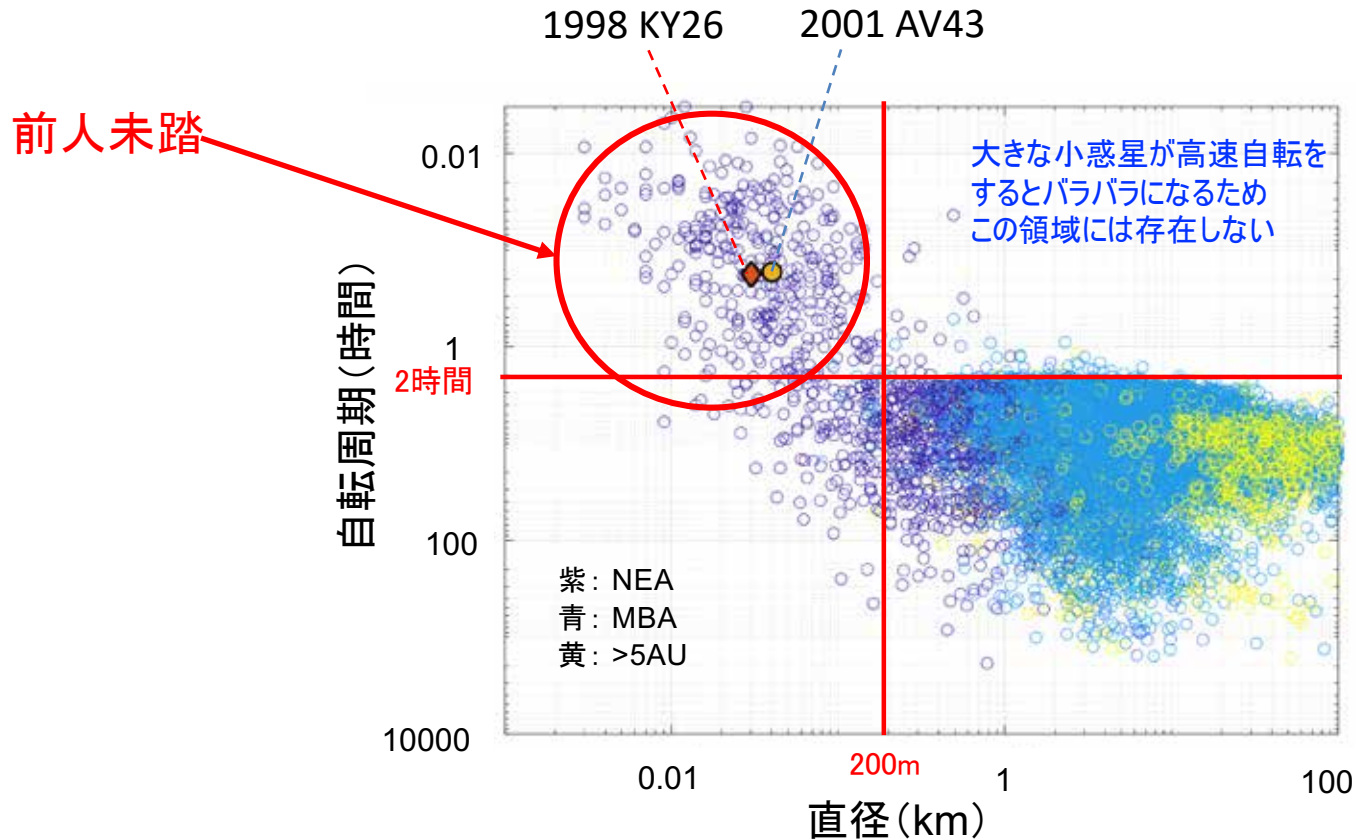
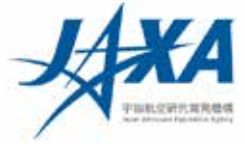
候補天体

2001 AV43
1998 KY26

(画像クレジット: JAXA)



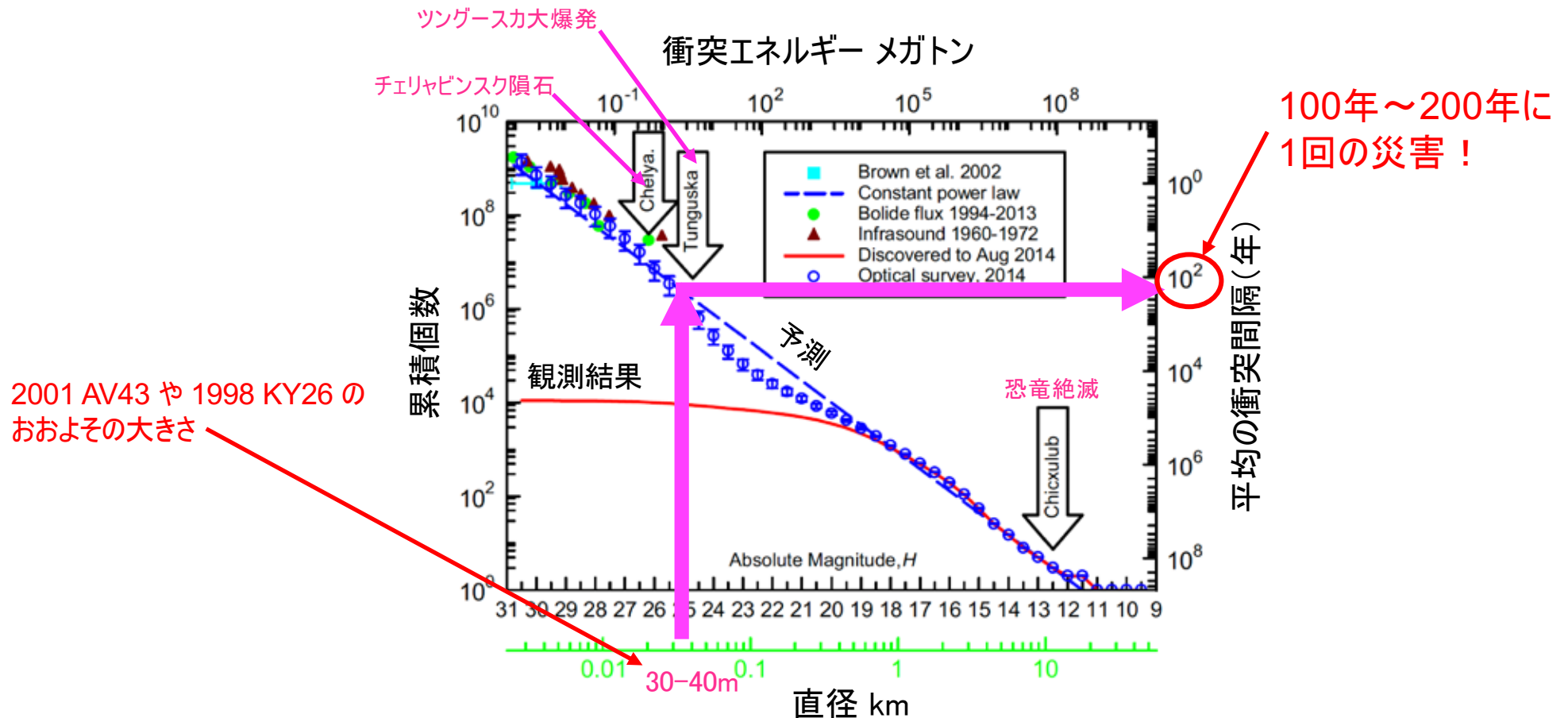
小惑星の直径と自転周期の関係



(© Auburn University, JAXA)



小惑星の地球衝突頻度予測



(元になっている図は、Harris and D'Abramo, Icarus 257 (2015) 302-312 より引用)