

小惑星探査ミッション 「はやぶさ2」



第11回 宇宙科学シンポジウム

2011年1月6日

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

吉川 真 (JAXA)

はやぶさ2プロジェクト準備チーム

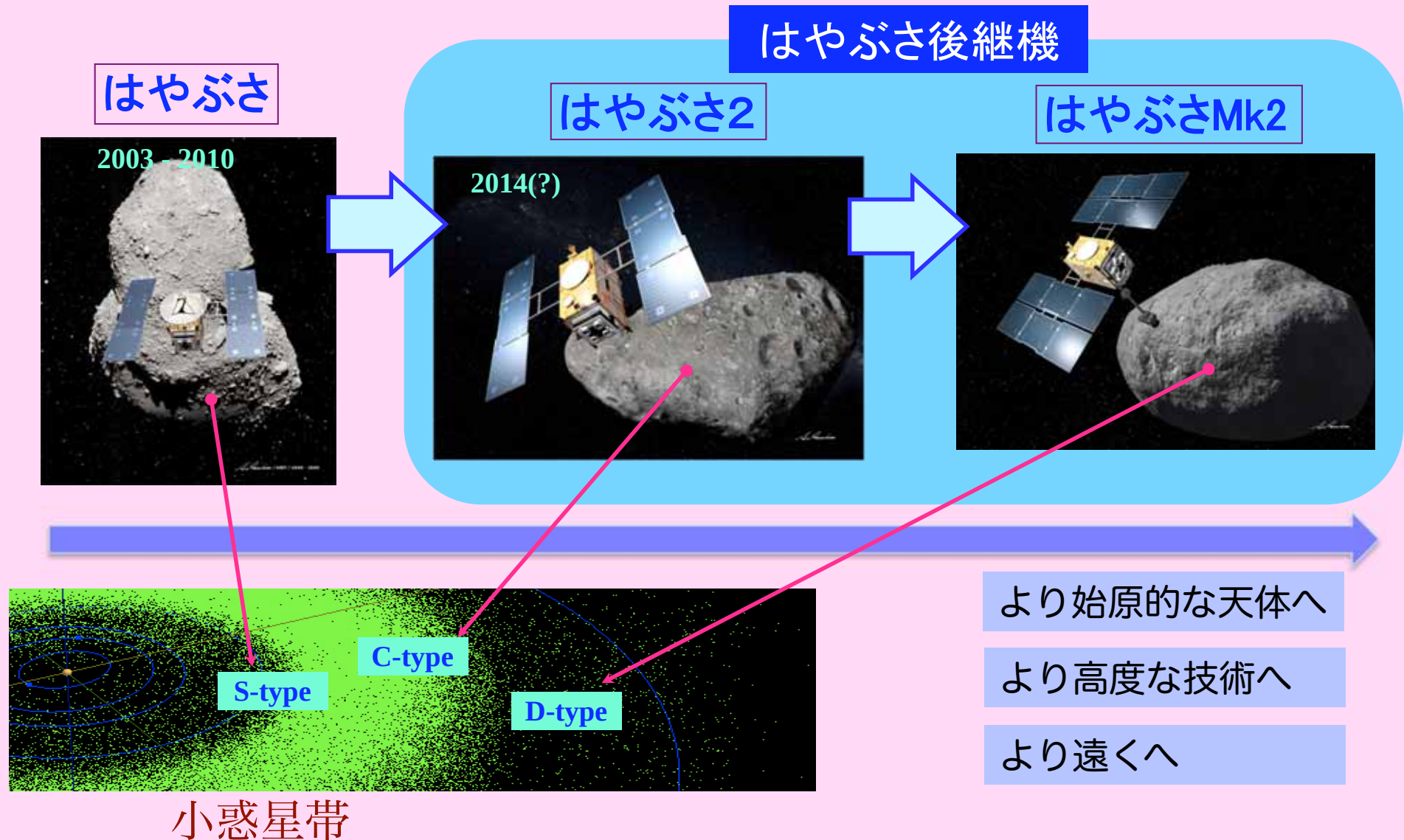
現状のまとめ

- 「はやぶさ」のカプセルが地球帰還し、「はやぶさ」ミッションの経験がフルに生かせる状況になった。
- 来年度（H23年度）に、「はやぶさ2」の予算が認められた。
- 今年度内のプロジェクト移行を目指して、いろいろな作業を継続している。

ポスター発表の一覧

- P3-040: はやぶさ 2 計画–探査機システム検討状況– (津田)
- P3-041: はやぶさ 2 サイエンス概要 (安部)
- P3-042: はやぶさ 2 衝突装置の科学目標 (高木@愛知東邦大学)
- P3-043: はやぶさ 2 着陸帰還機に搭載される観測装置 (中村@産総研)
- P3-044: はやぶさ 2 ミッションにおけるミネルバ 2 ローバの検討状況 (吉光)
- P3-045: はやぶさ 2 着陸探査による小惑星表面の科学観測 (岡田)
- P3-046: はやぶさ 2 衝突装置について (佐伯)
- P3-047: はやぶさ 2 小惑星近傍での画像航法誘導制御 (照井)

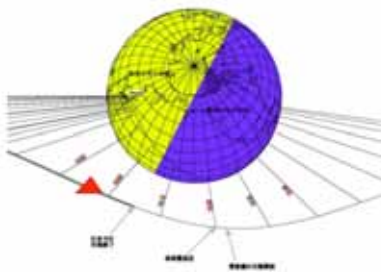
「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ 始原天体のプログラムの探査の構想



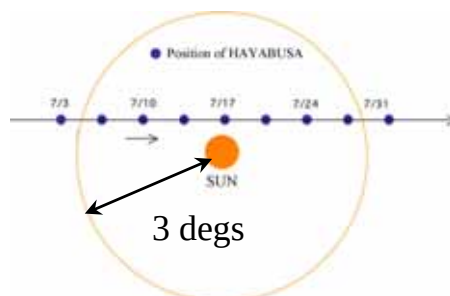
「はやぶさ」のエンジニアリング（工学）



打ち上げ



地球スイングバイ



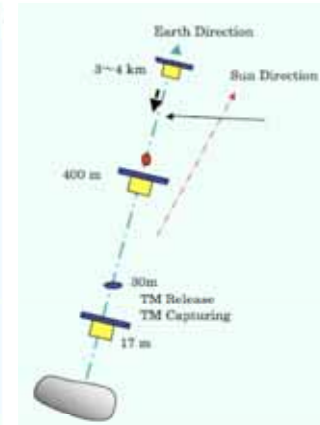
合



光学航法



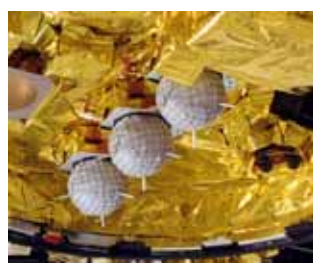
イトカワ
接近運用



タッチダウン



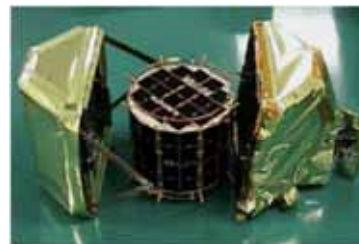
イオンエンジン



ターゲットマーカ



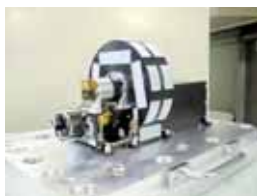
サンプラー



ミネルバ



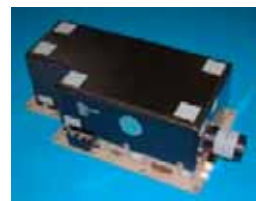
再突入カプセル



AMICA



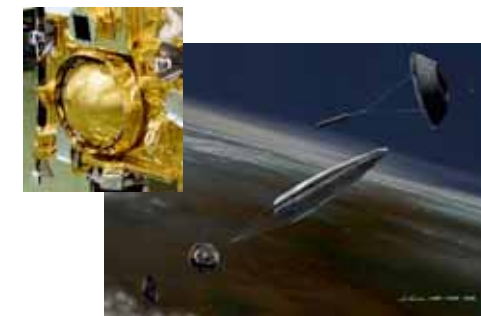
LIDAR



NIRS

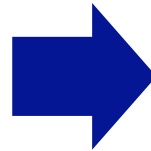


XRS



「はやぶさ」のサイエンスの成果

Before



After



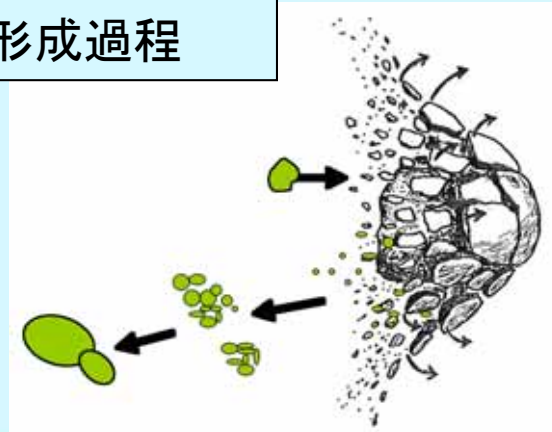
ラブルパイルであること

宇宙風化

微小天体における
地形学・地質学

表面の鉱物組成: 普通コンドライト

形成過程



探査機が見た小惑星

マチルダ (Mathilde)



66×48×46 km

ガスプラ
(Gaspera)



18×11×9 km

イダ (Ida)



60×25×19 km



エロス (Eros)
38×15×14km

シュテインス
(Steins)



直径約4.6 km



ルテティア
(Lutetia)
約130 km



イトカワ (Itokawa)
0.535×0.294×0.209 km

by NASA, ESA, JAXA

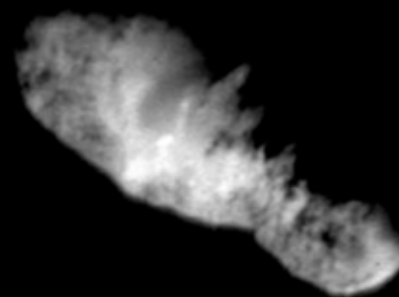
探査機が見た彗星

Halley彗星



14.4×7.4×7.4 km

Borrelly彗星



4.0×1.58 km

Tempel 1彗星



7.6×4.9 km

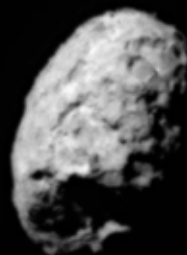
by NASA, ESA

Hartley 2彗星



1 km程度

Wilt 2 彗星



5.4×3.8×3.0 km

スケールを合わせてみると...

by Planetary Society



243 Ida - $58.8 \times 25.4 \times 18.6$ km
Galileo, 1993

Dactyl
[(243) Ida I]
 1.6×1.2 km
Galileo, 1993

9969 Braille
 $2.1 \times 1 \times 1$ km
Deep Space 1, 1999

5535 Annefrank
 $6.6 \times 5.0 \times 3.4$ km
Stardust, 2002

2867 Steins
 5.9×4.0 km
Rosetta, 2008

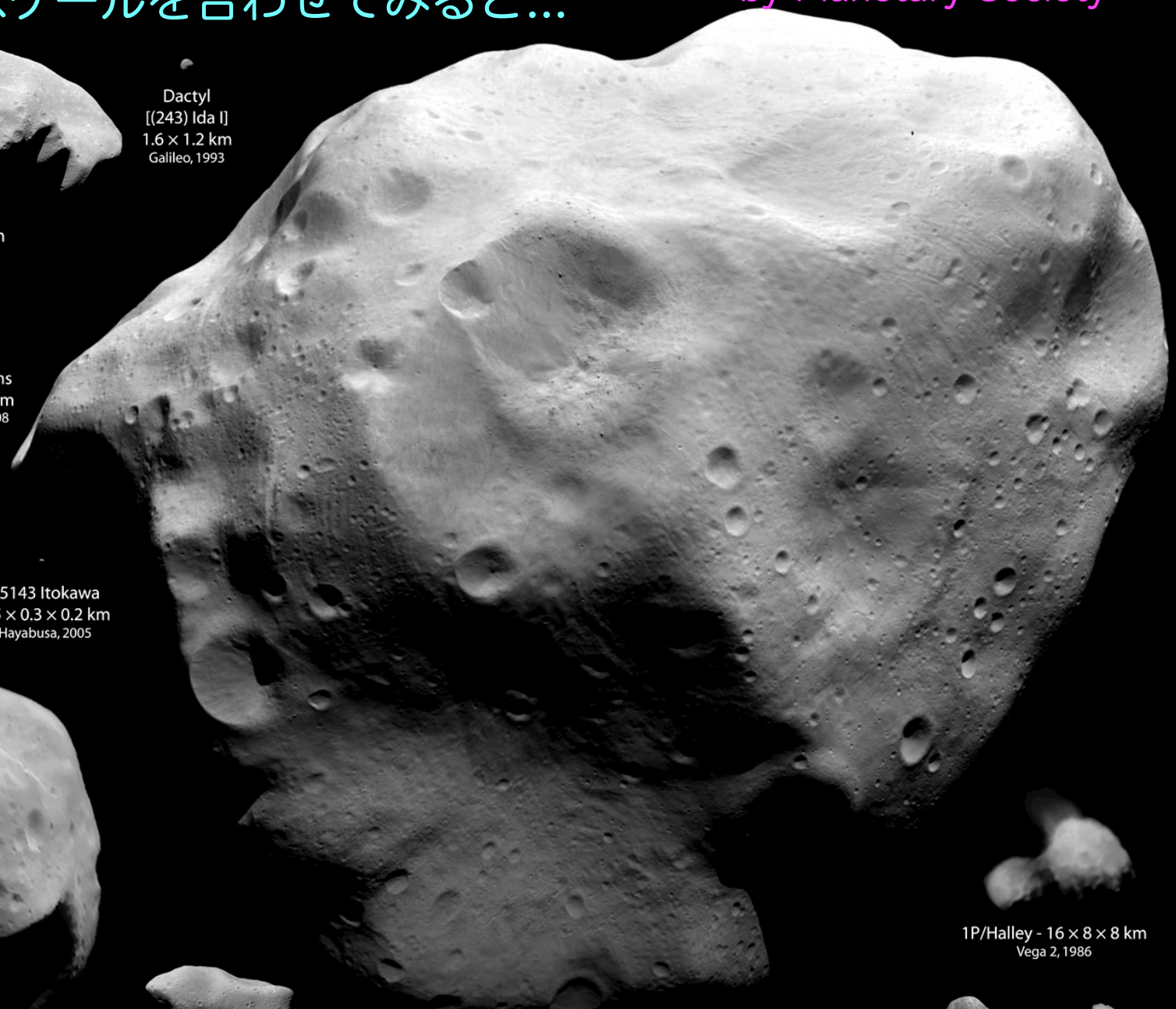


433 Eros - 33×13 km
NEAR, 2000

25143 Itokawa
 $0.5 \times 0.3 \times 0.2$ km
Hayabusa, 2005

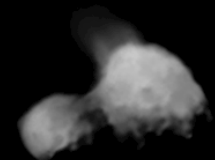


253 Mathilde - $66 \times 48 \times 44$ km
NEAR, 1997



21 Lutetia - $132 \times 101 \times 76$ km
Rosetta, 2010

951 Gaspra - $18.2 \times 10.5 \times 8.9$ km
Galileo, 1991



1P/Halley - $16 \times 8 \times 8$ km
Vega 2, 1986



19P/Borrelly
 8×4 km
Deep Space 1, 2001

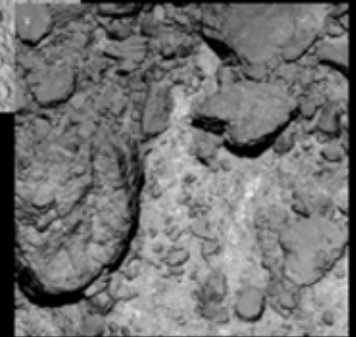
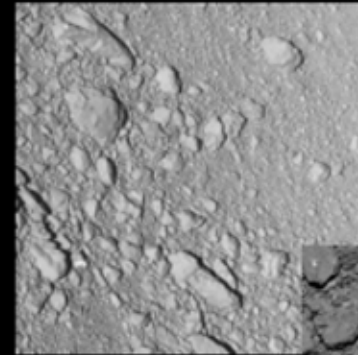
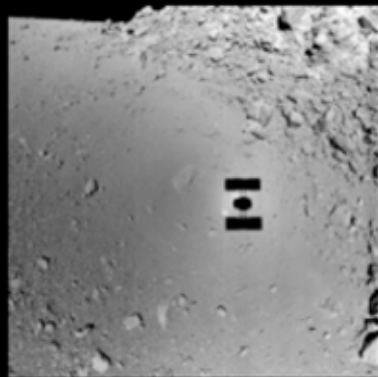


9P/Tempel 1
 7.6×4.9 km
Deep Impact, 2005



81P/Wild 2
 $5.5 \times 4.0 \times 3.3$ km
Stardust, 2004

イトカワ



「はやぶさ 2」が目指すもの

- 「はやぶさ」で挑戦した技術をより信頼性の高いものにする
- 始原天体の科学を進展させる
- 新たな技術にも挑戦し、太陽系探査の可能性を広げる

「はやぶさ 2」の意義

1. 科学的意義

「我々はどこから来たか」—太陽系の起源と進化、生命の原材料

地球、海、生命の原材料物質は、太陽系初期には同じ母天体の中で、互いに密接な関係を持っていた。この相互作用を現在でも保っている始原天体からのリターンサンプルを分析することで、太陽系の起源・進化の解明や生命の原材料物質を調べる。

2. 技術的意義

「技術で世界をリードする」—日本独自の深宇宙探査技術の確立

「はやぶさ」は世界初の小惑星サンプルリターンとして、数々の新しい技術に挑戦したミッションであった。その経験を継承し、より確実に深宇宙探査を行える技術を確立する。さらに、新たな技術※にも挑戦し、今後の新たな可能性を開く。

※衝突装置による人工クレーター形成：“**非破壊から破壊へ**”

3. 探査としての意義

「人類の活動領域を広げる」—太陽系内の自在な移動

地球から太陽系天体を往復してくる技術を確認し、さらにラグランジュ点利用などの新たな試みも行うことで、人類の活動領域を広げる。また、スペースガード、資源利用、有人探査のターゲット等の観点から小天体を理解する。

「はやぶさ2」の成功基準

ミッション目標	ミニマム	フル	エクストラ
理学目標 1 C型小惑星の物質科学的特性を調べる。特に鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする。	小惑星近傍からの観測により、C型小惑星の表面物質に関する、新たな知見を得る。	採取試料の初期分析において、鉱物・水・有機物相互作用に関する新たな知見を得る。	天体スケールおよびミクロスケールの情報を統合し、地球・海・生命の材料物質に関する新たな科学的成果を上げる。
理学目標 2 小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の直接探査により、小惑星の形成過程を調べる。	小惑星近傍からの観測により、小惑星の内部構造に関する知見を得る。	衝突体の衝突により起こる現象の観測から、小惑星の内部構造・地下物質に関する新たな知見を得る。	・衝突破壊・再集積過程に関する新たな知見をもとに小惑星形成過程について科学的成果を挙げる。 ・探査ロボットにより、小惑星の表層環境に関する新たな科学的成果を挙げる。
工学目標 1 「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。	イオンエンジンを用いた深宇宙推進にて、対象天体にランデブーする。	・探査ロボットを小惑星表面に降ろす。 ・小惑星表面サンプルを採取する。 ・再突入力プセルを地球上で回収する。	N/A
工学目標 2 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。	衝突体を対象天体に衝突させるシステムを構築し、小惑星に衝突させる。	特定した領域に衝突体を衝突させる。	衝突により、表面に露出した小惑星の地下物質のサンプルを採取する。

これまでの経緯と今後のスケジュール

「はやぶさ2」に関するこれまでの経緯

- 有志で「はやぶさ」以降の小天体探査を検討
- 2004年4月、JSPEC（当時・宇宙科学研究本部）の元に、「次期小天体探査WG」が正式発足。S型、C型、D/P型とより始原的な天体へ向かうプログラムの探査の科学・技術の検討を継続。
- 2006年初め、「はやぶさ」が予定していたやり方でのサンプル採取ができなかったことを受けて、確実に小惑星物質を採取するために「はやぶさ」同型機による新たなサンプルリターンミッション「はやぶさ2」を早急に立上げる検討が開始。探査天体として、C型小惑星である1999 JU3を選定。
- 2006年10-11月、ミッション定義、システム要求ならびにシステム定義に関わる一連の技術審査を実施。
- 2007年6月、プロジェクト準備審査が行われ、2007年8月29日、プリプロジェクトに移行。

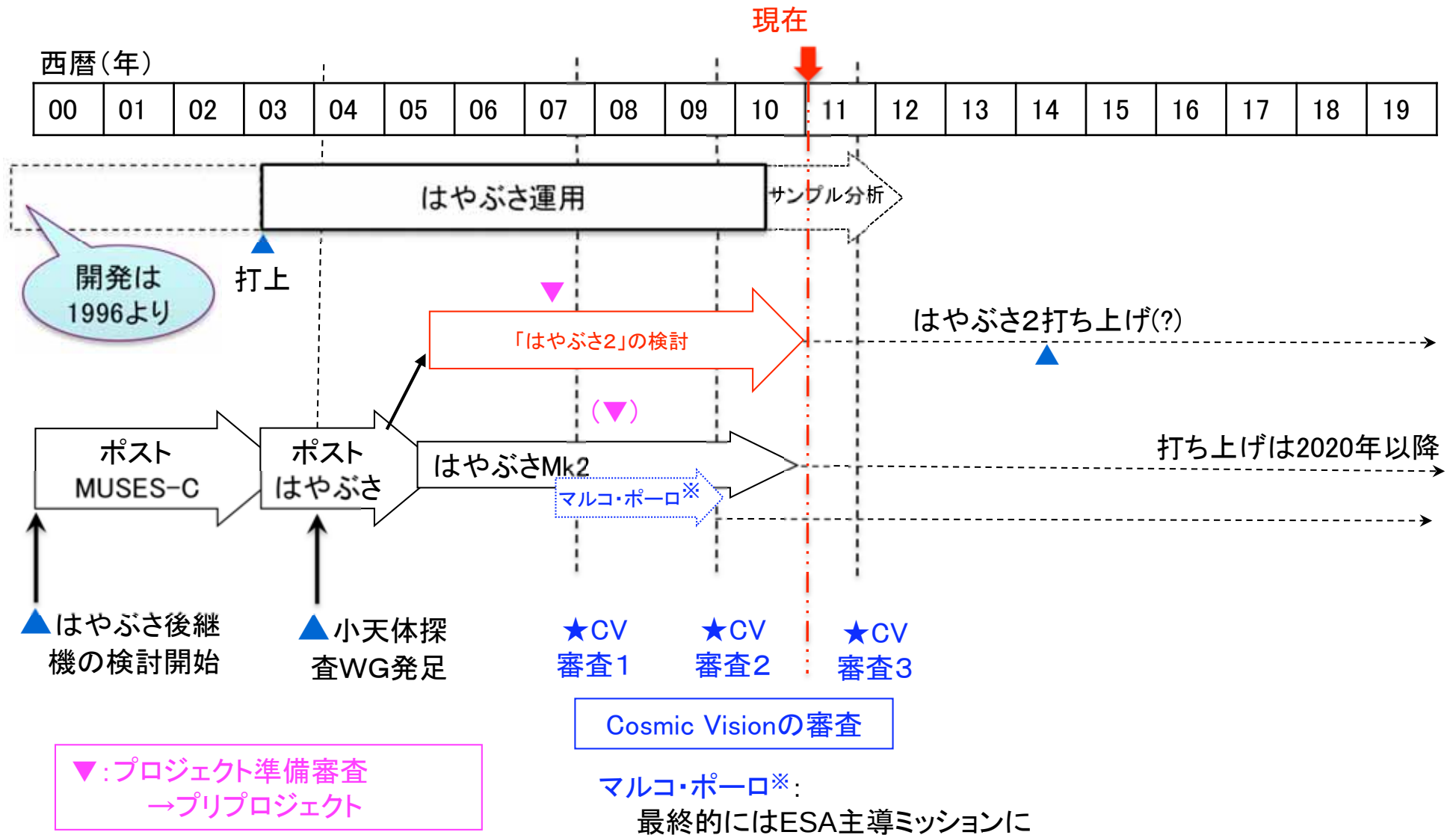
「はやぶさ2」に関するこれまでの経緯

(続き)

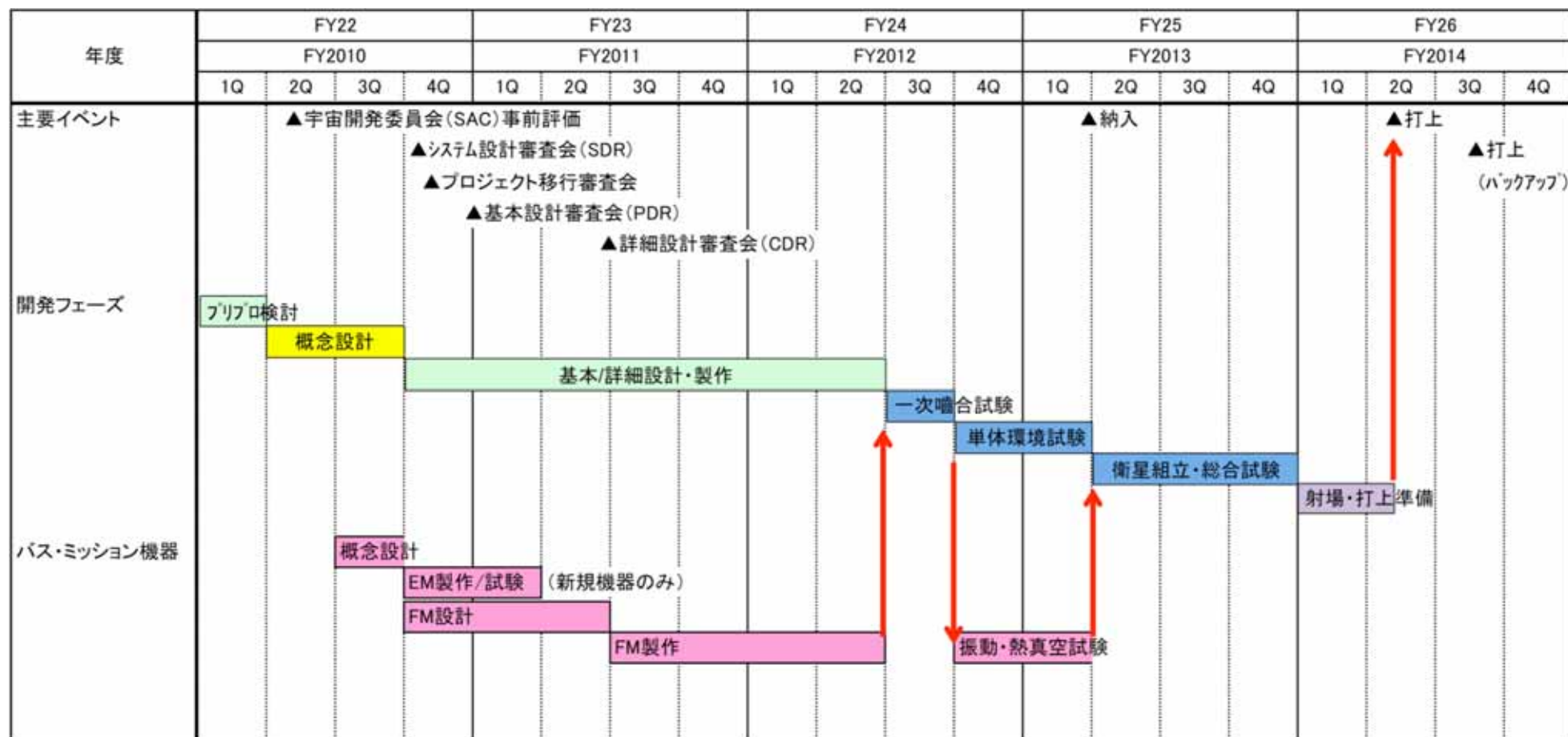
- 2008年11月、H2A相乗り打ち上げや、海外の廉価なロケットの利用など経費節減について検討をしつつ、従来のミッションから**スコープを拡大**する検討を開始。
- 2009年6-7月、スコープ変更後のはやぶさ2計画について、外部評価を経て**△MDR審査（ミッション定義審査）**でミッション要求の妥当性が審査され、「小惑星探査機 はやぶさ2」プロジェクト準備審査（デルタ審査）で一部のスコープ拡大に伴う変更が決定。
- 2009年12月、**システム要求審査（SRR）**を実施し、システム定義審査フェーズへの移行が了承。
- 2010年7月-8月、**宇宙開発委員会**の推進部会にて事前評価され、了承。
- 2010年9月末：「元気な日本復活特別枠」で予算要求。→**2010年年末に2011年度（H23年度）予算として認められる。**
- 2010年12月：新規機器についてのRFPが修了

※今後は、H22年度内にプロジェクト移行を目指す（SDR等の審査）

これまでの経緯（線表）

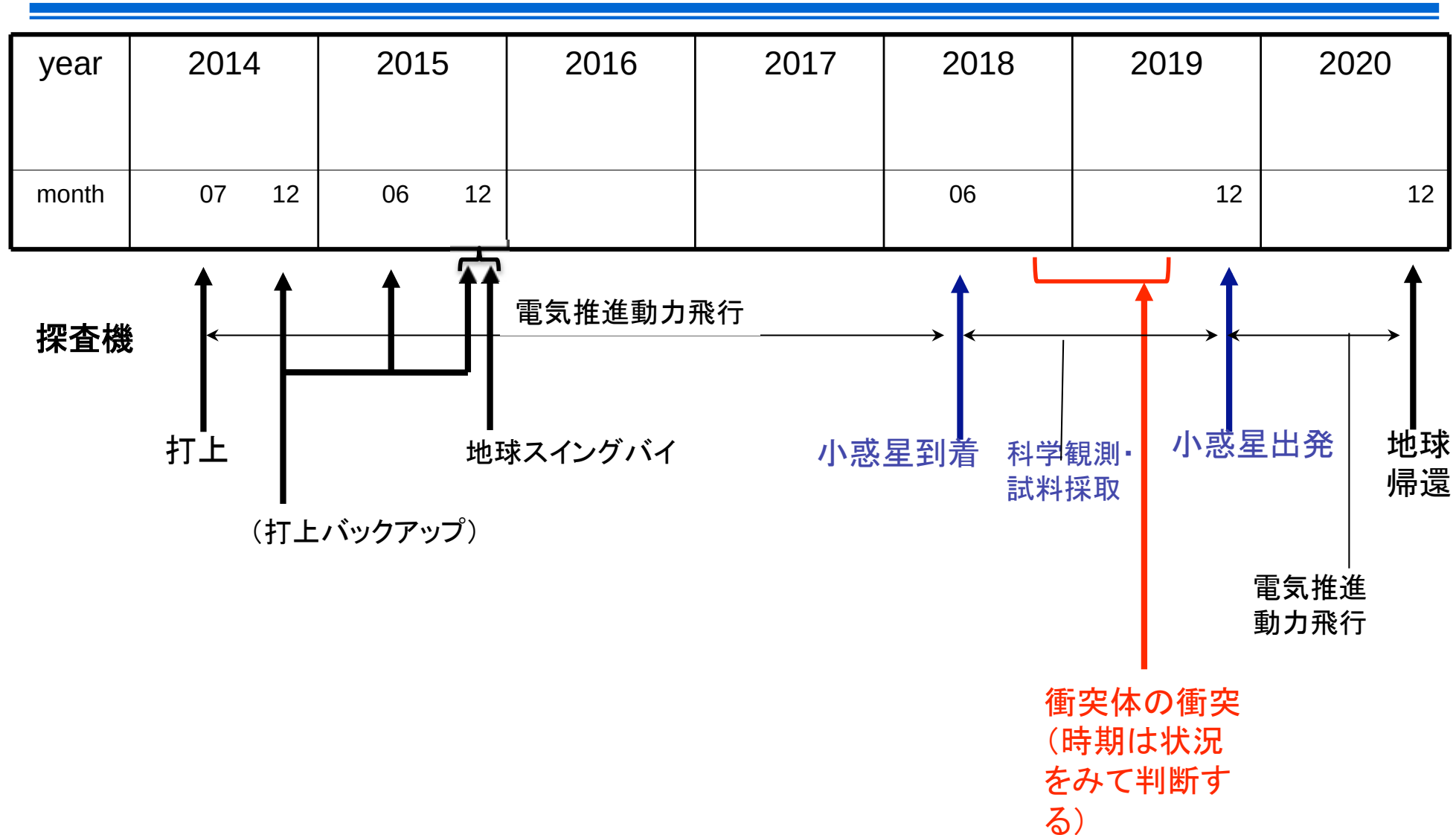


今後のスケジュール



「はやぶさ2」ミッションシナリオ

現在検討中のプラン



これまでの検討状況

「はやぶさ2」の現在の提案

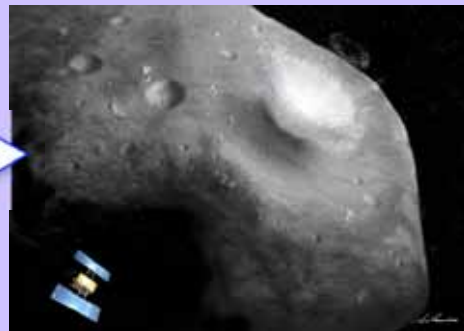
打上げ

2014年7月ないし12月
(2015年6月、12月)



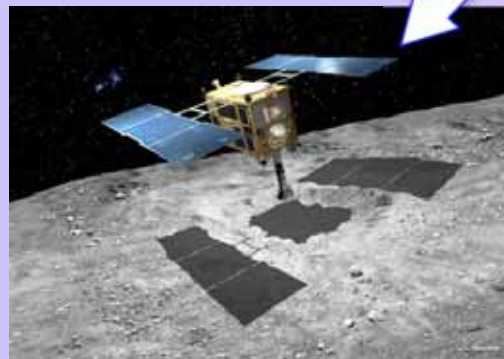
探査機によるリモートセンシング観測では、光学カメラ、赤外線分光計、LIDAR(距離測定)などの機器を用いて、小惑星の特性を調べる。その後小惑星の近接観測、小型ローバの投下、表面試料の採取を行う。

2018年6月



新しいミッションを追加

衝突体の衝突による小惑星表面地形の変化や形成された人工クレーターなどを探査機が観測することで、小惑星の地下物質、内部構造、再集積過程に関する新たな知見を得る。安全が確認できれば、人工クレーター近傍での試料採取にも挑む。



2019年
12月

2020年12月

地球帰還

探査機が地球に戻り、カプセルを地上で回収する。

サンプル分析

形成されたクレーターの観測とサンプリング



「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較

	はやぶさ (MUSES-C)	はやぶさ2(仮称) (?)
探査天体	S型小惑星(イトカワ) 地球接近小惑星、サイズ:535m	C型小惑星(1999 JU3) 地球接近小惑星、サイズ:約900m
技術	新しい技術の実証 ・イオンエンジン ・自律航法 ・ 微小重力下での試料採取 ・リエ ントリカプセル ・微小連続推進 +地球スイングバイ ・その他	技術の成熟+新しい技術 ・「はやぶさ」の技術をより確実に ・新規技術:衝突装置 Ka帯通信系
科学観測装置	・近赤外分光計 ・蛍光X線分光計 ・多バンド可視カメラ ・レーザー高度計	・近赤外分光計:観測帯域を長波長側に変更。水の検出。 ・中間赤外カメラ:熱慣性計測。 ・多バンド可視カメラ ・レーザー高度計
その他の機器	・ローバ → ミネルバ	・ミネルバ2(仮称)、ランダーなど
ミッション期間	2003年~2010年	2014年~2020年

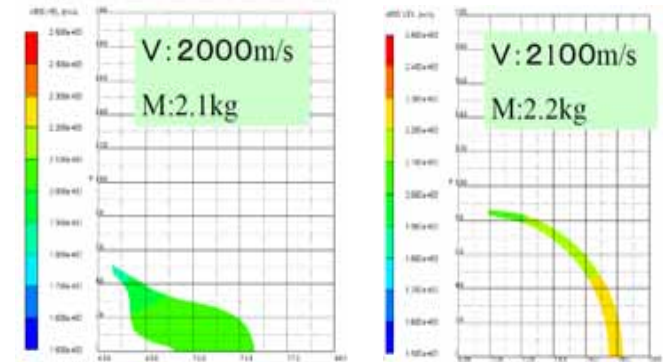
※赤字が新規開発機器

搭載観測機器(候補)

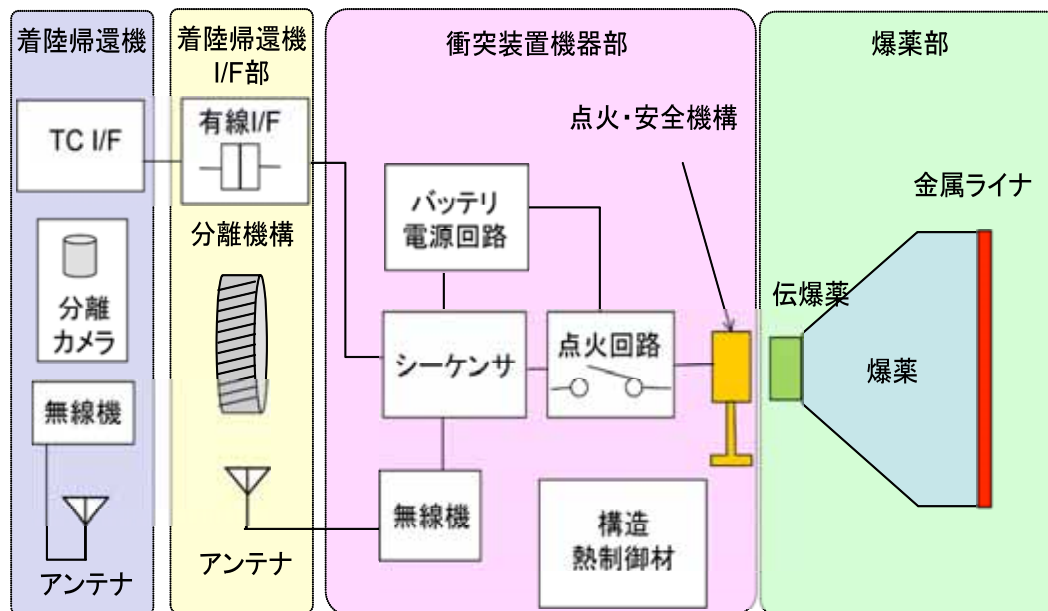
搭載機器候補	観測項目	仕様案
★ 地上遠隔観測	小惑星サイズ、表面温度を計測 分光観測より鉱物を同定	観測波長: 可視 - 中間赤外
★ リモセン レーザー測距	表面形状・荒さを計測する 自由落下軌道から重力を測定する	計測距離: 50±1m - 50±0.01km 計測周波数: 1 Hz
蛍光X線分光計	天体表面上の主要元素組成を決定する。	検出元素: Mg、Al、Si、S、K、Ca、Fe (C級フレア時) 空間分解能: 50m@高度1km
★ 多バンド可視カメラ	形状を決定(体積、平均密度、空隙率) 地形マッピング、鉱物分布を計測する	空間分解能: 2m/pixel@GP 観測波長: ~1000nm、~700nm、UV
★ 近赤外分光計	鉱物を同定する(隕石と比較) 水・含水鉱物の検出	波長範囲: 0.764 - 2.247 μm(分光計1) 1.7 - 3.4 μm(分光計2) 0.6 - 3.6μm(分光計3)
★ 中間赤外カメラ	表層温度と熱慣性を調べ、状態(岩石、砂状)を明らかにする	観測波長域: 8 - 12 μm、観測温度範囲: 220 - 250 K 空間分解能: 10m以下(全球)、1m以下(衝突点)
レーダー観測	天体の地下構造を計測する	周波数: 300 - 900 MHz(送信出力: 1W) 観測深さ: 深さ: 表層~数十m/空間分解能: 0.25m
★ サンプルリターン	・ 鉱物の詳細同定、水の存否 ・ 有機物を同定する ・ 宇宙風化作用を計測する ・ 軽元素同位体測定	サンプラー: 弾丸式、新規実証(とりもち式orコアラー式) 試料サイズ: mmサイズの試料を採取する。 採取回数: 2地点での採取(ノミナル)
★ 自由落下計測	小惑星近傍の異なる地点上空で、GM値の差異を計測する	姿勢制御スラスタ噴射せずレーザー測距(補完的にレンジ計測)
小型ランダ	表面物質を拡大撮像する 着陸地点全景を撮像する 鉱物を同定する	(顕微鏡) 4μm分解能、4色フィルタ、近赤外分光計 (広角カメラ) 60°視野、12色フィルタ
小型ローバ(1)	表面温度を計測する 表面を撮影する	(温度計) 白金、-200~540°C (カメラ) 38万画素

衝突装置検討

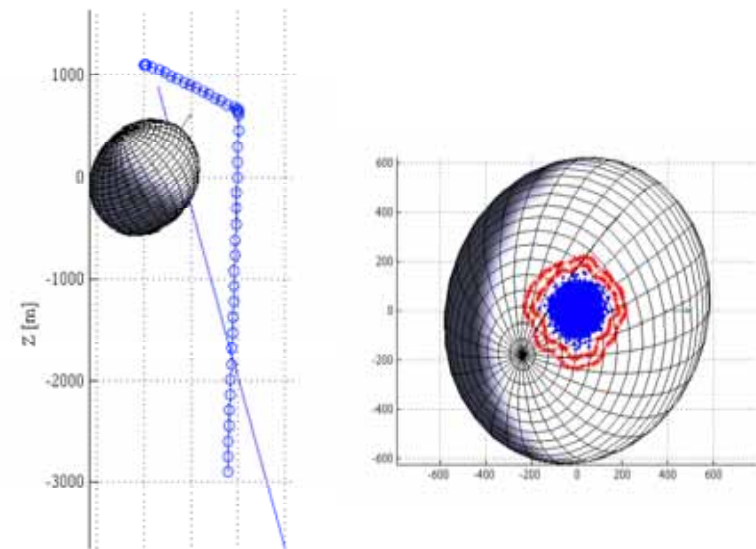
- 衝突装置
 - 衝突装置構成はほぼFIX
 - 作動シーケンス検討(安全な退避マヌーバ, 分離カメラの使用)
 - ライナ形状の検討(より大きなクレータを与えるライナ形状について)



中実ライナと中空ライナ



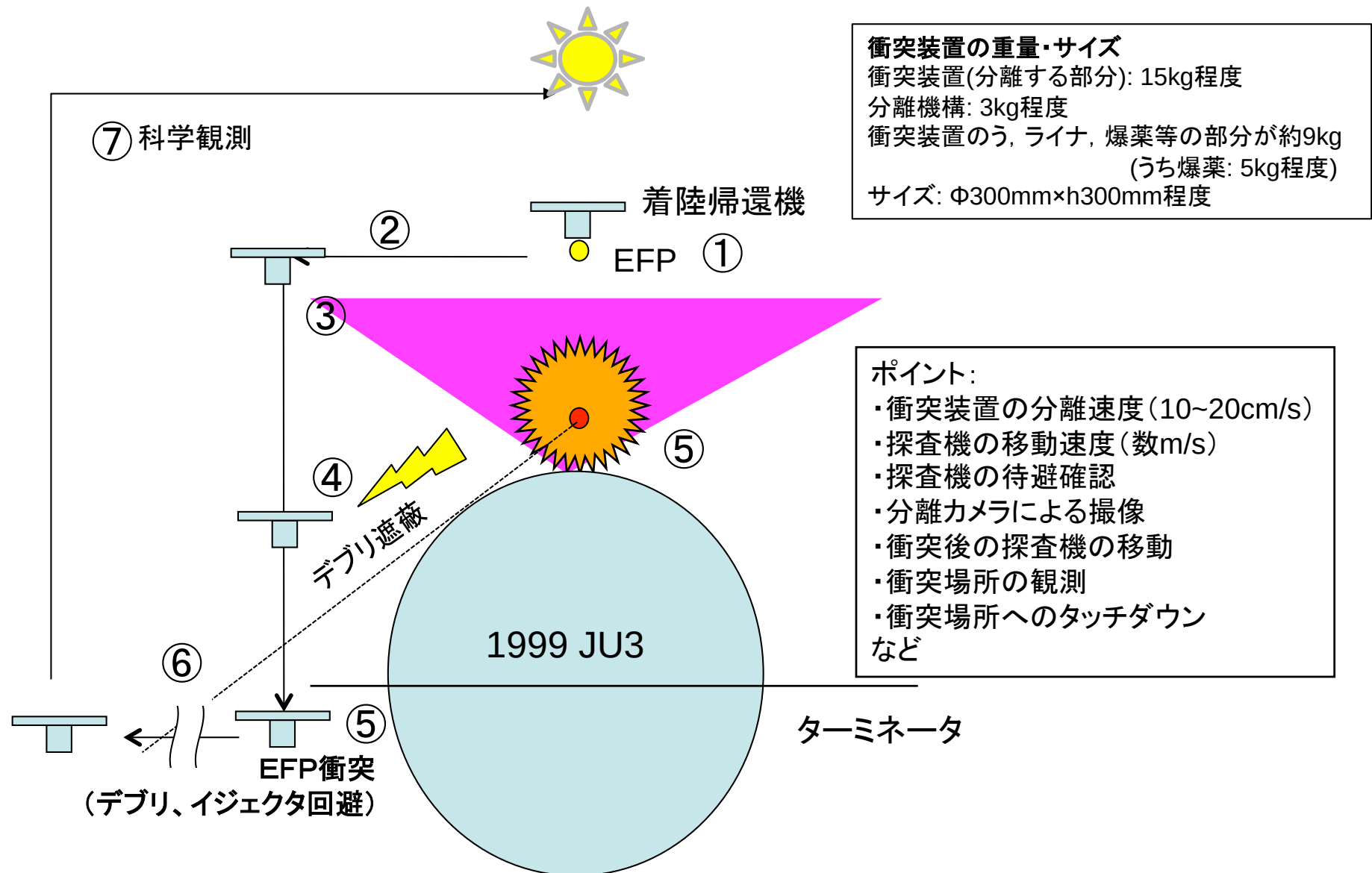
衝突装置構成



退避マヌーバとクレータ位置検討

詳細はポスターへ→P3-046はやぶさ2衝突装置について

衝突装置を使ったミッションのシーケンス



リモートセンシング観測装置

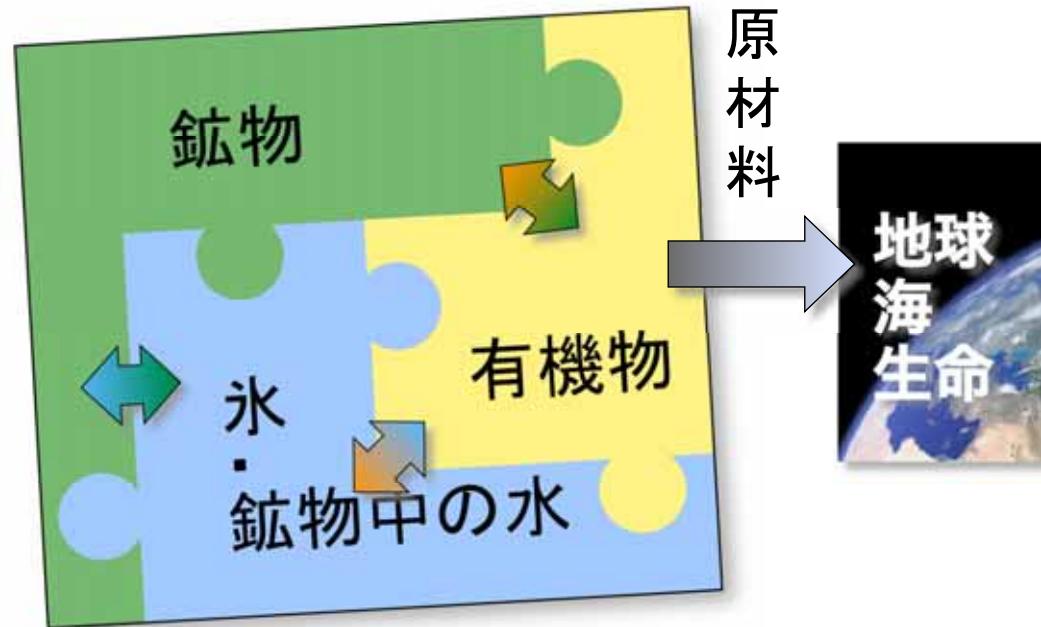
- ノミナルの4つの観測装置を選定
 - 可視カメラ・レーザー測距装置・近赤外分光計・中間赤外カメラ
- 近赤外分光計、中間赤外カメラについてはRFPを行い担当メーカーを決定
- 航法機器でもある可視カメラ・レーザー測距装置についてはGNC チームと共同で仕様策定中
- ベースとなるホームポジションでの全球観測に加え、サンプル採取地点の同定や EFP 衝突地点の詳細観測を含む全体運用計画を、システム担当者とともに立案

詳細はポスターへ→P2-82 はやぶさ2着陸帰還機に搭載される観測装置

衝突装置の科学

- 地下物質のサンプル採取
 - 直径 2 m、深さ 50 cmのクレーターを形成し、その内部に着陸・サンプル採取をめざす
- 地下物質の観測
 - 分光観測等でクレーター内外の違いを見つける
- 衝突現象の観測
 - イジェクタ・カーテンの観測から衝突点直下の空隙率等を推定する
- 再集積過程に関する知見の取得
 - イジェクタ堆積物の厚さ分布から速度分布を推定し、小惑星再集積過程に関する知見を得る

サンプル分析による科学



無機-氷-有機
相互作用の解明

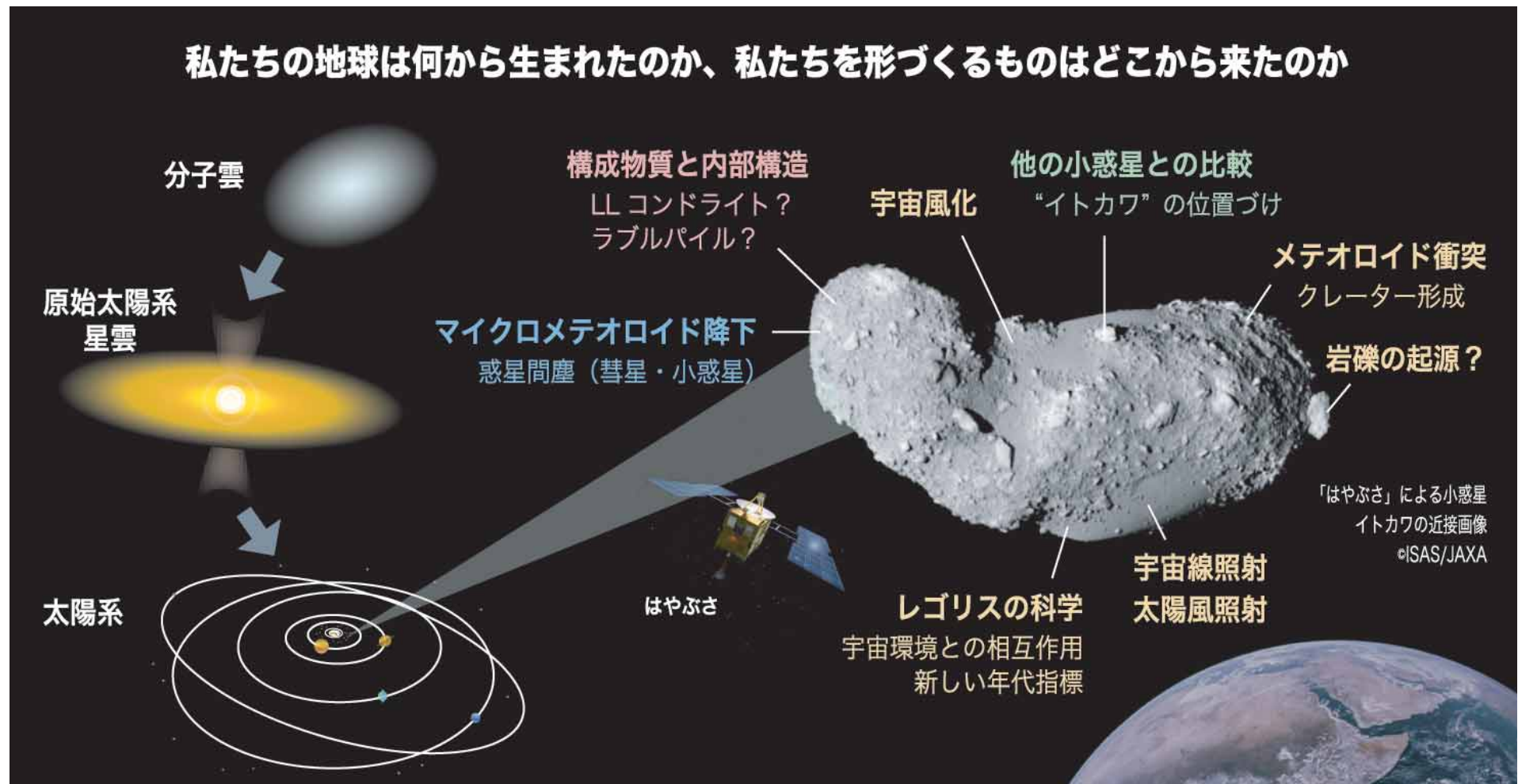
サンプルリターン

無機鉱物-氷-有機物がつくるミクロ
システムの総合理解

リモートセンシング

鉱物-氷-有機物
マクロシステム
の理解

始原天体のサイエンス



※「はやぶさ2」では、さらに有機物と水に焦点を当てる。

探査対象天体：1999 JU3

観測キャンペーン(2007、2008)により得られた物理情報

自転周期: 0.3178day (~ 7.6 h)

自転軸の方向: $(\lambda, \beta) = (331, 20)$

軸比 = 1.3 : 1.1 : 1.0

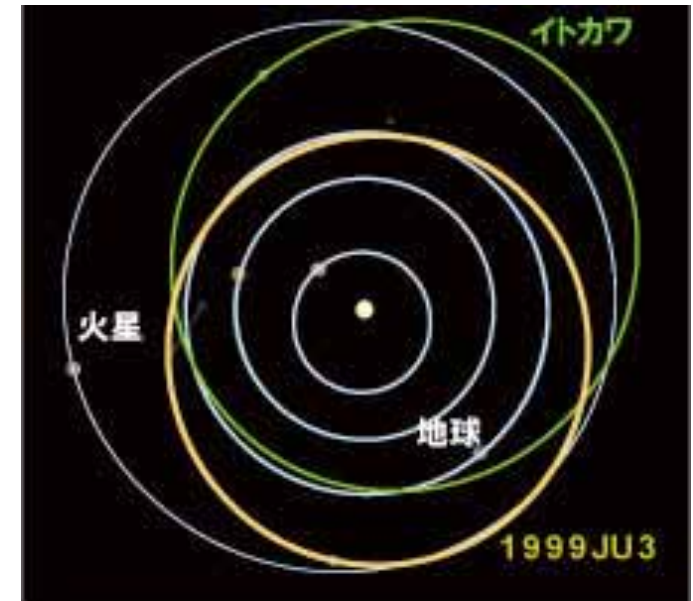
大きさ: 0.922 ± 0.048 km

アルベド: 0.063 ± 0.006

等級等: $H=18.82 \pm 0.021$, $G=0.110 \pm 0.007$

タイプ: Cg

小惑星1999 JU3の軌道



推定された形状

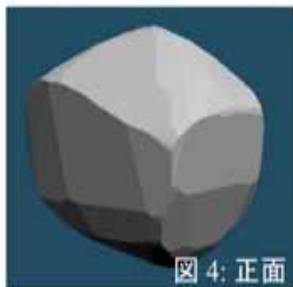


図 4: 正面



図 5: 側面

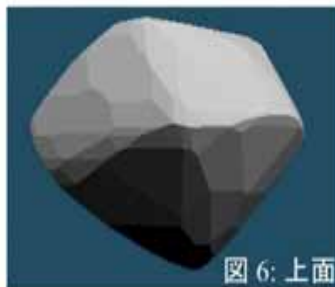
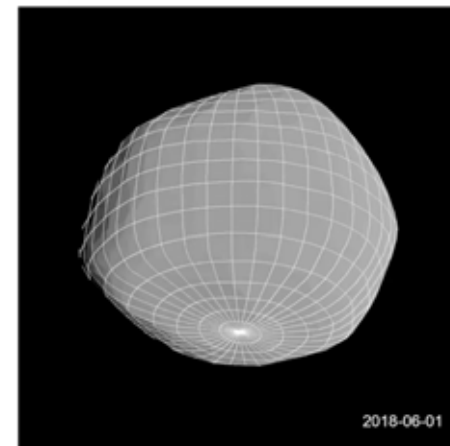


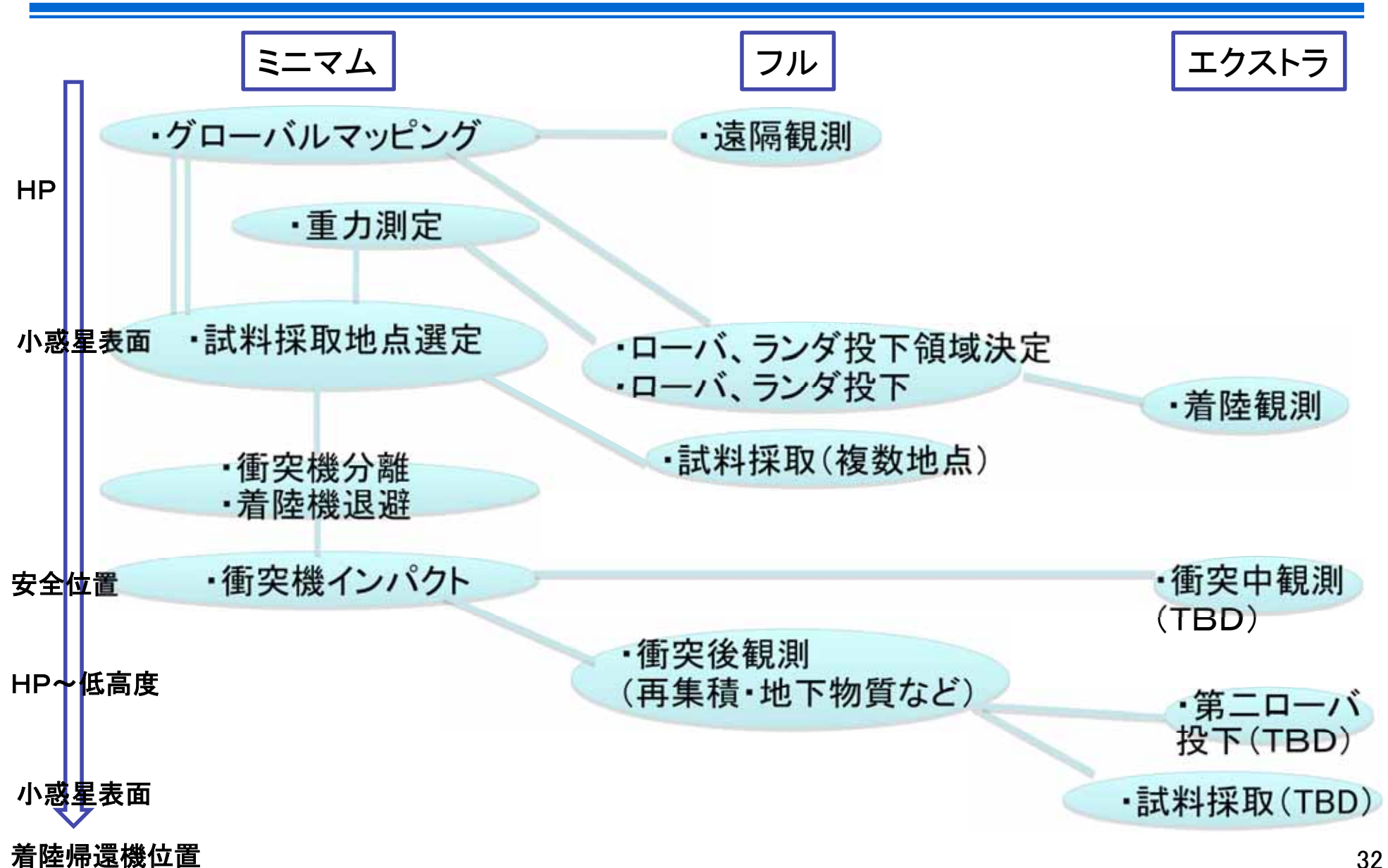
図 6: 上面

(Kaasalainenらによる)



(Muellerらによる。動画は会津大による)

ミッションフェーズの運用シナリオ



体制・海外協力

はやぶさ2プリプロジェクトメンバー

海外の研究組織

(ドイツ)

Astrophysical Institute and
University Observatory,
Friedrich Schiller University
Jena (独)

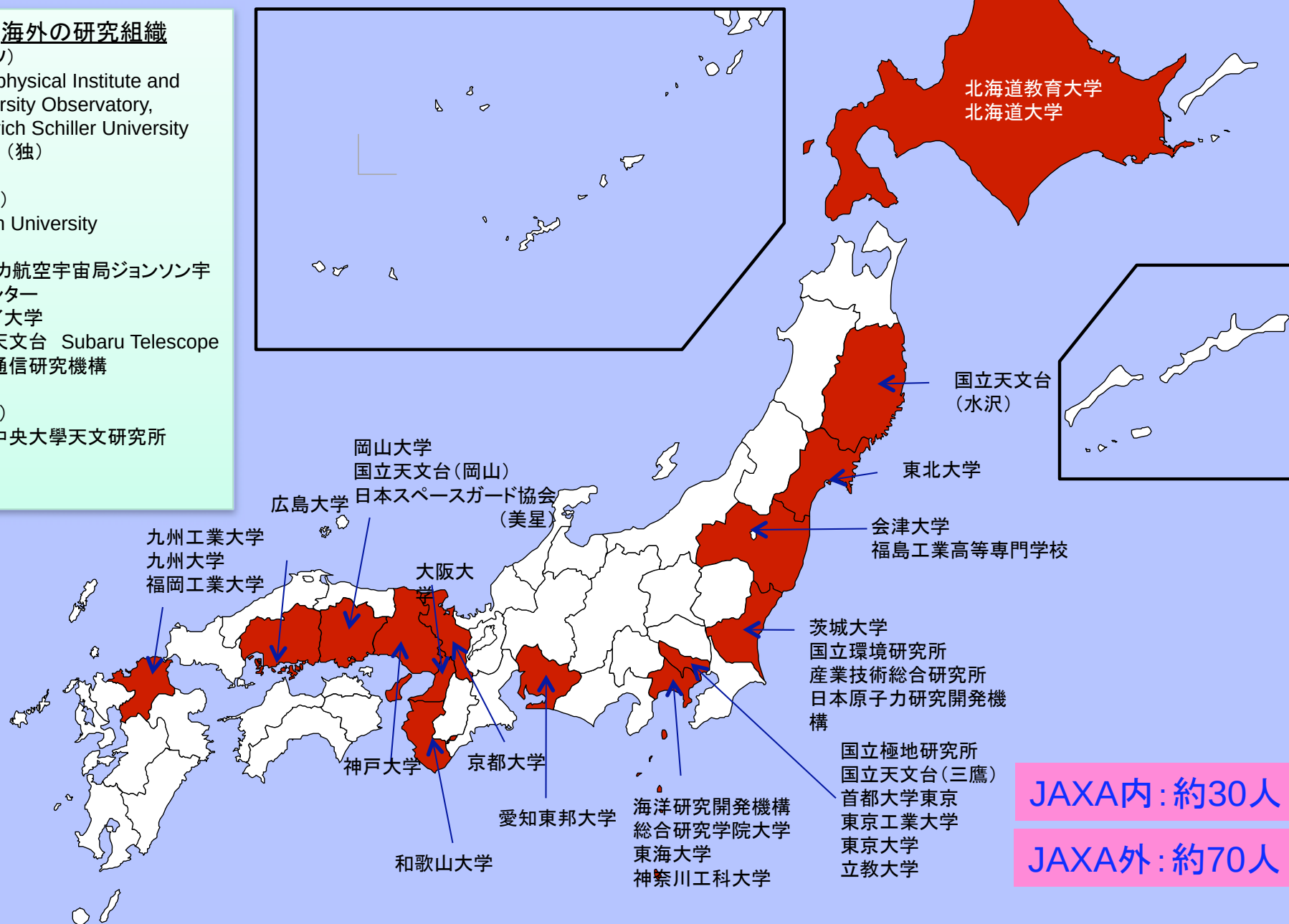
(USA)

Brown University

アメリカ航空宇宙局ジョンソン宇
宙センター
ハワイ大学
国立天文台 Subaru Telescope
情報通信研究機構

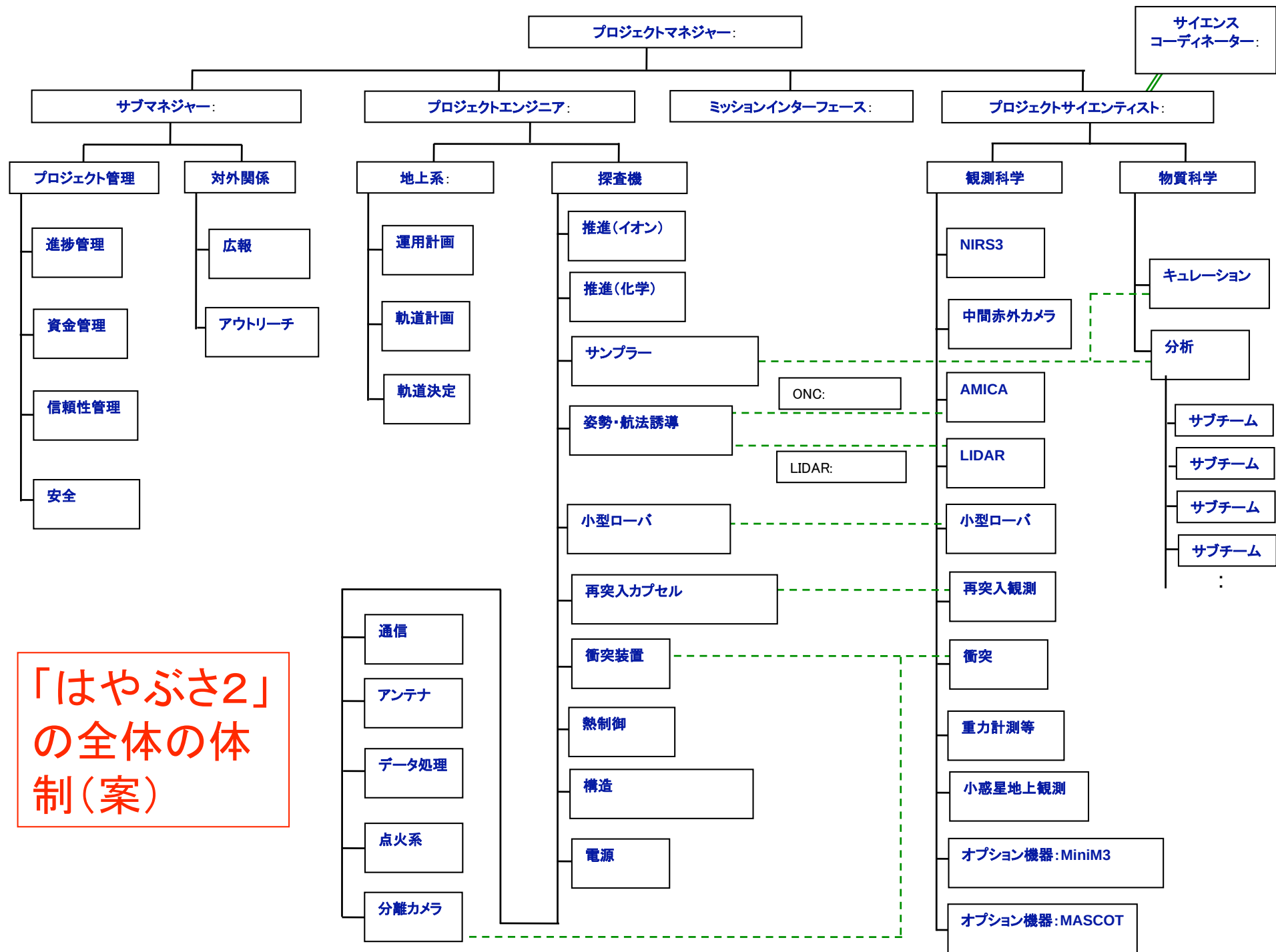
(台湾)

國立中央大學天文研究所



JAXA内:約30人

JAXA外:約70人



海外との協力

■ヨーロッパ

- ・DLR(ドイツ)を中心としたグループが「はやぶさ2」に搭載する小型ランダー(MASCOT)を検討中

■アメリカ

- ・JPLによる赤外線撮像分光カメラ(mini-M3)の搭載を検討中
- ・NASAの探査局も搭載機器に関心を寄せている(有人ミッションのため)

■その他

- ・他の国(台湾など)からも打診や関心あり

さいごに

世界の太陽系小天体探査

	1980	1990	2000	2010
フライバイ	1986 <ハレー彗星> ベガ1号・2号、さきがけ、すいせい、ジオット、ICE 1985 <ジャコビニ・ツィナー彗星> ICE	1991 <ガスプラ>ガリレオ 1992 <グリグ・シェレルプ彗星> ジオット 1993 <イダ>ガリレオ 1996 <マテルダ> ニア・シューメイカー 1999 <ブレリュ> ディープ・スペース1	2001 <ボレリー彗星> ディープ・スペース1 2002 <アンネフランク> スター・ダスト 2008 <シュテインス> 2010 <ルテティア> ロゼッタ 2004 <ビルト2彗星> スター・ダスト 2005 <テンペル1彗星> ディープ・インパクト	2015 <冥王星> ニューホライズンズ 2011 <テンペル1> NExT 2010 <ハートレイ2> EPOXI
衝突				はやぶさ2 「衝突装置」
ランデブー・着陸			2000 <エロス> ニア・シューメイカー	2014 <チュルモフ・ゲラシメンコ> ロゼッタ 2011 <ベスタ> 2015 <セレス> ドーン
サンプルリターン			2005 <イトカワ>はやぶさ (2010年帰還) 2004 <ビルト2彗星> スター・ダスト(2006年帰還)	2018 <1999 JU3> はやぶさ2

※年は天体に到着した(する)年を示す
※この他、火星衛星のフライバイ等あり

* **はやぶさ2**以外は、過去・現在に宇宙で運用されている探査プロジェクトのみを記載。