



**資料68-4**

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
(第68回) 2022.10.5

# 小惑星探査機「はやぶさ2」プロジェクト 終了審査の結果について

2022/10/5

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

國中 均

津田 雄一

# はじめに 事後評価と本資料の位置付け



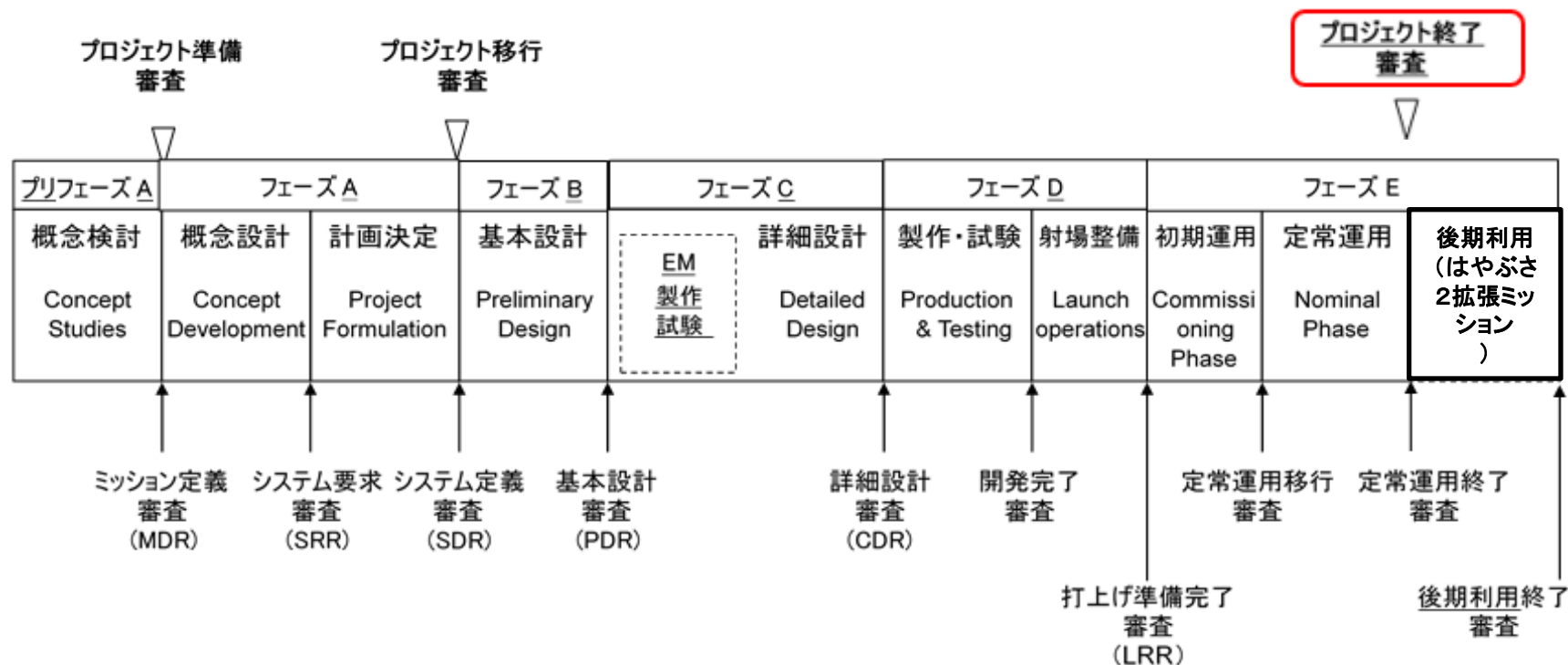
## 【経緯】

- 小惑星探査機「はやぶさ2」は、2014年12月3日に打ち上げられ、2018年6月27日に目標天体である小惑星リュウグウに到着、2回のタッチダウン(小惑星表面への着陸・試料採取)等を経て、2019年11月13日に小惑星リュウグウを出発、2020年12月6日にリュウグウ試料を格納したカプセルが地球へ帰還した。
- 宇宙開発利用部会(2021年2月9日)にて「小惑星探査機「はやぶさ2」の現状報告」として、カプセル帰還からリュウグウ試料の初期キュレーション作業、はやぶさ2拡張ミッションの概要を報告した。
- 小惑星リュウグウの探査及びカプセルの帰還及びその後のリュウグウサンプルの初期分析により、はやぶさ2のプロジェクトで定めたサクセスクライテリアをエクストラサクセスまで、すべて達成し、プロジェクトの終了について、2022年4月26日にJAXAプロジェクト終了審査を実施し、2022年5月17日のJAXA理事会議において了承された。
- プロジェクトは2022年7月1日付で解散し、2022年7月1日からははやぶさ2拡張ミッション所内プロジェクトチームにおいて、旧はやぶさ2プロジェクトメンバーの一部が主体となり、はやぶさ2拡張ミッションを継続している。

## 【本資料の報告内容と位置づけ】

- 本資料では、「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」(平成31(2019)年4月18日宇宙開発利用部会決定)における基本的な考え方を踏まえ、JAXA自らが評価実施主体となって実施したはやぶさ2の事後評価結果を報告するものである。
- なお、はやぶさ2の目的、目標、開発方針、開発計画については、平成24(2012)年1月25日に宇宙開発委員会による事前評価を受けた。

# はじめに 審査会の位置付け



(注) 計画変更については、必要に応じてプロジェクト計画変更審査を実施する。



1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要
2. プロジェクト目標の達成状況
3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果(アウトカム)の達成状況
4. 拡張ミッション(後期利用運用)の概要
5. プロジェクト終了審査結果

# 1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要



## 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:平成35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
小惑星滞在期間	約17ヶ月探査
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

プロジェクトの総開発費は289億円であり、計画通り完了した。

# 1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要

## プロジェクト移行から定常運用終了までの経緯

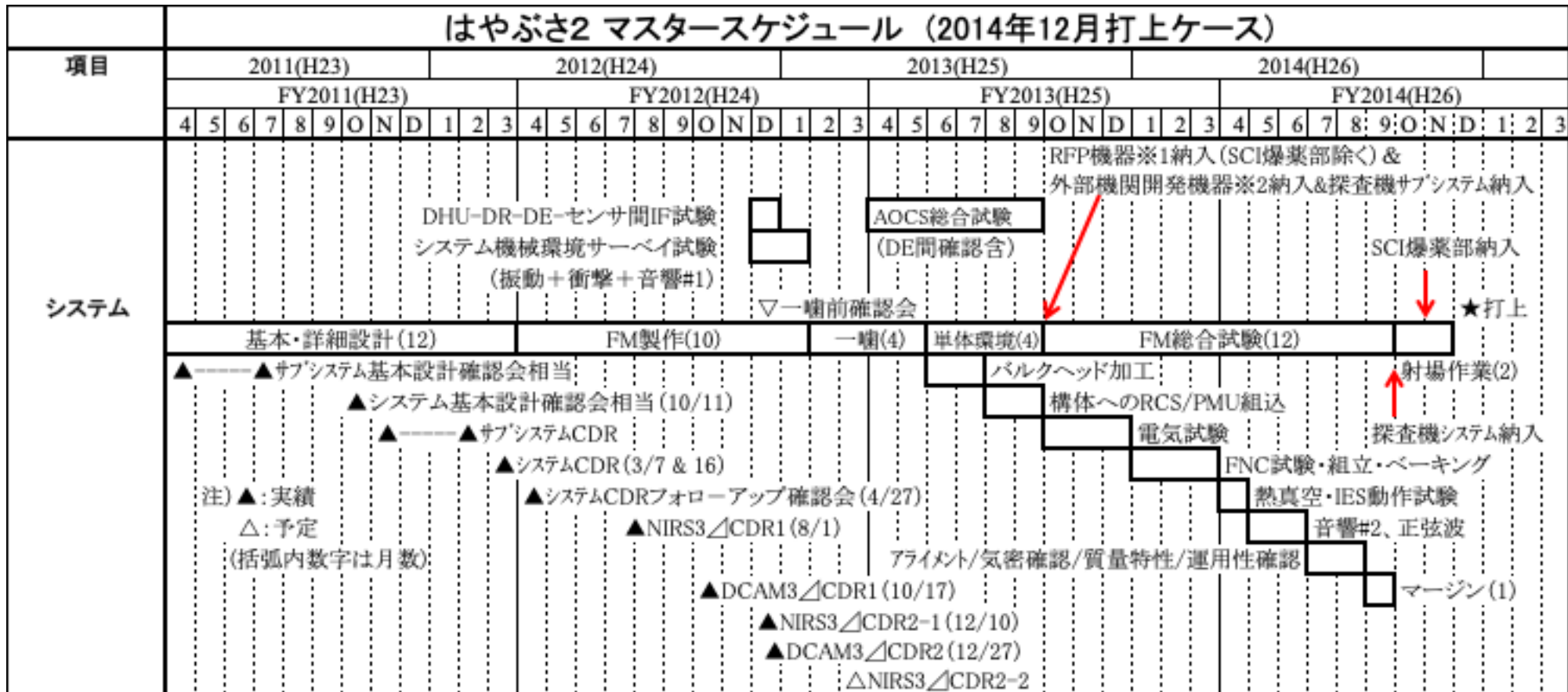


- 2011年 3月 プロジェクト移行審査において、開発スケジュール及びリスクの再評価と基幹ロケットによるバックアップ打上経費の調整を条件に、プロジェクト移行は妥当と判定された。
- 2011年 5月 プロジェクト移行した。
- 2014年12月 打上げ
- 2015年 3月 定常移行審査会を実施し、初期運用結果に基づき、定常運用フェーズへ移行することを判断した。
- 2019年11月 はやぶさ2探査機のリュウグウ離脱、地球帰還を開始した。
- 2020年12月 再突入カプセル地球帰還、新たな天体に向けた地球スイングバイを実施・成功した。
- 2021年10月 定常運用終了審査その1にて、地球帰還後より既に完了した探査機運用業務のうち、はやぶさ2を拡張した新たなミッションに関連した範囲において、定常運用の終了の妥当性について審議された。審査の結果、はやぶさ2プロジェクトの審査対象の定常運用活動の終了と、はやぶさ2拡張ミッションに探査機を引き継ぐことが可能であると判断された。
- 2021年12月 はやぶさ2拡張ミッション所内プロジェクトチームが発足した。
- 2022年3月 定常運用終了審査その2を実施し、プロジェクトの定常運用フェーズの終了が妥当であると判断された。

# 1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要



## スケジュール(開発フェーズ:実績)

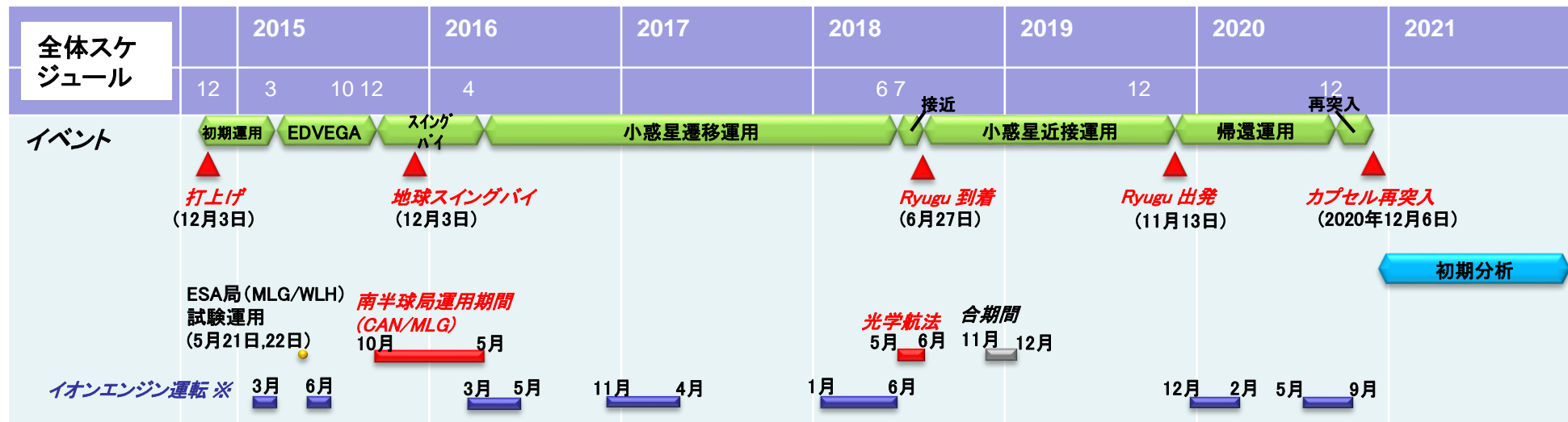


※1:RFP機器とは、Ka・NIRS3・TIR・SCI、 ※2:外部機関開発機器とは、MASCOT・MINERVA II

# 1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要



## スケジュール(運用フェーズ:実績)





# 1. 小惑星探査機「はやぶさ2」の概要 ミッションの流れ



打ち上げ  
2014年12月3日



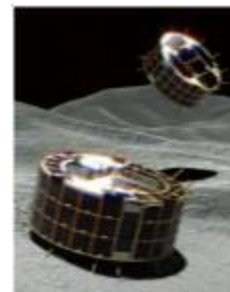
地球スイングバイ  
2015年12月3日



リュウグウ到着  
2018年6月27日



MINERVA-II1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



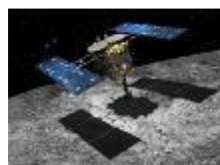
MINERVA-II2  
2019年10月3日



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



地球帰還  
2020年12月6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)

## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ミッション目標・サクセスクライテリアの達成状況

ミッション目標	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
<b>【理学目標1】</b> 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。	<b>【Sci1-Min】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 探査機の対象天体到達1年後	<b>【Sci1-Ful】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 試料回収カプセルの地球帰還1年後	<b>【Sci1-Ext】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 試料回収カプセルの地球帰還1年後
<b>【理学目標2】</b> 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。	<b>【Sci2-Min】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 探査機の対象天体到達1年後	<b>【Sci2-Ful】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 探査機の対象天体離脱まで	<b>【Sci2-Ext】→達成</b> ・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。  【達成判断目標時期】 探査機の対象天体出発1年後
<b>【工学目標1】</b> 「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。	<b>【Eng1-Min】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 探査機の対象天体到達時	<b>【Eng1-Ful】→達成</b> ・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。 ・再突入カプセルを地球上で回収する。  【達成判断目標時期】 試料回収カプセルの地球帰還時	N/A
<b>【工学目標2】</b> 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。	<b>【Eng2-Min】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 生成クレータ確認時	<b>【Eng2-Ful】→達成</b> 特定した領域に衝突体を衝突させる。(*)  【達成判断目標時期】 生成クレータ確認時	<b>【Eng2-Ext】→達成</b> 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。  【達成判断目標時期】 試料回収カプセルの地球帰還時

(\*) 特定した領域＝半径200mの範囲

## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ■ サクセスクリテリア[理学目標1、ミニマム]の達成根拠

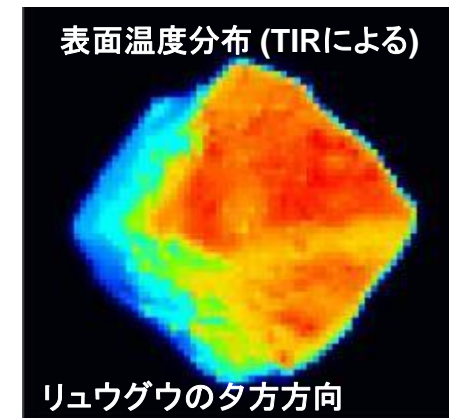
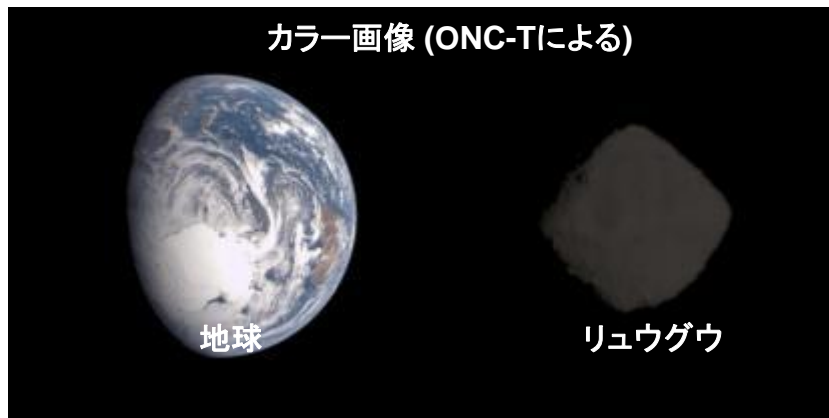
[Sci1-Min] 小惑星近傍からの観測により、C型小惑星の表面物質に関する、新たな知見を得る。

↓  
小惑星近傍からのONC-T, TIR, NIRS3による観測で、リュウグウ表面は反射率が非常に低く、高空隙率・低熱伝導率の岩塊や礫に覆われ、マグネシウムに富む含水鉱物が広く分布することが明らかになった。

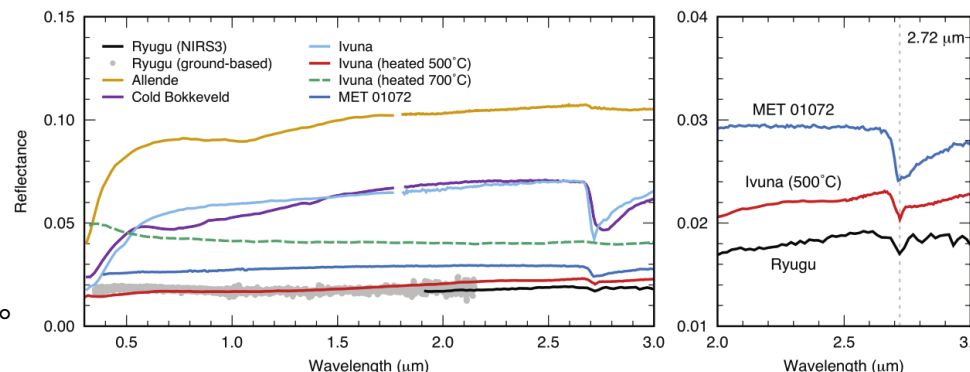
リュウグウはラブルパイル天体  
(瓦礫の寄せ集め)

リュウグウの反射率は非常に低い＝黒い

熱慣性が小さい



2.72  $\mu\text{m}$ の吸収が観測され、  
Mgに富む含水鉱物の広く分布。



左: 可視NIRスペクトル  
Kitazato+ 2019  
右:  $\sim 2.7 \mu\text{m}$  水の吸収  
Kitazato+ 2019

## 2. プロジェクト目標の達成状況



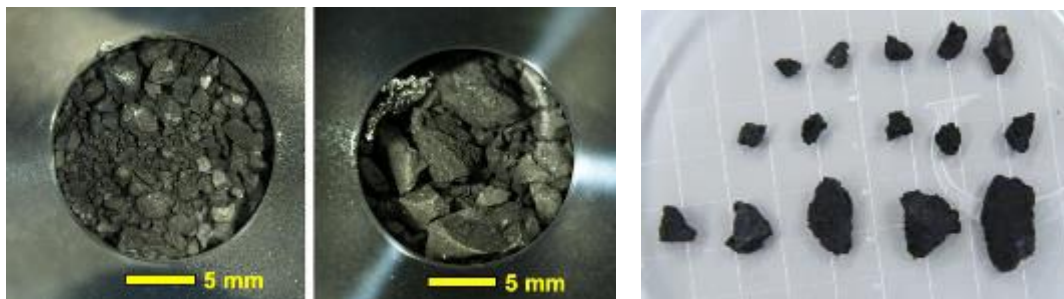
### ■ サクセスクリテリア[理学目標1、フル]の達成根拠

[Sci1-Ful] 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。



リュウグウ母天体の水質変成は太陽系誕生後500万年後には起きており、40°C程度の温度で鉱物の酸素同位体平衡が達成されたことが明らかとなった。有機物と鉱物の相互作用組織が見つかるなど、水質変成の程度は強く、有機物の分子進化が母天体で進んだことが明らかとなった。有機物には生体関連分子であるアミノ酸も含まれることがわかった。

5.4gのリュウグウ試料を採取(目標だった0.1gの50倍以上)

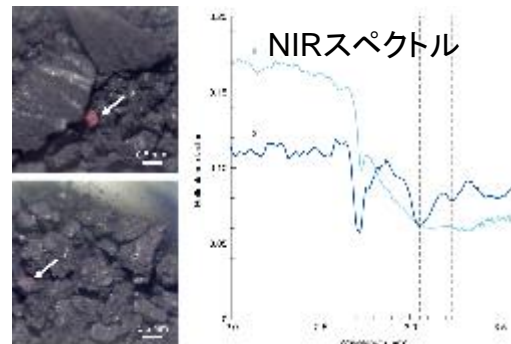


左は1回目、右は2回目のタッチダウンで採取

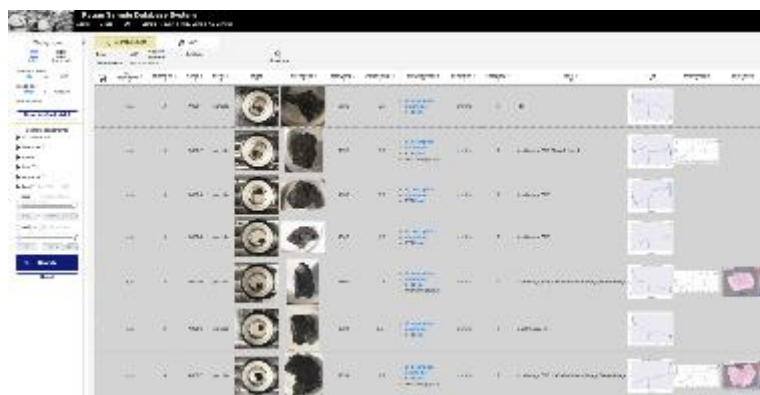
大型リュウグウ粒子

MicrOmega顕微分光像

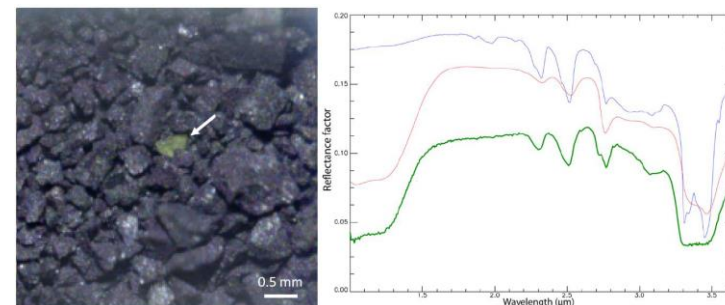
[Pilorget+ 2021]



破線: 3.06, 3.24 μm が窒素化合物(NH)の吸収。

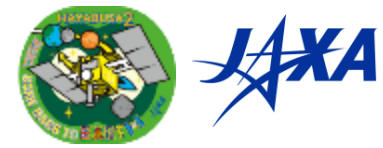


試料カタログの公開: <https://darts.isas.jaxa.jp/curation/hayabusa2/>



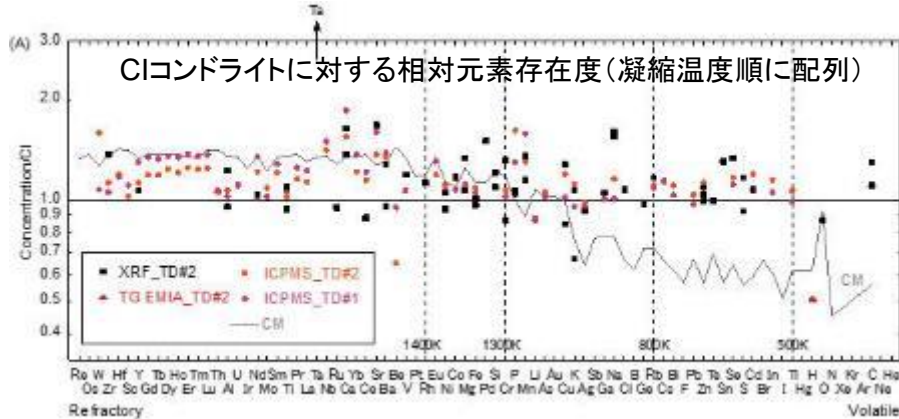
炭酸塩と推定される粒子(左の白矢印)の可視近赤外スペクトル(右の緑線; 赤: siderite; 青: dolomite)

## 2. プロジェクト目標の達成状況

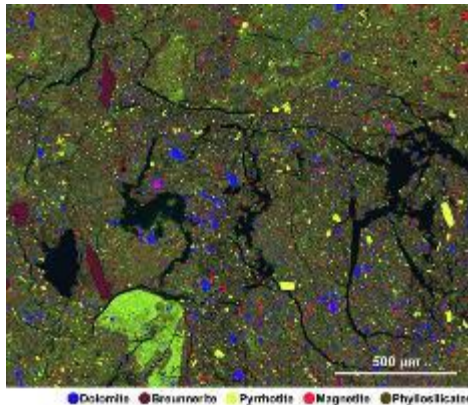


### ■ サクセスクリテリア[理学目標1、フル]の達成根拠(続き)

[Yokoyama+ 2022]

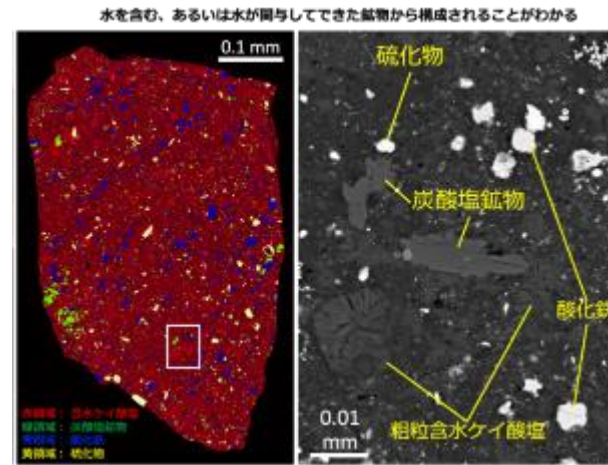


66元素が測定された。元素存在度はCIコンドライト(イヴナ型炭素質隕石)に似ており、太陽系で最も始原始的な物質であることが分かった。



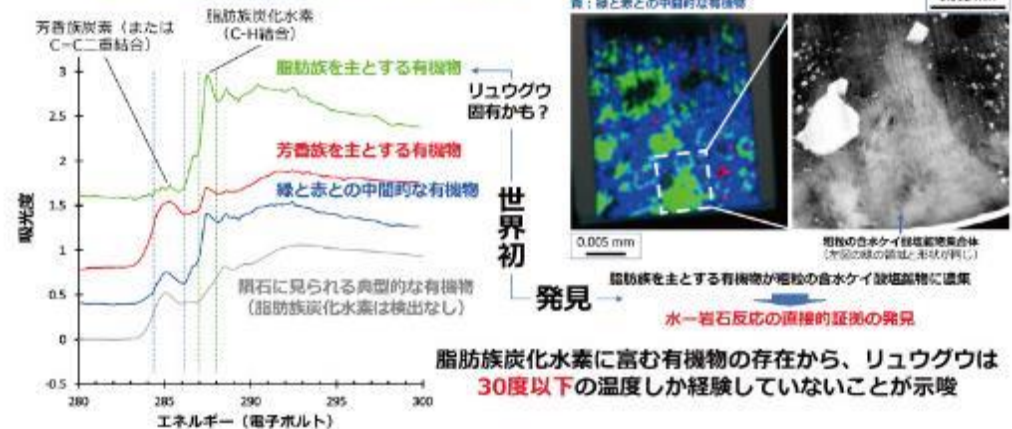
苦灰石、ブロイネル石、磁硫鉄鉱、磁鉄鉱、フィロケイ酸塩などが確認できるが、これらはすべてリュウグウの母天体上で水質変成によってできたものである。

[Ito+ 2022]



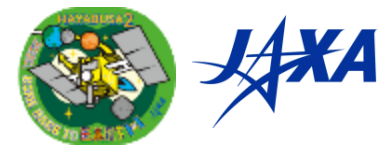
(左)リュウグウ粒子中の水が関与してできた鉱物群: 赤: 含水ケイ酸塩鉱物、緑: 炭酸塩鉱物、青: 酸化鉄、黄: 硫化鉱物、(右)左図の白四角領域を電子顕微鏡で拡大した図。

含まれる有機物は多種多様だが3つの特徴に分類された



三種類の異なる特徴を持つ有機物の存在が確認。

## 2. プロジェクト目標の達成状況



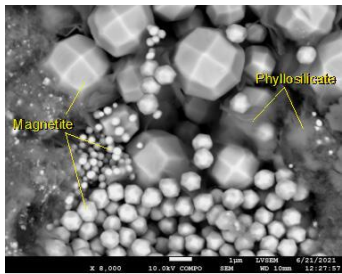
### ■ サクセスクライテリア[理学目標1、エクストラ]の達成根拠

[Sci1-Ext] 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。

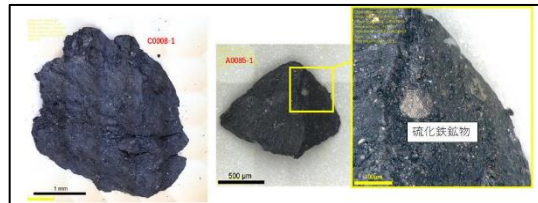


リュウグウは太陽系元素組成に近い化学組成をもつC1コンドライトに類似し、初期太陽系の低温領域でつくられた可能性が高いことがわかった。このため、現在、小惑星帯に存在するC型小惑星は外側太陽系から現在の位置にもたらされたことが示唆される。すなわち、揮発性物質に富んだ小天体が、内側太陽系に輸送されたことを意味し、C型小惑星が地球に海や生命の材料をもたらした有力候補となりえることがわかった。

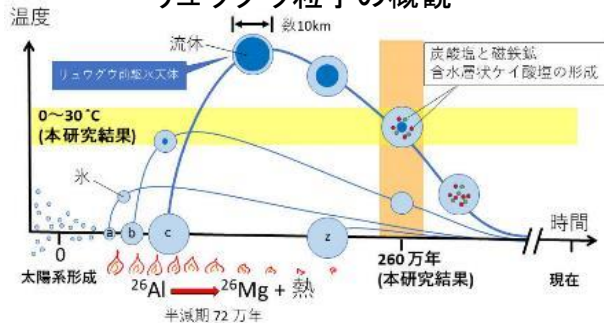
#### [E. Nakamura+ 2022]



多面体磁鉄鉱粒子の産状を示す走査電子顕微鏡像

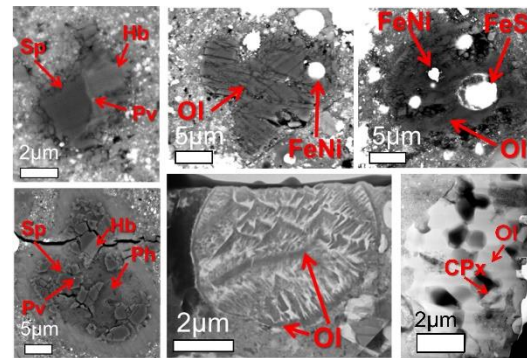


リュウグウ粒子の概観

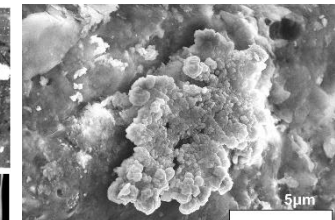


太陽系外縁部で氷を含んだ直径数十キロメートルの天体が作られ、太陽系誕生から約260万年後に放射性核種 $^{26}\text{Al}$ によって温度が30°Cほどになり、水質変成が起こった。その後、軌道が変化し、現在の軌道まで移動して、衝突破壊と集積が起こり現在のリュウグウになった。

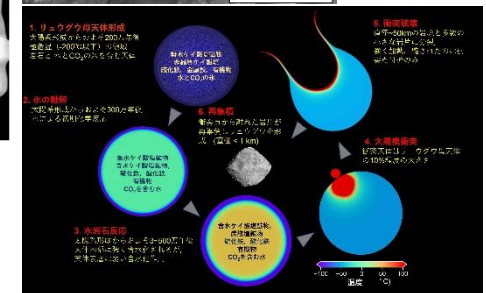
#### [T. Nakamura+ 2022]



高温環境で掲載された物質の電子顕微鏡写真



サンプル表面で発見された結晶



高温環境(1000°C以上)でできた物質および液体の水の存在を確認。サンプルの残留磁化の測定により、リュウグウの母天体は太陽光が届かないような低温領域で生まれた可能性大。右下の図は、サンプル分析結果から推定されたリュウグウの進化形成のプロセスを示す。

## 2. プロジェクト目標の達成状況



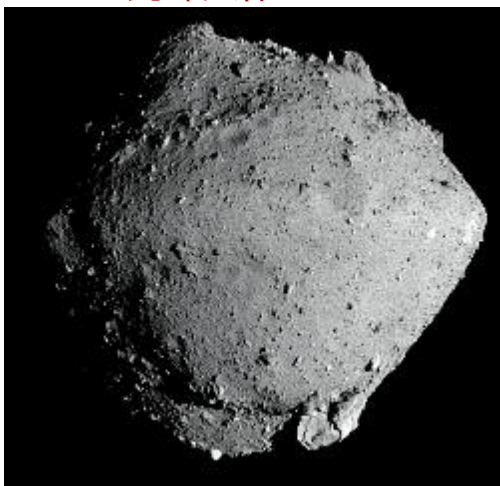
### ■ サクセスクライテリア[理学目標2、ミニマム]の達成根拠

[Sci2-Min] 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。



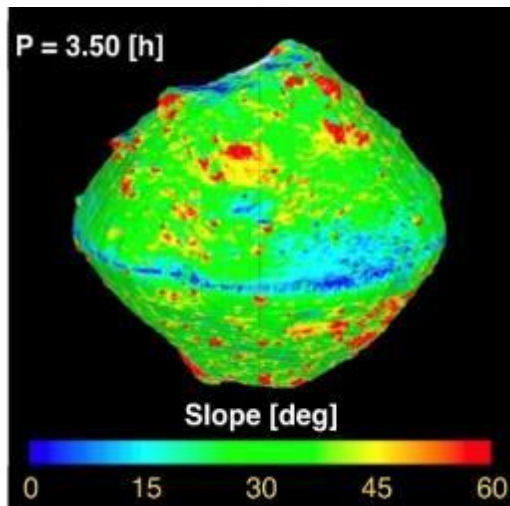
小惑星近傍からのONC-T, TIR, LIDARによる観測と、それから作成された形状モデル、および重力計測から、リュウグウが高空隙率の岩塊と礫がゆるく集積した内部構造を持つラブルパイル天体であることが明確となった。

大きな岩塊・低いバルク密度  
→母天体の破片を保持した  
瓦礫天体



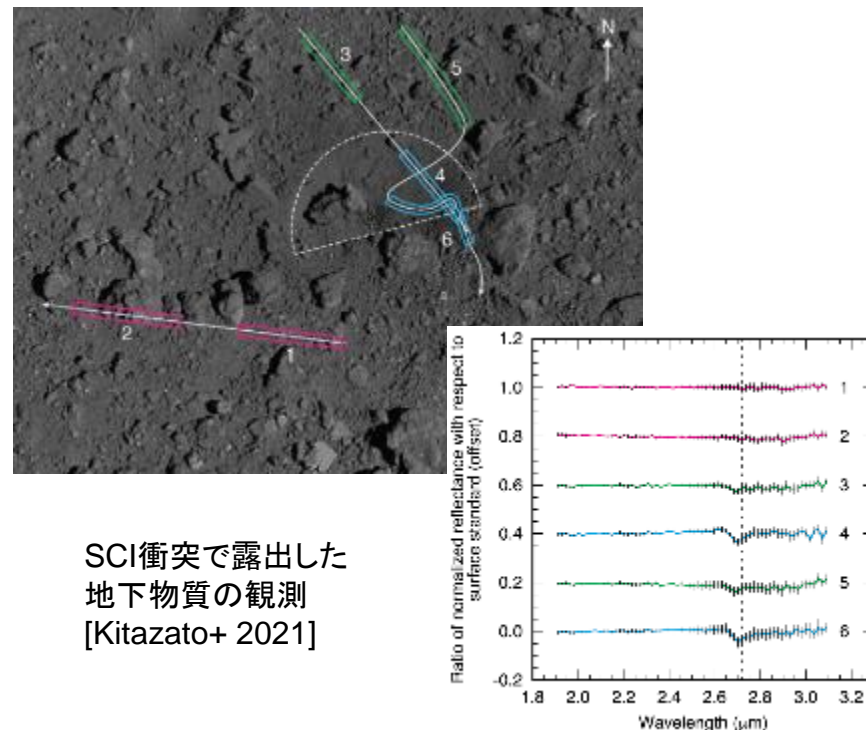
南極付近にある大きな岩が「オトヒメ岩塊」と名づけられたもので、大きさは160mほどある。

コマ型形状・表面の傾き  
→過去には自転周期が3.5時間  
→自転と構造の共進化の解明



周期3.5時間で自転した場合の  
表面傾斜角分布  
[Watanabe+ 2019]

SCIクレーターで露出した地下物質  
→宇宙風化の影響が深さとともに減少



SCI衝突で露出した  
地下物質の観測  
[Kitazato+ 2021]

## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ■ サクセスクライテリア[理学目標2、フル]の達成根拠

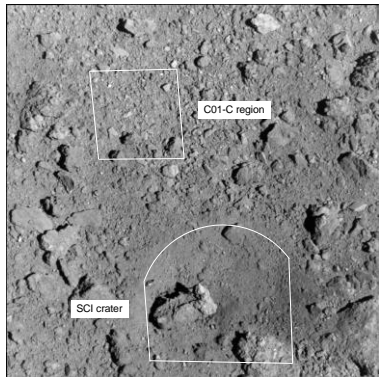
[Sci2-Ful] 衝突体の衝突により起こる現象の観測から、小惑星の内部構造・地下物質に関する新たな知見を得る。



SCIによって生成されたクレーターの大きさと構造, およびDCAM3でライブ撮像された衝突放出物カーテンの時系列変化などから, リュウグウの地下には層構造があり, 地下物質は表面物質に比べて反射率が低く, 表層粒子間の凝縮力は層による差はあるものの, 全般的に弱いことなどが示された。

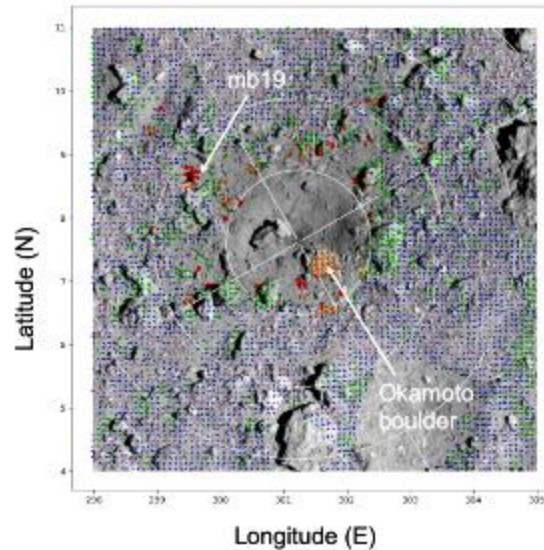
クレータの形状・3次元構造

→リュウグウの再集積過程や  
コマ型形状形成過程



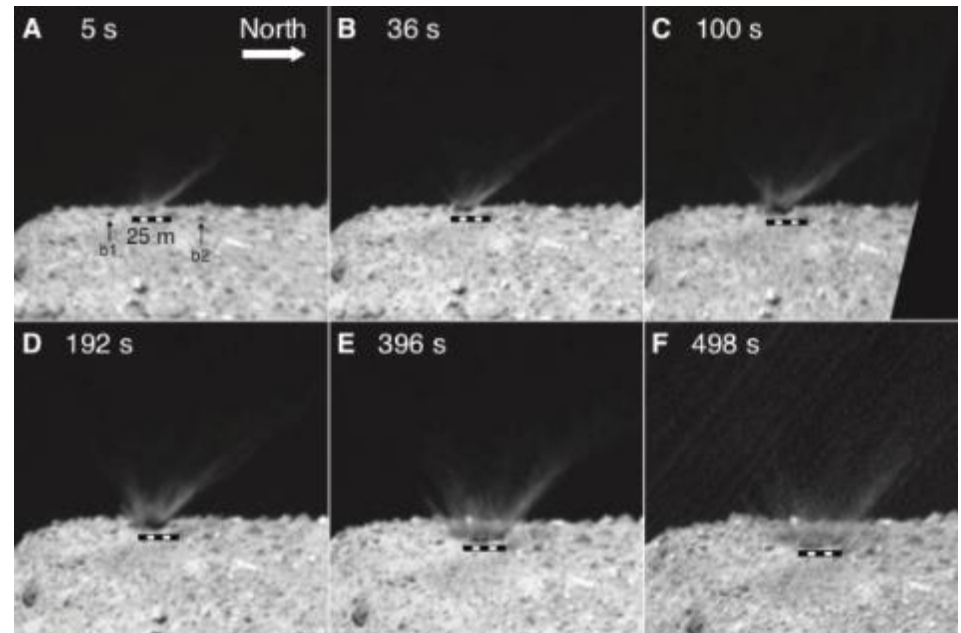
クレータ周囲の表面変動

→衝突による衝撃波の励起  
効率や減衰過程



クレータの生成過程

→クレータ形成が重力支配による  
表層物質の粒子間固着力がきわめて弱く脆い



[Arakawa+ 2020]



## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ■ サクセスクリテリア[理学目標2、エクストラ]の達成根拠

[Sci2-Ext] 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。

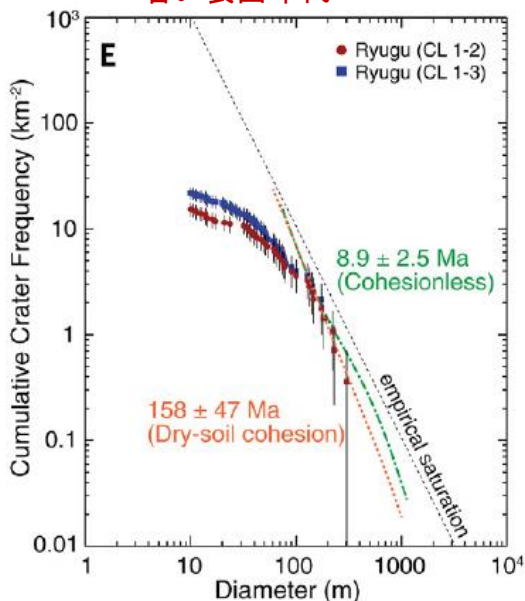


リュウグウ構成物質の凝縮力が弱いという知見から、クレーター年代学に基づく表面年代が制約され、そのコマ型形状が約1000万年前頃の高速自転による変形で形成されたことなどが強く示唆された。

MINERAVII-1およびMASCOTの表面その場観測により、リュウグウ表層にはサブミリメートルの細かい粒子が乏しく、高空隙率の岩塊は炭素質コンドライト隕石に見られるようなミリメートルサイズの白色包有物を多数含むことなどを発見した。

クレーターのサイズ分布

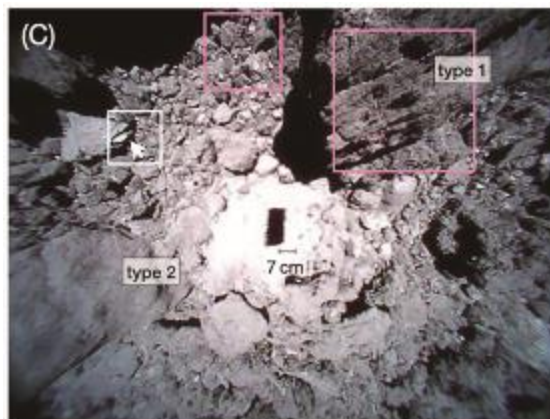
→若い表面年代



[Sugita+ 2019, Arakawa+ 2020]

MINERAVII-1およびMASCOTの表面その場観測

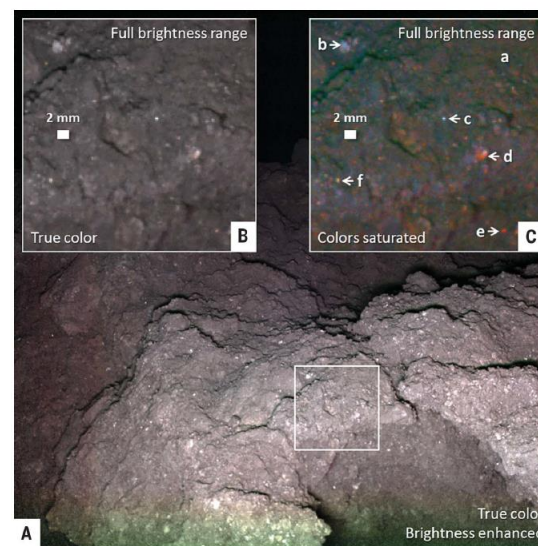
→リモートセンシング観測結果とサンプル分析結果の接続



MINERVA-II 1A

(C) 層構造岩塊(赤枠)岩塊から剥離しかけた扁平岩片(白枠)

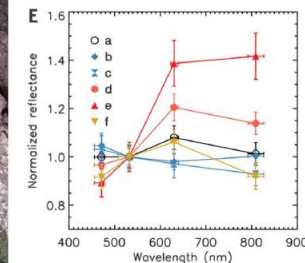
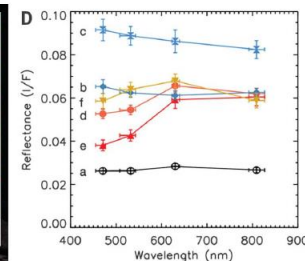
Tachibana+ 2022a



MASCOT

隕石の包有物のようなmmサイズの構造

[Jaumann+ 2019]



## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ■ サクセスクリテリア(工学)の達成根拠

- **[Eng1-Min] (イオンエンジン健在の状況でリュウグウ到達.)**
  - ✓ 2018/6/27に小惑星リュウグウに到着した。
  - ✓ 到着時点で、イオンエンジンの性能は正常であり、軌道制御運用は当初計画通り実施された。
- **[Eng1-Ful]**  
(少なくとも1基が成功規範であったが4基のローバーが小惑星に到達.)  
(少なくとも1回のサンプル採取が成功規範であったが2回のサンプル採取に成功.)  
(カプセル地球帰還に成功.)
  - ✓ 2018/9/21に、MINERVA-II-1A/-1Bをリュウグウ地表に向けて分離、小惑星表面に到達させた。その後、MINERVA-II-1A/-1Bは小惑星表面移動探査に成功した。2018/10/3にMASCOTが同様に、小惑星表面移動探査に成功した。また、MINERVA-II-2は、主計算機が故障していたものの電波科学ミッションとして再計画した上で、リュウグウ周回軌道に分離され、周回後小惑星表面に到達した。
  - ✓ 2019/2/22に第1回タッチダウン、2019/7/11に第2回タッチダウンに成功。2020年12月6日にカプセルが地球帰還した。2回のタッチダウンによるサンプル収量は5.4g(目標量の5000倍以上)であった。
- **[Eng2-Min](SCIの分離、作動、クレーターの生成を確認.)**
  - ✓ 2019/4/5に、SCIを分離し、リュウグウの地表に直径18mの人工クレーターを生成した。生成の様子はDCAM3により記録された。
- **[Eng2-Ful](人工クレーター生成点が、目標範囲に収まっていることを確認.)**
  - ✓ 2019/4/23-25のクレーター探索運用にて、人工クレーター生成点が、(想定生成範囲半径200mに対して)目標中心から約25mであったことが確認された。
- **[Eng2-Ext](地下物質へアクセスしたこと、採取サンプルが地下物質であったことを確認)**
  - ✓ 2019/7/11のPPTD運用にて、人工クレータイジェクタの多く堆積していると推定された地点は着陸し、サンプル採取に成功した。

## 2. プロジェクト目標の達成状況



### ■ 工学上の世界初

- 1) 小型探査ロボットによる小天体表面の移動探査
- 2) 複数の探査ロボットの小天体上への投下・展開
- 3) 小惑星での人工クレーターの作成とその過程・前後の詳細観測
- 4) 天体着陸精度60cmの実現
- 5) 同一天体2地点への着陸
- 6) 地球圏外の天体の地下物質へのアクセス
- 7) 最小・複数の小天体周回人工衛星の実現
- 8) 地球圏外からの気体状態の物質のサンプルリターン
- 9) C型小惑星の物質のサンプルリターン

さらに、「離着陸を含む惑星間往復航行」を実現したという点では、はやぶさ初号機に続いて人類史上2番目。

### ■ はやぶさの「4大実証項目」の継承・発展

#### 1) イオンエンジンを主推進機関とした惑星間航行

全エンジンが健在の状態で行った往復航行を完遂／はやぶさの「4大実証項目」を継承

#### 2) 光学情報を用いた自律的な天体への接近・着陸

小惑星への到着・降下・着陸 いずれにおいても、はやぶさの“宿題”を克服／はやぶさにはなかった小天体ピンポイント着陸技術の確立

#### 3) 微小重力下の天体表面の標本を採取

2地点のサンプル、ガスサンプル採取に成功。はやぶさを超えた目標設定をした上で成功。

#### 4) 惑星間からの直接大気圏突入

我が国として2例目となる惑星間空間からの地球帰還。大気圏突入技術の“確立”

## 2. プロジェクト目標の達成状況



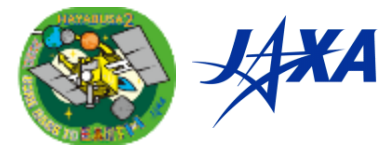
### ■ これまでの理学成果のまとめ

- 1) 世界初のC型小惑星ランデブー観測と探査ロボットによる表面その場計測から、その母天体が氷天体であったと示唆された。それは惑星の材料天体である微惑星が太陽系内を外側から内側へ大きく移動したことを初めて実証する成果である。
- 2) 世界初の小惑星衝突実験により、想定を上回る大きさのクレーターが生成されたことから、リュウグウは母天体の破片がゆるく集まった天体で、構成粒子間の固着力が非常に弱く、壊れやすいことが明らかになった。それは水や有機物がどのように地球に輸送されたかを大きく制約する。
- 3) 帰還試料は、これまで人類が手にした宇宙物質の中でもっとも始原的な物質であることが明らかになった。それは太陽系元素存在度や同位体組成についての新しい標準データを与えるとともに、太陽系形成や地球初期進化を論ずる上での物質科学的基盤となる可能性をもつ。

### ■ 今後1～2年の理学成果創出の展望

- 1) 試料の地上回収から約1年半、地上分析の初期成果論文のいくつかが出版され、更に投稿中の論文が査読を受けている状況である。また、これら地上分析結果と近傍観測データを突合せさせることで、スペクトルと表面物質の対応関係や、母天体である微惑星の物理化学プロセス、さらには太陽系形成史や地球への物質供給過程などの理解の進展が期待される。
- 2) リュウグウ試料のカタログを公開して国際公募研究を募集したが、6月末からはリュウグウ試料の配布を開始した。今後も約半年ごとに合計4回の試料配布を行う予定である。貴重な試料の研究機会をプロジェクト外の研究者にも拡大し、科学成果創出の最大化を図っていく。
- 3) はやぶさ2の半年後にB型小惑星Bennuに到着したOSIRIS-RExによる観測との比較から、両小惑星の共通性と個別性が明らかになりつつある。リュウグウ試料の分析が先行した後に、2023年に帰還予定のBennu試料が日本にも配分されるため、物質科学的な比較研究から共通性と個別性の理解進展し、太陽系形成論や地球への水や有機物の輸送の理解がさらに深まると期待される。

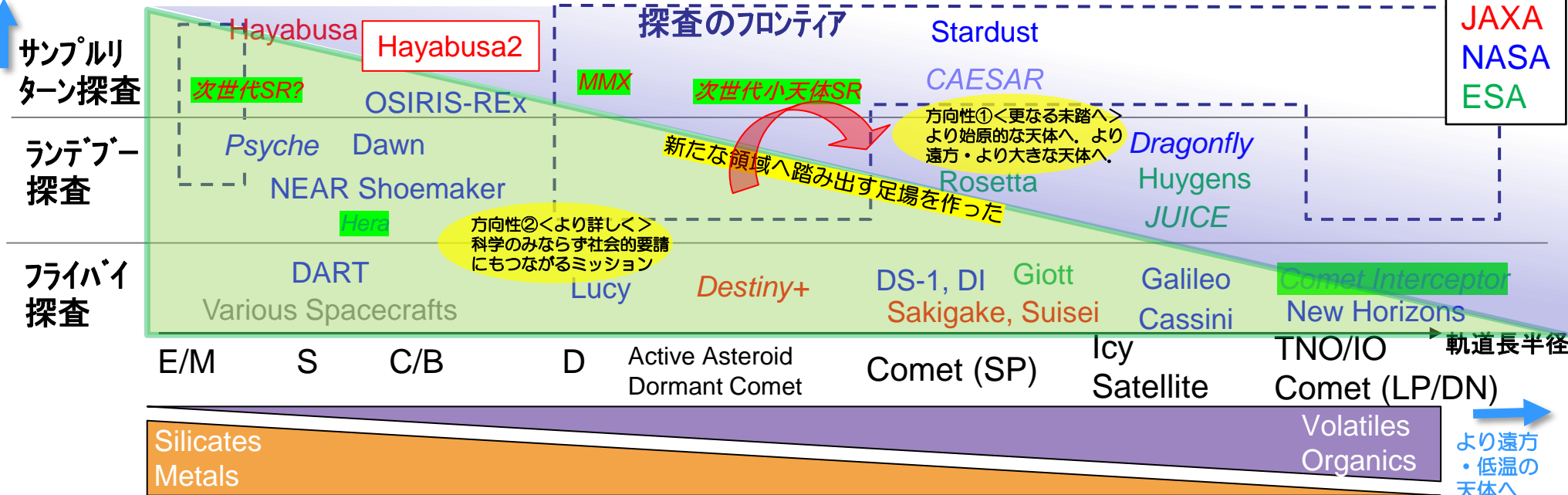
# 2. プロジェクト目標の達成状況



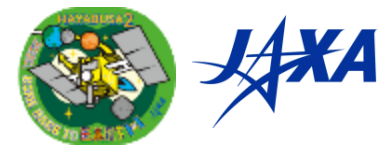
## ■ はやぶさ2の成果から見えてきた将来の探査

- ◆ **科学**: C型小惑星の素性が明らかになり, 始原天体の多様さを理解することの重要性がより明確になった  
→ はやぶさ2が示した1つの始原性の理解をバネに, サンプルリターン探査の科学的威力で, D型, E型, 彗星など多様な始原天体の解明へ.
- ◆ **技術**: NEO往復技術と, 天体到着後の自在性が確立し, より遠方・より大きな天体探査の課題に注力できる状況を作った  
→ はやぶさ2が作った惑星間往復探査, 自在性の高い探査を“足場”に, 火星以遠の小天体SRや, より遠方の天体への高度な片道探査へ.
- ◆ **探査**: 科学技術のみならずそれを超えた社会的要請・課題に応える活動足り得る可能性を示した.  
→ 天体往復航行, 小天体近傍飛行・着陸・地表移動・高速衝突・掘削等の技術を保有するに至った日本として, Planetary Defense, 宇宙資源, 国際宇宙探査等の課題にどう取り組むか?
- ◆ **JAXAの太陽系探査事業への貢献**
  - ミッション計画: MMX, D+, Hera, Comet Interceptor, 次世代小天体SR 等多数. これらの創出・前進に貢献.
  - 関連技術活動: 高効率エンジンによる航行技術(D+), 遠方天体へのピンポイントタッチダウン技術(深宇宙RVD, 輸送系OTV), 子機による自在な天体探査(次世代小天体SR, CI), 高度な天体近傍運用計画立案(MMX)

より高度な探査



# 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



## ■ アウトカム目標について

「はやぶさ2」のプロジェクト立ち上げ時には、アウトカム目標の設定は規定されていなかったが、プロジェクトとしては、ミッションの意義として、「科学的意義」、「技術的意義」、「探査としての意義」を定義していた。(図参照)

「科学的意義」と「技術的意義」については、サクセスクリテリアとして定義した。「探査としての意義」がアウトカム目標に対応するものと考えられるので、ここでは、この項目に沿ってプロジェクトの成果をまとめる。

### ミッションの意義

#### 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、生命の原材料の探求

地球本体、海水、生命を作った原材料物質は、惑星が生まれる前の原始太陽系星雲の中に存在していたが、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(C型小惑星)を探査しその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解明する。

#### 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継承と発展

小惑星探査機「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認する。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。

#### 3. 探査としての意義

「フロンティアへの挑戦」— 科学技術イノベーション、産業・社会への波及、国際プレゼンス発揮、青少年育成等の効果

未踏の地に踏み込むことで、新しい科学技術を創造し、産業に貢献するとともに、天体の地球衝突問題(スペースガード)、宇宙資源利用、有人探査のターゲット等の科学以外の観点からも小天体に対応することで社会に貢献する。

16

はやぶさ2情報源(Fact Sheet)初版より(2014年12月1日)

### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



#### ■ フロンティアへの挑戦としての貢献

- ◆ 多くの世界初の技術を成功させたことにより、国際的にも日本の小惑星探査技術が認められることになった。  
(2021年には、IAF\* World Space Awardを受賞した)
- ◆ 衝突装置による実験については、プラネタリーディフェンスのコミュニティからも注目されることになった。日本国内においては、プラネタリーディフェンスの活動を活性化することになった。
- ◆ 海外のメディアでも「はやぶさ2」が多数紹介され、日本の技術力を示すことに貢献した。



IAF\* World Space Award

\* International Astronautical Federation

#### ■ アウトカム(例)

アウトカムとしては、次のような将来ミッションへの展開が挙げられる。

- ◆ 国内ミッションの創出・後押し: MMX、Destiny+ ほか
- ◆ 海外ミッションからの招聘・共同: CAESAR、Hera ほか

### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



#### ■ 産業界への貢献

- ◆ 企業と協力しながら新規技術の開発を行い、日本の技術力向上に繋がった。
- ◆ 「はやぶさ2」が世界初の挑戦や困難な運用を成功させて知名度が上がったことにより、「はやぶさ2」に関連した企業の宣伝効果に繋がった。
- ◆ 産業界へ貢献したことは、日刊工業新聞社主催の「第50回日本産業技術大賞」において「はやぶさ2」が審査委員会特別賞を受賞したことでも示されている。
- ◆ 「はやぶさ2」プロジェクトから152社に感謝状を贈ったが、多くの企業で自社のWebや社内報に掲載された。(Web検索で確認された範囲では、23社が「はやぶさ2」から感謝状を受け取ったことをネット上で公開している。)  
また、はやぶさ2プロジェクトメンバーには感謝状に対するお礼が多数寄せられており、企業活動の士気高揚に役立った。

#### ■ アウトカム(例)

- ◆ 新規技術への発展  
「はやぶさ2」のイオンエンジン技術の応用として、「マイクロ波プラズマ除電処理システム」の開発が挙げられる。これは、JAXA(宇宙探査イノベーションハブ)と春日電機株式会社との共同研究によって、「はやぶさ2」に用いられたイオンエンジンの中和器の技術が応用されたものである。
- ◆ 企業の活性化および宇宙への積極関与の促進  
「はやぶさ2」に関係した企業が表彰を受けたり、「はやぶさ2」を自社宣伝に活用したが、プロジェクトはそのような状況を誘導する活動を展開してきた。(プロジェクト発足当初は、「ポテンシャルアウトカム」目標と位置付けていたもの)



### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



#### ■ 青少年育成への貢献

- ◆ はやぶさ2プロジェクト主催のイベントや学校、科学館、地方自治体などで行われる科学のイベントへの協力することによって、若い年齢層に生の科学を伝えることを行い、教育活動において科学への興味を高めることに貢献した。

#### ■ アウトカム(例)

- ◆ 科学館・博物館等に「はやぶさ2」に関する情報を提供したりカプセル・サンプル等の実物の貸し出したりすることによって、来場者数が増大した。
- ◆ 「はやぶさ2」関連の科学映画が制作され、科学館や博物館などで上映されることにより、多くの人々に科学や技術に対する関心を引くことになった。
- ◆ 「はやぶさ2」に関する話題が高校の教科書や高校地学資料集に取り上げられ、教育の現場でも利用された。
- ◆ 「はやぶさ2」に関連した書籍が多数出版されたり、雑誌記事が多数掲載された。

### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



- 国際的貢献: 競争と協力により、小天体探査の世界的潮流を創出
  - ◆ OSIRIS-REx探査への貢献とシナジー
    - ✓ はやぶさ2が先立ってタッチダウンや試料分析を進め、その経験を伝えることにより、OSIRIS-RExの試料採取成功や今後のBennu試料分析に大きな貢献をした。
    - ✓ MOUに従って両試料の交換して、比較研究を行うことで、炭素質小惑星の物質科学研究の大きな進展が期待される。リュウグウ試料については、既に2021年12月に総量の10%にあたる0.5gがNASAに引き渡された。
  - ◆ NASA/JAXAで互角の論文発表数およびプロジェクト外研究者の巻き込みの成功
    - ✓ 各キーワードを概要に含む査読論文数 [SAO/NASA Astrophysics Data System 2022年2月] Hayabusa2/Ryugu(298編) vs. OSIRIS-REx/Bennu(301編)
    - ✓ 両探査ともプロジェクト外研究者の論文が2/3を占め、広い波及効果がうかがえる。
  - ◆ SCI衝突実験において、単に人工衝突のみでなく、事前事後の衝突点周辺の精密観測やライブ観測、掘削試料採取を実現したことは、本格的な宇宙衝突実験の先駆けとなった。
    - ✓ NASAとESAが国際協力により実施する二重小惑星Didymos探査計画AIDAミッション(DARTとHera)においてベンチマークとして利用されている。
  - ◆ 日欧の協力の進展: MASCOT運用、マルチスケール科学・帰還試料分析での協力に加え
    - ✓ MASCOTでの協力関係が、火星衛星探査計画MMXへの欧州ローバの参加を誘導。  
※MASCOT運用直後にDLR理事からJAXAへの謝意をいただき、MMX欧州ローバの協定が成立した。
    - ✓ NIRS3メンバーが、MMX/MIRS(近赤外分光計)の開発を主導している。
    - ✓ TIRメンバーが、欧州の二重小惑星探査計画HeraミッションにおけるTIRI(熱赤外カメラ)の開発を主導している。

### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



#### ■ 社会的貢献

- ◆ NHKをはじめとするメディアからの報道やドキュメンタリーは、COVID-19感染拡大で暗くなりがちだった世相において、明るい話題として受け止められ、多くの国民に感銘を与えた。
- ◆ 帰還カプセルの巡回展が行われ、多くの人々が宇宙を旅してきたカプセルの実物を見ることで、宇宙への関心を高めてもらうことに寄与した。
- ◆ 帰還試料の1%をアウトリーチ用とし、その一部を博物館(日本科学未来館、相模原市立博物館)で一般市民に公開した。分析成果の解説とともに貴重な試料の生の姿を公開展示することで、科学を伝える活動に寄与した。
- ◆ 記者説明会(約60回)でプロジェクトの最新状況を説明すると同時に、プロジェクトWebやSNSなどで積極的に研究者自ら発信を行った。(プロジェクトでは日英合わせて3つのツイッターアカウントをで情報発信をしており、フォロワー数は延べ33万人である)
- ◆ 「はやぶさ2」のプラネタリウム映画が制作され、多くのプラネタリウム等で上映された。
- ◆ 多くのアウトリーチ活動により、幅広い年齢層に科学に触れてもらう機会を提供した(後述)。
- ◆ JAXA相模原キャンパスがある相模原市においては、「はやぶさ2」のマスコットキャラクターの「はやっ君」が「相模原市特別観光親善大使」となっており地元の活性化に貢献している。

#### ■ 関連大学への波及効果

- 新センター設立: 東京大学大学院理学系研究科附属宇宙惑星科学機構 2017年4月
- 東京大学総長告示(2018年9月)にもサイエンスが生み出すテクノロジーの例として「はやぶさ2」プロジェクトが引かれている。

[https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/president/b\\_message30\\_07.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/president/b_message30_07.html)

### 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



#### ■ 学術界への貢献

##### ◆ 太陽系科学・宇宙物質科学への貢献

- 水・有機物を含むC型小惑星の近傍探査と帰還試料から、太陽系での物質進化・輸送に対して、実証的基盤を与えることが期待される
- はやぶさ2探査の成果は、隕石・惑星間塵の分析、小惑星・彗星の観測、系外惑星観測、地上衝突実験、太陽系探査などを結ぶ結節点の役割を果たすと見込まれる

##### ◆ 地球初期進化への貢献

- リュウグウ探査で明らかになった壊れやすい天体・物質が地球の後期集積過程に与える影響について研究の進展が望まれる。
- C型小惑星の含水量が明確になり、地球の海の起源論が進展することが見込まれる
- 始原的隕石における地上落下後の汚染の可能性が示され、同位体比の決定などにおいて、宇宙物質を直接持ち帰る探査の重要性が共有認識となると見込まれる

##### ◆ 生命の起源の研究への貢献

- 太陽系形成期の氷微惑星における有機物合成過程の実証的研究が可能となる
- 地球汚染がないリュウグウ試料を標準試料とすることで、初期有機分子の存在量と多様性が明らかになると見込まれる
- 同位体異常をキーとして、円盤から持ち込まれた有機物成分と母天体で合成された成分を切り分けることが期待される

# 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



- 論文・受賞
- はや2の理工学論文(査読付き)  
298論文(1079アブスト) ※[SAO/NASA Astrophysics Data System 2022年2月]
- ◆ 理・工・理工合同論文含む, チーム外の論文含む  
(チーム内は253論文)
- ◆ 予算規模3倍, 論文執筆専属のチームを抱えるNASA O-RExと  
互角の成果(301論文, 1091アブスト)
  
- 特に2020-2021年は, はや2論文だけで世界の  
小惑星論文の1割.
- ◆ “asteroid” (1,432論文) vs “Hayabusa2 or Ryugu” (144論文)
  
- 受賞(学術・社会評価) : 57件
- ◆ 国際的な表彰 12 (IAF World Space Awardなど)
- ◆ 国内の表彰 38 (内閣総理大臣顕彰など)
- ◆ 個人(若手)表彰 32 (学会賞, 最優秀論文賞など)
- ◆ 企業との合同表彰 4 (日本産業技術大賞など)



近傍フェーズ初期成果論文



はやぶさ2工学の英文書籍



内閣総理大臣顕彰受賞



IAF World Space Award 2021受賞

# 3. 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (アウトカム)の達成状況



## ■ 広報・アウトリーチの定量的評価

### ◆ ライブ中継のアクセス数

	日本語配信	英語配信
第1回タッチダウン	490,000	166,000
衝突装置運用	109,000	143,000
第2回タッチダウン	736,000	37,500
リエントリー	651,000	133,000

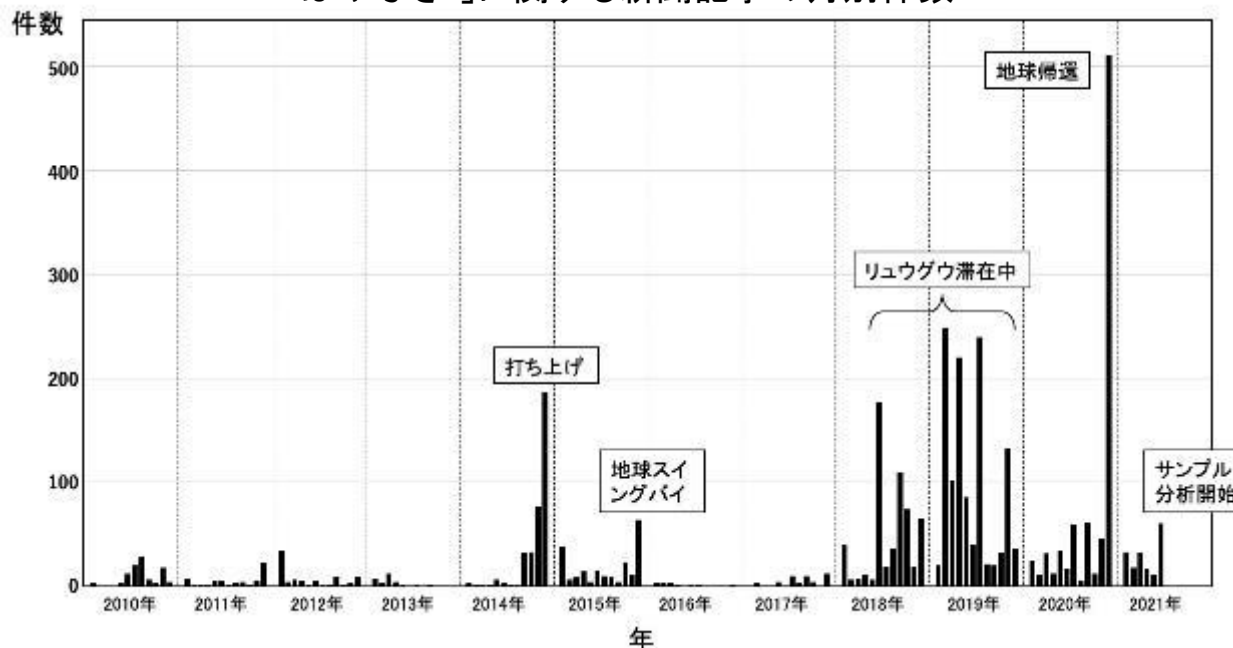
### ◆ 「はやぶさ2」ツイッターのフォロワー数

- ・日本語公式アカウント : 232,482人
- ・英語公式アカウント : 70,357人
- ・「はやツー君」アカウント: 31,511人  
(2022年4月7日現在)

### ◆ 新聞記事の数

JAXAの新聞クリッピングサービス(約50の新聞から)「はやぶさ2」関連記事の月別の件数を右のグラフに示す。

「はやぶさ2」に関する新聞記事の月別件数



# 4. 拡張ミッション(後期利用運用)の概要



## 目的

はやぶさ2の地球帰還後、はやぶさ2ミッションの使命を果たした探査機本体を有効活用し、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。最終的な新たな太陽系目標天体への到達は約10年後に及ぶ見込みである。  
また、はやぶさ2がリュウグウで創出した科学技術成果を最大限活用し、我が国の科学国際競争力の強化に資する活動を補強する。

## 期待される成果と効果

### 1) はやぶさ2拡張ミッションの実施

はやぶさ2ミッションの使命を果たした探査機本体により、新たな目標天体への飛行は、深宇宙長期航行技術やPlanetary Defenseに資する技術的・科学的知見の獲得に大きな貢献をもたらし、最終的に高速自転小惑星へのランデブーを行う。

### 2) はやぶさ2成果を活用した科学国際競争力の増強

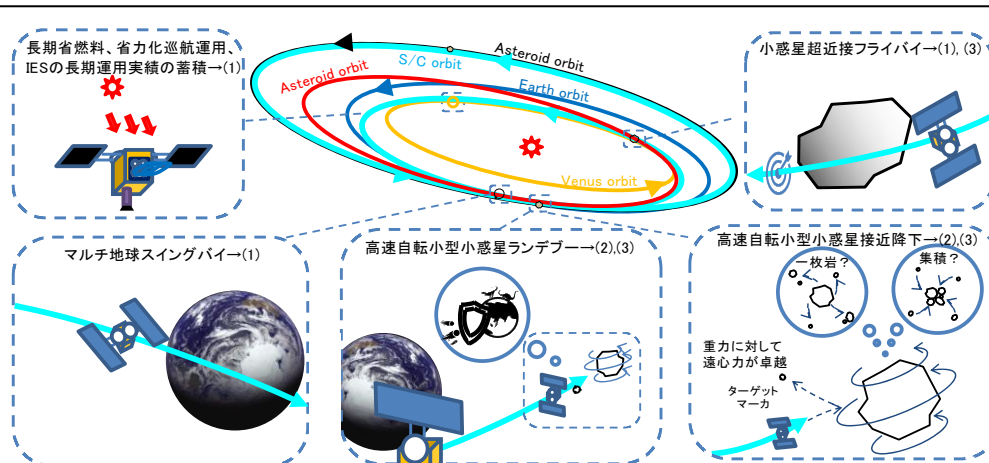
はやぶさ2/OSIRIS-RExが持ち帰る2天体の試料に対して日本の科学者が分析活動を支援・共同実施する。  
OSIRIS-RExの試料の受入施設整備を行い、複数天体のサンプル分析を総合的に分析できる能力を獲得する。  
はやぶさ2の科学データを定期的に公開するシステムの開発と運用を行う。またデータ利用促進等の国際連携活動を行う。

## 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、小惑星マルチランデブーを行う。  
「はやぶさ」「はやぶさ2」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:2016年、小惑星到着:2018年、地球帰還:2023年(予定))が実施中だが、サンプルの交換や科学者の協力について調整が進んでおり、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。

## 2022年度実施内容:

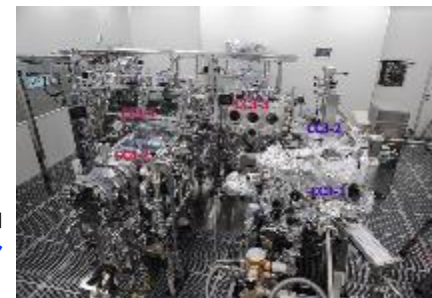
2020年に地球帰還した後の探査機運用を継続し、目標天体に向かう。OSIRIS-RExサンプルを我が国で受け入れるキュレーション設備の整備に着手する。  
「はやぶさ2」の観測データを公開するシステムの開発に着手する。



## 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

OSIRIS-RExサンプルのキュレーション設備は、はやぶさ2キュレーション設備(右図)の設計を踏襲する。



## はやぶさ2 主要緒元

質量 約600 [kg]  
本体サイズ 1×1.6×1.25 [m]

### 主要搭載機器

- ・ X帯高利得アンテナ
- ・ Ka帯高利得アンテナ
- ・ 化学推進系スラスタ(12基)
- ・ イオンエンジン
- ・ 光学航法カメラ
- ・ レーザー高度計
- ・ 近赤外分光計
- ・ 中間赤外カメラ

## スケジュール

2020年 地球帰還→拡張運用開始  
2021年 キュレーション設備整備開始  
2025年 OSIRIS-REx試料受入  
2026年7月 小惑星2001CC21フライバイ  
2027年12月 地球スイングバイ  
2028年6月 地球スイングバイ  
2031年7月 小惑星1998KY26到着

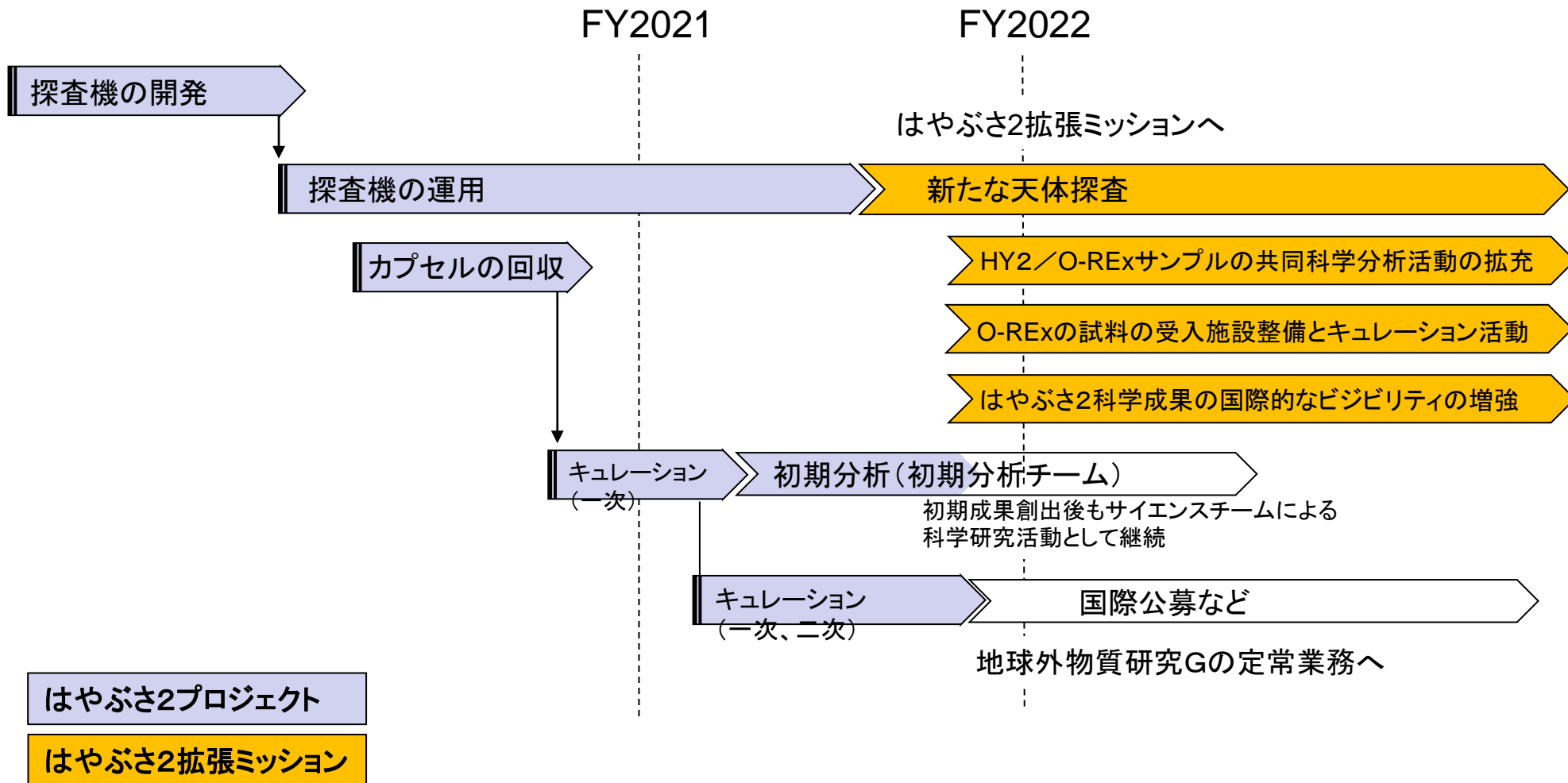
## 実施体制

宇宙科学研究所を中心にしてJAXA全体で行う。全国の大学、研究機関、また関連する海外機関から共同研究者を継続して募る。

# 4. 拡張ミッション(後期利用運用)の概要



## ■ はやぶさ2の事業の引継先





以上のように実施したはやぶさ2プロジェクトについて、プロジェクトチームとしては以下のように自己評価している。※下記のカッコ内の番号は審査の評価項目。

- (1) プロジェクト目標・サクセスクライテリアは十分達成された。かつ、当初想定以上の技術的成果、社会的反響、科学知見（およびその期待）を獲得した。
- (2) 波及効果・アウトカムの観点では、困難なミッションへの成功したこと、そのプロセスを見せたこと、またアウトプットに留まらずそれらの効果を最大化することにチームが熱意をもって当たったことで、わが国の価値、世界の科学に資する成果が得られたと自負している。
- (3)(4) 経営資源、実施体制、スケジュール、調達マネジメント実績ともに適切かつ効果的に実施できた。
- (6) レッスンズラウンドは十分整理された形で後続のプロジェクトに展開された。
- (7) 人材育成については、学術成果創出・ミッション進行・チームづくりをうまく連動させることで、チームメンバー個人にとって自己成長を感じられるしかけをつくることが出来た。そのことがひいては、ミッション遂行上の信頼性向上にも繋がったと考えている。
- (8) 他部門からの協力なくして当ミッションの成果はあり得なかった点、および、協力部門へ貢献できたことを定量的に示した。
- (9) プロジェクト終了後に移行事業を創出し、適切に実施体制を構築することが出来た。

はやぶさ2の成功は、はやぶさ初号機の教訓を真摯に反映しシリーズ技術として開発できたこと、JAXA職員および内外チームメンバーのモチベーションを十二分に喚起するミッションに仕立てられたこと、開発・運用を取り廻す十分な自由度が現場に与えられ若手とベテランのシナジーが発揮できたこと、直接社会と接点のあるミッション価値創出ができたことに帰するところが大きい。

はやぶさ2が、宇宙科学のみならず宇宙活動全般における日本への信頼や期待を高められたこと、科学技術立国としての日本の代表例となれたことは、望外の喜びである。

後続の宇宙ミッションに、科学・技術・マネジメントの点で、礎となったと評価いただければ幸いである。

## 小惑星探査機「はやぶさ2」プロジェクト終了審査 判定結果

2022年4月26日

審査委員長 石井 康夫

プロジェクトマネジメント規程・実施要領に従ってプロジェクト終了審査を実施し、プロジェクト終了可否について確認した。

審査項目及び審査結果を以下に示す。

### 1. 審査項目

- (1) プロジェクト目標(サクセスクライテリアを含む)の達成状況
- (2) 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果(アウトカム)
- (3) 投入した経営資源(資金・人員)、実施体制、スケジュールの実績
- (4) 調達マネジメントの実施結果及び資産の引継先
- (5) レッスンズラーndの取り込み状況
- (6) 機構横断的に継承すべき教訓・知見等の識別
- (7) 人材育成結果
- (8) 研究開発部門等によるプロジェクトへの貢献
- (9) プロジェクト終了後に移行する事業

### 2. 審査結果

上記の審査項目に沿って審査した結果、プロジェクト終了は妥当と判断した。

特に、理学・工学目標ともにエクストラサクセスを含む全てのサクセスクライテリアを達成していること、また多数の科学成果、JAXA内外の人材育成、社会的・国際的・学術的貢献及びアウトカム創出等の顕著な成果を上げていることを確認した。

はやぶさ2の実現に際して、宇宙科学コミュニティ、文部科学省、日本国政府から強力な支持をいただき、この大きな成果へと至りました。ここに厚く御礼申し上げます。

はやぶさ2は(開発中も、打ち上げ後も)多くの困難に遭遇しましたが、産業界・宇宙機関・大学・研究機関との良好なチームワークでそれらを乗り越え、ミッション成功に導くことが出来ました。はやぶさ2に関わったメーカー、米・独・仏・豪をはじめとした宇宙機関、国際的な学術コミュニティの皆様へ深甚なる感謝の意を表します。

最後に、国内外の一般の方々からの様々な形でいただいた応援が、チームメンバーにとって、直接間接にプロジェクト遂行の強力な推進力となりました。成功に至る前から、困難に遭遇している中途から、これほど多大な社会的サポートを継続的にいただいたことは、JAXAとしても得難い経験でした。はやぶさ2を温かく(時に熱く)見守って頂いたすべての皆様へ、深く感謝いたします。