

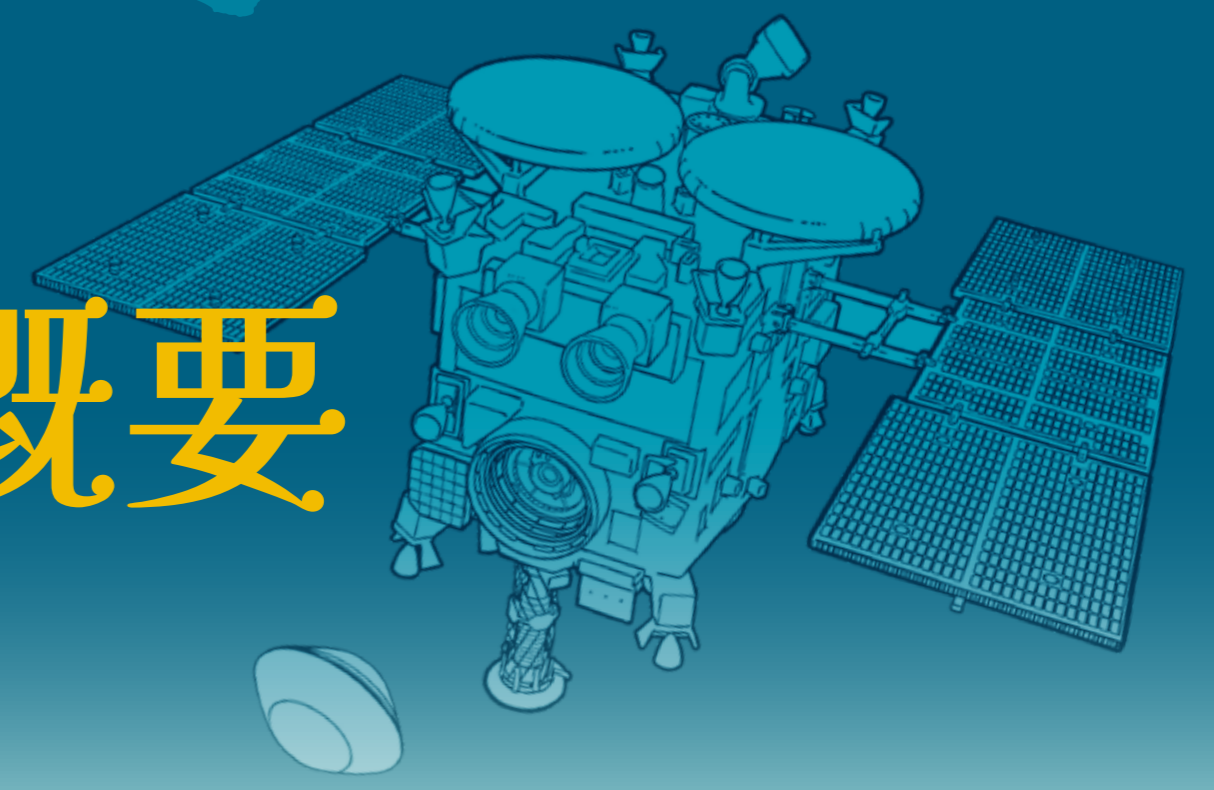
## ごあいさつ

太陽系がどのように誕生し、そして地球生命の誕生につながったのか。この問いは、これまで長きにわたり議論され、今後も議論されてゆく大きな問いです。日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が行った小惑星探査機「はやぶさ2」による小惑星リュウグウの探査は、この問いに対する足がかりとなりました。はやぶさ2が持ち帰った小惑星リュウグウのかけらの分析から、次々に新しい研究成果が得られています。今回、はやぶさ2の帰還カプセルおよび小惑星リュウグウのかけらの実物を、宇宙航空研究開発機構（JAXA）協力のもと、みなさまにご覧いただける機会を得ました。探査計画を支えた高度な宇宙技術を実感すると共に、リュウグウのかけらが何を物語るのか、その声に耳を傾けていただければと思います。

令和4年11月

京都産業大学

# はやぶさ2 ミッション概要



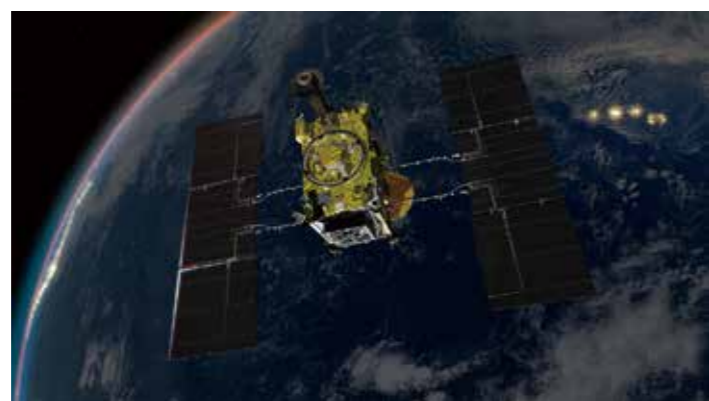
- 2014年 12月3日 → 打ち上げ
- 2015年 12月3日 → 地球スイングバイ
- 2018年 6月27日 → リュウグウ到着
- 2018年 9月21日 → MINERVA-II1 分離
- 2018年 10月3日 → MASCOT 分離
- 2019年 2月22日 → 1回目のタッチダウン
- 2019年 4月5日 → 衝突装置(人工クレーター生成)
- 2019年 7月11日 → 2回目のタッチダウン
- 2019年 10月3日 → MINERVA-II2 分離
- 2019年 11月13日 → リュウグウ出発
- 2020年 11月26日 → カプセル分離に向けた軌道変更
- 2020年 12月5日 → カプセル分離
- 2020年 12月6日 → 地球帰還
- 2021年 → 初期分析

クルージング・フェーズ

ミッション・フェーズ

リターン・フェーズ

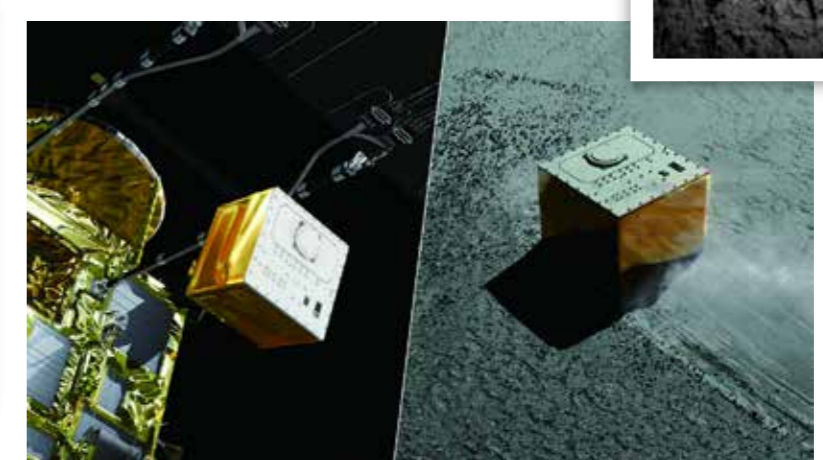
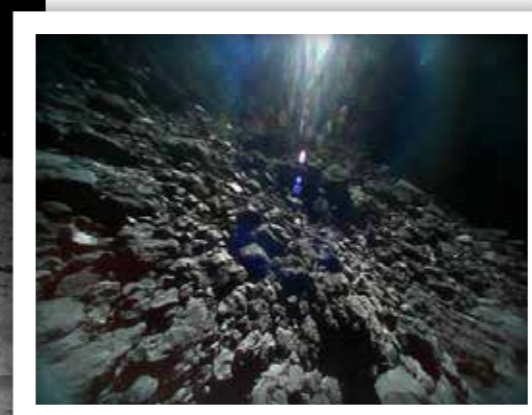
分析



イオンエンジンによる飛行



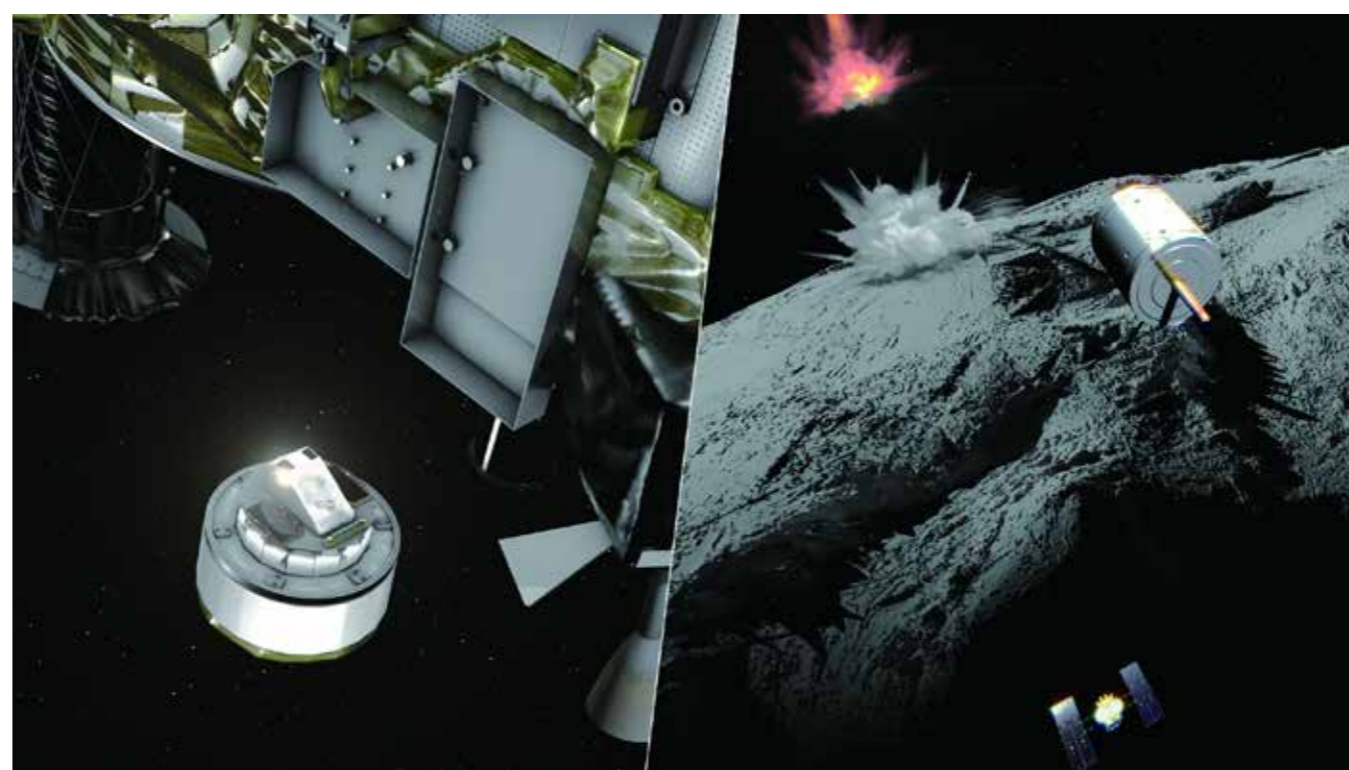
MINERVA-II1・MASCOT



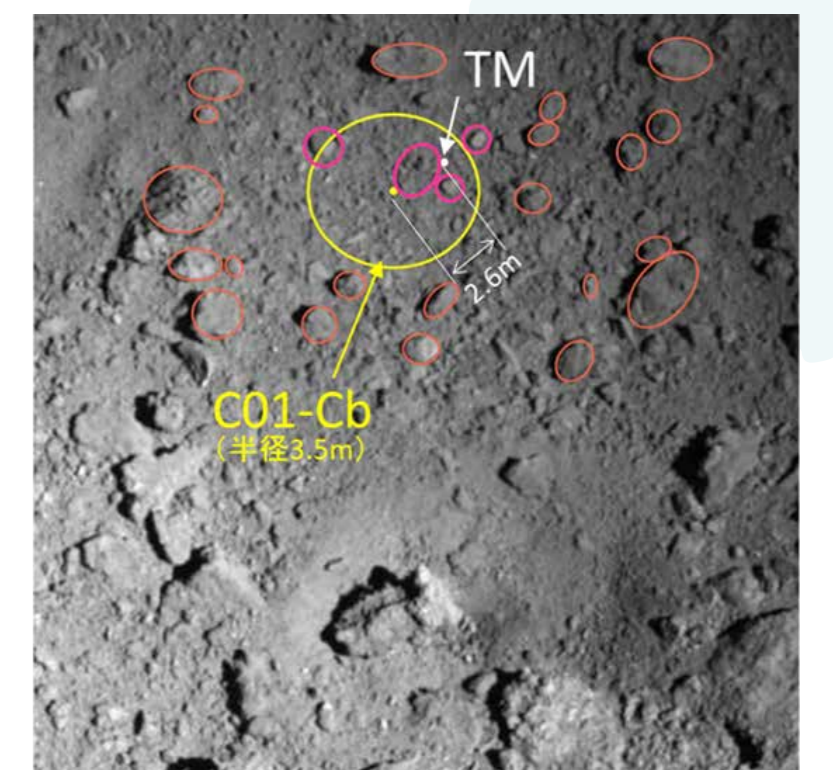
第1回タッチダウン



人工クレーター生成



第2回タッチダウン

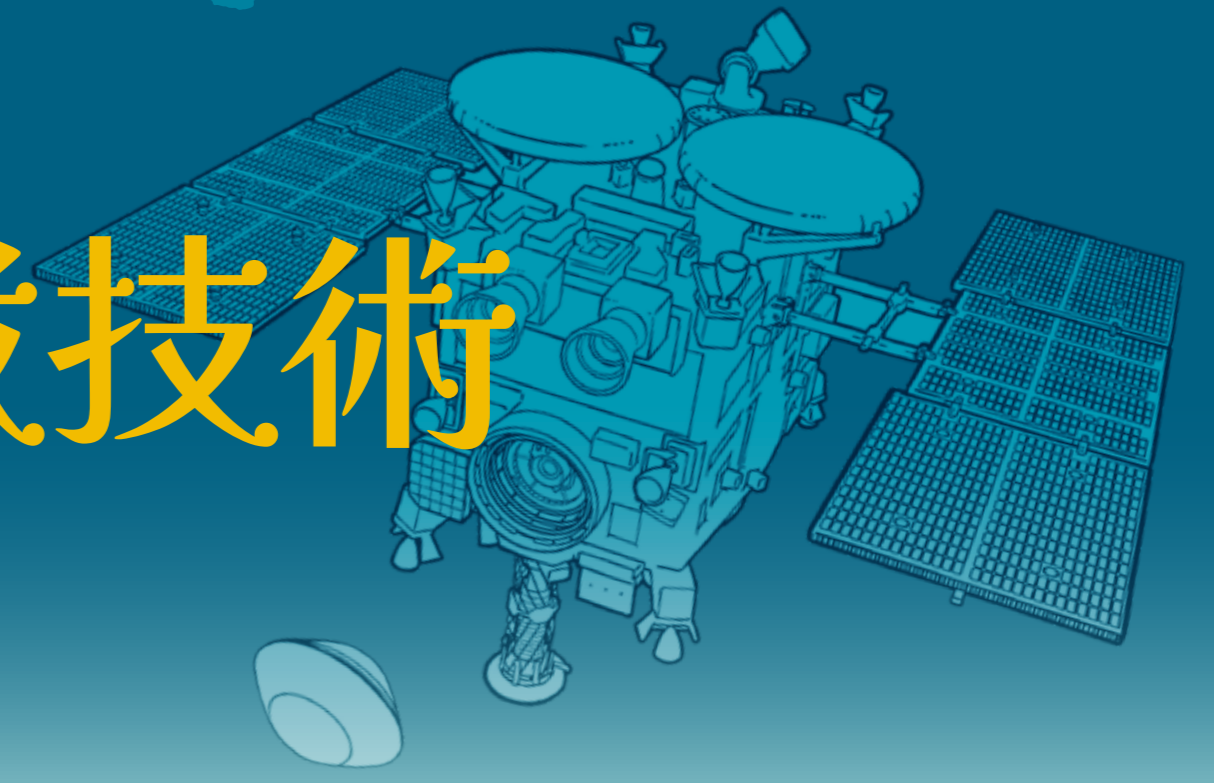


C01-C6:第2回タッチダウン地点

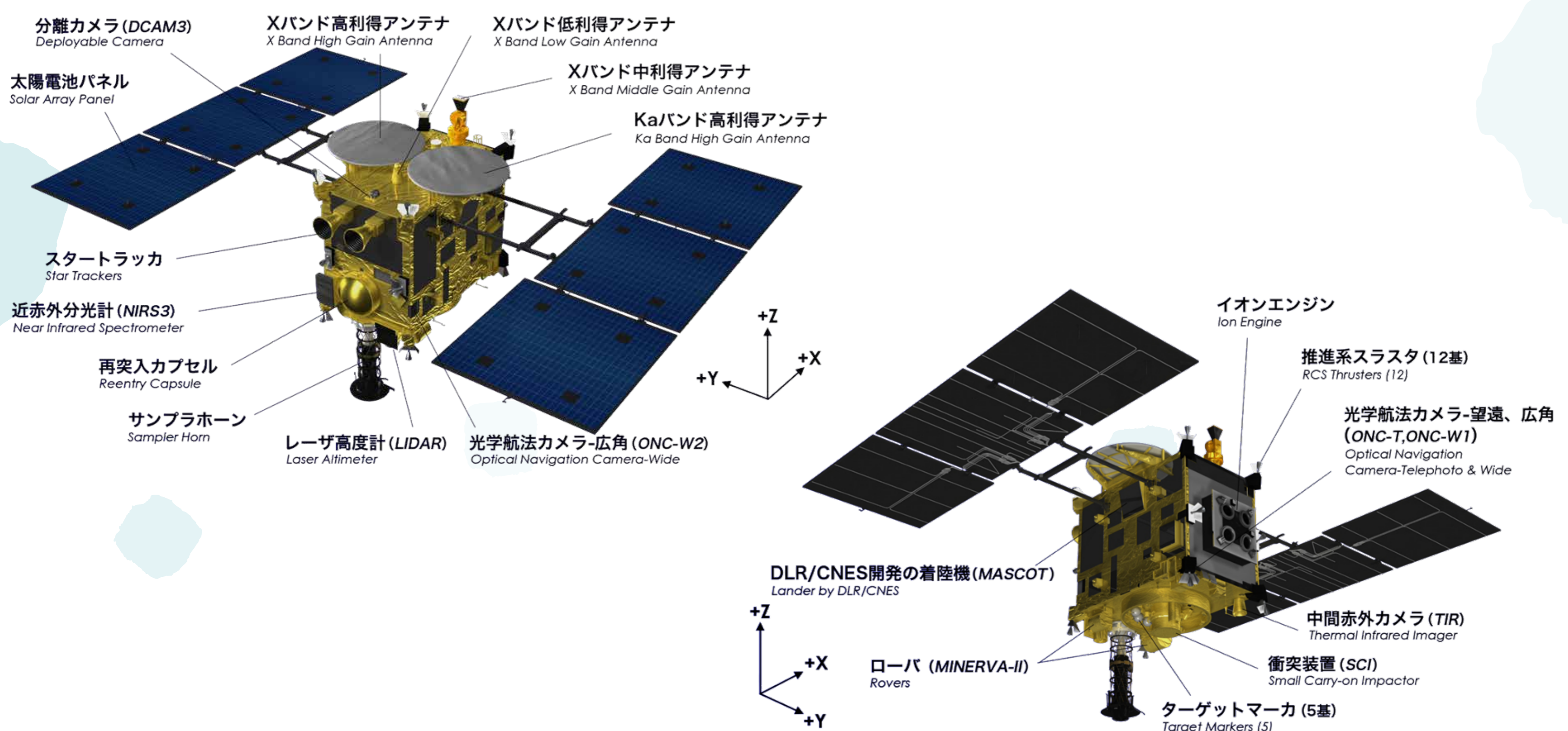
カプセル探索・回収



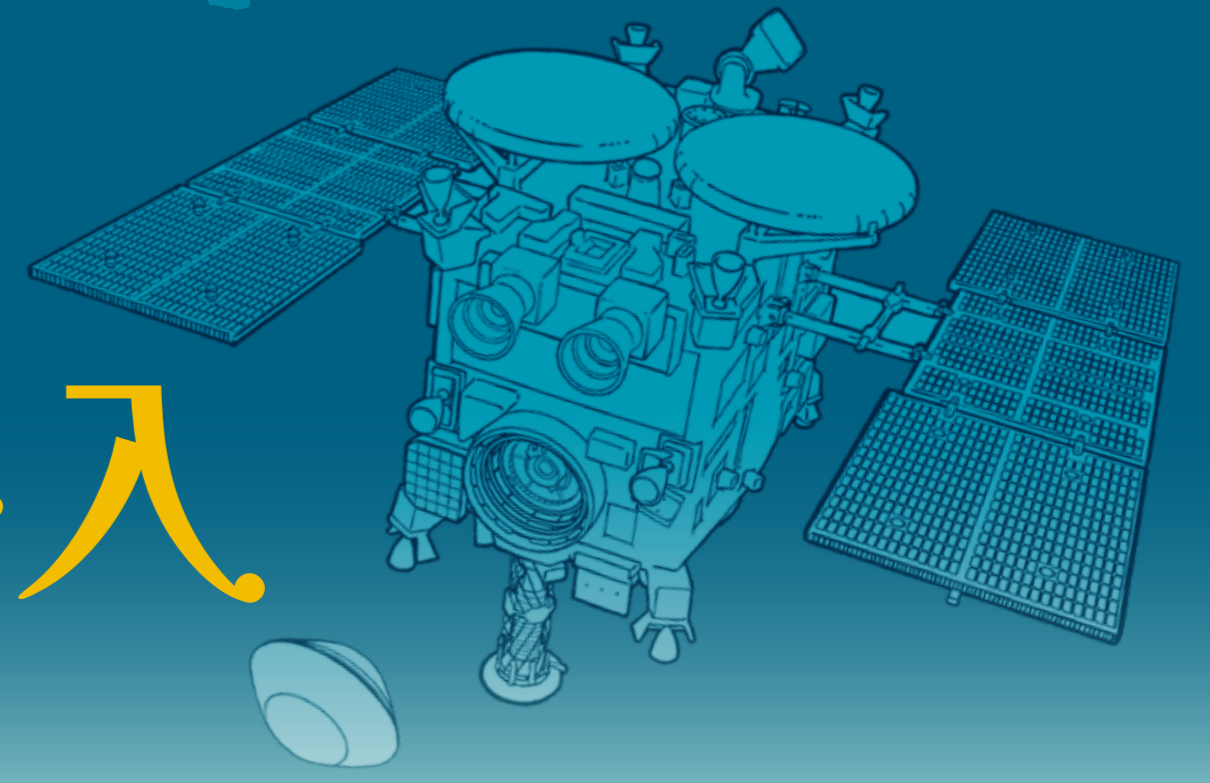
# はやぶさ2の特徴と搭載技術



はやぶさ2は電波通信によって地球から指令を受けますが、地球からの電波が届きにくい場所にいる時や、指令を待っている時間的余裕がない時には、自律的に動くことができます。また、分離物が多いのも特徴です。分離カメラ(DCAM3)や人工クレーター生成のための衝突機器(SCI)、リュウグウのサンプルを地球に届けるための再突入カプセル(帰還カプセル)など全部で12個の装置が分離し、様々な観測を実施しました。その他、はやぶさ2本体に固定されている観測機器としては、はやぶさ2の「目」となる光学航法カメラ(ONC-T・W1)やレーザ高度計(LIDAR)などがあります。



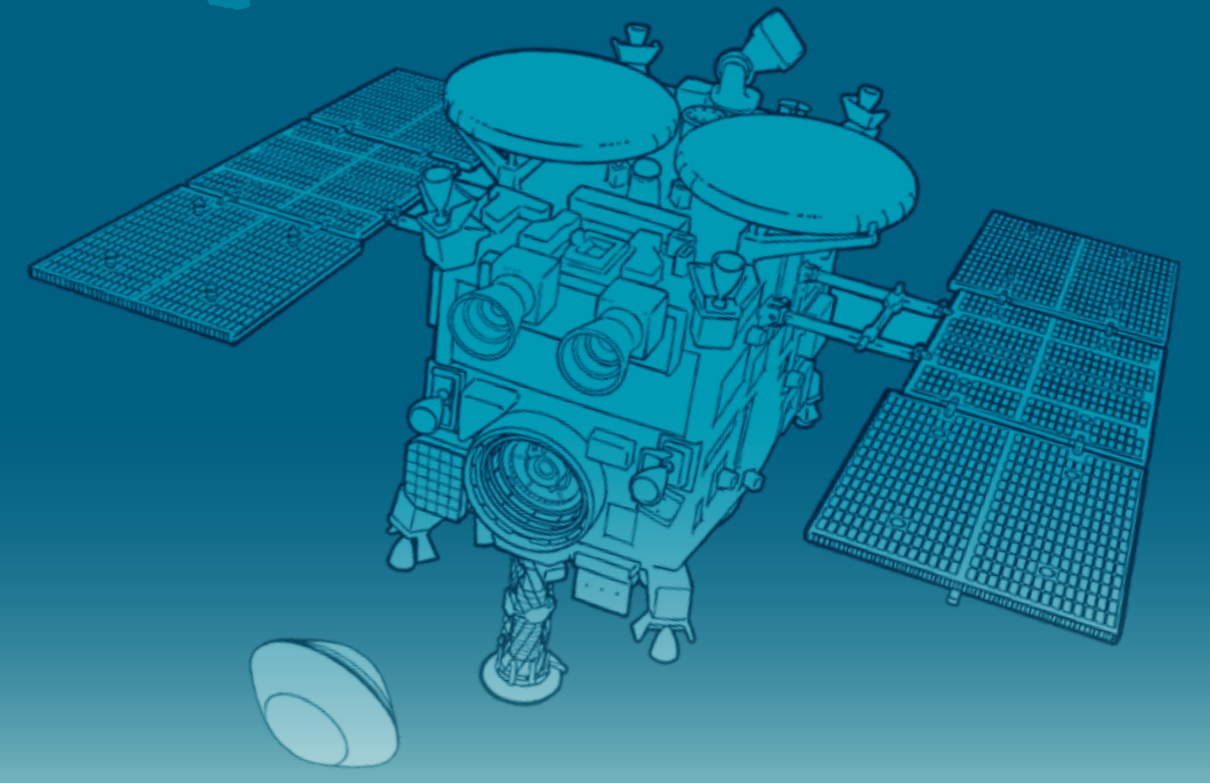
# リュウグウへの旅 イオンエンジンの導入



はやぶさ2はイオンエンジンによって小惑星リュウグウと地球の間を往復しました。イオンエンジンは、従来の化学燃料を用いたロケットエンジンよりも少ない(軽い)燃料でリュウグウに到達できる、軽量化に適した新しい推進エンジンです。宇宙へ運べる重さには限界があり、探査機の軽量化は宇宙探査の重要な課題となっています。イオンエンジンは、地上では1円玉を持ち上げる程度のみしかありませんが、長時間稼働させることにより、従来のロケットエンジンと比べて1/10の重さの燃料で必要な速度まで加速できます。

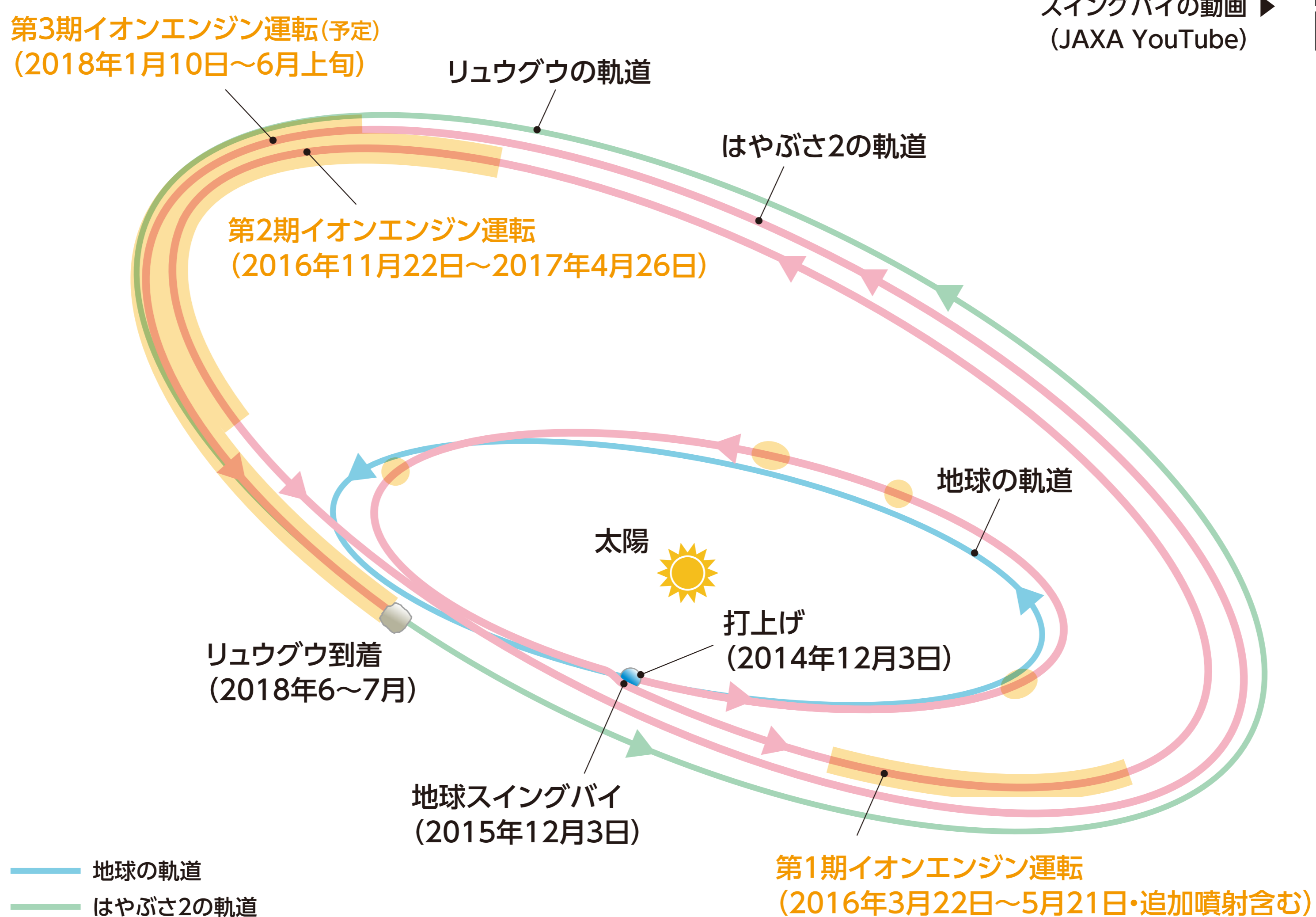


# リュウグウへの旅 地球スイングバイ

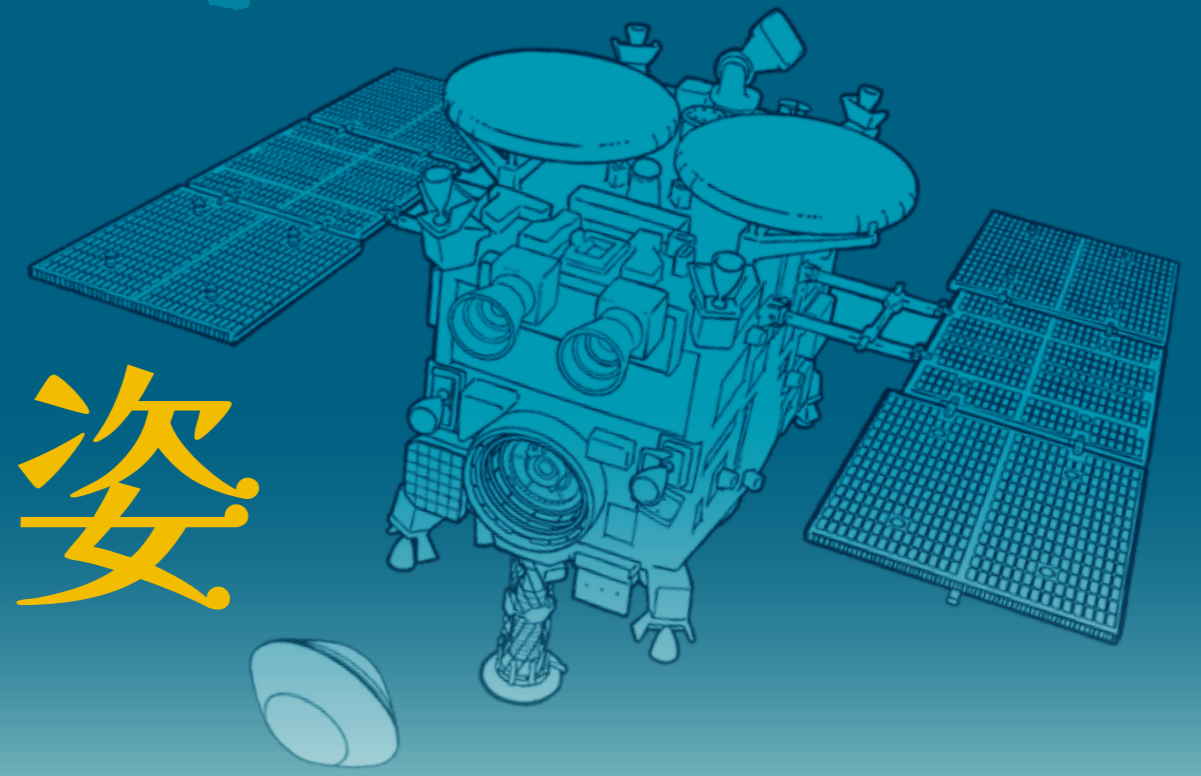


ロケットの打ち上げ能力とイオンエンジンの能力だけではリュウグウに到達する十分なエネルギーが足りなかったため、はやぶさ2はすぐにリュウグウには向かわず、地球のごく近くを飛行する「地球スイングバイ」を行いました。スイングバイとは、軌道変更に使われるテクニックの1つで、惑星の引力を利用して軌道を変える方法です。引力を利用することであまり燃料を使わずに飛行速度の増減や、飛行方向の変更が可能になります。はやぶさ2はイオンエンジンとスイングバイの効果を利用して地球とリュウグウを往復しました。

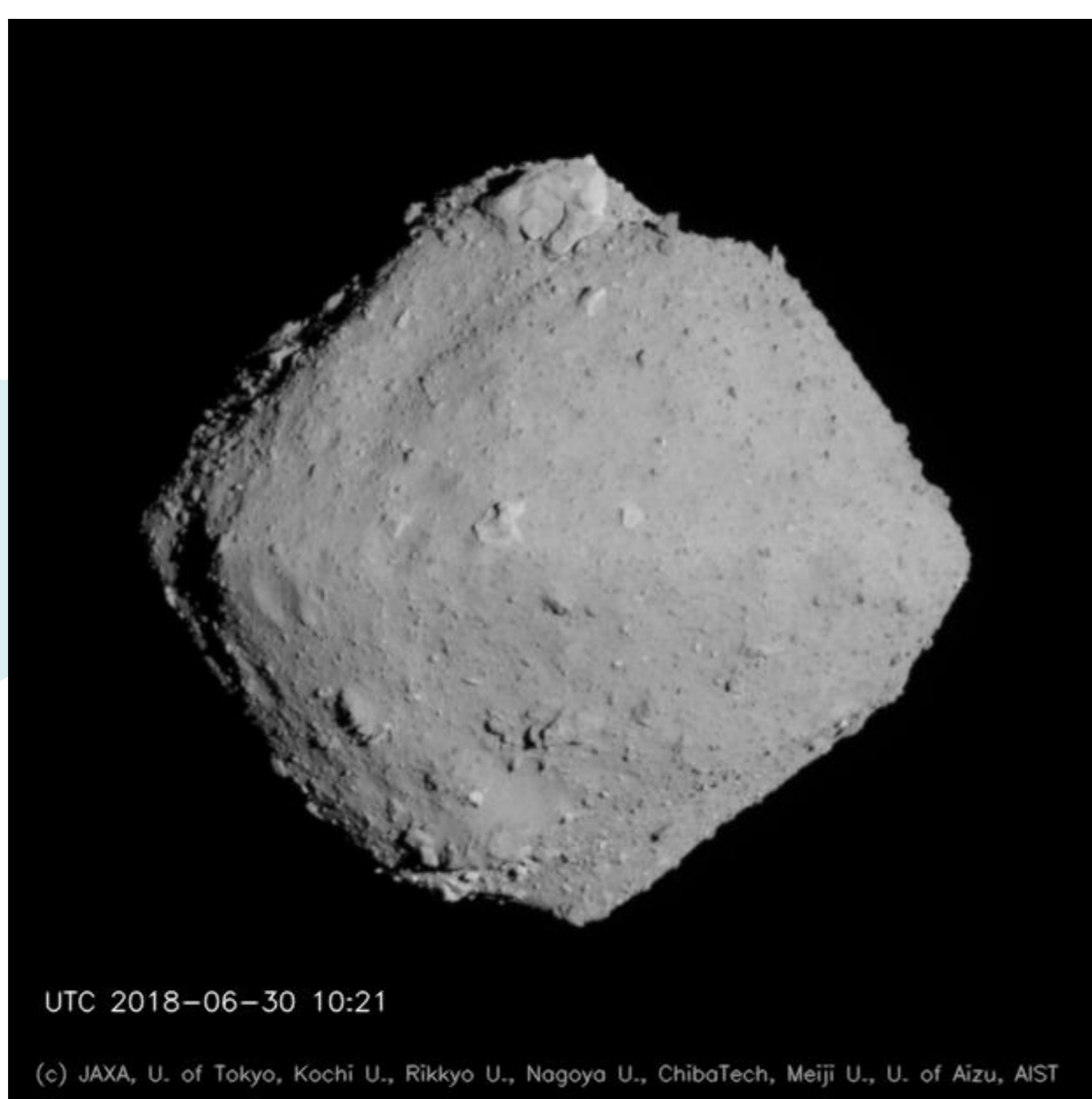
スイングバイの動画 ▶  
(JAXA YouTube)



# 予想以上にデコボコ?! 小惑星リュウグウの姿



はやぶさ2到着前に解っていたリュウグウの情報は非常に不確かなものでした。小惑星は「地上」の望遠鏡では点にしかみえないため、小惑星の情報は、この「点」の色、明るさ、時間変化の仕方から推測するほかありません。はやぶさ2が到着してわかったリュウグウは、「コマ型」と呼ばれるそろばんの玉のような形状でした。表面は大小様々な岩塊だらけで、クレーターも多く、凸凹な地形をしており、平らな場所がありませんでした。最大のクレーターは290mにも及び、過去に大きな隕石衝突があったことがわかります。

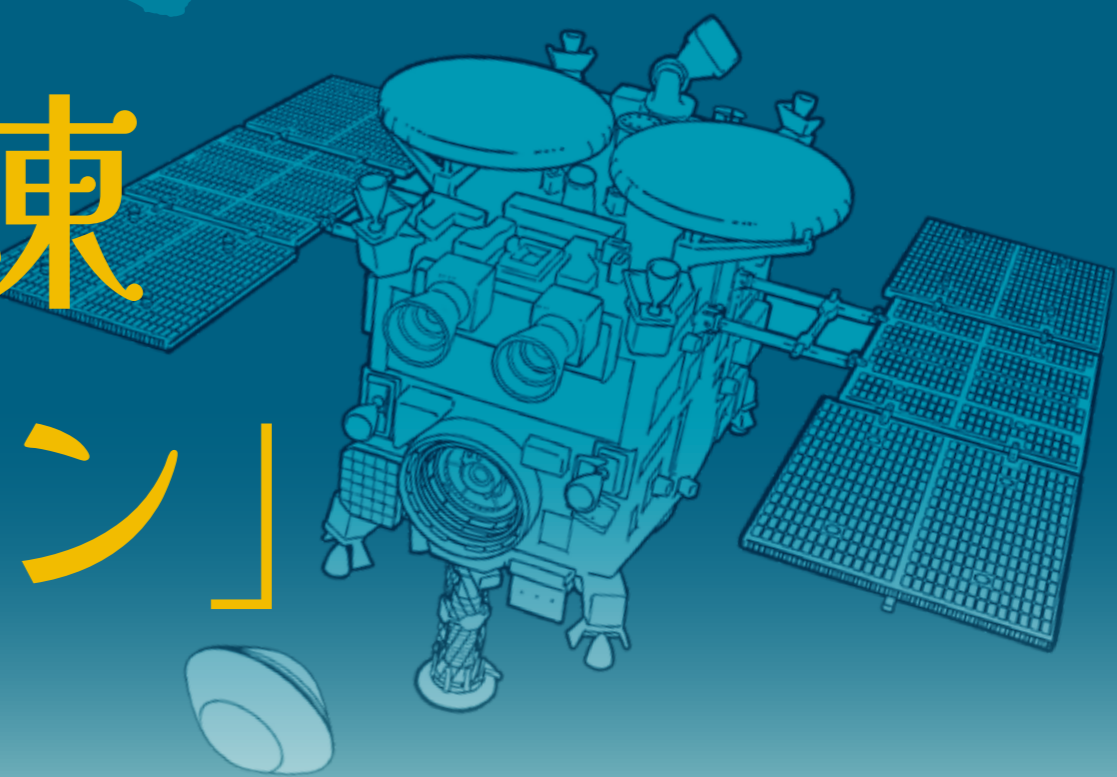


光学航法カメラ(ONC-T)が撮ったリュウグウの姿 ©JAXA

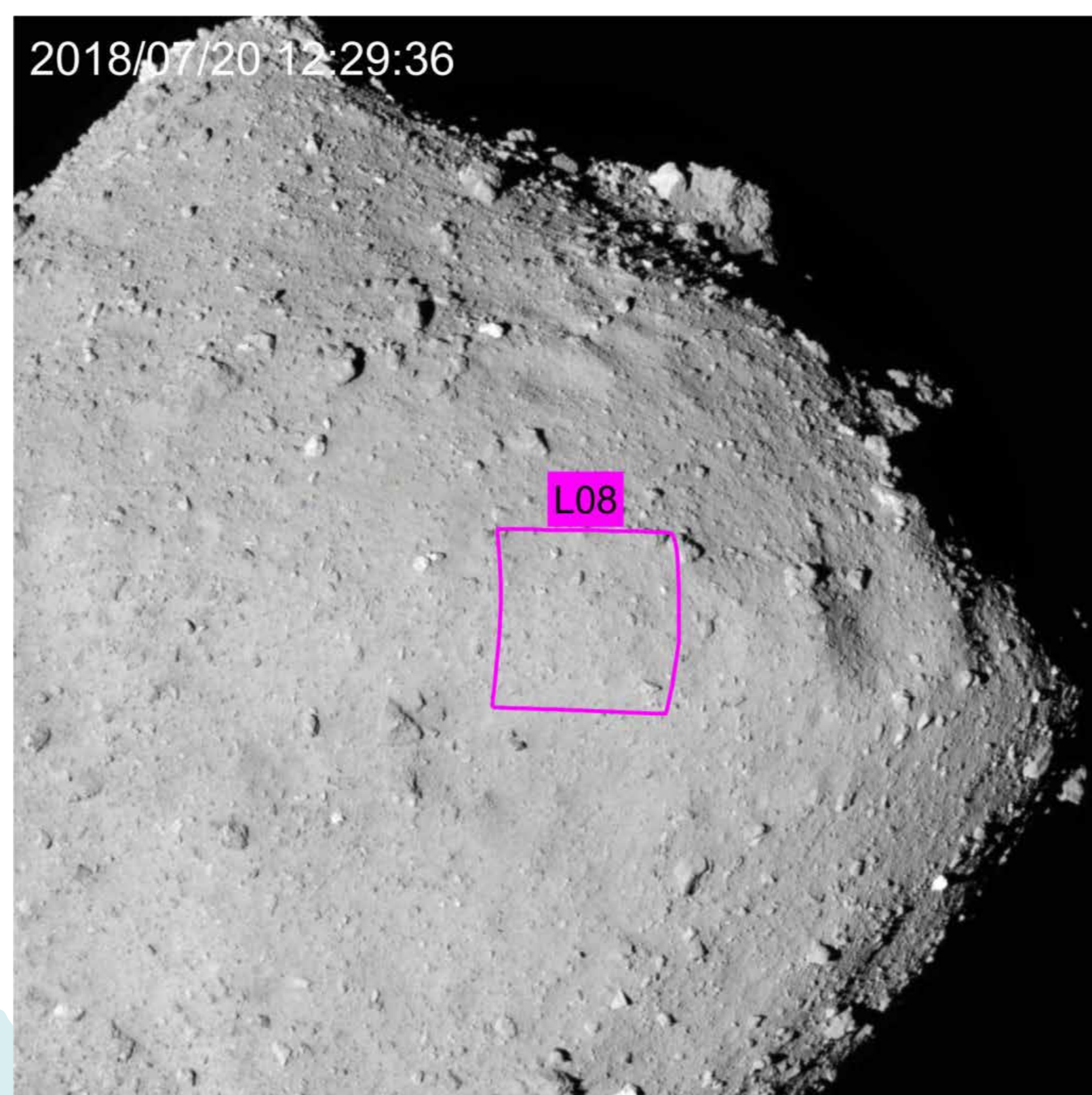


ミネルバIIが撮ったリュウグウの表面 ©JAXA

# サンプル取得への試練 難関の「第1回タッチダウン」

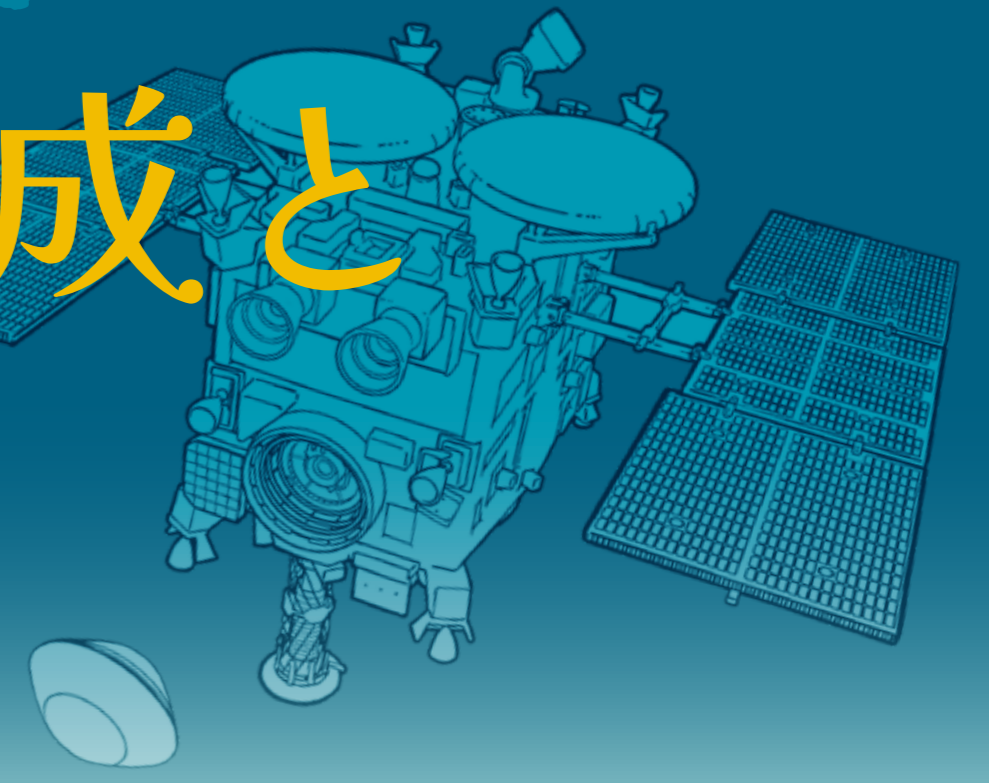


タッチダウンとは、小惑星の表面に落とされたターゲットマーカを目掛けて自律的に着陸後、すぐに再上昇する動作で表面の物質を取得する方法です。はやぶさ2の1回目のタッチダウンは、はやぶさ初号機と同じ方式のタッチダウンを行う予定でしたが、リュウグウの表面は予想より凹凸の激しい地形だったため、はやぶさ2の機体を大きな岩にぶつせずに着陸できるギリギリの広さの候補地しか見つかりませんでした。さらに、リュウグウの表面が暗すぎて、降下中に着陸地までの距離の計測に失敗し、タッチダウンを中断しています。そこで、2回目のタッチダウンで新たに試みる予定だった「ピンポイントタッチダウン」方式に急遽変更し、見事成功を収めました。

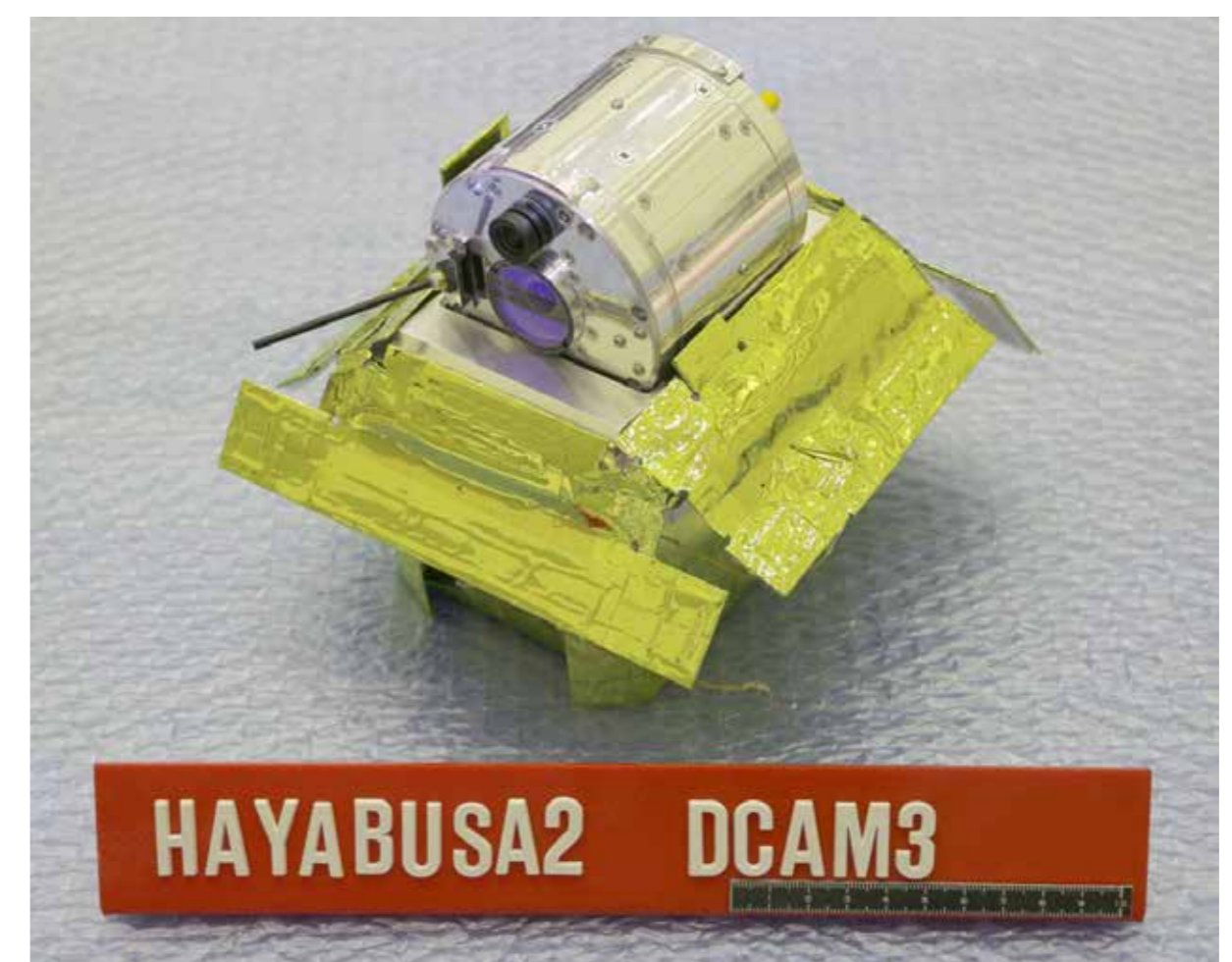


着陸候補図 ©JAXA

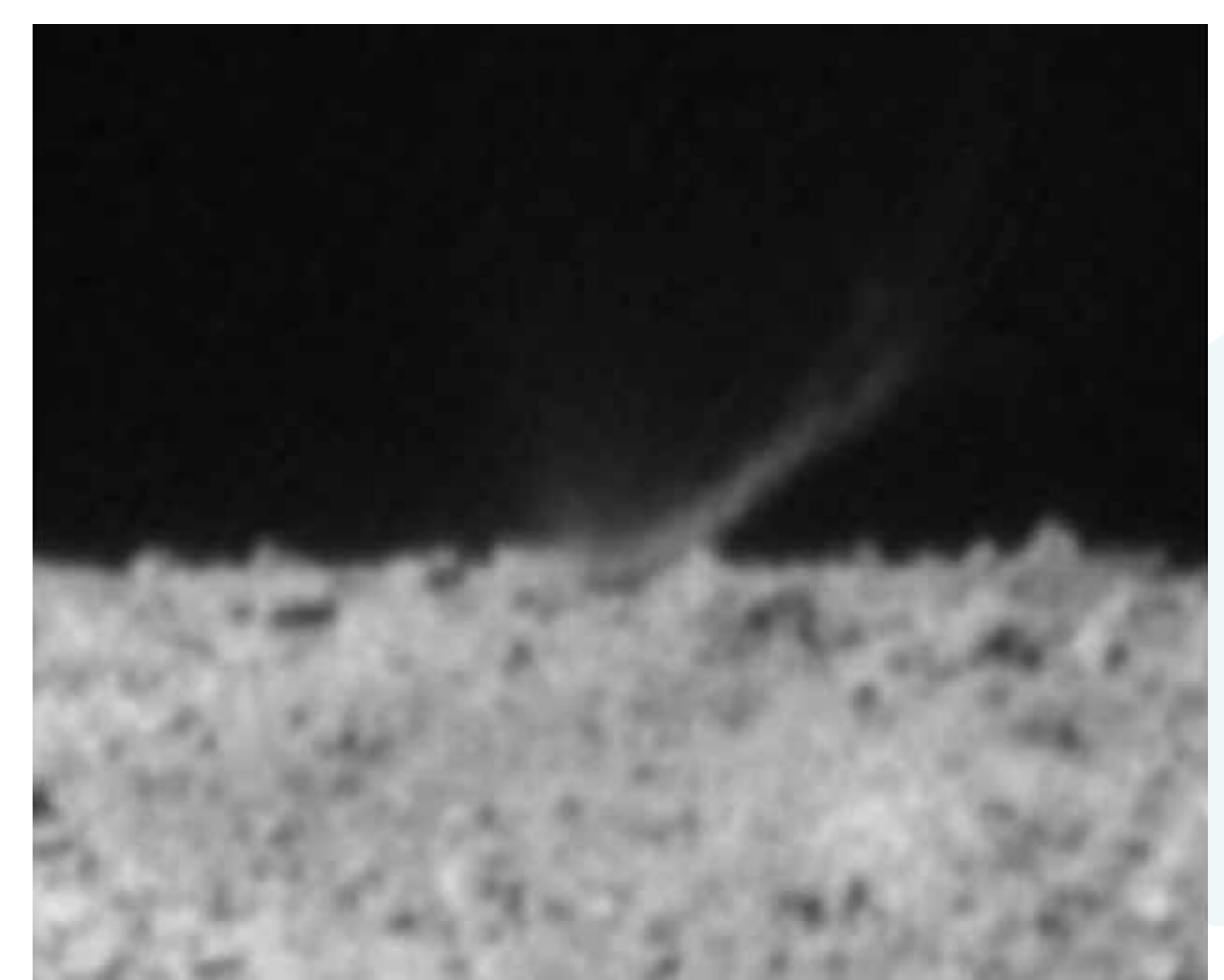
# 世界初！人工クレーター生成と 第2回タッチダウン



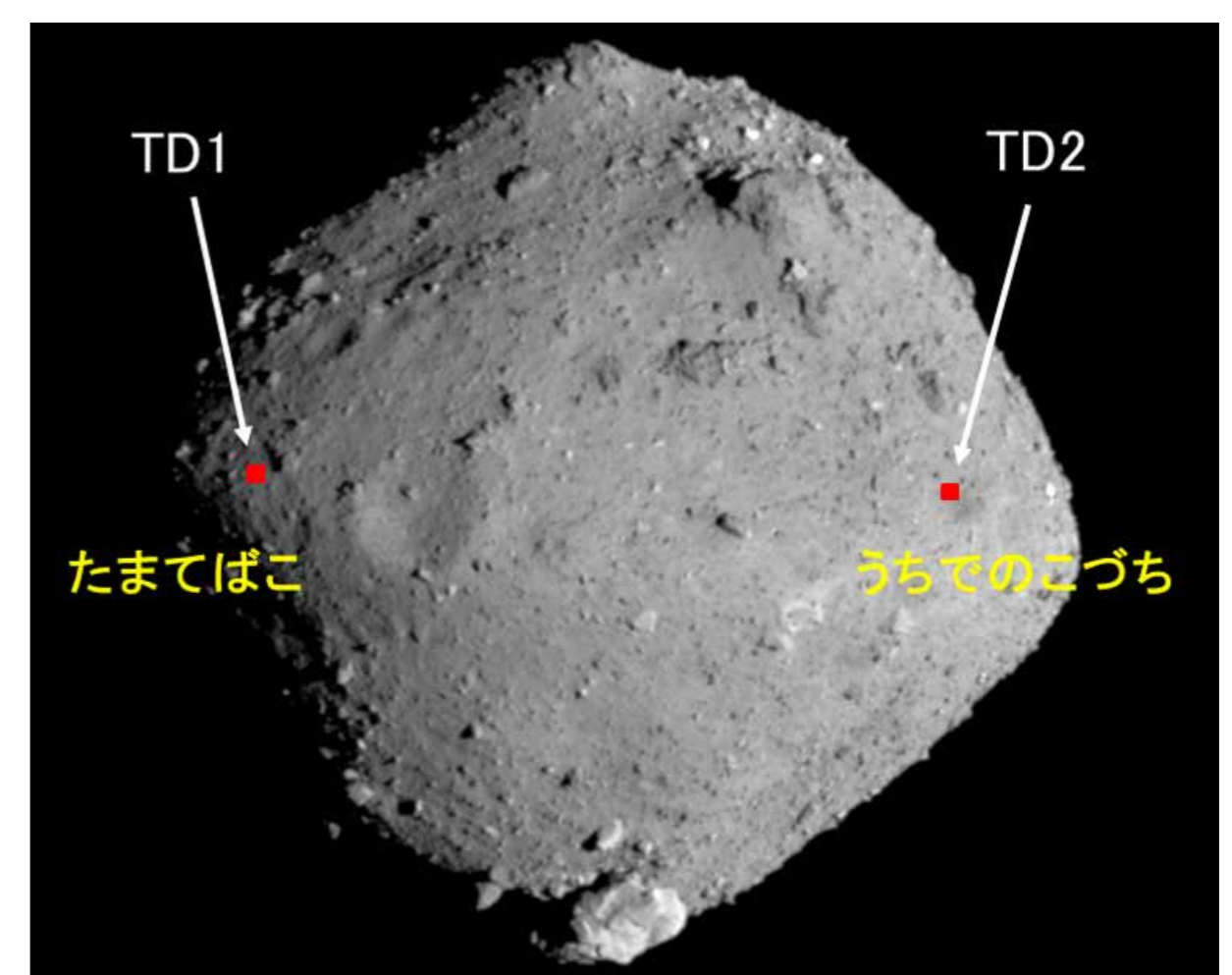
小惑星での人工クレーター生成と、同じ天体へ2回タッチダウンを行うことは、ともに世界初の試みでした。目的は、天体の地下物質を得ること、そして同天体の複数地点から採取した物質を持ち帰って比較することです。そのため、衝突装置 (SCI) で人工クレーターを作り、タッチダウンを行う必要がありました。クレーター生成の様子は安全のためにリュウグウの影に隠れたはやぶさ2の代わりに分離カメラ (DCAM3) が捉えました。2回目のタッチダウンの目標地点は、クレーター内部の6mほどの平らな領域でした (TD2)。1回目のタッチダウンで舞い上がった砂や塵が底面カメラ (ONC-W1) などの装置表面に付着し機器の性能が落ちたものの、目標地点から誤差60cmという精密さで、2回目のタッチダウンを成功させました。



分離カメラ DCAM3



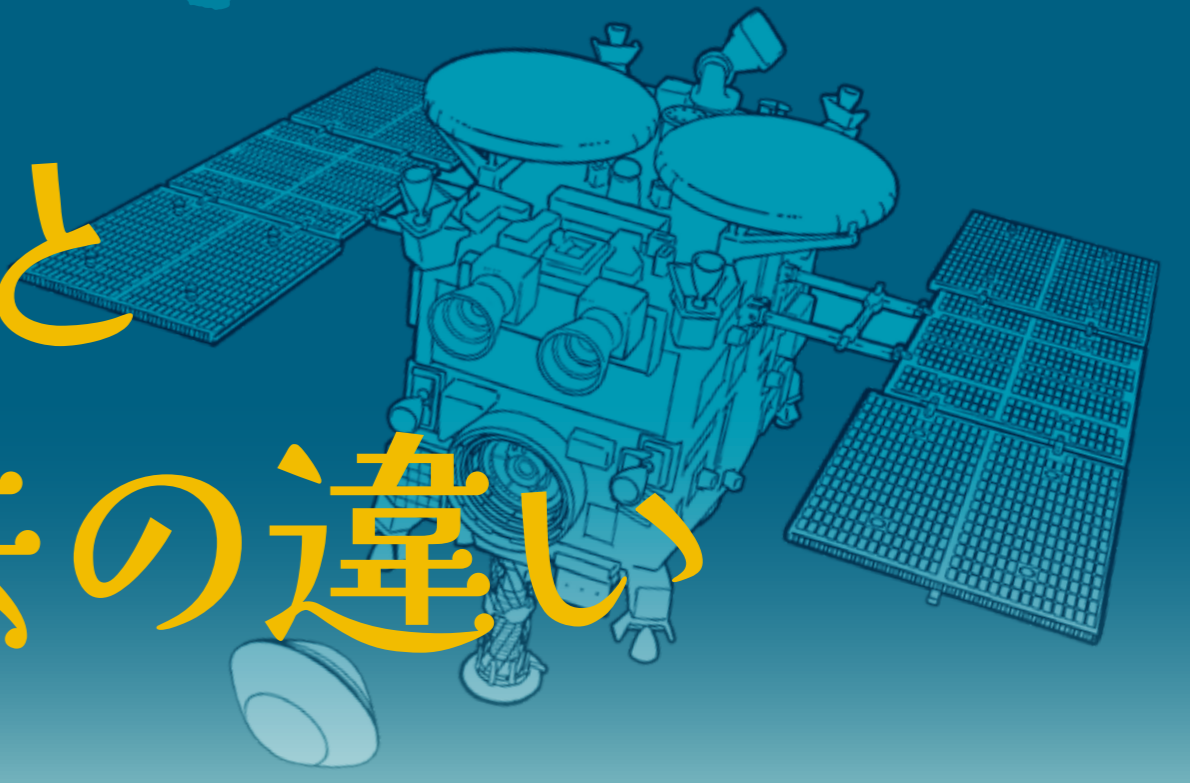
SCIが衝突した瞬間をDCAM3が捉えた画像



タッチダウンの場所 (黄文字は地点の愛称)



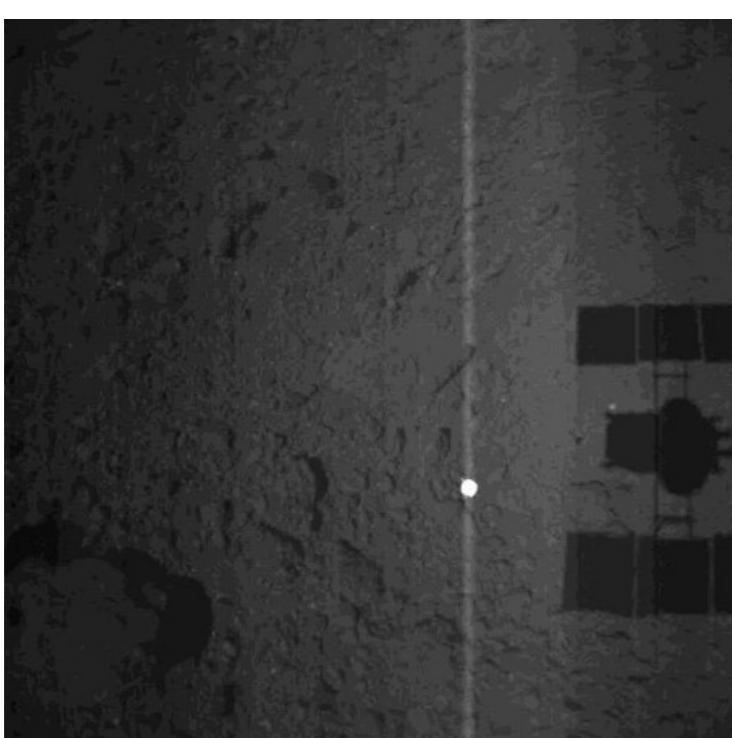
# タッチダウンの方式と ターゲットマーカの使用方法の違い



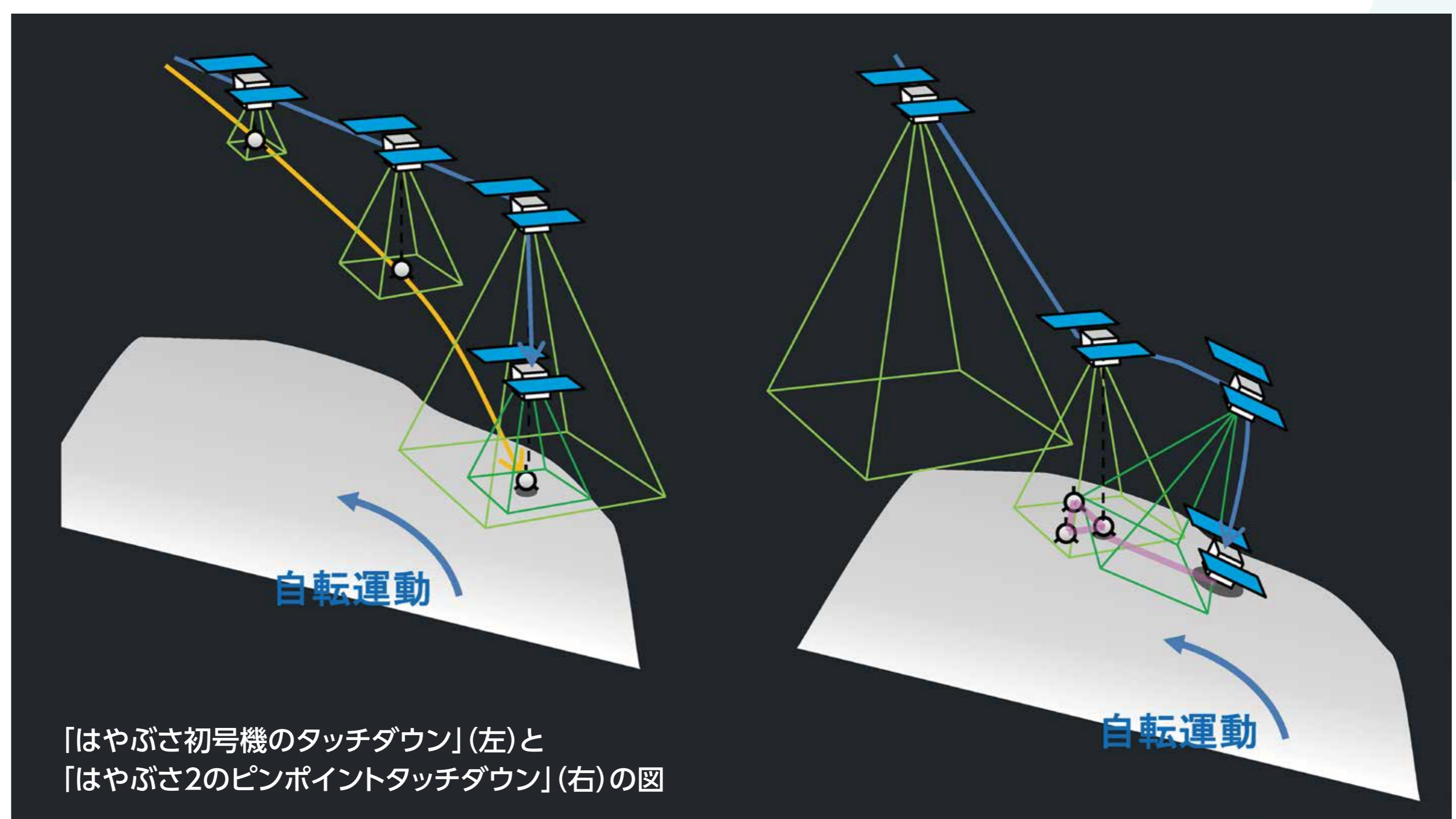
ターゲットマーカは、暗い天体にタッチダウンする際、光る目印として使用されます。はやぶさ2が行おうとしたタッチダウンの2つの方式は、このターゲットマーカの使い方が違います。1つ目の「はやぶさ初号機」方式は、探査機の着陸「直前」にリュウグウ表面へターゲットマーカを落とし、落下するそれを探査機が追いかけて、一緒に「同じ場所」に着陸します。2つ目の「ピンポイントタッチダウン」の場合は、ターゲットマーカを「事前」にリュウグウ表面に落とし、それを目印にして「近くの特定の場所」に着陸します。ターゲットマーカの投下精度とは無関係に着陸地点を指定できるメリットがありますが、その分、難易度が高い方式です。



ターゲットマーカ

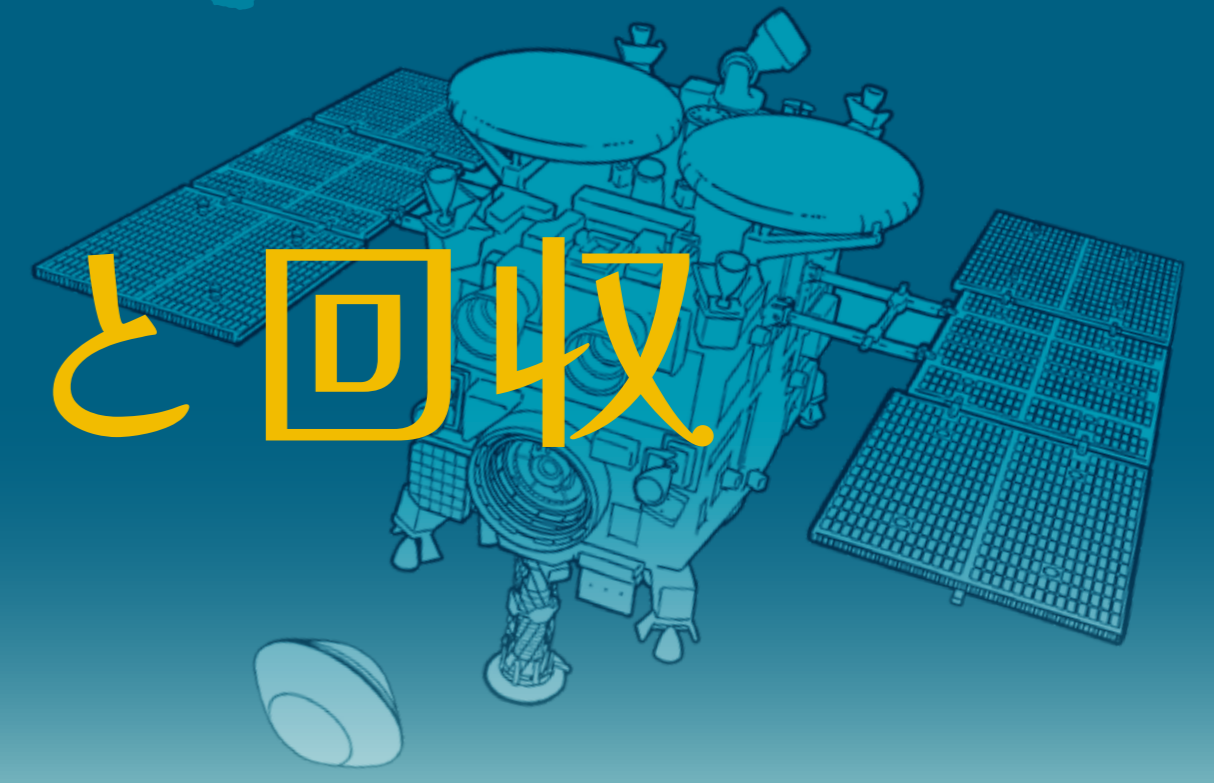


地表に落ちていく  
ターゲットマーカ



「はやぶさ初号機のタッチダウン」(左)と  
「はやぶさ2のピンポイントタッチダウン」(右)の図

# 帰還カプセルの地球着陸と回収



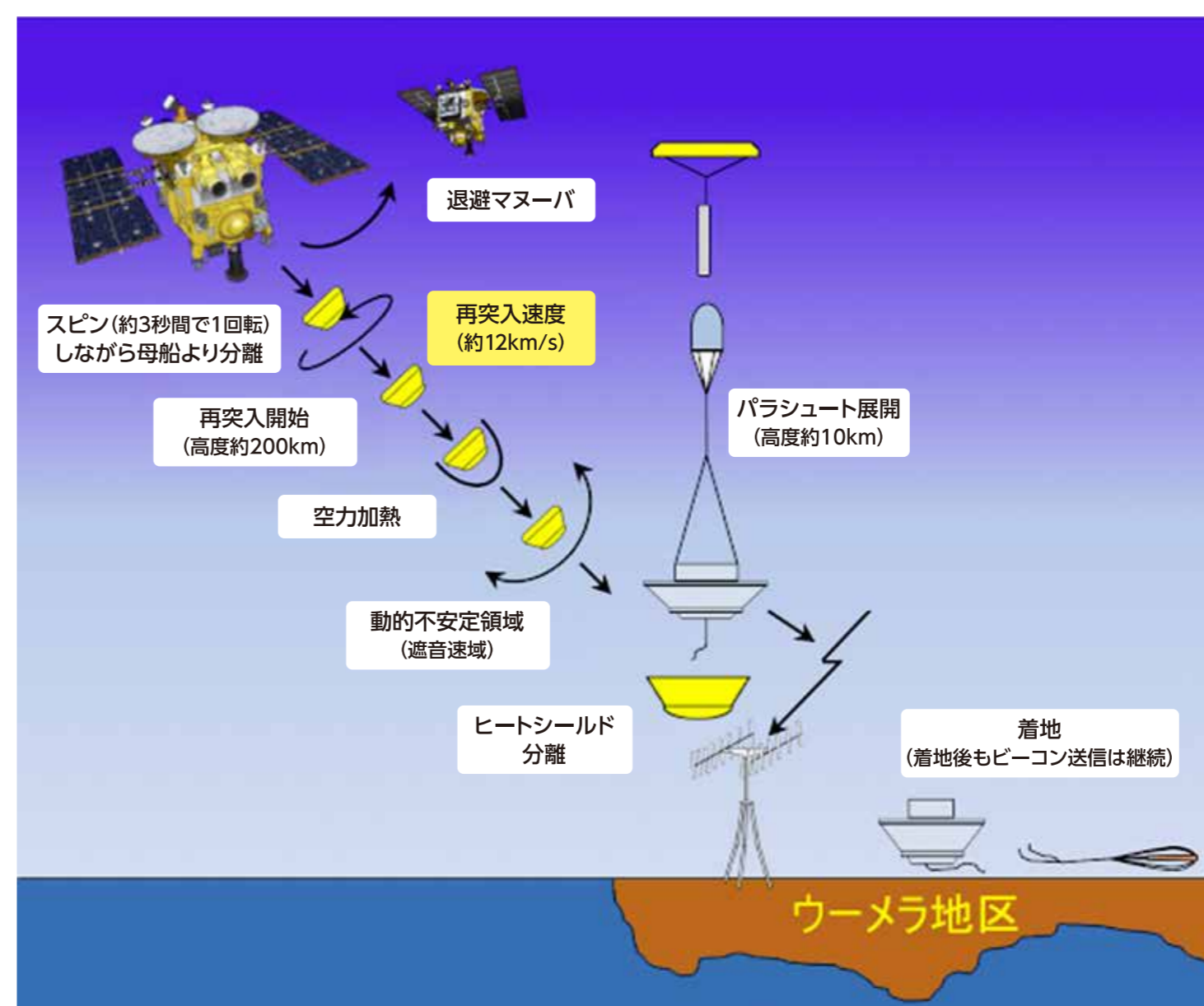
はやぶさ2から分離されたカプセルは、秒速12kmの猛烈な速さで大気圏に突入します。その速さによって空気が圧縮され、3000°Cもの熱(空力加熱)が発生します。カプセルは熱に耐えながら減速する時に激しい発光を伴うため、地球からは火球として観測されました。さらに減速するために、高度約10kmで直径3mほどの十字傘構造のパラシュートを展開します。カプセルは、ビーコン電波を出しながらオーストラリアのウーメラ砂漠への軟着陸に成功し、無事に回収されました。



火球となった帰還カプセル



パラシュート

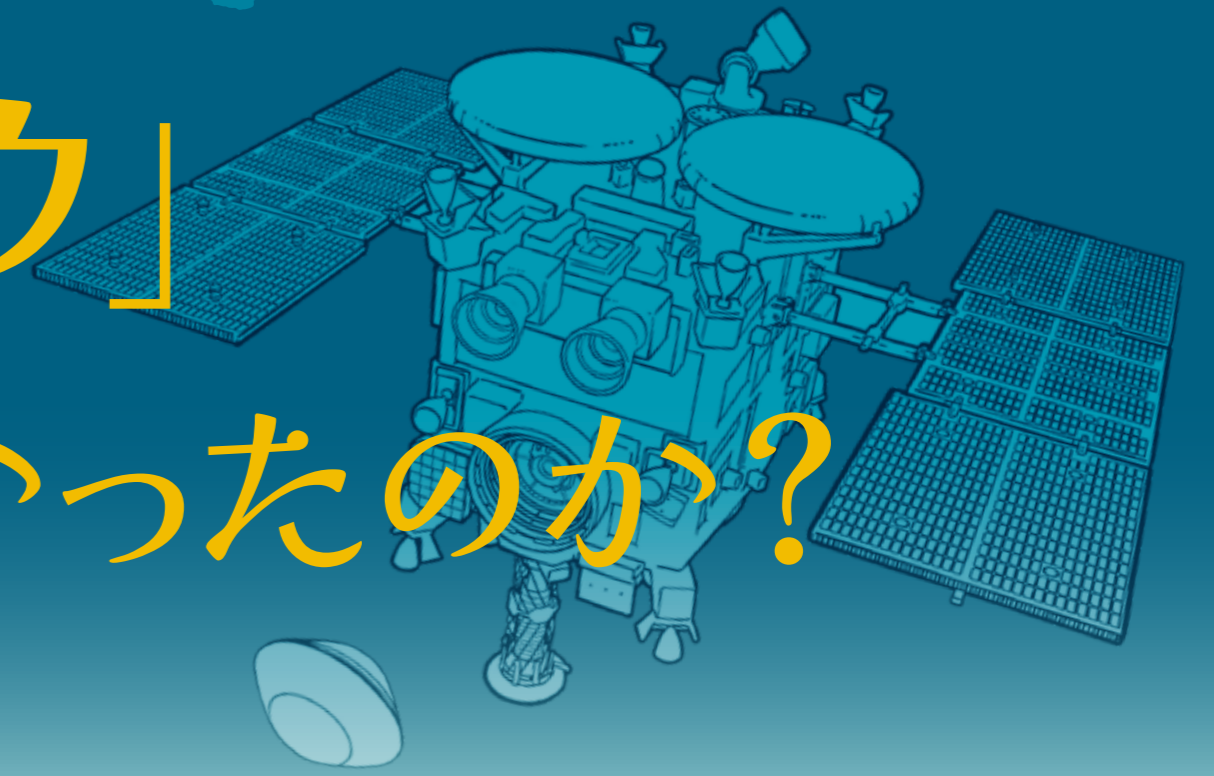


帰還カプセル再突入経路図

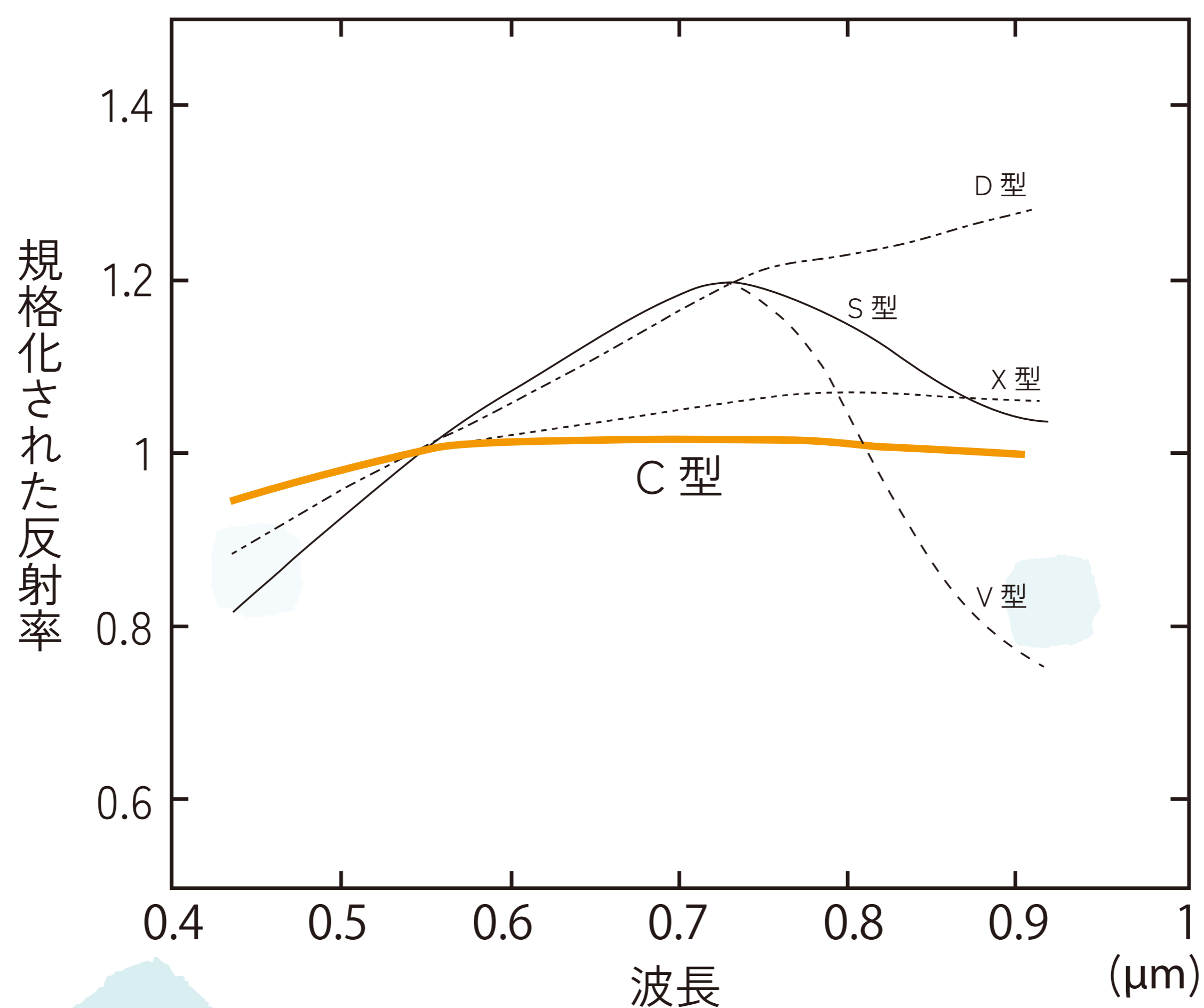
画像すべて ©JAXA

# C型小惑星「リュウグウ」

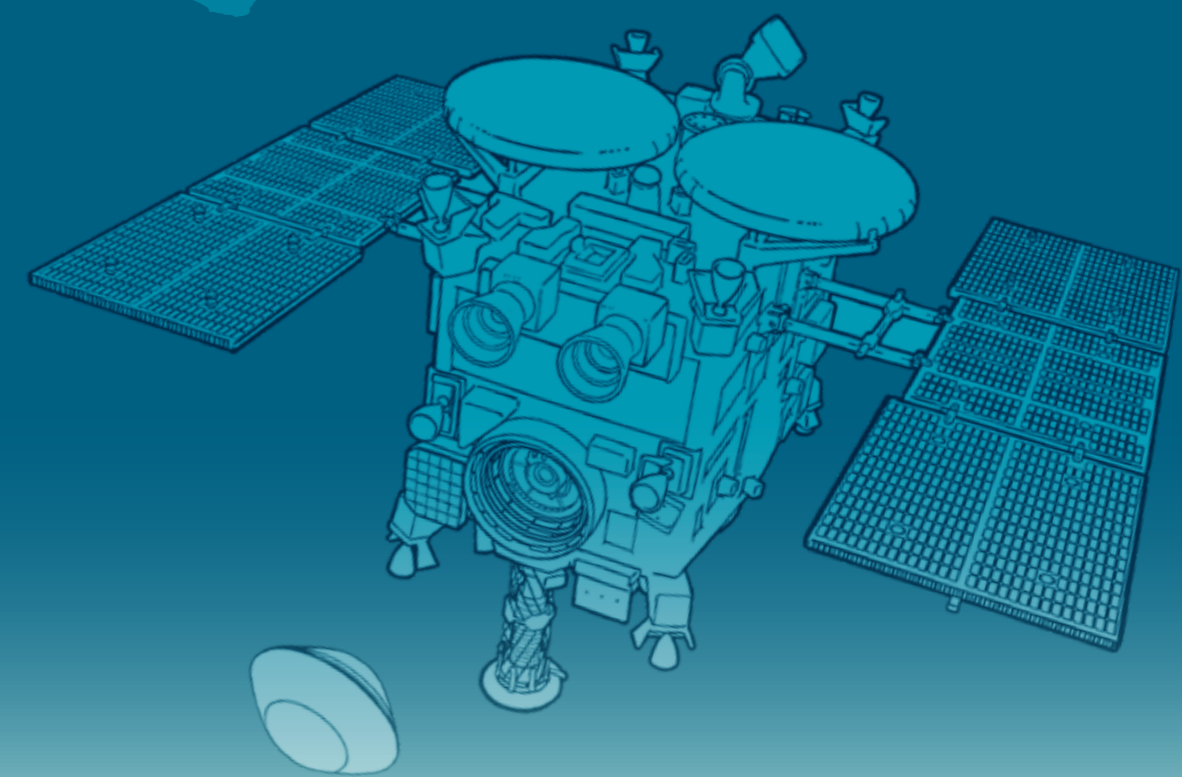
はやぶさ2は、なぜリュウグウに向かったのか？



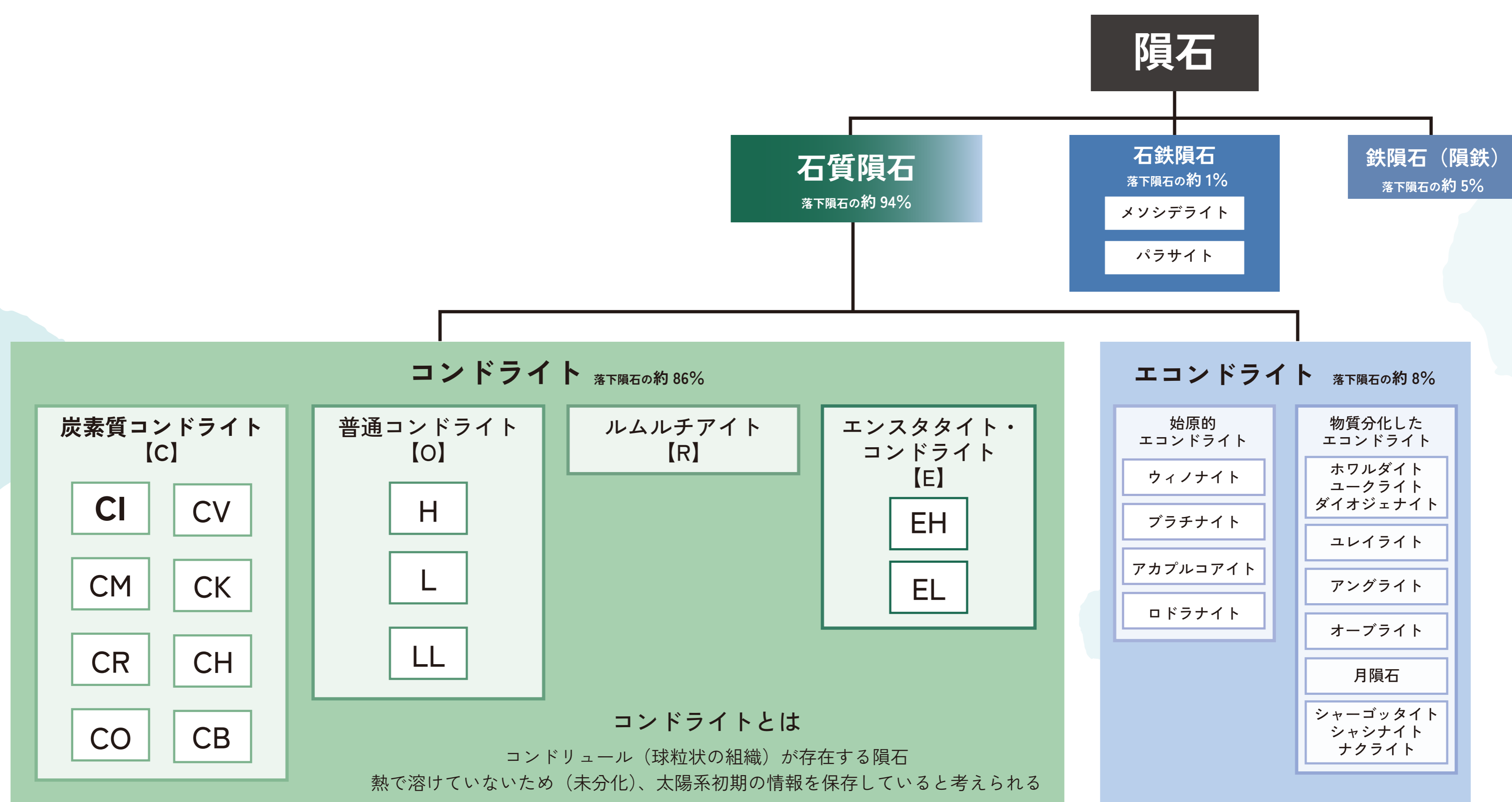
はやぶさ2の目的地の選定には、小惑星の起源と分類が関係しています。小惑星は、太陽系誕生当時の状態をそのまま保存されている可能性が高く、望遠鏡で観測される光のパターン（反射スペクトル）によって大きく5種類に分類されます。中でもC型は「炭素質 (Carbonaceous)」を表し、C型小惑星には炭素と水が含まれていると推定されています。これらの物質は生命の原材料とされ、「太陽系」と「生命」の起源に関する知見を得られると期待されてきました。そのため、はやぶさ2の探査ターゲットは「C型小惑星」としましたが、地球から到達可能な領域にあった小惑星は、リュウグウただ1つだったのです。



# 小惑星のかけら？ 隕石の分類

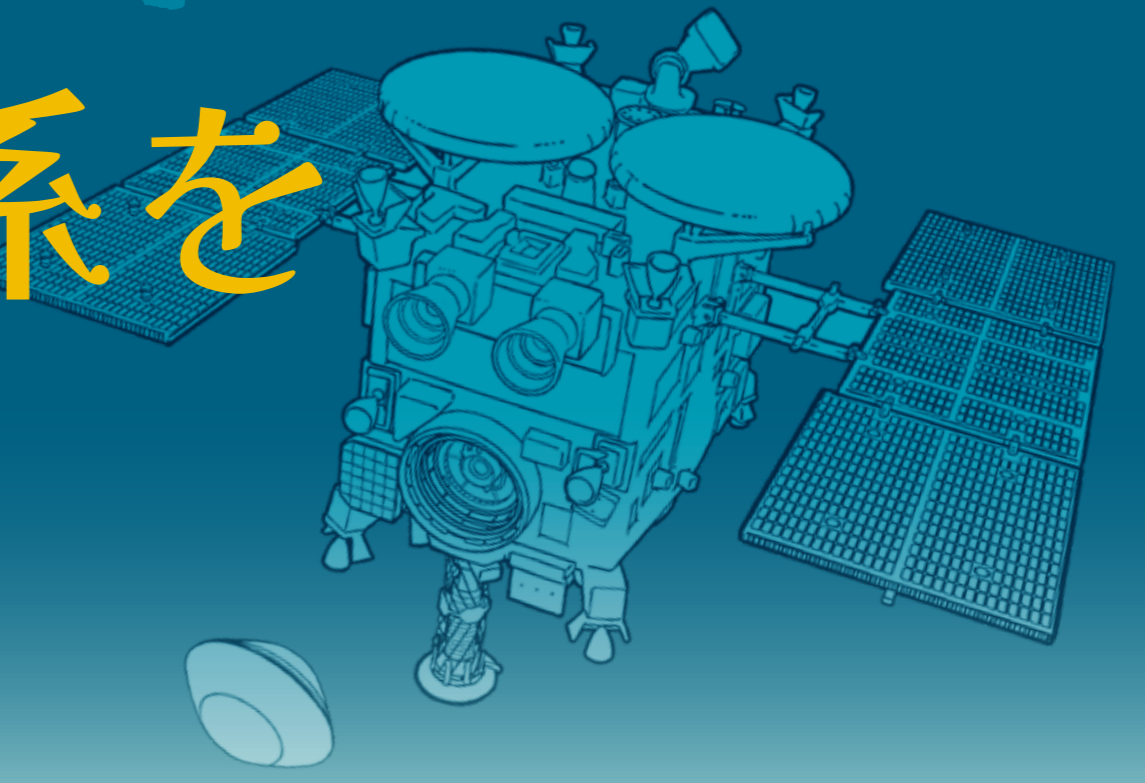


はやぶさ2がC型小惑星の探査にこだわった理由はもう1つ、「小惑星と隕石の関係を明らかにすること」です。隕石とは宇宙から落ちてきた直径1mm以上の石を指し、その起源の大半は小惑星であるとされています。小惑星起源の隕石は、約80%が普通コンドライト、炭素を多く含んだもの(約4%)を炭素質コンドライトに分類し、それぞれ細分類されています。特に炭素質コンドライトは最も太陽系形成時から変化をしていない(始原的な)状態であると考えられています。

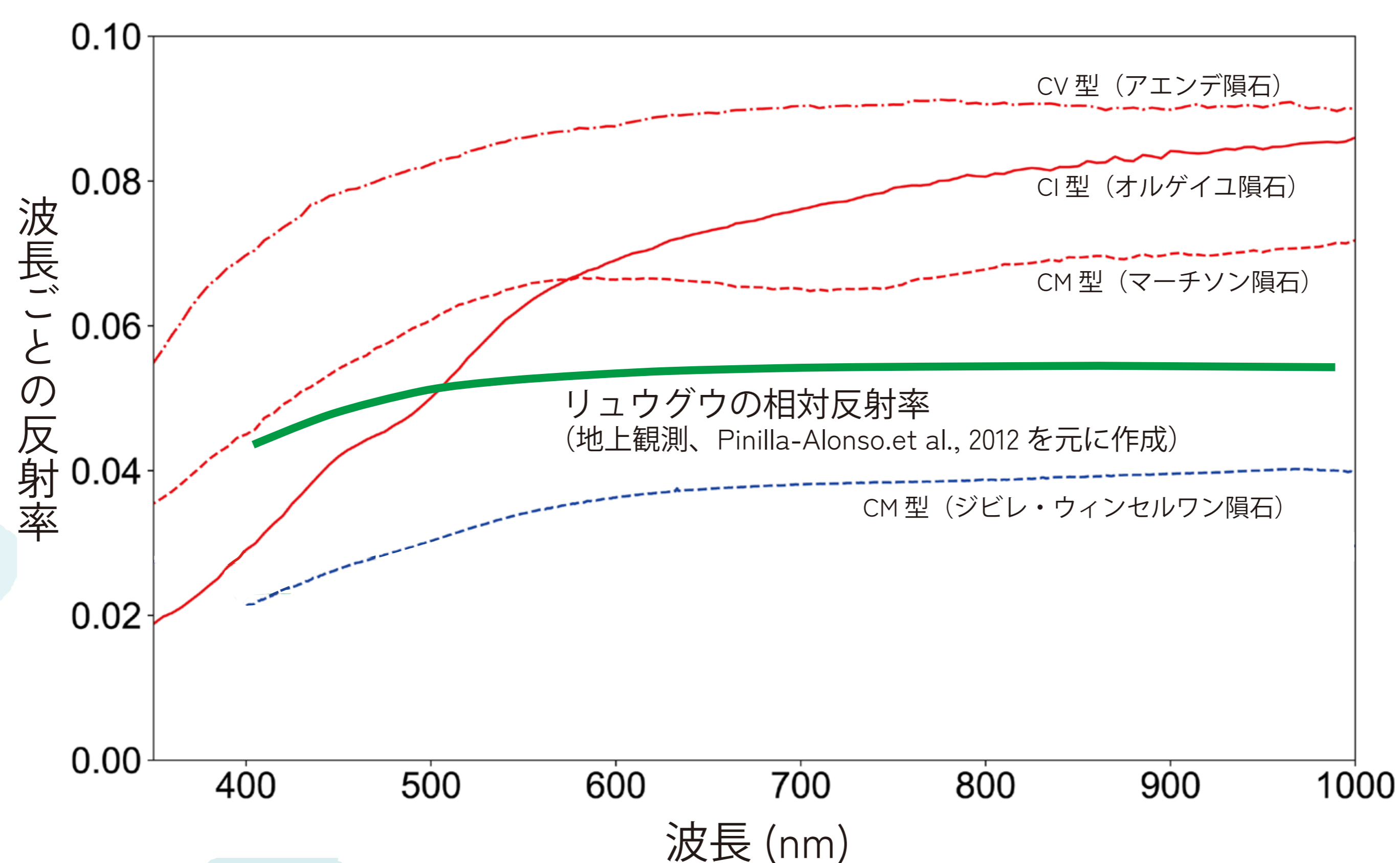


隕石のおおまかな分類

# C型小惑星と隕石の関係を 明らかにしたい！

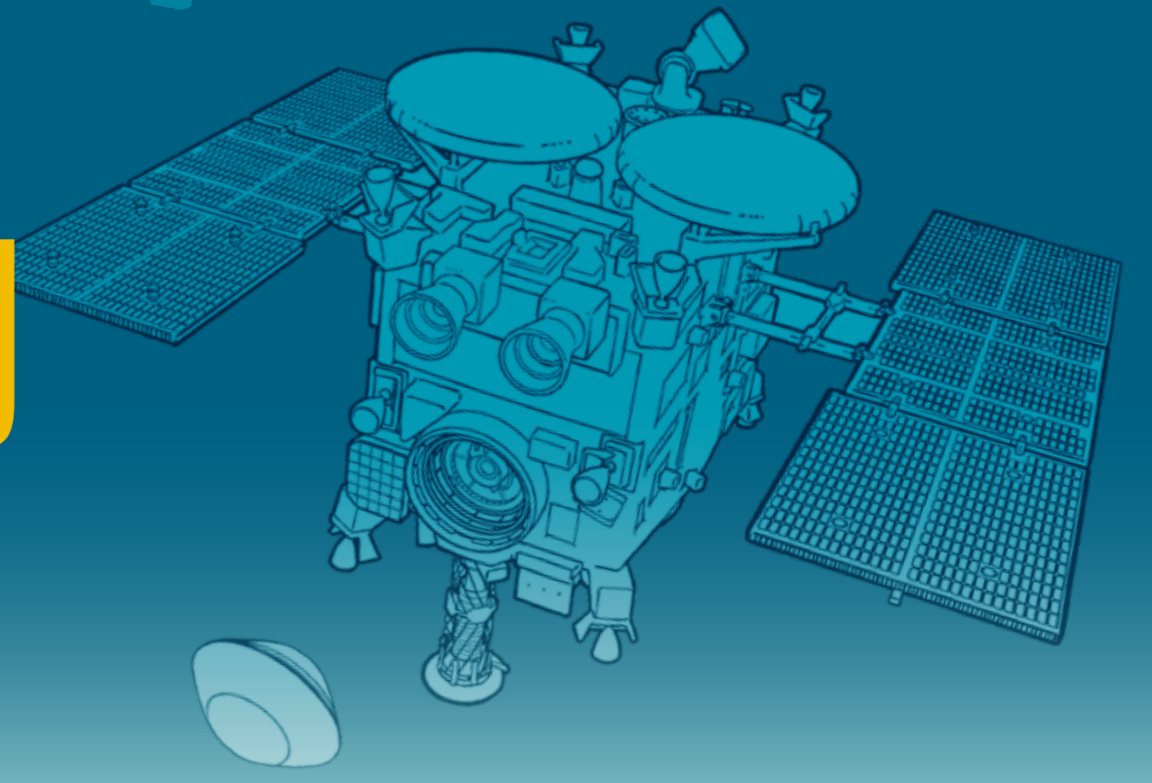


隕石の大半が小惑星起源であると考えられている理由は、小惑星と隕石の反射スペクトルが似ているためです。実際、普通コンドライトのLLタイプに分類される隕石と、はやぶさ初号機がS型小惑星イトカワから採取した試料は、成分等が非常によく一致することが分かっており、普通コンドライト(LL)の起源は、S型小惑星だと考えられています。同様に、炭素質コンドライトはC型小惑星と反射スペクトルが似ています。はやぶさ2の目的は、C型小惑星の物質を持ち帰り、炭素質コンドライトとC型小惑星の関係性を明確にすることでした。そのため、探査可能なC型小惑星であるリュウグウがターゲットに選ばれました。



実験室における炭素質コンドライトの測定データとリュウグウの地上観測スペクトル(©東京大学/JAXAに加筆)

# 帰還カプセルの役割

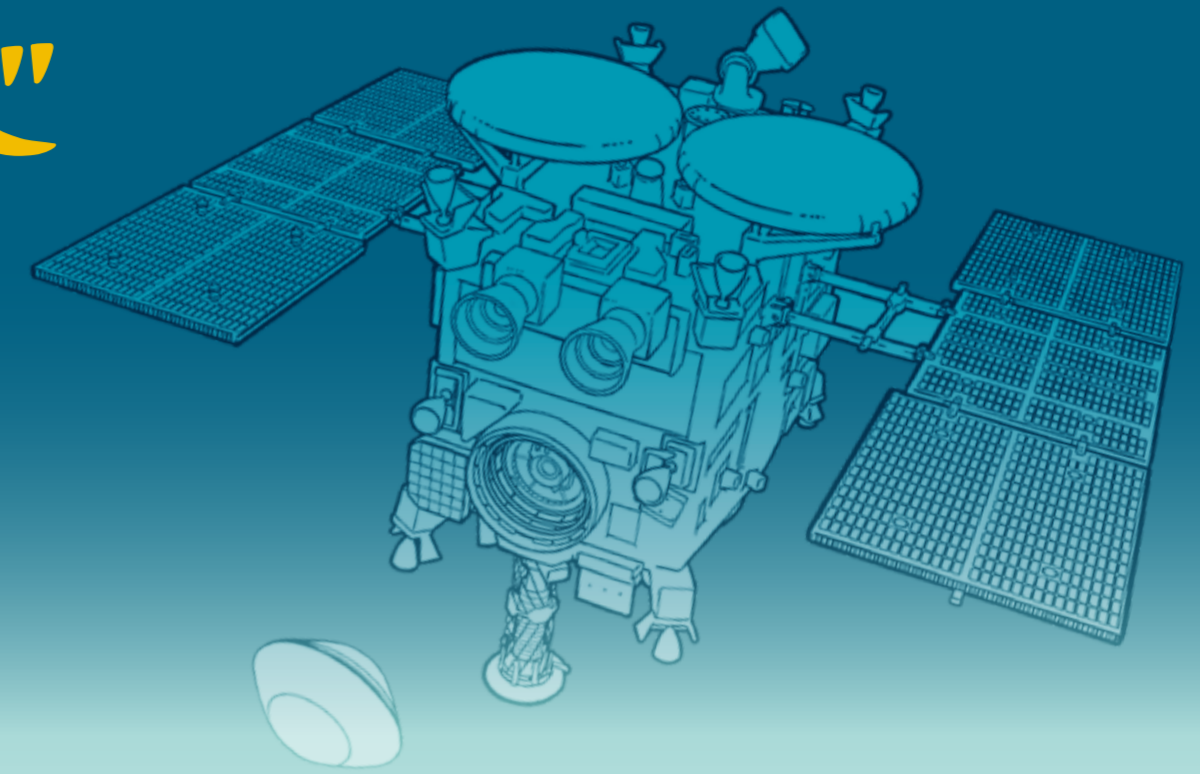


はやぶさ2から分離されたカプセルは、秒速12kmの速さで大気圏に突入します。この時に起こる猛烈な空力加熱から中身のサンプルを守るものがカプセルです。大気圏突入の際に起こる空力加熱という現象は、隕石や流星が地球へ落下する際にも発生します。その結果、隕石は焼け焦げて真っ黒になり、表面が溶けた痕（ようゆう ひ かく 熔融皮殻）があります。色が黒いことと、熔融皮殻があるかないかが、地球上の岩石と隕石との大きな違いであり、見分ける方法の1つです。



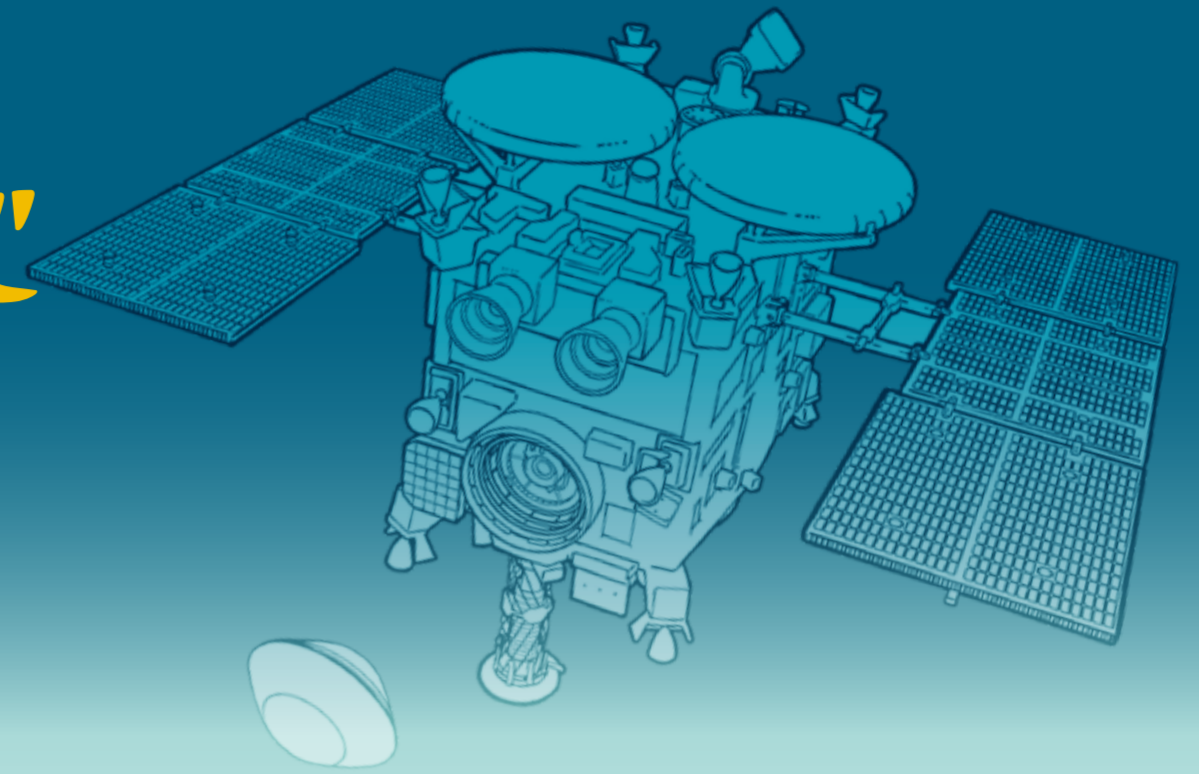
帰還カプセル ©JAXA

# 前面ヒートシールド (レプリカ)



高度10kmのところ、カプセルから前面と背面のヒートシールドが分離します。ヒートシールドは炭素繊維強化プラスチックでできており、地球大気突入時の空力加熱からインストゥルメントモジュールを守りました。突入時の表面温度は3000°Cになるため、焼け焦げて黒くなっています。

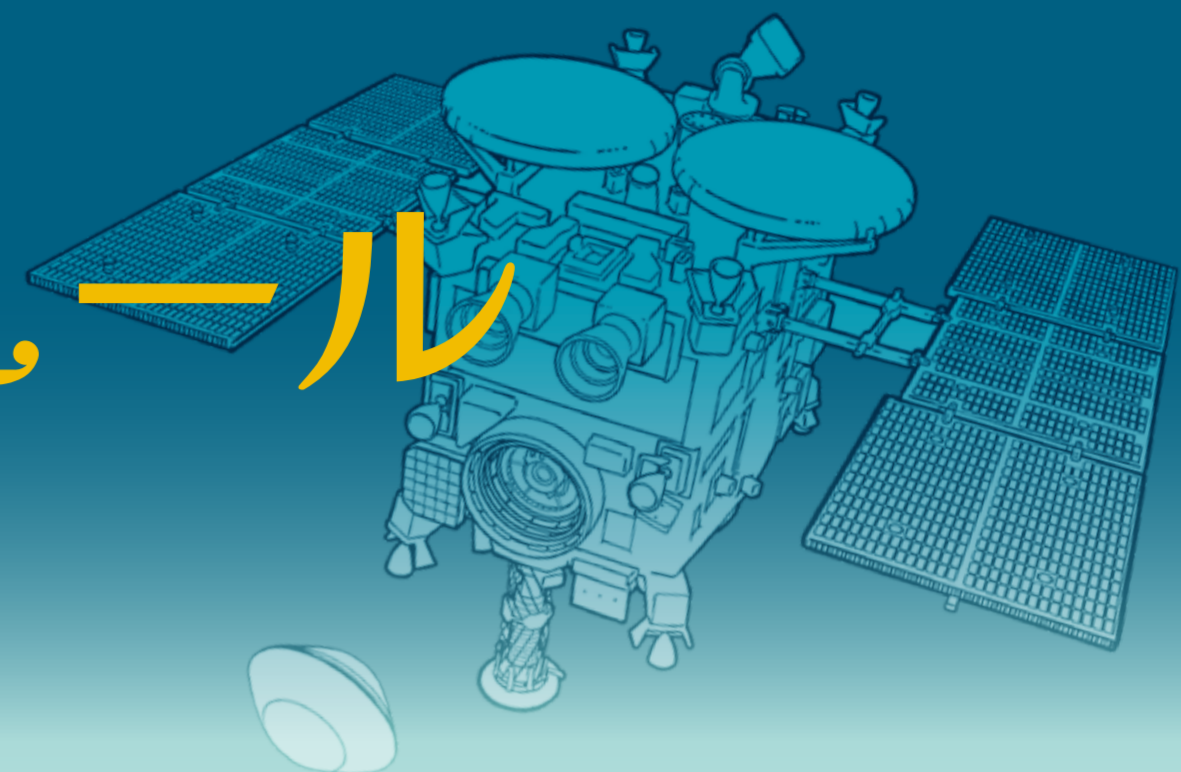
# 背面ヒートシールド



前面ヒートシールドと同じく炭素繊維強化プラスチック製です。前面に比べると少し表面温度が和らぐので、わずかに表面の金色のテープが残っています。帰還カプセルは貝のような構造であるため、前面と背面を結ぶ棒(貝柱)があります。

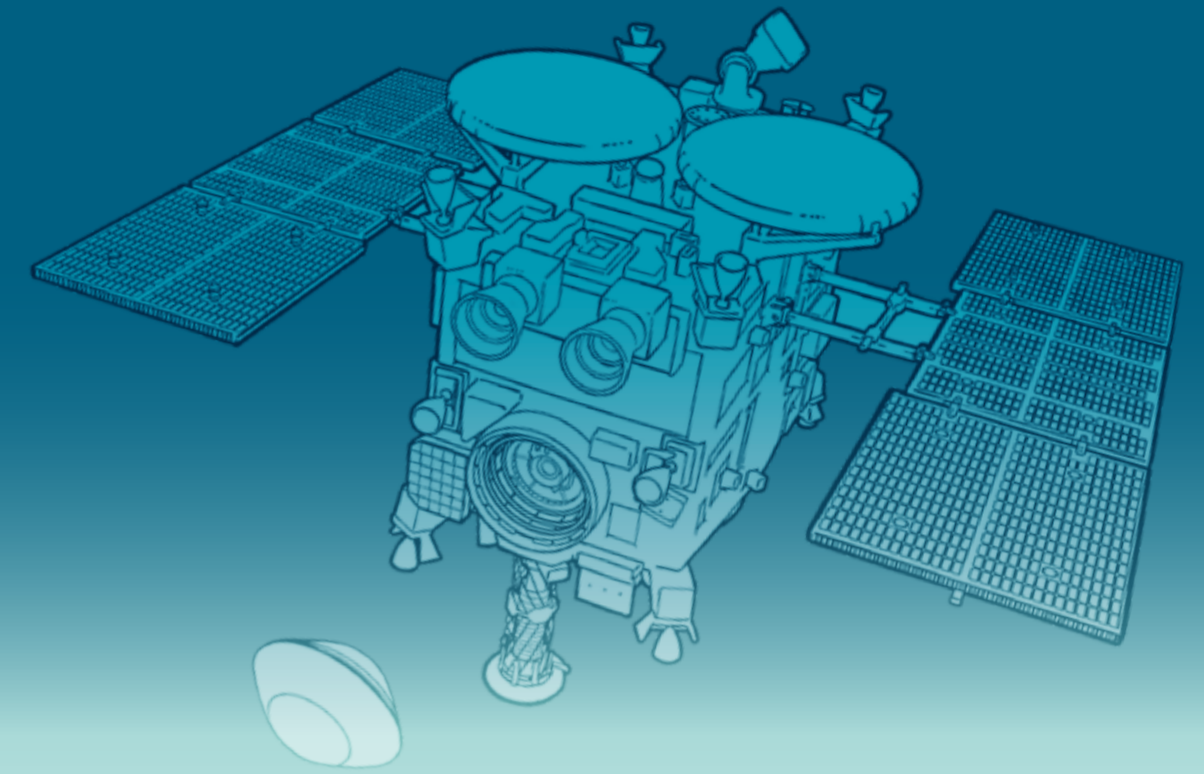


# インストルメントモジュール



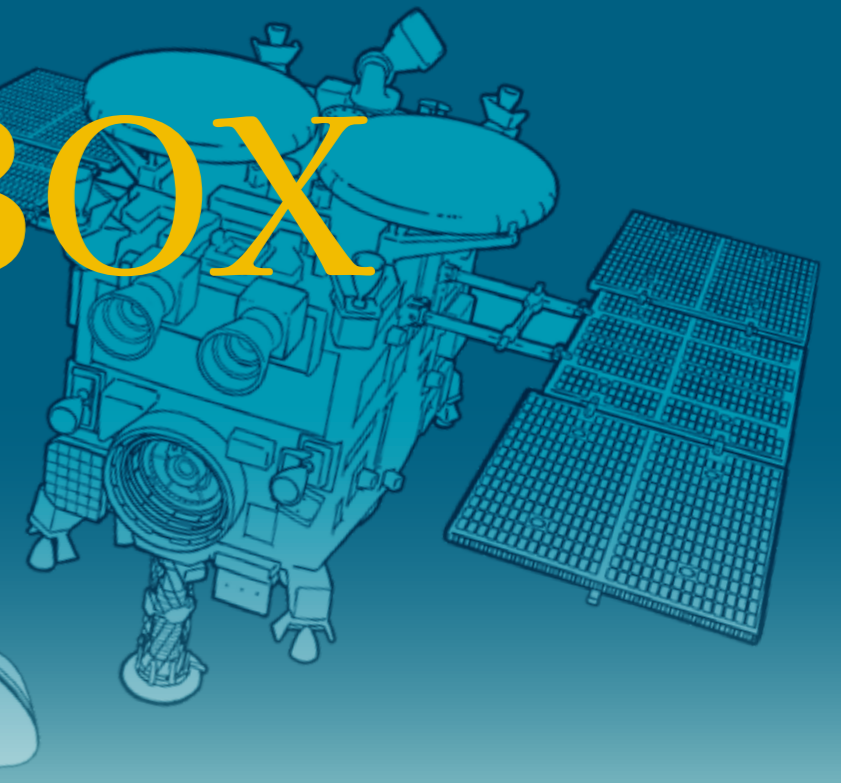
カプセルの本体部分です。リュウグウサンプルを入れておくための円筒状のサンプルコンテナ、ビーコン電波（JAXAがカプセル発見のために使う電波）を発信する搭載電子機器、パラシュートなどが収められています。ビーコン電波を反射してしっかり飛ばすためにお皿のような形をしています。

# 搭載電子機器部



地球からの指令を受け取るなど様々な役割を果たすカプセルの心臓部分であり、頭脳です。レム(REMM)という再突入の際の温度・加速度・姿勢運動を記録する再突入飛行計測モジュールの役割もしています。着地時にカプセルを発見するためのビーコン電波を放出します。真ん中には穴が開いており、ここにサンプルコンテナが入っていました。

# インストゥルメントモジュール輸送BOX サンプルコンテナ輸送BOX



帰還カプセル及びリュウグウのかけらが収められたサンプルコンテナを安全に日本に輸送するための密閉型の輸送BOXです。帰還カプセルは、発見後、本体であるインストゥルメントモジュールを最優先で回収し、Quick Look Facility (QLF) と呼ばれる施設で、リュウグウのかけらが収められたサンプルコンテナが取り出されました。取り出されたサンプルコンテナは、ガス採取装置につなぎ、コンテナ内のガスの簡易分析が行われました。



安全化作業

回収地点周辺土壌の採取



梱包



ヘリコプターによるQLFへの輸送作業



SRC分解と清掃

サンプルコンテナ取り出し作業



サンプルコンテナ内のガス採取



梱包



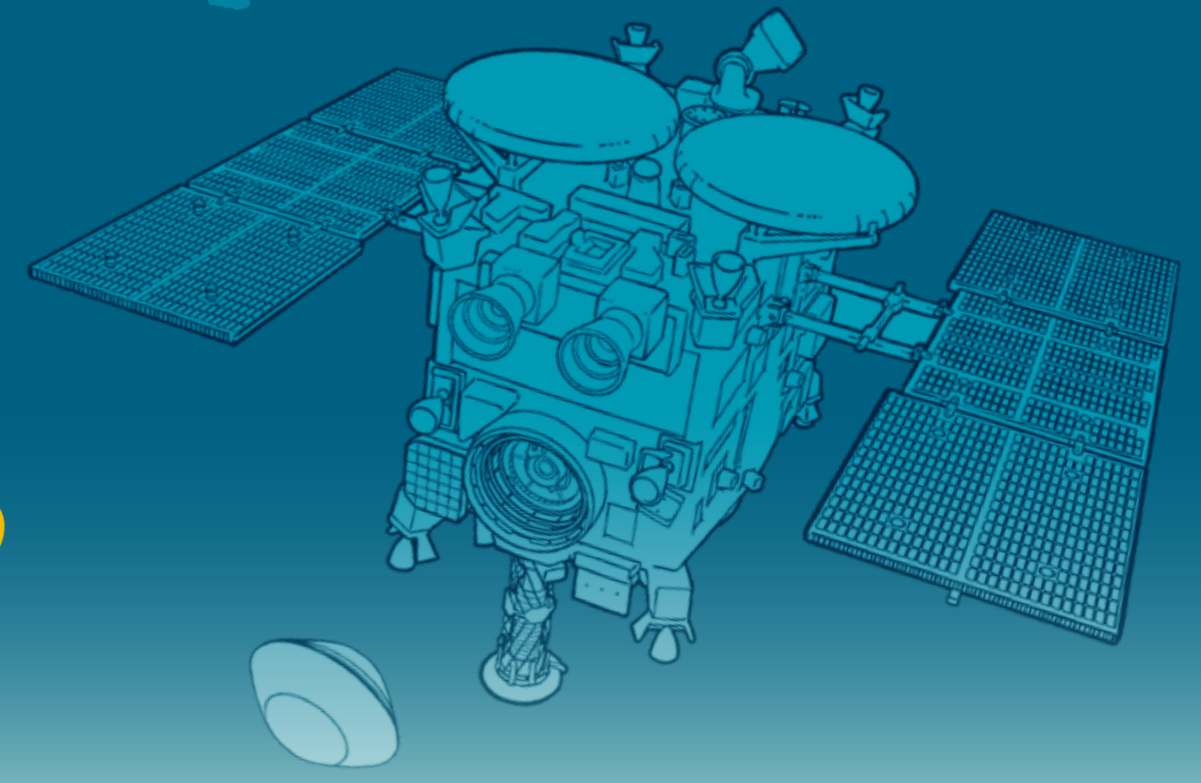
輸送BOXへの収納

検疫

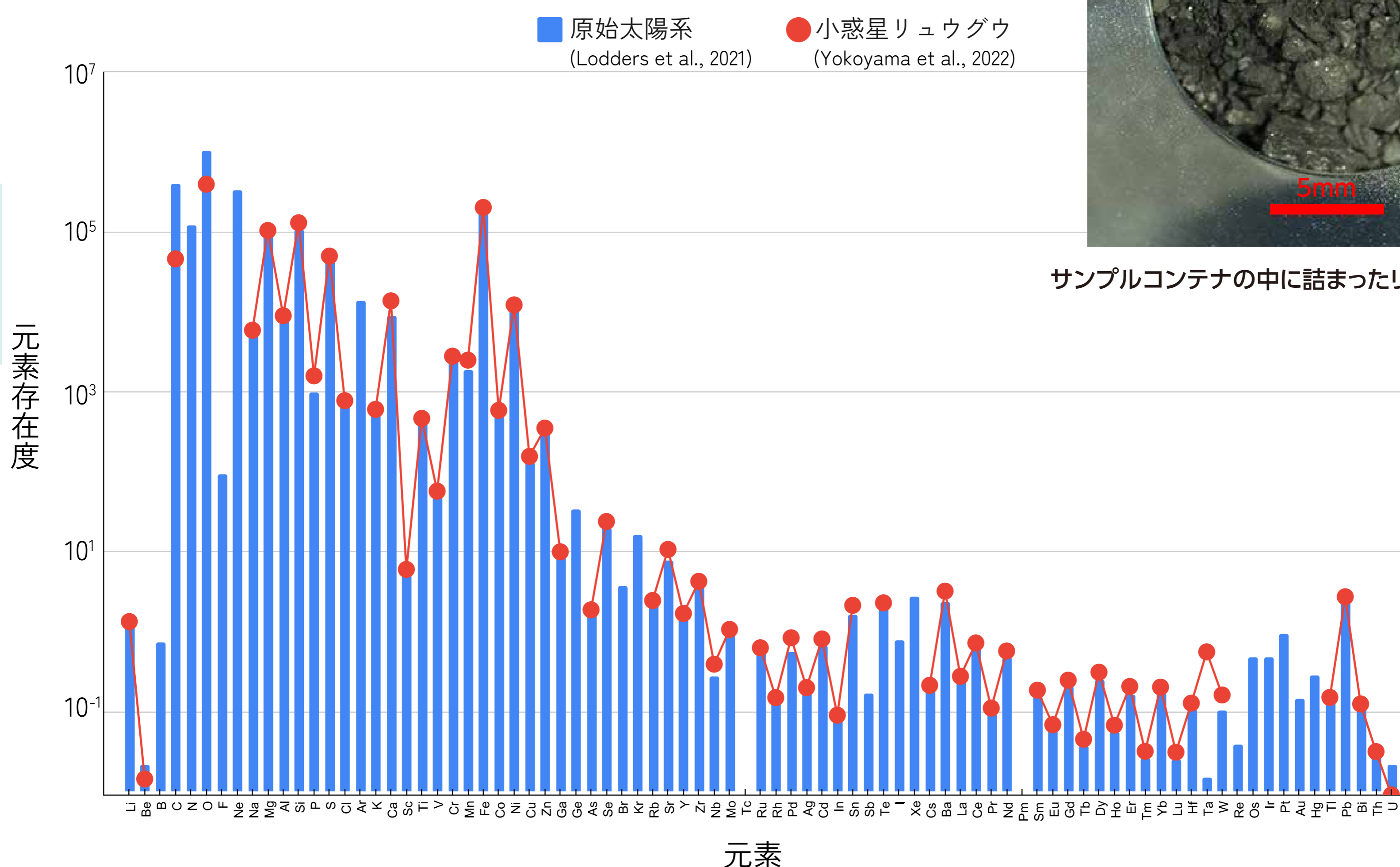


日本への輸送

# 46億年前の物質 リュウグウのかけら



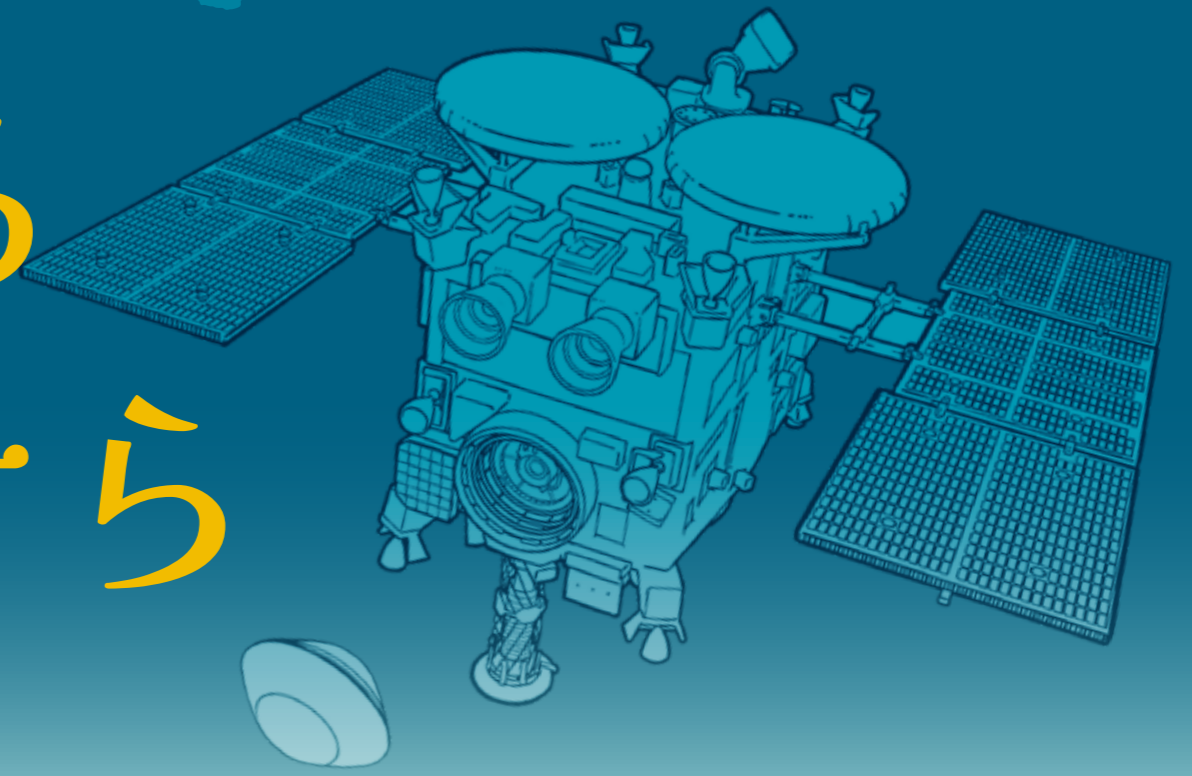
はやぶさ2が成功した2回のタッチダウンのうち、1回目のタッチダウンで採取したリュウグウの実物試料です。初期分析の結果、リュウグウのかけらの元素比率は太陽とほぼ同じであり、隕石の炭素質コンドライトと非常によく似ていることがわかりました。リュウグウは、太陽系形成初期(約46億年前)に誕生してから今まで誕生当時の状態を保っている、非常に始原的な天体であることが証明されました。



サンプルコンテナの中に詰まったリュウグウのかけら ©JAXA

リュウグウ試料の主な元素の存在度

# リュウグウと酷似する オルゲイユ隕石のかけら



オルゲイユ (Orgueil) 隕石は1864年にフランスのオルゲイユに落下した炭素質コンドライトで、その中でもCIタイプに分類されます。CIタイプは、これまでに回収された数万個の隕石の中でも、わずか9例しかなく、

- ① 太陽と成分が非常に似ている
- ② 岩石中に水を豊富に含んでいる
- ③ 様々なアミノ酸などの有機物を豊富に含んでいる

といった特徴があります。これらの特徴はリュウグウのかけらの初期分析結果でも示されており、炭素質コンドライト (CI) の起源が、リュウグウのようなC型小惑星にあることは、ほぼ確実であると考えられます。

