

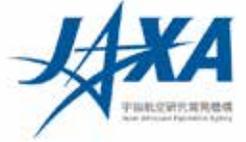
# 小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2021年4月27日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



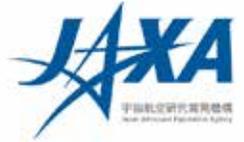
# 本日の内容



キュレーションにおけるリュウグウ試料の分光観測結果と科学成果の紹介、および探査機の様況について報告する。



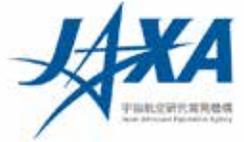
# 目次



1. プロジェクトの現状概要
2. リュウグウ試料の分光観測結果
3. 科学成果：リュウグウ上の含水鉱物分布
4. 科学成果：地上望遠鏡による偏光観測
5. 探査機の様況
6. 今後の予定



# 1. プロジェクトの現状概要



## ■ 探査機運用

- 探査機は、定常運用継続中であり、拡張ミッションの目的地へ向けて順調に航行している。今後のイオンエンジン運転の計画を再検討し、運転開始を5月末に変更した。

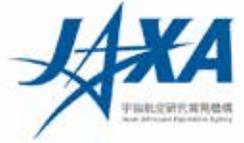
## ■ キュレーション作業

- 引き続き、リュウグウより帰還した粒子・バルク集合体試料の高精細な光学顕微鏡画像の取得を進めている。
- 観察の結果、帰還試料より、リュウグウ母天体における水の存在を示す含水鉱物・炭酸塩鉱物の特徴が観測された(詳細は、次頁以降)。



## 2. リュウグウ試料の分光観測結果

### 2. Spectral Profiles of Ryugu Return Sample

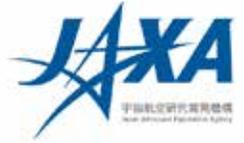


- 2021年1月より帰還サンプルの非破壊・非汚染での初期記載の一環としてバルク試料の分光観測を開始 / Spectroscopy of bulk return sample has started as an initial description under non-destructive and non-contaminated conditions since January 2021
- FTIR(連続赤外分光)及びMicrOmega(赤外分光顕微鏡)で測定 / Performed with FTIR (NIR continuous spectroscopy) and MicrOmega (NIR hyperspectral microscopy).
- 共通する特徴 / The same features are found in both spectral profiles
  - 2.7 $\mu\text{m}$ 付近の吸収 → 水に関連する特徴(NIRS3でも観測された特徴)  
2.7 $\mu\text{m}$  absorption, related to water (-OH), the similar feature observed in NIRS3 spectrum
  - 3.4 $\mu\text{m}$ 付近の吸収 → 有機物(-CH)や炭酸塩(-CO<sub>3</sub>)などに関連する特徴  
3.4  $\mu\text{m}$  absorption, related to organics (-CH) and/or carbonate (-CO<sub>3</sub>)
- リュウグウからの帰還試料である確たる証拠 / These features are the evidence that the return sample is originated from Ryugu.
- 水や炭素を含む始原的物質であることを示唆(⇒今後の高精度・高解像度分析に期待) / Indicating primitive sample in the solar system, containing water or carbon related materials (waiting for in-depth analyses with higher accuracy and resolution)

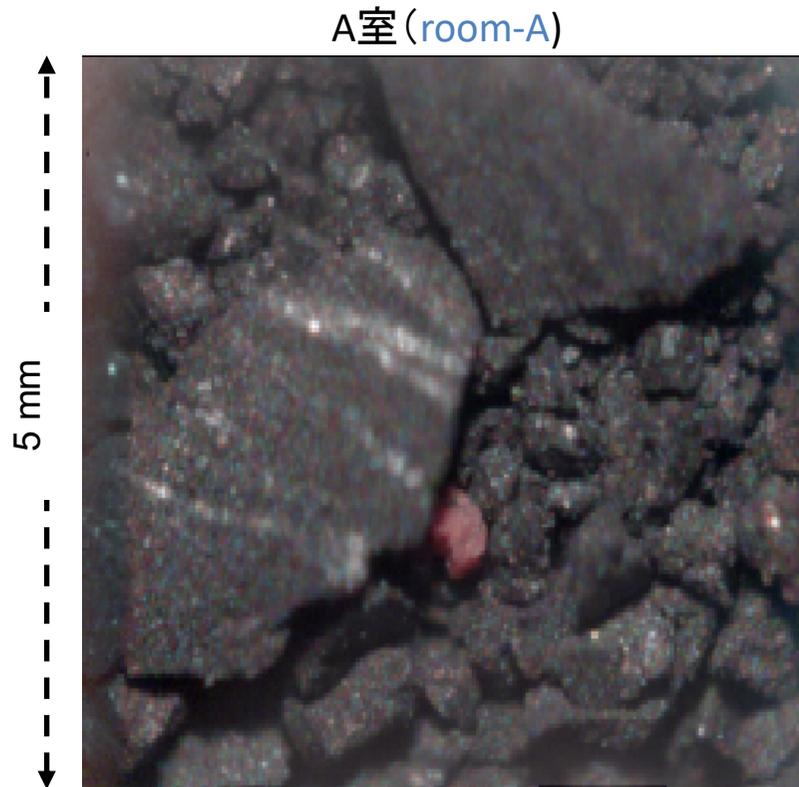


## 2. リュウグウ試料の分光観測結果

### 2. Spectral Profiles of Ryugu Return Sample



- 分光スペクトルの例 (FTIR & MicrOmega) / Examples of spectra
  - 2.7 $\mu\text{m}$ や3.4 $\mu\text{m}$ 付近に吸収がみられる / absorption features at 2.7 and 3.4  $\mu\text{m}$



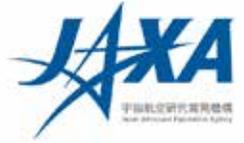
特定波長を選択して結像した顕微赤外像  
(赤色粒子) OH基の多い粒子

Wavelength-selected image enhance (few) grains  
with specific composition, within bulk material.  
[Red] : OH-enriched grain



## 2. リュウグウ試料の分光観測結果

### 2. Spectral Profiles of Ryugu Return Sample



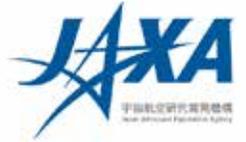
- MicrOmegaによる3Dモデル(Movie) / 3D movie by MicrOmega
  - 1mm以下の構造も観察可能 / Observation down to sub-mm scale structures
  - 別の組成の破片が含まれる / Identification of different compositional materials



特殊な組成の粒子を強調した3D画像:  
(赤色粒子) OH基の多い粒子  
3D image emphasizing the presence of  
few grains with specific composition:  
[Red] A largely OH-enriched grain



### 3. 科学成果:リュウグウ上の含水鉱物分布



## 概要

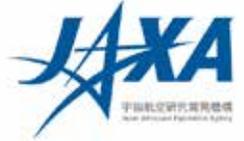
光学航法カメラONC-Tによって得られた含水鉱物吸収 ( $0.7 \mu\text{m}$ 帯)の分布。打上げ前に取得した試験データにリュウグウ到着後に得られたデータを組み合わせて精度を向上。試料を採取した低緯度域で、 $0.7 \mu\text{m}$ 吸収が強いことを確認。

2021年5月15日出版予定のICARUS誌にて報告

(2021年1月29日にオンライン公開) <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114348>

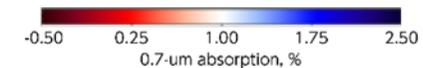
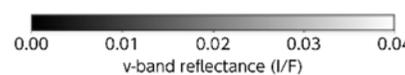
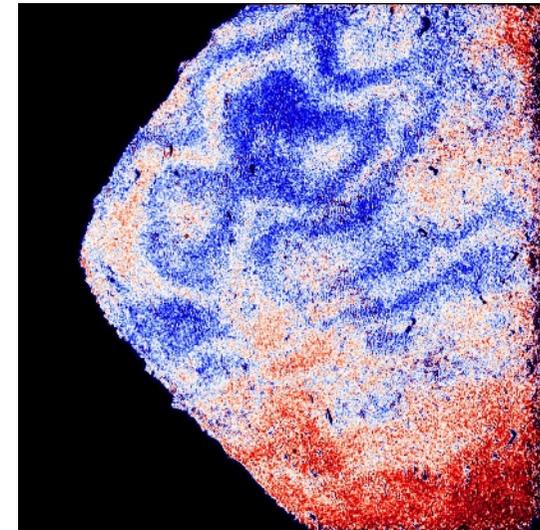
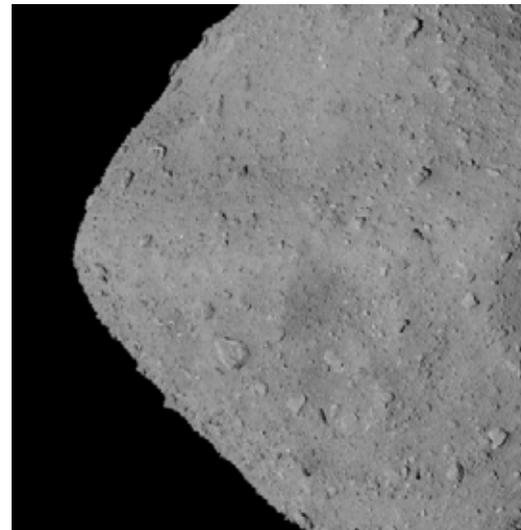
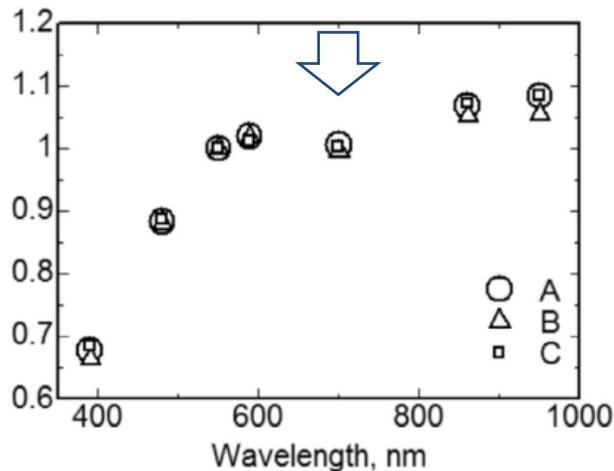


### 3. 科学成果:リュウグウ上の含水鉱物分布



0.7  $\mu$ m 吸収 (約3-4%)  
含水鉱物の存在を示す  
高温で消失

ONC-Tの持つ7枚のフィルタのうち0.55  $\mu$ m, 0.7  $\mu$ m, 0.86  $\mu$ mを使い、  
0.55  $\mu$ mと0.86  $\mu$ mに対する0.7  $\mu$ mの反射率から吸収量を測定



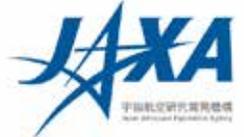
打ち上げ前にONC-Tで測定した含水鉱物(0.7  $\mu$ m)吸収(Murchison隕石)  
Kameda et al. (2015) から一部改変

Kameda et al. (2021)

右図の青い部分が吸収の強い部分  
平均1%程度、地域差は0.5%程度と弱いものの吸収を検出した・・・??



### 3. 科学成果:リュウグウ上の含水鉱物分布

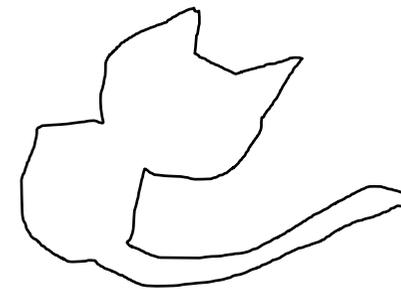
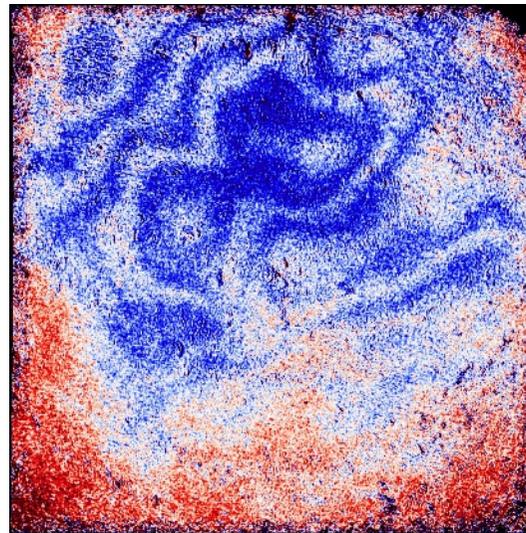
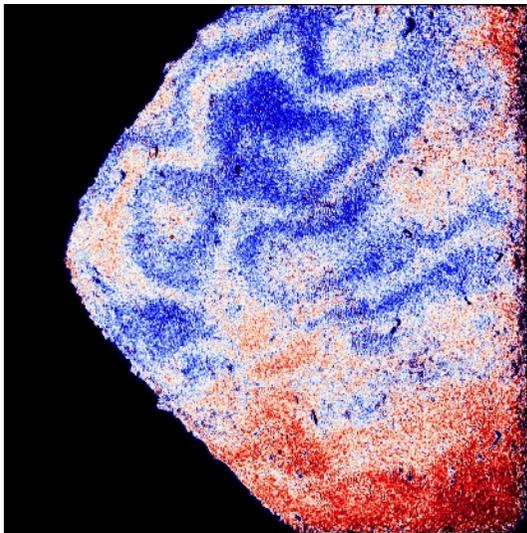


全く別の場所を取った時にも同じような分布が得られた！  
ということは、、、装置の特性としてこのような模様が見えてしまっている。。。  
もともと3-4%の吸収を検出するために、想定していた精度は1%程度。検出器に0.5%程度の感度ムラが出ていたことが原因

打上げ前の感度分布(感度ムラの補正用データ)は室温で取得されており、リュウグウ観測時の検出器温度は低温だった

温度変化によって画像全体の感度の平均値が異なることは試験でも確認していたが、試験設備、時間の制約から一部の領域のみのデータに限られていた  
常温での感度分布と低温での検出面上での感度分布がわずかに異なることが分かった

打上げ前に用意しておいたONCと同じセンサを使った装置でも同様の現象を確認した。

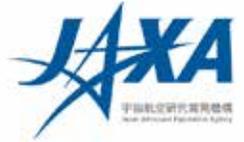


研究チームでは「ネコ模様」と呼んでいました

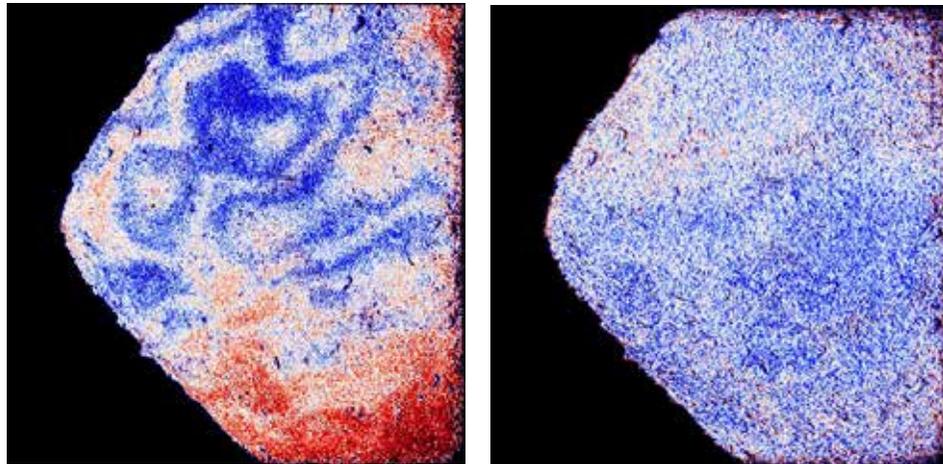
Kameda et al. (2021)



### 3. 科学成果:リュウグウ上の含水鉱物分布

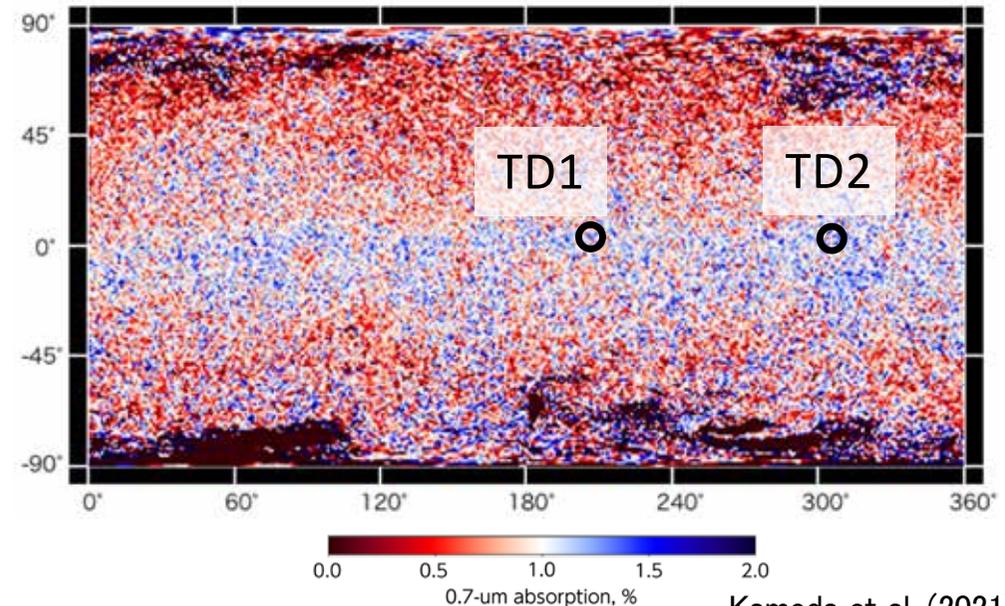


リュウグウで取得した多数の画像データ288枚を使い、  
低温での感度分布データを生成→再補正  
感度ムラの補正精度が2-3倍程度向上し  
0.7  $\mu$ m吸収の0.1-0.2%の地域差を確認



補正に成功！(ネコ模様が消失)  
0.7  $\mu$ m吸収分布が見えてきた

Kameda et al. (2021)

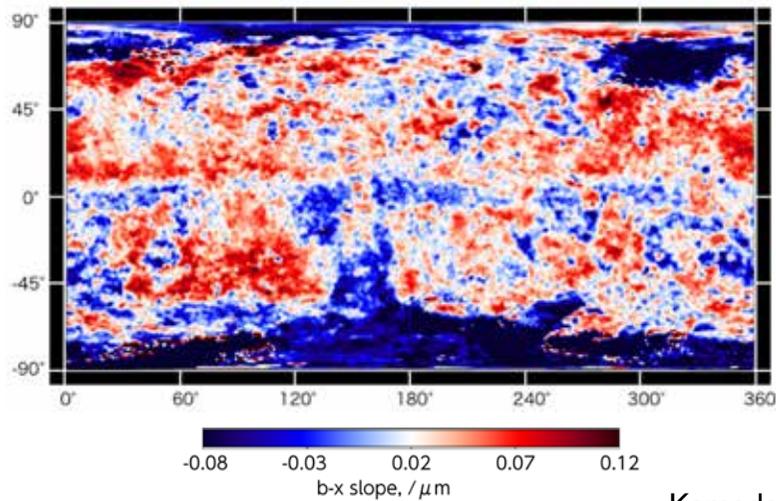
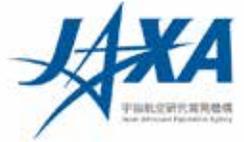


Kameda et al. (2021)  
(一部改変)

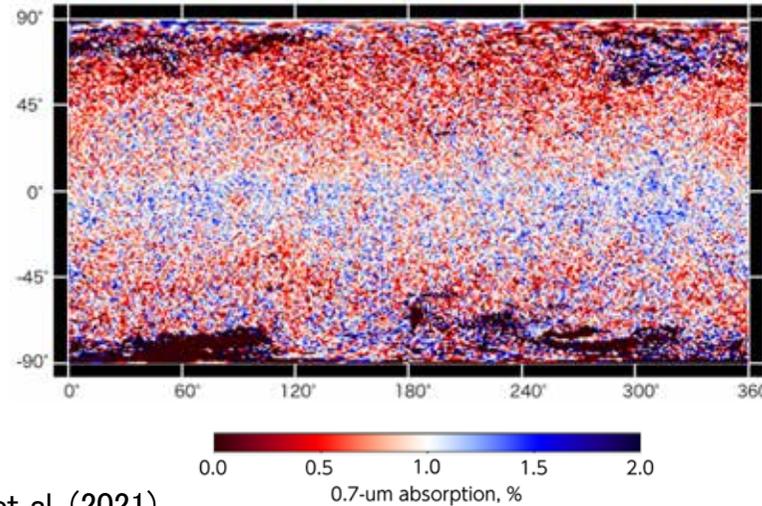
低緯度域では全体平均より0.7  $\mu$ m 吸収がやや強い  
サンプルはこの低緯度域で取得されている(黒円)ため、リュウ  
グウの表面の中でも含水鉱物が多い方の場所で試料を採  
取できた可能性がある。



### 3. 科学成果:リュウグウ上の含水鉱物分布



Kameda et al. (2021)



本研究の成果を生かし、火星衛星探査機MMX搭載カメラの開発、観測計画を検討中

リュウグウは見た目はほぼ単色の黒い天体であるものの、わずかに青い領域や、わずかに赤い領域があり、青い領域で0.7  $\mu\text{m}$ 吸収が強い傾向がある。(上左図は青赤を強調表示したもの)

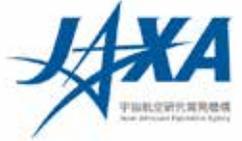
→青い領域は新鮮で、高温にさらされていない含水鉱物の吸収が見られる

→これまでの結果とも整合(Morota et al., 2020他)





# 4. 科学成果：地上望遠鏡による偏光観測



## 概要：

2020年9月-12月に、国内外4施設(図4-1)において、小惑星リュウグウの偏光観測を実施したところ、リュウグウの偏光度が、太陽系小天体としては観測史上最大となる高い値を示すことが分かった(図4-2)。この偏光度はリュウグウ表層にある石や砂の鉱物組成や粒のサイズなど、特徴的な表層の状態を反映すると考えられる。

リュウグウは、探査前の地上・宇宙望遠鏡による観測や、「はやぶさ2」探査機による調査が網羅的に行われたが、偏光度の測定は行われておらず、他に替えがない唯一の観測だった。また、今回の観測結果は、「はやぶさ2」が持ち帰ったサンプルの偏光度測定と比較することができる点で、科学的に非常に重要である。このような偏光度の最大値と天体のサンプルが入手できたのは、月に続き2例目。

この研究成果は、2021年4月20日付けの米国科学雑誌「The Astrophysical Journal Letters」に掲載された([DOI: 10.3847/2041-8213/abee25](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abee25))。



図4-1 本観測で使用した望遠鏡および装置(画像クレジットは()内の各大学)  
左からかなた望遠鏡+可視赤外線同時カメラHONIR(広島大学)、なゆた望遠鏡+広視野グリズム分光撮像装置WFGS2(兵庫県立大学)、ピリカ望遠鏡+可視マルチスペクトル撮像装置MSI(北海道大学)、普賢山天文台1.8m望遠鏡+3色撮像装置TRIPOL#3(ソウル大学)

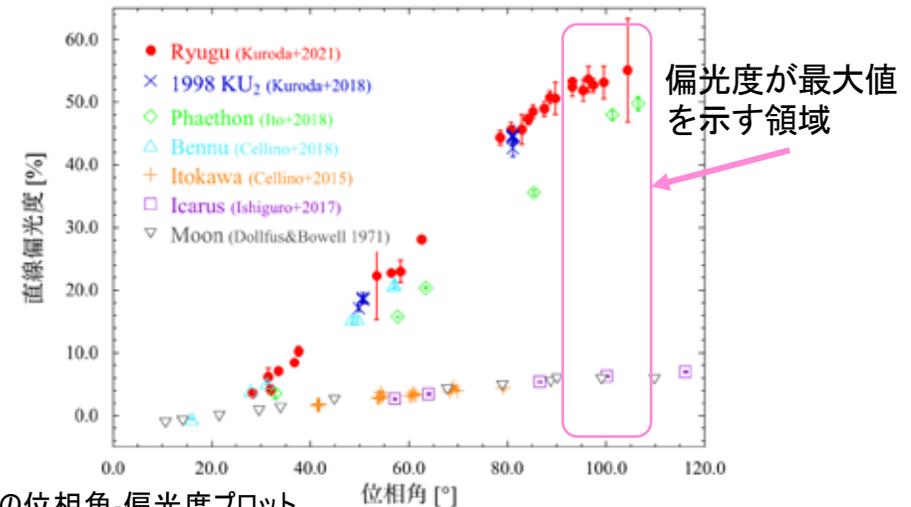
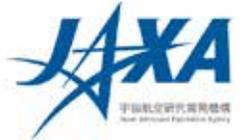


図4-2 小惑星の位相角-偏光度プロット  
赤丸が、リュウグウの偏光度を示す(画像クレジット: 京都大学)



# 4. 科学成果：地上望遠鏡による偏光観測



## 背景

### ○偏光度とは？

光源となる太陽光(様々な方向に振動 = 無偏光)

→ 物体に当たって反射や散乱すると、振動の方向に強弱(偏り)ができる。

この強弱の程度が偏光度で、物質の種類、形状、大きさに依存した値を示す。

偏光サングラスは、散乱光が一方向に偏光する性質を利用している。

偏光度を用いた画像診断は、地上の災害監視や土地利用といった調査で実用化が進んでいる(JAXA, NICT)。

### ○太陽系小天体の偏光度を調査する目的

位相角(図4-3)が変わると、偏光度も増減する。

偏光度の変化の特徴(最大値や傾向)から、表層の物理状態を特定する狙い。

#### ・ 偏光度が低い天体

月(20世紀後半に観測、サンプルを用いた測定)

小惑星Itokawa(「はやぶさ」の探査天体)など

#### ・ 偏光度が高い天体(>40%)

この数年に小惑星1998 KU<sub>2</sub>とPhaethon(「DESTINY+」の探査予定天体)など

表層の情報不足で、偏光度が高い要因が特定できない

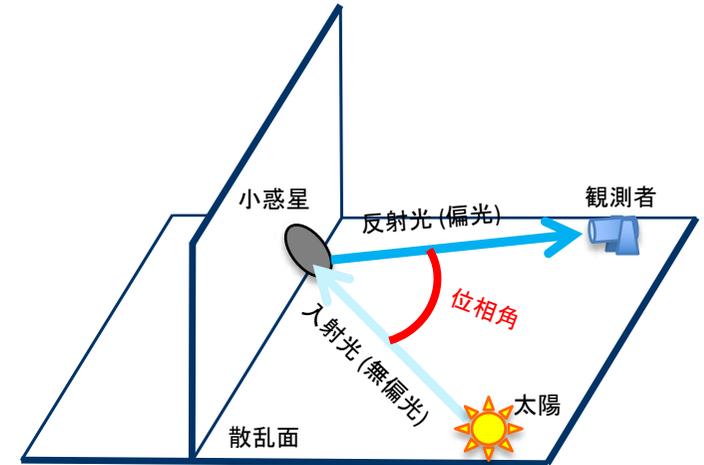


図4-3

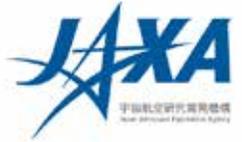
位相角の説明図(画像クレジット: 京都大学)

位相角は、太陽-小惑星-観測者のなす角度のことで、日々変化する。地上から位相角が大きい領域を観測可能なのは、一部の小天体(地球近傍小惑星や彗星)に限られる。

偏光度がどのような物理量によるのか特定するためには、表層状態がよく調査されたリュウグウが最適なターゲットであった



## 4. 科学成果：地上望遠鏡による偏光観測



本研究の成果：

- ・小惑星リュウグウは最大53%の高い偏光度を示す → 太陽系小天体の史上最大値を更新  
天体全体の偏光度なので、特殊な表層が広域に存在すると考えられる。
- ・偏光度が示唆するリュウグウ表層の特徴  
いくつかの隕石の偏光度との比較から、サブミリメートルサイズの粒子の寄与を推定した。
  - (1) 表層の大部分にサブミリメートルサイズの砂粒が存在する可能性
  - (2) サブミリメートルサイズの粒子が集まり、より大きな石を構成しているという可能性小型着陸機MASCOTが撮像した表層画像(図4-4)では、暗いカリフラワー状の組織を持つ岩が多く写っており、本研究と調和的なのは後者である。



図4-4  
MASCOTが撮影したリュウグウ表層の画像(画像クレジット：MASCOT/DLR/JAXA)

今後の展望：

持ち帰ったサンプルを用いた偏光度測定を行えば、粒子サイズや粗さなど表層構造の偏光度に与える影響が解明できる。  
また、サンプル取得の際に失われてしまったリュウグウの表層構造の再現も期待できる。

このような偏光度を用いた表層状態の調査が実証され、探査に頼らずに天体表面状態の推定ができるようになると、  
数多くの天体進化の履歴を追跡できるようになり、太陽系の起源と進化の解明に大きく貢献する。

共同研究者：黒田大介(京都大学), Jooyeon Geem, Sunho Jin, Yoonsoo P. Bach, Jinguk Seo, 石黒正晃(ソウル大学), 秋田谷洋(千葉工業大学/広島大学), 高橋隼, 川上碧, 戸塚都(兵庫県立大学), 高橋昂希, 関口朋彦(北海道教育大学), 内藤博之(なよろ市立天文台), 牧野可奈(名寄市立大学), 佐藤修二(名古屋大学), 笹子宏史(株式会社ささご), 川端弘治(広島大学), 渡邊誠(岡山理科大学), 高木聖子, 倉本圭(北海道大学), 吉川真, 長谷川直(JAXA)

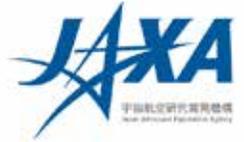


## 5. 探査機の状況

- 地球帰還後、分離カメラ制御部 (CAM-C) が故障した。
  - 放射線による劣化と考えられ、正常に起動せず、撮影もできない状況。
  - 原因調査と復旧可能性の検討を行ってきたが、プロジェクトとして故障と判断した。
  - これにより、CAM-Hでの撮影が出来なくなった。CAM-Hはタッチダウンその瞬間の撮像という役割を十分に果たしてくれた。
- 探査機各部の劣化について
  - 化学推進系スラスタ噴射部を保温するヒータでも一部故障が発生しているが、バックアップ手段により回復できており、省力運転で目標天体へ向けて引き続き運用を続ける。
  - 探査機は設計寿命をすぎており、劣化状況を蓄積・経験するのが「拡張ミッション」の一つの目標となっている。ひきつづき、貴重な深宇宙航行の機会を有効に活用する。



## 5. 探査機の状況



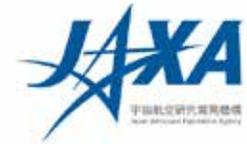
【2019.10.16 に撮像したCAM-H画像】  
結果として、これがCAM-Hで撮像した最後の画像となりました。

CAM-Hは、「はやぶさ2」を代表する大きな成果のひとつとなりました。CAM-Hは皆様からの寄附金により実現しました。ご支援いただきました皆様に、心より御礼申し上げますとともに、この素晴らしい達成感を共有したいと思います。

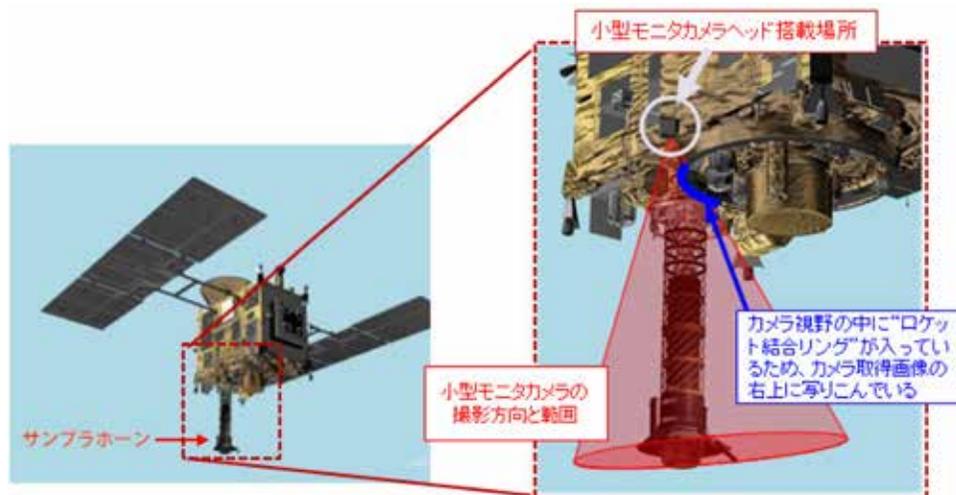
(画像クレジット: JAXA)



# (参考)分離カメラ制御部(CAM-C)と関連機器



分離カメラ制御部(CAM-C)は、分離カメラ(DCAM3)およびサンプラーホーンモニターカメラ(CAM-H)の制御を司る機器。探査機内部に搭載されている。DCAM3はリュウグウにて2019年4月5日に分離済み。



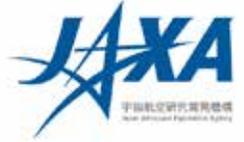
サンプラーホーンモニターカメラ(小型モニタカメラヘッド CAM-H)の搭載箇所, 視野方向

サンプラーホーンモニターカメラ  
(小型モニタカメラヘッド CAM-H)

(画像クレジット: JAXA)



# (参考)CAM-Hが撮影した代表的な画像



2014年12月5日  
サンプラーホーン伸展時の画像



2018年10月25日  
タッチダウン1リハーサル3 (TD1-R3)



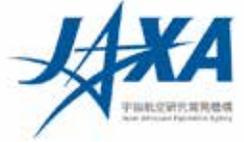
2019年2月22日  
第1回タッチダウン時の画像



2019年7月11日  
第2回タッチダウン時の画像



(画像クレジット: JAXA)



## 6. 今後の予定

### ■運用の予定

2021年4月～ 定常運用を継続  
5月末からイオンエンジン運転開始予定  
(前回報告した予定を変更)

### ■カプセル巡回展示の公募

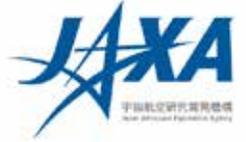
各地での公募巡回展示を8月以降開始する予定であり、展示先の募集を開始いたします。

- 募集開始: 4月27日(火)
- 募集締切: 5月21日(金)
- 結果通知: 6月18日(金)

詳しくは募集要項をご覧ください。

### ■記者説明会等

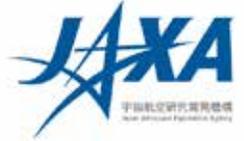
2021年5月TBD 記者説明会



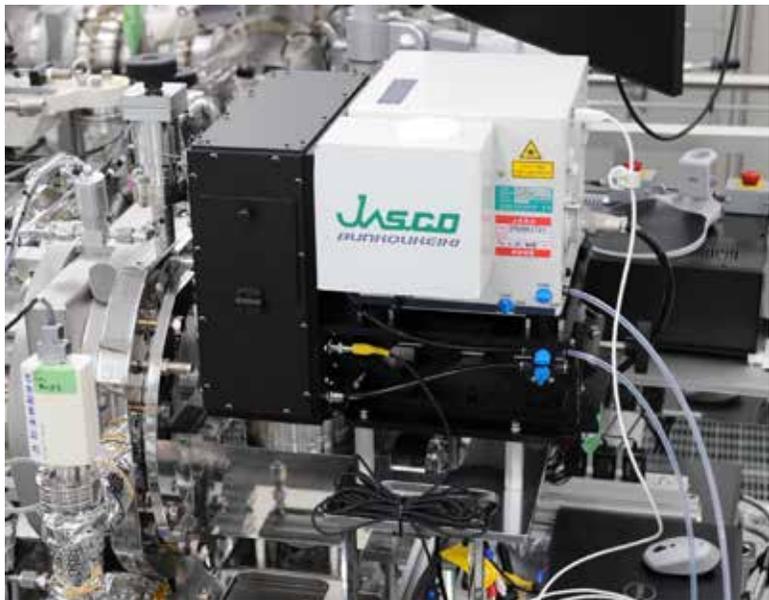
# 参考資料



# FTIR(フーリエ変換型赤外分光測定装置)



- 波長: 1 ~ 4 $\mu$ mの連続分光
- スポット径: 1 ~ 6mm

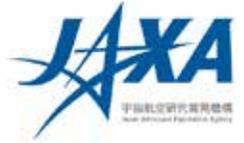


(画像クレジット: JAXA)



# マイクロオメガ(赤外分光顕微鏡)

## MicrOmega (Near-Infrared Hyperspectral Microscope)



近赤外分光による非汚染・非破壊でのサンプル初期記載

NIR spectroscopy for non-contaminated/non-destructive description of return sample

- 波長約0.99~3.65 $\mu\text{m}$ の連続分光  
wavelength range: 0.99–3.65  $\mu\text{m}$
- 解像度22 $\mu\text{m}$ /pixel  
spatial resolution: 22 $\mu\text{m}$ /pixel
- 測定領域5x5mm  
observation area: 5x5mm
- 小型着陸機MASCOTにも搭載  
mounted on a small lander MASCOT
- 日仏協力によって導入  
JAXA–CNES intl. collaboration
- 装置開発は仏宇宙天体物理学研究所  
developed by IAS

(画像クレジット: JAXA)

