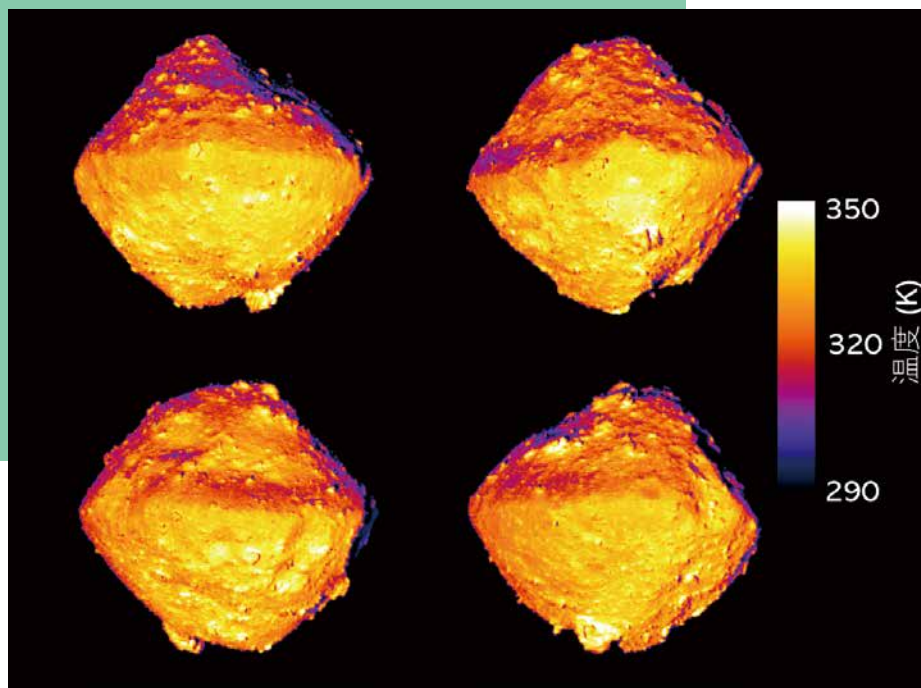


「はやぶさ2」中間赤外カメラTIRによるリュウグウの赤外画像の例

取得日は2018年8月1日で、太陽距離は約1.06天文単位、高度約5kmからの撮像。表面のクレーターや大きなボルダーなどが温度の濃淡として確認できる。また、各画像の右側には夜になりかけている部分が存在し、温度が低くなっている様子が見られる。画像の上方向がリュウグウの北方向に対応し、このときは南側から太陽が当たる条件であったため、北半球よりも南半球の方が温度が高い。



The Forefront of Space Science

宇宙科学
最前線

「はやぶさ2」で分かったこと：熱赤外観測の観点で

太陽系科学研究系 特任助教 坂谷 尚哉(さかたになおや)

はじめに

多くの方がご存じのように、小惑星探査機「はやぶさ2」は2014年12月に種子島宇宙センターから打ち上げられ、2018年6月にC型小惑星^{*1}リュウグウに到着しました。数々の偉業を成し遂げつつ、小惑星リュウグウからサンプルを採取し、2019年11月にリュウグウを出発、2020年12月に無事地球へサンプルを届けてくれました。現在「はやぶさ2」は、「はやぶさ2#」と名前を変え、2026年の小惑星2001 CC21フライバイ、2034年の1998 KY26ランデブーへ向けた拡張ミッションへと突入しています。

2024年2月時点で、小惑星リュウグウ・「はやぶさ2」に関する査読付き論文は351を数え、学会発表を加えると1,000弱に及びます(NASA ADS調べ)。これだけ多くの研究成果が創出されるのは嬉しい反面、全体を俯瞰して「はやぶさ2」の成果を述べるのがだんだんと難しくなっているという側面もあります。最初この記事の執筆依頼を頂いた際、『「はやぶさ2」の総括的な記事』とのことでしたが、簡単にYESと言えるものではありませんでした。ということで、今回は私の守備範囲である「はやぶさ2」中間赤外観測・熱物性に関する

結果に絞って、「はやぶさ2」到着前から到着後、リュウグウサンプルの分析までを総括的に書き記したいと思います。そのほかの観点での総括記事は後々のお楽しみということで。

熱観測からリュウグウを想像する

熱赤外観測では、天体表面の温度が分かります。小惑星表面の温度は、太陽からの入射エネルギー、宇宙空間への熱輻射、地下への熱伝導のバランスによって決まります。地下への熱伝導の程度は、地表面がどのような物質で構成されているかによって変わり、その程度を表すパラメータが熱慣性^{*2}です。熱慣性が高い物質は、熱伝導率が高く温度が変わりにくい性質を持ちます。例えば、地上にあるような普通の石の熱慣性は $1,000 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ 程度のオーダーなのに対して、月面の熱慣性は $50 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ 程度です。月面の低い熱慣性は、レゴリス(岩石の細粒の粉碎物)で覆われており、粒子間の微小な接触面によって隣り合う粒子間の熱伝導率が小さいことに起因します。このように、熱慣性は表面にどのような物質が存在しているかの指標となります。ちなみに熱慣性から表面物質の“定量的な”情報、例えば粒子サイズや空隙率を抽出できるモデルを作成したのが筆者の博士論文の一部だったり

*1 反射率が低く、炭素の含有量が比較的多い炭素質コンドライト隕石と類似したスペクトルを示す小惑星。

*2 熱慣性 Γ は熱伝導率 k 、密度 ρ 、比熱 c として、 $\Gamma = \sqrt{k\rho c}$ で表される。

します[1]。

熱慣性は宇宙望遠鏡等での赤外観測によって推定できます。リュウグウも「はやぶさ2」到着前から「あかり」やSpitzer、NEOWISE等の望遠鏡観測から熱慣性の値は推定されていました。その値は $150\text{--}300\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ で[2]、地球にある普通の石そのものよりも低く、月面レゴリスよりも高い、という値でした。この値からチームは、リュウグウ表面はcmスケールの岩石粒子で覆われていると予測しました[3]。

「はやぶさ2」がリュウグウ近傍に到着し、可視光カメラの観測でまず驚いたのはメートル級の多くの岩塊が覆われていたことでした。つまり、上記の到着前の予測は外れてしまったのです。可能性としては、①望遠鏡観測による熱慣性推定値が間違っていた、②熱慣性の解釈方法が間違っていたの2つが考えられました。今こそ「はやぶさ2」に搭載した中間赤外カメラTIRの出番だ！

「はやぶさ2」の観測

TIR(中間赤外カメラ、Thermal InfraRed Imager)は小惑星表面の温度分布を連続的に観測します。「はやぶさ2」の位置を慣性空間に固定した上で、小惑星が自転により360度回っていく様子を連続的に撮像することで全球的な表面温度観測を行いました。同時に小惑星上の各位置における温度の時間変化を観測しました。表紙画像がその一例です*3。

このようなリュウグウ1自転分の温度計測から、各緯度経度における熱慣性を求めました(図1)。その結果、リュウグウの全球平均の熱慣性は $225 \pm 45\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ であることが分かりました[4]。すなわち、望遠鏡観測の結果($150\text{--}300\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$)と同程度の値を持ちます。ちなみに、小惑星の望遠鏡観測での熱慣性の値をその場観測で検証したのは、「はやぶさ2」TIRが初めてです。この結果は、我々のこれまでの熱慣性の解釈方法が間違えていたということの意味しています。なお、NASAの小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-Rexにも熱放射計OTESが搭載されており、リュウグウと同様の結果(熱慣性はリュウグウと同程度、表面は岩塊だらけ)が得られています[5]。

熱慣性の値は自転による温度変化から求めた場合、熱浸透深さ*4程度までの物性情報を反映します。リュウグウの自転周期7.6時間と推定された熱慣性の値、および典型的な隕石の密度 2500 kg m^{-3} 、比熱 $800\text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ を用いると、熱浸透深さはおよそ1cm程度のオーダーと見積もられます。石の大きさが熱浸透深さよりも大きい場合、熱慣性の値は岩石そのものの熱慣性を強く反映した結果となります。逆に、石の大きさが十分に小さければ、粒子間の微小な接触面を熱が流れることになるので熱慣性は粒子集合体としての値を反映します。メートル級の岩塊によって覆われているリュウグウの場合、推定された熱慣性は岩塊そのものの熱慣性を表しているものと考えられます。岩塊の熱慣性が $225 \pm 45\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ というのは意外な結果でした。なぜならば、隕石の熱慣性は低くても $750\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ 程度であり、こんなに低い熱慣性を示す小惑星物質を我々は知らなかったからです。だからこそ、低い熱慣性=小さな粒子の集合体、という固定観念が生まれていました。

なお、小型ランダー MASCOTにも熱赤外センサ MARAが搭載されており、岩塊そのものの熱慣性を測定することに成功しました。そこで推定された熱慣性は約 $280\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ で[6]、TIRの観測結果と整合的でした(TIRデータを解析した身としては、もの凄く心強い結果)。

では、岩塊の熱慣性が低いことは何を意味しているのでしょうか？最も影響が大きいのは、岩塊の空隙率だと考えられます。空隙率が高い、つまり中身がスカスカなほど断熱性が高く熱慣性が低いことになります。隕石の熱慣性および空隙率を用いた経験的なモデルに基づくと、リュウグウの大部分の岩の熱慣性 $200\sim 400\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ は空隙率で30-60%程度に相当します。きっと手で簡単に押しつぶせるような脆い石なのだろうと想像されます。そのようなサンプルが地球に届けられているはずだろう、と。。。なお、「はやぶさ2」の高度100m以下の低高度運用で100個以上の岩塊一つ一つを識別して温度を計測することに成功しており、大部分の岩の熱慣性は $200\sim 400\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ でした[7]。一方で、隕石と同程度の $700\text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$ 以上のものも数個発見され、逆に

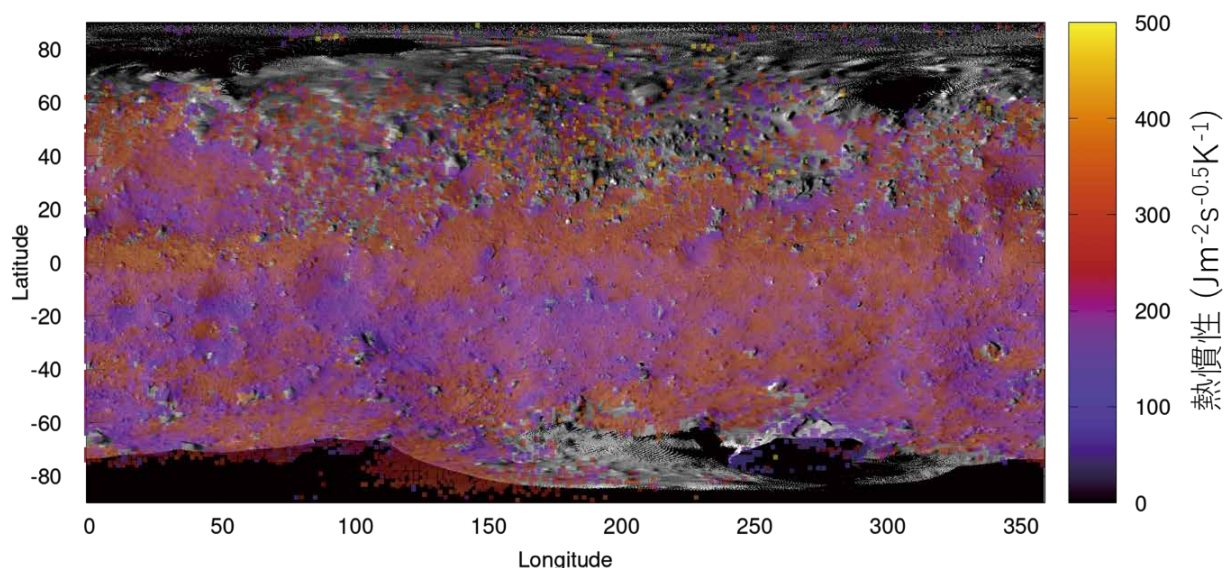


図1：リュウグウの熱慣性マップ[4]。背景は ONC-T 可視画像で作られた全球マップ。

*3 動画は https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20200317_nature/img/anim_l2_20180801.mp4 からご覧ください。

*4 ある周期的な表面温度の変動の影響がどの程度の深さまで伝わるのかを表す指標。周期をP、熱拡散率を κ とすると、熱浸透深さは $\sqrt{\kappa P/\pi}$ で計算できる。なお、熱拡散率は $\kappa = k/\rho c$ で計算できる。

$50 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$ 程度の極度に低い熱慣性を持つ岩も発見されています。このように全ての岩が同程度の熱慣性・空隙率を持つ訳ではなく、分布が存在することが分かりました。空隙率の分布は、母天体内部での熱変性、その破壊・再集積プロセスで生じたものと思われます。

リュウグウサンプル分析

2020年12月にリュウグウのサンプルが地球へ届けられました。TIRおよびMARAIによる熱慣性推定結果と照らし合わせるべく、サンプル粒子の熱物性計測が行われました。試料サイズは最大でも1 cm程度であるため、微小領域の熱拡散率^{*5}を測定するのに適しているロックインサーモグラフィ法が用いられました。この方法ではレーザー光で試料を周期的に加熱し、それによる温度変化を赤外線顕微鏡で観察することで、非接触で熱拡散率およびその異方性を測定することができます。

リュウグウサンプル6粒の熱拡散率測定値 ($2.8\text{--}5.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)、密度および比熱の実測値 ($1650\text{--}1920 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $865 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) を用いると、粒子の平均熱慣性は $790\text{--}1250 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$ であることが明らかになりました[8]。TIRおよびMARAIの観測結果よりも3倍以上大きな熱慣性です。ここでも予測が外れてしまいました。なぜサンプルの熱慣性はTIR/MARAによるその場観測結果と異なるのでしょうか？理由として考えられるのは熱浸透深さおよび空隙の空間スケールの違いです。上述したように、リュウグウ表面では日周期の熱浸透深さは1 cm程度です。一方で、ロックインサーモグラフィでは熱サイクルの周期は1秒程度で、熱浸透深さは数百 μm です。すなわち、数百 μm よりも大きなスケールに渡ってクラックや空隙があり、かつそこを通るような熱の流れが存在すれば熱慣性は低くなり、結果としてリモセンデータによる熱慣性とサンプル分析による熱慣性の整合性が取れるのかもしれませんが、事実、図2でお見せしたリュウグウサンプルには熱拡散率の異方性が確認されており、熱拡散率が最も低い方向(図2b-dの左上方向)では熱慣性 $240 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$ 相当で、TIR/MARAでの測定値と同等となっています。こちらの方向には数百 μm よりも大きいスケールでのクラックや空隙が潜んでいるのかもしれませんが。

度重なる想定外から

赤外線観測は物理特性情報を引き出すことができる唯一無二の探査手法です。単に熱慣性がかかるというだけでなく、その熱慣性を持つためにはどのような構造の物質でなければいけないのか、更に他の物理特性、例えば圧縮強度や弾性波速度などの機械特性まで推測できます。触ってはいないけど、手に取ったような情報を得ることができるのです。ただし、その議論のベースにあるのはラボでの基礎実験や理論モデルです。そして、その答え合わせが惑星探査だと筆者個人的に

*5 熱拡散率 κ と熱慣性 Γ は、 $\Gamma = \sqrt{\kappa \rho c}$ で相互変換できる。

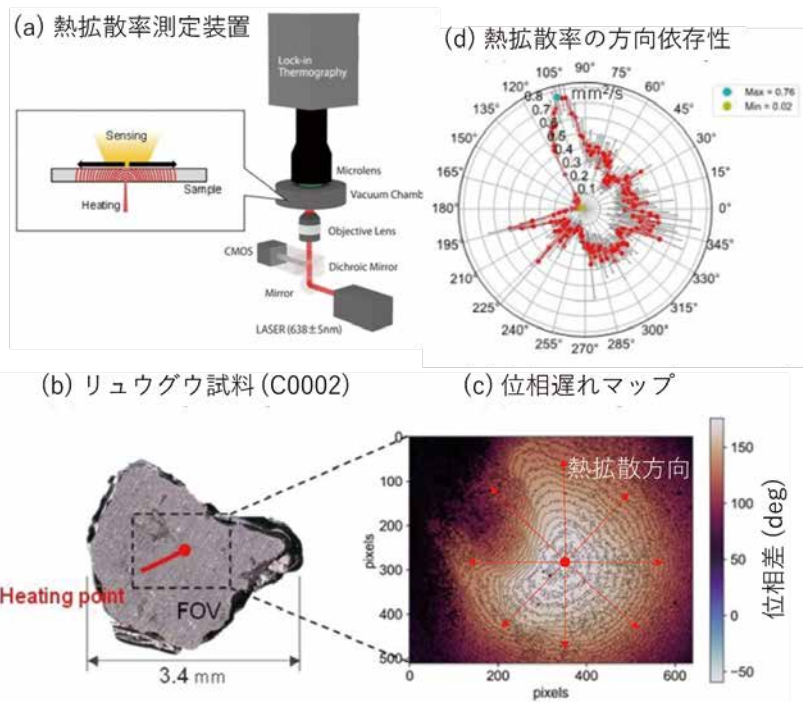


図2：ロックインサーモグラフィ法による熱拡散率測定 ([8]の図を修正)。(a) サンプル下面をレーザーで周期的に加熱しつつ、上面から赤外カメラで動径方向に広がる波の位相遅れを観測する。(b, c) リュウグウ試料と位相遅れマップ。位相遅れが大きい方向ほど熱拡散率が低い。(d) 熱拡散率の推定結果。青点は熱拡散率の最大値、黄点は最小値を示す。

は考えています。本記事で述べさせていただいた通り、到着前の予測は外れ、サンプルに関する予測も外れました。全然ダメじゃないか、という感想もあるでしょうが、探査をしなければ当然のように皆そうだと思って過ぎていたところに、風穴を開けることに成功したと言えるでしょう。

今後、中間赤外での小天体探査は継続していきます。ESAの二重小惑星探査計画Heraでは、「はやぶさ2」TIRチームが中心となって赤外カメラTIRIを開発し、2023年12月にプロトフライトモデルを届けました (ISASニュース2024年2月号)。Heraは2024年10月に打ち上げられ、2026年末に二重小惑星Didymos-Dimorphosに到着する予定です。きっとまた我々に想定外の観測結果を送ってくれることでしょう。その一方で、想定外にならないように、「はやぶさ2」TIRデータの解析、サンプル分析、基礎実験を行って準備していく所存です。

参考文献

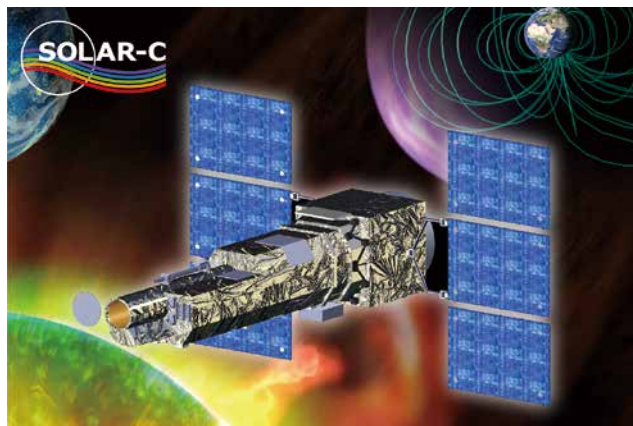
- [1] N. Sakatani et al., Thermal conductivity model for powdered materials under vacuum based on experimental studies, AIP Advances 7, 015310, 2017.
- [2] T. G. Müller et al., Hayabusa-2 mission target asteroid 162173 Ryugu (1999 JU2): searching for the object's spin-axis orientation, Astron. Astrophys. 599, A103, 2017.
- [3] K. Wada et al., Asteroid Ryugu before the Hayabusa2 encounter, Progress in Earth and Planet. Sci. 5, 82, 2018.
- [4] Y. Shimaki et al., Thermophysical properties of the surface of asteroid 162173 Ryugu: Infrared observations and thermal inertia mapping, Icarus 348, 113835, 2020.
- [5] B. Rozitis et al., Asteroid (101955) Bennu's weak boulders and thermally anomalous equator, Sci. Adv. 6, eabc3699, 2020.
- [6] M. Grott et al., Low thermal conductivity boulder with high porosity identified on C-type asteroid (162173) Ryugu, Nat. Astron. 3, 971–976, 2019.
- [7] N. Sakatani et al., Anomalous porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body, Nat. Astron. 5, 766–774, 2021.
- [8] T. Ishizaki et al., Measurement of microscopic thermal diffusivity distribution for Ryugu sample by infrared lock-in periodic heating method, Int. J. Thermophys. 44, 51, 2023.

SOLAR-C:プロジェクトチーム発足、基本設計フェーズに

高感度太陽紫外線分光観測衛星 (SOLAR-C) は、2023年12月にシステム定義審査 (SDR)、そして2024年2月にプロジェクト移行審査を完了し、3月1日付けで機構プロジェクトとして「高感度太陽紫外線分光観測衛星プロジェクトチーム」、略して「SOLAR-Cプロジェクトチーム」が発足しました。SDRは、SOLAR-Cのシステム定義が適切に設定されていることを審査し基本設計フェーズに移行する準備が整ったことを確認する宇宙科学研究所としての審査です。プロジェクト移行審査は、SDRの結果を踏まえ、プロジェクト実行段階への移行可否を審査する機構としての経営審査です。

SOLAR-Cのミッションコンセプトは、「ひので」をはじめとした太陽研究の最新成果・進展にもとづき研究コミュニティから宇宙科学研究所に2018年1月に提案され、宇宙理工学合同委員会の科学評価による選定を経て、2020年4月に公募型小型計画4号機ダウンセレクションで選定された次期太陽観測衛星です。太陽は私たちの生活にも密接に関わる天体であり、SOLAR-Cはその天体で起きているコロナやフレアがどのように生じるかの理解を深め、太陽が地球や太陽系に及ぼす影響や太陽大気の形成を解明することを通じて、太陽系や生命の起源にも迫るミッションです。高精度な望遠鏡による軌道上での太陽観測で強みを持つ日本が主導して、紫外線観測で経験を持つ米欧の国際協力を得て、世界初となる性能を持つ紫外線望遠鏡による太陽観測を実現させます。

ダウンセレクション選定からプロジェクトチーム設立まで約4年の月日を要しました。当初は最短の時間でフェーズアップを計



SOLAR-C想像図とプロジェクトロゴ

画しましたが、総開発経費の増加への対応、概念設計・技術要素の研究開発を念入りに実施した結果です。そして今、衛星開発はプロジェクトの実行段階に入りました。すでに、国立天文台との協力のもとで開発メーカーと観測望遠鏡の基本設計・試作開発による設計検証を進めており、さらに衛星システムの基本設計フェーズ開発を開始しました。また観測装置製作に貢献する米欧の機関でもそれぞれの宇宙機関 (米国NASA、欧州ESA、ASI、CNES、DLR) の支援のもとで開発が進められています。開始されたSOLAR-C開発へのより一層のご支援よろしくお願いします。

(清水 敏文)

「ひので」の運用延長

2006年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)は、開発が本格化してきた次期太陽観測衛星計画SOLAR-C (高感度太陽紫外線分光観測衛星) に一段と注力して推進する観点から、昨年、JAXAの機構プロジェクトとしての運用を終え、同年6月からは宇宙科学研究所の所内チームとして、後期運用体制へと移行しました。

これと並行して、「ひので」チームは2023年度で終了する現在の観測運用期間を延長するための準備を進めてきました。国内

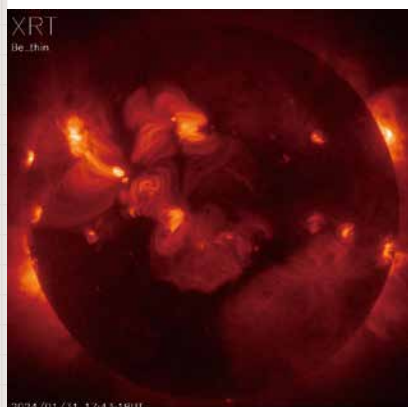
の太陽コミュニティおよび国際「ひので」チームで延長期間とその科学的な妥当性の検討を行い、昨年12月に宇宙理学委員会による審査、次いで今年2月に所内審査をそれぞれ受審しました。審査にあたっては、理学委の審査委員会を通じて太陽系科学GDIからの見解もいただき、これらを通じて、太陽の極域磁

場が最大となる、次の太陽活動極小期までを確実にカバーする2033年度までの運用延長が妥当と認められました。

SOLAR-Cの打上げから1年となる2029年度までは、Parker Solar Probe、Solar Orbiter、「みお」、「あかつき」等、内部太陽圏の探査機群との連携観測、極域磁場やフレア観測の継続、また、SOLAR-Cが打上げ後すみやかに科学成果を創出できることを念頭に、ALMAやDKISTなど地上の大型観測装置との連携観測を通じた協力体制の構築を推進します。さらにSOLAR-C打上げ後の1年間は、SOLAR-Cのための比較検証観測を進めます。2030年度以降は、データダウンリンク用の地上局数を削減して運用経費を抑え、極域磁場とX線高温コロナ活動という、2030年代においても「ひので」でしか観測が行えず、かつ、太陽圏の環境に影響を与える2つの対象に限った観測を実施し、太陽系科学への貢献を目指します。また2029年以降に太陽極域を高緯度から見られるようになるSolar Orbiterとの共同観測により、「ひので」による極域の高速太陽風の流源の磁場やX線ジェット活動と、Solar Orbiterのその場観測による太陽風の活動状態を直接結び付ける初めての機会が得られると期待しています。

「ひので」の運用延長は今回で最後となります。2033年度の運用終了まで、太陽・太陽圏の理解に向けた観測を、「あらせ」をはじめ他の太陽系科学ミッションとともに進めていきますので、これからも引き続きよろしくお願いします。

(坂尾 太郎)



活動極大期に向けてフレアを頻発させつつある太陽のX線画像 (日本時間2024年2月1日)。

雪ニモマケヌ金星人のホットな会合開催

南岸低気圧が大雪をもたらした翌日2月6日と7日、「あかつき」金星探査のメンバーによる第25回SWT (Science Working Team) 会合が相模原キャンパスで開催されました。

国内のメンバーに加え、米国からはNASA Participating Scientistsの皆さん、そして韓国Institute for Basic ScienceからLee Yeon Jooさん(一時期あかつきプロジェクト研究員でした)率いる惑星大気研究グループのメンバーも来日され、にぎやかな会となりました。

折しも「あかつき」の運用延長審査(2029年3月までの観測延長)が最終フェーズということもあり、これまでの成果の振り返り・次の延長における科学目標・さらにはポスト「あかつき」の

ミッション案まで、熱のこもった議論が展開されました(6日夜の、鶏鍋をつつく懇親会も大変に熱い雰囲気でした)。

印象に残ったのは、若い人たちの活躍です。メソスケール構造の時間発展に着目した紫外線データ(UVI)と赤外線データ(IR2)の比較(松井 龍郎さん)はとても興味深いものでしたし、UVIの2波長データから雲頂SO₂の分布(緯度と地方時に対する依存性)を導いた研究(岩中 達郎さん)も大注目です。

また、「あかつき」データではありませんが、地上望遠鏡(マウナケア山頂のIRTF)から得られた波長5ミクロンの画像を丁寧な画像処理により素晴らしいクオリティのデータへと生まれ変わらせた報告(神山 徹さん)も、今後そこから得られる解析・研究に大きな期待が寄せられます。

当然のように、あらかじめあったプログラムは大幅に遅延することとなったわけですが、SWT会合の目的は「決められた時間内に終わらせる」ことではなく、「心ゆくまで議論をする」ことにありますから、すべては成り行きまかせで進行了のでした。

初日の夕方には、金星の紫外線吸収物質に関する興味深い論文を最近発表されたPaul Rimmerさんに英国からリモートでご参加をお願いし、研究内容を詳しくお話して頂くこともできました。

恒例のグループ写真は、滅多に見ることのない「雪化粧したM-Vロケット」前でこやかに撮影したのでした(写真)。

(佐藤 毅彦)



マイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡LiteBIRD: ミッション定義審査を通過

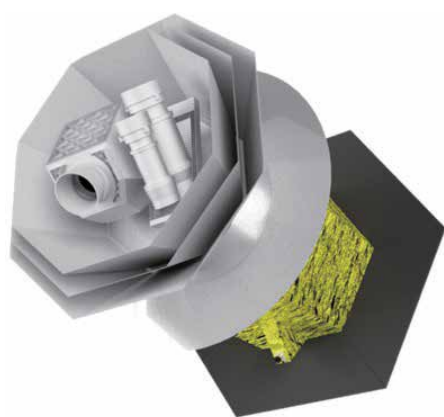
宇宙はビッグバン、すなわち高温の火の玉宇宙から始まったことは、多くの人がご存知でしょう。しかし、火の玉になる前に、宇宙は加速度的な膨張を経験したと多くの研究者は考えており、インフレーション宇宙仮説と呼ばれています。インフレーションは、原始重力波を生じ、宇宙マイクロ波背景放射に特徴的な渦巻き状の偏光パターン(原始Bモード)を刻印します。この原始Bモードを検出し、インフレーション宇宙仮説の検証を目指すのがLiteBIRD計画です(詳しくは、ISASニュース2016年9月号*参照)。JAXAを中心に、国内では、高エネルギー加速器研究機構、東京大学カブリ数物連携宇宙機構、岡山大学、海外では、フランスCNESを中心とする欧州各国、カナダなど、多くの国内・国際協力に基づき推進している計画です。

ミッション定義審査(MDR)は、衛星プロジェクトに関連する一連の審査の最初であり、またミッションの根本となる意義・価値を精査する重要な審査です。LiteBIRDのMDRは、まず事前説明会を2023年9月19日に開催、その後、技術分科会やマネジメント分科会が開催され、JAXA外から宇宙マイクロ波背景放射観測の専門家も招いて、多面的な審査が行われました。各分科会の結果を受けて、本審査会が2024年2月7日に行われ、合格することができました。

約半年という長期の審査になりましたが、これはLiteBIRDが

色々な意味で難しいミッションであることに起因します。技術分科会では多くの課題の指摘があり、それをアクションアイテムとして定義し、今後着実に処理していくことになりました。また、マネジメント分科会では成功基準の議論が行われ、フルサクセスに向かって段階的な成功基準を導入しました。

MDRでの議論で、これから処置していくべき課題があぶり出され、海外機関と協力して対処していくことで、より着実な計画推進が行えるものと期待できます。この後、プロジェクト準備審査に進み、合格できればプロジェクト準備段階に入ることになります。今後、国内外のパートナーとともにチーム一丸となって、LiteBIRDの着実な実現を目指す所存です。(堂谷 忠靖)



LiteBIRDの衛星外観図

* https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews426.pdf

SLIM the Moon Sniper

連載

第7回

降りられるところから、降りたいところへ

自動操縦で着陸！ 誘導航法制御系

日本時間2024年1月20日午前0時20分頃、SLIMは日本初の月面軟着陸を達成しました。高度50m付近以下で推進系にトラブルが生じたものの、世界初となる月面ピンポイント着陸を実現しました。第7回では、誘導航法制御系の簡単な紹介と共に、担当者の視点で運用現場の様子を振り返りたいと思います。

SLIMのピンポイント着陸実現には、探査機の日である「画像照合法」と、探査機の頭脳である「誘導航法制御」がキー技術でした。特に誘導航法制御系（英語ではGuidance, Navigation, and Control; GNC（ジー・エヌ・シー））は、探査機のスマートな目「画像照合」などの情報から、現在の位置や速度などを素早く推定し（航法）、その場で飛行予定経路を作り出し、目的地へと導く能力（誘導制御）が求められます（解説記事：ISASニュース2022年9月号）。SLIMの着陸降下シーケンスは日本上空で例えると、北海道の新千歳空港を秒速1.7 kmの速度（旅客機の数倍！）で出発し、20分後に兵庫県の阪神甲子園球場内（100m以内）に着陸するイメージです。このダイナミックかつ正確な着陸を、自動操縦で実現することが、GNC系の使命でした。

管制室では着陸降下開始の約30分前から数分前にかけて、各サブシステム担当者が探査機状態を最終確認し、最終Go/NoGo判断結果をコールしていきます。ここで万が一問題が見つければ、シーケンス中断の提言もあり得る、緊張感のある判断ポイントです。熱系OK、電源系OK、画像系OKといった形でコールが進む中、GNC系は各系の中で最後に判断を行うため、気が抜けません。降下開始の数分前に誘導計算が自動実行され、目標地点までのルート（軌道）が正しく計算されたことを確認し、「よし、いくぞ！」という気持ちを込めて「誘導OK！」とコールしました。

着陸降下が始まってからの20分間はあっという間でした。各系が定期的に状態を報告し、「次シーケンスまであと●分」と周知がある中、GNC系からも「軌道・姿勢OK」と報告を挟んでいきます。「（このまま上手く降りてくれよ…）」と祈るような心境でテレメトリ画面（図1）を見守ります。前半の動力降下フェーズが順調に進み、後半の垂直降下フェーズに移行してからは、さらにあっという間でした。垂直降下フェーズに入ってから間もなく、着陸レーダ（月面からの距離や速度を測るセンサ）の担当から「レーダ、ロックオン！」のコールがあり、月面はすぐそこだと感じると共に、ここまで上手く

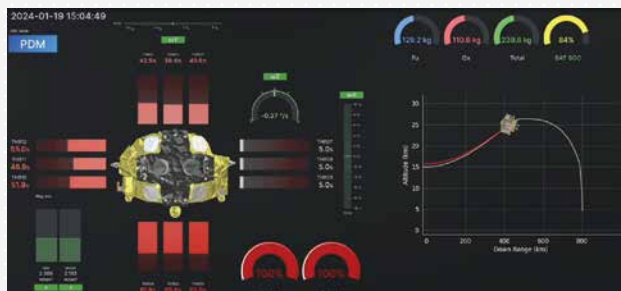


図1：動力降下フェーズ中のテレメトリ画面（例）。画面作成はJAXA職員の横田健太郎氏（研究開発部門、第一研究ユニット）、後藤健太氏（研究開発部門、第二研究ユニット）、中平聡志氏（宇宙科学研究所、科学衛星運用・データ利用ユニット）らの貢献が大きい。

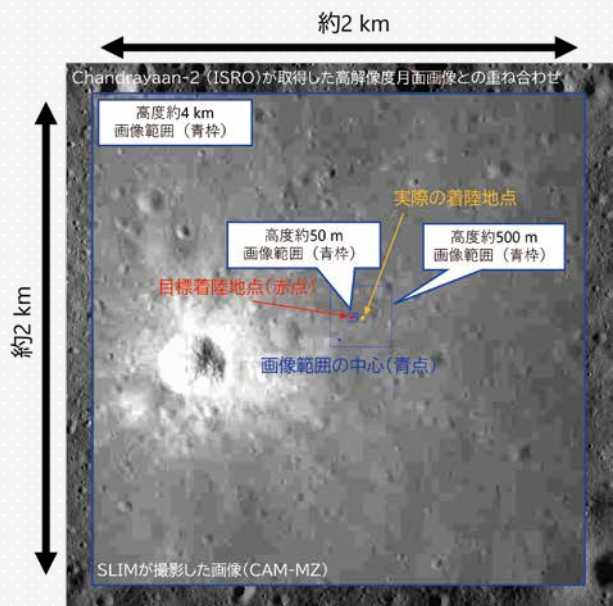


図2：垂直降下フェーズ中の月面画像。着陸後にデータ評価したもの。

飛んで来られたのだと期待が高まります。垂直降下中に何回か行う水平位置の修正も順調に進んでいきます。タッチダウン時は想定と異なる着陸姿勢で静定しており、しばらく緊張と動揺で溢れましたが、探査機の生存を確認できた時には心底、安堵しました。垂直降下フェーズ中に撮影した画像（図2）からは、まるで目標地点に吸い寄せられるかのように降りていく様子が分かります。

GNC系は世界初となるピンポイント月面軟着陸の自律飛行を司るがゆえ、開発フェーズでは多くの困難に直面しました。その際、SLIMチーム内外の方々にご支援を頂いたお蔭で、開発を完遂することができました。また、世間の皆様から頂いた暖かい声援には、大変励まされました。心よりお礼申し上げます。

伊藤 琢博（いとう たかひろ）



立命館大学 総合科学技術研究機構
教授

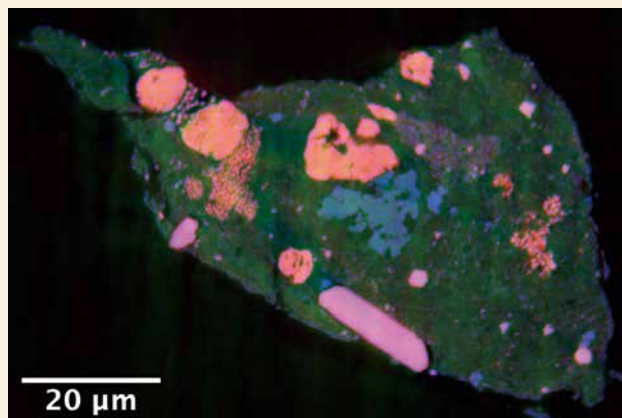
土山 明 (つちやま あきら)

太陽系の大航海時代と 新しい博物学

「ISASニュース」の「いも焼酎」に寄稿依頼を受け、「「いも焼酎」のネーミングいいですね」というお返事をしたところ、「鹿児島県内之浦の実験場に因んでのネーミングと聞いております。大昔ですが、本当に焼酎の話を書いた方がいらっしゃったそうです。」とのこと。2003年5月、小惑星探査機「はやぶさ」の打上げを内之浦で見学した際に、コテージ叶岳というところに宿泊し、「いも焼酎」の酒盛りをしたことを思い出しました。叶岳というのは内之浦の市街地から1kmほど離れたところに位置する標高187mの山で、山頂にあるコテージから市街地まで階段を上り下りして、小鹿の一升瓶と食料を調達しました。記念焼酎「はやぶさ」(大海酒造)はまだ存在せず、同じ鹿屋市(内之浦の近く)の小鹿酒造の「いも焼酎」を調達していたわけです。家に戻ってからも小鹿のファンになり、見かけるとよく買っていました。

天体からサンプルを採取し地球に持ち帰るサンプルリターンは、1969～1972年のアメリカNASAのアポロ計画(有人)による月サンプル(約390kg)採取が始まりで、ほぼ同時期(1970～1976年)には、旧ソ連のルナ計画(無人)により約200gの月サンプルが持ち帰られています。今世紀に入ってから、太陽系小天体のサンプルが地球に持ち帰られるようになりました。2006年のNASAスターダスト計画によるヴィルト第2彗星のサンプル(10 μ m以下の微粒子)、2010年のJAXAはやぶさ計画による小惑星イトカワのサンプル(数100 μ m以下の微粒子約15 μ g)、2020年のJAXAはやぶさ2計画による小惑星リュウグウのサンプル(5.4g)、そして昨年2023年のNASAオシリス・レックス計画による小惑星ベヌーのサンプル(121.6g)です。また中国の嫦娥5号により2020年に月サンプル1731gが採取されています。これらのサンプルは、多くの分野の研究者によって今も分析が続けられています。

私は幸いにも、これら全てのサンプルについて、主としてX線CTを用いた分析に携わることになりました。このために、大型放射光施設であるSPring-8において、ビームラインサイエンティストを含む共同研究者とともに、新しい手法を開発しました。これにより、X線透過率の違いによるサンプルの3次元構造だけでなく、高空間分解能(数100nm)での鉱物(物質相)の3次元分布(写真はその一例です)や、物質密度・大まかな化学組成も得ることができます。このような高分解能で鉱物3次元マップを得る手法は世界的に例がなく、貴重なリターンサンプルの分



「はやぶさ2」が小惑星リュウグウから持ち帰ったサンプル粒子(C0103-FC007)のRGB-CTスライス像の一例。3つの異なるX線CT手法で取得した像をRGBで合成することにより、粒子を構成する鉱物の違いが色の違いで表されている(緑色：含水層状珪酸塩、ピンク：硫化鉄、オレンジ：磁鉄鉱、青色：アパタイト、灰青色：ドロマイト、暗緑色：有機物)。

析に適したものだと自負しています。実際、イトカワやリュウグウサンプルでは、X線CT情報を元に、その後の破壊分析を効率よく行うことができ、ベヌーサンプルにも適用予定です。

我々が実際に手にして分析できるサンプルとしては、リターンサンプルの他に隕石がありますが、どの天体から来たかの確実な証拠はなく、地球落下後の大気や水、有機物の汚染も避けられません。アポロサンプルの分析により、人類は初めて月の岩石がどのようなものであるかを知り、その後の月隕石の発見にもつながりました。また、月形成時のマグマオーシャン(マグマの海)の存在が判明し、惑星形成論に大きな進展をもたらしました。スターダストサンプルでは、彗星起源と考えられていた宇宙塵の彗星起源を確認し、高温起源物質の発見により太陽系内側で形成された高温物質が極低温域に移動したことが指摘され、太陽系形成理論に大きな影響を与えました。イトカワサンプルでは、宇宙風化を受けた普通コンドライト隕石との対応が判明し、小惑星で観測される反射スペクトルタイプと隕石タイプの出現頻度が合わないというパラドクスが宇宙風化を考えることにより解決され、宇宙風化などの小惑星表面での活動が明らかになりました。リュウグウサンプルは最も始原的なCIコンドライト隕石に対応し、アミノ酸などの多様な有機物や鉱物内に閉じ込められたCO₂に富む流体の発見により、リュウグウの母天体は太陽系の外側で形成され木星軌道内部に移動したことが示されました。ベヌーサンプルは初期分析が始まったところですが、リュウグウサンプル以上に多様な有機物が発見され、今後の分析結果が期待されています。

アポロやルナ計画は米ソ冷戦時代の産物でもありましたが、四半世紀以上の中断を経て、彗星や小惑星のサンプルが地球に届けられるとともに、今後も火星も含めた様々な太陽系天体からのサンプルリターンが予定・計画され、「太陽系の大航海時代」が始まったと言われています。ヨーロッパの大航海時代以降、世界各地から新種の動物・植物・鉱物が発見され、それらを分類する手段としての博物学が発達し、現代科学の礎となりました。「太陽系の大航海時代」がもたらす太陽系の物質に関する「新しい博物学」の始まりと言えるでしょう。

》4度の挑戦を超えて新たな宇宙へ

「銀河を吹き渡る風」の動きを見る

——2023年6月、金沢大学から宇宙研に移ってこれました。

17年半ぶりに宇宙研に戻ってきました。X線分光撮像衛星XRISMの打上げ準備に追われ、2023年9月7日に打ち上げられた後も初期機能確認運用、ファーストライトと慌ただしく、2024年2月から定常運用に移行して、ようやく落ち着いたところです。

——XRISMは、どういう衛星ですか？

XRISMは天体からやってくるX線を観測し、宇宙で起きている熱く激しい現象を調べます。私は、Resolveという日米欧国際協力の観測装置の開発に日本グループのサブPIとして携わってきました。Resolveは、X線マイクロカロリメータという検出器を絶対温度0.05度（マイナス273.1℃）という極低温に冷却することで、X線のエネルギーを高精度に測定します。それによって「銀河を吹き渡る風」の動きを見ようとしています。

——銀河を吹き渡る風とは？

銀河団は数千個もの銀河の集まりですが、宇宙の初期にはそのような巨大な天体はありませんでした。銀河の小さな集まりが衝突・合体を繰り返して大きな銀河団に成長していったと考えられています。銀河団の衝突・合体に伴って、銀河団を満たしている高温ガスも混ざり合います。そうした高温ガスの動きのことです。

高温ガスが放射するX線のエネルギーをマイクロカロリメータで高精度に測定し、さらにドップラー効果によって波長が変化することを利用すると、高温ガスの動きが分かります。銀河を吹き渡る風の動きを詳しく捉えることで、銀河団がどのように成長してきたのかを明らかにする。それがXRISMの大きな科学目標の1つです。

4度目の挑戦！

——2024年1月にはファーストライトで取得されたデータが発表されました。

XRISMは大マゼラン雲にある超新星残骸N132Dを観測しました。これまでは分離できなかったX線輝線の微細な構造を、しっかり分けて捉えられています。

実は、X線マイクロカロリメータによる観測は、2000年に実現する計画だったのです。ところが、ASTRO-Eは2000年に打上げ失敗、2005年打上げのASTRO-E II（すざく）は液体ヘリウムが失われて観測ができず、2016年打上げのASTRO-H（ひとみ）は衛星の姿勢制御のトラブルによって1カ月で運用終了。そして2023年、XRISMが打ち上げられたのです。4度目の挑戦でした。

編集後記

XRISM/SLIM打上げとSLIM月着陸のライブ配信に携わり、その成功を誰よりも近いところから見届けの機会をいただきました。そのなか、3月からSOLAR-Cがプロジェクト化されました（ISAS事情記事）。両ミッションに続けるよう、一層励みたいと思います。

（鳥海 森）

宇宙物理学研究系 教授

藤本 龍一（ふじもと りゅういち）

1969年、大阪府生まれ。東京大学理学部物理学専攻卒業。同大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程中退。1995年、宇宙科学研究所助手。博士（理学）。2006年より金沢大学理工研究域数物科学系准教授を経て、2023年より現職。



この間、装置の改良を続け、エネルギー決定精度は2倍以上に、その他の性能も大きく向上しました。同じX線マイクロカロリメータを用いた観測装置ですが、ASTRO-Eとは別の装置と言ってもよいくらい進化しています。

X線からマイクロ波へ。銀河団から宇宙背景放射へ

——今後どのようなプロジェクトに携わっていく予定ですか？

宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星LiteBIRD計画を推進する人材の公募があり、宇宙研に戻って来ました。私はずっとX線天文衛星に携わってきましたが、LiteBIRDが観測するのはマイクロ波です。また、宇宙誕生から何十億年もかけてできた銀河団などを観測してきましたが、LiteBIRDで観測するのは宇宙誕生の38万年後に発せられた宇宙マイクロ波背景放射です。

——なぜ、観測する波長も対象も違う衛星に携わることにしたのですか？

実は、LiteBIRDに搭載するマイクロ波検出器は、X線マイクロカロリメータと基本的な原理は同じです。検出器を極低温に冷却して観測する点も同じです。これまでのX線天文衛星で培われた技術がLiteBIRDに生きて、LiteBIRDで培われた技術が次のX線天文衛星に生きる。そうやって将来につなげていきたいと思っています。

複雑な現象を基本法則で解く物理学に惹かれて

——宇宙物理学の道に進んだきっかけは？

高校の物理の先生との出会いが大きかったですね。物理学とは複雑な現象を基本法則で説明する学問である、と教えてくれました。高校物理の問題は、覚えることは少なく、原理を理解して道筋を立てて考えていけば解ける。それが新鮮で、物理って面白いと思い、大学では物理学を学ぼうと決めました。

——物理学の中でも、なぜ宇宙物理学を選んだのですか？

それも先生との出会いですね。絶対この道に進むぞ、という目標があったわけではなく、その時々のお会いに導かれて歩んできました。あっ、ちょっと格好よく言い過ぎたかもしれません。物理学は物性と素粒子・宇宙とに大きく分けられますが、物性は複雑すぎて自分には無理だと思ったということもあります。

でも、観測装置を開発していると、物性の知識が必要になってきます。必要に駆られて勉強してみると物性も面白く、学生時代にもっと勉強しておけばよかったと後悔しています。若い人には、自分が目指す分野だけでなく、ぜひ幅広く興味をもって勉強してもらいたいです。



ISASニュース No.516 2024年3月号

ISSN 0285-2861

発行／国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
発行責任者／宇宙科学広報・普及主幹 藤本 正樹
編集責任者／ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠
デザイン制作協力／株式会社トリッド

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 isasnews@isas.jaxa.jp

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶ <https://www.isas.jaxa.jp/>