JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

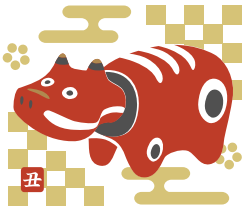
ISSN 0285-2861

2021 1

No.478

カプセルが見た地球での初日の出

2020年12月6日にオーストラリアのクーバーペディ（カプセル回収班光学観測係の火球観測拠点）で見た日の出。
この数時間前には、上空の夜空を「はやぶさ2」の再突入カプセルが火球となって飛び去っていきました。そして、この日の出の前と後に、カプセル探索およびカプセル回収のためのヘリコプターが飛び立ちました。
サンプル回収の成功を予見するかのような、美しい日の出でした。



2021年所長年頭挨拶

宇宙科学研究所長　國中　均（くになか ひとし）

昨年は新型コロナの影響が色濃く出たことは否めません。感染が広まる前1月9日に観測ロケットS310-45号機を打ち上げ、2月11日には「おおすみ」打上げ50周年を記念して国立科学博物館講堂にて「宇宙科学・探査と『おおすみ』シンポジウム」を開催しました。しかし、それ以降の催しは中止せざるを得なくなりました。

その中にあっても大樹町のご理解のもと2機の大気球実験を実施し、佐久市からのご協力を得て54mアンテナ美笹局を完成にこぎ着けました。水星に遷移中のBepiColomboは10月15日に金星にてフライバイを実行し、その際ESAのMPOと宇宙研の「みお」「あかつき」「ひさき」による金星共同観測が実施されました。宇宙研が完成を目指す、探査機群で太陽系の歴史と生命の起源に迫る「深宇宙探査船団」の成果の片鱗が見え始めました。さらには豪州政府・日本政府の支援を得て12月6日に「はやぶさ2」カプセル回収が成功しました。派出した総員約70名の回収班員のコロナ罹患予防や豪州への防疫には万全を期したことは言うまでもありません。探査機の活動は、2014年打上げから地球帰還まで、ほぼ完璧でした。太陽周回天体の探査は難度が高く、1985年の「さきがけ」「すいせい」によるハレー彗星観測以降は失敗や故障の連続でしたが、35年かけてようやくの大成功です。宇宙機が完成度を高めるとともに運用技術が向上した結果であり、宇宙工学出身の身として「エンジニアリング冥利に尽きる」感慨です。カプセル帰還に際し、インターネットを駆使してアウトリーチに努め、YouTube上で延べ5万件以上の視聴をいただきました。これから小惑星サンプルの分析が始まり、理学特に物質分析科学者の活躍に期待します。「はやぶさ2」は、小惑星1998 KY26を目指す新たなミッションを開始しました。

3月にNASA宇宙物理領域MoO（Mission of Opportunity）公募に提案された宇宙研に関連する計画（SPICA・LiteBIRD・JASMINE）全てが落選しました。10月にはESAのCosmic Vision 中型5号機候補として概念検討中のSPICAが、費用超過を理由に、トップ協議の結果、最終選定を待たずに終了となりました。天文分野では世界協働が進む中、日本のプレゼンスを示しながら国際的なメガサイエンスに参画し、確実な成功を収める制度の設計・構築が必要と考えます。

2021年は、ますます難しい舵取りが予想されますが、国内政府機関からのご指導をいただきつつ、たとえコロナ禍であろうとも突破する“前向き姿勢”を全面に対処する所存ですので、引き続き宇宙研にご理解とご支援を賜りたく、よろしくお願いします。

宇宙科学最前線

遠くの“星”のように太陽を観測すると?

JAXA 国際トップヤングフェロー　太陽系科学研究系　鳥海　森(とりうみ しん)

はじめに

私たちにとって最も身近な恒星である太陽は、フレアの発生や太陽風の放出によって、地球周辺の宇宙空間に絶えず影響を及ぼしています。これまでの観測から、太陽フレアは、黒点上空のコロナに蓄積された磁気エネルギーが突発的に解放される現象であると考えられています。太陽では時空間分解した観測が可能なため、太陽面上のどの黒点が、いつ、どのように太陽フレアを生じたのか、精度よく調べることができます。

近年、太陽に類似した恒星で、太陽をはるかに上回る巨大フレア「スーパーフレア」が発見されました。スーパーフレアも太陽フレアと同じく、強力な磁場が密集した黒点によって引き起こされる現象だと考えられています。すなわち、太陽と恒星は、黒点やフレアを含めた共通の磁気活動現象を有していると言えます。したがって、太陽で得た知見を活かすことで、恒星ではフレアがどのように発生するのか、恒星黒点とはどのように関係するのか、太陽でもスーパーフレアが発生する可能性はあるのか、さらには、周囲の(系外)惑星へどのような影響を及ぼすのか、といった謎に迫ることが可能となります。

太陽や恒星の活動現象を詳細に理解するためには、可視光で表面の黒点を捉えるだけでなく、紫外線やX線によって表面より離れた上空の高温ガス(彩層やコロナ)の状態も調べる必要があります。黒点の磁気エネルギーがどのように上空に輸送され、黒点の成長にともなってどのように磁気エネルギーがコロナに蓄積されるのかを調べることが、フレアの発生メカニズムの理解につながるからです。

しかし、現在の技術では、空間分解して観測することができる恒星は太陽しかありません。そこで私たちは、遠くの恒星から届く光を、空間分解するのではなく、可視光を含むさまざまな波長帯に渡って長期間モニター観測することで、黒点の構造や時間変化を探れるのではないかと考えました。そして、その可能性を検討するため、豊富にある太陽観測データを活用することにしたのです。

コロナ禍での研究活動

本研究[1]では、太陽の自転にともなって黒点が太陽面上を横切る(「トランジット」と呼ぶ)際に、太陽全体から届く光の強さがどのように変化するのかを調べました。一定の時間間隔で取得された太陽の観測画像について、各時刻において明るさを太陽面全面で積分し、それを時間方向に並べることでライトカーブ(光度曲線)を作ります。これを可視光から紫外線、X線に至るさまざまな波長帯の観測データについて行い、作成したライトカーブと元の観測画像を比較することで、太陽面上のどの構造(黒点など)がライトカーブの時間変化を作り出すのかを解析しました。太陽を、あたかも遠くの恒星のように、点光源として扱うことで、他の恒星にも適用できる情報を導いたのです。

私たちが知る限り、これまでこのような視点で解析を行う研究はほとんどありませんでした。そこで、この研究アイディアを具体化させるため、2020年2月に、米国のNASAゴダード宇宙飛行センターとロッキードマーチン太陽天体物理学研究所に赴き、データ解析の方針について議論を行いました。研究チームには、天文学者でありアストロバイオロジーの研究も手掛けるV. Airapetian氏のほか、太陽物理学の大家であるH. Hudson、C.J. Schrijverの両氏、さらにデータ解析のアドバイザーとしてM.C.M Cheung、M.L. DeRosaの両氏に加わっていただき、アイディアの発案者である筆者(鳥海)が統括と解析作業を行うことになりました。当時、日本では新型コロナウイルスの感染が拡大しつつあり、マスクの着用や手洗いうがいの励行など、慎重に対策を重ねての渡航となりました。その一方、米国では、コロナウイルス感染症など未だに「対岸の火事」という雰囲気だったように思います。しかし、帰国直後の3月に、米国は国家非常事態を宣言し、ロックダウンに突入したのでした。

3月末にはJAXAでも原則テレワークによる勤務となり、自宅からリモートで解析サーバに接続しての研究を余儀なくされました。太陽観測衛星のデータは多くがウェブ上で公開されているため、入手に困ることがなかったのは幸いでした。

解析と結果

今回の解析には、太陽観測衛星「ひので」と米国の「ソーラー・ダイナミクス・オブザーバトリー(SDO)」を中心に、

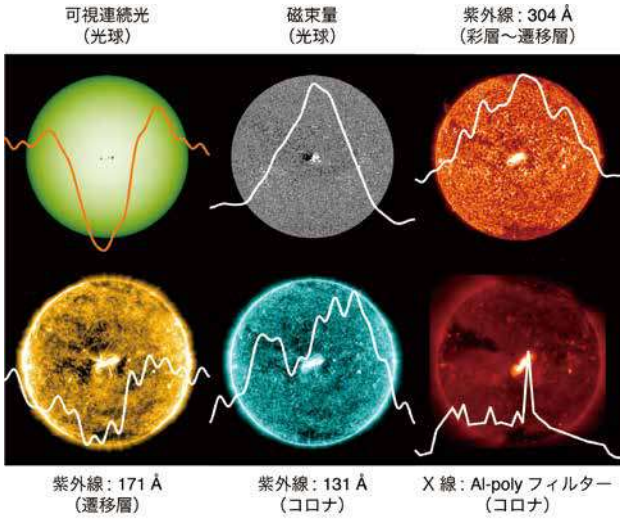


図1:太陽面上を黒点群(活動領域12699)がトランジットした際の、複数の波長帯におけるライトカーブ(実線)。背景は、黒点が太陽面中心付近に到達した時刻の画像。黒点トランジットに伴って、可視光ではライトカーブが減光する一方、彩層やコロナに感度を持つ紫外線・X線では増光が生じる。唯一、遷移層に対応する紫外線(左下)では、ライトカーブが減光を示す場合があることが明らかになった。(Credit: ISAS/NAOJ)

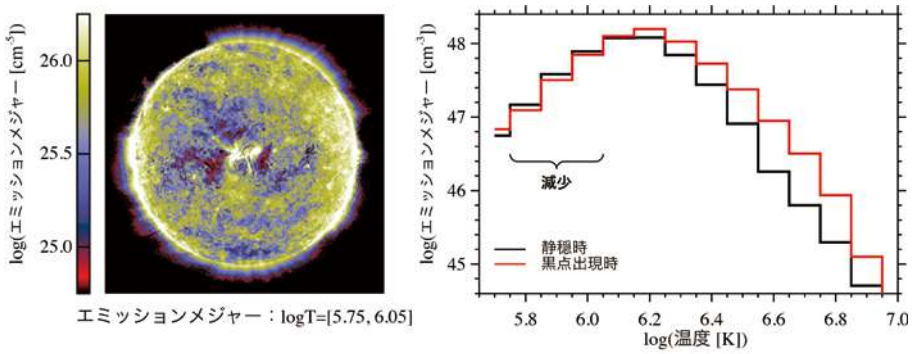


図2：エミッションメジャー解析の結果。（左）遷移層温度（60万から80万度付近）のエミッションメジャーについて太陽面上の分布を示した画像。太陽面中心の黒点上空では遷移層温度のエミッションメジャーが増加する（黄・白）が、周囲の広い領域ではエミッションメジャーが減少している（青・赤）。（右）太陽面全体で積分したエミッションメジャー。黒点出現時には、遷移層温度（60万から80万度付近）のエミッションメジャー（赤線）は静穏時（黒線）よりも減少する。一方、100万度以上のコロナ温度におけるエミッションメジャーは、静穏時と比べて大幅に増加している。（Credit: ISAS/NAOJ）

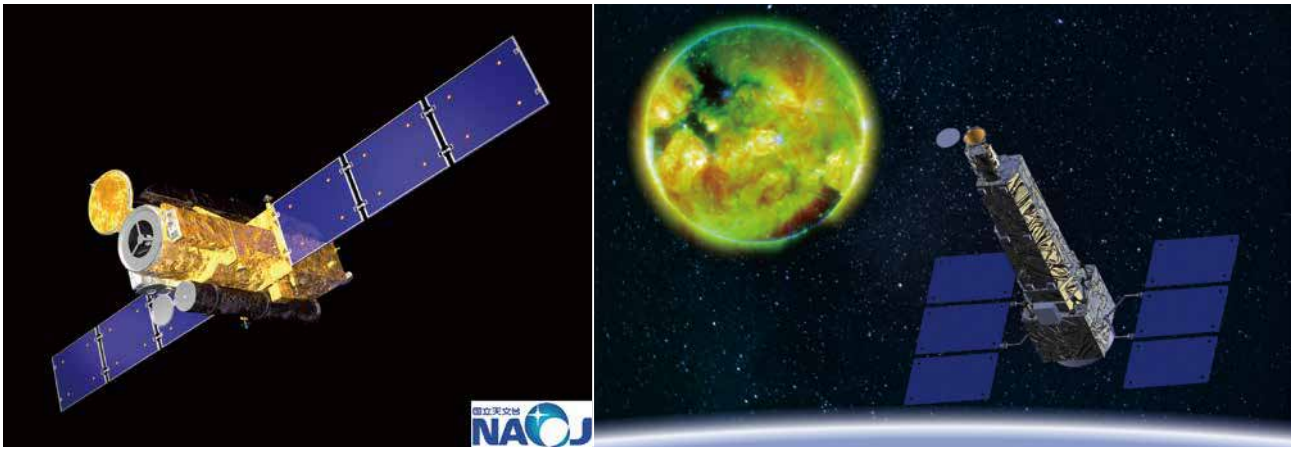


図3：（左）太陽観測衛星「ひので」（右）次期太陽観測衛星「Solar-C（EUVST）」（Credit: NAOJ/JAXA/Solar-C WG）

合計4機の太陽観測衛星が取得した、全14種類のデータを用いました。「ひので」は2006年に、「SDO」は2010年に打ち上げられ、それぞれ太陽全面を撮像するモニター観測を続けています。

私たちは、過去10年以上に及ぶ膨大な観測データから、太陽面上を孤立した単独の黒点群がトランジットした期間を選び、黒点トランジットにともなう各波長帯のライトカーブと、その変動の要因を調べました。黒点が1群のみトランジットする状況であれば、ライトカーブが比較的単純でかつ大きく変動することが期待でき、黒点とライトカーブの変動の対応づけが容易に行えるためです。しかし、1自転周期（約26日）にわたって太陽面上に黒点群が1つだけという状況は、必ずしも多くありません。約11年に及ぶ太陽活動周期のうち、極小期には黒点がほとんど出現せず、反対に極大期には多数の黒点群が同時に出現します。研究は、およそ1ヶ月にわたって黒点が1群だけ存在するという、理想的な期間を洗い出す作業から始まりました。

図1は、今回の研究で得られた代表的な黒点トランジットの様子です。各パネルの実線は、黒点群（活動領域12699）が太陽面をトランジットした際の複数の波長帯におけるライトカーブを示しています。分かりやすいよう、それぞれのライトカーブを、黒点が太陽面の中心付近に到達した時刻における全面画像に重ねています。ムービーはNASAのプレスリリースサイト[2]から閲覧することができます。

まず、光球に対応する可視連続光（図1左上）では、黒点が周囲に比べて暗いため、ライトカーブは減光して見られます（谷が現れる）。光球では偏光観測により磁場強度を求めることができ、磁気活動の指標として、磁場強度の絶対値を太陽面全体で積分して得られる磁束量を用います（図1中上）。この磁束量は、黒点が太陽面の中心付近を通過するときに最も大きく観測されます。次に、彩層やコロナでは、黒点上空の磁場やコロナループが明るく輝いて見えるため、紫外線やX線のライトカーブは、多くの場合、黒点通過時に増光して観測されます（図1右上、中下、右下）。

ところが、彩層とコロナに挟まれた薄い大気層である遷移層では、遷移層に感度を持つ紫外線で観測すると、ライトカーブが減光する場合があることが分かりました（図1左下）。黒点上空の磁気ループは明るく輝いているにも関わらず、太陽面全体で輝度を積分すると、黒点が存在しない静穏時よりもさらに暗くなるという、奇妙な事実を示しています。

この謎を解明するため、私たちは、観測データをもとに、各温度帯におけるプラズマの存在量（エミッションメジャー）を測定しました（図2）。その結果、遷移層に対応する、温度が60万度から80万度付近のプラズマは、黒点を取り囲む広大な領域（面積で太陽面の約4割）でエミッションメジャーが減少していることが分かりました（図2左）。この効果は大きく、太陽面全体でエミッションメジャーを積分しても、黒点出現時の遷移層温度のエミッションメジャーは、黒点の存在しない静穏時と比べて減少していました（図2右）。反対に、100万度以上のコロナ温度の成分は静穏時よりも増加していました。これらのデータから、黒点が存在すると、その周囲の広い領域でプラズマが加熱されることが分かります。そのため、遷移層に感度のある紫外線では、ライトカーブが減光することが分かりました。

さらに、彩層に感度を持つ紫外線のライトカーブ（図1右上）と光球の磁束量のカーブ（図1中上）が良い相関を示すこ

とや、光球のライトカーブとコロナのライトカーブでは増光・減光のタイミングに差があり、その時間差はコロナループの空間的な広がりに対応することなども明らかになりました。これらの結果は、空間分解が困難な遠方の恒星観測であっても、複数の波長帯でライトカーブを取得することで、恒星黒点の空間的な構造や磁場についての情報を得られる可能性を示しています。

以上の結果は論文としてまとめられ、査読を経て出版されました[1]。また、「SDO」衛星の運用主体であるNASAから打診があり、「ひので」の運用主体であるJAXA宇宙科学研究所・国立天文台と共同で、10月上旬にプレスリリースを行いました。

将来への展望と謝辞

これまでの観測装置では感度が足りず、可視光以外の波長帯（紫外線やX線）では、星間物質による強い吸収に打ち勝って恒星黒点を観測することは困難とされてきました。しかし、現在開発が進められている米国の「ESCAPE」や日本の研究機関も装置を提供するロシア・スペインの「WSO-UV」などの紫外線宇宙望遠鏡を使えば、感度が大幅に向上し、遠方の恒星についても紫外線でモニター観測を実現できるかもしれません。恒星黒点の存在により恒星の紫外線放射がどのように空間分布し、時間変動するのかを調べておくことは、恒星の手前を横切る系外惑星を紫外線で検出し、大気の特徴付けを行う際に、測定の不定性を見極める上でも重要です。

また、「ひので」（図3左）の後継機として日本が中心となって欧米と開発を進める次期太陽観測衛星Solar-C（EUVST）（図3右）は、彩層からコロナまでの幅広い温度帯を隙間なく高感度で観測し、大気加熱やフレア発生機構の解明に挑みます。「ひので」を大きく上回るSolar-C（EUVST）の圧倒的な感度や分解能を活かした観測により、太陽大気が紫外線放射を生じるメカニズムを、これまでにない精度で解明できると期待されます。次世代の高精度太陽観測と新たな宇宙望遠鏡で実現する恒星観測を組み合わせることで、恒星黒点の構造や時間変化を解明できる可能性があります。

本研究は、「ひので」を含む各衛星が10年を超える長期間の運用を継続したからこそ実現した研究です。安定した運用を続け、データを世界に向けて公開する努力を続けてこられた全ての皆様に深く感謝します。

[1] Toriumi, S. et al., 2020, The Astrophysical Journal, 902, 36
[2] https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/a-new-look-at-sunspots-is-helping-nasa-scientists-understand-major-flares-and-life-around/

ISAS事情

彗星ダストトレイルとベピコロンボ

2020年8月、MMO（「みお」）を含むベピコロンボ探査機は、地球からスウィングバイを行う金星に向かうクルージング中に彗星ダストトレイルを通過しました。彗星ダストトレイルは彗星が軌道上に放出したダスト粒子が、その母天体の軌道上付近を運動し続けているもので、地球と交差する場合にはそれらのダスト粒子が大気に突入することで流星群として観測されます。

今回ベピコロンボが通過したダストトレイルの母天体は、169P/NEATとP/2003 T12（SOHO）という軌道が非常に似ている2つの彗星で、予想されるダスト粒子のフラックスのピークは8月23日でした。これは、Stuttgart大学が開発したシミュレーションモデルIMEXを使って、JPL Small Body Databaseから近日点が3AU以内の短周期彗星のデータを選んで計算した結果から、独マックスプランク研究所のHarald Krüger氏（後述するMDMのチームメンバー）が予想したもので、図1にベピコロンボが交差する彗星ダストトレイル粒子のフラックスを示しています。IMEXで扱っているのは100 μm以上のダストのみで、それより小さいものは太陽輻射の影響を強く受けて軌道から散逸しやすくなります。小さいものも含めると実際は図1に示されているフラックスはより大きくなると考えられます。

ところで、「みお」には水星ダストモニター MDM（Mercury Dust Monitor）というダスト粒子の衝突を検出する観測装置が搭載されています。クルージング中の「みお」はサーマルシールドに覆われているためMDMの視野も非常にせまくなっていてダストの観測をしません。今回の彗星ダストトレイルに際してサーマルシールドの開口部をダスト粒子の到来方向に向けて頂いて観測を行いました。というのも、これまでに彗星ダストトレイル粒子を軌道上で直接的に観測した例はほとんどなく、条件は悪くとも、あわよくば観測できればその価値は高いのではと考えたからでした。

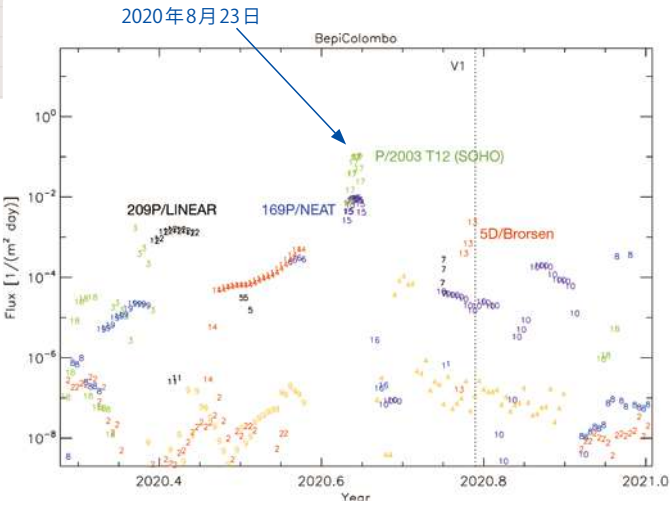


図1：ベピコロンボが交差する彗星ダストトレイル中のダスト粒子のフラックス。異なる彗星ダストトレイルの区別のために色分けされた数字で示している。ダスト粒子は100 μm以上のもので、Stuttgart大学が開発したIMEXモデルによって予測されたものである。

結果として、MDMでははっきりとダスト衝突と思われる信号は確認できませんでしたが、8月23日にベピコロンボ探査機のスタートラッカー3台に一時的なトラブルがあり、それが彗星ダストトレイル粒子によるものではないかと考えられています。水星までの道のりは長いのでさらに大きな彗星ダストトレイルに遭遇する可能性もあります。次の機会に期待したいと思います。

（小林 正規）

特　集

「はやぶさ2」カプセル地球帰還

撮影：丸山 拓馬　機材提供：キヤノン株式会社

サンプルリターンの襷、繋ぎきった!

2020年12月6日午前2時54分（日本時間）、ウーメラ砂漠にて、再突入カプセルから発信されるビーコンが消滅。小惑星サンプルリターンミッション「はやぶさ2」のアンカーを担うカプセルが、地球帰還のゴールテープを切った瞬間でした。

それは恐ろしく難易度の高いリレーでした。リュウグウからの帰路、イオンエンジンチームと軌道計画チームは、一切気を抜かず敢えて「非最適」にすることで頑強性を高めた動力航行軌道を辿り切りました。システムチームは一発勝負のリエントリ運用を精緻で頑強なものにすべく、ノミナル計画の100倍の分量はある緊急対処手順を練り上げました。姿勢系チームと軌道決定チームはリエントリ精密誘導の肝になる「絶対に外乱を発生させない」細心の運用管理に成功しました。リエントリ成功のための軽重を完璧に理解したサイエンスチームは、絶妙な隙間を狙って効果的な観測計画を挿入、「はやぶさ2」成果の“積み増し”に余念がありません。リュウグウ到着前にすでに2隊に分割したプロジェクトチームのもう片方である「回収班」は、JAXAの得意分野とは決して言えないフィールド作業の準備を着々と進め、答えを誰も教えてくれない新型コロナウィルス対策を施して、豪州の地に展開しました。

大気圏突入後、予想と1秒と違わずウーメラの夜空に現れた火球は、整然と美しい光を放ちました。私は、探査機もろとも突入した初号機ほどの華やかさがないことに、むしろ身震いを覚えました。これぞ“Controlled Reentry”の光跡、地球帰還技術の完成形を見た思いでした。「はやぶさ2」は、近傍フェーズを完全成功させた時点で「7つの世界初」を達成しましたが、今回の成功で「地球圏外の天体からのガス状物質のサンプルリターン」「C型小惑星の固体物質のサンプルリターン」の2つの世界初が加わりました。

サンプルリターンは長い長い襷リレーです。一つの襷を繋ぐためにたくさんのサイドストーリーが生まれたのですが、その一端をこの特集でお伝えできればと思います。

私からは小さな蛇足。元地球外物質研究グループ長の圦本尚義先生は、私とカプセルの開封作業を見ながら、「『はやぶさ2』は0.1gのサンプルを採取する設計と君は言っていた。君は工学者だからそれより多く入っていたら残念がらなければ」という主旨のご発言。確かに工学者としてはそうあるべきかな?「はやぶさ2」は、大変“遺憾”ながらその50倍を超える量を持って帰ってきてしまいました。しかしそれがわかった時に圦本先生の顔が緩み切っていたのを私は知っています。真の価値を理解し、キュレーションチームを困らせるほどのサンプルを持ち帰ったプロジェクトチームの皆さん、素晴らしい仕事でした!!

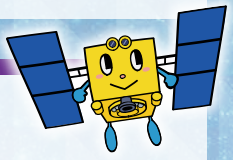
プロジェクトマネージャ　**津田 雄一**（つだ ゆういち）

オールJAXAでの回収

「はやぶさ2」のカプセル回収ではプロジェクト外、ISAS外の多数の方に支援していただきました。“多国籍”が集まって各係に分かれてしまうので、全体計画の浸透や連携が心配でしたが、コロナ隔離期間中のオンライン会議などで補完を試みました。結果的には大きなトラブルもなく、ほぼ最速の回収・輸送ができました。責任を果たせたことで安堵するとともに、オールJAXA（言い過ぎ?）でこれを達成できたことがさらに嬉しいです。

サブマネージャ／カプセル回収班　**中澤　暁**（なかざわ さとる）

帰還を終えて



カプセル帰還を無事に終え、バトンをサイエンティストの方々にお渡しすることができて、ホッとしています。NECグループとしては、探査機システム全体の取り纏めのみならず、化学推進系と一部のミッション系機器、及びカプセル／衝突装置の電気系以外を除く、全サブシステム／搭載機器を担当させていただきました。また、地上系の衛星管制、局管制、アンテナ局送受信系のほとんど、運用計画系、軌道計画、運用技術支援も担当させていただきました。部品担当者や、基板の組立／検査担当者まで含めると、数百名のメンバーが、歴史に名を残すプロジェクトの成功を信じて、全力を尽くしました。それがとうとう、完璧な形で実を結びましたね。みなさん、本当におめでとう！

NECプロジェクトマネージャ　**大島　武**（おおしま たけし）

リュウグウ試料の地上分析への期待

完璧に近いリエントリ運用により、数mmを超える大型粒子を多数含む計5.4gものリュウグウ試料が無事回収されたことは、何にも増して喜ばしいことです。近傍観測や人工クレーター生成実験で浮上したいくつもの新たな謎に対し、いよいよ地上分析により解答を与えようという段階となり、わくわくするとともに身の引き締まる思いです。特に注目するのは、水の含有量とその存在形態・成分元素の同位体比、有機物の含有量と成分・鉱物との共存関係、粒子の空隙率や強度・熱特性、母天体から現在に至る歴史などの解明です。工学チームの素晴らしい仕事と搭載機器による科学観測の価値が、地上分析の成果を通じてさらに高められるものと信じています。

名古屋大学／プロジェクトサイエンティスト　**渡邊 誠一郎**（わたなべ せいいちろう）

Hayabusa2 has been a great success story of 2020. Being in the field to retrieve it will live with me forever. The first sample of a C-type asteroid is now in the lab and waiting for analysis in 2021. Looking forward to being back in Japan.

Trevor R. Ireland
Professor, Research School of Earth Sciences College of Science
The Australian National University

The successful return of samples from asteroid Ryugu is a momentous occasion. The sample return marks the end of one amazing journey and the beginning of a new one. I am proud of my small role in Hayabusa2 and look forward to analyzing the samples for years to come!

Dante Lauretta
OSIRIS-REx Principal Investigator
Professor, University of Arizona

カプセル分離、その頃管制室では

2020年12月5日のお昼頃、管制室は緊張感に包まれていました。その日はカプセルを分離し、大気圏に突入させる運用の日でした。困難な小惑星近傍フェーズをやりきった運用チームにとって、何でもない運用であると思われるかもしれません。確かに、地球近傍で電波の遅延がないというのはありがたい状況ですが、絶対にやり直しのきかないという点が運用チームにプレッシャーをかけていました。もちろん準備は万端で、事前に訓練とリハーサルも行ない、チームは自信を持って当日を迎えています。それでも、“絶対”はないことはチーム全員が知っています。

運用はカプセルを外部電源からバッテリ電源に切り替えることから始まりました。カプセルチームのホッとした表情がチームを安心させます。その後は拍子抜けするくらい計画通りでした。全ての分離準備が整い、後は定刻の分離を待つだけ。「3、2、1、カプセル分離」。皆が探査機の挙動に注目します。分離成功！ 管制室が「わぁ」と盛り上がります。それでも皆はすぐに冷静になり、次の地球離脱に向けて作業を進めていきます。本当に素晴らしいチームです。探査機の地球離脱のエンジン噴射も無事終了。化学推進系のチームもホッとしています。これで、打ち上げ以来皆で繋いできた襷をカプセルチームとカプセル回収チームに渡すことが出来ました。サンプルリターンミッションは、皆の想い（とプレッシャー）が蓄積されていく襷を繋ぐ駅伝のようなものです。誰一人欠けてはなりません。探査機管制メンバーはやり切った顔をしています。私も「後はよろしく」とカプセルチームににやけ顔でプレッシャーをかけることを忘れません。この時、すぐにその後の探査機の長時間の日陰通過で再度胃がキリキリし始める事はすっかり忘れていました。ゴールの後にすぐに再スタート。何と長い駅伝でしょうか（笑）。

プロジェクトエンジニア　**佐伯 孝尚**（さいき たかなお）

軌道決定

軌道決定チームの任務は、地上パラボラアンテナによる電波計測で「はやぶさ2」の軌道を正確に把握し、カプセルを豪州に向けて正確に誘導する事でした。JAXAの軌道決定チーム、定常運用をサポート頂いている富士通チーム、NASA/JPLの Shadow navigationチームの3者が各々独立に開発した3つの異なるソフトウェアで計算した軌道を比較しあう事により、リスクを最小とする体制をとりました。解に僅かな差異があった場合には原因を探るために三者でとことん議論を尽くし一つの解を選択しました。地球から1,700万km離れた10月22日の第1回軌道調整（TCM-1）の時点で数km程度あった軌道決定誤差は、地球に近づくにつれ小さくなり、11月30日の最終軌道決定解に基づいて実施された最終軌道調整（TCM-4）の結果、予定されたリエントリ点（カプセルが地上からの高度200kmに到達した時の位置）から僅か120mの地点にカプセルをリエントリさせる事ができました。

カプセル分離運用の成功を祝う管制室の運用メンバー

軌道決定担当　**竹内　央**（たけうち ひろし）

おかえり、カプセル！

「入感！」

豪州の回収班から発せられたこの短い一言が管制室に響いた瞬間、カプセルが所定の機能を果たしてミッションの成功に至ったことを確信し、喜びと安堵の気持ちで飛び上がりました。

多くの人々に応援を受けた前人未踏のミッションの最後の関門にてバトンを渡されることの重圧は、帰還の日が近づくにつれ日増しに大きくなり、本当に苦しい思いもしましたが、相模原でカプセルと6年ぶりに対面した際には、この仕事に携われた喜びを噛みしめることができました（カプセル担当の特権！）。帰還したカプセルは、6年間52億キロの旅の末、秒速12kmの超高速で大気圏に再突入、表面温度が約3000℃に達するような過酷な環境に晒されながら、その内部は打上げ前と見分けが付かないくらい綺麗で、サンプルをしっかり守ってくれたことに本当に感動しました。皆様にもぜひご覧いただきたいと思っています。

再突入カプセル担当　**吉原 圭介**（よしはら けいすけ）

国際協力で成し遂げたカプセル帰還

「はやぶさ2」国際調整はカプセル回収の地、豪州対応が中心でした。カプセル着陸許可（AROLSO）取得が初号機では直前となった教訓から、豪宇宙庁ASA窓口に早めに申請するも、進捗する前に新型コロナによる渡航制限で対面調整もできず焦りも。在豪日本大使館などの支援も得て、JAXA-ASA会合や日豪首脳会談でも「はやぶさ2」協力に言及してもらうなど多方面に手を尽くして促進し、8月に何とかAROLSOを取得。新型コロナ禍での特例入国・回収活動にはASAより豪州各所に調整をしてもらい、カプセル再突入時にはASA長官、大使館や在豪メディアのウーメラ参加も得て迎えることが出来ました。相模原でも豪大使館に加え、仏CNES、独DLR、米NASAの駐在員参加や代表メッセージなどで応援をもらいました。「はやぶさ2」カプセル帰還を多くの国際協力も得て達成できたことは非常に感慨深いです。

国際担当　**東覚 芳夫**（とうかく よしお）／**亀﨑 沙紀子**（かめさき さきこ）

カプセル分離・帰還生中継 顛末記

「いま何が起こっているのかをタイムリーに伝えろ。派手にやれ。」、「世界中の人にハラハラドキドキしてもらいたい。」という要求を果たすべく、運用と掛け持ちでネット中継の準備を進めました。我々が一番伝えたいことを余すところなく伝えるため、台本は私の手作りです。加えて字幕放送の準備やゲスト調整等など、運転手だった筈なのにプロデューサの仕事に奔走しました。苦労の甲斐あって、完璧な探査運用の雰囲気を、生々しく伝えられたのではないでしょうか? 今回の広報活動が、将来の科学への投資や子供たちの将来に影響を与えたなら大成功です。

イオンエンジン／広報担当　**細田 聡史**（ほそだ さとし）

日豪の同じ想いが成し得た回収オペレーション

回収班は、サンプルリターンカプセル（SRC）リエントリの11時間後には全てのSRC構成品を回収し終え、56時間後にはそれらを相模原のキュレーション室に届けることが出来ました。理想のタイムラインを掲げて臨んだオペでしたが、現実の結果となり、一番驚いているのは我々回収班かもしれません。

回収オペは、先発隊による日本国内ホテル隔離に始まり、帰国後の国内隔離が完了するまでの66日間にも及ぶ長期オペでした。その内、半分以上である5週間を隔離期間として過ごしました。長期間、制限環境を強いられることによるモチベーションの低下が心配でしたが、自己紹介、回収オペ及びチーム概要説明など、テレコンを用いた2時間規模の交流イベントを平日の夕方にほぼ毎日開催したことにより、むしろ意識向上と回収班として不可欠な目標の共有化が図られました。結果的に重要な期間であったと思います。

現地入り後は、日本からの輸送機材の到着遅れや南オーストラリア州でロックダウンが発令されるなど、何度か危機的な状況に陥りました。そのような状況にもかかわらず、完璧と言える結果を得るに至った一番の要因は、回収班のみならず、現地国防省（DoD）、宇宙庁（ASA）を筆頭に日豪関係機関が、このオペレーションを自分のミッションの如く熱心、且つ真剣に取り組んでくれたことであると思います。また、そのような雰囲気づくりに成功したプロジェクト構成員一人一人の成果であると思います。

カプセル回収班　**川原 康介**（かわはら こうすけ）

受信局アンテナ組み立ての様子

方探訓練を積み重ね、待ち構えたカプセル帰還

着地点予測エリアを囲むように5つの受信局を設置し、ヘリコプターによるビーコン方探訓練と5回のリハーサルを経て本番を待ちました。砂漠の強風で1局が倒れ受信局アンテナが大きく損傷しましたが、“ちゃんこ”チームDFSの本領発揮、本番までに無事修復し完璧な方向探査を実施できました。「練習より本番の方が簡単」が全員の感想です。システム要求3Kmのところ約200mの精度でカプセル着地点を予測し、早期回収に貢献できたことはDFS係全体の喜びです。

カプセル回収班（方向探索係）　**藤田 直行**（ふじた なおゆき）

カプセル帰還のとき、ふたたび空は晴れ渡った

光学班の任務は、地上や航空機からの光学観測によって、カプセル軌道と着地点を予測し、また科学的光学観測を行うことでした。総勢10名の班員は、7名が3つの地上局に、3名が航空機に配置され、カプセルの帰還を待ちました。航空機観測は導入したものの、やはり最大の関心は天候でした。幸い、初号機と同様に、雲はカプセル到着直前に晴れ上がり、すべての観測局で完璧な観測を行い、カプセル軌道を決定することができました。

カプセル回収班（光学観測係）　**藤田 和央**（ふじた かずひさ）

望遠追尾カメラによって撮影したカプセル火球（F=1,800mm）。

最先端AI技術でカプセル探索に成功！

ドローン係は無人航空機で指定した領域を隙間なく空撮し、物体認証技術を使って着陸したカプセルを探索する試みです。今回の回収ミッションで様々な改良と事前訓練を繰り替えして臨みました。しかし機材の到着が遅れに遅れ、準備とリハーサルに実質2日間しか時間がないというアクシデントに見舞われ、慣れない条件で本番となってしまいましたが、ヒートシールドの1つを確認することに成功し迅速な回収に貢献できほっとしています。

カプセル回収班（ドローン係）　**田中　智**（たなか さとし）

マリンレーダによるカプセル探索

ウーメラ砂漠に展開した4つの船舶用レーダでカプセルを追いかけました。内之浦での試験や昨年の現地リハーサル、幾度もの国内訓練で過ごした2年間は、すべてこの日の一瞬とも言える探索のためです。準備は万全でしたが、前夜は自ずと空に祈らずにはいられませんでした。結果は3つのサイトでカプセルを捕捉し、着地点付近約200mまでの探索に成功しました。「はやぶさ2」の偉大なる功績に微力ながら貢献できたことは私たちの誇りです。

カプセル回収班（マリンレーダ係）　**林　大介**（はやし だいすけ）

カプセル回収の様子

カプセルはしっかり飛んで、着地した

カプセルの専門家（?）として、事前調整、着地許可取得、豪州Go-NoGo判断、本番を通じ、飛行解析を行ってきました。一条件5,000ケースの解析には、3～8時間の計算時間を要し、毎回数条件をこなすために、これほどCPU性能が求められたこともありません。何とか間に合い、結果をマリンレーダ、地上光学観測を含む方探チーム、航空機観測チーム、そして豪州レーダチームに渡すことができまず一安心。いよいよ再突入では、ビーコン受信の瞬間、当日の強いジェット気流にもよらず、方探局が予測どおりの結果を導出してくれる瞬間、感動でゾクゾクしました。着地点が決まれば、心もスイッチです。カプセルの回収・安全化処理担当として現場に赴きます。低木の下に着地しているカプセル（I/M部）。こみ上げる万感の想いを押し殺し、火工品の状態をみるべく淡々と安全化作業に入ります。パラシュートは付いたまま。もしやアンカ非分離・火工品未作動? いえいえ、予め決めておいた手順に則り、ライザをスッと引っ張るとスルッと抜けるアンカ。よかった。完璧な着地でした。

カプセル回収班　**山田 哲哉**（やまだ てつや）

リュウグウ試料の受け入れ準備と今後の活動予定

リュウグウからの帰還試料の受け入れに際し、地球外物質研究グループでは、地球の大気にさらすことなく作業が行える専用のクリーンチャンバーを、クラス1000のクリーンルーム内に設置しました。「はやぶさ2」専用クリーンチャンバーの最大の特徴は、小惑星の環境に近い真空環境下での試料ハンドリングが行えることで、世界でも類を見ない技術となっています。真空環境下での試料の取り扱いは、地球環境からの汚染を防ぐという点では最も有効な方法である一方、内視鏡とマニュピュレーターに頼らざるを得ないことから、熟練の技術が必要です。我々地球外物質研究グループは、合計4回の通しリハーサルや、「はやぶさ2」サンプラーチームとの合同リハーサルに加え、各工程での要素試験を幾度となく実施し、手順や治具の改良を行ってきました。果たして本番では、リハーサル通り真空下でサンプルコンテナ・キャッチャを開封し、リュウグウ試料の回収・保管に成功しました。

現在、リュウグウ試料は、真空環境で保管されている一部を除き、大部分は窒素環境チャンバーに移動され、光学顕微鏡による詳細観察が進められています。今後は、試料全体の観察を行った後、粒子ごとの観察に進む予定です。今後の観察では、光学顕微鏡に加え、可視・近赤外領域における分光・イメージング観察を行い、リモセン観測データとの比較を可能とします。

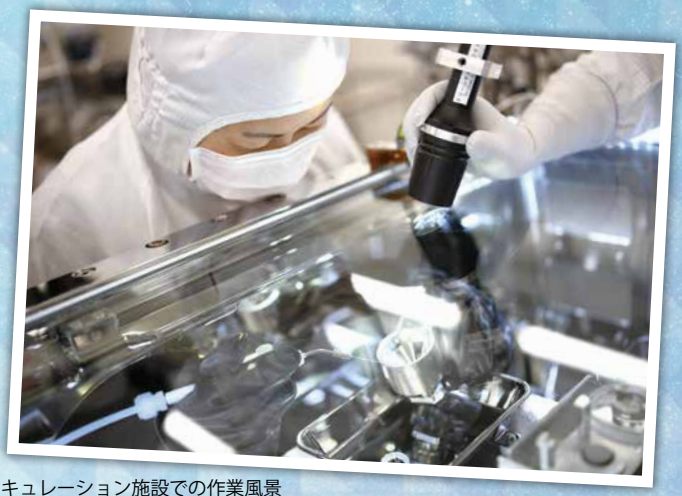
「はやぶさ2」では、想定内ではあるものの、目標値の0.1gを桁で上回る約5.4gの試料を回収しました。当然ながら、多量の試料の分析で得られる科学的知見は増大します。加えて、グラム単位を超えるリュウグウ試料の取り扱いで得られる経験は、OSIRIS-REXのみならず、MMXによって2029年に帰還予定のフォボス試料（目標値:＞10g）のキュレーション・分析技術の開発に大きく貢献することになるでしょう。

地球外物質研究グループ グループ長　**臼井 寛裕**（うすい ともひろ）

帰ってきたリュウグウサンプル

昨年12月6日、「はやぶさ2」再突入カプセルは、豪州ウーメラ立入制限区域（WPA）に無事着陸しました。カプセルは発見後すぐWPA内に設置されたQuick Look Facility（QLF）に運び込まれ、内部のサンプルコンテナが取り出されました。コンテナはQLF中の簡易クリーンラボで、ガス採取装置に取り付けられ、翌7日にガス採取がおこなわれました。7日深夜にカプセル、コンテナは現地を発ち、8日午前に宇宙研のキュレーション施設に運び込まれました。その後、サンプラーチームによって、コンテナ開封準備作業が進められ、12月15日に第1回タッチダウンで採取された粒子が確認されました。その後のキュレーションチームの作業で、試料総質量が5gを超えること、第2回タッチダウン試料には、サンプラーの採取可能最大サイズである1cm程度の礫が存在することが明らかになりました。ミッション要求「天体表面の複数地点で合計0.1g以上の試料を回収し、地球での汚染を最小限に分析に提供できること」を考えると、2回の着地で採取されたサンプルが個別に格納され、その総量が5gを越えたということで、サンプラーチームにとっては大きな喜びでした。深宇宙からのサンプルリターンとしては現時点で世界一のサンプル量になります。今後、試料は宇宙研キュレーションでの約6ヶ月の初期記載作業の後、プロジェクトが主導する1年間の初期分析が始まります。初期分析には国内外の地球外物質の専門家が集まり、化学（圦本 尚義・北大）、粗粒粒子鉱物学・岩石学（中村 智樹・東北大）、微粒子鉱物学・岩石学（野口 高明・九州大）、揮発性物質（岡崎 隆司・九州大）、固体有機物（薮田 ひかる・広島大）、可溶性有機物（奈良岡 浩・九州大）の6つのサブチーム（括弧内はチーム代表）がリュウグウ試料の物質科学的特徴を詳細に調べます。リュウグウを通じて、太陽系の誕生と初期進化、地球の海や生命の材料の進化の解明に近づきたいと考えています。「はやぶさ2」のリュウグウへの旅は終わりましたが、リターンサンプルの科学はこれからスタートです。

東京大学／サンプラー・初期分析担当　**橘　省吾**（たちばな しょうご）



キュレーション施設での作業風景

新たな世界へ

2020年12月6日、「はやぶさ2」は新たな深宇宙の旅へと飛び立ちました。次の目的地は、1998 KY26という、直径30m程度の非常に小さな天体です。これまでに予定していたミッション全てが順調に進んだため、余分に搭載していた燃料で到達することが可能なのです。但し、到着は2031年。その間、小惑星2001 CC21へのフライバイ（2026年）や、2回の地球スイングバイ（2027、28年）を予定しています。既に全てのミッションをやり切った「はやぶさ2」に、さらに10年以上の挑戦を期待するのは少し酷なようにも思いますが、諦めない心の象徴であるこの探査機は、その歩みを止めない限り、きっと新たな成果や感動を、我々にもたらしてくれるでしょう。さあ、「はやぶさ2」、共に新しい旅を始めよう。次に見える景色はどんなところだろう? 早くも胸の高鳴りが止まらない！

航法誘導制御担当　**三桝 裕也**（みます ゆうや）

編集後記

「はやぶさ２」の帰還とカプセル回収の仕事を掛け持ちしたために、超多忙の ２ヶ月でした。

何はともあれ、全てがうまくいって心底からホッとしています。しかし、ミッションも、そしてこの ISAS ニュースもまだこれから続く…。

（田中　智）

JAXA ISASニュース　No.478　2021年1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／株式会社アズディップ

〒 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1　TEL: 042-759-8008

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