JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2020 11

No.476

スイングバイ最接近直前に「ベピコロンボ」推進モジュール搭載モニタカメラが捉えた金星の姿。

2020年10月15日（木）12時58分31秒（日本時間）に金星に最接近、高度10,721.6kmを通過した。可視光では模様もなくほぼ一様に昼面が明るく見える。手前には水星表面探査機の中利得アンテナ（左上）および磁力計搭載マスト（右）が映り込んでいる。
（Credit: ESA/BepiColombo/MCAM）

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

小惑星探査機「はやぶさ2」による人工クレーター形成実験

神戸大学大学院理学研究科 教授　荒川 政彦（あらかわ まさひこ）

はじめに

2019年4月5日、小惑星探査機「はやぶさ2」は、小型搭載型衝突装置（Small Carry-on Impactor略してSCI）により、小惑星リュウグウ表面に直径10mを超える人工クレーターの形成に成功しました。また、このクレーターの形成の様子は、「はやぶさ2」から分離した超小型衛星（Deployable CAMera 3略してDCAM3もしくは分離カメラ）により、その一部始終が観測されました。本稿では、主にこの「はやぶさ2」が成し遂げた人工クレーター形成実験の科学的成果について紹介したいと思います[1]。

「はやぶさ2」ミッションと人工クレーター形成実験

小惑星リュウグウを探査する「はやぶさ2」ミッションでは、リュウグウ表面から試料を採取して地球に持ち帰ることが最も重要な目標となっています。リュウグウは、「はやぶさ」が探査したSタイプ小惑星のイトカワとは違ったCタイプ小惑星であり、水や有機物を含んだ試料を採取することが期待されています。一方、有機物や鉱物中に結晶水として含まれる水は、太陽放射や太陽風、更には宇宙線により、変成・消失する可能性があります。リュウグウの最表面の試料を持ち帰ったとしても、そのような宇宙風化を強く受けている可能性があります。リュウグウの進化を解明するには、もちろん、現在起きている宇宙風化の理解も重要ですが、リュウグウ、もしくは、その母天体内部における過去の進化過程を強く反映した試料の採取が必要です。宇宙風化の影響は、地表面で最大となり地下では小さくなります。太陽放射による加熱の影響は数十cm、銀河宇宙線でも1mほど地下に潜るとその影響はかなり軽減されます。そこで「はやぶさ2」では、地下からの試料採取を実現するために、地面を掘り起こす手段として人工クレーターを利用することにしました。

人工クレーターを惑星探査で実現する試みはNASAで何度か行われています。例えば、フライバイ型のDeep Impactミッションでは、彗星核に370kgのインパクターを衝突させることで人工クレーターを形成し、その時に放出される彗星核物質を観測しています。一方、「はやぶさ2」では、リュウグウにランデブーした状態で「SCI」により人工クレーターを作り、その様子を「DCAM3」により観測しました。さらに、衝突前後のリュウグウ表面を望遠光学航法カメラ（ONC-T）で撮影し、人工クレーターの詳細な地形再現も行っています。「はやぶさ2」は、人工クレーターの視点で言えば、これまでに行われた人工衝突による探査とは一線を画す能動的な惑星探査と言えます。実験室での衝突実験を超える様々な成果が期待されました。

深宇宙での衝突実験

今回の人工クレーター形成実験は、地下物質の採取を目的としたものでしたが、同時にクレーター形成メカニズムを研究するための実験としても位置づけられました。月のクレーターを再現するために始まった衝突実験は、現在も、小惑星を始めとする太陽系天体上に観測されるクレーターを再現し、そのサイズや放出物の速度分布を記述するスケール則を構築するために行われています。クレーターに関するスケール則の応用範囲は広く、例えば、クレーター年代学の較正、天体の表面強度等の物性や表層構造の推定、天体の衝突集積過程、そしてスペースガードなどが挙げられます。

これまでクレータースケール則は、室内実験とそれを元にした理論的研究から構築されてきました。「はやぶさ2」が行ったSCIによる人工クレーターの形成実験は、室内実験並に良く制御された環境下で実施されたもので、このスケール則の検証にはもってこいの機会となりました。この機会を十二分に活用して、室内実験並の観測を行うために「はやぶさ2」では2つの観測運用を行いました。1つは、衝突点領域のONC-Tによる事前・事後観測、もう1つは、DCAM3によるSCI衝突の観測です。この両者が成功したことで、室内実験を超える宇宙での衝突実験を成し遂げることができました。

SCI運用では、SCIから直径13cmの中空銅弾丸が、速度2km/sでリュウグウの赤道付近に向けて発射され、見事に着弾しました。この着弾地点付近の事前・事後観測は、数10cmのクレーターでも判別できるように高度1.7km、解像度18cm/pixelで行われました。また、2度目のタッチダウンに関連して、SCIクレーターの周囲は100m程度の低高度で撮影が行われました。その結果、SCIクレーターそのものに関して、かなり精密なデジタル高度地形図（Digital Elevation Map:DEM）が作られています（図1）。これがクレーター形成メカニズムの研究に役立っています。

DCAM3によるエジェクタカーテンの観測

DCAM3は、理学研究用のデジタル通信が可能な広視野カメラ（DCAM3-D）を搭載しています。SCI運用において、DCAM3は「はやぶさ2」から分離されたあと、2時間以上撮影を続けました。DCAM3-Dは、衝突前にはSCI本体を観測することに成功し、衝突後にはクレーターから放出されるレゴリス粒子が作るエジェクタカーテンを撮影することにも成功しました。SCI本体の位置を確認できたので、リュウグウ上の着弾地点と繋ぐことでSCI弾丸の軌跡を再現できます。この軌跡と地表面の関係から、SCI弾丸は南から北に向けて衝突しており、地表面に対して60°の角度（正面衝突の場合90°）で衝突したことが分かりました。また、着弾地点は予定していた地点からわずか20mしか北にずれていませんでした。DCAM3は着弾点から約1km離れた位置から観測しており、その位置でのDCAM3-Dの分解能は約1m/pixelでした。

SCIクレーターが10mを超える大きさだったので、放出物の量も多く、かなりはっきりとエジェクタカーテンの成長の様子を撮影することができました。

エジェクタカーテンは、衝突直後の数秒は北側一方向に成長し、そのあと、他方向へもゆっくりと成長しました（図2）。衝突後100秒を越えると南側のカーテンが欠損していることが分かるようになり、200秒後ではその欠損はよりはっきりします。一方、クレーターの成長に伴うエジェクタカーテンの成長もこの辺りで終わっており、そのあとはエジェクタカーテンがリュウグウの重力により徐々に表面に堆積していく様子が撮影されています。500秒後になるとそのエジェクタの堆積領域が40m程度にまで広がっています。以上の観測で重要なのは以下の2点です。1つは、SCIクレーターの南側にはエジェクタカーテンが成長していないこと、もう1つは、クレーターの成長時間は200秒以上と長く、放出されたエジェクタが作るカーテンの根元はいつも地表面に接地しているということです。1つめの観測結果は、南側はほとんどクレーターが成長しなかったことを示唆しています。また、二つめの観測結果は、このSCIクレーターの成長を止めたメカニズムが重力であることを示唆しています。

おむすびころりんクレーターからわかること

SCIクレーターは、プロジェクトチームにより「おむすびころりんクレーター」と命名されました。この「おむすびころりんクレーター」は、ONC-Tの事前・事後撮影画像やそれから作られたDEMなどから、幾つかの特徴が浮かび上がってきました（図1、図3）。まず、クレーターの形状は南側が弦の半円形で、その直径は14.5mでした。次に、クレーターの北側周囲は高さ40cmほどの堆積リムで囲まれており、そのリムが作る半円の直径は17.6mでした。また、クレーターの中心付近にはピット状の窪地があり、その直径は約3mで深さは60cm程度、そのピット入り口までのクレーターの深さは約1.7mでした。クレーターの内部には約5mの大きな岩塊（イイジマ岩）があり、これは衝突により3mほど北西に移動しています。一方、クレーター南端の大きな岩塊（オカモト岩）は、衝突点近傍にあるにも関わらず、ほとんど移動しませんでした。

SCIの地上試験では、砂地に約2mのクレーターを形成しましたが、「おむすびころりんクレーター」は、この大きさと比

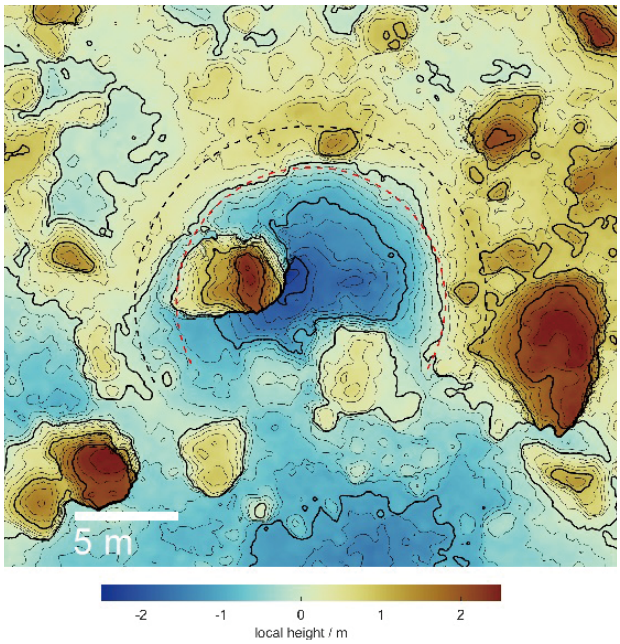


図1：おむすびころりんクレーター付近のDEM。赤点線がクレーター形状を表し、黒点線はクレーターリムの形状を表す。図の上側が北方向を表す。[1]の図を改訂。

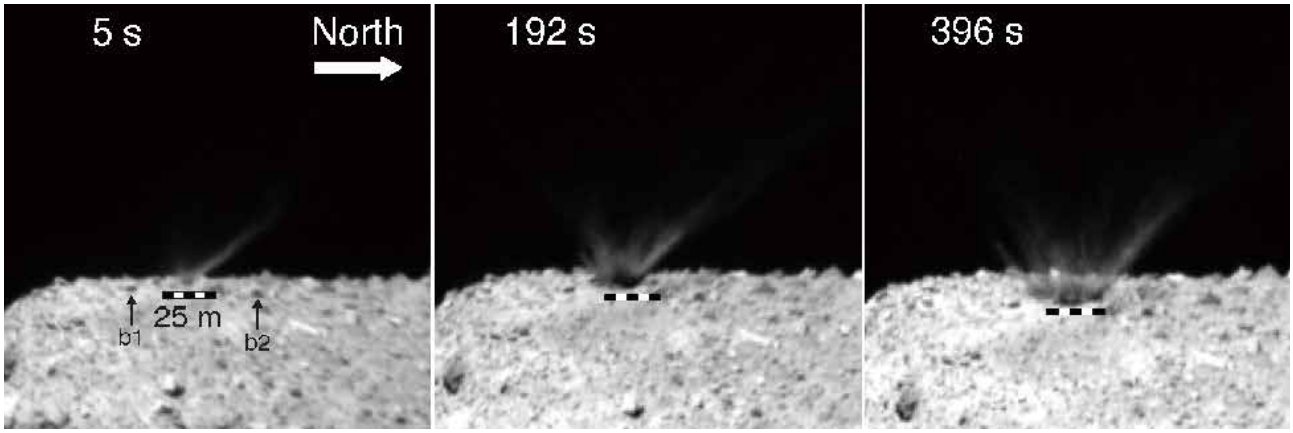


図2：DCAM3-Dにより撮影されたエジェクタカーテンの画像。左から衝突後5秒、192秒、396秒後となっている。それぞれの画像の右側が北方向を表す。[1]の図を改訂。

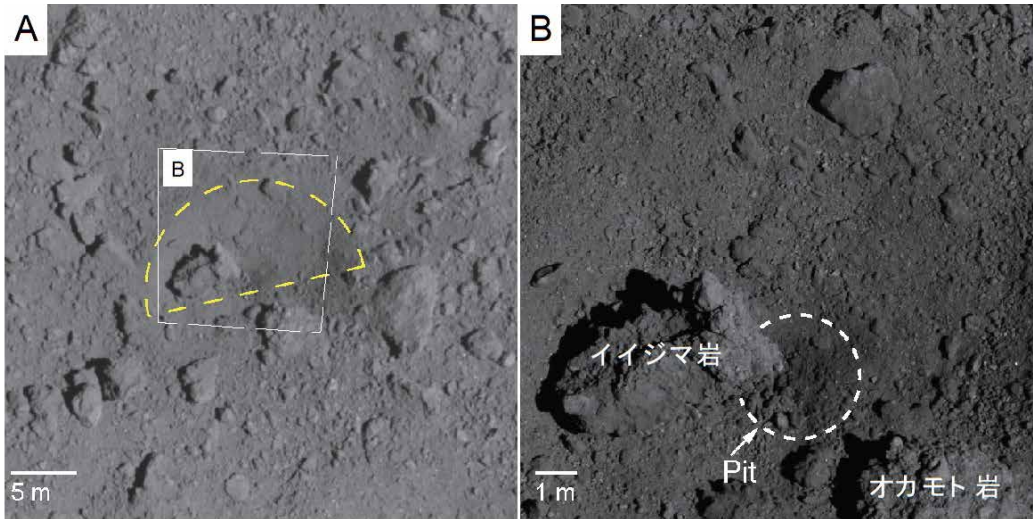


図3：ONC-Tにより撮影された衝突後のSCI衝突点付近の写真。Aはクレーターを中心に周辺領域も撮影した写真。BはA中の四角形部分を低高度から撮影した写真。それぞれの写真の上側が北方向を表す。[1]の図を改訂。

べると7倍以上大きなことが分かります。また、クレーターの半円形の形状は、DCAM3の観測結果と整合的です。南側にクレーターが成長しなかった理由は、オカモト岩で掘削が妨げられたからだと考えられます。オカモト岩がイイジマ岩の様に移動しなかった理由は、オカモト岩は、表面には現れない岩体が地下深くに広がっていたからだと推測されます。ピットの存在は、リュウグウの地下2m程には100～700Paの強度を持つレゴリス層があることを示唆しています。また、クレーター周囲の堆積リムは、砂上に形成されるクレーターの特徴で、クレーターの成長が重力で止められたことを表しています。これらの事実から、「おむすびころりんクレーター」は重力支配域といわれる、重力がクレーターの成長を止める領域で作られたことが判明しました。リュウグウの表面重力が、地上の10万分の1と小さいことが大きなクレーターができた理由と言えます。

サラサラした砂に対して作られた重力支配域のクレータースケール則に、SCI衝突の条件を入れてその大きさを見積もると、半径は6.9mから7.7mとなります。この大きさは「おむすびころりんクレーター」の半径7.3mをほぼ再現しており、リュウグウの表面は砂のようにサラサラして流動的だと言えます。一方、リュウグウの表面は砂地のような場所はどこにも存在せず、一面ゴツゴツした岩塊で覆われています。SCIが衝突した領域も数mから数十cmの岩塊で覆われており、SCI弾丸の直径（十数cm）程度の岩はゴロゴロしていたと思われます。しかしながら、リュウグウ表面の岩塊は、砂粒よりもずっと強度は弱く脆いと言われています。一見、砂地とは大きく異なる地形を持つこのリュウグウに大きなクレーターができた理由は、表面を覆う岩塊が脆く弱いからなのかもしれません。岩塊の強度がクレーターサイズに及ぼす影響については、現在、私達も研究を進めています。

おわりに

2度目のタッチダウンの位置を決める際に、クレーターから放出したエジェクタの堆積領域を特定する必要がありました。その際、DCAM3チームからは、南側へのエジェクタがほとんど成長しておらず、その堆積も確認できないことを報告しました。一方、ONCチームにより、SCI衝突前後のクレーター周囲の反射率変化マップが発表され、エジェクタ堆積が南側ではほとんどないことが報告されました。それらの報告と安全性等を考慮して、クレーターの北側へのタッチダウンが決定し、そのあと、実施されました。SCIによる人工クレーター形成実験に関わった一人として、回収した試料の中に、当初から目論んでいた宇宙風化の少ない試料が含まれることを心から祈っています。

参考文献
[1] Arakawa, M., Saiki, T., Wada, K., Ogawa, K., et al. (2020). An artificial impact on the asteroid (162173) Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime. Science, 368(6486), 67-71.

「ベピコロンボ」金星スイングバイに成功
～「みお」「あかつき」「ひさき」による金星共同観測～

日欧共同水星探査計画「ベピコロンボ」では、2018年10月の打上げから2025年12月の水星周回軌道投入までの間に、地球で1回、金星で2回、水星で6回と合計9回もの惑星スイングバイを実施します。これは惑星探査機として最多となります。2020年4月には地球スイングバイに成功し、今回は1回目の金星スイングバイを実施しました。2020年10月15日（木）12時58分31秒（日本時間）に金星に最接近、高度10,721.6kmを通過しました。金星スイングバイでは金星の重力を利用して約3.25 km/sの減速を行い、そのあとも目標通りの軌道を航行中であることを確認しました。

金星スイングバイの前後では、「ベピコロンボ」に搭載される多くの装置で観測が実施されました。また今回の金星スイングバイにあわせて、現在金星を周回する唯一の人工衛星である金星探査機「あかつき」および地球を周回する惑星分光観測衛星「ひさき」との金星共同観測も実施されました。日本の宇宙機3ミッション共同による惑星同時観測は初めてであり、まさにISASが推進する「深宇宙探査船団」の金星観測編隊が実現したと言えます。「みお」と「あかつき」は同じ2001年に各ワーキンググループからミッション提案書が作成されました。2010年に宇宙へ飛び立った「あかつき」と2018年にようやく打ち上げられた「みお」が2020年に金星で一瞬の再会を果たし、その様子を遠く地球周回から「ひさき」がしっかりと見守る。その構図に心を震わせる多くの関係者の姿が目に浮かびます。

「みお」に搭載された科学観測装置でも、太陽風および金星周辺プラズマ環境の観測を行いました。図1は「みお」による2020年10月15日の観測結果です。金星は地球と異なり磁場をもたない惑星であり、太陽風が惑星に直接作用して衝撃波面や電離圏尾部領域を形成しています。プラズマ粒子観測装置で観測された電子のエネルギー分布を見ると、安定した太陽風中に比べて衝撃波面より内側では金星との相互作用により複雑な分布を示していることがわかります。またイオンは太陽風中ではほぼ直線状に進むため「みお」を囲う太陽光シールドに遮蔽されて検出されませんが、衝撃波面より内側では複雑な運動をみせるため、金星起源とみられるイオンの一部がシールド内に到来し検出に成功しました。こうした金星電離圏尾部領域でのプラズマ観測はまだ例が少ないため、磁場をもたない天体における太陽風の影響を理解する上で貴重な観測結果となります。またプラズマ波動・電場観測器では、水星到着までの限定的な観測制約のもとでも、信号を捉えられることが確認されました。今回捉えた現象は衝撃波面や境界領域の通過に伴って発生している可能性があり、今後の解析でその起源などを明らかにしていく予定です。

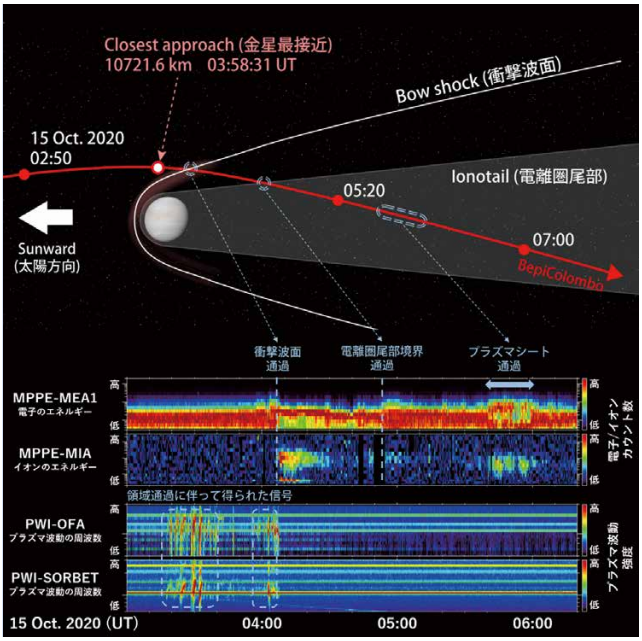


図1：「みお」搭載プラズマ粒子観測装置およびプラズマ波動・電場観測器が捉えた金星スイングバイ時の観測結果。

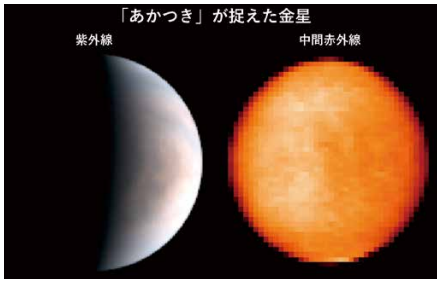


図2：「あかつき」搭載紫外イメージャおよび中間赤外カメラが2020年10月15日13時頃（日本時間）に捉えた金星の姿。（Credit: Planet-C Project Team）

スイングバイ前後では「あかつき」に搭載された紫外イメージャおよび中間赤外カメラによる金星撮像が1～2時間おきに実施され、太陽に照らされた雲の構造（紫外線）および雲表面の温度分布（中間赤外線）が観測されました（図2）。紫外線の画像は2波長の金星観測データを合成した疑似カラー画像で、太陽光の反射を観測しているので昼半球のみ明るく、その濃淡は雲を作る材料物質の量（暗いと多い）を示しています。中間赤外線の画像は観測データをもとにサーモグラフィのように温度分布を色付けした画像で、昼夜問わず雲頂の温度を示しています。

「ベピコロンボ」の水星表面探査機（Mercury Planetary Orbiter: MPO）にも紫外線および赤外線の観測装置が搭載されています。分厚い大気をもつ金星を観測する「あかつき」と大気をほとんどもたない水星を観測する「ベピコロンボ」ではそれぞれ観測装置の仕様が異なるため、それらを組み合わせることで「あかつき」のみでは観測できない波長帯をカバーすることができます。また、「あかつき」では観測できない電離圏などより高層大気における変動をモニタするため、地球周回から惑星分光観測衛星「ひさき」による極端紫外線分光観測をスイングバイ前後1週間にわたり実施しました。これらの観測を組み合わせて解析することで、低層から高層にかけて複雑につながる金星大気力学に関する新たな科学成果の創出を狙います。

金星スイングバイ時に得られたデータの解析が本格的に開始されており、今後の新たな科学成果の報告を楽しみにお待ちください。また「ベピコロンボ」は今後定期的な機能確認に加えて惑星スイングバイ時や惑星間空間巡航時の科学観測運用を実施していく予定です。次回スイングバイは2021年8月10日頃に2回目となる金星スイングバイを実施予定で、最接近高度は今回の1/20となる約550kmを計画しています。まだまだ水星への旅路は続きますが、全く退屈することなく過ごすことになりそうです。

（村上　豪）

TCM-1、カプセル回収班、そしてオサイリス・レックス

地球帰還に向けた「はやぶさ2」の運用や再突入カプセル回収のための準備作業は順調に進んでいます。10月15日には追跡管制隊主任班長会議が開かれ、探査機のTCM（Trajectory Correction Maneuver）運用とカプセル回収班のオーストラリアへの移動がGO（実行してよいとの判断）となりました。

まずTCMですが、リエントリー最終誘導フェーズにおける最初の軌道制御であるTCM-1が10月22日に行われました。TCM-1以降は、化学エンジンによって軌道制御が行われます。「はやぶさ」のときには、化学エンジンが使えなかったので、イオンエンジンで行いましたが、今回は当初の予定通り化学エンジンで行います。TCM-1における軌道制御量は秒速約15cmで、この制御によって、地球への最接近高度が約400kmから約310kmに変更されました。

今後のTCMの予定ですが、微小の軌道補正を行うTCM-2が11月12日に行われます。そして、探査機を地球に衝突する軌道に乗せる重要なTCM-3が11月下旬に、その補正のTCM-4が12月初めに行われます。再突入カプセルは12月5日の14時～15時頃（日本時間、以下同様）に探査機から分離され、その直後にTCM-5を行って探査機は地球圏から離脱することになります。カプセルのウーメラ着地は、12月6日の午前2時～3時です。

一方で、カプセル回収班もいよいよ本格的に動き出しました。10月30日には、相模原市がカプセル回収班の壮行会を開催してくれました。國中所長と津田プロジェクトマネージャは市庁舎にて、出発前に国内で隔離中の藤本副所長、中澤サブマネはじめ4名がオンラインで出席し、本村市長から応援の言葉を頂きました。また、銀河連邦メンバーの相模原市のマスコットキャラクター「さがみん」に加えて銀河連邦6市町のマスコットキャラクターが特別隊員としてカプセル回収班に加わってくれることになりました（うち、写真2の4人？はオーストラリアに同行します）。

写真1：カプセル回収班先発隊（14名）の搭乗カウンター前での集合写真。搭乗便は日本航空JL8823便。便番号は「ハヤブサ」と読むことができます。

写真2：カプセル回収班に同行する銀河連邦のマスコットキャラクター。「はやぶさ2」の模型と回収班ミッションロゴマークも。

11月1日、先発隊の14名がオーストラリアに入国しました。本隊（59名）も1週間遅れて11月9日にオーストラリアに到着しました。それぞれアデレード市内のホテルで2週間の隔離生活のあと、カプセル回収地のウーメラに向かいます。探査機からの“ロングパス”を確実に受け止めたいと思います。

以上は日本の状況ですが、米国でも大きな動きがありました。10月21日の午前7時頃、オサイリス・レックス（OSIRIS-REx）が小惑星ベヌーへのTAGに成功しました。TAGとはTouch-And-Goのことで、「はやぶさ2」のタッチダウンと同じことです。彼らのサンプル採集方法は「はやぶさ2」とは異なって、小惑星表面に窒素ガスを吹き付けて砂礫を吹き上げて採取するものですが、後に公開された動画を見ると非常に多量のサンプルが採取できた模様です。オサイリス・レックスが地球に戻るのは2023年の予定ですが、リュウグウのサンプルと交換することが今から楽しみです。

（吉川　真・中澤　暁）

國中 均 所長が2020年度衛藤細矢記念賞を受賞

JAXA宇宙科学研究所長 國中 均が、2020年度衛藤細矢記念賞を受賞しました。衛藤細矢記念賞は、優れた業績・成果を上げた個人又は団体に贈呈されます。対象者は、日本国の自然科学・技術に関する学術及び産業社会における基盤技術の研究・開発・産業振興などの面で顕著な功績・業績があり、今後さらに大きく進展することが期待される、推薦された人物もしくは団体です。

相模原市立博物館の「はやぶさ」実物大模型の前で。賞状を持っているのが、國中所長。

今回の受賞は、國中 均の電子サイクロトロン共鳴（ECR）イオン源をベースとした宇宙推進装置の開発と、はやぶさミッションへの応用に対する業績が評価されたものです。2020年9月17日に「はやぶさ2」は、のべ22,348時間に及ぶ地球―小惑星リュウグウ間往復のイオンエンジン運転を完了しました。「はやぶさ」と「はやぶさ2」の小惑星サンプルリターンミッションは、ECRイオン源をなしには実現できなかったと言っても過言ではありません。

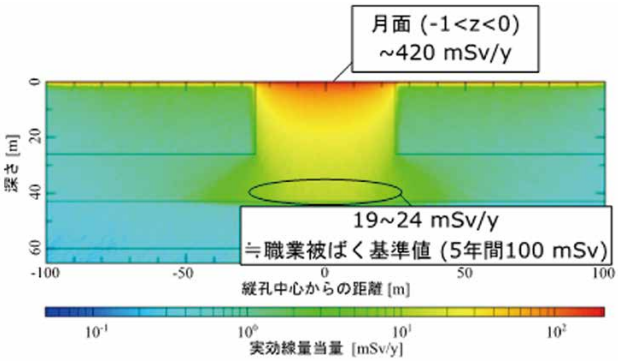
加えて、従来のラングミュアプローブに代わる光ファイバー式プラズマ診断技術を開発し、ECRイオン源の動作状態を測定することに成功したことも高く評価されました。この技術は薄膜生産用プラズマ装置の開発や診断に広く利用される可能性があり、産業技術の振興にも寄与することが期待されています。

月縦孔を利用して宇宙放射線被ばく量を10%以下に低減

宇宙は銀河宇宙線や太陽粒子線をはじめとする様々な放射線が混在する環境です。例えば、国際宇宙ステーション（ISS）に滞在する宇宙飛行士は1日に0.5～1.0mSv（ミリシーベルト）の線量を被ばくしています。これは地上での被ばく量の100倍以上に相当します。将来的に有人活動の拠点が地球近傍のISSから月へと移るのに際して、地球磁場による放射線の低減効果がなくなることや滞在期間が長期化することで、被ばく量が大幅に増大することが懸念されます。そのため、将来の月面有人滞在を見据えると、宇宙飛行士の被ばく量管理と併せて効果的な放射線防護体系の構築が不可欠になります。

我々の研究グループは、月探査衛星「かぐや」（SELENE）によって発見された縦孔地形を放射線防護空間として利用することに着目しました。縦孔地形は溶岩洞のような地下空間の天井が隕石衝突などの衝撃によって崩落したことで形成したと考えられており、その直径・深さは共に数十メートルに及びます。溶岩洞は地球型天体の火成活動により作られる特徴的な地形で、月面での放射線防護に有用であることが知られています。一方で、その現実的な入り口となる縦孔の放射線環境についてはこれまで十分な評価が行われていませんでした。そこで、月表面と縦孔の放射線環境を最新の放射線科学研究に基づく数値シミュレーションによって調査し、それらを比較することで縦孔による放射線防護効果を評価しました。

その結果、月表面では年間約420mSvと地球上に比べて200倍も過酷な環境なのに対し、マリウス丘の縦孔（直径約50m、深さ約45m）の底では被ばく量は月表面の10%以下（年間約19～24mSv）まで低減されることが明らかになりました。縦孔底面から地下空間が実際に広がっていれば、さらに高い放射線防護効果が得られることが期待されます。これまでの縦孔周辺の光学観測やレーダ観測によると、縦孔から続く地下空間の大きさは最大でkmクラス、最低でも十数mはあることが示唆されています。このことから、縦孔と底から続く地下空間を利用することで、地上における職業被ばく基準値（5年間で100mSv）以下の放射線環境を月面に実現できる可能性が高いことを明らかにしました（図）。



縦孔地形周辺の年間線量分布図。縦孔の底では地球上の職業被ばく基準値程度まで被ばく量が低減されている。

近年、月への有人回帰が加速しており、米国や中国による有人月探査の計画が進められています。本成果は、有人月探査や将来の恒久的な月有人滞在に向けて、新たに遮蔽材を持ち込むことなく、月に安全な放射線防護空間を確保できることを示した重要な知見と言えます。実際の放射線環境を取得するために、将来探査において縦孔内の放射線環境を実測することが望まれます。

（内藤 雅之）

齋藤 成文先生を偲ぶ

去る10月7日、齋藤 成文先生が101歳の天寿を全うされました。先生は東大の生産技術研究所にとどまられましたが、我々宇宙工学の大先輩でいらっしゃいます。

「出来ないこと」は出来ません。宇宙科学は工学主導で進みました。工学は非電気と電気に大別され、それぞれのリーダーのもとにいわば双頭政治をしていました。非電気とは妙な言葉ですが、ある意味では言いえて妙で、我々の間で定着しました。初代の糸川・高木体制のあと玉木・齋藤、森・野村、秋葉・林と続きます。別に制度があるわけではなく自ずからなる体制で、如何にも宇宙研らしい在り方でした。あのように小人数の所帯で連続して素晴らしいリーダーに恵まれたことは、一種の奇跡だったと思います。

今年50周年を祝う「おおすみ」の成功は玉木・齋藤体制の下でのことでした。成功の記者会見に臨んだ両先生と実験主任を務められた野村 民也先生の笑顔が、各社の紙面で弾けました。

1969年には科学技術庁所管の宇宙開発事業団が発足し、そこへの一元化いわゆる体制問題が浮上します。この問題は2003年に現実に統合されるまで我々を悩ませ続けるのですが、先生は両者の関係の円滑化に心を砕いていらしたようです。あとには宇宙開発委員長代理（当時は科技庁長官が委員長だったので実質的な委員長）として日本の宇宙開発全体のかじ取りをなさいました。またIAF（International Astronautical Federation）の副会長も務められ、このことが1980年のIAF東京大会への布石となりました。

「おおすみ」の打上げを終えて（1970年2月11日）。
右から齋藤 成文先生、野村 民也先生、玉木 章夫先生。

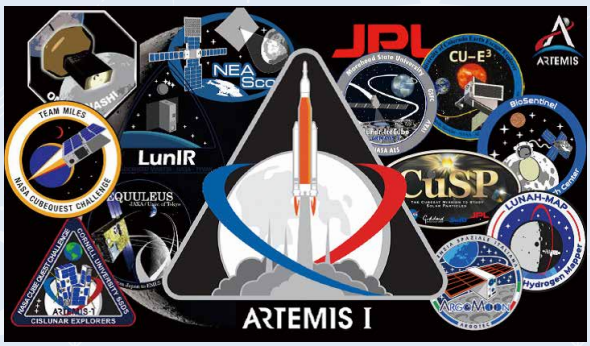
二・二六で有名な麻布の三連隊兵舎を使った生研には中庭があって、窓を開けて中庭越しに電話をされると直接のお声の方がよく聞こえたと、これは当時の市川助手の話です。大きなご業績と快活なお人柄を偲びつつ、ご冥福を祈ります。

（松尾 弘毅）

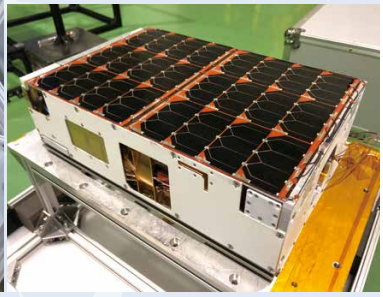
SLS搭載超小型探査機プロジェクトの概要

2015年の8月末、突然NASAから「2018年に打上げ予定のSLSロケット1号機の相乗り探査機枠に空きができたので、興味がある宇宙機関はミッション提案を10月9日までにして欲しい。ただしその科学的および技術的目的が将来の有人探査を推進するのに役立つものであること。」との連絡がJAXA国際宇宙探査推進チーム* あてにありました。通常の科学衛星は、3年程度かけてワーキンググループでミッション検討をしてから提案をしますし、観測ロケットや大気球にしても、毎年公募があることがわかっているので、科学コミュニティではそれに向けて準備をしています。しかし今回は、月へ向かう軌道で分離される超小型探査機（質量14kg以内、サイズ11×24×37cm）であり、そのような相乗り打上げ機会があるとは考えていませんでした。そこで急遽、JAXA内でアイデアを募り、JAXA内での評価を経て、複数の計画をNASAに提案しました。その中から選定されたのが、この連載の対象、EQUULEUSとOMOTENASHIです。

まず初めに、打上げロケットSLSの説明からしましょう。Artemis（アルテミス）計画は、2024年までに人類を再び月面に立たせ、将来の火星有人探査につなげていこうという米国の計画で、日本も協力することを表明しています。この計画を実現するため、NASAはアポロ宇宙船を打ち上げたサターンロケットとほぼ同じサイズの巨大ロケットSpace Launch System（SLS）を開発しています。宇宙飛行士が乗る宇宙船はOrion（オリオン）で、SLSの1号機（Artemis-1）では無人のOrionを載せ、月のまわりを周回してから地球に帰還するまでの行程をシミュレーションします。Artemis-1に搭載される超小型探査機は全部で13機、10機は米国内で公募されたものですが、追加で搭載が決まったのは日本のEQUULEUS、OMOTENASHIとイタリアのArgoMoonです。Orionと相乗りであるため、超小型探査機でありながら、有人宇宙船と同様な厳しい安全基準が課せられています。



SLSロケットと搭載される13機の超小型探査機のミッションロゴ。


完成したEQUULUES（左）とOMOTENASHI（下）。

では次に、本連載の主役を紹介します。EQUULEUS（EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft）は、超小型深宇宙探査機としては世界初となる、月、地球、太陽の重力が釣り合うラグランジュ点のうちの月の裏側に位置する地球（Earth）－月（Moon）系の第二ラグランジュ点（EML2）へ向かう計画で、そのための軌道変換技術の開発・実証と、月・地球周辺の磁気圏プラズマ、微小隕石・ダスト環境の観測を行います。超小型の推進系として、気化させた水を排出して推進力を得る水レジストジェット（AQUARIUS）を開発しました。超小型通信機はOMOTENASHIと共通設計で開発しました。地球磁気圏の全体像把握のためにプラズマ撮像装置（PHOENIX）、月裏面への隕石衝突を観測するために2台の閃光撮像カメラ（DELPHINUS）、地球～月圏の宇宙塵の分布を調べるために断熱材に衝突する微粒子を計測するセンサ（CLOTH）を搭載しています。EQUULEUSの開発は東京大学が中心となり、JAXA、日本大学などが協働しています。

OMOTENASHI（Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor）は、世界最小で月面着陸を目指す計画です。着陸時の減速には小型固体ロケットモータを使用しますが、固体モータは燃焼中の推力を調整できないため、いわゆるソフトランディングはできず、セミ・ハードランディングになります。着地速度は秒速50m程度の速度になる可能性があるので、耐衝撃技術も開発しました。また、地球・月周辺の放射線環境測定を行うため、超小型の放射線モニタを搭載しています。超小型で月面着陸を実現するために、超小型の分離機構、通信機、搭載計算機などを開発するとともに、世界中で市販されている超小型の機器を探し搭載しました。OMOTENASHIは、JAXAの若手技術者、研究者を中心に開発していますが、難しい新規技術に挑戦しているため、JAXA内外のベテラン技術者の知恵と技能の助けを借りています。

本原稿執筆時点ではArtemis-1の打上げは2021年9月に予定されており、両探査機ともハードウェアの開発は完了し、現在、搭載ソフトウェアの試験や運用練習などを実施しています。来月から両探査機の搭載機器やミッションの詳細について解説していきますので、苦難の開発の過程をご堪能ください。

（橋本 樹明、船瀬　龍）

* 当時、部門横断的に将来の探査について検討をしていたチーム。その成果が国際宇宙探査センターの設立につながった。

元 JAXA 理事
山浦 雄一（やまうら ゆういち）

「はやぶさ２」、そして先人が残したもの

目黒区駒場にあった東京大学宇宙航空研究所（宇宙研）で、1976年4月～1978年3月の修士課程時代、秋葉 鐐二郎先生と松尾 弘毅先生にお世話になった。一番奥、56号館2階の松尾研究室を居室とした。当時45号館と56号館は、両先生のほか、長友 信人先生、雛田 元紀先生、的川 泰宣さん、高野 雅弘さん、上杉 邦憲さん、小野田 淳次郎さんなどなど、糸川 英夫先生門下・秋葉ファミリーの錚々たるメンバー揃いであった。刺激が多く、人生勉強もさせていただいた。

修士課程を終えて宇宙開発事業団（NASDA）に入った。25年後（2003年10月）、JAXAが生まれた。私は、昔の仲間と一緒にやれる、と宇宙3機関統合を喜んだ一人である。

オールドネームにはのちほど戻るとして、まずは「はやぶさ2」。

2020年12月6日、「はやぶさ2」のカプセルが帰還する。前回のISASニュースへの寄稿が2012年11月号（No. 380）だったから、8年ぶりである。当時私は相模原を拠点とする「月・惑星探査プログラムグループ（JSPEC）」担当の執行役で、記事のテーマは、同年10月1日付で断行した「はやぶさ2」プロジェクトの体制強化であった。そのテーマの記事掲載を企画したISASニュース編集委員会の視座・視野に感心したことを覚えている。そして、今回。再び「はやぶさ2」帰還のタイミングでご指名いただいた。編集委員会の配慮に感謝したところで、「『いも焼酎』に書く齢なのか」との思いは消えた。

今だから問えるのだが、2012年3月に行われた「はやぶさ2」プロジェクト詳細設計審査（CDR）で、今日ここまでの達成を確信できた人はどれだけ居たであろうか。2014年11月30日～12月9日の打上げを逃したら次は10年後。その上2012（平成24）年度の予算は、要求額73億円に対して認可額30億円であった。打上げ期限（2014年12月9日）を、たとえ半年でも遅らせたかった。だから、2012年、当時の国立天文台長にリュウグウ以外の到達可能な別の小惑星を探索するようお願いをした。天文台にはこのほかいろいろお世話になった。

非常に厳しい状況で、2012年10月、國中 均教授（現ISAS所長）にはプロマネ就任という随分無理なお願いをした。ISASニュース特別版（2016年1月号）の國中教授の寄稿（後編、完全版）*には、私からの「半強制」と書かれている（苦笑）。

H-IIAロケット26号機搭載前の「はやぶさ２」と打上げ（2014年12月3日）。

別の小惑星発見は成らなかったが、探査機はきちんと開発が間に合って、2014年12月3日に無事打ち上げられた。「はやぶさ2」の開発と運用で、プロジェクトチームと科学コミュニティは一丸となって素晴らしい成果を上げてきた。周到な運用も見事、分かり易くタイムリーな記者説明、各種発表も見事である。プロジェクト開始から9年。あっという間であった。

話題をオールドネームに戻す。最近、NASAとの共同プロジェクトに関する日本人のレポート（1999年受理）を見つけた。その「結び」には、「最後に、○○プロジェクトのエンジニアリングの作業を通じて学んだものをまとめて結びとする」とある。更に、「1）エンジニアリングの基本に忠実、2）マネジメントのルールの順守、3）○○日本チームのマネジメント」と続く。このレポートの著者が誰なのかお分かりだろうか。

答えは、長友 信人先生。○○にはSEPACが入る。宇宙科学研究所報告第107号「SEPACプロジェクトのエンジニアリングとマネジメント」（2000年2月）の結びである。SEPACは、1970年代前半から日米共同検討が行われ、初のスペースラブミッション（SL-1：1983年11月～12月）に高順位で選定され搭載された。同レポートは、SEPACプロジェクトでNASAマーシャル宇宙飛行センター（MSFC）に長期駐在した長友先生の実見録である。駐在は1976年～1978年だったと記憶する。

そして、私は、1985年～1989年「ふわっと'92（FMPT計画）」でMSFCに駐在した。渡米が決まった頃、現地ハンツビルの様子を、在住経験者の長友先生と二宮 敬虔先生からうかがった。私がMSFCに赴くと、「SEPACチームは、SL-1の懇親会の最後に必ず『線路は続くよどこまでも』を英語で歌った。全員の合唱になった」と聞かされた。ISASは1970年代から幅広く存在感を発揮していたのである。レポートを読み、長友先生も二宮先生も私も、MSFCの同じ部署で同じ人々、同じマネジメントの環境で過ごしたことを理解した。どうやら、現地での開き直り感も私と似ていたようである（お許しあれ）。

私のMSFC駐在中、ISASは1985年～1986年にハレー彗星探査で躍動した。現地市民から日本の宇宙開発の実力を問われた時、私はハレーアルマダを語った。臼田64m局建設はハレー探査の4大難関の1つであった。私がJAXA理事時代に美笹54m局建設に尽力したのは、臼田局の価値と歴史を理解したからである。美笹局は今年9月末JAXAに引き渡され試験運用中である。

では、今日の結び。長友先生レポートにあるテーマは、挑戦、国際競争と協力、システムズ・エンジニアリング、マネジメントである。ISASにとって重要なものを暗示している。今、「はやぶさ2」の帰還と成果を待ちながら、そんなことを思っている。

* http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/special/2016/kuninaka/image/kuninaka02.pdf

編集後記

先日の晴れた夜、月が綺麗だったので数年ぶりに望遠鏡を引っ張り出して夜空を眺めました。月の他にも火星・木星・土星を見ることが出来、子どもと共に楽しみました。もうしばらくすると、その宇宙から「はやぶさ 2」のカプセルが帰還しますね。どうぞご期待ください。（竹前 俊昭）

JAXA Explore to Realize **ISASニュース　No.476　2020年11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/