

SLSロケットにて打ち上げられる超小型探査機EQUULEUSとOMOTENASHIの引き渡しをNASA Kennedy Space Centerにて行いました。探査機は、Dispenserと呼ばれる放出装置に格納した状態でロケットに搭載されます (p.4参照)。

左上：Dispenser挿入直前のEQUULEUS
右上：EQUULEUS挿入後のDispenserとプロジェクトメンバー

左下：Dispenser挿入直前のOMOTENASHI
右下：OMOTENASHI挿入後のDispenserとプロジェクトメンバー、およびDispenser担当のTyvak社メンバー。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

「はやぶさ2」が明らかにした C型小惑星リュウグウの衝突の歴史

カナリア天体物理学研究所 JSPS海外特別研究員 巽 瑛理(たつみ えり)

「はやぶさ2」によって地球へと持ち帰られた試料の詳細分析がついに始まった。リュウグウから我々は何を学んだだろうか？そしてこれからさらに何が明らかになるだろうか？リュウグウに到着した頃と同じくらい期待と緊張が入り混じる、第二章の始まりだ。次章への期待を胸に、本稿では筆者が関わってきた、イトカワ、リュウグウとベヌーの探査機観測（主に可視カメラ）に基づく科学成果（第一章）の一部について紹介したい。

サンプルリターン型探査

2006年NASAの探査機Stardustは、ヴィトル第2彗星からの粒子を地球に持ち帰った。そして、2010年に世界で初めて小惑星からのサンプルリターンを成功させた「はやぶさ」は記憶に新しい。それに続き、「はやぶさ2」は昨年12月に、炭素質小惑星リュウグウからのサンプルを持ち帰った。サンプルの量は「はやぶさ」とは比べ物にならないほど大漁だ。NASAの探査機OSIRIS-RExは炭素質小惑星ベヌーからの試料採取を成功させ、現在地球に向かっていているところである。この十数年間にこれだけのサンプルリターン型探査が行われており、さらにMartian Moon eXplorer (MMX) による火星の衛星フォボスからのサンプルリターンが計画されている。現在の潮流はサンプルリターンだと言って過言ではないだろう (図1)。

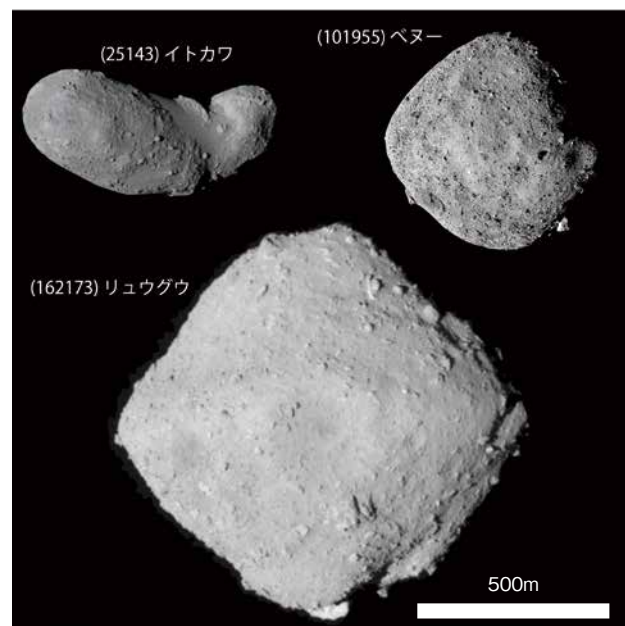


図1：サンプルリターンされた小惑星／イトカワ、リュウグウ、ベヌー。

小惑星は原始太陽系の物質の生き残りと考えられており、惑星形成に物質的にも力学的にも大きな影響を及ぼした。火星と木星の間の小惑星帯には多様なスペクトル型を持つ小惑

星があり、その組成は明らかではない。サンプルリターン型探査の強みは、物質科学と観測データを1対1で対応づけられるところだろう。例えば、S型小惑星イトカワから採取された試料は少量ながらもLL普通コンドライトであることが判明した。このことから、小惑星帯に多く存在するS型小惑星が、普通コンドライト的な物質であることがほぼ確実になった。このようにして、我々は1つずつ、太陽系形成のパズルのピースを集めている。

黒い小惑星リュウグウ

「はやぶさ2」のターゲット天体であるリュウグウは有機物や揮発性成分に富む炭素質小惑星(C型)であり、特に地球の水や生命の起源と直接関係する可能性が高い。炭素質小惑星は一般的に反射率が低い(黒い)という特徴を持っているが、リュウグウは可視反射率が4%程度とその中でも一段と暗い天体であることが分かった。これほど暗い隕石は、地球にあるコレクションの中では加熱を受けた隕石くらいしかなく、リュウグウも加熱を受けた炭素質コンドライト的な物質だろうと考えられる。もしくは、炭素に富む物質という仮説も存在する。また、リュウグウに特徴的なのは、非常に密度が小さくおそらく内部に空隙が多くある点である。含水鉱物を含む炭素質隕石のCMやCI^[1]は $1.6\sim 2.3\text{g/cm}^3$ なので、リュウグウのバルク密度 1.19g/cm^3 はこれよりかなり軽い。可視分光カメラONC (Optical Navigation Camera)や近赤外分光器NIRS3から得られた反射スペクトルと完全に一致するような天然の隕石がこれまで見つかっていないため、一体どんな物質なのか非常に興味をそそられる。リュウグウのサンプル分析により、構成物質について明らかになることを期待したい。

リュウグウの衝突史

リュウグウやイトカワ、ベヌーはラブルパイル天体だと考えられている。小惑星は衝突破壊と重力による集積を繰り返し、小さな天体となっていく。つまりkmサイズの小惑星というのは一世代前の母天体の衝突破壊によってできた瓦礫(ラブル)の集まり(パイル)である。そんなリュウグウの表面に明る

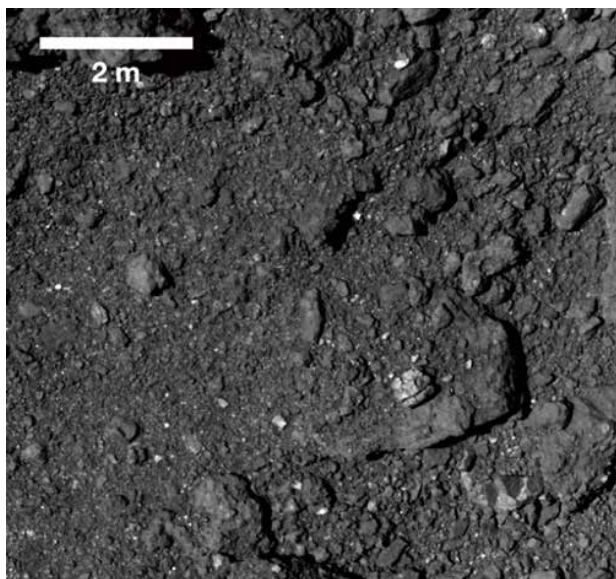


図2：リュウグウ表面の高解像度画像(8mm/pix)。あちこちに白く輝く点が見える。リュウグウ母天体の衝突破壊による混合の跡と考えられる(Tatsumi et al. (2021)* から改編)。

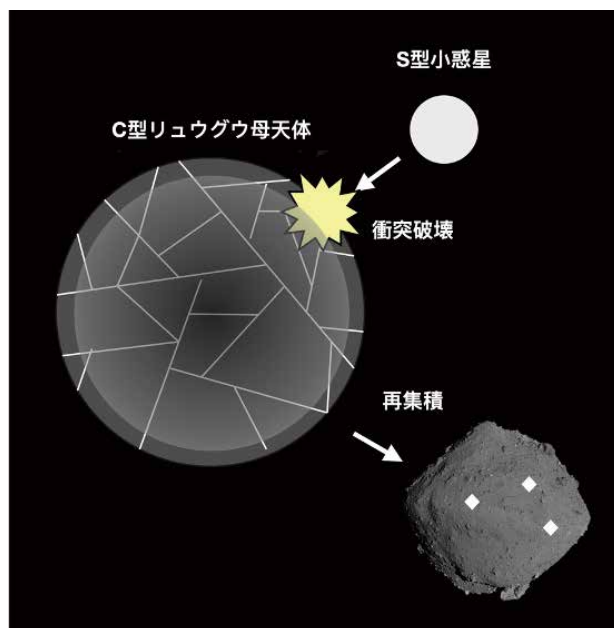


図3：C型のリュウグウの母天体はS型の小惑星と衝突し、破壊された破片が集まって現在のリュウグウを形成した。また、C型リュウグウ母天体内部も深さによって異なる熱変成を受けていると考えられる。

い輝点がいくつも見つかった。とりわけ低高度での高解像度の画像には多くの輝点に至るところに見られた(図2)。これらの輝点は明るい岩石であることが分かった。分光カメラであるONCでこれらの明るい岩石の可視反射スペクトルを測ると、大きく2つの異なるスペクトルタイプに分けられることが分かった。1つは、可視から $1\mu\text{m}$ の波長域にかけて大きく吸収のあるS型、もう1つは比較的フラットなスペクトル形状を持つC型である。 $1\mu\text{m}$ 波長域の吸収は一般的にカンラン石や輝石などのシリケート質な鉱物に見られ、イトカワのようなS型小惑星にもよく見られる。

これらの発見がリュウグウの歴史を辿る上で非常に重要である。C型小惑星であるリュウグウにS型の外来性岩石が見つかるとはどういうことなのだろうか。つまり、S型の岩石がどこかのタイミングでリュウグウ(もしくは母天体)と混ざったということである。おそらくこの岩石が混ざったのはリュウグウの母天体が衝突破壊されたためであると推定される。この小さな明るい岩石の発見が、リュウグウ母天体とS型小惑星の衝突という歴史を明らかにしたのである(図3)。S型小惑星は小惑星帯の内側 $2.1\sim 2.5\text{au}$ に多く分布しているため、リュウグウがこの小惑星帯の内側から来たと考えられていることと整合的である。この小惑星帯の内側にはニーサ・ポラーナ小惑星族^[2]があり、リュウグウのようなC型とイトカワのようなS型が集中して混在する領域が存在する。リュウグウはこのようなところから来たのではなかろうか。

また、明るい岩石の中には物質的にはリュウグウに似ている(C型)が、明るさや反射特性がやや異なるものが発見されている。このC型の明るい岩石はリュウグウの母天体の異なる深さからもたらされているものではないかと予想される。

リュウグウとベヌー

ベヌーはNASAの探査機OSIRIS-RExがサンプルリターンを行っている天体だ。現在OSIRIS-RExは地球に向かって航行しているところで、2023年に地球に帰還する予定である。ベヌーもリュウグウと同様に炭素質小惑星で、小惑星帯の内側から

[1] CMIはMigheiと似た組成の炭素質隕石タイプ、CIはIvunaと似た組成の炭素質隕石タイプ。どちらも過去に水と反応し、含水鉱物が存在する。

[2] 100km程度の大きな小惑星が衝突破壊した破片群によって形成されている。

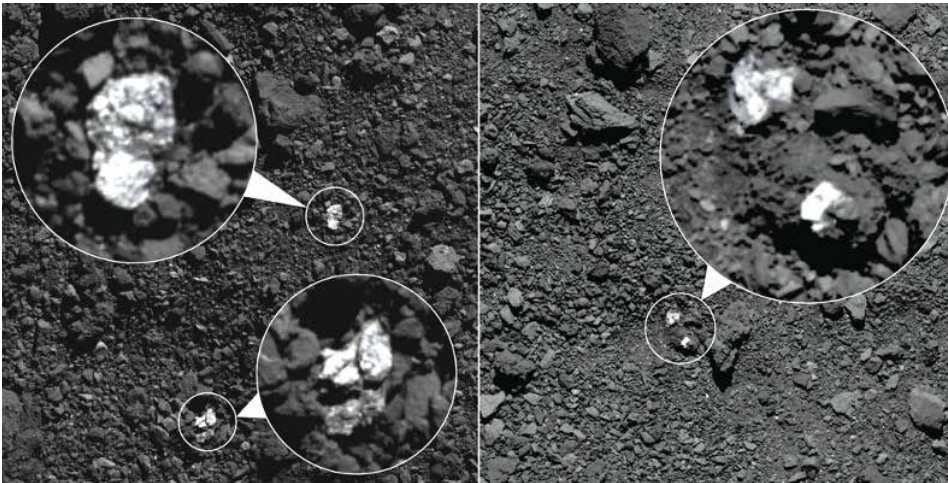


図4：小惑星ベヌーの表面に見つかったベスタ由来と考えられる外来性物質 (credit: NASA/Goddard/University of Arizona)。

地球近傍へやってきたと考えられている。すると、ベヌーとリュウグウは同じ母天体起源なのだろうかという問いが浮かんでくる。大きな共通点としては反射率、密度、熱特性が非常に近い値であることが挙げられる。また、どちらの天体も含水鉱物を含む物質から構成されていることが分かっている。一方で、含水鉱物の反射スペクトル特徴は異なっており、水質変成度（過去に水と反応した割合）が異なることが示唆されている。

ベヌーにおいてもリュウグウと同様に、外来性の岩石が見つかった（図4）。ベヌーにおいて見つかった岩石スペクトルは、 $1\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ に深い吸収を持つ、分化を経験した玄武岩的なHED隕石に似たものだとして判明した。HED隕石は小惑星ベスタ起源であると考えられている。ベスタも小惑星帯の内側に存在するので、ベヌーの起源が小惑星帯の内側であることが整合的だ。また、ベヌーに見つかった外来性の岩石割合はリュウグウのおよそ40倍にもものぼる。この発見から、リュウグウとベヌーに見つかった外来性物質が違うものであることが分かったため、リュウグウとベヌーの世代前の母天体はおそらく違う天体だと思われる。しかし、リュウグウやベヌーに至るまでには、複数回の衝突破壊と集積を経験しているため、より先祖にあたる天体が異なるかまでは結論が出ていない。

イトカワとリュウグウ

イトカワとリュウグウは物質が大きく異なっている。にもかかわらず、「はやぶさ」がイトカワで発見したことはリュウグウの探査にも大きく影響を与えている。例えば、イトカワの表面はメートルサイズの岩石で覆われており、月で見つかるようなはっきりとした輪郭を持つクレーターが見当たらない。これはそれまでに探査されてきた小惑星エロスやマチルダなどとも異なる形態で、今となってはリュウグウでも見慣れた光景だが、最初にイトカワに着いた時に驚いたことは想像に難くない。なぜクレーターがない（ように見える）のか？これに対していくつかの仮説が立てられた。(1) レゴリスが動くことですぐに消えてしまう、(2) 表面にある岩石の影響でクレーターができにくい（アーミング効果）、(3) 表面の年代が若くあまりクレーターが作られていない、というものである。(1)について、エロスでも“ポンド（池）”と呼ばれる、クレーターの中にレゴリスが溜まったような地形が見られたことから、小惑星表面でレゴリスが動くことは確実なように思われる。また、エロスに比べて重力が小さいため、レゴリスの流動性が高い

のは確かそうだ。一方で(2)はどうだろうか。イトカワに遭遇するまでアーミング効果については多くの知見がなかったが、イトカワの探査をきっかけに高速衝突装置を用いた実験や数値計算が行われた。衝突実験の結果、岩石に衝突したとしても破碎できるエネルギーの10倍程度に大きなエネルギーを与えると、できるクレーターサイズは細粒砂にできるクレーターと同程度になることが分かった。また、クレーターを消去する効果は小さいクレーターほど効果的である。つまり、イトカワにクレーターが少ないのは表面年代が若いからと考えられる。実験結果を用いて、天体表面のクレーターのサイズを計測することにより、天体表面年代が推定できる。アーミングが大きなクレーターには効かないということから、イトカワの表面年代は以前考えられていたよりも桁で若いことが示された。この結果はリュウグウの表面年代推定にも使われ、ここでも1000万年程度という非常に若い年代が推定された。また、世界初の小惑星上でのクレーター形成実験（SCI）の結果からもこのクレーター年代が支持された。

このようにイトカワで得られた科学的知見は「はやぶさ2」の探査に生かされている。運用や機器などの技術的な面でももちろん多くの知見が受け継がれ、改良されている。リュウグウで得られた知見はMMXの探査にも生かされるだろう。このように技術や知見をたやすく繋いでいくことがより遠くへ、より挑戦的な探査を実現するために重要なのだということを一連の探査機が伝えているように思える。

終わりに

現在、「はやぶさ2」は次なる目標である2001 CC 21と1998 KY 26という小惑星に向かって航行している。主ターゲットである1998 KY 26は自転周期が10分程度と高速回転をする小惑星である。強度を持たないラブルパイル天体の限界自転周期は2.3時間程度であることが知られているが、なぜこれだけ高速回転をしているにも関わらず壊れないのかというのは最も興味深い点だろう。実際に天体に到着するのは10年も先のことだが、「はやぶさ2」がさらなる太陽系の謎を解き明かしてくれるのを楽しみに待ちたい。また、これから続々と出てくるであろうサンプル分析によるパズルのピースも加わって、我々はどんな太陽系の描像を描けるのか…挑戦は続く。

*“Collisional history of Ryugu’s parent body from bright surface boulders” Nature Astronomy 5, 39-45.

EQUULEUS、OMOTENASHI探査機のNASAへの引き渡し

超小型探査機EQUULEUS（以下EQUと略す）とOMOTENASHI（同OMT）は、今年11月にNASAのSLSロケットで打ち上げられる予定です。探査機はOSA（Orion Stage Adapter）と呼ばれる、ロケットとOrion宇宙船をつなぐアダプタの内側に搭載されるため（写真1参照）、打上げの約半年前の引き渡しが必要です。そのため、NASA KSC（Kennedy Space Center）にて、両探査機の動作チェック、OMTの組み立て（後述）、および両探査機の放出装置（Dispenser）への挿入を実施しました。

これに先立ち、OMTのRocket Motor（RM）は5月11日に日油（株）武豊工場から、Orbiting Module（OM）とSurface Probe（SP）は同13日に相模原キャンパスから搬出しました。火薬類であるRMは専用の容器に入れて輸送する必要があるため、OM、SPとは別コンテナで運び、KSCにて最終組立を行うこととしました。動作チェックに使用する試験装置や、最終組立作業に必要な治具、工具などは、6月14日に相模原キャンパスから搬出しました。一方でEQUは、6月18日に探査機本体と試験装置類と一緒に東京大学本郷キャンパスから搬出しました。

7月6日より輸送荷物の開梱、動作チェックを開始しました。EQUは、写真2のように東大本郷キャンパスとネットをつなぎ、日本に残った担当者も参加しながら試験を実施しました。観測機器、バス機器ともに不具合は無く、順調に終了しました。

OMTも写真3のように、まずOMの動作試験を実施し、不具合は無く終了しました。次にSPの動作試験を実施しました。SPは既に展開アンテナが装着されているので、電源をオンすると電波が空中に放射されてしまい、他機器に影響を与えます。そのため、電波遮蔽箱の中にSPと受信アンテナを入れ試験しました（写真4）。

7月9日には、今回のクライマックスであるOMTの組み立て作

業を行いました。RMは、これまでRMのダミー（火薬は入っていないが、外形や質量は全く同じにしたもの）を使って組み立て練習をしてきました。何度も練習をしてきたのですが、本物のRMを扱うのは初めてなので、緊張するとともに、サイズがあっているのかどうか不安がありました。結果的には、サイズはぴったりで、練習の際より簡単に挿入できました（写真5）。精密なダミーを作っていただいた川崎重工（株）に感謝します。ところが、最後の位置決めピンを挿入しようとしたところ、入らないという事態となりました。原因究明と対策案を検討した結果、0.5mm程度、SPの位置が設計値と異なることがわかりました。このような微小量であれば穴を少し広げればピンは入るので、許容範囲まで広げて無事ピンを挿入することができました。

7月12日にはEQUのDispenserへの挿入を行いました。この作業も、数年前にEngineering ModelをNASAより借用してインターフェイス確認をしたのが最後、Flight Model同士を組み合わせるのは初めてです。不安がありましたが、問題無く挿入が完了しました。OMTのDispenserへの挿入も13日に完了し、ハードウェアとしての探査機引き渡しが完了したことになります。そのあとNASAにより、EQU、OMTともに全ての安全基準、インターフェイス条件を満たしていることが確認され、14日に正式な引き渡しとなりました。

今回はコロナ禍での海外出張であり、米国到着後および帰国後の隔離期間も含めると、6月25日～8月1日という長旅になりました。感染防止対策にご指導、ご支援いただいた皆様に感謝致します。なお、EQUのDispenserは7月20日、OMTは7月23日にそれぞれNASAによってOSAへ組み付けられました。

（橋本 樹明・船瀬 龍）

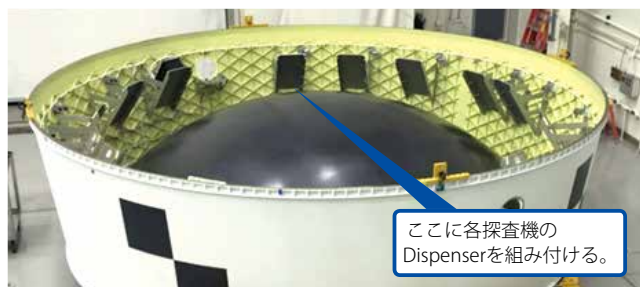


写真1：OSA ©NASA



写真2：EQUの動作試験風景（矢印の部分が探査機）。手前のPCで東大と音声をつないで試験を実施した。



写真3：OMT(OM)の動作試験風景（矢印の部分が探査機）

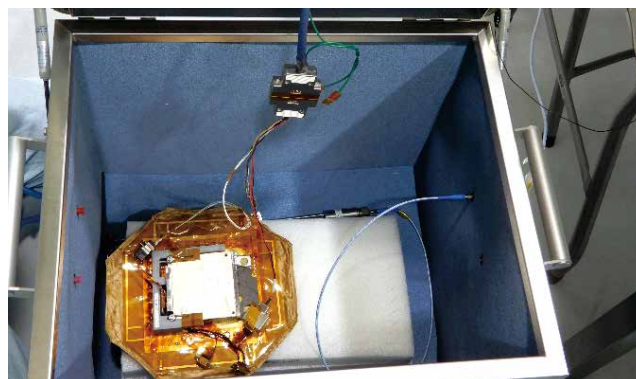


写真4：OMT(SP)の動作試験風景。試験時には蓋を閉める。

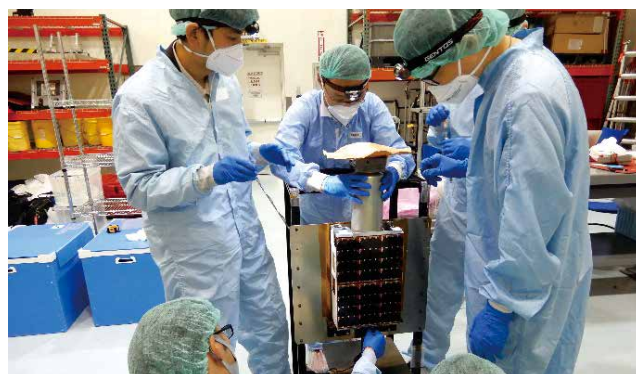


写真5：OMTの組み立て作業

S-520-31号機実験成功

2021年7月27日5時30分にS-520-31号機を内之浦宇宙空間観測所から打ち上げました。当初打上げは7月20日の予定でしたが、台風6号が沖縄付近に停滞し強風が吹き荒れ、また台風8号まで発生するという状況で、1週間ずっと風待ちをしていました。27日は2つの台風の狭間で南九州付近だけ風が鎮まる奇跡的な好機で、図1に示す様に多少の雲はありましたが、朝焼けの中無事打ち上げることが出来ました。内之浦の街からも飛んでいくところが綺麗に見えたそうです。満を持しての打上げに風の読みはばっちり、方位は真中、飛距離も十数km手前という落下予測円ほぼど真ん中に落下しました。困難な天候判断・風予測・回収海域波高予測に協力いただいた気象班・OP班・種子島応用気象の皆さんには深く感謝したいと思います。

S-520-31号機の実験は、名古屋大学の笠原先生を中心とするグループが開発したデトネーションエンジンシステムDES^[1]とISASの山田和彦先生らが開発した観測ロケット実験データ回収モジュールRATS^[2]の2つです。前者DESは、燃焼ガスが急速に熱膨張し音速を超えて衝撃波を伴いながら燃焼する現象であるデトネーション(爆轟)を利用した軽量高効率なロケットエンジンの燃焼実験で、動作の異なるRDE^[3]とPDE^[4]の2種類を組み合わせた全長2m近い大型ペイロードかつ高度な工学実験です。また推進剤として大量のメタンガス・酸素ガスを搭載する、観測ロケットとしては初めての実験で(微量の可燃ガスを機器に封じ込めて搭載した例は過去にもありますが)、その運用と安全性には設計段階から非常に注意を払っています。

またRATSはDESの大量の実験データを回収するためのカプセル

で、S-310-41号機で実証された低弾道係数の小型インフレーターカプセルの技術を発展させて開発されています。両者とも実験結果は非常に良好で、DESについては推力の発生(速報値で500N)と圧力振動等からデトネーション燃焼発現まで確認できており、更に詳細な燃焼状態や推進性能の解析を進めています。RATSについては、ロケットから分離後緩降下してロケット着水の約30分後(6時10分頃)に落下予定海域へ着水し、7時50分頃にヘリコプターでの回収を完了(図2はその一幕)、分解して13時頃にはデータを確保とほぼ満点の出来でした。RATSから回収したデータの一部が図3に示すDESの燃焼中の画像(30fpsで取得)で、これだけ高精細かつ多数の画像を得ることが出来たのは回収だからこそ、と言えます。世界初の宇宙空間でのデトネーションエンジン実証という本機のミッションは大成功だったと言えるでしょう。

本実験は2016年度に採択され、私はその際に名古屋大学の提案を観測ロケットで実験できる様に落とし込む支援を指示され、それから4年半程を掛けて一緒に準備をしてきました。紆余曲折ありましたが、やはり一番影響が大きかったのはCOVID-19で、昨年からは色々と活動に制約がある中での準備作業でした。打上げに際してもその影響は大きかったですが、その中でも今回打上げを無事実施、成功できたのは、当事者であるJAXAと名古屋大学の努力もさることながら、協力を快諾いただいた各メーカー、肝付町をはじめとする地元自治体・組織のお陰でもあります。関係の皆様様に心よりのお礼を申し上げ本稿を締めたいと思います。(竹内 伸介)



図1：朝焼けの中を飛翔するS-520-31号機(写真提供：USC)



図2：シーマーカーを放出し海上浮遊するRATS(写真提供：朝日航洋)



図3：地球を背景に燃焼するRDE(写真提供：名古屋大学)

[1] Detonation Engine System

[2] Reentry and Recovery module with deployable Aeroshell Technology for Sounding rocket

[3] 旋回型デトネーションエンジン (Rotating Detonation Engine)

[4] 間欠型デトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine)

「カイロス」第3段固体モーターの地上燃焼試験

米国を中心に急ピッチで民営化が進む宇宙輸送分野では、学術コミュニティの果たすべき役割が大きく変わりつつあります。今後は、学術ミッションのための安定した宇宙輸送サービスを確保すべく、市場競争力の向上に学術研究の成果を以て貢献することが求められるでしょう。

現在宇宙科学研究所では、スペースワン社（S1社）が開発を進める小型固体ロケット「カイロス」の第1段及び第3段の固体モーターの地上燃焼試験について、学術研究で成果を上げ産業振興に貢献する貴重な機会と捉え、共同研究体制を敷いて取り組んでいるところです。去る6月30日には能代ロケット実験場において、第3段固体モーターの試作供試体S1R-B3-1TVCの真空地上燃焼試験が成功裏に終了しました。実はこの試験、ペンシル以来65年の歴史をもつ日本の宇宙用固体モーターが、



S1R-B3-1TVC真空地上燃焼試験における高性能試験用拡散筒の噴流。

初めて民間で自主開発され、地上燃焼試験に成功した歴史的な出来事でもありました。

学術研究の課題としては、ノズル排気中の粒子観測技術の検証とレーザー点火系の技術実証について成果を上げることができました。両者とも今後の固体ロケットの競争力向上に貢献する技術です。

燃料にアルミニウム粉末を用いる高性能固体モーターについては、燃焼室内に溜まる液状の燃焼残渣が燃焼末期に排出されて宇宙デブリになることが懸念されています。そのためJAXAでは、新しい高性能固体モーターの研究の中でノズル排気中に存在する粒子を直接観測する技術を研究しており、今回はそれを従来型の実機大モーターで試してみました。また点火用火工品については、点火薬にレーザー光を直接照射して点火する新しいレーザー式の技術を実証しました。微量の高感度爆薬を電熱線で発火させて点火する旧来の電気式に比べて、点火薬に電線が接しないため、雷、静電気、外来電磁波による発火の恐れがほぼなく、さらに火工品点検に要する時間を大幅に短縮できる可能性があります。S1社が掲げる「世界最短」の打上げサービスにも貢献できるかもしれません。

今回の地上燃焼試験では、総勢90名を超える実験班メンバーにご活躍頂き、加えて実施に関わる多くの皆さまに試験の成功を支えて頂きました。この場を借りて厚く感謝申し上げます。

（徳留 真一郎）

ありがとう！ 管制室

「はやぶさ2」の運用は、2014年12月3日の打上げ以来、JAXA相模原キャンパスにある管制室で行われていました。現在、「はやぶさ2」は延長されたミッション（拡張ミッション）を行っていますが、これまでの管制室から引っ越して別の管制室で運用を行うことになりました。管制室の引っ越しは、5月に第一弾、そして7月に第二弾を行って終了しました。

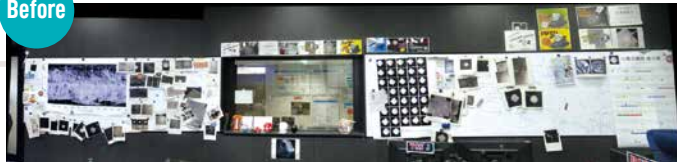
「はやぶさ2」の運用を行っていた管制室ですが、以前に「はやぶさ」の管制を行っていた部屋と同じです。内装を一新してから「はやぶさ2」の運用が開始され、6年間余りに渡って「はやぶさ2」専用の管制室となっていました。「はやぶさ2」プロジェクトメンバーとしては、多くの困難を乗り越えてきた一心同体と言ってもよい管制室です。

管制室の様子はこれまでいろいろな場面で紹介させていただ



写真1：2020年12月5日に地球帰還運用が終了した直後に管制室で撮影した集合写真。

Before



After



写真2：管制室の壁

Beforeの方は、3つに分割して撮影したものを光学航法カメラ（ONC）の技術で継ぎ目が分からないように合成してあります（作業はONCメンバーである千葉工業大学の山田学氏による）。

いていますが、例えば、2020年12月5日に地球帰還直前の探査機運用が終了したときの管制室の様子が写真1です。メンバーの後ろの壁には、沢山の写真や図が貼ってあるのがわかるかと思いますが、これは、まさに6年間の「はやぶさ2」運用の足跡なのです。この思い出深い掲示の数々も全て撤去しました。撤去の前と後が写真2です。

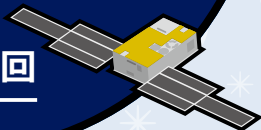
管制室はまた白紙の状態に戻りました。「はやぶさ2」プロジェクトメンバーとしては、少し寂しい感じがしますが、管制室は次の新しいミッションで使用されます。「はやぶさ2」の拡張ミッションの方も、管制室の規模は縮小されましたが、これからも続きます。1つの区切りとして、また次を目指しましょう！

（吉川 真）

EQUULEUS と OMOTENASHI

*** 世界最大のロケットで ***
打ち上げる世界最小の探査機

第 9 回



「水」を推進剤とするエンジンで 月スイングバイへ

今回はEQUULEUSのエンジンであるAQUARIUS (AQUA Resistojet propulsion System) について紹介します。

AQUARIUSは「水」を蒸気として排出するエンジンで、その役割は、月マルチスイングバイの軌道調整、ラグランジュ点到達後における軌道維持、そして全期間を通して必須のアンローディング (探査機の角運動量調節) と多岐にわたります。このために、2基の軌道遷移スラスタ (推力4.1 mN、比推力70 s)、4基の姿勢制御スラスタ (0.6 mN、60 s)、そして1.2 kgの「水」推進剤を装備しています。一方で、推進システムとして大きさ約2.5U、最大消費電力22 Wとキューブサットに適した小型・低電力も実現しています。

この小型・低電力化の鍵は、推進剤としての「水」と独特な常温蒸発方式にあります。「水」は常温で液体でありながら低い分子量を持つため、小型化と高い比推力を可能にします。また、水蒸気と聞くとボイラーのような高温蒸気を想像されるかもしれませんが、約100分の3気圧という低圧において常温蒸発を行います。熱は高所から低所へと流れますので、常温であればヒーターや水蒸気から熱は逃げにくくなります。それどころか、周囲に配置した高温機器からの排熱を利用することさえできます。実際、本エンジンでは100%を超える熱効率を達成しており、「水」の持つ欠点である高い潜熱の問題を緩和しています。

推進剤として「水」のメリットは密度や分子量だけではありません。安全性、取扱性、そして将来性という大きな特徴をもっています。まず、安全性は言うまでもありません。当然ですが危険物と識別されません。これは別プロジェクトにおいてAQUARIUSの姉妹機 (より小型の1.0U版) が、難なく国際宇宙ステーションへ持込めた点でも確認できました。また、低圧における常温蒸発が系全体の圧力を下げるため、タンクは圧力容器ではなく密閉容器として識別されます。

次に取扱性は、地上での開発および試験に大きく関わります。AQUARIUSが使用する「水」は工業用の精製水です。値段は安い、薬品登録は不要、流しに捨てられる、誤って飲んでも大丈夫 (飲みませんが…)。実際に開発を進める身であれば、これがどれほど有意であるか理解できます。表には現れにくいですが、これは開発効率を大きく向上させます。

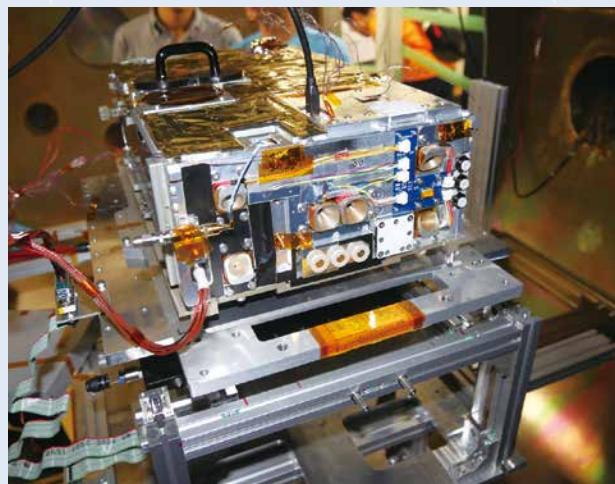


図1：AQUARIUSを搭載したEQUULEUS (推力測定スタンドによる推力測定試験のセットアップ時の様子)

そして、最後の将来性は宇宙資源としての「水」です。月、火星、小惑星等における宇宙資源の活用は、宇宙開発の可能性を大きく広げます。そして、もっとも期待されている資源が「水」です。その「水」を利用できる推進機を一足先に実現しておくことで、宇宙資源利用時代に先手を打つことができます。実は「水」を推進剤とするエンジンは他にもあります。プラズマ化による水イオンエンジンや、マグネシウム等との燃焼による金属／水ハイブリットロケットなどです。水蒸気式はもっとも単純な推進機ですが、タンクを含む推進剤供給機構という水エンジンの核となる技術を備えています。つまり、AQUARIUSは様々な水エンジンのベースとなる可能性も担っているのです。

なお、「水」と言えば、よくある質問が「水」の凍結問題です。基本的に探査機温度は常温付近にあり凍結は生じません。ただし、姿勢喪失等で長時間にわたり0℃を下回ることがあれば凍結は生じてしまい、それに伴う膨張が問題となります (冬場の水道管破裂と同じ)。このために、タンクは初期状態15%程度の押しガス領域を、凍結膨張におけるバッファとして有しています。凍結膨張によりタンク圧力は上昇しますが、初期圧力が0.5気圧程度と低く、完全凍結に至っても2気圧を超えず安全です。

最後に機器の工夫として、金属 (アルミ) 3Dプリンタの活用を挙げます。わずか300cm³ほどの空間への液滴噴射、蒸発、気液分離、多数のバルブ・入出口・センサの実装は、3Dプリンタなしには実現不可能でした。一方、この空間への100本もの配線接続は従来どおりの実装でした。配線はCAD上における詳細設計が難しい上、技量に大きく反映されるハンダ付けを要します。開発における多くのトラブルがここで生じました。膨大なハンダ付けを宇宙研の熟練者にお願ひし、多大な苦勞の末に何とか仕上げた状態です。電力ラインを含めた完全無線化を実装したい思いです。

多くのメンバーの多大な尽力と周囲からの協力によりAQUARIUSは完成し、つい先日NASAへの引き渡しも無事に完了しました。その最大の山場は、打上後、即座にやってくる第一の月スイングバイです。これが最大のΔVを要する上、ここを逃すと地球・月圏から脱出してしまうからです。打上げまで束の間のお別れをしましたが、その出番はもうすぐです。最大の山場を最大の見せ場とすべく、本番に向けてさらに入念な準備を進めようと思います。 小泉 宏之 (こいずみ ひろゆき)

コロナ禍の探査機引渡し

宇宙科学研究所 宇宙科学プログラム室

徳永 翔 (とくなが かける)

夏の暑さの残る2020年10月、我々は米国フロリダ州NASA ケネディ宇宙センター出張に向けた準備を始めた。新型コロナウイルスの影響で国際移動が制限される中、我々の想いが詰まった探査機EQUULEUS / OMOTENASHIをNASAに引き渡すために米国への渡航が不可欠であった。当時の米国は感染が拡大しつつあり、プロジェクトが確実に役割を果たし全員無事に帰国するため、万全の出張計画を策定する必要があった。先例に限られる中で計画立案は難渋し、出張計画が了承されたのは冬枯れの季節であった。

SLSロケットの開発遅延もあり、出張予定は度々延期され、最終的には6月下旬出発となった。その間、所内外との打合せは数十回を数え、JAXA新型コロナ対策本部会合にも2度附議した。出張計画にご助言くださった執行部、科学推進部の皆さま、貴重な情報を共有してくださったJAXA有人宇宙技術部門や各プロジェクトの皆さま、出張準備をサポートいただいた関係部署の皆さまにこの場を借りて御礼を申し上げます。

米国渡航前日、PCR検査のためチャーターバスで成田空港に到着した我々が目撃したのは閑散とした出発ロビーであった。人々の賑わいを失ったチェックインカウンターの列に緊急事態を改めて認識し、米国渡航に向けて強く気を引き締め直した。昼過ぎに受けたPCR検査では陽性の場合にだけ電話があるというのが心臓に悪かった。翌朝陰性証明書を受け取った際の安堵は出張中1番であったかもしれない。

国際線の機内は感染対策が徹底されていて安心して過ごすことができたのだが、乗り継ぎのシカゴに到着し、寝惚け眼で米国に降り立った我々はその光景に驚いた。ターミナルを歩き交う人の群れ、荷物検査を待つ長蛇の列……。ワクチン接種が進んだアメリカがコロナ禍以前の社会に戻りつつあることを実感した瞬間であった。国内線で移動したオーランド空港ではバカンスの家族連れの喧噪に緊張感を覚えながらも感染予防を心掛け、なんとかホテルへと辿り着いた。感染に警戒しながらの1日がかりの移動に体力的にも精神的にも疲労困憊であった。

米国到着後には10日間のホテル待機が求められる。この期間の食事はスーパーやレストランのテイクアウトを利用した。空港とは異なり街中のマスク着用率は低く日本との意識の違いを感じたが、車社会のアメリカでは日常生活で感染リスク



我々以外にほとんど人がいない成田空港（左上）と多くの人で賑わうフロリダオーランド空港（右上）、オーランド空港で見られた無料ワクチンの案内（左下）。

を感じることは少なく、作業本番に向けて良い準備期間になったのではないかなと思う。

さて、ここからが射場作業本番であるが、詳細についてはISAS事情の記事をお読みいただきたい。本記事では無事に探査機を引き渡したあとに話を移すことにする。探査機を引き渡した翌日、我々は空港近くのクリニックでPCR検査を受け、夕方には10名全員の陰性結果とともに帰国の準備が整った。

復路はシカゴ経由で羽田空港へと帰国の途についていたが、空港の混雑に慣れを感じている自分が怖かった。ともあれ無事に帰国した羽田空港では至るところに組市松紋が飾られ五輪の殷賑を極めていた。五輪関係者を横目に入国書類・位置連絡アプリの確認や抗原検査などを受け、政府指定の隔離ホテルに着いた頃にはすっかり日が沈んでいた。この日から3日間の隔離生活が始まった。隔離生活中は部屋から出ることができず、毎日3食ドアノブにお弁当が配給される。窓外の夏空を飛び回る鳥たちに羨望の念を禁じ得なかった。

隔離3日目の早朝に再度抗原検査を行い、全員の陰性が確認されたあと、羽田空港に送り返され解散。事前に手配した貸切バスで各自の隔離場所へ移動し14日目まで待機。この間は毎日健康状態や所在地の報告、電話対応が求められた。ネットスーパー等の普及のおかげで外出せずとも案外不自由なく過ごすことができた。

8月1日に隔離生活を終えた。1ヶ月以上に及ぶ出張において1人の体調不良者もなく、探査機引渡しという重大な任務を無事にやり遂げたことに心から安堵している。最後に出張者の皆さん、長期間の出張お疲れさまでした。1ヶ月に渡る貴重な機会を共有できたことを嬉しく思います。出張者の所属部署や家族の皆さま、長期間の出張にご理解・ご支援いただきありがとうございました。また最後までご助力いただいた関係者の皆さまにも改めて感謝します。そしてEQUULEUS & OMOTENASHI、Fly Us to the Moon!

編集後記

能代での民間ロケットの地上燃焼試験、観測ロケットS-520-31号機打上げと、久しぶりに宇宙研の固体ロケットのニュースが続きました。オリンピックと同じくらい？ロケット関連も盛り上がっているところをISASニュースでお伝えできるのは大変うれしく思います。

(荒川 聡)



ISASニュース No.485 2021年8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
E-mail: isasnews@isas.jaxa.jp FAX: 042-759-4251