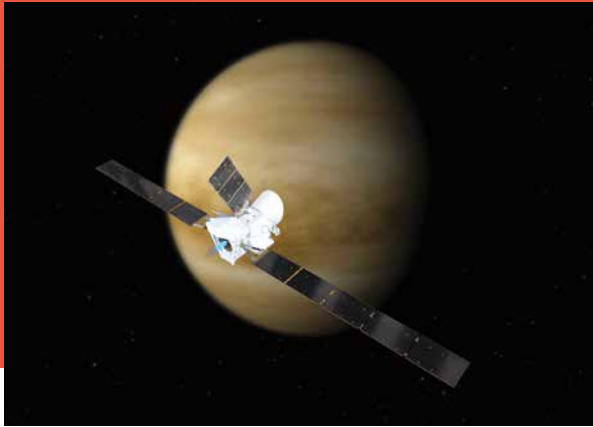




(上) 金星スイングバイを行う「ベピコロombo」水星探査機のイメージ図。
©ESA/ATG medialab

(右) 2回目の「ベピコロombo」金星スイングバイ時、最接近直後に撮影された金星の姿。推進モジュール (Mercury Transfer Module: MTM) に搭載されているモニタリングカメラ (MCAM-3) によって2021年8月10日13時57分56秒 (UT) に撮影された。水星表面探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) の本体およびハイゲインアンテナが映り込んでいる。
©ESA/BepiColombo/MTM



10 August 2021
13:57:56 UTC

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

高効率な熱エネルギー輸送技術 ループヒートパイプ

宇宙飛行工学研究系 テニュアトラック特任助教 小田切 公秀(おだぎり きみひで)

アルコールで手を消毒するとひんやりと感じたり、暑い日に冷えた飲み物の周りに水滴が付いたり、身近な現象である蒸発と凝縮。これらの流体の潜熱が関わる現象を利用することで、非常に効率的に熱を運ぶことができます。地球上で身近なこれらの現象を用いた熱制御技術が、将来の宇宙科学衛星・探査機の熱制御システムを大きく高効率化させることが期待されています。本稿では、宇宙の熱環境と熱制御技術の概要、高効率な宇宙用熱輸送技術として国内外で注目を集める気液二相熱流体デバイスのループヒートパイプ (Loop Heat Pipe: LHP) について、筆者の研究内容を交えながらご紹介します。

ミッション高度化に向けた 宇宙機熱制御技術の課題

宇宙機がさらされる熱環境は過酷です。外部からの熱入力、太陽光、太陽光が惑星表面ではね返った反射光、および惑星表面からの赤外放射です。また宇宙機表面からは、2.7Kの深宇宙へのふく射放熱があります。宇宙機外部との熱のやり取り、宇宙機内部での搭載機器からの発熱の間で成立

するエネルギー保存によって宇宙機の温度は決定されます。投入軌道や姿勢制御によって異なりますが、例えば地球周回軌道上では太陽光が直接当たる箇所は+100℃以上、太陽光が直接当たらず深宇宙を向いた箇所では-100℃以下と、とても大きな温度差にさらされます。大気が存在しないために熱の移動が起こりにくく、さらに宇宙機にとって極端に暑い／寒いという厳しい熱環境において搭載機器を適切な温度範囲に保ち、ミッションを成功に導くことが熱制御システムの役割です。

宇宙機の熱制御技術は大きく分けて、多層膜断熱材やラジエーターなどの「ふく射熱制御」、ヒーターやペルチェ素子などの「発熱・冷却制御」、サーマルストラップなどの「伝導熱制御」、そしてヒートパイプや機械式冷凍機などの「熱・流体制御」に分類されます。宇宙機の熱制御システムは、ミッションの投入軌道および姿勢制御、搭載機器、電力リソースによって完成させる絵が変化するパズルのようなもので、各ピース(要素技術)を組み合わせ、ミッション要求に対していかに最適かつ信頼性の高い熱制御システムを組み上げるかが重要です。近年では、ミッション高度化に伴う搭載

機器の高発熱密度化や、宇宙機小型化による機器の高密度実装要求の高まり、探査・科学ミッションの多様化などによって、熱制御システムに対する要求は厳しさを増しています。このため、将来の熱制御システム、宇宙科学・探査の新しい絵を完成させるためには、不足するであろう重要なピースが何かを見極め、それらの研究開発を進め、技術レベルを上げることがとても大切なのです。

では、その重要なピースは何か？ここでは「熱・流体制御」に焦点を当てていきましょう。宇宙機内部の発熱は最外部のラジエーターで放熱されますが、高密度に機器が搭載された場合、熱の発生源から放熱部までいかに効率よく、省電力で熱を運ぶかが重要になります。そこで将来の熱輸送技術として期待され、国内外で活発に研究が進められているのが、内部に封入された流体の蒸発と凝縮を利用して熱エネルギーを運ぶ、「気液二相熱流体デバイス」です。代表的なものとして、1964年に米国で技術実証され、これまでに宇宙利用実績も多数あるヒートパイプが挙げられます。近年研究開発が進められている次世代技術としては、ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe: LHP)、自励振動ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe: OHP)、そして気液二相メカニカルポンプループ (Two-Phase Mechanical Pumped Fluid Loop: TPMPFL) が挙げられます。これらの次世代技術のうちの1つ、LHPについて、動作原理と最新研究成果を以降、紹介します。

ループヒートパイプの動作原理と特性

図1にLHPの基本構造を示します。LHPは受熱部の蒸発器、放熱部の凝縮器、液量を調整する補償室、これらをつなぐ蒸気管、液管から構成されます。宇宙用LHPには作動流体として、アンモニアが多く用いられます。蒸発器内には、流体の駆動源となる毛細管力を生み出す多孔質体があり、蒸発器へ熱が加えられると、封入された液体が多孔質体表面で蒸発し、蒸気管を流動します。凝縮器まで到達した蒸気は、液体へと凝縮し、このとき放熱します。液体は液管を通して蒸発器、補償室へと戻ります。LHPは蒸発器の多孔質体で生じる毛細管力のみを駆動源とすることから、電力を用いることなく長距離・大量熱輸送が可能であり、動作特性の重力依存性が小さいといった宇宙機にとって魅力的な特徴を有します。LHPは、これまで国内外の多くの宇宙ミッションで実績を積んできました[1-3]。しかし長年、研究者・技術者を悩ませてきた課題もありました。そのうちの1つが、機器からの発熱密度が高まった条件で生じる蒸発器の著しい熱伝達性能の低下でした。

図2に負荷熱流束 (単位面積当たりの発熱量) に対するLHP蒸発器の温度変化を模式的に表した図を示します。LHPの熱輸送限界は、原理的には駆動源となる蒸発器多孔質体の最大毛細管力によって決定されます。しかし実際には、ある熱流束を境に蒸発器熱伝達特性が著しく低下し、急激な温度上昇が生じることが実用上の動作限界を決定していました。性能理論限界までLHPの能力を引き出し、高熱流束条件での動作信頼性を上げるために、この現象のメカニズム解明が必要不可欠です。

高熱流束での多孔質体界面熱輸送メカニズムの解明とLHP応用

熱伝達性低下メカニズムを明らかにするにはどうすれば良いでしょうか？熱の流れを理解するには温度分布を捉えられる赤外観察、相変化現象を理解するには液体と気体の境界 (気液界面) の動きを捉えられる可視光での観察が有効です。先行研究で赤外・可視それぞれの波長領域の観測結果の報告例はあったものの赤外・可視を組み合わせた観察や、現象が生じる実スケール (数 μm ～数十 μm) での観察例は無く、現象理解には至っていませんでした。そこで筆者含む研究チームで、マイクロスケール赤外・可視観測装置を構築し、蒸発器内部を模擬した試料表面の熱輸送現象の観察から研究に取り組みました。

観測装置のアイデア自体は比較的シンプルなものであったため、研究開始当初は楽観的に考えていたものの、実に約2年もの間、装置構成や計測条件、試料を変えては上手くいかない試行錯誤の日々を過ごしました。熱伝達を担う支配因子や熱伝達特性が著しく低下するメカニズムなどの手がかりが得られず、研究者としては楽しくも苦しい日々を過ごしていた中、未だに忘れられない瞬間があります。ある時、可視光観察で意図せず視野がほとんど暗くなる光源設定になってしまったことがありました。暗いと当然得られる情報も少ないと考え、それまで検討すらしていなかった条件だったのですが、画面を見るとそれまで着目していなかった観察領域 (蒸気溝の内部) に蒸発器容器と多孔質体を繋ぐ影がうっすらと見え、さらに熱伝達性能が著しく低下する熱流束条件でその影がはじけるようにして消失する過程を観測したのです。初めて実験中に鳥肌が立ちました。これが、蒸発器の熱伝達特性が急激に低下する要因を捉えることに成功した瞬間でした。

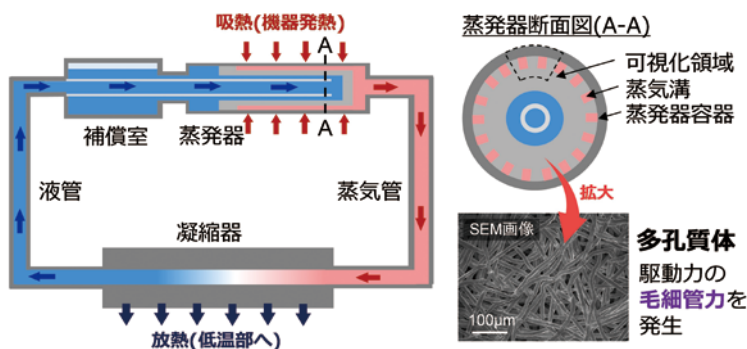


図1: ループヒートパイプの基本構造

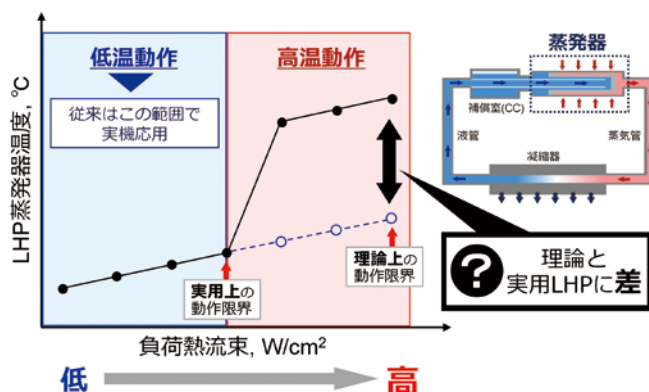


図2: 負荷熱流束に対する蒸発器の温度変化の例

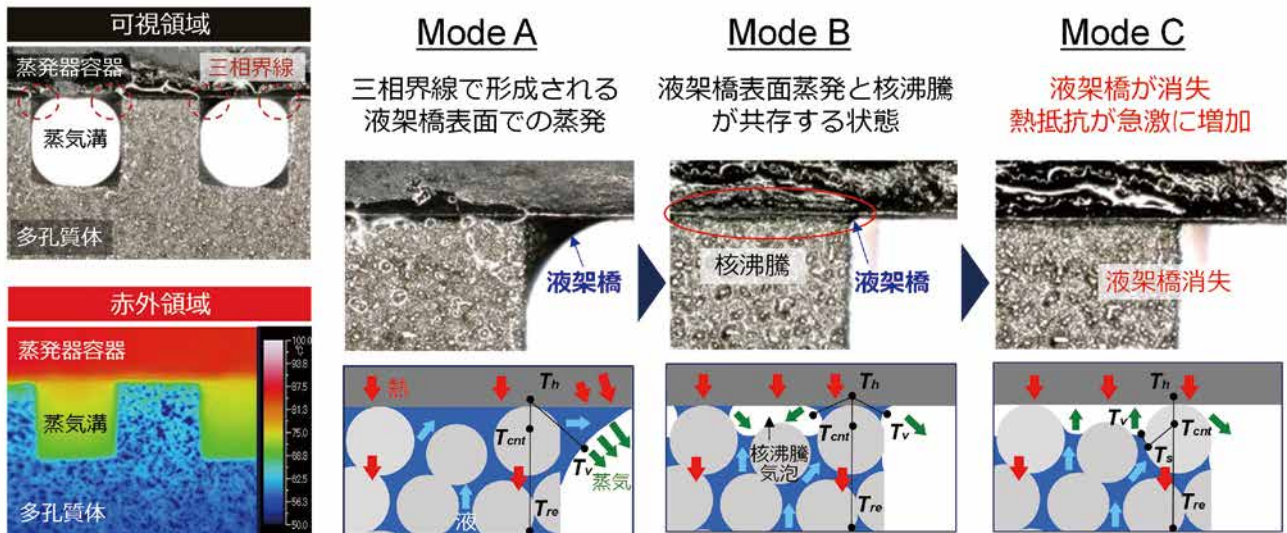


図3：蒸発器内の3種の熱流動様式

この現象をより明瞭に観測できるよう光源を改良し、この影が熱伝達において重要な役割を担う液架橋であること、液架橋が消失することが性能低下の本質的要因であることを明らかにすることができました。また多孔質体熱流動現象は図3に示すように、Mode A：低熱流束時、液架橋表面において薄液膜蒸発が生じる様式、Mode B：中熱流束時、液架橋表面の薄液膜蒸発と核沸騰現象が共存する様式、Mode C：高熱流束時、液架橋が消失し多孔質体内部の気液界面で蒸発が生じる様式の3種の様式に分類できることを明らかにしました。さらに上記の分類は、多孔質体の特性（熱伝導率、細孔半径、浸透率）によらず適用可能なこと、伝熱促進効果の高い薄液膜蒸発と核沸騰を共存できる界面構造を形成することで、従来よりも5～6倍高い熱伝達性能が得られることを明らかにしました[4]。

また薄液膜蒸発理論に基づく熱流動モデルを構築し、(1) 熱伝達の効率が非常に高くなる薄液膜が形成される固気液三相界線領域の増大と、(2) 蒸発器容器・多孔質体と作動流体間の濡れ性*の向上が、LHP高性能化の指針であることを示しました。これらの理論的予測は、マイクロスケール赤外・可視観測装置を用いてそれぞれ要素技術レベルで実証しました[5、6]。さらに、(1)の基礎的知見をLHPに適用し、蒸発器製作技術とシステム熱流動設計の制約の中で固気液三相界線領域を最大化した結果、LHPシステムレベルで実用上の動作限界を大きく向上させ、従来に対し約2倍の18.2 W/cm²の高熱流束条件での熱輸送を達成しました[7]。これらの成果は、従来は用いられることのなかった高熱流束領域でのLHPの宇宙機適用を可能にすることや、想定外の高密度発熱事象から宇宙機を守ることなど、熱制御システムとしての信頼性向上につながる事が期待できます。これから技術成熟度レベルを向上させるなど課題はありますが、将来の宇宙機熱制御を担う、パズルの重要な1ピースとなることを確信しています。

おわりに

本稿では宇宙用熱輸送デバイスの1つであるループヒートパイプの最新の研究成果について紹介しました。従来の

宇宙科学・探査ミッションにおいて、熱制御システムは外には見えにくい「縁の下の力持ち」のような存在でしたが、熱的な厳しさが増す将来ミッションにおいてはその方向性を決定づける存在になると考えています。多様化するミッションを高次を実現するために、不足するパズルのピースを生み出すことにとどまらず、将来の宇宙科学・探査の絵自体を大きく変えられるような新たな熱制御技術を生み出すことが、1人の宇宙機熱屋としての夢です。最後に本稿で紹介した研究に関してお世話になりました、名古屋大学の長野 方星教授、岡 智絵美助教、豊橋技術科学大学の西川 原理仁助教、長崎大学の近藤 智恵子教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Ku, "Operating Characteristics of Loop Heat Pipes," *Proc. of 29th Int. Conf. on Environmental Systems*, 1999-01-2007, 1999
- [2] H. Nagai and S. Ueno, "Performance Evaluation of Double-condenser Loop Heat Pipe Onboard Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) in Thermal Vacuum Testing," *Proc. of 35th Int. Conf. on Environmental Systems*, 2005-01-2939, 2005
- [3] A. Okamoto, J. Melendez, and F. Romera, "Loop Heat Pipes for ASTRO-H/SXS," *Proc. of Int. Conf. Environmental Systems, ICES-2017-349*, 2017
- [4] K. Odagiri, M. Nishikawara, and H. Nagano, "Microscale infrared observation of liquid-vapor interface behavior on the surface of porous media for loop heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, 1083-1090, 2017
- [5] K. Odagiri and H. Nagano, "Characteristics of phase-change heat transfer in a capillary evaporator based on microscale infrared/visible observation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, 938-945, 2019
- [6] C. Oka, K. Odagiri, and H. Nagano, "Effect of wettability of a porous stainless steel on thermally induced liquid-vapor interface behavior," *Surface Topography: Metrology and Properties*, Vol. 5(4), 044006, 2017
- [7] K. Odagiri and H. Nagano, "Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 140, 530-538, 2019

* 濡れ性は、液体と固体の間の濡れやすさを表す指標である。液体・固体間の接触角で定量的に表される。例えば雨傘にみられる撥水表面は、接触角を90°以上に大きくすることで、濡れにくい状態を作っている。

X線分光撮像衛星(XRISM)の開発進行中

世界の多くの科学者、技術者、他関係者が協力し、不斷の努力を続けて、2022年度の打上げを目指し、XRISMの開発と科学運用の準備が進んでいます。本稿ではXRISM開発の進捗をご報告します。

まず、衛星の基本機能を実現するためのバス部は、NEC府中事業場にて、ほぼ全てのコンポーネントを構体へ取り付け、電気配線を完了したあと、衛星構体を大型スペースチャンバ内に入れ、高温ベーキングを実施しました(高温ベーキングは、使用している材料が含有しているガスを排出させるための工程です)。そして、府中から、JAXA筑波宇宙センター総合環境試験棟(SITE)に搬入されました。NASAが開発しているX線集光ミラー(XMA)を保持するための巨大構造物である固定式光学ベンチ(FOB)もSITEに到着し、現在、XMAの到着を待っているところです。

次にミッション機器ですが、XRISMには、超高分解能分光観測を行う軟X線分光装置(Resolve)と広視野のCCDで撮像観測を行う軟X線撮像装置(Xtend)が搭載されます。

Resolveでは検出器を50mKの極低温に冷却します。デュワーを中心とする冷却システムは、住友重機械工業新居浜工場での組立てを完了。現在はSITEで試験中です。苦労の甲斐があって、8月中には規定の温度に冷却し維持できること、要求される分解能が得られることが確認でき、開発メンバーはホッと安堵しました。今後、振動試験などの機械環境試験、更なる機能性能試験、運用試験を行う予定です。

Xtendは現在、三菱重工業名古屋誘導推進システム製作所にて組立試験を行っており、CCD画像の評価などを実施中です。



筑波宇宙センターに到着した固定式光学ベンチ(FOB)

同時に、科学運用の準備も進めています。日米欧の科学者が協力して、打上げ直後のPerformance Verification Phaseで観測する天体の選定を行うとともに、観測対象ごとのチームを編成し、活動を開始しました。

衛星による観測を支える地上システムについては、衛星管制やデータ処理を行う各系内の試験、系間の接続試験を順次実施しています。

開発状況はXRISM公式ツイッター(@XRISM_jp)でも報告しています。フォロー、お願いします。(前島 弘則)

SLIM、いよいよフライトモデルの試験へ

小型月着陸実証機SLIMは、月面上の狙った所に降りるための「ピンポイント着陸技術」を開発・実証すること、併せて小型軽量化技術を開発・適用すること、この2つを大きな目的としたプロジェクトです。これまでは難しかった「降りたいところに降りる」を実現するために、着陸の正確さを、これまでの数km～10数km程度から一気に100m級にまで高めようとしています。



相模原市立博物館で企画展開始を待つSLIM展示モデル

2016年4月からJAXAプロジェクトとなったSLIMですが、2019年度からは“詳細設計フェーズ”という段階へと進んでいました。このフェーズでは、モデルを使った各種試験なども行いつつ、細部の設計を確定させる作業を行い、最終的に確定した設計について専門家に確認してもらって審査を受けることになります(詳細設計審査)。SLIMもこの一連の審査プロセスを順次進め

て、最終的に、2021年の春に審査を完了することができました。そのあとは、“制作・試験・維持設計フェーズ”と呼ばれる次のフェーズに進んでいます。2021年秋からは、実際に打ち上げるフライトモデルを用いたシステム総合動作の試験も開始される予定ですので、2022年度の打上げに向けて、また一歩近づいた状況です。

さて、詳細設計フェーズの中で行った試験の1つに、探査機モデルを用いた機械環境・熱環境の試験、というものもありました。これは、構造特性や熱特性をフライトモデルに合わせて作ったモデルを用いて、打上げ時の振動衝撃や宇宙の熱環境に探査機が耐えられることを確認する試験でした。この際に使用したのは、“本物”ではないにせよ“本気”でつくったモデルですから、そのままにしておくのはもったいないと、展示用のモデルとして整備することにしました。SLIMプロジェクトメンバー以外の職員にも手伝ってもらって、ちょうどこの夏に完成したばかりですが、早速、相模原キャンパスの向かいにある相模原市立博物館で展示してもらえることになっています。JAXA連携企画展「相模原と月」にあわせた展示です(10月1日～10月17日の予定)。新型コロナウイルスの影響もまだまだ続いています。が、もし機会がありましたら、ぜひご覧頂ければと思います。

(坂井 真一郎)

“星の王子さまに会いにいきませんか ミリオンキャンペーン2”完結！

「はやぶさ2」の打上げ1年以上前の2013年4月10日から8月9日にかけて、“星の王子さまに会いにいきませんか ミリオンキャンペーン2”というものを行いました。これは、「はやぶさ2」を応援して下さる皆さんから名前やメッセージなどを送っていただき、「はやぶさ2」に搭載するという企画です。タッチダウンの時に目印になるターゲットマーカーには、名前を刻んだシートを入れ、小惑星リュウグウのサンプルを持ち帰る再突入カプセルには、名前やメッセージ・イラストの電子ファイルが記憶されたメモリチップを入れました。ターゲットマーカーには18万人余りの名前が、メモリチップには23万人ほどの名前やメッセージなどが入っています。合計192の国や地域の皆さんの名前です。

ターゲットマーカーは5個搭載されていましたが、その全てに名前を刻んだシートを入れました。4つのターゲットマーカーはリュウグウ表面にあります。誰かがリュウグウに行ったらターゲット



メモリチップには、2012年11月に行った「はやぶさ2ジョイント・サイエンスチーム会議」の集合写真も記録してありました。左上の往復乗車券にはミッションに関するいろいろな情報が書かれています。

マーカーを見つけて中を開けてみると、18万人余りの名前を読むことができることになります。ただし、顕微鏡が必要です。

メモリチップの方は、ISASニュース2021年3月号*に記事がありますように、カプセルから取り出すことができ、その内容もきちんと読むことができました。寄せられた皆さんの名前やメッセージ・イラストが、リュウグウまで行って無事に地球に戻ってきたわけですね。皆さんの分身が、6年間、52億4千万kmの宇宙の旅をしてきたと言ってもよいかもしれません。

メモリチップに記憶させた名前・メッセージ・イラストは、「はやぶさ2」のウェブサイトで確認をすることができます。特に、名前については、「はやぶさ2」への乗車証明書としてダウンロードできます。乗車証明書には、リュウグウまでの往復乗車券も描かれています。また、ターゲットマーカーに入れたシートについても、どの位置に自分の名前が書かれているか調べることができます。宇宙旅行は可能になりつつありますが、まだ小惑星まで行ってくるのは難しそうです。とりあえずは、皆さんの分身がリュウグウまで行って、さらに地球まで戻ってきたということで、想像の世界で宇宙旅行を楽しんでいただこうと思います。

「はやぶさ2」の運用はまだ続いています。近いうちに、また「はやぶさ2」拡張ミッションへの乗車券が発行できるかもしれません。お楽しみに。(吉川 真)

●メモリチップ検索：

https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20210630_MsgSearch/

●ターゲットマーカー検索：<https://www.haya2-campaign.jp/>

* https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews480.pdf

「ベピコロンボ」2回目の金星スイングバイに成功、いざ水星へ

日欧共同水星探査計画「ベピコロンボ」の水星磁気圏探査機「みお」および水星表面探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) は、2021年8月10日に2回目となる金星スイングバイを実施しました。探査機は同日の22時51分54秒 (日本時間) に最接近高度552 kmを通過し、金星の重力を利用して毎秒5.7 kmの減速を行って目標通りの軌道に投入することに成功しました。これにより探査機はいよいよ水星に向けて舵を切ったことになります。残り6回の水星スイングバイを経て、2025年12月に水星周回軌道へ投入予定です。

今回のスイングバイでは1回目の最接近 (高度10,722 km) に比べ、はるかに金星の近くを通過しました。そのため、通過時には太陽光シールドに覆われている「みお」も金星大気からの強い太陽反射光に照らされ、探査機の側面に位置する太陽光パネルの温度が5分間で約110℃も上昇しました。想定内の変化だったとはいえ、運用室のディスプレイに映し出された温度グラフの急峻な変化に運用チーム一同声を上げたとともに、まさに金星の間近を通過したことを実感した瞬間でした。

1回目に引き続き今回も「みお」に搭載されるほぼ全ての観測装置を稼働させ、金星電離圏や周辺宇宙環境の科学観測を実施しました。特に太陽直下点付近のプラズマ観測は過去にもほとんど例がないため、重要な金星観測の機会となります。観測は順調に実施され、金星周辺のプラズマ粒子および磁場の観測に成

2回目の金星スイングバイにおいて探査機を見守った「みお」運用チーム。



功しました。観測データは各チームを中心に鋭意解析中です。

金星スイングバイ中の「みお」の運用は全て事前に探査機に登録したシーケンスに沿って実施し、「みお」運用チームは相模原の運用室から探査機の状態を監視しました。また観測機器チームもリモートで運用に参加し、取れたての観測データをわれわれに共有してくれました。やはり探査機から送られてくる観測データを目にする瞬間の感覚は格別です。

次はいよいよ1回目の水星スイングバイが早くも2021年10月2日 (日本時間) に迫ってきています。高度約200 kmを通過予定で、探査機搭載のモニタカメラから送られてくる水星表面の大迫力画像や、待ちに待った水星の科学観測データを目にする瞬間が待ち遠しいです。水星への旅路を続ける「ベピコロンボ」からますます目が離せません。(村上 豪)

シンポジウム「月面における科学」

宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会にて、日本が主導的に月面活動を展開していく上で今後10年間の技術開発を支えるものは何かという議論が展開された。これは、月面インフラを活用した30年後の活動への興味が広い分野にて高いことを踏まえつつも、それまでの期間における戦略的活動を問うたものである。その議論を踏まえ、宇宙政策委員会基本政策部会から、「月面活動に関する基本的な考え方(案)」において「アルテミス計画への参画により我が国の月面活動の機会が拡大していくことを念頭に、当該機会を活用して新たな知の創造につながる世界的な科学の成果を創出することを目指す」ことが示された*。

そして同部会から、第一級の成果をもたらす「月面における科学」として次の3つのテーマが例示された：(a) 月面からの天体観測(月面天文台)(図1)、(b) 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還(図2)、(c) 月震計ネットワークによる月内部構造の把握(図3)。

本シンポジウムは、「月面における科学」としてまずはこれら3テーマについて議論を行うことを目的に、宇宙科学研究所が中心となって2021年8月18日にリモート開催された。企画セッションとして、第1部「月面における科学を取り巻く状況」、第2部「月面における科学」、第3部「パネルディスカッション」を設けること

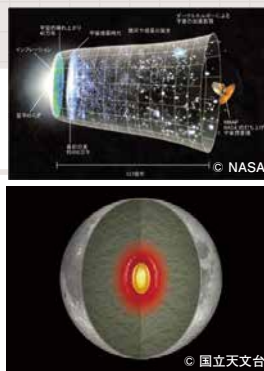


図1(左上)：宇宙の年表／図2(上)：初期の太陽系で起こった惑星同士の衝突(想像図)／図3(左下)：月の内部構造(想像図)

で、従来の宇宙科学とアカデミアの枠組みに閉じ籠ることなく産業界との対話も意識した情報共有と議論を行った。第1部では、国際宇宙探査の最近の動きおよび関連するフィージビリティスタディの公募、宇宙探査イノベーションハブからの期待、宇宙工学・宇宙理学からの期待が紹介された。第2部では、前述の3テーマ各々のサイエンスゴールとそれらを目指した2030年代までの戦略的プログラムが提案された。第3部では、アポロ計画に匹敵するインパクトをもって日本が主導的に科学を大きくアップデートさせる方策について、参加者を交えた議論がなされた。

本シンポジウムをきっかけとして、冒頭で述べた国の指針に対してサイエンスコミュニティが宇宙科学・探査における絶好の機会と捉えつつ、緊張感も持ってタイムリーに応えようとする機運が更に高まることを、ISAS国際宇宙探査専門委員会の一員として願っている。

(稲富 裕光)

* 宇宙政策委員会基本政策部会第19回会合 資料2 (<https://www8.cao.go.jp/space/committee/01-kihon/kihon-dai19/siryou2.pdf>)

第20回「君が作る宇宙ミッション(きみっしょん)」開催

8月2日から8月6日の5日間、高校生向け体験型イベント「君が作る宇宙ミッション(きみっしょん)」を、初のオンラインで開催いたしました。きみっしょんでは、「自ら考え、自ら決定し、自ら作業する」を理念として掲げており、高校生が主体的に宇宙ミッションの立案・検討を行うことで、科学研究とはどういうものであるか、身をもって学んでもらうことを狙いとしています。

今年は、課題作文で選抜された高校生12名が2班に分かれ、総勢30名の宇宙研で学ぶ大学院生のサポートのもと、ミッションにおける背景・目的・手段等について、重点的に検討しました。今回は、高校生が「積極性と協調性のバランス感覚を養う」ことを目標に、高校生たちへの指導・サポートを行いました。

8月6日の昼に行われた最終発表会では、多くのJAXA役職員・研究員の方々にもご参加いただき、活発な議論が行われました。研究者の方々から貴重な意見をいただき、高校生たちは多くの学びや刺激を得たことと思います。



Zoomの画面越しでの集合写真(参加者とスタッフ)

きみっしょんでは、高校生の進路選択の幅を広げることを目的に、ミッション作成以外にも様々なイベントを企画しています。今年は、尾崎 直哉特任助教による宇宙ミッションデザインに関する講義、中島 晋太郎特任助教による超小型探査機に関する講義、「はやぶさ2」プロジェクトの岡田 達明准教授による「はやぶさ2」の理学成果に関する講義を実施しました。また、大学院生の研究を紹介する「院生講義」や、きみっしょんに高校生の時に参加し、現在社会で活躍されているOB・OGの方を招いての「OB・OG座談会」を実施しました。普段関わることのない大学院生や研究者、社会人との交流は、高校生たちが進路を考える上で大いに参考になったはずです。

一方で、運営に携わっている大学院生にとっても、きみっしょんは大きな刺激になりました。高校生への指導を通して、自身の研究を振り返る良い機会になったことと思います。研究と両立しながらきみっしょんに参加するというのは決して楽なことではありませんが、かけがえのない多くの学びを得ることができたと思います。

また、冒頭でも述べましたが、今年度は初のオンライン開催でした。事前にZoomやSlackなどのオンラインツールの整備や運営方法の見直しなどを念入りに行いました。一方で、今回のきみっしょんを通して課題も多く見つかりました。これらの点を踏まえ、来年度以降に活かしていきたいと考えております。

最後に、きみっしょんの運営・開催にご協力いただいた皆様に御礼申し上げます。すでに来年度のきみっしょんへ向けて議論が始まっています。今後のきみっしょんにもぜひご期待ください。

(藤田 雅大)

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 10 回

OMOTENASHIの 衝撃緩和技術

OMOTENASHI探査機は最終降下中にOrbiting Module (OM) から、Rocket Motor (RM) とSurface Probe (SP) を分離し、RM逆噴射の減速後、50m/s程度の速度でSPを月面へ到達させる計画です。今日までに110機以上の着陸探査機が月、火星、小惑星へ向けて打ち上げられ、いずれの探査機にも高速衝突や転倒から破壊を防ぎ、レゴリスの付着からミッション機能の漸減を抑制する着陸装置が搭載されていました。OMOTENASHIでは、史上稀にみる高速度でSPを月面へやさしく降ろすために、その全周へ衝撃緩和装置を搭載することで破壊の危険性を排除する方針としました。この着陸条件と各種機能環境試験の試行錯誤を経て、衝撃吸収材とエアバッグで減速距離を確保し、さらにSPに耐衝撃構造を持たせた、3つの機能が同乗する着陸装置を最終案としました。

衝撃吸収材(図1)とエアバッグは、それぞれ利点を持つ

ています。前者は受動的に機能しエネルギー吸収密度が高く、後者は広い範囲をカバーし減速距離も大きくとることができます。一方、吸収材を全周囲に取り付ける空間的余裕がない、搭載状態ではエアバッグを展開するスペースがないなど、小型機特有の寸法制約に阻まれました。そこで、RMとSPの間に金属製の衝撃吸収材を衝突方向に機能するようねじ固定し、軌道上で宇宙空間へ曝露するSP上面にエアバッグを搭載して外空間に展開するという、寸法制約を回避したハイブリッド案を採用しました。衝撃吸収材はSLIM探査機のパッドに用いられた切頂八面体のラティス構造にネジ取り付けインターフェースをつけるなどして3Dプリンタで製造しました。エアバッグにはEGG^{*1}で採用された気室と外皮の二重構造で、気室に用いるポリイミドを融着により接合したものを用いました。耐衝撃構造はLunar-Aのペネトレータの開発で採用された樹脂とガラスビーズの混合材を電子機器に充填させました。これらはISASがこれまでに培ってきた技術であり、小型探査機向けに仕立て直して用いることでOMOTENASHIの着陸装置は小型軽量化と耐衝撃性を両立させることができました。

開発の中で一番の難関は耐衝撃性の試験評価(高速衝突試験)にありました。特に、エアバッグは展開後に大面積をとるため、高高度からの落下による高速衝突では空気抵抗により十分な速度まで到達できず、試験条件が成立しないことが早い段階でわかっていました。しかしながら、逆転の発想で、月面が衝撃緩和装置に迫ってくる試験方法を思い付き、速度108km/hでの衝突試験を実現することができました。具体的には、一般財団法人日本自動車研究所の衝突実験場設備を用い、エアバッグや衝撃吸収材に車を衝突させました(図2)。自分には経験のない試験でしたが、その結果から減速距離と衝突時の加速度の関係を計算で見積もることができるようになり、そのあとの設計が加速されました。また、角田試験場の真空射出装置を用い、スケールモデルの真空雰囲気にある砂地への衝突試験も試み、衝撃緩和機能の設計検証を行うことができました。

Flight Modelでは、SPのアンテナ性能を出すために小型化ができず、搭載スペースへエアバッグを収めることができませんでした。そのため、月面を覆うレゴリスの柔軟性に期待し、また、着陸姿勢が月面に対してほぼ垂直になることを前提として、衝撃吸収材のみの搭載としました。エアバッグ外皮は展開型アンテナ^{*2}の表皮保護のために残し、膨張させる必要はなくなったので、気室とガス配管を削除して搭載スペースに収めることにしました。月面へはSP下面の衝撃吸収材から着陸し、計測された加速度値が変調された電波に乗って地上に届きますが、衝撃吸収材側からの衝突とそれ以外への衝突は、加速度の値と履歴形状が異なります。果たして、月面にやさしく降りるという目標に対してどのような形で地上に電波が届くのか楽しみです。

大槻 真嗣(おおつき まさつぐ)

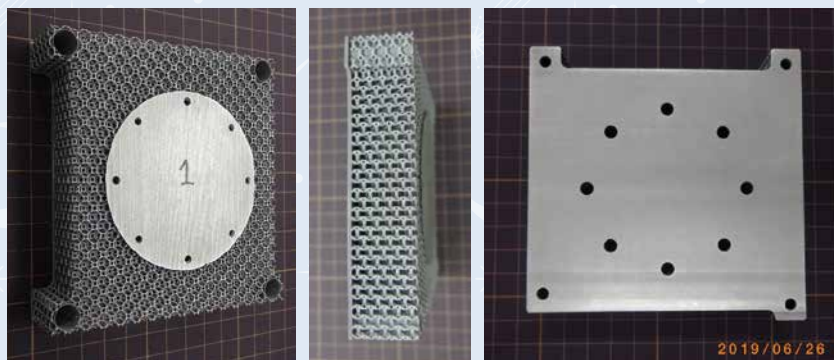


図1：3Dプリンタで製造したスキン付き衝撃吸収材



図2：自動車技術研究所での108 km/hの衝突試験の様子(左/試験構成、中/衝突時側面、右/衝突時上面)

*1 ISASニュース2017年11月号宇宙科学最前線参照 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews440.pdf

*2 ISASニュース2021年7月号連載記事参照 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews484.pdf



毎日新聞医療プレミア編集長
兼論説室

永山 悦子 (ながやま えつこ)

|| 探査の主人公を追いかけて

伝統の本欄への寄稿というお話をいただき、「頭が真っ白」になった。思い浮かぶのは、有名かつお世話になった先生方の原稿。宇宙科学は素人の私が何を書くのか。悩んだ末、この場をお借りするからには「あれしかない」と考えた。小惑星探査機「はやぶさ」と「はやぶさ2」の取材経験についてだ。

私は2005年に文部科学省記者クラブの担当となり、初めてJAXAの取材をすることになった。理系科目が苦手で、出身は法学部だが、星空は大好きだった。東京・渋谷の五島プラネタリウムは何度通ったか分からない。「JAXAの取材ができる」と思うだけでうれしくなった。

担当になった直後、「はやぶさ」の小惑星イトカワへの着陸運用が実施された。これが私にとって非常に幸運だったと思う。JAXA相模原キャンパスの大会議室に設けられた記者室に、刻々と探査機の高度や現状の情報が届く。3億kmも彼方にある小さな探査機の様子が手に取るように分かることに、「すごい！これが宇宙探査なんだ」と魅力にとりつかれた。

中でも感動したのは、ミネルバが撮影した「はやぶさ」の太陽電池パドルと、イトカワに映った「はやぶさ」自身の影の画像。「探査機が間違いなくそこにいる」。何にも代えがたいリアリティーだった。

2010年6月の「はやぶさ」帰還の取材では、社内から「(有人宇宙開発と違って人命にかかわらない)無人機の取材のために海外へ出張する必要があるのか」と後ろ向きの反応もあった。しかし、私は「現地で取材したい」と上司を説得した。オーストラリアであの劇的な瞬間に立ち合い、帰国後に川口 淳一郎さんから「現地へ行ったんですね。幸せ者ですね」と言われたことは忘れられない。

私がJAXA取材を担当したのはこのころまで。だが、川口さんたちの本番機(「はやぶさ2」)への強い思いを聞いていたから、「取材を続けたい」という思いを抑えられなかった。メインの担当記者がいる横で、「趣味」として取材を続けた。

2014年12月の「はやぶさ2」打上げは、休みを取って「自腹」で種子島へ行った。そのころから私はツイッター(アカウント名「はやぶさ毎日」)を始め、毎日新聞のウェブサイトに「はやぶさ2」応援ページも作ってもらった。

「はやぶさ2」にかかわる皆さんには、数え切れないほどイン



2010年に「はやぶさ」帰還の取材で訪れたウーメラで。現地へ行った日本の大手メディアは実は少なかった(筆者は右から2人目)。

タビューをお願いした。打上げ直前には、津田 雄一さんたち若手メンバーに話を聞き、皆さんの「まじめに面白がる」姿勢に触れた。「これは二番煎じなんかじゃない」と確信を持ったことを思い出す。ウェブサイトには、それらの記事約400本が掲載されている。

「はやぶさ2」がリュウグウへ向かっていたころ、宇宙研の広報委員会にも参加させていただいた。その際、NASAやESAを思い浮かべて、『「はやぶさ2」のような注目プロジェクトは、もっと組織的な広報体制を作るべきだ』と発言した記憶がある。

実際は、吉川 真さんや細田 聡史さんたちの「手作り感いっぱい」の広報活動が続いた。考えが変わったのは、小惑星に人工クレーターを作る実験の日のウェブ中継だ。プロジェクトチームの皆さんがヘルメットをかぶって登場した映像を見て納得した。「スタイリッシュなものよりも、これが一番宇宙研らしいリアリティーがある広報だ」と。

唯一悔しかったのは、新型コロナウイルスの感染拡大で、「はやぶさ2」の帰還を現地で取材できなかったこと。再び休みを使って取材へ行こうと計画していた。ギリギリになっても事態は好転せず、昨年10月下旬に予約していた飛行機のチケットをキャンセルした。

最後に、「はやぶさ」帰還取材の出張について、私が上司を説得したときの話に戻りたい。私は上司に「この探査機のために、どれだけ多くの人が汗を流し、知恵を絞ったか。どれだけの方が勇気づけられたか、という記事を書きたい」と訴えた。すると、上司はこう言った。「そうか。「はやぶさ」取材は機械の塊を紹介するのではなく、人間ドラマを伝えるものなんだな」。

「はやぶさくん」や「はや2くん」、「あかつきくん」、「イカ坊」、「みおちゃん」も素晴らしいが、ドラマの主人公は、それらを開発・運用している皆さんののだ。「はやぶさ」、「はやぶさ2」では、ほぼリアルタイムの情報を提供いただき、運用のさなかにも取材に協力いただいた。そこからにじむ喜びや苦悩が社会へ伝わり、管制室の喜怒哀楽を「我がこと」として共有してもらえたのではないかなと思う。

人によって関心を寄せる情報はさまざま。だから、1つでも多くの情報を発信することが、共感を広げるために欠かせないと思う。私はこれからも宇宙探査の主人公の皆さんの取材を続けたい。1人でも多くの人に、宇宙探査の魅力に気づいてもらうために。

編集後記

最近ハマった本、「鹿の王」。医療、民族と文化、政治家の駆け引きとそこで翻弄される人々がファンタジーのオブラートに包まれて描かれている。なかでも、医学者が有力政治家にすり寄り、別の学派を排除して、自らの学派の勢力を強めようとする様子には色々と考えさせられた。(生田 ちさと)



ISASニュース No.486 2021年9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。▶ <https://www.isas.jaxa.jp/>