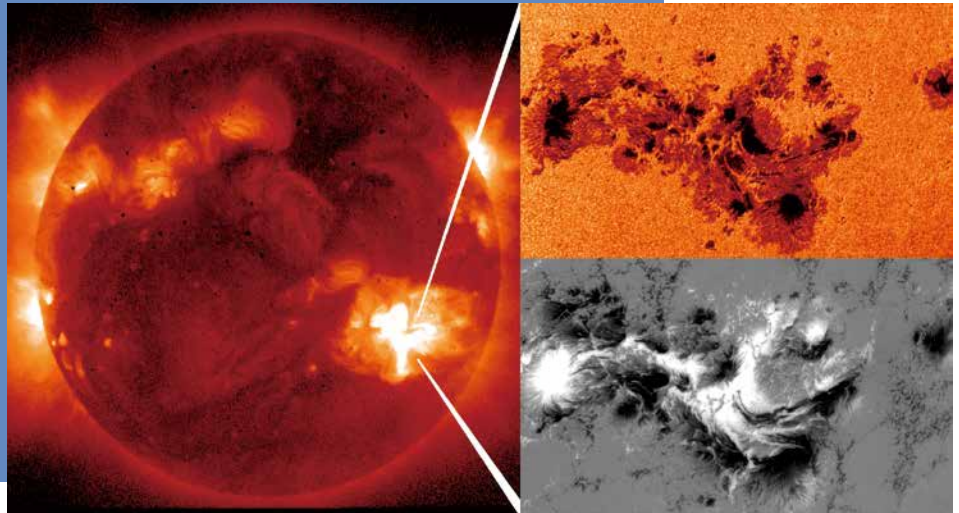


太陽観測衛星「ひので」、2024年5月の大規模フレアの観測に成功！

2024年5月に日本各地でオーロラが観測される現象がありました。これは、太陽に出現した大型の黒点で、Xクラスという最大規模の太陽フレアが頻発したことによります。「ひので」は、この黒点やフレアの観測に成功しました。(左) X線望遠鏡による太陽全面画像。黒点上空は強く加熱され、明るく輝いている。(右) 可視光磁場望遠鏡による太陽表面の明るさおよび磁場分布(白：N極・黒：S極)。今回フレアを起こした黒点は面積が大きく、非常に複雑な磁場形状を示すことが明らかになった。 ©JAXA, NAOJ



The Forefront of Space Science

宇宙 科学 最前線

端面燃焼式ハイブリッドロケットの実用化に向けて

東北大学 学際科学フロンティア研究所 新領域創成研究部 助教 齋藤 勇士(さいとう ゆうじ)

ハイブリッドロケットとは？

宇宙開発において人工衛星、探査機、有人宇宙船などの輸送手段として様々なロケットが用いられている。化学推進ロケットは酸化剤と燃料の相により3種類に分けられる。酸化剤と燃料が共に液相である液体ロケット、酸化剤と燃料が共に固相である固体ロケット、そして酸化剤と燃料の相が異なるハイブリッドロケット(以降、HR)である。一般的にHRは、液相の酸化剤と固相の燃料を用いる。HRは、固体ロケットと比較して、酸化剤と燃料を別々に貯蔵しているため安全であり、酸化剤の供給を調節することによって燃焼の停止、再点火および推力制御が可能というメリットを有する。また、液体ロケットと比較して、燃料にプラスチックなどの固体燃料を用いることで安全であり、液体推進剤の供給系が酸化剤の1系統で良いので、構造が簡単になり製造コストを抑えられるメリットを有する。

一般的なHRは、筒形燃料を用いその中に酸化剤を供給し、境界層燃焼によって燃料は後退(ガス化)していく(図1a)。HRは、1930年代から研究開発が進められているが、実用化の例は数例しかなく、地上から打上げ軌道に到達するロケット形態としての実用例も少ない。この理由として、一般的に「燃料後退速度が遅いこと」、「燃焼中もしくは推力制御中にロケット性能が変動(O/F(酸化剤と燃料の混合比)シフトの

影響)すること」ことが挙げられる。これら2つの課題を克服するために、世界中でHRに関する研究開発が進められている(境界層燃焼の事象および技術課題は、嶋田先生および永田先生の特集記事[1,2]を参照してください)。

端面燃焼式ハイブリッドロケット

端面燃焼式HR(図1b)は、燃料軸方向に向かって開いた微小ポートが多数に配置されており、各ポート内に酸化剤が流れ、燃料出口端面で拡散火炎を形成する。燃焼面積は燃焼中に常に一定であるだけでなく、基礎燃焼試験より、ポート内に形成される火炎移動速度(ロケット燃焼の場合、燃料後退速度と同義)が燃焼室圧力に比例することから推力制御中においてもO/Fシフトが発生しないことが期待されている。これは、推力制御を行うために増加された酸化剤質量流量によって、燃焼室圧力が増加しそれに伴って燃料後退速度および燃料質量流量が増加することで、O/Fがほぼ一定となるためである。また、燃焼室圧力を高くすることで、固体ロケットに比肩するほどの高い推力を有することも期待されている。

黎明期の研究開発

端面燃焼式HR燃料の変遷を図2(上)にまとめる。当初のアイデアは1997年の文献で確認することができ、当時はウェットタオル式(図2a)と呼ばれていた[3]。これは、多孔質もし

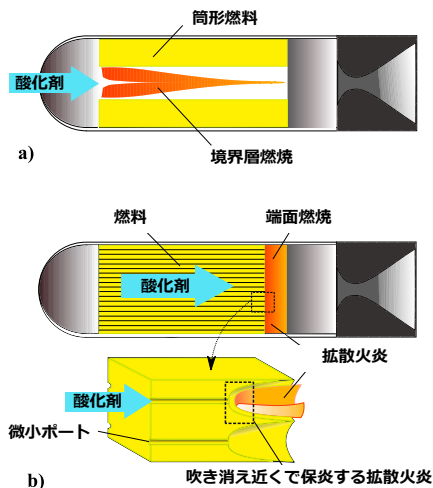


図1：a) 一般的なハイブリッドロケットとb) 端面燃焼式ハイブリッドロケットの概要図

くは繊維状の燃料に液体酸化剤を浸潤させたものを推進剤として用いるもので、固体推進剤の酸化剤粒子を液体酸化剤に置き換えたものに相当する。液体酸化剤を燃焼室に供給する機構を必要とせず、基本的な構造は従来の固体ロケットとほぼ同じである。固体ロケットと同様な構造を有する中で、推進剤後退速度を燃焼室圧力の関係で示した際に、燃焼室圧力を底としたべき指数（圧力指数）が1を超える結果を示した。圧力指数に関する説明は後述するが、固体ロケット燃焼の場合、圧力指数が1を超えてしまうと安定したロケット燃焼を得ることはできないため、ウェットタオル式HRの研究開発は止まっている。その後、ウェットタオル式HRにおいて酸化剤に浸潤させていた燃料のみを取り出し、フィルタのような多孔質燃料に酸化剤を供給する方式として、ドライタオル式（図2b）[4]の研究が進められた。しかし、燃料端部で形成された火炎が急激に上流部に燃え拡がること確認された。燃料内部に形成される拡散火炎の挙動を解明するために、透過性の高いアクリル樹脂（PMMA）に孔をあけて燃焼試験を行ったのが、現在の端面燃焼式HR[5]の初めと言える。ポート内部で形成される拡散火炎の挙動は、主にポート内部を流れる酸化剤流速によって制御することができ、燃料出口端面で火炎を維持するためには吹き消え近くの速い流速が必要である

ことが示された。数mm/sの燃料後退速度に対して、数十m/sの速い流速が必要であるため、最適な混合比燃焼を満たすために燃料充填率（単位断面積あたりに占める燃料割合）は95～97%（空隙率は3～5%）が必要であることが示されている。2000年代にはドリル加工によって端面燃焼式燃料の孔加工を行い、燃焼試験（図2c）を行ったが、所望する端面燃焼の実現にはならなかった。これは、ドリル加工で加工できる孔の直径が数mmとなり、燃料充填率を満たすためにはポート間隔が大きくなってしまい隣接するポートが繋がるができなかったためである。

高精度3Dプリンタによる燃料試作と世界初の実証試験

筆者は、北海道大学・永田 晴紀教授の指導のもと、端面燃焼式HRの研究開発を修士および博士研究として進めてきた。東京大学理学研究科のご協力のもと、高精度光造形技術を用いた燃料試作が始まった。造形効率などを考慮して外径20mmの小さい燃料を用いて、ポート径0.3mm、ポート数86個で燃料設計を行い、小型ロケット燃焼器を用いた燃焼試験（図2d）を行った。

HRの点火システムにおいて、固体ロケットと同じ火薬を用いた方法はHRの特質の安全性を損なうため、試作試験としてはニクロム線による加熱方式を採用した。両端に配線をつなげたニクロム線を燃料端面に設置し、配線をノズルから外に出し電圧をかけた。ノズルから白煙を検知するところまでは通常の点火シーケンス通りであったが、酸化剤を供給した途端に燃焼室圧力は急激に上昇し「バツ、バツ」と間欠的な火炎がノズルから噴出した。燃焼試験としては緊急停止となり酸化剤供給を停止し窒素パージ後、燃焼器内部を見ると丸焦げとなった燃料だけが残っていた。この現象を私たちは「逆火（図2h）[6]」と呼んでいる。逆火とは、何らかの原因で、燃料端面で形成していた拡散火炎がポート内部に入り込み燃料全体が燃えてしまう現象のことであり、造形された燃料のポート径のばらつきが原因となることも明らかになっている[8]。逆火が頻発する中で燃焼試験を複数回実施し、ポート精度を含む燃焼条件が整ったことで、世界で初めての端面燃焼式HRの実証[7]となった（図2d）。

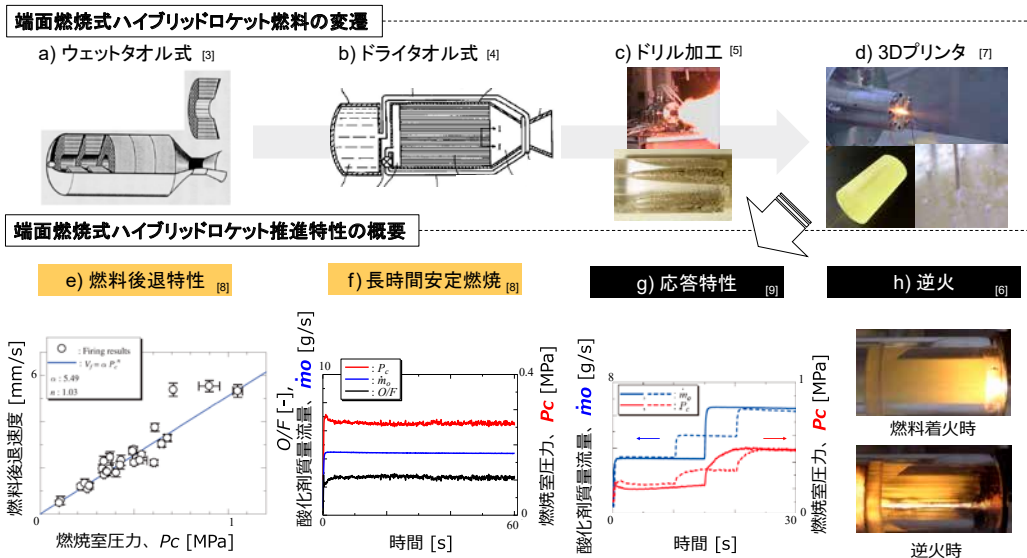


図2：端面燃焼式ハイブリッドロケット燃料の変遷（上）と推進特性の概要（下）

燃焼試験による推進性能の解明

ニクロム線着火装置は小型ロケット燃焼器のノズルスロートに詰まりやすく、そのときの圧力変化が逆火に影響を与えることが明らかになったため、ノズルから線香を入れた点火装置となった。極小流量のガス酸素を供給しながら線香を点火させると、少々活発な燐製燃焼（炎を生じないで煙の多い燃焼）が起きる。また、燃焼後の線香は自らの自重に耐えられないほどのスススな炭化物となり、燃焼器内でノズル詰まりを誘発しない熱源となりうるのである。白煙を検知後、ガス酸素を供給したところ、安定的に端面燃焼を実現できた。

点火手法が確立されてから毎日のように燃焼試験に取り掛かり、端面燃焼式HRの推進性能解明を目指してきた（図2下）。燃焼室圧力が0.1MPaから1.1MPaまでの範囲で燃焼実験に成功し、燃料後退速度が燃焼室圧力にほぼ比例するという特性（圧力指数がほぼ1、図2e）を示すと共に、80秒間を超えて安定的に燃焼することを確認した（図2f）[8]。HRにおいて圧力指数が1という燃焼特性は、燃料流量が酸化剤流量に比例的に追従するという推力制御特性を意味する。そこで、端面燃焼式HRの推力制御特性を燃焼試験により調査した。酸化剤流量を増減させてもO/Fがほぼ一定に保たれ、酸化剤質量流量の制御のみで、最適なO/Fを維持しながらの推力制御が可能であることを示した。供給される酸化剤質量流量に対して速やかに所望の燃焼室圧力に変化することが期待されるが、本方式の燃焼室圧力が酸化剤質量流量に対して一次遅れ系の応答特性（図2g）[9]およびヒステリシス特性[10]を有することも明らかになった。応答特性およびヒステリシス特性においては、ポート内に形成される後退形状の圧力依存性が原因と報告[11]されており、詳細な研究が進められている。

圧力指数は燃焼室圧力を底としたべき指数を示すが、端面

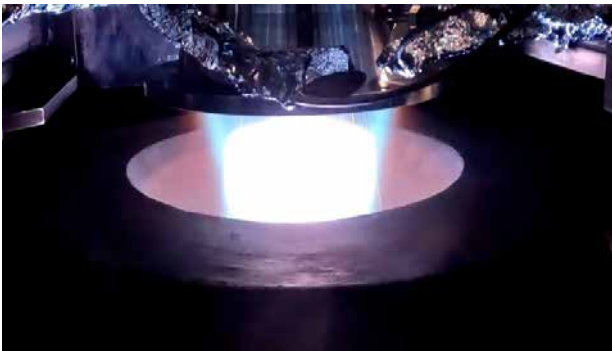


写真1：宇宙科学研究所あきる野実験施設での真空燃焼試験中のノズル火炎



写真2：共同研究開発メンバーの集合写真（筆者は前列右）

燃焼式HRにおいて圧力指数が1近くで安定的に燃焼できるのかと多くの質問を受ける。固体ロケットの場合、固体燃焼によって発生する推進剤質量流量とノズルから排出される質量流量が平衡となり、安定して燃焼継続できる条件として、1より小さい圧力指数が求められる。固体ロケット燃焼もしくは前述のウェットタール式HR燃焼の場合は、「推進剤（燃料+酸化剤）」後退速度の圧力指数に対して、端面燃焼式HR燃焼の場合は、酸化剤は供給されるため「燃料」後退速度の圧力指数となることから、圧力指数が1を超えても安定的に燃焼できる。

約1MPaの燃焼室圧力での端面燃焼HRは、推力で約5MPaの燃焼室圧力の固体ロケットと、比推力で炭化水素系液体ロケットにそれぞれ比肩し、推力制御特性で液体ロケットを凌ぐ革新的な化学ロケットの可能性を示している。しかし、1.1MPaを越える燃焼室圧力では逆火（図2h）[6]の頻発に直面し、さらなる高圧条件下での燃料後退特性および推進性能解明に至っていない。高圧燃焼になると各流路のポート精度の影響が大きくなる事が実験的および解析的に明らかになっているため、燃料製作精度の向上が求められる。

今後の展望

端面燃焼式HRは従来式の課題を克服し、固体および液体ロケットに引けを取らない推進性能を有する。しかし、高圧条件における逆火という端面燃焼式特有の課題を解決するためには、多孔ポート径の加工精度向上や3Dプリンタ（AM）造形可能な大型化などに取り組む必要がある。また、推力制御中の応答特性およびヒステリシス特性の解明に向けた基礎燃焼試験も求められる。

基礎的な研究に加えて、筆者はHR自体の技術成熟度（TRL）を向上させるべく、ベンチャー企業（株式会社ElevationSpace）との共同研究でハイブリッドロケット（スラスタ）を用いた軌道離脱推進装置の開発を進めている。宇宙ミッションにおける化学スラスタの多くは海外購入品であることが多く、かつ、高額である。そこで、ハイブリッドスラスタを採用し、その安全性の高さから独自開発を進めている。また、火薬類を用いないハイブリッドスラスタ点火システムの実用化は大きな技術課題であり、衛星メーカーおよびJAXAが開発を進める衛星用低毒スラスタをハイブリッドスラスタ点火システムに組み入れた共同研究も進めている[12]。宇宙科学研究所あきる野実験施設での地上および真空燃焼試験によって、着火および推進性能は確認済み（写真1・2）であり、2026年以降に軌道離脱ミッションを行う予定である。本ミッションの実現によって、ハイブリッドロケットのTRLは向上し、多くのミッションでハイブリッドロケット・スラスタ、そして、端面燃焼式HRが世界を席巻する日を楽しみに著者は日夜研究開発に励んでいる。

- [1] 嶋田, 宇宙科学の最前線, 2012:
<https://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2012/shimada/index.shtml>
<https://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.377/ISASnews377.pdf>
- [2] 永田, 日本燃焼学会誌, 2017.
- [3] 永田ら, 日本航空宇宙学会誌, 1997.
- [4] 秋葉, 特開平10-288091.
- [5] 橋本, 博士論文, 北海道大学, 2004.
- [6] 齋藤ら, 日本航空宇宙学会誌, 2018.
- [7] Nagata et al., Journal of propulsion and power, 2017.
- [8] Saito et al., Journal of Propulsion and Power, 2019.
- [9] Saito et al., Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, 2018.
- [10] 君野ら, 日本航空宇宙学会論文集, 2019.
- [11] 津地ら, 日本機械学会年次大会, 2020.
- [12] Saito et al., Proceedings of IAC, 2023.

日米韓共同ロケット実験CIBER-2の第3回打上げが成功

宇宙赤外線背景放射の観測を目的とするNASA観測ロケットを用いた日米韓の国際共同実験CIBER-2 (Cosmic Infrared Background Experiment 2) の第3回実験は、2024年5月5日21時32分(米国山岳時間)、ニューメキシコ州ホワイトサンズ実験場にて打上げに成功しました(最高高度316km)。観測装置は正常に動作し良質な観測データを得ることができました。

前駆実験のCIBERで、わたしたちは近赤外線(波長0.8-2 μ m)の宇宙背景放射が理論的予測より過剰な強度とゆらぎを持つことを見つけました。そこには宇宙で最初に生まれた天体や銀河間空間に浮遊する星々といった未知の放射成分が寄与していると見られ、わたしたちは感度を格段に向上させたCIBER-2でその解明に挑んでいます。



観測装置の最終組立て作業

CIBER-2は10年以上前に日米韓の国際チームで立上げ、筆者がISASから関西学院大学へ異動した2015年からは、より多くの学生さんたちが参加し進めてきたものです。2020年に新型コロナの流行で計画は塩漬けになり、米国メンバーだけで限定的に実施した2021年の最初の打上げ実験では、人的・時間的な制約の影響で良い結果が得られませんでした。コロナ禍が下火になり日本チームも勢い込んだ2023年の第2回実験は、ロケット追尾の問題でまさかの飛行停止措置がとられ、落下した装置は大きく損傷してしまいました。それでも学生さんたちと元気づけあい装置を修復し背水の陣で臨んだのが今回の実験でした。筆者は20年ぶりにカウントダウンに立会いました。何度も経験したはずですが、私たちの装置が爆音と閃光を放ち漆黒の空に駆け昇る姿には以前にも増して深い感動を覚え、打上げ完了後はチームメンバーと抱き合って喜びました。

この実験を支援いただいたすべての方々に深く感謝します。今回の観測データによる科学成果を紹介できるよう尽力します。2年前に他界された松本 敏雄先生(ISAS名誉教授)のもとで筆者が大学院生として行ったロケット実験は綿々と続き今も科学を愛する若者の心の糧になっています。今回の成功報告で観測ロケットの価値をさらに多くの方々に知っていただければ幸いです。

(関西学院大学 松浦 周二)



打上げの瞬間



打上げ前のロケット尾翼にサイン

PHOENIX-2プロジェクト ロケット実験完了！

2024年3月24日午前10時45分(現地時間)、スウェーデン宇宙公社のエスレンジ射場よりTEXUS60号機が打ち上げられました。TEXUSロケットは微小重力実験用のロケットであり、60号機には日本とドイツの国際共同プロジェクトによる「燃料液滴列の冷炎ダイナミクス解明に関する研究(PHOENIX-2)」の燃焼実験装置が搭載されました。本機は高度250kmに到達し、362秒間の微小重力環境が提供されました。本研究プロジェクトはこの微小重力環境を利用して実験を行い、燃焼挙動の詳細観察を無事実施することができました。



PHOENIX-2メンバー集合写真

本研究プロジェクトは、ジェット燃料のモデル燃料である正デカン($n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$)液滴を高温燃焼容器内に挿入することで自発点火させ、冷炎*の発生パターンやダイナミクスを明らかにする研究です。次世代型の化学推進装置の必須技術である炭化水素系燃料の爆発的燃焼の予測と制御を実現するため、冷炎現象を含めた化学反応

モデルの構築に貢献する実験データをロケット実験により取得することを目指しました。

本プロジェクトは2012年に実験計画案の検討が始まりました。2018年には航空機による微小重力環境において実験装置の機能検証を実施しました。そして2019年にはISAS小規模計画に採択していただき、実験装置フライトモデルの製作を本格的に開始しました。このまま順調に進むと思われましたが、2020年にはコロナ禍により装置開発およびロケット打上げ計画に遅れが生じるなど様々な困難がありました。しかしながら、関係者の不断の努力により今年打上げ実験を迎えることができました。ロケット打上げ当日はこれまで以上にプレッシャーを感じながら、「人事を尽くして天命を待つ」といった状態でした。打上げ1分後に実験シーケンスが開始し、テレメトリデータを祈るような思いで見守っていました。全シーケンスが無事完了したことが報告されると、ブロックハウス内のメンバー全員で実験完了の喜びを分かち合いました。数時間後、ペイロードが回収され実験で取得された燃焼画像を見た瞬間、大きな安堵と嬉しさがこみ上げてきた感覚は忘れられません。今後、日独研究者チームにより解析を行い、論文として公表していく予定です。

最後に、本ロケット実験の成功に当たり、これまでご支援、ご協力いただいたすべての方々に、この場を借りて深くお礼させていただきます。

(日本大学 菅沼 祐介)

* 700℃程度の比較的温度の低い火炎で、条件によってはエンジンの燃焼器でも発生する燃焼現象

國中所長が米国航空宇宙学会AIAAの名誉会員へ推挙

米国航空宇宙学会 (AIAA) は世界最大の航空宇宙に関する学会であり、その発展に長く貢献し顕著な功績がある人物を名誉会員 (Honorary Fellow) として選出します。1932年に第1号としてライト兄弟の弟Orville Wrightに授与され、それ以来2023年までに238名が授与されています。名誉会員リストを眺めると、

J.S. Ames (1934)、R.H. Battin (1990)、D.W. Douglas (1936)、H.L. Dryden (1939)、L. Grumman (1951)、G.W. Lewis (1940)、G.L. Martin (1937)、J. McDonnell (1968)、J.K. Northrop (1969)、L. Prandtl (1933)、W. von Braun (1970)、T. von Kármán (1936)

などと、NASAのフィールドセンターや宇宙航空企業として冠したお名前やら、教科書で見覚えのある流体力学や宇宙工学のレジェンド名が列挙されています。日本人では唯お一人、谷 一郎先生 (1990年没) が授与されています。

このたび私JAXA宇宙科学研究所所長、國中 均は、

「For development of electric propulsion to acquire the first material from an asteroid and work on high voltage systems in space」

との題にて名誉会員に選出いただくことになりました。5月13日Class of 2024 AIAA Fellows and Honorary Fellows、翌14日にThe AIAA Awards GalaがWashington DCのJF Kennedy Centerにて開催され、出席して参りました。Galaでは名誉会員授与に続き、AIAA Premier Award授与、さらに次期AIAA会長Prof. Daniel



AIAA会長Dr. Laura J. McGillから國中均所長へ表彰状の授与

Hastings (MIT) の挨拶と進みました。彼とは、私が30代の頃、栗木 恭一先生からの紹介で、名誉会員受賞理由の後半の部分が見せる分野にて共同研究を行い複数の論文を共著して、宇宙実験・観測フリーフライヤSFUに搭載した高電圧ソーラーアレイ実験を共同実施しました。当時、彼から「衛星とプラズマ間の干渉という新しい学術分野を創生する」という野心的大望を吹き込まれ、大いに刺激を受けたことを思い出しました。

名誉会員という、身に余る栄誉に浴し心より光栄に感ずるとともに、身の引き締まる思いです。栗木先生、Prof. Daniel Hastingsをはじめ、これまで支えてくれた多くの仲間と諸先輩の方々に深く感謝申し上げます。称号の名に恥じないよう、宇宙航空 宇宙科学の振興に精進したいと存じます。(國中 均)

※ () 内の数値は授与年

令和6年度 文部科学大臣表彰 鳥海 森准教授(太陽系科学研究系)が「若手科学者賞」を はやぶさ2プロジェクトメンバーが「科学技術賞」を受賞

文部科学大臣表彰は、科学技術に携わる者の意欲の向上を図り、我が国の科学技術の水準の向上に寄与することを目的として、顕著な成果を収めた者を表彰するものです。今年度は宇宙科学研究所から2件が表彰を受けました。

萌芽的な研究、独創的視点に立った研究等、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた若手研究者を対象とした若手科学者賞を、鳥海 森太陽系科学研究系 准教授が受賞しました。

対象となったのは「衛星観測と数値計算を用いた太陽恒星磁気活動現象の研究」で、「ひので」などの太陽観測衛星を用いたデータ解析と、スーパーコンピュータによる数値シミュレーションを組み合わせた新たな研究を展開することで、巨大爆発現象「太陽フレア」や、その原因となる「黒点」のメカニズム解明に取り組んだ点が評価されました。

また、はやぶさ2プロジェクトを代表してメンバー5名が、一般社団法人日本航空宇宙学会の推薦を受け、科学技術賞(開発部門)を受賞しました。この賞は、我が国の社会経済、国民生活の発展向上等に寄与し、実際に利活用されている画期的な研究開発若しくは発明を行った者が対象です。

受賞対象となったのは、「着陸及び地下物質採取を含む自在な小天体探査技術の開発」で、小惑星往復探査に必要な地表探査体や科学観測装置、人工航法標識を用いたピンポイント



文部科学省での表彰式にて表彰状を持つ鳥海 森准教授



表彰後の集合写真。左から中澤 暁氏(JAXA)、津田 雄一氏(JAXA)、渡邊 誠一郎氏(名古屋大学)、佐伯 孝尚氏(JAXA)、吉川 真氏(JAXA)

着陸技術、地下掘削を行う人工クレーター生成技術等を実現したものであり、それらの技術は「はやぶさ2」に適用され、太陽系形成史と地球における水・生命の起源解明に係る科学に貢献しました。また、太陽系探査技術の向上、大規模科学プロジェクトのマネジメント技術の発展に寄与した点も評価されました。

表彰式は2024年4月17日に文部科学省にて行われ、宇宙科学研究所から鳥海 森、津田 雄一、佐伯 孝尚、中澤 暁、吉川 真が、名古屋大学からは渡邊 誠一郎教授が出席し、一人一人が賞状を受け取りました。

連載

第10回

SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

与えられた時間は5秒。 画像航法支援系

月面動力降下開始7分前、SLIMが最初の画像照合航法を実施。数秒後、航法カメラの撮像画像と画像照合航法結果が管制室画面に表示されました。訓練通り確認。オペレータからは“OK”のサイン。大丈夫、SLIMは完璧に自身の位置を把握している。私はそれを確認し「よし」と強くコールしました。SLIMは動力降下開始直前3つの領域で画像照合航法を実施し、その成否が最終GO判断の大きなポイントとなりました。今回は地上側で画像照合航法の成否判断に重要な役割を果たした「画像航法支援系」に焦点を当てます。

SLIMのピンポイント着陸のキー技術のひとつが「画像照合航法」です。これによりSLIMは月軌道上での自身の位置を精密に把握し、自律的に軌道修正して降下していきます(詳細はISASニュース2022年9月号をご覧ください)。では、なぜ「画像航法支援系」という地上システムが開発されたの

でしょうか?十分な検証・試験を通じて、当然我々は自信を持って画像照合航法をSLIMに搭載しています。しかしながら一発勝負の新規技術、万が一、位置を誤認識したらSLIMは明後日の方向に飛んでいってしまいます。事前検討では、地上の計算機能力をフル活用すれば地上からコマンドを送ることで救えるケースがあることもわかりました。こうした背景からもしものときは可能な限り地上から救う、という思想で画像航法支援系の開発が始まりました。

画像航法支援系の大きな役割は「搭載系の画像照合航法のモニタ」と「画像照合航法が万が一失敗した場合のコマンド送信」です。画像照合航法実施直後、ダウンリンクされた画像(図1左)と照合結果から地上で生成した模擬画像(図1左から2番目)の一致を見てその成否をオペレータ1が判断します。また、ダウンリンク画像を使って2つの独立した画像処理を地上の計算機で行い位置を推定した結果(図1左から3,4番目)の成否判断をオペレータ2,3が行います。そのオペレータ達の判断結果をもとにスーパーバイザがコマンド送信要否を判断、承認者が即座にダブルチェックし必要なら画像照合航法の結果を地上計算機の計算結果で上書きするようなコマンドを送ります。これらの一連の判断・動作を「5秒以内」に行います。半ば無茶に聞こえますが着陸シーケンスを成立させるにはこれ以上の時間はかけられません。そのため画像航法支援系には様々な工夫が込められています。例えば新規開発した運用画面には短時間での判断に必要なかつ最低限の情報を詰め込んでいます。また、成否の判断が最小動作でできるよう専用のキーボードも導入しました。あとはひたすら模擬データを使った訓練を重ねて習熟を図りました。

運用本番では終始緊張を強いられたもののオペレータは訓練通り冷静かつ確かな判断を短時間で行うことができました。画像照合航法は7領域でそれぞれ2回ずつ、計14回実施しましたが、その全てが正しく動作していることを画像航法支援系の画面上で確認することができ、結果的に地上からコマンドで介入することはありませんでした。着陸目標点周

辺には目立つクレータがいくつかあるのですが、上空500mで実施した最後の画像照合航法の際にそれらのクレータが訓練通り見えたときは本当にピンポイントで降りていることを確信しました。

他に類を見ない特殊なシステムとなった画像航法支援系。淡々と進んでいるように見えたSLIMの着陸シーケンスの裏側ではこうしたハラハラドキドキの運用があったのでした。

地上画像航法担当: 石田 貴行(いしだ たかゆき)

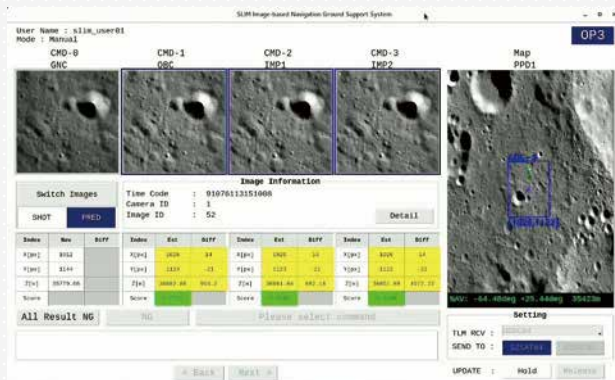


図1: 動力降下開始直前、SLIMが月軌道上で画像照合航法を初めて成功させた瞬間の画像航法支援系画面。最も左が航法カメラ画像、その右が画像照合航法結果をもとに地上で自動生成した模擬画像。2つの中心が一致していることから、画像照合航法が成功していると判断できる。



図2: (左) 画面手前左からオペレータ3人、スーパーバイザ(筆者)と承認者。(右) 画像航法支援系で使用していた専用キーボード。



アリانسスペース社
東京事務所代表

高松 聖司 (たかまつきよし)

宇宙開発と信念 王道を歩むということ。

のちに宇宙研所長を務めることになる小野田 淳次郎博士がまだ若き助手だった1981年に私は宇宙研を卒業し、富士重工(現SUBARU)の構造設計者として社会人の第一歩を踏み出しました。この会社で一生を終える、との覚悟で入社したものの、人生は思い通りには行かないもので11年後に退社、アリانسスペースに転職しました。当時は転職が一般的ではなく、不祥事を起こして会社にいられなくなった結果として転職があるといっちはちょっと大袈裟かもしれないが、少なくともキャリア・アップとは見られなかったし、転職先が外資系企業となるともう危険がいっぱい。

そんな状況の中、入社後に社内の公用語がフランス語と知って愕然とするなどということもあって、いつクビになるかと不安な毎日のなか、気がつくと31年の時が過ぎていました。アリانسスペースは日本との協力が積極的だったため、転職後も日本の宇宙業界との関係は続き、欧州企業に身を置いて日本の宇宙産業とかかわるという貴重な経験をすることができました。そうした中で強く感じたのは仕事をする上で信念を持ち続けることの大切さです。宇宙研、富士重工、そしてアリانسスペースに共通するのはその規模の小ささで、規模が小さいと、そこで働く人々の強烈な個性が組織の信念として表れやすく、そうした環境で40年以上を過ごしてきて、そうした信念がいかに大切に強く実感しています。

今の日本の宇宙業界にはベンチャー企業をはじめ勢いがあります。宇宙村と揶揄される狭い世界で不十分な予算で細々と海外に追いつこうとしていた昔とは隔世の感があります。メディアも好意的で、打上げ失敗があってもかつてのように糾弾するのではなく、応援する論調で、日本の宇宙開発に関わる人々がかつてない心地よい環境におかれていると思います。「雰囲気的な」応援だけでなく、財務的な基盤についても国はかつてない規模の財政支援を積極的に展開し、「1兆円規模の宇宙戦略基金」を知った時には(10年というスパンではあるものの)「兆」の単位を日本の宇宙予算で見たことに感慨深いものがありました。

しかし勢いがつくと、規模が拡大し、変化の速度が速くなります。その意味で日本の宇宙活動は発展しているだけでなく、宇宙村から出て新たな環境にさらされ始めています。宇宙ビジネスという言葉がその変化を端的に表していますが、これまで「宇宙ビジネスで成功する」という言葉は、その本質について議論されないまま日本の官民にとってひとつの目標になっていました。いま、その悲願を達成でき



宇宙研キャンパスで撮影したロケット協会の写真
(撮影 HASEO <https://www.hasegawahaseo.com/>)

るかもしれないという気持ちだが、現在の「勢い」にも繋がっていることは間違いありません。しかし、お金が動く、ということになった瞬間、ありとあらゆるものが、それこそ魑魅魍魎も含めて関与してきます。投資家の意向や、国際的な競争が健全な宇宙活動の発展を阻害することも当然予想されます。しかし、そうした負の側面にはあまり目が向けられていないのが実情です。

私がこうした懸念を抱く背景には、世界に先駆けて宇宙ビジネスを作り上げたアリانسスペースが、ひいては欧州のロケットが、一足先にこうした変化の波にさらされ、大変革の真っ只中にあるからです。欧州の強みは物事の本質を徹底的に考え抜いて、その方向性を信念として結実させ、その信念に基づいて具体的な計画を組み立てていくところにありますが、その信念が改めて問われているのです。それは出口戦略などという現実的な成果予測とは異なるもっと本質的なものです。そして日本もそう遠く無い将来に同じ環境に置かれるに違いありません。信念を持つということは、王道を歩む、と言い換えても良いかもしれません。「新しいことをする」というのはこれまで歩んできた「王道を捨てる」ことではありません。新しい環境に合わせて王道を極めてこそ幸せな未来が来るのだと思います。その意味で「新しいものが良く、古いものは捨て去るべき」との風潮には強い違和感を感じます。

世界の中で日本は小さいかもしれないけど、その小ささを活かしてかつて黎明期にそうであったように信念のある宇宙開発で王道を歩んでほしい、私が2020年に日本ロケット協会の会長に就任した時、こうした想いを表したいと一枚の写真を撮影しました。CGやAIが最先端と思われている写真業界で、徹底的に実写にこだわり、加工を排して作品を撮り続けている写真家HASEOさんに宇宙研キャンパスで撮影していただきました。実写という写真の王道を極めてつつ、写真の新しい世界を作り上げている作風がぴったりだと思ったからです。複数のストロボを巧妙に配置し、スモークをたき、モデルも航空エンジニアの女性にお願いしました。会長を退任したこの3月に、私の原点である宇宙研に寄贈したので皆さんもどこかで見かけることがあるかもしれません。

この写真は雪の舞った寒い日に撮影しました。たまたま宇宙研にいらっやっていた小野田名誉教授に現場を見られ「高松くんは、僕があんなに苦労して卒業させたのに、いったい何をやっているのか」と言われて頭を掻くことしかできなかったけど、このコラムを読んで意図を汲みとってくれると嬉しいな。

宇宙・夢・人

》次世代の天体観測・宇宙探査を目指して

「SLIMテーマソング」に込めた想い

——小型月着陸実証機SLIMのウェブサイトで公開されている「SLIMテーマソング」は、伊藤さんが作曲されたそうですね。どういうイメージで、この曲をつくったのでしょうか？

宇宙開発のイメージとしてよく言われるのが、壮大さです。一方で、私が実際に携わって思うのは、宇宙開発はとても人間くさい仕事だということ。プロジェクトのメンバー同士で、侃々諤々の議論をすることもあります。でも、同じ釜の飯を食べてきた仲間であり、信頼関係で結ばれています。壮大さに加えて、ヒューマンドラマのような人間くささも表現できたらいいな、と思いつくりました。ぜひ多くの人に聞いていただきたいと思います。

——評判は？

どうでしょうね(笑)。自分から聞くのも恥ずかしいですし、周りの人も直接は言いづらいと思いますが、とてもうれしいこともありました。2024年3月にNPO法人「JAXA宇宙科学研究所と夢を創る会」による「JAXA宇宙科学研究所応援コンサート～弦楽五重奏で宇宙をたのしむーん～」が相模原キャンパスで開催され、SLIMテーマソングを演奏してくださったのです。*とても感動しました。

SLIMは生きている！

——SLIMでは何を担当されたのですか？

誘導航法制御という部分です。SLIMは、自身のカメラが捉えた画像などの情報から現在の位置や速度を推定し(航法)、目標地点までの軌道を計算して決め(誘導)、エンジンを噴いたり止めたり機体の姿勢を回したりしながら(制御)、目標地点にピンポイントで着陸します。その自動操縦で着陸するためのプログラムの開発や設計を担当しました。

——月面着陸のときの管制室の様子を教えてください。

降下を始めてから着陸まで20分ほどです。着陸は自動操縦で行われますから、基本的に私たちはSLIMの状況が表示されているテレメトリ画面を見守るのみです。「このまようまく降りてくれ」と祈る一方で、あれが起こるのではないかと、これが起こるのではないかと考えてしまい、ピリピリした精神状態が続きました。

私は、SLIMの誘導航法制御に9年もの時間を捧げてきました。にもかかわらず、わずか20分で、成功か失敗か結果が出てしまうのです。以前、SS-520-5号機という小型ロケットの誘導航法

宇宙飛行工学研究系 助教

伊藤 琢博(いとう たかひろ)

1990年、三重県生まれ。大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻修士課程修了。2014年、JAXA入職。宇宙科学研究所航法・誘導・制御グループ、研究開発部門第1研究ユニットにてロケットや探査機の制御系を担当。2021年、東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻博士課程修了。博士(科学)。2022年より現職。



制御を担当したときは、3年を捧げて、飛行は10分足らずでした。打ち上げるまでの道程が苦しく長い分、成功すると、しびれるほど強烈にうれしくて、また経験したくなる。それが宇宙開発の魅力の1つです。

——SLIMは2024年1月20日、世界初の月面ピンポイント着陸に成功しました。

テレメトリ画面に月面着陸を示す「MLM」の文字が表示されたものの、SLIMの着陸姿勢が想定と異なっていることが分かり、管制室は緊張と動揺に包まれました。ただし、SLIMからはデータが送られてきていました。SLIMは生きている！私は心の中で小さなガッツポーズをしました。でも何が起きているのかを早急に把握する作業と、着陸後の運用作業で慌たしくなり、みんなでガッツポーズをするという雰囲気ではありませんでした。

今回、絶対に成功しなければいけないラインはクリアできました。でも、着陸降下データを詳しく解析していくと、いろいろな改善点やアイデアが出てきます。次の月着陸ミッションでは、この経験を生かし、完全なガッツポーズをしたいです。

次は超精密なフォーメーションフライト

——次はどのようなミッションに携わりたいと考えていますか？

私たちは月面ピンポイント着陸をやり遂げましたが、それは20年前に先輩たちが構想したものです。今度は自分たち若い世代が新しい構想を描き、実行しなければなりません。私が挑戦したいのが、フォーメーションフライトです。これは、一定の距離や配置を保って複数の宇宙機を飛行させる技術です。

複数の衛星をフォーメーションフライトさせれば、100mどころか1km、100kmという巨大な望遠鏡として機能させることも可能で、天体を高分解能で観測できるようになります。また、小惑星や衛星など天体の周りを複数の探査機が並んで飛行することで、これまでない観測ができるようになります。フォーメーションフライトは、天体観測や宇宙探査を変革するポテンシャルを持つ技術です。

フォーメーションフライトを利用した天体観測の中には、衛星間距離について精度1μm以下のきわめて正確な制御を求めるものもあります。この衛星間制御を自律化した、画期的な超精密フォーメーションフライトの実現を目指しています。私は、自在に宇宙機を飛ばすための技術を提供することで、画期的な天体観測や宇宙探査の実現に貢献したいです。

*https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews518.pdf

編集後記

新型宇宙船、スターライナーが無事打ち上げられました。一方、1977年に打ち上げられたボイジャー1号が太陽圏を離れた宇宙空間から科学データの送信を再開したそうです。他国の宇宙ネタですが、新人もベテランもがんばっている姿には、何だか励まされます。

(石川 毅彦)



ISASニュース No.519 2024年6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/>