JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2024
8
No.521

**南極域でヘリコプターから
ペネトレータ投下！**

昭和基地付近の「北の浦」海氷域にて、ヘリコプターの左足に装着したペネトレータを投下する直前（気象庁／奥谷 椋一 隊員撮影）。左上はペネトレータの実機。貫入設置された機体（左下写真）は地震・超低周波音響波観測などを行い、衛星回線でデータを送る。惑星探査機器開発技術を応用して南極域で着陸できない場所に観測点を設置する可能性の道を開く。

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

国際宇宙ステーションの微生物学

学際科学研究系 教授　山崎　丘（やまざき たかし）

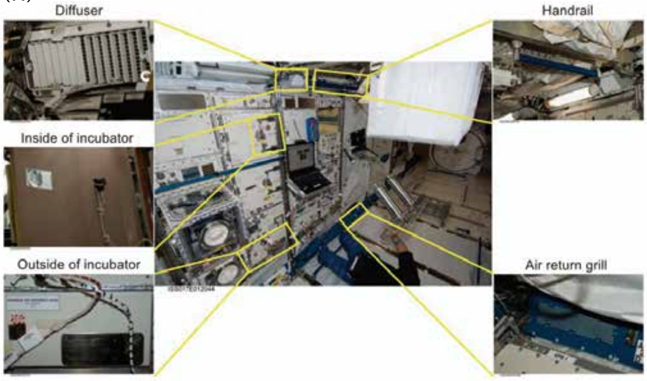
はじめに

私の専門分野は「微生物学」です。「JAXAの微生物学」と聞いたとき、みなさんはどのような研究を想像しますか？例えば、地球圏外の生命を探索したり、地球生命の起源や進化を解明するカギや地球生命そのものの痕跡を宇宙に求めたりする、アストロバイオロジーと呼ばれる学問分野でしょうか。実際にそう思われることがよくあるのですが、私は、2008年に日本実験棟「きぼう」の最初のモジュールである船内保管室が国際宇宙ステーション（International Space Station, ISS）にドッキングし、「きぼう」で宇宙飛行士が活動を開始する前から、「宇宙環境で人が安全に活動し、安心して生活するための研究」に携わってきました。簡単に言うと、宇宙飛行士が生活する1気圧に保たれたISS船内環境（与圧部といいます）の微生物についての研究です。かつてロシアの宇宙ステーション・ミールでは、細菌やカビが船内を汚染し装置が故障するなどの問題が起こりました[1]。ISSでも「きぼう」日本実験棟がISSにドッキングするころには、すでに微生物が検出されていました[2]。そこで私たちは、将来月や火星で人が生活する基地でも同様なことが起こるかもしれないと想像しながら、ほとんど微生物がいない状態で打ち上げられる「きぼう」日本実験棟の中で、微生物叢（そう）（そこにいる微生物の量や種類を表します）が時間が経つにつれてどのように変化していくのか、調査することにしました。また、宇宙飛行士がISSで口にする飲料水に含まれる微生物についても調べてきました。今回は、人が暮らす宇宙船・ISSの船内環境微生物についてお話しします。

人が暮らす宇宙船内にも微生物は存在する

まず、宇宙飛行士が滞在するISSの船内環境と私たちの生活環境の違いをおさらいしておきましょう。ISSは最初の基本機能モジュール（ザーリャ）の打上げから20年以上にわたり、完全に閉鎖された環境を維持しており、持ち込まれるのは補給機や有人宇宙機に含まれる空気や物資、宇宙飛行士自身などに限られ、窓を開ければ換気できるような私たちの生活環境とは大きく異なります。長時間潜ったまま航行できる原子力潜水艦も似たような環境かと思われますが、ドックで整備する際にハッチを長時間開放するなど、空気や物資、人の出入りはISSの比ではありません（ドックには多くの環境微生物が存在することも重要なポイントです）。また、地上400kmを周回するISS船内は、ほとんど重力がない「微小重力環境」であるため、あらゆる物体が（宇宙飛行士も）船内を浮遊し、落下しません。これは船内の微生物の動態を考察する上で大変重要なポイントです。細菌やカビ、ウイルスなどは、それ単独で空中を漂うのではなく、ほこりや飛沫（エアロゾル）のような微粒子に付着して漂い、地上では重力に引かれて落下します。つまり、細菌やカビ、ウイルスを含む微粒子が、地上では（原子力潜水艦でも）落下して床が最も汚れるのに対し、ISS船内では空中を漂い続けることになるので、私たちは、宇宙飛行士

（A）



（B）

図1：(A)「きぼう」船内実験室内のサンプリング箇所（出典：[3] Figure 2）。(B) ケネディ宇宙センターのSpace Station Processing Facility (SSPF)において、「きぼう」船内保管室に搭載される前にJAXAの細胞培養装置（Cell Biology Experiment Facility, CBEF）の表面からサンプルを採取するところ。これを「きぼう」ドッキング時のゼロ時点サンプルとした。

の身体（特に上半身）への付着量や呼吸で取り込む量が増えたり、船内の壁全体に汚染が広がったりするのではと危惧していました。そこで私たちは、「きぼう」船内で宇宙飛行士が手で触れそうなところや、気流の流れを考慮して（重力がない場合、気流の向きが物質の移動方向になります）船内の壁面など数ヶ所からスワブ（綿棒のようなもの）で拭き取り地上に回収して、DNAの塩基配列に基づく微生物の群衆解析を計画しました（図1(A)）。しかし、ここでひとつ問題が発生しました。「きぼう」の微生物叢は、ISSにドッキングしハッチが開いた瞬間から変化し始めるので、運用開始時の微生物叢を示すデータとして、理想的にはドッキングしてハッチが開く直前のデータが必要です。しかしながら、ハッチが開く前はもちろん、ドッキングした直後に宇宙飛行士にサンプル採取を依頼することは不可能でした。そのため、私たちはケネディ宇宙センターのSpace Station Processing Facility (SSPF) に赴き、「きぼう」船内保管室に搭載される装置の表面から打上げ前にサンプルを採取し、それをゼロ時点サンプルとしました（船内保管室にはさすがに入ることはできませんでした）（図1(B)）。その結果、搭載される装置表面の微生物量が検出限界以下であることを確認できました（これは「きぼう」船内保管室も同様の清浄度が保たれていると言ってよいことを意味します）。ほどなく「きぼう」船内保管室が、続けて船内実験室が打ち上げられ、「きぼう」船内で本格的に宇宙飛行士が活動するようになり、現在に至るまで「きぼう」船内は高い清浄度を維持していることがわかっています。また、少ないながらも検出された微生物を詳細に解析したところ、時間が経つとともに多様性が減少していくこと（種類が限られていくこと）、細菌であればブドウ球菌科（*Staphylococcaceae*）や腸内細菌科（*Enterobacteriaceae*）[3]、真菌（酵母やカビ、きのこの仲間）であれば全身の皮膚に広く分布するマラセチア属の酵母（*Malassezia*）[4,5]といった、健康な人の身体に日常的に存在する微生物（いわゆる「常在菌」）が優占種であることがわかりました。ISSに持ち込まれる物資は可能な限り滅菌、除菌した上で打ち上げられますが、もっとも微生物を持ち込むのは宇宙飛行士の身体そのものです。人は言ってみれば微生物の塊のようなものですから、有人宇宙機への微生物の持ち込みは避けようがありません。一方で、「きぼう」船内の微生物が少なかった理由は、宇宙飛行士による清掃が適切に行われていることや、「きぼう」船内の優れた空気循環システムにより、浮遊する微粒子が効率よく除去されているからだと考えています。

ISSの飲料水からも微生物が検出された

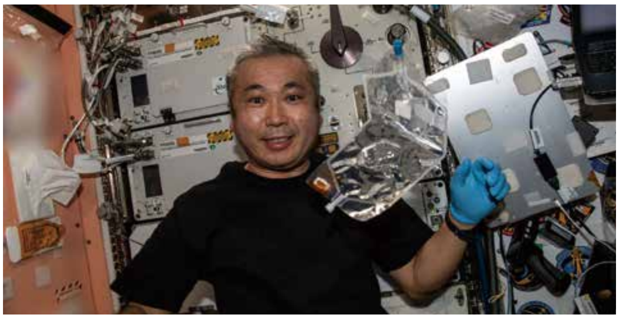
私たちは、ISSの飲料水供給装置（Potable Water Dispenser, PWD）の水についても調べてきました。現在ISS飲料水の微生物検査は、地上に回収した飲料水を寒天培地で培養し、形成される細菌や真菌の集落（コロニー）の数を指標に行われています。ただしこの方法では、ISSで採取した飲料水を地上に下ろす間隔が数ヶ月単位である上、地上に回収してからも培養に数日掛かるなど、異常があっても判明するまでに時間を要します。また、一般に微生物の多くは、生きているが培養できない状態（viable but non-culturable, VBNC）であり、形成されるコロニー数はそこに含まれる実際の細胞数より小さい値を示す傾向にあります（余談ですが、「きぼう」船内から検出された皮膚の常在菌であるマラセチア属は培養することが非常に難しい酵母で、ミールやISSの培養検査では検出されませんでした）。以上のことから、私たちは宇宙飛行士がより安心して飲料水を飲むことができるように、宇宙飛行士自らが飲料水中の微生物をその場で迅速に検査できるシステムの構築を目指し、「宇宙船内水環境微生物のオンボードモニタリング法の開発（Micro Monitor）」をテーマに研究を始め、2021年1月から3回にわたりISSの飲料水を地上に回収し、そこに含まれている微生物を詳細に解析しました（図2(A)および(B)）[6]。始めに、ISSの飲料水検査で通常実施されるように寒天培地で培養したところ、細菌のコロニーが形成されました（真菌のコロニーは形成されませんでした）。ちなみに、市販のミネラルウォーターの中にも培養でコロニーが形成されるものがありますし、水道水（常水）も無菌ではありませんので、この結果自体は意外ではありませんでした。続いて、「宇宙船内水環境微生物のオンボードモニタリング法」の要となる生物粒子計数器による細菌数測定を行いました。この装置は、細胞内の自家蛍光物質（リボフラビン、いわゆるビタミンB_2）の蛍光強度を指標として生物粒子を選択的に検出することにより、水中の細菌数を短時間で計数することができます。実際にISS飲料水中の細菌数を計数したところ、生物粒子計数器が示す細菌数と、顕微鏡により目視で計数した細菌数がほぼ一致し、生物粒子計数器がISS飲料水中の細菌数の測定に適用できること、ISS飲料水に含まれる細菌数は、一部の市販のミネラルウォーターに含まれる細菌数と数値的にほとんど変わらないことがわかりました。また、ISS飲料水中に含まれる細菌の種類について調べたところ、船内から多く検出される人に由来する細菌の割合

は低く、土壌や河川などに広く存在するラルストニア・ピッケティ（*Ralstonia pickettii*）が優占種であることがわかりました（図3（A）および（B））[6]。なぜラルストニア・ピッケティが多いのか、この点はISS飲料水の細菌叢の特徴のひとつと言えますが、その理由はまだわかっていません。なお、今のところ直ちに身体に悪影響を及ぼすような細菌は見つかっておらず健康被害

（A）

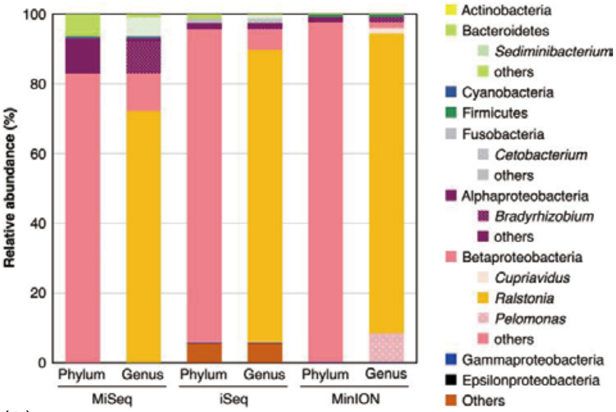
図2：（A）Micro Monitor実験のミッションデカール。飲料水の中を流れる微生物を宇宙飛行士自らが発見するというイメージで作成した。（B）2023年1月、ISSのPWDから飲料水サンプルを採取する若田光一宇宙飛行士。

（B）



写真提供：JAXA/NASA

（A）



（B）

Phylum	Genus / Species	Read count	Relative abundance (%)
Betaproteobacteria	*Ralstonia*	13,470	85.8
	Ralstonia pickettii	13,261	84.4
	Pelomonas	1,318	8.4
	Pelomonas saccharophila	1,299	8.3
	Cupriavidus	265	1.7
Alphaproteobacteria	*Bradyrhizobium*	196	1.2

図3：（A） 16S rRNA遺伝子の塩基配列解析から得られた、飲料水中の細菌の大半がベータプロテオバクテリア（桃色）のラルストニア属（橙色）であることを示すデータ（出典：[6] Figure 4）。Phylum、Genusは生物学上の階級で、それぞれ門、属を意味する。イルミナ社（USA）のMiSeq･iSeq、オックスフォード・ナノポアテクノロジーズ（ONT）社（UK）のMinIONという3種類の異なる次世代DNAシーケンサー（塩基配列解析装置）により、同等の結果が得られている点が重要なポイント。（B） MinION DNAシーケンサーを用いて同定された飲料水中の細菌種とその割合。16S rRNA遺伝子のリード数から算出し、代表的な菌種の相対量をパーセンテージで示しており、ラルストニア・ピッケティが優占種であることが分かる（出典：[6] Table 1）。

も報告されていないこと、ISS飲料水を飲み続けることで宇宙飛行士の健康に悪影響を及ぼすとは考えにくいという点は強調しておきたいと思います。この研究については、JAXA有人宇宙技術部門のウェブサイトに関連する記事が掲載されていますので、そちらもぜひご覧いただければと思います[7,8]。

さいごに

― 将来の太陽系天体探査ミッションに向けて 私たちに課せられた使命 ―

ISSでは、ここまでお話ししてきた船内環境微生物の研究以外にも、「きぼう」船外実験プラットフォームを利用したり[9]、宇宙飛行士の身体を対象とするなど[10]、様々な微生物研究が行われてきました。それではさいごに、将来の宇宙探査に向けて私たち宇宙機関の微生物研究者が重要な役割を担う研究分野についてお話ししたいと思います。ISSの運用は四半世紀を超えており、いずれ来るその役割を終える時を想像すると寂しい限りですが、その一方でこれからは太陽系天体を目指す探査ミッションがますます活発になっていきます。その中で私たちに課せられた重要な任務が「惑星保護（planetary protection）」です[11]。惑星保護とは、探査機等に付着して地球から対象となる天体に持ち込まれる微生物や生命関連物質による汚染（フォワード汚染、forward contamination）から、その天体の環境を守ること、また、探査機等がその天体から地球圏に戻る際に、地球外生命やその関連物質による汚染（バックワード汚染、backward contamination）から、地球圏を守ることです。探査機等に付着する微生物の数などを考慮した生物汚染度の指標となる「バイオバーデン（bioburden）」を製造から打上げ、帰還するまで厳重に管理し、探査の対象となる天体と地球圏を互いに決して汚染することのないようミッションを達成させることが、今後私たち宇宙機関で働く微生物研究者の大きな使命のひとつとなっていくことでしょう。

[1] Novikova, N.D. Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft. *Microbial Ecology* 47(2):127-32 (2004) DOI: 10.1007/s00248-003-1055-2
[2] Surface, Water and Air Biocharacterization - A Comprehensive Characterization of Microorganisms and Allergens in Spacecraft Environment. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090014893/downloads/20090014893.pdf
[3] Ichijo, T., Yamaguchi, N., Tanigaki, F., Shirakawa, M., Nasu, M. Four-year bacterial monitoring in the International Space Station-Japanese Experiment Module "Kibo" with culture-independent approach. *NPJ Microgravity* Apr 21:2:16007 (2016) DOI: 10.1038/npjmgrav.2016.7
[4] Satoh, K., Nishiyama, Y., Yamazaki, T., Sugita, T., Tsukii, Y., Takatori, K., Benno, Y., Makimura, K. Microbe-I: Fungal biota analyses of Japanese Experimental Module KIBO, International Space Station which passed for about 460 days. *Microbiology and Immunology* 55(12): 823-829 (2011) DOI: 10.1111/j.1348-0421.2011.00386.x
[5] Satoh, K., Alshahni, MM., Umeda, Y., Komori, A., Tamura, T., Nishiyama, Y., Yamazaki, T., Makimura, K. Seven years of progress in determining fungal diversity and characterization of fungi isolated from the Japanese Experiment Module KIBO, International Space Station. *Microbiology and Immunology* 65(11), 463-471 (2021) DOI: 10.1111/1348-0421.12931
[6] Ichijo, T., Uchii, K., Sekimoto, K., Minakami, T., Sugita, T., Nasu, M., Yamazaki, T. Bacterial bioburden and community structure of potable water used in the International Space Station. *Scientific Reports* 12:16282 (2022) DOI: 10.1038/s41598-022-19320-3
[7] きぼう利用テーマ資料集:宇宙船内水環境微生物のオンボードモニタリング法の開発 https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/70655.html
[8] 宇宙で暮らす人が安心して水を飲めるように! https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/case/detail/003006.html
[9] Yamagishi, A., Yokobori, S., Kobayashi, K., Mita, H., Yabuta, H., Tabata, M., Higashide, M., Yano, H. Scientific Targets of Tanpopo: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments at the Japanese Experiment Module Exposed Facility of the International Space Station. *Astrobiology* Dec;21(12):1451-1460 (2021) DOI: 10.1089/ast.2020.2426
[10] Sugita, T., Yamazaki, T., Makimura, K., Cho, O., Yamada, S., Ohshima, H., Mukai, C. Comprehensive analysis of the skin fungal microbiota of astronauts during a half-year stay at the International Space Station. *Medical Mycology* Mar;54(3):232-239 (2016) DOI: 10.1093/mmy/myv121
[11] ISASニュース 2019年10月号（No.463）宇宙科学最前線「宇宙探査と惑星保護」藤田 和央 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews463.pdf

小規模太陽観測プログラム：国際大気球太陽観測実験「SUNRISE-3」の飛翔

SUNRISE-3は、口径1mの望遠鏡で紫外線〜可視光〜近赤外線の広い波長範囲で太陽の偏光観測を行う国際共同気球実験です。スウェーデンのESRANGEから大西洋を越えてカナダまで高度35–37kmを5日間以上フライトさせる計画です。SUNRISE-3にはドイツ、アメリカ、日本、スペインが参加しており、日本のグループは近赤外線の偏光分光装置SCIP（Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter（スキップ））を提供しその運用を担当しました。2022年の初フライトでは放球時のトラブルで観測データを取得できず、その悔しさから2年、2024年に再フライトの機会が得られました。今年はSUNRISE-3以外にも、小規模計画で日本も参加しているXL-CaliburなどのNASA気球に加えて、フランスCNESもESRANGEで気球実験を計画しており、夏至前後の2ヶ月は過密なスケジュールになっていました。ESRANGEの宿舎も満杯なので、SUNRISE-3チームは、ドイツ・ゲッティンゲンの研究所にリモート運用センターを作り、現地で気球搭載装置にアクセスする若干名を除いて、チームのほとんどはドイツから地上試験とフライト運用を行う体制をとりました。5月末から6月頭にかけてSUNRISE-3は何度か放球を試みましたが、天候と風の条件が整わず延期となり、XL-Caliburを先行して打ち上げることになりました。しかし、6月は天候が安定せずXL-Caliburも放球できずに1ヶ月以上待たされました。毎年7月10日頃になると大西洋を越えるための西向きの風が弱くなって放球に適さなくなるのですが、その期限が迫る7月9日にようやくXL-Caliburが放球され、その翌日の7月10日についにSUNRISE-3に放球機会が回ってきました。やや風はあったものの、SUNRISE-3を吊るすクレーン車Herculesの調整のおかげで、現地時間の朝6:22に無事に放球されました。装置に大きな不具合もなく、きれいな太陽のデータが得られていることをサムネール画像で確認できています。6日半フライトし、カナダのグレートベア湖の西側に着陸しました。搭載SSDアレイに記録されたデータの内容を確認するまではまだ安心できませんが開発からフライト前の待機期間、そしてフライトまで、長期にわたり熱意を切らすことなく観測を実現させたSUNRISE-3チームを誇らしく思います。この記事を書いている7月26日現在、SUNRISE-3はまだカナダの森の中で回収を待っています。　（国立天文台　勝川 行雄）

SUNRISE-3放球時の様子
（Credit: MPS [D. Germerott]）。

国際水星シンポジウムMercury 2024およびBepiColomboサイエンスチーム会議を京都・福岡で連続開催

2024年6月に世界から水星関連の研究者が日本に集う濃密な2週間がありました。国際水星シンポジウムを Mercury 2024 として京都で、翌週にはBepiColomboサイエンスチーム会議を福岡で開催。海外の水星研究者やBepiColomboチームメンバを中心にそれぞれ約150名もの参加者が集まり、日本での連続開催だったためか事前の予想を大きく超えて盛況な会合となりました。筆者を含め参加者の一部は、京都の前週に幕張で開催された日本地球惑星科学連合大会（JpGU 2024）から3週連続で水星研究の議論に没頭できる夢のような時間を過ごしました。

Mercury 2024は2年に一度開催される国際シンポジウムで、京都大学生存圏シンポジウムおよびSGEPSS研究集会の共催として京都大学宇治キャンパスで4日間にわたり開催しました。水星の起源から内部、表面地形や組成、外圏大気から磁気圏まで、多岐にわたるトピックスの最新研究成果について多くの発表と活発な議論が行われました。コーヒーブレイクでは個別の共同研究の話があちらこちらで進行し、対面開催ならではの収穫が多くありました。エクスカーションでは抹茶体験や二条城見学も実施し、海外ゲストを中心に日本文化をたっぷり堪能してもらいました。日本文化といえば、海外ゲストを迎える際はもちろんカラオケは必須で、過去最高人数での盛り上がりを見せました。

京都でのシンポジウムを終えるとすぐに、今度は福岡でBepiColomboサイエンスチーム会議を開催。サイエンスの研究発表は前週に集中的に行っていたため、本会議では運用状況や今後の計画、各サブグループの議論の時間を多くとって進行しました。またアウトリーチ企画の一環として、ロケット工学アイドルVtuber宇推くりあさんのYouTubeライブ配信にJAXA・ESAメンバが出演しBepiColombo計画について紹介。共演に際しては相模原で培った配信ノウハウも役立ち、多くの反響を得られました。

怒涛の2週を終え、改めてBepiColomboチームを中心に水星研究者間に、いかに家族のような関係性を築けているかを実感できました。水星到着に向けて、チームは引き続き、準備を進めて行きますので、応援をよろしくお願いします。（村上　豪）

Mercury 2024（上）およびBepiColomboサイエンスチーム会合（下）での集合写真。

連載 第12回

SLIM the MOON Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

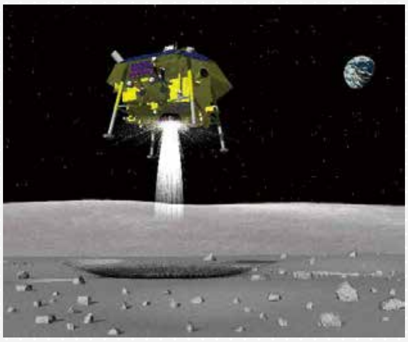
SLIM立ち上げの歴史

小型月着陸技術実証機SLIMは2023年9月7日に打ち上げられ、翌年1月19日 15:00UTCに月面への着陸降下シーケンスを開始、最終段階で思わぬことが起きつつも月面に降り立つことができました。着陸シーケンス開始から着陸までは長く感じた20分でしたが、SLIMミッションの検討開始から着陸までは紆余曲折の20年でした。

SLIM検討の源流は2002年11月提出のSELENE-B提案にまで遡ります。SELENE（かぐや）に続く月探査ミッションとして月面着陸を目指す構想で、JAXA発足前のISAS/NAL/NASDAの旧3機関関係者が集まって議論を重ねていました。オンライン会議が珍しかった当時、毎月のように会議室に集まっては話し合いが続けられていたことを思い出します。どのような探査機にすべきか。最初のうちは組織対組織で議論を闘わせていましたが、回数を重ねるにつれて所属組織を越えて考えが近い者同士が意気投合して自らが信じるところを主張するようになっていきました。ある意味、JAXA統合前に現在の状況を先取りしたような雰囲気。参加者一人一人が真摯にSELENE-B実現に全力を傾けていたとともに、当時のSELENE-Bチームを率いておられた旧3機関の先輩方の度量の大きさもあったのだろうと推察します。このSELENE-B計画、SLIMが実証したピンポイント着陸技術の実現を1つの目玉とした宇宙科学ミッションとして、2002年、当時のISASに提案しました。探査機のドライ質量は500kg強でSLIMの2.5倍くらい。個人的にはよい提案だと思っていましたが、残念。結果は落選。

落選という現実を前に、提案チームでは「何がいけなかったのか」の分析が行われました。本当の原因はわからないものの、「提案した探査機のサイズが中途半端だった」という見立てが大半。そこまでは一致しても、それでは、大きくすべきか、小さくすべきか。意見は分かれました。「より大きな探査機にして多くの観測機器を搭載、本格的な探査を行うべき」と主張する人も多い中、私を含めた数名は、「極限まで小型化してみよう。小型化が実現すれば、将来、サンプルリターン探査をするときの帰還機にその技術を利用することで、手軽にサンプルリターンができるようになるかも」として、SELENE-Bをどこまで小さくできるか検討を始めました。

しかし、いざ検討に着手してみると、想像以上に技術的なハードルは高いものでした。SELENE-B提案でさえ月着陸機としては小型の部類で、そこに当時、誰も実現していないピンポイント着陸技術を詰め込んだ計画でした。それを更に数分の1までサイズダウンしようというのだから、今までの常識は通用しません。多くの衛星・探査機技術者から、「成立していない」、「できるわけない」と窘められていました。



SELENE-B構想：普通の4本脚での着陸を目指していました。

成功祈願：運も実力のうち。運を引き寄せるのに、神様にも助けて頂きました。

きっとそうなのでしょう。少なくとも当時、私たちが考えていたものは成立していなかったのかもしれません。ただ、そう言われると益々挑戦してみたくなる。我ながら天邪鬼。とは言っても、その挑戦にはより多くの専門家・研究者の知恵が必要。そこで当時、いくつかの学会・シンポジウムに出没し、発表会場にはあまり顔を出さず廊下や展示会場をうろつき、顔見知りに声を掛けたりしていました。これぞ正に「ロビー」活動。研究者の中には、難しそうで成立しているかどうか怪しげな新しい技術が好きな人もいて、時を経るにつれて、検討する仲間が徐々に増えていきました。

こういった経緯を経てSLIMは提案に漕ぎ着け、その後プロジェクト化。曲がりなりにも月面に到達することができました。お陰様で当初の着陸目標点から50mくらいの場所に降り立つことができ、ピンポイント着陸技術の実証として一定の評価も頂けたと自負していますが、個人的には小型化を実現した技術にも思い入れがあります。キーワードとしては、デジタル化、統合化などですが、詳細についてご興味があれば、この連載の過去の記事などをご参照下さい。私からひとつ言うとしたら、私たちが取り組んだのは技術であって芸術ではありません。優れた芸術とは違い、全ての先端技術は未来において陳腐化する運命にあります。関係者の一人としてSLIMに対する強い思いがあると同時に、SLIMをひとつの契機として月惑星探査分野で技術が長足の進歩を遂げ、技術実証機としてのSLIMが早期に忘れ去られることが最大の願いでもあります。

SLIMプロジェクトサイエンティスト：
澤井 秀次郎（さわい しゅうじろう）

東奔西走

「南奔南走」南極域にて 月探査で開発した技術を試す

太陽系科学研究系 教授
田中　智（たなか さとし）

ラングホブデ氷河にて貫入したペネトレータを前にスリーショット。筆者（左）とチームメンバー（同行者）の高知工科大学の平塚 丘将さん。

これまで宇宙研の職員が南極に派遣されるとすれば、オーロラ観測や気球関連の方が多かったように思いますが、今回は、月探査技術を応用して南極観測に適用する目的で、惑星探査の開発を主に行ってきた私が現地に赴くことになりました。

宇宙研の固体惑星研究は「月探査」で幕を開けました。そこで開発を行ったのが、「ペネトレータ」呼ばれる観測プローブで、秒速300mの高速で月面に貫入させた後、観測を行うという当時は画期的なものでした。この計画自体は残念ながら2007年に中止となってしまいましたが、スピンオフとして地上への応用（火山や災害地での利用）へ繋げています。

南極観測へこの技術を応用する試みは実は2回目で、20年ほど前にも試みられたことがありますが、観測データを得るには至りませんでした。我々はその時の問題点や課題を1つずつ解決して再提案した結果、萌芽研究として採択され今回の南極域での試験がかなったという次第です（詳しくは極地研のHP*をご参照ください）。南極域は気候的にも極寒であり、地形的にもクレバスなど危険に満ちていて目的地に容易に行くことができません。最近月着陸に成功したSLIMのキャッチフレーズは「降りられるところから降りたいところへ」でしたが、これと同じく、南極域で観測できる自由度を格段に増やす解決の1つして提案したのが「ペネトレータ」です。観測地点付近上空まで到達できれば、そこから投下することで観測点を設置することを可能にします。「着陸する必要がない」ことは非常に大きなメリットです。

我々、65次南極観測隊の出発は2023年11月24日で、オーストラリアから観測船「しらせ」に乗り込み約1ヶ月かけて12月20日に昭和基地に到着。船の中ではソフトウェアの改良に明け暮れましたが、昭和基地に入ってからも試験の準備や最終段階の調整が続きました。さらに南極域では「白夜」でしたので、余計に睡眠時間が少なくなってしまい疲れも溜まっていきます。そういう時のつかの間のリラックスは、インターネットがほとんど使えない環境でもあるので、他の隊員との「おしゃべり」とか、昔ながらの「テーブルゲーム」とかでしょうか。古風ですよね。まさにここは「昭和基地」です。それから、時折基地周辺にも姿を見せてくれる「ペンギン」のおぼつかない歩き方にも癒されました。

さて、我々は「ペネトレータ」の投下貫入試験としてドローンを使った試験などもいろいろと試みたのですが、なんといっても有人ヘリコプターからの投下貫入試験が今回のメインイベントです。実際にどうやって投下するかですが、ヘリコプターの上空で目的地に到達したら、ドアを開けて機体を投げ下ろす、という実に原始的な方法を採用しました。シンプルイズベストです。この方法で最高対地高度400mまでの投下貫入試験を行いました。最初、投下するときは恐怖に怯え、計画した自分自身の無謀さに少し後悔しましたが、次第になれてくるもので回を重ねるごとに楽しくなってきました。表紙写真は投下した時に地上から隊員の方に超望遠レンズで撮っていただいた貴重なワンショットです。

今回はあくまでも実験開発段階の位置付けで行ったため、貫入した機体にアクセスできる場所に貫入させました。機体の正確な位置や貫入状況、機器の動作健全性を確認した後、機体はすべて回収しました。写真はラングホブデ氷河と呼ばれる昭和基地から比較的近い場所で試験した際に投下貫入させた機体と、開発をともにした今回の南極試験の同行者である高知工科大学の学生と私との3ショットです。この機体は健全性を確認した後、1週間そのままの状態でデータ取得試験を行いました。得られたデータはイリジウム衛星通信を通じて伝送されます。実際にデータが手元に送られてきた時は、これまでも試験をしてきて慣れているとはいえ、非常に感慨深いものがありました。観測期間中にはブリザードも経験しましたが問題なく動作しつづけ、氷河に特有に生じる地震（氷震）もバッチリ取得できました。

一連の実験をすべて終了し、合計14機体の投下貫入試験を実施、紹介した氷河以外にも様々な場所で地震（氷震）観測をして多くの貴重なデータを得ることができました。また現地でしか体験することができない様々な教訓も得ることができました。

昭和基地を離れたのは2月10日、これまで寝食を共にしてすっかり顔馴染みになった越冬隊員と別れを惜しみつつ帰りのヘリに乗り込みましたが、その時に目にした上空からの昭和基地を生涯忘れることはないでしょう。それから1ヶ月以上かけてオーストラリアに到着し、私を含む多くの観測隊員は飛行機にて2024年3月21日に帰国しました。

我々の研究は今年（2024年）度まで続きます。今年の12月には別の隊員がいよいよ実用機を持って南極域に向かう予定にしており、本格的な科学データの取得に挑戦すべく開発製造を急いでいるところです。

＊https://www.nipr.ac.jp/antarctic/science-plan10/houga02.html

いも焼酎

JAXA 宇宙科学研究所 名誉教授
川口 淳一郎
（かわぐち じゅんいちろう）

クレーターと鳥害物回避

いも焼酎に何か書いてほしいと言われ、もうとっくに退役している者に何を？と途方に暮れました。前回、いつISASニュースに書いたかなと探してみると、どうやら10年以上前のようです。当時はまだ勤務していましたが。退職後も、広報殿にはいろいろお世話になりっぱなしで、何かお返しをしなくてはと、書きだしたところです。

現在は、いろいろな経緯もあってキャンベラで勤めています。またかとか、まだかとか複雑な気持ちですが、退職した身として他に選択肢はないわけで、何とか続けています。原稿は、南半球にいるわけですから、「南船北馬」というコーナーがあったら一番ぴったりするかもしれません。

オーストラリアは映画「MAD MAX」の舞台。それだけに暴走車が多い？しかし、現実にはスピード遵守が徹底しています。反則金（Fine）がとんでもなく高額で、違反記録が10年間蓄積されるからです。いたるところにspeed cameraもあります。DXが進んでいて、有料道路料金も通行時撮られるだけで請求がきますし、交差する道路に待機車がいなければ信号で止められることもありません。技術的には大したことはなくても、日本では万一の際の社会的な追求が怖くて実施に踏み切れないでしょう。独自の有人宇宙飛行に踏み切れない背景と通じています。

オーストラリアに来てしばらくして、奇妙な車を見かけました。車体にディンプルが散りばめられたデザインの車です。稀ではあるのですが、1台ではなく何台も見かけます。何というデザインだ。抵抗を減らす空力設計か？疑問をもって眺めていたのですが、私自身も経験してその理由がわかりました。それは雹（ひょう）によるものだったのです。ある日買い物帰りに、私も突然の雹に巻き込まれました。日本でも珍しいわけではないですが、その雹の大きさが尋常ではないのです。ゴルフボールよりも大きくてソフトボールに近いかもしれません。それがドンドンと降ってくるのです。フロントガラスが割れるのではないか、非常に不安でした。そして案の定、私の車にもあちこちクレーターが。ディンプルを散りばめるようなことにはなりませんでしたが、何ともはや。驚くことに、雹に対する車の保険もあります。けっしてディンプルができるくらいの雹は珍しいことではないようです。似たようなことですが、フロントガラスに小石がぶつかって、えぐられてガラスにクレーターができます。私も日本で経験していましたが、頻度が違うかもしれません。当地で車を買ったときディーラーから勧められた保険のオプションは、ガラスの交換補償でした。

マグパイー鳥害物。

1年1回のペースで掛け金をかけては？というのです。車のボンネットの先端にアクリルの板をつけた車も相当多いです。小石がフロントガラスを直撃しないように対策する車は多いです。これも日本ではなかなかないのかなと思います。日本の高速道路は小石も少ないのかもしれません。

オーストラリアは鳥の国でもあります。キバタン（黄芭旦）は有名です。かなり大きなオウムの種類の鳥で、猫くらいの大きさがあります。頭に黄色のとさかがあって、羽は真っ白。綺麗でとても見栄えのする鳥です。しかし、ちょっと変わっていて好きになりきれない面があります。まずは、その鳴き声。美しい外見とは裏腹にギャーと、それも相当騒々しい叫び声で鳴き叫ぶのは、すこしがっかりです。ペットにする方も多いですが、近所迷惑に注意せよとあります。相当に賢く、集団行動でゴミ箱の蓋を器用に開け、生ごみをあさるのはいただけません。日本のカラスのように。見た目の美しさとのギャップがちょっと考えられないです。都市部でも群れをなして捕食し、空を舞い、なんとも異様な光景です。ギャーっと叫びながら、何十羽と群れてねぐらに戻るさまはちょっと怖いくらいです。非常にポピュラーな鳥としては、マグパイというカササギの1種の鳥があげられます。こちらは、カラスぐらいの大きさでしょうか。つがいで行動する、非常に美しい声の持ち主です。キャンベラを代表する鳥でもあって、市の中心部には巨大なマグパイ像が置かれています。ただ、マグパイは実は要注意な鳥です。危険人物を何人も記憶しているといわれていて、そして攻撃してきます。寿命も長いので、毎年、特定の個人が襲撃に遭うようです。とくに自転車に乗っている人が後頭部を襲われるニュースが報道されることがあります。ときどき奇妙なファッションのヘルメットを被って自転車に乗っている人を見かけます。衛星やロケットの計装をしばるタイラップ（Cable Tie）がありますが、それをヘルメットに縛りつけて、先端を星のように四方八方に伸ばして被る人がいるのです。新手のファッションか？最初は何？と思っていましたが、これは実は、マグパイ除けの対策、「鳥害物回避」です。入ってこられないようにという対策なのですが、マグパイも非常に賢い鳥なので、少々の対策では効果は無いようで、一刻も早く退散することが推奨されています。

思い起こせば、こうしてキャンベラにいるのも、ISAS/JAXA時代のプロジェクトつながりです。小惑星へのクレータリング、そして障害物を避けての着陸。どこへ行っても関わりは尽きないものです。

宇宙・夢・人
Space Human Dream

プロジェクト請負人でありたい！

SOLAR-Cプロジェクト
プロジェクトエンジニア
松本　純（まつもと じゅん）

1988年生まれ。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士（工学）。2018年、JAXA入職。研究開発部門、内閣府準天頂衛星システム戦略室（出向）、宇宙研宇宙科学プログラム室を経て、2024年より現職。

次期太陽観測衛星 SOLAR-C プロジェクト始動

――所属しているSOLAR-Cプロジェクトについて教えてください。

SOLAR-Cは太陽観測衛星です。特に、紫外線を使った分光観測を行います。運用中の「ひので」より望遠鏡の解像度を空間的にも時間的にも高め、感度も上げて細かい構造や動きまで詳しく観測することで、高温のコロナが加熱される仕組みや巨大爆発である太陽フレアのメカニズムなど太陽大気の謎を解明することを目指しています。2024年3月にプロジェクトチームが立ち上がったばかりで、私はプロジェクトエンジニアを務めています。

――プロジェクトエンジニアの役割は？

宇宙研の科学衛星プロジェクトは、研究者が「こういう観測をすれば新しいことが分かる」と構想を練ることから始まります。しかし、研究者だけでプロジェクトを実現できるかというと、そうではありません。こういう観測をしたいという要望に対し、どういう装置が必要かを検討し、足らない技術があれば開発し、観測装置をつくり上げる必要があります。しかも、要求性能を満たすだけではなく、衛星に搭載できるものにしなければなりません。スケジュールとコストの制約もあります。SOLAR-Cは2028年度の打上げを目指していて、スケジュールに余裕はありません。そうした中でプロジェクトマネージャの下でプロジェクト全体を見て技術について判断し調整する役割を担っているのが、プロジェクトエンジニアです。重責に胃が痛みます。

過去一難しいプロジェクトの実現に必要なこと

――過去に携わったプロジェクトと比較してSOLAR-Cの印象は？

配属が決まってまず、どういうプロジェクトなのかをリサーチしたのですが、自分的には私が経験してきたプロジェクトの中で、最も難しいミッションだと感じました。望遠鏡の開発を国立天文台と宇宙研を主体とした日本のチームが担当し、分光器の開発を米国と欧州各国が担当する国際協力プロジェクトです。国内外のいくつもの組織が参画し、たくさんの人がプレーヤとして入っています。プロジェクトはみんなが納得して進めないとうまくいかないので、要求を取りまとめつつも容認できないときは話し合って納得してもらう必要があります。また望遠鏡と分光器をいくつもの国で分担して開発するので、結合部分の確認が欠かせません。SOLAR-Cでは、そうした人や物のインターフェース調整がとても多くなると予想されるのです。

――プロジェクトをうまく進めるために必要なことは？

まず、きちんと会話をすること。今どういうことをしているのか、困っていることはないかなどを尋ね、話を聞きます。問題が起きそうなところを把握し、先手を打って問題をつぶしていくのです。2つ目は、打合せでは「誰が何をいつまでにやるか」を明確にすること。そうしておかないと、進行が滞ったり、問題が放置されたりしてしまいます。

最後に、人と会話するときの「言い方」に気を付けることです。これは、いくつかの衛星プロジェクトの運用・開発に関わりながら学んだことです。トラブルが起きたとき、ある方が話をすると解決に向けた動きがうまく回り始めるということが、何度もありました。注意して見ていると、「言い方」に理由があると分かったのです。言葉は分かりやすく、穏やかで、話し掛けられた人が自然と「それならできそう、やってみよう」と思う言い方でした。

私は大学院生のときから宇宙研でソーラーセイルの研究開発をしていたのですが、当時の私を知っている人には「彼の言葉はヤバかった」と、いまだに言われます。実際、気性が荒く、言い方がきつかった自覚があります。そんな私が、高いコミュニケーション能力が求められるプロジェクトエンジニアとして仕事ができているのは、さまざまな衛星プロジェクトにおいてプロジェクトを進める上で大切なことを学べたからです。性格の根っこの部分は今も変わっていませんが、相手が気持ちよく全力を発揮したくなるような「言い方」を心がけています。

宇宙工学は総合工学である

――なぜ宇宙工学分野を選んだのでしょうか？

趣味で音楽をやっていたものの、ほかに特別好きなことはなく、大学選びに迷っていました。そんなとき、新海 誠さんの『ほしのこえ』のコミカライズ版を手にしました。そこに「宇宙工学科」という言葉を見つけ、気になって調べてみたのです。そうしたら興味が出てきて、宇宙工学科がある大学に進みました。

「宇宙工学は総合工学である」という言葉が印象に残っています。宇宙工学というのはさまざまな分野が関わっているので、それに携わる人は幅広い知識を持ち全体を見てまとめていかなければならない、と言われました。私は、1つのことを深掘りするより、いろいろなことを大きく見る方が好きで得意です。そういう私の特性と宇宙工学の特性が合っていました。

――今後はどのようなことをやりたいとお考えですか？

プロジェクト請負人でありたいと思っています。「この人がいればプロジェクトは成功する」。そう言われる人になりたいのです。そしてプロジェクトを1つでも多く、特に世界一を狙えるプロジェクトを成功させたいです。

編集後記

場所を選ばず活躍する方々の寄稿をお楽しみいただけたでしょうか？“石の上にも三年”というがごとき、忍耐強く時機を待って実験を完遂した物語です。サンプル入手までじっくり待つ姿勢、捲土重来の実験機会、諦めず切り開く使い道、ひたむきな姿勢がきっと皆さんの心に清涼な気分を運んでくれたことと思います。（戸田 知朗）

JAXA ISASニュース　No.521　2024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
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/