

変形型月面ロボットLEV-2*1 (愛称：SORA-Q)の地上検証モデル

LEV-2は、小型月着陸実証機SLIMに搭載され、2024年1月20日(日本時間)にもう1台のロボットLEV-1と共に月面に放出された。月面に着陸した後に、球体形状(写真左側)から両車輪・頭部・尻尾を展開し、走行可能な形状(写真右側)に自動で変形した。さらに、地上からのコマンド操作は一切受けずに、自律的にSLIMを見つけ出し、その画像を撮影・送信することに成功した。LEV-2は、LEV-1と共に、日本初の月面探査ロボットになると同時に、世界初の完全自律制御による月面探査を達成した。
©JAXA／タカラトミー／ソニーグループ(株)／同志社大学



The Forefront of Space Science

宇宙 科学 最前線

世界最小の月面ロボットLEV-2の挑戦 ～手のひらサイズのロボットに詰め込んだ技術と思い～

研究開発部門／宇宙探査イノベーションハブ 主任研究開発員 平野 大地(ひらの だいち)

はじめに

地球から約38万キロ離れた月面でLEV-2(愛称：SORA-Q)が撮影して送ってきた画像を見たとき、思わず「おお！」と声が出た。撮りたかったものはすべて写っていた。自分たちが開発したロボットが月に降り立ち、設計通りに動いたことが分かった瞬間だった。

始まりは、2018年4月。私は未だにこの仕事の始まりをはっきり覚えている。ちょうど新しい部署への併任が決まり、挨拶を兼ねて業務内容を相談しようと思って相模原キャンパスを訪ねた日だった。しかし、こちらの想定とは異なり、上司と先輩からは私の専門分野や希望はまったく聞かれず、ただ一方的に「タカラトミーが試作した小型ロボットをSLIMに搭載したいから、宇宙仕様化して」とだけ言われた。急に言われたからビックリしたし、心の中では「すげえ軽く言うじゃん。大丈夫か、これ？」と思っていた。

自分が日本初の月面ロボットを作るチャンスを得たことにワクワクしたが、当然ながら不安もあった。しかし、幸いなことに、小惑星探査機「はやぶさ2」等で成功を収めた先輩たちが身近にいたので、「困ったら彼らに助けてもらえれば何とかなるだろう」と聞き直ることができた。この記事では、そんな軽い気持ちでスタートしたLEV-2開発※2で苦労したエピソードや関係者の熱い思いを紹介する。

球体から変形するロボットの誕生

開発を始めてすぐにワクワク感は打ち砕かれた。SLIMに搭載できるサイズや質量に制限があるため、要求がかなり厳しく、LEV-2は直径80mm以下、質量300g以下(最終的には約228gで完成)に抑える必要があったのだ。当時、最新の試作機は直径100mm・質量300gで、宇宙環境に耐えるための構造強化に加えて、さらなる小型軽量化が求められた。当然ながら、小型化すると車輪のサイズも小さくなり、走行性能が落ちて、傾斜や障害物を乗り越えられなくなる。着陸地点から動けないと話にならないので、小さくても月面を安定して走行できる機構を検討し始めた。

まずは、タカラトミーに協力してもらい、おもちゃ技術を使って変形・展開する機構を取り入れた。外郭の半球が左右に割れて、そのまま車輪になり、さらにメインボディの逆回転を抑えるスタビライザーが展開する(図1)。これによって走行の安定性を向上させることができた。ちなみに、搭載されているモータは2つのみで、これだけで変形・展開と前進・旋回の制御を行う。宇宙機の開発では、信頼性を上げるために部品点数を抑えることがあるが、おもちゃ開発でも子供たちに安心して遊んでもらうために同じことが求められる。簡易的な機構・構造を用いて部品点数や質量を抑えるという技術は、意外にも宇宙開発とおもちゃ開発に共通して求められるもので相性が良かった。

※1 正式名称Lunar Excursion Vehicle 2。もう1台の超小型ローバーLEV-1と共にSLIMに搭載され、日本初の月面ロボットとなった。
※2 JAXA宇宙探査イノベーションハブで実施したタカラトミー・ソニーグループ・同志社大学との共同研究により開発された。

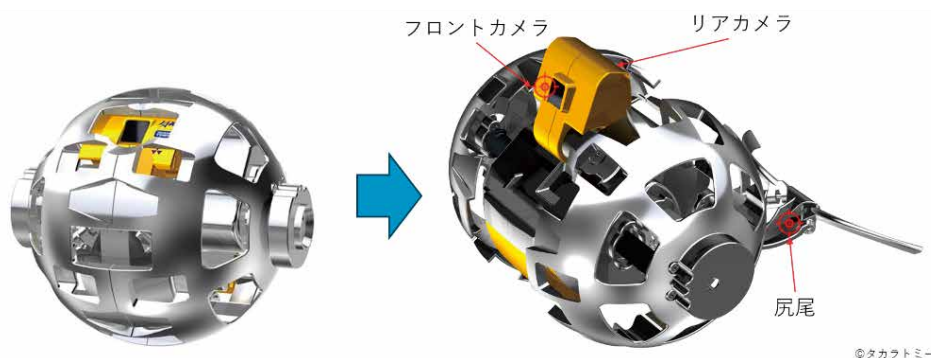


図1：おもちゃ技術を応用したロボットの展開。球形のコンパクトな状態でSLIMには収納されているが、月面到着後に内部のシャフトを回転させることでバネによって半球型の車輪が外側に伸展し、カメラを搭載した頭部や尻尾を展開する。形状を拡大することで走行性能を向上させている。

©JAXA／タカラトミー／ソニーグループ(株)／同志社大学



図2：過去の試作機。初期のモデルでは、内部の機器や配線に干渉が無い目視で確認するため、ボディ部分に透明の樹脂を使っている。このあとに製作した環境試験モデルやフライト品には、宇宙環境に耐えられるようにアルミなどが用いられている。

©JAXA／タカラトミー／ソニーグループ(株)／同志社大学

しかし、レゴリスで覆われた柔らかい地面を走らせると、スリップして車輪が埋もれてしまう課題が残っていた。車輪のサイズを大きくすることはできず、開発者たちは頭を抱えていた。そこに、タカラトミーから車輪の回転軸をずらした偏心回転のアイデアが出てきた。これを試すと、車輪が掻くことができるリーチが長くなり、20度程度の傾斜であれば走行できるようになった。ウミガメの動きからインスパイアされた玩具メーカーらしいユニークな発想だった。

図2にこれまで試作した歴代のロボットを示す。開発中は、試作と試験を繰り返して形状や機構を何回も改良した。ロボットが超小型で作りやすいこともあるが、COTS品(入手しやすい市販品・既製品)を利用したことや、共同研究先のタカラトミーとソニーグループ(制御ボード・カメラ等の開発担当)のクイックな開発スピードに助けられ、試作・試験のサイクルを早くまわすことできた。結果として、課題の早期発見や迅速な改良に繋がり、この点でも異分野企業とのコラボレーションによる恩恵を受けていた。

超小型ロボットの賢い知能

LEV-2は、もう1台の超小型月面探査ローバLEV-1と共にSLIMに搭載され、SLIMが月面に着陸する寸前に放出される(図3)。その後、月面を移動し、SLIMの着陸状況が分かる画像を撮影して地上に送信するのがLEV-2のミッションだ。LEV-2はSLIMと通信を行わず、取得したデータをLEV-1に無線送信し、LEV-1が直接地上に転送する。わざわざSLIMとは別の通信ラインを使うのは、万が一SLIMが着陸失敗などで通信不具合が発生した場合にデータを送信できなくなることを避けるためだ。しかし、LEV-1も超小型ロボットなので、消費電力や熱の制約で地上と通信できる時間やデータ量は限られている。LEV-1を経由してLEV-2を地上からコマンド操作するのは難しかったため、LEV-2は完全自律制御を採用した。つまり、人間のサポートは一切受けず、自力でSLIMを見つけて画像を撮って送らないといけない。さらに、データ量の制約から送信できるのは多くて2～3枚程度で、たくさん画像を撮ってもすべて

のデータを地上に転送することはできない。そのため、SLIMの着陸状況や周辺環境が適切に写っている画像、いわゆる「見栄えの良い写真」を選定して送る必要があった。

そこで、ソニーグループに協力してもらいながら、カメラを使ってSLIMを発見できる「知能」をLEV-2に取り入れた。宇宙機には、過酷な熱環境から機器を守るために、MLIと呼ばれる金色の断熱材シートが取り付けられている。このMLIの色相に着目し、撮った画像の中からSLIMの領域を検出する画像処理アルゴリズムを開発した。これによって、LEV-2はSLIMとの位置関係を推定することができ、SLIMの周辺を走行したり、画像撮影時にSLIMの方を向いたりすることができる。さらに、SLIMが写った見栄えの良い写真だけを選んで送信することもできる。まさに一石二鳥の機能だ。しかし、画像処理は計算コストが高いため、小型・低消費電力のマイコンボードに実装するのは難しい。LEV-2は、ソニー製の小型カメラと処理能力が高い最先端の制御ボードSPRESENSE™を利用することで、オンボード画像処理を可能にした。地上とは光学環境がまったく異なる月面でも、正確にSLIMを検出したり、見栄え良く写真を撮ったりできるように、月面を模擬した探査フィールドにSLIMの模型を置いて何回も撮影試験を行い、画像処理アルゴリズムを改良して完成させた(図4)。

月面カメラマンの大活躍

LEV-1とLEV-2は共にSLIMに搭載され、2023年9月7日にH-IIAロケット47号機で打ち上げられた。そして2024年1月20日に月面着陸直前に月面に放出された。前述のように、LEV-1の通信系はSLIMとは別系統のため、月着陸の当日、LEV-1とLEV-2の関係者はSLIMの運用が行われている相模原キャンパスではなく、内之浦や臼田の観測所でLEV-1の電波を受信・保存する業務を行っていた。SLIM着陸直後、LEV-1からの電波を受信できたことで、少なくともLEV-1が正常に分離されて動作していることは分かった。しかし、LEV-1から受信したデータを復元してその中身を確認しないと、月面でLEV-2が正常に動作したのかどうかは分からない。受信データの復元には数日の



図3：LEV-2の動作シーケンス。LEV-2はもう一台のロボットLEV-1と共にSLIMから月面に放出される。その後、LEV-2は完全自律制御でSLIMの周辺を走行・撮影し、そのデータをLEV-1経由で地上に送信する。地上からの指示・コマンドは一切受けずに、ロボット自身がすべてを判断して自律的に動作する。

©JAXA / タカラトミー / ソニーグループ(株) / 同志社大学



図4：(左・中央) 探査フィールドでSLIMの模型を撮影した試験結果と(右)月面で撮影した写真。赤枠はSLIMの検出結果を示している。探査フィールドを使った地上試験では逆光の場合でもSLIMを検出できることを確認していた。右図は、ロボットが月面でも正しくSLIMを検出できていたことを示している。

©JAXA / タカラトミー / ソニーグループ(株) / 同志社大学

作業時間が必要だったため、LEV-2の結果を確認するまでもどかしい日々が続いた。その間に、SLIMの着陸状況が分かってきて、ノズルが天頂に向けた姿勢で着陸したらいいという情報が入ってきた。当初の想定とは異なる条件で着陸したので、LEV-2が無事にSLIMを見つけ出せたのか不安だけが強くなっていった。

ここで冒頭の話に戻る。LEV-2は私の不安をよそに、見事にSLIMを探し出して撮影し、その画像を我々に届けてくれていた。ようやくLEV-2が月面で正常に動作したことが分かり、開発メンバーと喜び合った。ロケットの打上げ振動に耐え、宇宙空間を何百万キロも飛んで、地球とは環境がまったく異なる月面に放り出されて、それでも自力で立ち上がってSLIMを探して、画像を撮って送信したと思うと、小さいのに本当に良く頑張ったと思う。車輪の位相によっては、画像の中にLEV-2の車輪が写りこむことがあるのだが、ちゃっかり両方の車輪を入れてくるあたり、自己主張してて憎めないロボットだなと感じた。

自律制御でキー技術となった画像処理の結果を図4(右図)に示す。赤枠はLEV-2がオンボード処理で検出した結果を示しており、月面でも完璧にSLIMを検出できていた。さらに、詳細を解析した結果、事前に設定したプラン通りに、この画像はSLIMから約5m離れたところから撮影されていたことも分かった。月に降り立った小さなカメラマンは、こちらのリクエスト通り完璧に仕事をこなしてくれた。

LEV-2が月から伝えてくれたこと

LEV-2は、SLIMの着陸状況が分かる情報を取得するというミッションを見事に達成した。SLIMに搭載された航法カメラや分光カメラで撮影した月面の画像はあったが、SLIM自身を撮影した画像は他には存在せず、LEV-2の画像によってSLIMの着陸状況を鮮明に捉えることができた。この成果が出たのは、SLIMが無事に月面まで運んでくれたからで、さらにLEV-1が地上にデータを転送してくれたからであり、見事な連携プレーだった。

ちなみに、LEV-2が送信する画像は、データ量を抑えるためにグレースケールに変換する選択肢もあったが、「リアリティのあるデータを取りたい」という開発者たちの思いから、あえてカラー画像を送ることになっていた。結果として、無機質で色彩のない月面で金色に輝くSLIMを捉えたインパクトのある画像を取得できて、たくさんの人たちに月面着陸の現実感を伝えることができたと思う。LEV-2が月面で撮った画像を見て、SLIM関係者だけでなく、たくさんの人たちが喜んでくれたことはすごく嬉しかった。

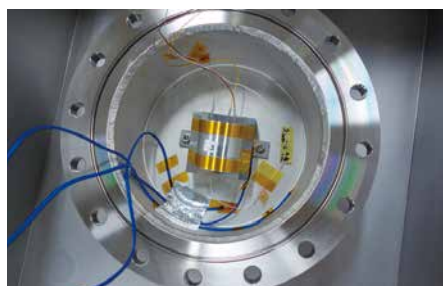
一方で、開発者としては悔しいこともあり、画像の真ん中付近にデータの欠損部分が出てしまったことや、送信データ量を抑えるために画像をあえて低解像度・高圧縮にせざるを得なくなったところに悔いが残っていた。周りの人たちがすごく喜んでいたので、気にしないようにしていたが、ある日ソニーグループの開発者が「SLIM周辺の月面が白飛びしてしまった」と残念がっていた。月面で撮影できたことだけで十分すごいことなのに、さらに画像の美しさにもこだわっていて、「さすがカメラを開発しているソニーだ!」と感心させられた。また、それと同時に、自分と同じように悔しがっている人をチーム内で発見して、改めて素晴らしいパートナーに恵まれていたなと実感した。

LEV-2にはSORA-Qという愛称が付いている。そのフラグシップモデルがおもちゃとして市販されていることもあり、たくさんの子供たちに応援してもらった。みんなの応援が月まで届いて、SORA-Qも頑張ることができたと思う。ぜひ、子供たちには月を見上げてもらって「あそこにSLIMやSORA-Qが行ったんだ」と想像してみしてほしい。そして、「SLIMはどうやって月まで行ったのだろうか?」「SORA-Qはなんであんな形をしていて、どうやって月で動いていたんだろう?」と考えてみてほしい。その疑問の答えには、たくさんの科学技術が詰まっている。SORA-QのQには、Question(問い)やQuest(探求)の意味が込められている。このSORA-Qの挑戦が、たくさんの子供たちに届いて、宇宙への問いや探求心に繋がり、科学技術への興味を広げるきっかけになることを心から願っている。

NASA Dragonfly ミッション 詳細設計フェーズに入る

NASAの4番目のニューフロンティア計画として2019年に採択されたタイタン離着陸探査ミッション「Dragonfly」が詳細設計フェーズ(Phase-C)に入ったことが2024年4月に正式に発表されました^{*1}。予備設計審査(PDR)は2023年初頭に終了していましたが、資金調達等の調整などに時間を要していたと思われます。この遅れにより探査機の打上げは当初予定から約1年遅れの2028年7月に再設定されました(タイタン到着は2034年)。我々はこの探査機に対して地震計を提供する予定で、2022年4月に所内プロジェクトとしての承認を得て開発をスタートさせました(ISASニュース2022年6月号^{*2}の記事をご参照ください)。

Dragonflyが着陸するタイタン表面は-190℃という極低温度です。地震計はドローン機体底面部からウインチで地上に降ろされ観測を実施するため、地震計と信号増幅回路はタイタン環境と同じ温度圧力にさらされます。この点が開発の重要ポイントで、この温度(圧力)環境での十分な耐性、信頼性が求められます。これを確認するための高温と極低温を何度も往復させる「温度サイクル試験」で、必ずしも十分な耐性が得られないことが判明しました。地震計の感度を高くするために非常に細い線材を用いており、この部分の熱変形が主原因であることがわかりまし



地震計の極低温度試験状況。加圧チェンバー装置に地震計をセットし(左図)、装置全体を液体窒素に入れて試験をします(右図)。



た。この部分の製造方法の見直しと試作、試験を繰り返した結果、試験をパスすることができました。プロジェクトが少し滞っていた間に、これらの技術的課題を解決することができ胸を撫で下ろしています。

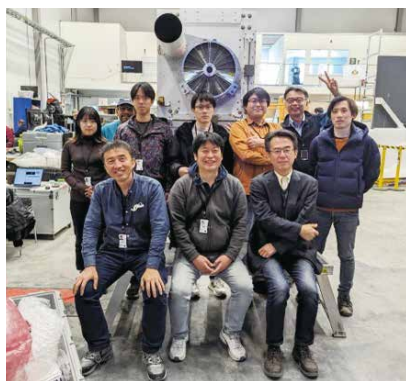
詳細設計フェーズではEM(エンジニアリングモデル)を開発製造して米国にて試験立会を行なってきたところですが、問題なくセットアップは完了して滑り出しは順調ですが、これから待ち受ける厳しい試験に耐えてほしいところです。EM品の結果を反映した設計が搭載機に反映され、来年初頭には詳細設計審査(CDR)が予定されています。これを通過するといよいよFM(フライトモデル)の製造を開始します。(田中 智)

*1 <https://science.nasa.gov/missions/dragonfly/nasas-dragonfly-rotorcraft-mission-to-saturns-moon-titan-confirmed/>
*2 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews495.pdf

XL-Calibur 気球実験 スウェーデン・キルナでのフライトに向けて

2024年6～7月にスウェーデンのキルナで第2回の放球^{*1}が予定されているXL-Calibur。2018年度の小規模計画公募で採択されたこのミッションは、ブラックホールや中性子星などの天体が放射する硬X線の偏光測定を目的とし、日・米・瑞典^{*2}の様々な機関(広大、WUSTL、阪大、ISAS/JAXA、都立大、OIST、名大、東理大、愛媛大、理研、藤田医大、山形大、UNH、NASA WFF、NASA GSFC、NRL、KTH、OKC等)が協力する国際気球実験です。

2024年4月、キルナでのフライトに向けてXL-Caliburの各チームがSwedish Space CorporationのEsrange Space Centerに集まりました。北緯68度、日照時間はおよそ18時間。まだかろうじて日没のあるこの時期から、白夜の続く6月の放球を目指し準備を進めます。硬X線望遠鏡の設置・アライメントを担う我々日本チームは、



望遠鏡設置後の一枚。準備期間中入れ替わりが多々あったため写っているのは一部のメンバーです(後方左が筆者)。

Esrangeに到着後、航空便で輸送されてきた望遠鏡の状態確認を行い、ゴンドラに接続する12m長のトラスに取り付けました。

望遠鏡にはWolter I型光学系が採用されており、白金/炭素の多層膜を反射膜とする円弧状の鏡が同心円上に213枚並べられています。今回のフライトに先立ち我々望遠鏡チームは、実際の天体の光を模したX線を望遠鏡に照射する地上実験を複数回重ねてきました。実験の中で、213層の鏡の位置調節や、望遠鏡の光軸・有効面積・角度分解能等の調査を行い、今回の放球場のように直接X線を照射することが困難な環境でも、望遠鏡の持つ性能を十分に再現できる方法を確立してきました。

トラスへの設置後、我々は望遠鏡の背面に設置されたカメラやNASAから持ち込んだ平行光源を用いて、望遠鏡の位置の調節・像の確認を慎重に行い、望遠鏡本体の取り付けに問題がないことを確認しました。その後、フライト中・フライト後～回収までの間に望遠鏡を異物から保護するためのシールドを取り付け、満を持してフライトレディとなりました。

無事に気球が放たれおよそ1週間の観測が終われば、機体がカナダで回収され(2022年11月号「東奔西走」参照^{*3})、データの解析ならびに次の南極フライトに向けての準備が始まります。執筆現在、我々は放球条件が揃う絶好の気球日和を日々待ち続け、来たる観測・運用に備えています。引き続きご協力・応援のほどよろしくお願いします。(宮本 明日香/東京都立大学)

*1 7月9日 03:04 UTC に放球が成功しました。 *2 スウェーデン *3 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews500.pdf

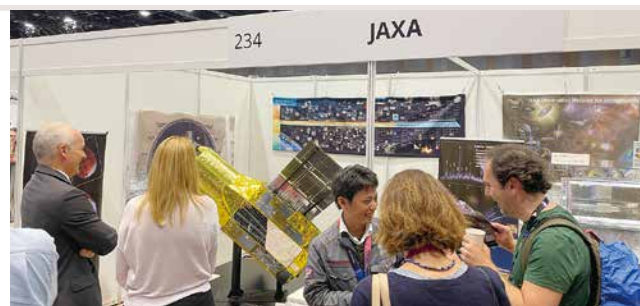
SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation に見るスペース天文学の最先端と将来

光学技術に関する世界最大の国際学会であるSPIEが主催する"SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation"が、2024年6月15～21日に横浜で開催されました。全体で2,919人の参加者があり、同会議では過去最大でした。日本からも、若手を中心に多数の参加がありました。本稿では、スペース天文学分野について、講演からみる最新状況をピックアップしてみます。

今回のSPIEでは、NASAが2040年代の打上げを目指して計画を進めているHabitable World Observatory (HWO) が中心テーマの1つでした。系外惑星関連のミッションや、関連技術のセッションでは講演も聴講者も圧倒的に多く、この分野の活況を呈していました。HWOやRoman宇宙望遠鏡のコロナグラフ技術には特に注目が集まっていたようでした。

紫外線分野の拡大が印象的でした。2030年打上げ予定のNASA/MIDEX衛星にUVEXが採用されたことが報告され、日本の超小型衛星Petrelなどの多くの紫外線の小規模計画も発表されました。HWOに向けた技術開発も進められています。また、時間軸天文学の観点では、中国のEinstein Probeが着実に成果を上げており、まもなく打上げとなるSVOMにも注目が集まります。日本のHiZ-GUNDAMやESAのTHESEUSの進捗、複数の超小型衛星計画の現状が共有されました。

その他、光・赤外線分野では、近年打ち上げられたJWSTやEuclidの稼働状況、打上げが近いSPHERExやRomanの切迫した開発状況が伝えられました。また、NASAのProbe級として提案さ



展示エリアのJAXAブースも大盛況でした。

れている5つのX線ミッション、3つの遠赤外線ミッションの発表もあり、それぞれ大変迫力のあるプレゼンがなされていました。

日本のミッション関連では、XRISMの初期成果が、複数の基調講演で取り上げられるなど、多くの聴衆の関心を集めていました。VERTECS、JASMINE、LiteBIRD、GREX- PLUS、CHRONOSなど超小型から大型までのさまざまな将来計画の望遠鏡と観測装置の開発・研究の発表がありました。

グラスを片手に発表できるポスター会場は大盛況で人がなかなか行き来できないほど混み合い、多くの若手の発表がよりいっそうの活気を生んでいました。今回、日本の組織委員が中心となって、優れた研究の発表をした若手に対するベスト論文賞・ポスター賞を初めて実施しました。(中澤 知洋/名古屋大学、松浦 周二/関西学院大学、文責: ISASニュース編集委員会)

宇宙研歴代の看板を玄関ホールに展示

1964年：東大航空研究所と東大生産研究所の糸川グループを合流させて「東京大学宇宙航空研究所」に発展的改組。

1981年：東大から独立して「宇宙科学研究所」を設立。

その当時のそれぞれの看板そのものと、看板をかけかえる際の歴史的な写真をA棟玄関ホールに展示しました。別の写真には、当時の所長森 大吉郎先生も写っています。

綺麗事だけで書くと前述の表現になりますが、それだけでは到底語り尽くせない複雑な周辺状況と関係者の忸怩たる思

いが詰まっています。私が大学院学生として宇宙研に入った1983年その当時に「旧航研」「新設部」という表現をしばしば耳にし、分断を匂わせる何やら経緯があったのかしらと感じました。1964年のことは「門前の小僧習わぬ経を読む」として文献や回想録から読み知るのみですが、1981年の出来事は元所長松尾 弘毅先生から「我々はオートノミー^{*}を堅持するため、東大を割って出たのだ。」とその矜持を直接拝聴しています。宇宙研は、東京帝国大航空研究所→東大宇宙航空研究所→宇宙科学研究所→JAXA宇宙科学研究所と組織を変革させながら、取り扱う主題を飛行機→観測ロケット→打上げロケット→宇宙天文→惑星探査と発展させてきました。そろそろ次のステージに飛躍するべき頃合いなのかもしれません。だからこそ、2030年代を見据えて次の宇宙研の新たな主題を獲得するため、オートノミーを発揮させ Front Loadingとして野心的な技術研究開発に努めています。

私があきる野実験場を訪れた際に、2つの看板が保管されているのに気がつきました(聞くところによれば、2つの看板が廃品集積所に捨てられているところ、すんでのところで回収されたいい)。この看板を相模原キャンパスに展示することにより、宇宙研の100年を超える歴史と根拠すべき精神を後続の方々に知っていただければと思います。(國中 均)



宇宙研の変遷を記した説明パネル(左)と看板実物(右)。

林先生を偲ぶ

新型コロナ平癒後に肺炎を発症されて、林 友直先生が逝去された。長者の風のある方であった。宇宙研の先輩方については「大先生方」と題して思い出を綴ったことがあるが、林、秋葉 鏡二郎両先生についてはご壮健ゆえ触れなかった。事実、林先生は大変お元気で、今回も新型コロナで入院される直前まで講演などなさっていたようである。両先生については甸甸前進など戦時中の軍事教練が効いているのではないか、というのが私の理解であった。

宇宙研(宇宙科学研究所)は、名称を含め外部から見た位置づけは変遷を重ねたが、基本的には同じグループが新陳代謝をしながら発展してきたものであり、その意味で「宇宙研」で通すことにする。宇宙研には理学・工学双方の研究者が共存しており、さらに工学は電気と非電気とに分類された。そしてそれぞれに頭領とでもいうべき方が率いていた。林先生は四代目の電気の頭領でいらした。宇宙研は基本的には大学であったから、頭領などという名称はありうべくもないのだが、当時珍しかったプロジェクト研究をしていく上での自ずからなる秩序であった。このある種のいい加減さ、よく言えば自由闊達さが、往時の宇宙研の活力を生んでいたと考えている。この分類に従えば私は工学の非電気の間人なのだが、もう一方の塊である理学においても、状況は似たようなものであったろう。

この理工連携の上に所長がおり、所長の役割は恣意的な人事を楽しむことではなく、皆を代表して苦勞を背負い込むことであった。私にしても前任の西田 篤弘先生にしても、所長就任受諾の辞は、「仕方ないんですかね」であった。

話は違いが、米誌スペース・ニュースだったか、組織は、創設時の闊達さに代わって次第に規律が整備され、最後に現場から遠いところが権限をもつようになって衰退に向かう、との論考があったが、私が宇宙研を去った2003年に至るまで宇宙研には創設時の気風が残っていたように思う。

ともかく、1993年に宇宙研が自ら企画した外部評価の委員であったネイチャー誌の編集長ジョン・マドックス氏が、

帰国後同誌の巻頭言に「世紀末にあたって世界中から一研究所を選ぶとすれば、それは宇宙科学研究所であろう」と載せたことは、いささか面映ゆくはあるが、後輩諸君は覚えていたほうが良い*。

以上、林先生が中核として活躍された時代の宇宙研小史であるが、ご専門については失礼ながら何も存じ上げない。デジタル化の中にあつて、アナログのわかる最後の先生という電気の連中の言葉を信用するだけである。ただ、プロジェクト研究に参加していたこともあつて、いろんな場面で御一緒した。以下、肩の力を抜いてそちらに話を移す。

1986年のハレー彗星の回帰に際して宇宙研は接近観測を計画した。地球周りの衛星技術はすでに手にしていたが、惑星間空間飛行のためには超遠距離通信技術・軌道決定技術を習得する必要があり、地上には大型のアンテナ(電波望遠鏡)が必要であった。

1980年、宇宙研はこの大型アンテナ建設のための、林先生を長とする調査団を派遣し各地のアンテナを調査した。メーカーから4人、宇宙研からは、私のほかに実務者としては国内最高の権威であったろう市川 満助手が参加した。私はアンテナについては大きい小さいくらいしか判らない。私の役割は我々の計画の意義と内容の紹介であり、こんなに軽負荷で楽しかった出張はその後も記憶にない。

さて、大旅行の成果は長野県白田の64メートルの大アンテナに結実する。直径64メートル、さぞかし「故あることに侍らん」と思われることであろう。先に述べた調査団はNASAの深宇宙局も訪問した。そこが具備していたのが直径210フィートの大アンテナであった。「我々も210フィート・クラスのアンテナが欲しい」と言ったのを、律義にメートル換算した人が居たようである。

海外出張にラケットを持参するほど卓球がお好きだった。あんな妙なフォームに負けるはずがないと思うのだが、勝てなかった。あまり高くない孤立峰の頂点を究められたと思っている。それにしても、サーブの時のえげつない目つきは、普段の温顔からは想像もできない。私が世話人になってブリティッシュ・コロンビア大学の碩学ヴィノド・モディ教授を招聘したことがある。ある時、彼が笑って言うのに「林先生に卓球を挑まれたが、申し訳ないけど、私に勝つのは無理なんだよね」。なんと、彼は全米の学生チャンピオンだったことがあるのだそうである。それだけではない。ロンドン・オリンピックの100メートルで第4位。凄い人が居るものである。

ISTSの度に、そのアウトリーチの一環として、近隣の小中学校での出前授業に、はちきれんばかりのバッグを肩に出向かれる先生のお姿が目につく。「大成功であった」という自己評価と、付き添った奥様の「あら、後ろの子は寝てたわよ」という観察とが伝わっている。心から、ご冥福を願います。(松尾 弘毅)



白田宇宙空間観測所の64mアンテナについてご説明中の林先生。

SLIM the Moon Sniper

連載

第11回

降りられるところから、降りたいところへ

SLIM画像航法の 研究開発を振り返って

画像航法の話が続けます。前号では石田さんが息を飲むような着陸運用の緊張感を伝えてくれましたが、今回は書き手を年配担当者にスイッチし、15年ほど昔にタイムスリップしながら、SLIM検討初期の雰囲気を取り戻してみます。

この当時、画像航法については以下が課題でした。

- 情報量が非常に多い光学カメラ画像の多様な処理手法が研究され得る中で、搭載性やロバスト性も含めたアルゴリズムの見極め
- SLIMの目的である小型軽量化に適したハードウェアの具体的な開発計画の策定
- 一発勝負となる着陸運用を見据えた事前の万全な検証スキームの確立

これらを解決するため、2009年頃から各方面の有識者や企業にアクセスし、SLIMが拓く「降りたいところに降りる」世界の意義を共有して、研究開発体制を整えていきました。

画像処理アルゴリズムの検討には、宇宙工学研究以外の分野の専門家も含め、複数の大学の先生方に参加をお願いしました。SLIMの画像照合航法にはクレータ抽出とクレータマッチングの各処理が必要ですが、明治大の鎌田研究室では前者を、電気通信大の高玉研究室では後者の研究を実施されました。また、着陸直前の最終段階に実施する障害物検知処理は、東京都立大の小島研究室に担当頂きました。ただし、SLIMの搭載計算機の演算能力は地上の汎用PCなどと比較すると非常に貧弱ですので、常に性能と搭載性をセットで検討する必要がありました。SLIMでは画像処理をMPUではなくFPGA上で動作させて演算能力を確保する方針としましたが、JAXAや大学のアイデアをハードウェア言語で都度記述・検証していくのは開発の見通しが悪いと、国産の高位合成ツールベンダ((株)ソリトンシステムズ)と協働し、FPGA実装性を含めた評価を円滑に進めました。JAXA・大学・ベンダの枠組みでの「SLIM画像分科会」の開催回数は、合計60回にも及びました。

航法カメラ開発の初期検討を始めたのも2010年度あたりです。撮像画像を地球に伝送するための効率の良い圧縮回路((株)シキノハイテック)や、民生用のカメラで培った光学レンズ((株)nittoh)など、特色ある技術を有する企業の協力を得つつ、最終的には経験豊富な搭載機器ベンダ(明星電気(株))の取りまとめで盤石な開発のスクラムが組まれました。軌道速度が速い時に撮像画像が平行四辺形などに歪むのを避けるため、搭載品としては先進的なグローバルシャッタータイプのCMOS



図1：SLIM航法カメラが撮像した着陸地点周辺の風景(3回の越夜後の2024年4月26日撮像)。



図2：FMシステム試験での画像航法系の総合確認の様子。

センサを採用したこともあり、部品実装の信頼性には大変気を揉みましたが、複数回の月の夜を越えて着陸地点周辺の撮像に成功したことは、関係者の努力の賜物と思います(図1)。

画像航法の検証にあたっては、太陽条件等を考慮しつつ、さもSLIMの航法カメラで月面を撮ったかのような模擬画像を生成することが大きなテーマでしたが、「かぐや」で経験を積んだ解析ベンダ((株)NTTデータCCS)に協力を依頼したのも15年ほど前でした。以来、地形データへの小さいクレータの(ある部分は手動での!)掘り込みや、画像の色味(反射率マップ)の忠実な再現など、無理難題に完璧に対応頂きました。実際の着陸運用で得られた月面画像と模擬画像が極めて酷似していたのは、この活動の誇らしい成果です(前号参照*)。打上げ前にこのような模擬画像を何万枚も生成して検証を重ね、さらにはシステム試験でSLIM実機に月面タペストリを見せた総合確認まで行い(図2)、SLIMを軌道に送り出しました。

画像航法という新しい技術を実証し、世界初の月面ピンポイント着陸を実現したことはもとより、それを継承・発展させる技術コミュニティを構築できたことが、SLIMが工学実験ミッションとして達成した大きな意義と自負するところです。関係者の協力と努力に心よりの敬意と感謝を表して、今回の昔話を終わりにします。

SLIMシステムマネージャ：福田 盛介(ふくだ せいすけ)

* https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews519.pdf

》宇宙大航海中！ 私は日本人・地球人・宇宙人

人のつながりはJAXAの資産

——3年間のアメリカ・ヒューストン駐在を終え、2023年から科学推進部に所属されています。

ヒューストンでは、国際宇宙ステーションに続く有人月周回軌道拠点「ゲートウェイ」に関する技術調整のJAXA現地代表を務めていました。科学推進部でも国際関係の仕事を担当しています。

ずっと国際関係の仕事をしてきたように思われるかもしれませんが、実は違います。私は、大学で情報工学を学んで修士号を取り、1998年にNASDAに入社しました。最初に配属されたプロジェクトは技術試験衛星VII型でした。配属直後の1998年七夕に、「おりひめ」「ひこぼし」と名付けられた衛星はランデブ・ドッキング実験に成功しました。この技術が宇宙ステーション補給機「こうのとり」や国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟のロボットアームにつながるようになります。当時は筑波宇宙センターの閉鎖された環境で休みなく人工衛星の追跡管制を行う日々でした。私が有人宇宙活動の国際協力を担当するのは、それから15年後のことです。

かつて一緒に仕事をした人たちと再会し、また仕事を共にすることもあります。宇宙規模の奇跡や巡り合わせで出会った人たちとのつながりは、とても大切なもので、私個人のものではなくJAXAの資産だと考えています。それは人と人との橋渡しにより国際協力がスムーズになることを実感してきたからです。

あなたは宇宙へ行きたいですか？

——「有人宇宙ミッション検討のミエル化」という活動をされていました。どのような活動ですか？

人が宇宙船に乗って宇宙に行くことについての検討を活性化させようというJAXA職員有志による活動です。2011年4月にスタートし、まずJAXA職員に「あなたは宇宙へ行きたいですか？」という問いから始まるアンケートを実施しました。さらに日本の有人宇宙ミッションはどうあるべきか、さまざまな立場の人たちと意見交換を行い、活動結果を『日本の宇宙探検』として2012年3月に出版しました。宇宙への関心を高めてもらう有力なツールになったと思っています。現在はPDFを無料公開しています*。

46億年の地球史で人類が宇宙に行く手段を持ってからまだ100年未満です。しかし今は、できなかったことが次々と可能になり、知らなかったことを知り、行きたいところに行けるように

編集後記

今号の宇宙科学最前線ではLEV-2 (SORA-Q) のお話をお届けしました。宇宙開発とおもちゃ開発との意外な共通点や異分野企業とのコラボレーションなど、開発する方々のワクワク感が届きましたでしょうか。

(高木 亮治)

科学推進部

高橋 伸宏 (たかはし のぶひろ)

1972年、東京都生まれ。早稲田大学大学院理工学研究科電子情報通信学専攻修士。修士 (工学)。1998年、宇宙開発事業団 (NASDA) 入社。技術試験衛星VII型プロジェクトチーム、OICETSプロジェクトチーム、経営企画部、システムズエンジニアリング推進室、有人宇宙技術部門、安全・信頼性推進部、ヒューストン駐在員事務所などを経て2023年7月より現職。



なる、「宇宙大航海時代」です。だからこそ日本から有人宇宙船を打ち上げたいと思い、「ミエル化」の活動を始めました。当時学生だった人たちがJAXAや宇宙ベンチャーで働くことになり、航海を共にする仲間が増えていくのを実感しています。

——この記事のタイトルは、高橋さんに付けていただきました。

6,000個を超える太陽系以外の惑星が発見され、地球型惑星もたくさんあることが分かってきました。そこに生命が存在すると信じています。外国の人に対しては「日本人です」と自己紹介するように、ほかの天体の人に対しては「地球人です」と言うでしょう。彼らには「宇宙人」と呼ばれるかもしれませんが、人類はまだ地球外の生命を発見できていませんが、「私は地球人です」「私は宇宙人です」と言える日が来るために、科学衛星や探査機と共に宇宙船地球号で航海中です。

日本の長所は「技術力」と「和の心」

——宇宙開発は国際協力が不可欠になっています。なぜですか？

宇宙開発のような大きなプロジェクトの場合、一国でできることは限られています。なぜ国際協力をするのかというと、それぞれの国が持つ長所を生かして取り組むことで、より早く、より良くプロジェクトを成功に導けるからです。

——日本の長所は？

ユニークで高い技術を有していること。もう1つが和の心です。日本人は、争わないで物事をうまくまとめる力を持っています。2カ国間の協力がうまくいかないとき、日本がその間に介入することでうまく進み出すことがあります。

——明日から海外出張だそうです。今回の目的は？

X線分光撮像衛星XRISMのファーストライトや小型月着陸実証機SLIMの成功を携え、國中 均所長に同行して火星衛星探査計画MMX、二重小惑星探査計画HERAなどの将来ミッションにおける国際協力を着実に進めることです。HERAによる小惑星観測はプラネタリーディフェンス、つまり天体の地球衝突から人類を守る活動にもつながります。2029年にはアポフィスという小惑星が地球表面から3万2000kmまで接近します。地球に衝突する可能性のある小惑星を探索する絶好の機会であり、複数の国が協力して複数の方法で同時に観測した方が、多様なデータが得られて総合的な理解につながります。今回の海外出張では、まだ計画化されていない将来ミッションについても議論してきます。ここから新たな航海が始まるかもしれません。楽しみにしてください。

*https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/space_exploration.pdf



ISASニュース No.520 2024年7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/>