JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2020 3

No.468

「宇宙科学・探査とおおすみ」シンポジウムの中で、白熱したパネルディスカッションの様子。

ISAS事情

「宇宙科学・探査とおおすみ」シンポジウム

さる2月11日に「おおすみ」打上げ50周年を記念して、国立科学博物館で「宇宙科学・探査とおおすみ」シンポジウムを開催しました。収容人数が200名弱と限られていたために来賓以外は抽選でご参加いただくことになりましたが、ライブ配信を含め広く情報を発信できたと思います。シンポジウムは秋葉 鐐二郎名誉教授の基調講演で始まり、「4度の失敗も全て成功とも言えるし、最後の成功自体が失敗とも言える」というお言葉がシンポジウム全体の方向性を指し示すものとなりました。『成功と失敗の狭間の真剣勝負でこそ科学と技術は進歩する』、これこそ宇宙科学の源流から受け継いできた我々の遺伝子です。もう一つの基調講演では津田 雄一氏が、「はやぶさ2」を踏切り台として科学探査の未来を展望、特に深宇宙OTV（燃料補給もできるスペースデポ）という発想により、H3級はもちろんイプシロン級の小型・超小型でも深宇宙探査が可能になるという話になると会場は俄然熱気に包まれました。客席からも活発な意見が出され、一般のお子さんから冥王星探査について突かれた津田氏の目から鱗が落ちる瞬間が印象的でした。

基調講演に続き、臼井 寛裕・稲富 裕光・船瀬 龍・徳留 真一郎の各氏が、サイエンス・国際宇宙探査・探査工学・輸送工学の各領域で独自の主張を展開、これらを受けて行ったパネル討論には倉本 圭（北大）・渡邊 誠一郎（名大）・中須賀 真一（東大）・津田各氏が加わり誠に豪華な布陣となりました。パネルは予め筋書きを作ると退屈なものになるので、ほぼ打合せなしで始めましたが、パネリストの皆さんは直球にも変化球にも瞬時に反応し、会場を巻き込んで大いに盛り上がりました。日本が世界を先導して変えていくというのが我々の真骨頂です。これを臼井氏は「日本の宇宙科学が世界の教科書のイントロを書く」と絶妙に表現しましたが、その具体例として“超小型探査だからこそ開拓できる新たな科学”という視点で理解が深まったことは大きかったと思います。さらに、これからの宇宙輸送では深宇宙OTVのような軌道間輸送が科学探査の頻度と自在性を上げる上で重要であるという認識も共有、探査と輸送の融合という新たな展望も生まれました。蛇足ですが、渡邊氏が真面目な顔をして「最近巷ではAI（人工知能）が流行っているが、我々の周りでは別のAI（アクションアイテム）が多過ぎる。AIでAIを何とかしたい」と発言された時には会場は大爆笑、その後の議論の度にアクションが設定され活気に溢れたパネルとなりました。

山川 宏JAXA理事長が冒頭で言及したように、「おおすみ」は5度の挑戦の末の成功でした。民間がロケット開発でも月探査でもやる時代に我々は一体何を期待され、何を目指していくのか？それは世界初・世界一と誇れるコンセプトを掲げ、何が何でもやりぬき、新たな世界を切り拓いていくことです。

（森田 泰弘）

宇宙科学最前線

XRISMが目指すサイエンス ～銀河団編～

宇宙物理学研究系 准教授／XRISM 副プロジェクトサイエンティスト　山口 弘悦（やまぐち ひろや）

はじめに

「X線分光撮像衛星 XRISM」は、革新的な分光性能をもって宇宙から来るX線を観測するミッションです。2021年度の打上げを目指し、チームメンバー一丸となって開発を進めています。XRISMは2016年に運用を停止したASTRO-Hの代替機に相当します。再度のチャンスをいただいたことに対し、関係者の皆様にこの場をお借りして改めて御礼を申し上げます。私はXRISMの科学検討を任された立場として、このプロジェクトをASTRO-Hの単なるやり直しにするつもりはありません。ASTRO-Hに期待された以上の成果を実現するプロジェクトにできるよう、ベストを尽くしてまいります。

さて、XRISMは具体的に何を目指すプロジェクトなのでしょうか。ISASが公開するXRISMのウェブサイト（http://xrism.isas.jaxa.jp/）を見ると、そのトップに「銀河を吹き渡る風をみる」という、何だか凄そうだけどよくわからないフレーズが登場します。本記事の目標は、この言葉の意味をお伝えすることです。XRISMができることや目指すことは他にもたくさんあり、今回の話題はその一部であることをご承知おきください。

宇宙の階層構造

ISASがある相模原市は神奈川県の一部で、さらに神奈川県は日本という国の一部です。これを「階層構造」と呼びます。宇宙にも階層構造があります。我々が暮らす太陽系（隣の恒星まで4光年）は「天の川銀河」（差し渡し10万光年）に含まれます。つまり、銀河は太陽系（惑星系）の上の階層です。本記事の主題である銀河団はさらに1つ上の階層にあたり、差し渡し1,000万光年程度、数100から数1,000個の銀河を含みます。天の川銀河は、お隣のマゼラン星雲やアンドロメダ銀河とともに「局所銀河群」というグループに属します。銀河団より少し規模が小さいので銀河“群”と呼ばれますが、両者の間に厳密な区別はありません。銀河団や銀河群のさらに上には超銀河団と呼ばれる階層もあって、局所銀河群は「おとめ座超銀河団」の辺境に位置します。今度は「おとめ座超銀河団」の中心に向かって段々と階層を降りていきましょう。「おとめ座超銀河団」の中心には「おとめ座銀河団」があります。地球からの距離は6,000万光年、3,000個を超える銀河の集まりです。銀河団の中心には必ず、Brightest cluster galaxy（BCG）と呼ばれる明るくて巨大なボス銀河が存在します。おとめ座銀河団のBCGは、M87という楕円銀河です。天文ファンの方なら一度は聞かれたことがある名前ではないでしょうか。昨年4月に国際プロジェクト「イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）」は、世界各地にある8台の電波望遠鏡を結集して前人未踏の超高分解能観測を実現し、ブラックホールの「直接撮像」を成し遂げました。あの「黒い穴」こそが、M87の中心にある巨大ブラックホールであり、太陽の65億倍もの質量をもつことが知られています。M87のブラックホールは地球を含む「おとめ座超銀河団」の最も中心にいるわけなので、我々の総元締め、ボス猿のような存在だと言えます。今回のお話は、このボス猿と、それを取り巻く銀河団の密接な関係についてです。

宇宙の力学的進化と銀河団

そもそも、M87のブラックホールは何をもって我々の「中心」とされるのでしょうか。一言で言うと「重力場の中心」だからです。銀河団は文字通り「銀河の集まり」ですが、それらはたまたま近くに集まっているわけではなく、一つの大きな重力場の中に捉えられています。重力を生み出すのは、水素のような普通の物質とダークマターです。後者の正体はまだわかっていません。しかし、銀河団1つあたりのダークマターの総質量は太陽の百兆倍をも超えることが知られており、BCGに向かう強い重力場を作ります。実はこのような重力場が存在する理由は、宇宙の初期にまで遡ります。生まれた直後、つまり138億年前の宇宙は、ほとんど一様等方だったものの、ほんの少しだけ密度のムラがありました。すると、密度の高い部分が重力で周りの物質を引き寄せて、段々と成長していきます。こうして巨大化したのが、銀河団に他なりません。つまり銀河団とは、ちょっとしたお金持ちが庶民から搾取して大富豪になった姿だと捉えることができます。

さて、ダークマターは正体がよくわからないので一旦脇に置いておくとして、強い重力に引き寄せられた通常の物質（水素やヘリウムなどの軽元素と、酸素や鉄などの重元素）はどうなるのでしょうか。それらはまず、落下に伴って大きな運動エネルギーを獲得します。やがて銀河団の中心に降り積もる物質同士がぶつかり合い、運動エネルギーは熱エネルギーへと変換されます。そのエネルギーは凄まじく、大きな銀河団の場合、1,000万度を超える「高温ガス」になります。ガスと言っても、これほどの高温にな

図1　銀河団エイベル383の可視光画像（左）とX線画像（右）。可視光では個々のメンバー銀河が、X線では銀河間を満たす数千万度のプラズマが見える。
X-ray: NASA/CXC/Caltech/A.Newman et al/Tel Aviv/A.Morandi & M.Limousin; Optical: NASA/STScI, ESO/VLT, SDSS

ると、水素原子が電子と陽子に電離した「プラズマ」の状態です。水素だけでなく、酸素や鉄などの重元素も全て電離します。そしてX線で光ります。X線とは、波長の短い光（電磁波）の一種です。一般に温度が高い物質ほど波長の短い光を出し、数100万度から数億度の物質に対応するのがX線の波長です。XRISMが捉えようとしているのは、銀河団を取り巻く高温プラズマからのX線放射です。

図1に、同じ銀河団を可視光（左）とX線（右）で見た姿を示します。可視光では一つ一つの銀河が島のように見えるのに対し、X線では高温プラズマがまるで海のように広がって見えます。銀河団に含まれるプラズマの質量を測ると、何と銀河（星）を全て足し合わせた質量より一桁も大きいことがわかります。ダークマターの総質量は、さらにその数倍です。つまり可視光で見える銀河団はその天体の本質ではなく、海の上に浮かぶ氷山の一角に過ぎないのです。

XRISMが挑む銀河団の謎

銀河団のように自分自身の重力で形を保つ天体を「自己重力系」と呼びます。太陽などの恒星も自己重力系です。天体を構成する物質同士が重力で引き寄せ合いながらも、潰れてしまうところまではいかず丸い形に収まる。なぜ潰れないかというと、高温の物質が中心から外側に向かう圧力勾配を作り、内向きの重力に拮抗するためです。銀河団の場合、X線で見える高温プラズマが圧力の担い手です。プラズマとダークマターの絶妙なバランスによって、銀河団は支えられているのです。

しかし、このバランスはいつまでも保てるわけではありません。銀河団のコア、つまりBCGの近傍は、X線で特に明るく輝いています。光はエネルギーを持つので、明るく輝くということは、その領域が放射冷却によって継続的にエネルギーを失っていることを意味します。観測される明るさ等に基づいて概算すると、今見えているような放射冷却が続いた場合、銀河団のコアは数億年で冷えきってしまうことがわかります。これは、銀河団の年齢（約100億年）に比べるとあっという間の時間です。もし本当にそのような短時間で冷えるのだとすると、コアは圧力を作れないので銀河団は形を保てなくなります。その結果、重力に引きずられた物質が一気にコアへと流れ込み、大量の星が生まれるだろうという予想も、かつてはありました。しかし実際には、銀河団は安定に存在しているし、コアは熱いまま。冷えた物質から大量の星が生まれているような証拠もありません。したがって、何かがエネルギーを供給し、銀河団コアを温め続けている（放射冷却による損失を相殺している）はずです。その「何か」の最有力候補こそが、BCGの中心に居座るボス猿ブラックホールです。ブラックホールはひたすら物を吸い込むイメージが強いですが、実はそれだけでなく、強烈なジェットを吹き出すことが知られています。吹き出したジェットは周りのプラズマをかき回して、暖かいガスの流れ、つまり「銀河を吹き渡る風」を作っているはず。これを確かめるのが、XRISMの役目の一つです。

実はこれまでにも、ボス猿ブラックホールが風を送っているらしき様子は、様々な銀河団で確認されています。冒頭で紹介したM87もその一つで、ブラックホールからのジェットがプラズマを吹き飛ばしているように見えます（図2）。しかし、このプラズマがどれほどの勢いで吹き飛ばされているのか、銀河団を十分に温められるほどのエネルギーを持つのか、誰も結論できていません。なぜなら、ガスの動きを捉えられていないからです。XRISMは初めて「風」を捉えるだけでなく、「風速」の測定まで行います。

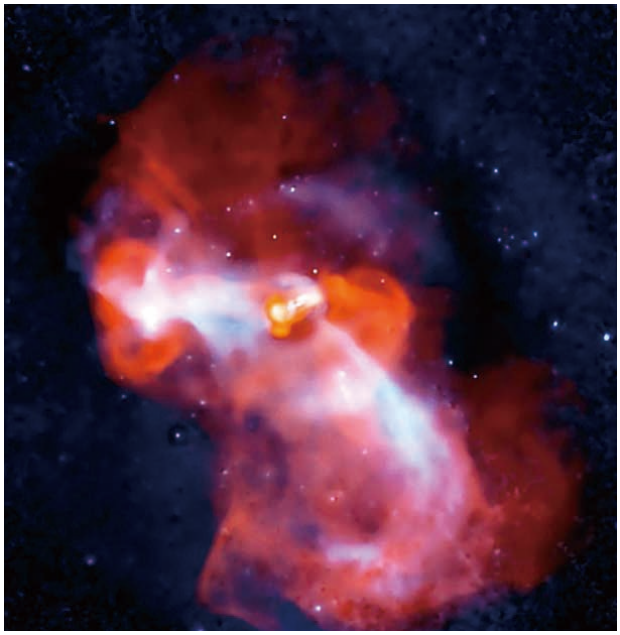

図2　おとめ座銀河団の中心楕円銀河M87のX線（青）および電波（赤）の合成画像。中心ブラックホールからのジェットによってプラズマが吹き飛ばされているように見える。
X-ray: NASA/CXC/KIPAC/N. Werner, E. Million, et al.; Radio: NRAO/AUI/NSF/F. Owen

XRISMの特長は、並外れた波長分解能

XRISMが挑戦する風速測定にはドップラー効果を利用します。銀河団のプラズマに含まれる重元素は、それぞれ特定の波長のX線で光ることが知られます。しかしそれは、プラズマが止まっている場合の話です。プラズマがこちらに近づいてくる場合は波長が短く、遠ざかる場合は波長が長くなります。XRISM最大の特長の一つが、このようなドップラー効果による僅かな波長のずれを識別する能力です。元の波長の0.01%以下の違いまで識別します。さらに、XRISMが識別できるのは、波長が一方向にずれた場合だけではありません。銀河団中心のボス猿ブラックホールが周囲のプラズマをぐちゃぐちゃにかき混ぜているのだとすると、台風のような乱気流が吹いていると考えられます。すると我々のところには、遠ざかるプラズマからのX線と、近づくプラズマからのX線が混ざって届くことになります。XRISMはその混ざり具合（輝線スペクトルの幅）から、乱気流の速度分散まで測ります。たくさんの銀河団を観測して、乱気流の激しさとボス猿ブラックホールの活動性（ジェットの強さなど）の相関関係を調べます。それによって、銀河団コアがどのようなプロセスでエネルギーを獲得しているのか、どのようにして安定な状態を保ち続けるのかを明らかにします。それらを突き詰めると、宇宙がなぜ今のような姿をしているのか、星の生まれるスピードは何によって決まるのか、という根源的な問題に行き着きます。XRISMが「銀河を吹き渡る風」を捉え、宇宙の謎を解き明かすまで残り2年。どうぞご期待ください。

XRISM搭載X線マイクロカロリメータResolveの「ファーストライト」

ファーストライト。それは、軌道上での初観測で、観測装置開発の長年の苦労が報われる瞬間です。ですので気が早すぎるのですが、2019年12月9日、XRISM搭載Resolveは地上の「ファーストライト」ともいうべきマイルストーンを愛媛県新居浜の地で迎えました。

Resolveは、ASTRO-H SXSと同じ、X線マイクロカロリメータを使った分光撮像器で、検出部は50mKまで冷却されます。検出部のある心臓部から、断熱消磁冷凍機、液体ヘリウム、これらを包む5層の真空断熱デュワを介し、それらを冷やすジュールトムソン冷凍機と二段スターリング冷凍機で汲み上げた熱をヒートパイプとラジエータで宇宙空間に排熱することでこの極低温を実現します。検出部と断熱消磁冷凍機は米国NASAゴダード宇宙飛行センターで、デュワと前述した二種類の機械式冷凍機は、住友重機械工業株式会社とJAXAをはじめとする国内の研究者との長年の協力のもと、それぞれ開発されたものです。この両者が、昨年の暮れ、新居浜で結合されました。

一つ一つのX線光子による極めて小さな温度上昇を、マイクロケルビン精度で測ることで比類ない分光性能を実現するマイクロカロリメータにとって、機械式冷凍機の振動によって発生する熱の流入は大敵です。Resolveでは振動アイソレータを用い、振動をデュワに伝えないようにしています。ASTRO-H SXSの経験から慎重に設計されてはいるものの、一品づくりのデュワ冷却系との結合は、緊張するマイルストーンです。11月16日からNASA、JAXAそれぞれからの搬入機器のチェック、組み付け、12月7日からの冷却を経て、9日夜、フライトデュワでの最初のスペクトル—「ファーストライト」が得られました。較正線源を用いて測った分光性能は、実験室で測った検出器単体での性能に匹敵し、搭載冷凍機による悪影響は最小限。申し分ない「ファーストライト」でした。

住友重機械工業株式会社（住重）のクリーンルームで「ファーストライト」を終えた、住重、NASA、JAXAと大学からなるResolve開発チームとResolveデュワ（左奥の銀色の容器）。右から３人目の青い帽子をかぶっているのが筆者。

その様子は、ネット会議システムでチーム内に中継されました。筆者は、新居浜に向かう電車の中で、歓喜のご相伴に。翌10日には筆者も現場に。しかし、なぜか前日の性能が出ません。筆者のせいではなく、機械式冷凍機のパワーを上げたため、2種類の冷凍機それぞれの高調波の「うなり」が検出部まで侵入していたためでした。しかし、このチームには、20年以上にわたって開発を続けてきた蓄積があります。誰かのセリフではありませんが、「こんなこともあろうかと」機械式冷凍機の振動周期と位相をコマンドで微調整できる仕組みが用意してあります。最初のハードルは、ほぼ1日で乗り越えてみせました。

Resolveには、「分解（分光）する、解明する」の他に、「不屈」という意味があります。 本物のファーストライトまでには、まだいくつものハードルがあることでしょう。しかし、屈することなく乗り越え、軌道に届けたいと思います。

（田代　信）

髙野先生を追悼する

髙野雅弘先生は、日本独自の固体推進系技術を世界水準に高め完成させたことにおいて、最大の功労者でした。すなわち、上段モータ用の固体推進薬、点火器の設計、上段モータ用ベルノズルの設計、進展ノズル、高精度の地上燃焼試験などは、髙野先生ご指導により配下の研究チームや開発チームが上げた成果が基盤となって実用化されたものです。

駒場の秋葉・髙野研究室学生部屋の朝は、先生が10時過ぎに「コーヒーが飲みたいなぁ」と呟きながら入って来られるところから本格スタートしていました。４回のコーヒータイムに酒盛りを加え、多い日で５回のミーティングによる高密度コミュニケーションが、「研究者は朝令暮改」を信条とする研究活動のスピードを支えていたようです。

M-V開発では、先生が培われた人材と技術を総動員しつつ、後進の育成も強く意識されながらかじ取りをされていました。最もこだわりを持って取り組んでおられたM-3SIIに比べて規模が圧倒的に大きく、推進系開発の責任者として陣頭指揮をとられた先生の双肩にかかったプレッシャーは我々若輩者には想像が及ばないものだったでしょう。

髙野先生の退職記念パーティにて。

その後は、探査機推進工学講座の長として高エネルギー物質による一液式推進系の研究を立上げる一方で、宇宙化学推進の組織的な実験研究の拠点となる「あきる野実験施設」を開設されるなど、後進の研究環境を整えようと奔走される日々を送っておられました。そのあきる野実験施設は、開設から22年を経てなお探査ミッションを支える探査機推進系の開発研究拠点であり続けています。

髙野先生、永いあいだ大変お世話になりました。乱筆ではありますが、謹んで追悼の辞を捧げます。

（徳留 真一郎）

「みお」搭載ミッションデータプロセッサMDP

水星を包みこむ電磁場、プラズマ、大気、ダストの網羅的観測に初挑戦する「みお」は、15の科学観測装置を搭載している。これらを統合制御するのが「ミッションデータプロセッサ（MDP）」（図1）である。その開発は、厳しいリソース要件下（軽量・省電力）でも高信頼・高性能化を図り、次世代へ繋がる機能を可能な限り詰め込んだものであった。複数の観測装置のデータを処理するために、当時としては世界トップレベルの100 MIPS CPU（HR5000:JAXA研究開発本部開発）と高速アクセス可能なBurst SRAM（同左）、大容量FPGA（RTAX2000）、観測機器毎に複数タスクの制御を可能とするリアルタイムOS TRON（eT-kernel）の採用、更には機器の通信規格SpaceWireの採用と、粋を極めた仕様である。開発は最早プロジェクトだけで行う規模を超越しており、ISASをはじめAll-JAXA、大学、そしてMDP開発メーカ（MHI）の理解、StarDundeeによるSpaceWireの技術支援、さらには国内・海外の部品メーカの協力に至るまで、どれが欠けても開発を達成することができなかったであろう。あらためてこの誌面にて、関係者に深く御礼申し上げたい。開発を終えたMDPは、皆の願いが叶って「みお」の科学観測をまとめる司令塔となり、水星到着のその日を今か今かと待ち続けている。

MDPは2つのData Processing Unit（DPU）を搭載し、各DPUが約半数ずつの観測装置を分担して制御する（図2）。科学観測データの処理は、我々研究者が「アプリケーション」として提供し、ミドルウェア（MHI開発）がDPUハードウェア（同左）との仲立ちをする。この3層構造こそが、複雑なMDPの分業開発を可能とした大きな理由の1つである。アプリケーションの開発には、MDP-BBM（ブレッドボードモデル）を用いた全系試験システムを地上に構築し、衛星バスインタフェースから観測機器までの一連の動作を模擬可能としたことで、質の高い開発を効率的に進めることができた。

筆者は、26年間に渡って地球磁気圏を観測し続けた「あけぼの」のプラズマ波動データ解析、地球放射線帯を観測中の「あらせ」搭載機器の開発を経て、2018年に宇宙科学研究所に移り、「みお」のMDPを担うバトンを受け取った。当時、MDPの技術を「あらせ」の各所で目の当たりにし、先行開発された兄貴分の「みお」の運用にその後携わることになるとは、なかなか感慨深いものがある。地球周辺で活動する衛星と比べ、水星で活動する「みお」には通信速度の制約が大きくのしかかる。「あらせ」では1日あたり数100 MB～1 GBのデータを地上に伝送できるのに対し、「みお」は1日あたりわずか数10 MB程度。一方で、各観測装置が生み出す生データ量は「あらせ並」のため、伝送可能量に対して数100～数1,000倍にもなる。MDPは、統合的なデータ圧縮・信号処理技術を提供してデータ量を削減し、またストレージに蓄積したデータの取捨選択も可能にすることで、なんとか「あらせ並」の情報を水星から持ち帰ろうとしている。

図1 MDPのフライトモデル。この箱の中に2つのDPUが搭載されている。

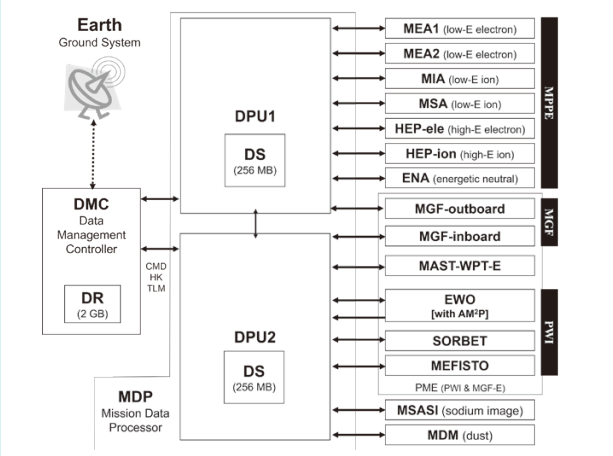

図2 MDPのインタフェース図。衛星バス部と科学観測装置の間に位置し、地球に届けるテレメトリを作り出す。

宇宙機では、耐放射線性能や電力消費等の観点から、機上処理に使用できるリソースは限定的である。プロセッサ速度やメモリサイズは、常に地上技術の10～20年前の水準であり、MDPの最重要課題「限られた資源で如何にサイエンスアウトプットの高いテレメトリを生成するか？」は、惑星探査機では世界共通かつ永遠の課題であろう。ところが「限られた資源で…」と聞いて血が騒ぐのが技術者の性であって、ソフトウェアの柔軟性を生かして（安全マージンは確保した上で！）ハードウェア能力を最大限に引き出すことを常に考えてしまう。300円の小遣いを渡され、釣り銭が0になるよう駄菓子の組み合わせを熟考した少年期のあの感覚に近い（消費税分を忘れ、マージンの大切さを知った…という余談はさておき）。我々の次なる任務は、これまでのMDPの開発経験を活かして「更にインテリジェントな将来探査を実現」することである。

BepiColomboプロジェクト「みお」MDP担当　**松田 昇也**（まつだ しょうや）

退職の時を迎えて

振り返れば

太陽系科学研究系　早川　基（はやかわ はじめ）

駒場にあった宇宙研に通いだしたのが大学院で西田 篤弘先生の研究室に所属することが決まった後の1978年の10月からで、それ以来ずっと宇宙研生活を続けてきましたので40年以上も宇宙研にいることになります。

小さい頃から星を見るのが好きだったことなどから大学を受験する時には「天文学科」に進みたいと思っていたのですが、入学後に「太陽地球系物理」の分野があることを知り、そこであれば「自分で作った機器を衛星に載せて直接観測をすることが出来る」ということで、物を作ったり壊したりすることが好き（余談ですが、中学の技術の時間に製作した椅子が未だに現役で使えているのは秘かな自慢です）なこともあり宗旨替えをして「地球物理学科」を目指すことにしました。３年になり地球物理学科に進学した時点から「大学院で超高層大気分野に進学したい」と表明していたのが私と山本 達人君の二人だけだったことや、彼の実家が私が通っていた小・中学校に近かったこと、思考回路が結構似通っていたこと等から彼が1998年に亡くなるまで公私にわたり親しく付き合いをさせてもらいました。実際私が大学院で宇宙研を希望したのも、何処の研究室が良いかと雑談をしていた時に山本君が「宇宙研ていうのがあるみたいだけど早川にぴったりじゃない」と教えてくれたのがきっかけです。大学院に進学が決まった時には修士で就職をするつもりでいましたから、まさかこんなにも長い期間、宇宙研にいることになるとは思ってもいませんでした。

転機は修士２年の夏に３ヶ月ほど米ロスアラモス国立研究所で過ごす機会を西田先生からいただいたことです。この時に「もう少し続けてみたいな」と思ってしまい、西田先生が時差を間違えて現地時間の夜中の２時過ぎ（だったと思う）に電話をしてこられた時に、「博士課程に進学をしたいと思いますが宜しいでしょうか」と言ってしまいました。西田先生はきっと「本気か？寝ぼけて変なこと言っているのじゃないだろうな」と驚かれたのではないかと思います。何しろその当時の私の英語力は「聞けない、話せない」状態で、学生寮の相部屋だった院生にひと月ほどたった時に「お前の英語はこのひと月で随分進歩した。やっとお前の言うことが解るようになった」と言われるレベルでしたから。実際受け入れ教官の方が「あいつの言うことはちっとも解らん」と日本に電話をして来たそうです。この為宇宙研の研究室の方々からは「あいつノイローゼになって帰ってくるのでは」と心配されていたと帰国したあとでお聞きしました。当人は能天気に「そーか、言葉が通じなくても意外と生活って出来るものなんだ」などと思っていましたが。

腕組みをしている二人が山本君（左）と筆者（右）、右で腰に腕を当てているのが鶴田先生。

そんなこんなで博士課程に進学しましたが、博士課程では実験をしようということで隣の平尾研究室の当時助手だった向井利典さんに教えを乞うことになり、真空実験や粒子計測器の設計など様々なことをいろはから教えて頂きました。

1982年11月に鶴田浩一郎先生の研究室の助手に採用されてからは、当時大学院生だった中村正人君と３人で飛翔時間計測法（通称ブーメラン法）を用いた新しい電場計測器の開発にどっぷりとつかる毎日になりました。1989年打上げの「あけぼの」と1992年打上げのGEOTAILには電場計測器として従来から良く用いられているダブルプローブ法による計測器とブーメラン法による計測器の両方を搭載しましたが、ダブルプローブ法の計測器の開発は当時名古屋大学空電研究所におられた岡田 利美さん（「あけぼの」打上げの翌年に富山県立大学に異動）にほとんどお任せしっぱなしで、宇宙研組はひたすらブーメラン法の開発に取り組んでいました。「あけぼの」用の計測器の開発をする傍らロケットを用いて軌道上実証をするための観測器も開発を行うという自転車操業を行い、何度かの失敗の後最終的に1987年１月に打ち上げられたS-520-9号機でやっと実証が出来たという冷や汗ものの開発でした。

搭載機器開発の中心として、また衛星開発のシステムメンバーの一員として、宇宙研が開発した衛星４機（「あけぼの」、GEOTAIL、「のぞみ」、「みお」）とカナダの衛星１機（E-POP）の計５機の衛星に係りましたが、何とも情けないことにそれら全ての衛星で「あそこはこうするべきだった」という後悔が残っています（しかも大抵は複数）。どんな後悔があるかを書き始めるととても紙面が足りませんので、具体的な話は別の機会にまわそうと思います。係るという点では「かぐや」「はやぶさ２」にも搭載観測器開発にアドバイザーという名目で少しだけお手伝いをさせていただきましたが、相談されたことに対して好き勝手に言いたい放題言っていただけのような気もします。ペネトレーターの開発にもLUNAR-A計画のキャンセル後に係らせていただきましたが、時間・コストの制約で「合わせ技一本」か「技あり」までしか持っていけなかったのが残念です。

40年以上もの間、右往左往しながらも宇宙研で何とかやってこられた（と自分では思っているが正しいかは…）のはひとえに一緒に働いてくれる「人」に恵まれたからだと思っています。本当にありがとうございました。

最後にこれからの日本の宇宙開発・研究が発展して行くことを祈念して筆を置きます。

調布から相模原へ移民して

はやぶさ2プロジェクトチーム　照井 冬人（てるい ふゆと）

平成元年に旧科学技術庁 航空宇宙技術研究所（NAL）に入所した。調布のNALの中でも私が属していた宇宙関係の研究グループは少数派であり、周りのほとんどが航空機関連研究の部署であったが、自分の専門分野が制御工学であるため、航空機の制御の研究者と交流しつつ、人工衛星の姿勢制御系、軌道上デブリ回収機などの宇宙機の画像航法誘導制御系の研究を続けて来ていた。

個人的に実際のフライト品を打ち上げるプロジェクトに関与することよりも理論的な研究を指向していて、研究室レベルでの小規模な実験や数値シミュレーションによる研究を細々と続けるのが楽しかった。その間、2004年にμ-LabSatという超小型衛星の姿勢制御系の一部の設計、搭載ソフトウエアの開発、運用に携わる機会を得て、実システムに触れる面白さを味わったが、それでもプロジェクトは「売名行為の一環」とまで思い、距離を置いていた。まさかその後、退職直前にそのようなプロジェクトにどっぷり漬かるとは考えもしなかった。

組織が国立試験研究機関から独立行政法人、更には、宇宙3機関統合でJAXAとなることで、研究環境は今までの牧歌的な仕事のやり方を許してくれなかった。機会があって、2009年に相模原で新しく作られた月・惑星探査プログラムグループ（JSPEC）に併任し、そこで、はやぶさ2プロジェクトの立上げに関与することとなった。

当初は個人的にプロジェクトが立ち上がることに対して懐疑的だったが、「はやぶさ」の地球帰還をきっかけに急激に話が進み、定年退職の10年前である2010年にプロジェクトが正式に立ち上がり、誘導制御サブシステムを任された時には正直慌てた。今だから言えることではあるが、それまでに誘導制御ハードウエアに関係したことはほとんどなかった。ただ、誘導制御、画像計測に使われる理論やアルゴリズムに関しては、これまでの知識や経験が有効に機能し、過去の研究実績の実フライト品への応用を体験する良い機会となったと、今になれば思える。

「はやぶさ2」は「はやぶさ」のコピー機とはいえ、変更した部分もあり、また改良したくてもスケジュールとコストの制約で改良できず、古い設計のまま搭載するしかないコンポーネントもあったりして、悩む要素は少なくなかった。また、打上げ日に自由度がほとんどないため開発スケジュールは厳しく、搭載機器の調達、搭載ソフトウエアの開発は常にギリギリの状態だった。その中で、JAXAとメーカーとの関係、具体的には、両者間の業務分担や情報公開のレベルをどのようにマネージしたらよいのか、更には、技術レベル・ノウハウ量の違いをどのようにうめたらよいのか、は常に悩んできたことだったが、最終的には両者間の業務分担は絶妙なバランスを取ることができた。特に小惑星近傍の運用においてはこのバランスが有効に機能したと思う。

小惑星到着1年前から、当初は誘導制御サブシステム主体でリアルタイムシミュレータを用いたタッチダウンなどの運用訓練を実施した。今思えば、小惑星到着後の実際の運用よりも大変な経験だったが、プロジェクトメンバーにとって最も有用な経験だったと感じる。高度20kmから小惑星表面までの降下は24時間かかるため、運用訓練自体も交代制で24時間かかる。訓練当初は計画通りの降下自体がそもそも困難で、夜通し降下して半徹夜状態で金曜日の朝を迎え、朝方に不具合が生じて緊急上昇する結果となり落胆したことが多々あった。個人的にはこの訓練中の若いプロジェクトメンバーとの議論を通じ、多少の技術伝承もできたことを嬉しく思っている。

2019年2月22日　第一回タッチダウン成功後の集合写真。

2018年6月の小惑星到着後、初めて見る小惑星に驚き、不確定要素が高い中での運用シーケンスの設計、並行してタッチダウンを含め複数の降下運用を実施するスケジュールは非常に過密で、体力的に相当きつかった。老眼が進んだ眼を酷使し、管制室で手元のディスプレイと数m離れたスクリーンを交互に見る必要があるため、様々なタイプの遠近両用の眼鏡を購入する必要に迫られた。あと10歳若ければ、可能であればあと20歳、と思ったことは何度もあるし、とても自分では務まらないのではと諦めかけたことも何度もあったが、周りの優秀なプロジェクトメンバーに助けられて何とか当初の目的を達成できたことを幸いに思う。

「はやぶさ2」は地球に帰還中でプロジェクトはまだ終了していないので、定年退職後も何らかの形で関与したいと思うし、このプロジェクトを経験する過程で、調布のNAL時代では考えも及ばなかったこと、実プロジェクトの中に本当に「血の通った研究テーマ」が散在している、を強く感じた。この血の通った研究テーマをプロジェクトの最中はゆっくりと考える暇がなかったので、残された時間でこれらのテーマの解決策を考えてみたいと思う。

最後に、快く（？）調布から相模原への異動を承諾して下さった方々、はやぶさ2プロジェクトの立上げ、参画を私に勧めて下さった皆様、そして、ともに全力で戦った、はやぶさ2プロジェクトのメンバーに感謝して退職のご挨拶とさせていただきます。

ミッションの航法（軌道決定）に長年携わって

深宇宙追跡技術グループ　**市川　勉**（いちかわ つとむ）

大学院時代、制御・推定の応用理論について研究しており学会にて（故）砂原 善文先生（当時京都工芸繊維大学）の紹介で宇宙研の（故）西村 敏充先生の所に研究生としてお世話になりました。両先生は確率システム理論に関する大家であり酒豪であり良き親友と後に伺いました。学生時代は駒場キャンパスで秋葉研、松尾研、上杉研、林研と現在でもご活躍されている門下生の先生方にも大変お世話になり、宇宙研には1986年に着任し早いもので34年になります。当時は西村研で、1985年に臼田64mアンテナの建設に伴い、軌道決定システムを富士通（後に宇宙研に入所され退官された加藤 隆二先生が中心）と新規に開発しました。ハレー彗星観測のために打ち上げられた「さきがけ」「すいせい」の追跡管制が臼田局、NASA/DSNで始まり、追跡可能な精度で軌道決定に成功しました。その瞬間を目の前で見ていて感激したことが、今でも記憶にあります。これらミッションの追跡を始めとし現在の巡航中のミッションに至っています。又、専門が近いこともあり、川口 淳一郎先生には駒場時代から色々な角度からご指導いただきました。先生の専門外も熟知した多角的視点からの議論の場にたびたび同席させていただき、今でも教訓となっております。振り返ってみると34年間に、工学実験衛星「ひてん」（1990年）、電波天文衛星「はるか」（1997年）、火星探査機「のぞみ」（1998年）、小惑星探査機「はやぶさ」（2003年）（以上、運用終了ミッション、打上げ年度順）及び磁気圏尾部観測衛星GEOTAIL（1992年）、金星探査機「あかつき」（2010年）同時打上げの小型ソーラーセイル実証機IKAROS、小惑星探査機「はやぶさ２」（2014年）（以上、現在巡航中）の航法（軌道決定）に携わってきました。特に惑星探査機においては臼田64m局、鹿児島34m局の２局を用いたレンジ・レンジレートだけでは精度が向上しないのでNASA/DSNの局のサポートが必須でNASA/JPL Navigationチームの方々とも双方で行き来して会合にて議論してきました。現在巡航中及び今後のミッションでもNASA/DSN支援は基より共同研究していく上でも重要だと思います。

もう少し噛み砕いて各々のミッションに対応した航法（軌道決定）について述べると一言共通して言えることは探査機の位置は“神のみぞ知る”です。長年当該分野に携わってしみじみ感じたことは、最初は追跡できるだけの精度で問題なかったのですが、時代とともにミッションも複雑化し航法としても高精度化が求められるようになりました。幾つかのミッションについて共同での軌道決定の精度評価等は成果としてJPLと双方で国際会議（学会）発表・論文投稿したのもよき思い出です。紙面上、これ以上細かいことは筆者は別途整理するつもりではおりますので割愛しますが、近年のミッションは特に航法・誘導において非常に高精度の運用が求められ、軌道決定としても電波（レンジ・ドップラー）観測に、搭載カメラ画像の観測量（Optical navigation）あるいはDDOR（Delta Differential One-way Range）という観測量をハイブリッドに加えることで格段に推定精度向上が期待出来ることは基礎研究として国際会議等で議論していましたが特に後者については竹内 央さんが着任され、局における受信装置及びデータ処理ソフトウエア導入等により観測が実現化し、JPLの結果に引けをとらない精度までに至っています。これらは今後、必須の観測量です。当然ですが、軌道決定は局と密接な関係の上に成立しております。新規アンテナ“美笹局”も含め観測量に対する計測精度について局関係者と情報共有していくことが必須です。近年は軌道決定は探査機のシステム、地上局の特性を把握した上で高精度化が成立する縁の下の力持ちから櫓をしっかり固めた躍進的研究開発の分野であり、今後のミッションでは更なる課題に向け挑戦すべき分野でもあると思っています。

国際会議に参加させていただく機会も多々あり、特に欧米の宇宙関係の機関・大学等の方々がどんなミッションの航法についてどういう研究開発しているか時代の推移とともに特に航法に関する勉強をさせていただきました。写真は私（右端）以外はJPLの航法セクションのメンバーです。中には「あかつき」及び「はやぶさ２」の共同作業で来日した方もおられますが航法セクション全体で少なくとも300人を超える大所帯です。

一方で、十数年前のことですが専門としている制御・推定理論で国際会議にて現代制御理論の生みの親とも言われるR. E.Kalman博士（1930 ～ 2016年）とお会いする機会があり会食も含め特に推定理論を中心に議論させていただいたことは私にとって宝物となりました。R. E. Kalman 博士の有名な理論は研究者・技術者が一度は利用された方が多いと思いますが“カルマンフィルター ”です。

最後に、節目を迎えますが、今後何らかの体制で宇宙研に携わるような機会がございましたらご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

ISSFD（International Symposium on Space Flight Dynamics）のレセプションにて（2015年、ドイツ）。

編集後記

いつもは活気に満ちた宇宙研の入口が静けさにつつまれています。新型コロナウイルス感染症拡大防止のため、宇宙科学探査交流棟も臨時休館しているのです。そんな中でも柔らかな陽射しや、木々の緑、そして、玄関前の桜の綻びに、着々と躍動の季節への準備が進んでいるのを感じます。（斎藤 芳隆）

ISASニュース　No.468　2020年3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　生田 ちさと
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。▶http://www.isas.jaxa.jp/