



GEOTAILの打ち上げと停波

1992年7月24日に米国フロリダ州のケープカナベラルからデルタIIロケットによって打ち上げられたGEOTAILは、30年を超える運用で数々の成果をあげた後、2022年11月28日に停波しました。停波運用には、メーカーOB、宇宙研OB、現役のGEOTAILプロジェクトメンバーが宇宙研に集合したほか、米国のGEOTAILプロジェクトメンバーを含む関係者がオンラインで参加しました。



2024年の展望

宇宙科学研究所長 國中均(くになか ひとし)

降りかかる火の粉を払い除け、当初予定からかなり遅れてようやくと2023年9月7日にX線分光撮像衛星XRISM／小型月着陸実証機SLIMを打ち上げました。本稿執筆中の12月中現在、試運転に奮闘努力中の両プロジェクトには、細心の注意を払い、ことを進めるように指示しています。この先どうなっているのか知る由もありませんが、2024年新年になって皆さんと「晴れがましい気持ち」で成果を共有できると信じています。

世界最小月着陸機OMOTENASHIと超小型探査機EQUULEUSが当初目標を完結できず誠に残念です。それでも、米国ARTEMIS-1ロケットに搭載されたキューブサット10機の中で傑出した成果を収めるのみならず、JAXA若手・大学院学生に対するエンジニア育成に大いに貢献しました。しかし、キューブサット／超小型衛星を宇宙科学の実践手段として供するには、まだまだ課題を多くはらんでいることを頭にしたりと認識します。不具合の原因を追求／精査して、先進的に宇宙科学への応用展開を目指します。一方で、磁気圏尾部観測衛星GEOTAILと惑星分光観測衛星「ひさき」は、当初目標を達成し、停波により天寿を

全うしたことは特記に値します。

戦略的中型クラスのXRISMが打ち上げられましたので、その次の火星衛星探査計画MMX、次の宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星LiteBIRDのさらに向こう側、2030年代の新たな戦略的中型計画の立案を、GDI(Groupe de Discussion Intensive、戦略的中型創出グループ)を中心に加速させます。宇宙科学本来のBottom Up提案を前提として、そこに宇宙研執行部から組織運営上の観点を加えて、宇宙科学コミュニティと膝詰めで議論した上で、両者納得の上で次のミッションを決めて育てたいのです。宇宙研所長がGDIに込めた期待は、個々個別のグループが狭い見で自分勝手な未来を考えるのではなく、宇宙科学コミュニティの総意として日本のためになる且つ国力に見合った、さらに世界を先導する未来を作りたいとの思いです。このことに理解と共感をいただき、宇宙科学として未来に繋げる精神で新たな計画を立案しましょう。

引き続き宇宙研の「挑戦の精神」にご高配頂き、応援だけでなく主体的なご寄与をお願いします。

GEOTAILからその先へ 40年間の感謝を込めて

日米共同プロジェクトのGEOTAILは、1992年7月24日に米国フロリダ州から打ち上げられて以来、30年以上の長期間に渡り地球周回の長楕円軌道で観測を行い、2022年11月28日に停波しました。30年間、休む事なくデータを送り届けてくれたGEOTAILに感謝すると共に、プロジェクトの開始から停波までの約40年間、GEOTAILを支えて頂いた多くの方々に深く感謝いたします。本特集ではGEOTAILの歴代プロジェクトマネージャ、プロジェクトサイエンティストが、GEOTAILの40年間を振り返りました。

飛天から磁尾艇留へ ～日本の宇宙工学に残したもの～

上杉 邦憲(うえずぎくにのり)

GEOTAIL計画の前身であるOPEN-J計画のワーキンググループが発足したのは、今から45年も前の1979年でした。それはL-4S-5による日本初の人工衛星「おおすみ」打ち上げ(1970)から10年も経っていない頃で、ハレー彗星探査に必須のM-3SII型ロケットの開発が公式には未だ認められていない時期でした(直径1.4mまでという軌を一歩外したM-3SII開発が宇宙開発委員会に認められたのは1981年3月)。

そんな中、地球磁気圏尾部(遠地点20Re^{*}、約13万km)の探査をする衛星OPEN-JをM-3SII第4段にハレー探査用に開発中のキックモーターKM-Pを用いることで打ち上げられないか、という検討をしたのですが、その後NASAの予算上の都合もあり、OPEN計画衛星群のひとつ米国NASAの衛星TAILとOPEN-Jを統合して、最初の2年間は遠地点を約220Re(140万km)の地球夜側に常に持ってきて磁気圏遠尾部を観測、その後遠地点を20～30Reに下げて、従来のOPEN-Jが観測予定だった近尾部を1年半にわたりカバーするという提案がNASAから出されました。こんな実現不可能ともいえる軌道計画を立てたのは、当時NASAゴダード宇宙飛行センター(GSFC)で「軌道の魔術師」とあだ名されていたロバート・ファーカーでした。

しかし遠地点を220Reの夜側に常に置くのに衛星搭載の推進系を使っていたのでは、いくら燃料があっても足りず、二重月スウィングバイと呼ばれる技術が必要です。ファーカーの描いた軌道図では加速月スウィングバイで遠地点高度を上げ、帰ってきた衛星を減速月スウィングバイによって周期調整、再度加速月スウィングバイで夜側の磁気圏遠尾部に持っていくというオペレーションを二年間にわたり繰り返す様子が見事に示されていました。ただこれはあくまで机上でのこと。それまで世界中で実際にこんな軌道運用をした例が無い中、我々がいきなりこの技術を実現する自信を持てるはずありません。

従来宇宙研ではMロケット新型初号機には、いきなり正規理学ミッションを載せるのは問題、ということもあり、MS-T(Mu Satellite-Test)という試験衛星を搭載するのが常で、M-3SII-1号機では「さきがけ」が五番目の試験衛星(MS-T5)として、文字通りハレー探査の先駆けを務めました。従ってそのままではM-3SII型では試験衛星を上げるチャンスがありません。そこで、

新たに工学技術をマスターするための衛星が考えられることになりました。こうして誕生したのが工学実験衛星MUSES(Mu Space Engineering Satellite)シリーズで、GEOTAILに先立ち二重月スウィングバイ技術の修得を主目的にしたMUSES-A(後の「ひてん」)がその初号機となりました。

MUSES-A計画開始は、「さきがけ」「すいせい」を打ち上げた1985年で、衛星ハードウェアの開発はもとより、何と言っても苦労したのは軌道計画の基となる軌道決定精度の向上と月スウィングバイを可能にする軌道制御ソフトウェアの開発でした。前者に関してはNASA/JPLで長年軌道決定に携われ、帰国後富士通に籍を置いておられた西村敏充先生を三顧の礼をもって宇宙研にお迎えして一安心。後者は川口淳一郎先生という「日本の軌道の魔術師」の指導の下、MOONS(Muses Orbit Operation & Navigation System)と称する運用ソフトが完成しました。1990年1月24日に打ち上げられたMUSES-Aは「ひてん」と命名され、同年3月19日の最初の月スウィングバイを始め、最初の1年間に予定通り8回のスウィングバイを成功させて、GEOTAILへの道を開くことが出来ました。

「ひてん」と並行して進められたGEOTAIL計画では、打ち上げロケットが当初のスペースシャトルからチャレンジャー事故の影響で、一時は「シャトルでもデルタでも上げられるような設計に」という要求になり、それは加速度のかかる方向が90°変わるので無理ということになり、結局デルタに落ち着くまでのすったもんだや、NASA式文書管理の煩雑さに音を上げながらも、こと軌道計画についてはMOONSをGEOTAIL向けに改良したGOONS(GEOTAIL Orbit Operation & Navigation System)があったために殆ど苦労らしい苦労をせずに打ち上げ後も淡々と運用できたように記憶します。プラズマ粒子観測装置(LEP)ラッチアップ対策として月の陰に衛星を入れて電源オフにするという離れ業を行えたのも、軌道運用に余裕があったればこそだったと言えるでしょう。

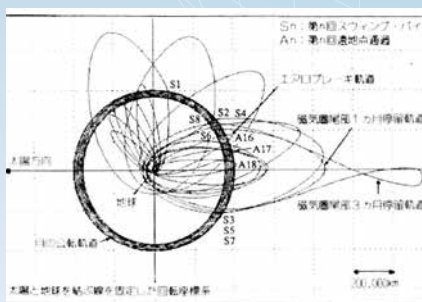
「ひてん」は、新たに困難な工学技術を必要とする理学衛星・探査機に先立ってそれを修得する工学実験衛星MUSESとしての真価を発揮した、と言ってよいでしょう。この手法は、小惑星からサンプルを持ち帰るという無謀とすら言われたミッションに必要な多くの世界初の技術を確認するためにも必要とされ、工学実験探査機MUSES-C(「はやぶさ」)が生まれました。苦難の末「はやぶさ」がミッションをやり遂げたことが、理学ミッション「はやぶさ2」の成功に繋がったことは言うまでもありません。

*地球半径。

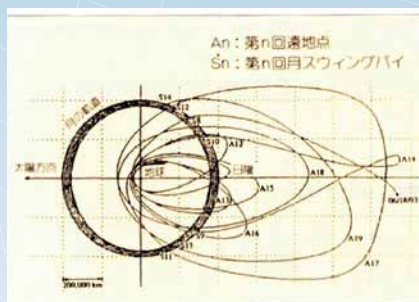
その時思い出すのは工学実験衛星2号機MUSES-Bとその後のミッションのことです。MUSES-B「はるか」は直径8mの大型アンテナを地球上の電波天文アンテナとリンクさせて宇宙VLBI技術を修得するもので、このミッションはほぼ成功したものの、次の本格的VLBI理学ミッションであるASTRO-Gでは全く違う大

型アンテナ方式を採用したことも要因となり、計画中止・打ち上げ断念に追い込まれました。

MUSESシリーズを最初から見守って来た者として、困難な技術に挑戦することが常に必要とされる科学衛星計画を進める後輩たちにこういったことを忘れないでほしいと思っています。



「ひてん」の軌道 (打ち上げから1年後まで)



GEOTAILの軌道 (磁気圏遠尾部探査)

いずれの図も太陽—地球—地球を結ぶ線を固定した回転座標系



打ち上げ2日前 (1992年7月22日)、ロケット上のGEOTAIL衛星の見納め (最終点検) をしている筆者

なぜGEOTAILは成功したのか？

向井 利典(むかい としふみ)

GEOTAILは、宇宙研が衛星開発と運用管制を担当し、NASAが打ち上げを担当する、観測装置の分担とデータ受信は日米双方で協力するという大型国際協力ミッションとして計画された⁽¹⁾。この枠組みはNASAからの提案(1983年)に基づいて決められたが、その際、当時の宇宙研所長・小田稔先生は、NASA流の大量の文書に基づくプロジェクトマネジメント方式でなく、宇宙研流(最低限の文書作成)の衛星開発方式にNASAも同意する事を要求したのであった。この事に代表されるように、当時の宇宙研とNASAではプロジェクトの進め方が大きく異なり、他にも意思決定方式や予算システム、ITARや損害賠償に関する法的問題など、様々な違いが多く存在し、いわばcultureが違うわけで、使用言語の障壁もあった。プロジェクトの共通言語は英語としたが、当時、宇宙研やメーカーの技術者で英会話に堪能な人は少なく、英語と日本語の文法・文章構成の違いは物事の思考順序の違いでもあり、そのため、誤解や不要な混乱が頻発した。このような様々な障害を乗り越えてプロジェクトが成功に至った最大の要因は、双方のプロジェクトメンバー間の信頼関係が構築されたことであった。しかし、信頼関係の構築はそう簡単な事ではない。まず、初期フェーズの頃、中谷一郎先生がNASA側のプロジェクトを担うゴダード宇宙飛行センターに滞在し、NASAのプロジェクト管理方式を経験した事が非常に大きかった。帰国後、中谷先生はNASA側のシステムマネージャのMac Grantと緊密な連絡体制を作り、様々な複雑な問題を宇宙研方式に翻訳・解釈して日本側での対処を促し、一方、Mac GrantもNASA側で同様な役割を果たした。その事により日米のプロジェクトメンバーは物事の対処法における日米間の違いを認識して、双方のcultureを尊重、誠実な対応を通じて信頼関係が構築されたのであった。言うまでもないことだが、その背景として日本の宇宙技術が世界的に通用するレベルに到達していたからこそ信用されたのであった。また、科学観測における当時の日

本側の実績は米国側と比較して遥かに少なかったが、潜在的な観測技術レベルは世界的に十分通用する状況にあった。すなわち、お互いに競争できるレベルにあったからこそ協力する場合に信用されたと云える。

Mario Acuna博士(GEOTAILを含むNASA GGS Project Scientist)は宇宙研方式に対する信頼感を込めて次のように語った。“In ISAS, things were accomplished in a few hours that would have taken months in the United States.…… the development of a mutual trust relationship between the partners was perhaps the most critical element of all for success.”

以上、国際協力プロジェクトの推進に際して信頼関係の重要性について述べてきたが、科学衛星の成功はその科学成果の質と量によって評価される。ここでは多くの科学成果を生み出した要因について述べる。

- 1) ミッション目的に合致した軌道設計が功を奏した。具体的には、打ち上げ後の2年余りの間、二重月スウィングバイ技術によって地球磁気圏の広範な遠尾部の探査を行った後、近尾部軌道に移動し、特に、磁気リコネクションが発生する確率が高い領域の探査において衛星が日陰に入らないように設計された。このような軌道の磁気圏探査ミッションは過去になく、次項に述べる新規性のある観測装置と相俟って多くの新しい現象が発見された。
- 2) 観測装置設計における新規アイデア(特に、日本側担当のプラズマ粒子観測装置(LEP)とプラズマ波動の波形観測装置)が高精度・高時間分解能の観測を可能とした。
- 3) それらの新たな現象・観測データが計算機シミュレーションで再現される等、宇宙プラズマの理論的な研究も大きく進展した。その結果に刺激されて観測データの利用者(研究者・大学院生)が増加した。
- 4) 観測データの公開、特に、NASAのデータセンターから公開されたkey parametersを見て、データ利用者が汎世界的に増大した。

いずれも、今では当然と思われる事ばかりのように思われるかもしれないが、30年以上前では新たな試みであった。

なお、LEPの観測データに基づいて数多くの論文が生まれ、GEOTAILの成果増大に貢献したが、実は、LEPは打ち上げ1カ月後の初期運用の途中でラッチアップしたのであった。その回復のためには衛星全体の電源をオフ・オンする必要があった。宇宙研工学と担当メーカーの検討結果に基づいて衛星が月の陰に入るように軌道設計を変更し、日陰中に衛星バッテリーを切り離し(電源をオフ)、日照に出て太陽電池による発電で復帰させるという運用が計画された。この計画に米国側も賛同したのは日本側の検討結果を信用したからであった。

LEPの回復は正に信頼関係のおかげであった。

上記のような次第で、GEOTAILは1990年代の磁気圏観測衛星の中で最も成功したミッションと言われた。計画立案段階から長年にわたってミッションを牽引した西田篤弘先生が宇宙研所長を退官した時、NASA有志がゴダード宇宙飛行センターで“Nishida Honor Symposium”を主催したのはその一端の表れである。

(1) 文集「GEOTAIL計画をふりかえる」において「GEOTAIL計画の生い立ち」(西田篤弘)
https://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/mission/GEOTAIL/PDF/0_文集.pdf



NASA OPEN計画の代表者が宇宙研来訪、ISAS首脳部OPEN-J → GEOTAILに合意(1983年9月、駒場)



FM開発着手前のNASA/GSFCで行われたJoint Working Group会合(1988年11月)



左から上杉邦憲、中谷一郎、Mac Grant (いずれも敬称略) 1989年12月



右上：LEPのFMセンサーを組み上げている筆者 左下：筆者とMario Acuña



GEOTAILの長年のリーダー・西田篤弘所長の退官記念のシンポジウム@NASA/GSFC

GEOTAILと宇宙研における国際協力

藤本 正樹(ふじもと まさき)

大学院生の頃からGEOTAILと関わってきました。自身は、宇宙研に所属しつつも計算機を用いた理論研究をする「あまり役に立たない」学生だったのですが、「こういう新しい観測をすることをどう考えるか」といった質問を教授室に呼び出されて受けたことを、よく覚えています。「こんなことを自分に聞いてくるぐらいに新しいことをやるのだな」という強い印象を受けました。実際、それまでの観測精度とは次元の異なるデータが生み出され、そのデータ解析と理論的考察が緊密に絡み合うことで、宇宙空間を満たすガスがどのように振舞うのかを理解していく新しい観点と研究スタイルを世界の学界に提示しました。GEOTAILの最大の成果のひとつは、そのスタイルがその後20年以上にわたって世界の太陽圏科学界で真似されてきたことだと思います。2000年代には「GEOTAILは磁気圏観測分野で最も成功した計画のひとつ」という言い方もされていました。

GEOTAILの成功は、宇宙研の地球惑星科学分野における国際協力の形も大きく変える契機となったと思います。GEOTAIL以降は、以下のように世界から注目されるポテンシャルのある計画が続いたのですが、そこでの存在感を確保する上でGEOTAILでの経験が生かされていたと考えるからです。

「かぐや」は人類が月探査を再開する先陣を切る形になったわ

けですが、その月面宇宙環境の把握においてもGEOTAILで得た知見を活かし、新しい研究テーマを切り拓いて世界にインパクトを与えるということをしました。この展開は、月と同様に大気を持たず天体表面と宇宙空間が直に接している水星を探索する計画にもよい影響を与えました。この計画は欧州との大型協力で進めるベピ・コロomboですが、欧州側が主導するもの、かつ、水星到達まで長い期間が必要となる計画において、日本の存在感を出すには面白くて新しいアイデアを出すことが特に効果的です。これはまさにGEOTAILで学んだことです。その経験が、ベピ・コロomboの打ち上げ後・水星到達前に複数回行う金星・水星のスウィングバイの際に取得された観測データの解析に、日本の若手が活躍する素地となったと思います。存在感を持ってコミュニケーションを持つことで欧州コミュニティとの親密な関係が確立し、それが欧州主導の氷衛星探査計画JUICEへ参加することにつながりました。15年前にはそのための枠組すら無かったのが、今では海外主導計画への参加は宇宙研の活動の柱のひとつです。

小惑星サンプルリターン「はやぶさ」シリーズにおいては、私自身が必ずしも研究者という立場ではなく国際協力の案件調整に参加してきたのですが、そこでもGEOTAILでの経験を根拠とする自信が支えになっていました。「あまり役に立たない」大学院生が「少しは何かができる」宇宙研メンバーになったということです。

GEOTAILが観測した磁気リコネクション

篠原 育(しのはら いく)

GEOTAILが30年もの長い期間、地球周辺の宇宙空間を観測し続けたことによって生み出された科学成果は膨大なものです。図に示すように国際的な科学雑誌に掲載された論文数は運用終了時点の2022年12月の時点で1,307編、総引用回数は36,000を越えています。ここでは、膨大な科学成果の中から、私自身にも思い入れの深い、磁気圏尾部における磁気リコネクションに関する科学成果について、紹介させていただきます。

磁気リコネクションは磁場エネルギーをプラズマの運動・熱エネルギーに変換する物理過程で、多くの宇宙プラズマ研究者の関心を集めている現象です。地球磁気圏では、磁気圏内のプラズマ対流や、活発なオーロラが発生することなどで知られる磁気圏サブストームと呼ばれる擾乱現象の主要因の1つとして重要なプロセスです。GEOTAILの科学目標の1つは「磁気圏尾部におけるリコネクションによる磁場エネルギーの解放やプラズマの加速の物理を解明する」ことでした。

GEOTAILのような地球周辺の宇宙空間における人工衛星による観測は、「磁気リコネクション現象が発生しているまさに“その場”で何が起きているのか」を詳しく知ることができるという大きな特長を持っています。GEOTAILには、イオンと電子の速度分布関数を高精度に観測できる機器や幅広い周波数帯域で電磁場変動を精密に観測できる機器が搭載されており、“その場”観測の特長を最大限に活かせるように設計されていました。その結果、磁気圏尾部リコネクションの重要性を示す直接的な

証拠を得ることに成功しただけに留まらず、磁気流体力学的な描像を越えて、プラズマを構成する個々のイオンや電子の振る舞いが磁気リコネクションの物理にとって重要であることを明らかにしました。沿磁力線ビームなど複数のコンポーネントからなる複雑なイオンの速度分布、イオンと電子が分離して運動する二流体効果、電子の非熱的加速、など、宇宙空間プラズマにおける様々な運動論的な物理過程が次々と見出されたのです。

中でも画期的だった観測の1つは、磁気リコネクションを駆動させる心臓部である磁気拡散領域を観測できたことです。わずか数例ではありますが、磁気リコネクションに伴ってアルフベン速を超える電子の流れ、など、磁気拡散領域内の磁気中性線の極近傍にのみ見ることができると予想されていた特徴を観測することに幸運にも成功しました。これらの観測結果や同時期に進展した数値シミュレーション研究の成果から、磁気拡散領域の空間スケールや構造の一端が明らかになり、磁気リコネクションの理解は大きく進みました。

1つの衛星による“その場”観測は、ある一点での精密な観測データを得ることはできますが、磁気リコネクションの空間的な広がりを把握することはできません。このため、数多くの磁気リコネクションの観測例を集め、整理することによって、はじめて空間的な広がりを推測することを試みることができます。GEOTAILが近尾部軌道に遷移した1994年から運用終了までに243例の磁気リコネクションの観測データが集まりました。この内、電子加速を伴うような激しいリコネクションは93例しかありません。30年間でこれだけの観測例しか得られなかったことは、磁気リコネクションを“その場”観測することが如何に難しいかを物語っていますが、GEOTAILの軌道が磁気圏尾部のリ

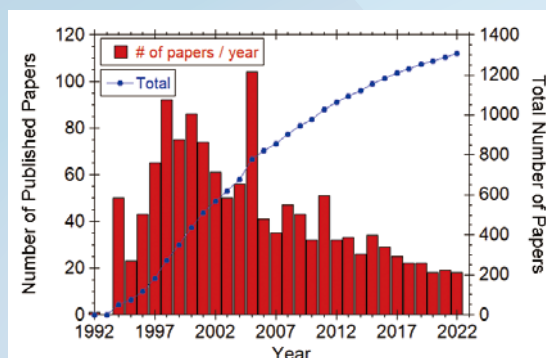
コネクションの観測頻度をあげるために最適化されたものだったからこそその成果です。

磁気リコネクションの観測コレクションからも、新しい知見が得られています。その1つは、磁気拡散領域の3次元的な空間構造が推定されたことです。イオンの流れを速度分布関数のレベルで解析し、磁気圏尾部を支える尾部電流中のイオンの運動論的な振る舞いと関連付けて考察することで、それまではほとんど議論がなされていなかった尾部リコネクションの朝一方向の構造を推定することができました。この他にも、長期間観測を活かして、太陽風の状態によって尾部リコネクションの発生位置がコントロールされることや、磁気リコネクションの

発生場所は太陽風状態だけではなく、発生時の磁気圏の状態によっても影響されること、なども最新の研究成果で明らかになってきています。

このように、長期間観測があつてこそ、観測確率が低い現象や長期的な太陽風に対する応答について調べることができました。これらは磁気圏研究にとって重要な課題です。GEOTAILが30年間も観測をすることができたことは、私たちにとって非常に貴重な研究の機会を与えてくれました。今後もGEOTAILの観測データは参照され続け、新しい知見をもたらすことでしょう。

※磁気リコネクションについては、例えば、GEOTAILの初期の成果を紹介したISASニュースNo.166(1995年01月号)「オーロラの源を探る—GEOTAILが見た地球のしっぽ—」などもご参照下さい。



GEOTAIL衛星の国際的な科学雑誌に掲載された論文数の推移、青線は累積論文数



GEOTAILの成果を総括した上でその成果を将来につなげることを目的に開催されたGEOTAILシンポジウム@東大本郷キャンパス・小柴ホール(2023年3月28-31日)

そして未来へ

齋藤 義文(さいとう よしふみ)

1990年代にはNASA、ESA、ISASが協力して、GEOTAILを含む複数の衛星による同時多点観測で、太陽-地球系環境を理解しようとするISTPプログラムが実施されました。その後、2000年代に入ると、ESAが打ち上げたClusterを皮切りに、地球磁気圏のその場観測は、1機の衛星による観測から、現象の時間変化と空間変化を識別することのできる編隊飛行衛星観測が主流となってきました。そしてさらに近年、地球磁気圏で起こる様々なダイナミックな現象のメカニズムを真に理解するためには、編隊飛行衛星で1つの空間サイズを観測するのでは足りず、同時に複数の空間サイズを時間と空間を分離して観測する、更に多くの機数の衛星群で観測を行うミッションが提案されて実現に向けて動き出しています。

日本でこのような複数衛星によるミッションを実現しようとすると、資金規模からも、比較的小さな打ち上げロケットを用いることから、今後超小型衛星の使用と、超小型衛星に搭載して、必要とされる観測性能を発揮できる観測装置の開発が必須になると考えられます。現在はそのような将来に向けて、小型で高性能を有した新しい観測装置の開発が国内の複数のグループで進められています。

地球磁気圏から、更に広い太陽圏に目を向けると、2020年代の後半には、特に太陽から火星までを含む内部太陽圏において、1990年代のISTPの内部太陽圏版とも言える世界が実現されようとしています。宇宙研では、太陽観測衛星「ひので」が観測を継続し、現在開発が進められているSOLAR-Cが新たな太陽観測を開始、BepiColombo/Mioが水星磁気圏に到着します。これらの日本の衛星が欧州のSolar Orbiter、米国のParker Solar Probeなどと連携するのに加えて「あかつき」が金星周回軌道での観測を、そして「あらせ」が地球の内部磁気圏での観測を継続し、MMXが新たに火星圏の観測を開始するという、内部太陽圏を複数の衛星で同時多点観測できるまたとない好機を迎えます。

そして更にその先、恐らく地球磁気圏のその場観測で当たり前となった編隊飛行衛星観測が内部太陽圏から全太陽圏に広がり、それぞれの編隊飛行衛星ミッションが連携して太陽圏を理解するという将来がやって来るに違いありません。GEOTAILで育てられた我々研究者は、将来の研究者にその役割を引き継ぎ、かつてGEOTAILが実現したようなユニークなこれまでに無い観測を新しい技術で実現することにより、太陽圏そして更にその先の世界の理解を進めて行きたいと考えています。

最後に、これまでGEOTAILを支えて頂いた皆様、どうも有難うございました。そして、おやすみなさいGEOTAIL。30年間お疲れ様でした。

観測ロケットS-520-33号機打上げ実証実験記

観測ロケットS-520-33号機は将来のロケットや衛星、探査機への応用を目指した先進的宇宙工学技術の実証実験を目的として、2023年12月2日(土)の16時に鹿児島県の内之浦宇宙空間観測所から無事打上げられました。今回の実証実験では将来の惑星や地球の大気圏への突入技術の実証を目的としたインフレータブル型データ回収システム(RATS-L)、宇宙空間で展開型の構造を実現するインフレータブル伸展プラットフォーム(IEP)、実験機器のデータ収集及び地上への転送を簡便かつ効率よく行うPIデータ収集装置(PDC)、高性能な小型ロケット用航法センサである観測ロケット用航法センサ(NANA-ka)の4つの実験機器が搭載されました。

当初設定された打上げが延期になった後、天候やミッション達成の可能性を鑑みて12月2日に打ち上げる事になりました。当日朝、いつもより早く目が覚め、カーテンを開けると雲一つない青い空、絶好の打上げ日和でした。打上げ時には少し雲が出ていましたが文句なしの天候です。打上げシーケンスに入ると慌ただしく時間が過ぎて行き、あっという間に打上げ時刻が訪れました。発射とともに轟音が聞こえ、実験班はロケットか

ら送られてくるテレメトリーの確認に集中していました。ノーズコーンが開いた頃に送られてきた写真を恐る恐る見てみると観測ロケットと分離直後のRATS-Lが写っているではありませんか(写真1)！その写真を見て感動し思わず「かっこいい」という言葉が口に出ていました。周りの方々も送られてきたテレメトリーを確認して成功を確信したのか感嘆の声が上がりました。打上げから279秒後に最高高度304kmに到達し、543秒後には予定落下区域内へ落下して無事実験は終了しました。飛行時間は10分弱と短いものでしたが得られた成果は大きなものになりました。RATS-Lは打上げ196秒後にロケットから分離し、3183秒後(53分後)の16時53分頃に海面へ着水しました。翌日12月3日の7時37分には着水したRATS-Lの洋上回収も成功し、全機器予定していた実験を遂行することができました(写真2)。

観測ロケットはH-IIAやイプシロンなどに比べると規模は小さいですが、その分、身近に接することができるため、今回の打上げには学生さんや若手職員の方が研修に参加されました。皆さん良い経験をされたのではないかと思います。最後に関係者およびご協力、応援してくださった皆様に深く感謝いたします。(三田 信)



写真1：全方位カメラで撮影した分離直後のRATS-L



写真2：洋上回収される着水したRATS-L

とうとう停波！！惑星分光観測衛星「ひさき」

惑星分光観測衛星「ひさき」は、2013年9月14日に内之浦宇宙空間観測所からイプシロンロケット試験機で打ち上げられ、極端紫外分光観測を武器に惑星の磁気圏や高層大気観測から多くの成果をあげてきました*。10年以上にわたり観測運用を継続してまいりましたが、経年劣化により高い指向精度が要求される観測条件を満たすことが困難になりました。有意義な観測運用を継続できないことから、その責務を全うしたと判断し、2023年12月8日停波運用を実施し、惑星用の宇宙望遠鏡としての使命を終えました。

振り返ってみると、セミオーダーメイド型で開発した初めての衛星、スペースワイヤーと呼ばれる衛星内通信ネットワークを



停波後の「ひさき」(2本の黄色い直線が交わる位置)、電波を送信していない衛星を光学望遠鏡で正確に追尾していることがわかる。 於：美里スペースガードセンター

本格的に導入した初めての衛星、地上の衛星運用システムである汎用衛星試験運用ソフトウェア(GSTOS)を初めて採用した衛星管制、そしてイプシロンロケットも初めての打上げと初めてづくしだったプロジェクトでした。ミッション機器からの情報を姿勢制御に活用することで効率的に高精度の指向を達成するアイデア、次世代電源系要素技術実証システム(NESSIE)の搭載など、小さいからこそできる挑戦を詰め込んで、後続の計画に貢献することを目指した実験的な要素も強く、多方面からのご指導・ご指南がなければ、叶わぬミッションでした。

特に、セミオーダーメイド型のバスシステムは、イプシロンロケット2号機で打ち上げられたジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)、衛星メーカーの小型地球観測衛星である先進的宇宙システム(ASNARO-1、ASNARO-2)や政府開発援助を活用したベトナムの地球観測衛星(LOTUSat-1)などの礎にもなりました。また、発展的な研究課題が、公募型小型計画の6号機候補に選定された紫外線宇宙望遠鏡計画(LAPYUTA)に受け継がれています。

プロジェクト発足から15年、観測運用開始から10年、長きに渡りご支援・ご協力・ご声援いただきありがとうございました。

(山崎 敦/澤井 秀次郎)

*主な成果は「ひさき」プロジェクトサイト(<https://www.isas.jaxa.jp/home/sprint-a/#section04>)をご参照ください。

》あきらめない！

2025年、水星到着。「みお」との通信開始

——国際水星探査計画BepiColomboで地上系システムを担当されているそうですね。

地上系システムとは、宇宙を飛行している衛星や探査機と我々をつなぐものです。具体的には、地上から探査機へコマンドと呼ばれる指令を送り、テレメトリと呼ばれる探査機からのデータを受け取って処理するインターフェースを指します。どういうコマンドとテレメトリをいつどのくらい送りたいのか、どのように処理したいのかは、衛星・探査機ごとに違います。プロジェクトのメンバーと打ち合わせを重ね、そのプロジェクトに合った地上系システムを構築し運用する、というのが私の役割です。

——BepiColomboの地上系システムの特徴は？

BepiColomboでは、日本が開発した水星磁気圏探査機「みお」(MMO)と欧州が開発した水星表面探査機(MPO)が、水星を周回しながら観測を行います。2つの探査機が結合した状態で2018年10月に打ち上げられました。7年かけて水星に到着するまで地上との通信はMPOが担い、その通信にはJAXAの深宇宙探査用アンテナも使います。受け取ったテレメトリはドイツにあるESOC(欧州宇宙運用センター)に流すのですが、そうした運用はJAXAにとって初めてのことで、試験や訓練を重ねました。計画当初には予定していなかった地上局新設などもあり、未だにやるべきことが残っています。

——水星到着は2025年12月の予定です。

水星の周回軌道に到着して「みお」が分離されると、「みお」自身と地上との通信が始まります。「みお」は、回転しながら水星の磁場や電場を観測します。回転してもアンテナは地球に同じ面を向けるように制御されるのですが、分離直後は信号が途切れ途切れにしか届きません。手旗信号で通信するようなもので、現在も運用シミュレータを用いた訓練と検証を繰り返しています。

——20以上の衛星・探査機の地上系システムや軌道力学業務に携わってきたと伺いました。この仕事で大切なことは？

あきらめないことです。できないではなく、できるようにする。訓練を重ねるのも1つの方法です。人の努力では解決できないなら、システムを改良する、というように、あらゆる手を尽くします。やったことがあるならば、同じようにやればできるでしょう。しかしJAXAでやるのは世界初のことばかりですから、これまでと同じようにやってもできません。できないとあ

BepiColombo プロジェクトチーム
(併任) 科学衛星運用・データ利用ユニット
ワーク・ライフ変革推進室 協力員

小川 美奈 (おがわ みな)

東京都出身。立教大学大学院理学研究科原子物理学専攻(理論物理)博士前期課程修了。1992年、宇宙開発事業団入社。軌道力学を中心に衛星・探査機の地上システム全般を担当。2017年より現職。



きらめてしまわずに、できるようにする、というのが重要です。そのためには、専門や経験や立場が異なるいろいろな人たちが力を合わせ、早め早めに手を打つことも大事になってきます。

制度の改善にも取り組む

——大学院の博士前期課程は、宇宙研で受託院生としてX線天文衛星「ぎんが」の観測データを使った研究を行い、修了後NASDAに。

宇宙に関わる仕事をしたいと思い、就職先としてNASDAを考えたのですが、当時NASDAでは技術系・事務系共に修士以上の女性の採用枠がありませんでした。駄目で元々と問い合わせると、今年から採用枠を設けると言うのです。タイミングと運がよかったな、と思います。

——初めての技術系修士の女性職員ということで、苦労されたことも多かったのでは？

いくつもありますが、衛星・探査機の打上げのときに組織される追跡管制隊に加わるたびに困ったのが子どもの預け先でした。追跡管制隊は24時間体制で日曜祝日にも当番が回ってくるため、事業所内に保育園を設置してほしいと訴えました。実現まで約10年かかったものの、2012年、筑波宇宙センターに「ほしの子保育園」が開設されました。自分の子どもには間に合いませんでしたし、24時間保育は実現できていませんが、困るのは私だけでも女性だけでもないと思って、取り組みました。

——現在もワーク・ライフ変革推進室の協力員をされています。さまざまな制度を整えていくためには、どのようなことが必要だとお考えですか。

困っているらしい、といった伝聞では、制度を変えられませんが、アンケートを取って数字を出したり、客観的な事実を示して交渉することが必要だと思います。そして、制度を変えるには時間がかかります。あきらめないことも必要です。

——ご自身の性格は？

しつこい。それは欠点なのかもしれませんが、しつこいを裏返すと、あきらめないです。それは長所でしょう。

——今後やりたいことは？

まずは2年後の水星到着までに「みお」の地上系システムを完成させ、分離後の運用を成功させることです。その後は、これまで培ってきた地上系システムに関する技術や知見をまとめ、これからのプロジェクトが地上系システムを楽に構築できるようにしたいと思っています。

編集後記

GEOTAILの30年観測、「ひさき」の10年の観測、様々な方がご尽力されたのかと想像します。今後も各プロジェクトが成功し、長期の観測で得られる科学データを多くの人が共有でき、人類の知的財産が増えていく未来に、年初に思いを馳せました。

(三谷 烈史)



ISASニュース No.514 2024年1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