



SLIM / H-IIAロケット47号機の打上げをISAS管制室から遠隔で見守るSLIM運用メンバー。打上げからマスパロマス局での最初のテレメトリ受信までの64分間は探査機の無事を祈るばかり。



XRISM / 太陽電池パドル展開時のXRISM管制室の様子。衛星の状況を確認するため、皆緊張した面持ちでモニターを見ている。写真中央が、衛星運用の司令塔であるSpacecraft Conductor(SC)という役割の人の席です。

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

「半導体でなんとかならないの？」 ～豆粒トランスポンダを目指して～

宇宙機応用工学研究系 助教 宇佐美 尚人(うさみなおと)

緒言：小型軽量「長寿命」への夢

我が国の月惑星探査はハレー彗星探査機「さきがけ」をその名の通りさきがけとし、先日打上げを迎え月へと向かっている小型月着陸機SLIM、そして来年度以降に打上げが予定されている深宇宙探査技術実証機DESTINY⁺、火星衛星探査計画MMXと今日まで連綿と紡がれてきました。時代を下るごとに探査機の技術は進化を続けておりまして、「はやぶさ2」の華々しい成果とそれを支える探査技術は1つの到達点であるといえましょう。一方、年を追うごとに探査機に要求される科学ミッションはより複雑かつ難しくなっておりまして、それに応えるために探査機の重量は増加傾向にあります。38年前の「さきがけ」は推進剤込みで138kgであったのに対し、リュウグウと地球を往復した「はやぶさ2」は600kg、そして火星衛星のフォボスと地球を往復するMMXは4,000kgにまで達しています。

これら大型化をたどる旗艦ミッションに対して、より小型軽量の宇宙機による探査の流れもまた存在しています。例えばSLIMはコンポーネントの小型化と主構造とタンクの一体化(詳しくはSLIM連載[1]をチェック!)によって同時代の月着陸機の10分の1程度の質量(推進剤抜き)で高精度着陸可能な探査機システムを実現しています。ここからさらに

COTS品(Commercial off-the-shelf; 世の中に流通している既製品、車や産業機器向けの電子部品やそれを活用して設計製造されたコンポーネントを指す)を活用するなどしてコストを大幅に削減しつつそのサイズおよび重量を10分の1以下まで小型化したものがOMOTENASHIなどの超小型探査機です。超小型探査機はその10倍以上も大きい既存の探査機と比べても通信や姿勢制御、発電といった基本機能については妥協をせず、同等の機能を有しています(このあたりはEQUILLEUS・OMOTENASHIの連載[2]を読んでいただきたい)。このような超小型探査機の活用は世界的潮流となっておりまして、国内でもNASA SLSロケットで打ち上げられた6Uサイズの探査機であるEQUILLEUSがこのクラスの探査機としては世界で初めて自前の推進装置を使ったダイナミックかつ高精度な軌道操作を実証しています。海外の事例でいえば、探査機本体を衝突させることで小惑星の軌道を変更する実験を行ったNASA DARTが衝突した瞬間を撮影したLUCIA Cubeの活躍が頭から離れない読者の方も多いでしょう(私もその一人です)。宇宙研の将来計画においても、同じくDART探査機の衝突した小惑星を探査するHeraや、彗星探査をおこなうComet Interceptorにおいても超小型探査機を子機として搭載し、母船と連携してよりリスクの高い探査を行うことが計画されています。

以上のように、COTSを活用することによってコストを大幅に低減しつつ究極的に小型・軽量化された超小型探査機の実績は年々積み上がっており、その活躍の場は今この瞬間にも広がり続けています。一方で超小型探査機は最終目的地にたどり着くことなく故障する事例も多く、例えば二台一組で火星に向かったNASAの超小型探査機MarCOについては一台はそのミッションを果たすことなく行方不明となっております。COTSの利用の限界と超小型探査機の信頼性の問題は切っても切り離せないものでありまして、この記事で通信機を題材にとってCOTSの限界とは何ぞやという話と、宇宙研が中心となって取り組んでいる解決法についてご紹介できればと思う次第です。

COTSが生んだ超小型通信機たち

宇宙研ではCOTSを活用した深宇宙通信機に早くから取り組んできました。2014年に「はやぶさ2」と相乗りで打ち上げられた世界初の超小型深宇宙探査機PROCYONは、COTSを利用することで超低コストでの開発を実現した超小型X帯深宇宙通信機を搭載していました[3]。この通信機を含めた通信システムの質量は7kg程度と既存の探査機の数分の1にまで軽量化されており、その後継である2022年打上げのEQUILLEUS(以下EQU)・OMTENASHI(同OMT)用のX帯超小型深宇宙通信機は通信システム全体でなんと700gとさらに10分の1にまで軽量化され、寸法も80mm×80mm×60mmとキューブサットにぴったりな大きさまで小型化されています。EQU・OMTとともにSLSで打ち上げられたほかのキューブサットや火星探査機MarCOについては、極限られた部分ではありますがCOTSを利用したJPL開発の超小型通信機Iris[4]を搭載していました。

本年2023年9月に打ち上げられたSLIMに搭載された表面探査用小型プローブLEV-1にもCOTSを利用した超小型通信機が採用されています[5]。この通信機にはS帯送信、そしてUHF帯の送受信の機能が実装されており、機能がEQU等と大きく

異なるとはいえ、地球-月間の通信を可能とするシステムがなんと質量100g程度と極めて小型軽量に仕上がっています。

さて、これらのCOTS超小型通信機ですが、性能は十分で小型軽量かつ格安と極めて理想的に見えます。ですが、この「先」を考えたときに2つの限界が見えてきます。1つ目の限界はサイズです。COTSの電子部品の組み合わせは宇宙用部品の組み合わせと比べて性能を保ったまま小型軽量に上げることができませんが、あくまで複数の部品を基板の上に実装する必要があります。そのためそれぞれの部品の取り付けとそれらをつなぐ配線のための最低限の面積が常に必要であり、LEV-1通信機よりも小さくすることは困難でしょう。もう1つの限界は信頼性です。通常、宇宙用部品であれば動作寿命や放射線耐性を厳格に管理しており、それを組み合わせて作製されたコンポーネントはミッション期間中しっかり動作することが保証されます。一方COTS部品は宇宙用部品と比べてこう言った管理は厳格ではなく、したがってCOTS部品を利用したコンポーネントもまたミッション期間分の動作を正確には保証できません。COTS品の信頼性は日ごとに高まっているため完全に信用できないというわけではなく、一定の信用を得ているからこそ超小型通信機の需要が絶えないのですが、それでもなお長期のミッションで超小型通信機を採用するには慎重な検討が必要です。これはJPLの通信機Irisのように宇宙用部品との併用や部品単位での追加の検査・評価などで解決することもできますが、コスト面に対するCOTS利用の恩恵は消えコストは跳ね上がってしまいます。

ところで、1つのコンポーネントの信頼性が要求を満たさない場合、二台以上のコンポーネントで冗長系を組むことでシステムとしての信頼性を上げる方法があります。では超小型通信機を使って冗長系を組めばいいかというと、COTSコンポーネントを利用する動機を持つミッションは容積や質量のリソースが常に制限されており、超小型通信機でさえも超小型探査機や超小型ローバにとっては冗長系を組むほどには小型足りていません。そのうえで先ほど言及した通り、



図1：LEV-1に搭載された通信機。

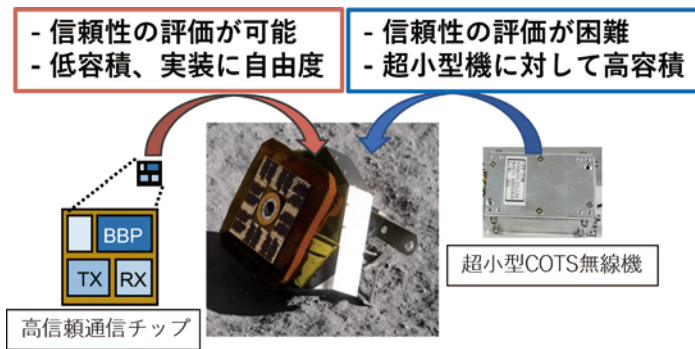


図2: ワンチップ無線機の夢。

COTS部品の組み合わせによる小型化には限界が来ています。コストの問題で宇宙用部品は使いたくても使えません。さて、それではどうすればよいのでしょうか？これ以上低コスト・小型・軽量でありつつも高信頼な通信機は実現できないのでしょうか？

ワンチップ無線機

もったいぶりましたが、究極の小型化を達成しつつも高信頼性を両立させる手段はあります。それは「ワンチップ化」、すなわち1つの半導体チップ上に通信機の機能のほとんどを詰め込み、そのチップを高信頼に作りこむという方法です。「ワンチップ化」してしまえば部品の組み合わせによるサイズの限界は消えますし、信頼性についても複数のCOTS部品の信頼性を保証することに比べれば1から設計した1つの部品の長期信頼性を保証することは十分実現可能です。チップサイズまで通信機が小型化すれば、冗長系が組み放題であることはもちろん、配置の自由度も増しますのでOBCなどのほかのコンポーネントに間借りすることも、アンテナの近くに配置することで配線を最低限にし、質量や損失を削減することもできます。さらに1つのチップであればそのコストも1つの部品程度でしかありません。

夢のような話ですが、ワンチップ化は決して奇抜な発想ではありません。地上における通信分野においては半ば常識となっておりまして、例えばWi-Fi程度であれば1つのチップの中にRF信号の送受信の機能を詰め込んだものが市販されています。RFフロントエンドのみをワンチップにまとめた、ものは広くソフトウェア無線機に採用されていますし、最近ではRF-SoCといって、自分で通信機の機能を自由に定義できるワンチップ無線機も出てきています。5Gの盛り上がりとともに、ワンチップ無線機に必要な技術は地上通信分野で着々と広まりを見せています。従来の宇宙機向け通信機の枠組み・しがらみにとらわれず、こういった地上における通信技術の高度化の恩恵を宇宙分野に積極的に取り入れることでワンチップ無線機は現実的に開発可能であると確信しています。

それではワンチップ無線機の実現にあたっては技術課題などなく、ただ地上の通信チップをまねるだけで簡単にできてしまうのでしょうか？ここで立ちふさがるのが信号を受信する際の雑音の壁です。地上から探査機へ向けて送られた電波は、その道のり分の距離の二乗に反比例して小さくなっていきます。結果として探査機が受け取る地上からの電波は皆さ

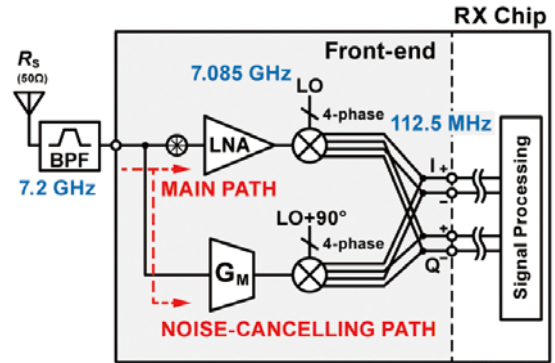


図3: ノイズキャンセリングレシーバの回路図。

んがお使いのbluetoothの1億倍小さいものとなります。このような小さい電波を正確にデータとして解釈するためには、受信機は受けた信号に雑音を極力乗せずに増幅・復調することが求められます。通常の深宇宙向け超小型通信機では高性能なGaAs等のトランジスタを用いた低雑音増幅器を採用することでこの要求を満たしていますが、ワンチップ無線機ではそうはいきません。さらにチップ上ではインダクタなどの受動素子の性能が単体部品に比べて低く、低雑音増幅器の性能がさらに劣化する要因となっています。

そこで我々宇宙研と東京大学のワンチップ無線機開発チームは地上向け先端無線技術であるところのノイズキャンセリング機能を採用することで、この限界を打破しようと試みています[6]。図3はノイズキャンセリングレシーバの概念図といえるものです。2つの回路で初段の増幅器で発生する雑音を逆位相で拾い、その後合成して打ち消すことで信号に雑音を乗せずに取り扱うことができます。これだけ聞くと簡単そうに聞こえてしましますが、実現するためには各回路の電気的特性に厳しい要求が課せられます。現在ワンチップ無線機開発チームはこの厳しい要求を乗り越えるべく研究開発を進めております。いつの日か実際の探査機にこのワンチップ無線機を乗せたという報告を皆様にお届けできるよう励んでまいります。ご期待ください。

引用：

- [1] SLIM連載 <https://www.isas.jaxa.jp/feature/slim/>
- [2] EQUULEUS, OMOTENASHI連載 <https://www.isas.jaxa.jp/feature/eq-om/>
- [3] Y. Kobayashi et al., "Low-cost and ultimately-downsized X-band deep-space telecommunication system for PROCYON mission," in 2016 IEEE Aerospace Conference, 2016
- [4] M. M. Kobayashi et al., "The Iris Deep-Space Transponder for the SLS EM-1 Secondary Payloads," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 34, no. 9, pp. 34–44, 2019
- [5] T. Yoshimitsu et al., "SMALL HOPPING ROBOT FOR LUNAR EXPLORATION", in 74th IAC, 2023
- [6] S. Kano, N. Usami, A. Tomiki and T. Izuka, "Preliminary Design of X-band Noise-cancelling Receiver Front-end with Radiation-hardened 130nm SiGe BiCMOS Process for Deep Space Probes", in 34th ISTS, 2023
- [7] W. Kuhn et al., "A Microtransceiver for UHF Proximity Links Including Mars Surface-to-Orbit Applications," Proc. IEEE, vol. 95, no. 10, pp. 2019–2044, 2007.

※ 宇宙用のワンチップ無線機は今まで検討されてきたことがなかったのでしょうか？実は一例のみ、RFフロントエンドおよびベースバンドを分けて二種類のチップを開発し、火星ローバ・火星オービタ間の通信で求められる通信機能の実装までこぎつけた例が米国に存在します[7]。ですがチップサイズの無線機を必要としていた小型のローバによる協調探査のプロジェクトも立ち消えとなり、その後打ち上げられ続けたJPLのローバ連はどれも巨大でワンチップ化された超小型通信機を必要としていなかったのです。結果採用するローバはなく、このチップサイズの無線機プロジェクトも立ち消えとなりました。このような事態に陥らないようにする一つの解法はデュアルユース、すなわち探査用だけでなく地球周回向けや地上で使えるよう、ソフトウェア無線技術を採用することでワンチップ無線機に汎用性をもたせることにあります。

X線分光撮像衛星XRISM、遂に宇宙へ！～打上げ成功～

2023年9月7日8時42分11秒(日本標準時)、XRISM(くりずむ)がH-IIAロケット47号機により種子島宇宙センターから打ち上げられました。天候不良による延期が続き、緊張状態を維持しながら、射場側も運用側も延期に係る作業に追われ、肉体的にも精神的にも非常に辛い期間が続いた末の、待望の打上げとなりました。打上げ当日は、SRB-A(固体ロケットブースター)の分離も確認できるほどのきれいな青空が広がり、それまでの疲れなどを吹き飛ばしてくれる素晴らしい打上げとなりました。

さて今回は、打上げ時の管制室の様子、打上げライブ番組の裏側、そして現在の運用状況について紹介していきます。

まずは、打上げ時の管制室の様子と現在の運用状況です。

当日は、打上げシーケンスが進むにつれ緊張感も高まっていく中、打上げ後の運用を担当するメンバーは、相模原キャンパスのXRISM管制室で打上げを見守っていました。運用は衛星分離後からが本番ということもあり、衛星分離時は特に歓声が上がることも無く、皆静かに臨戦態勢に入りました。いざ運用が始まると、打上げ直後は衛星の生死に関わる運用イベントが続くため大忙しでしたが、それらを1つ1つクリアしていくと徐々に緊張が和らぎ、太陽電池パドルの展開等重要イベントをクリアした際は、緊張で張り詰めた雰囲気から一転して管制室内では拍手が沸き起こりました。これまで数多くの運用訓練やリハーサルを繰り返してきたこともあり、落ち着いて運用に臨めたのではないかと思います。

続いて、打上げライブ番組の裏側について紹介します。

種子島の射場や相模原の管制室で打上げに向けた最終準備中、相模原キャンパスの宇宙科学探査交流棟では、打上げライブ番組の準備が着々と進んでいました。スタジオ設営は打上げ前日の9月6日午後スタート。機材がセットできたところで、種子島からの映像と音声伝送テストを行い、翌日に備えました。

そして、9月7日の朝。いよいよ本番を迎えました。番組開始前の緊張した雰囲気が嘘のように、司会の鳥海森さんの絶妙のリードで、番組が進んでいきました。打上げ10分前からは種子島の映像・音声を配信し、出演者も裏方も打上げの様子を見守りました。打上げからペイロードの分離までの時間を使い、XRISMとSLIMについてももしっかりアピール。ライブ視聴では、接続数のピークは打上げの前後でしたが、番組終了時の接続数は約15,000もありました。YouTubeライブで配信された番組は、日本語版は急上昇ランク#3を記録。平日の通勤・通学もしくは始業する時間帯にもかかわらず、多くの方々に番組を視聴していただきました。

現在は「初期機能確認運用」を実施しています。初期機能確認運用とは、衛星全体及びミッション機器等の搭載機器の機能確認を実施する期間で、約3ヶ月続きます。搭載機器や各機能を動作させてデータを取得・評価し、それらが正常であることを1つ1つ確認します。打上げ直後の運用と比較するとあまり目立たない地道な作業ですが、今後のXRISMの活躍には必須の非常に重要な作業ですので、慎重かつ着実に作業を進めているところです。打上げ直後のクリティカル運用期間が終了した頃からは、種子島で射場作業を担当していたメンバーも相模原に戻り始め、現在はメンバー全員で運用に全集中しています。

最後に、XRISMの開発には多くの人の力が注がれました。プ



分離の様子。XRISMが遂に宇宙へ旅立ちました。



打上げライブ番組の裏側。スタジオ設営も万全の状態で配信に臨みました。



ミッション機器の機能確認も順調に進んでいます。

プロジェクトの遂行及びロケットの打上げにあたり、JAXAのみならず、メーカー、大学関係者、海外機関等の方々に多大な協力を頂きましたこと、ここに深く感謝いたします。そして、今後も多くの方々に支えられながら、素晴らしい科学成果が得られることを期待してやみません。これからも応援よろしく願います。

(XRISMプロジェクトチーム 堀内 貴史 生田 ちさと)

種子島回想録

2023年9月7日、日本時間8時42分11秒。X線分光撮像衛星(XRISM)及び小型月着陸実証機(SLIM)を載せたH-IIAロケット47号機が、秋の気配を見せ始めた種子島の朝の空へ轟音とともに昇っていきます。種子島宇宙センターの衛星組立室の分厚い壁越しでも伝わってくる、空気の振動。一瞬のうちに地球から遠く離れていくロケットをモニター越しに眺めながら私は、SLIMの長い長い射場作業を思い出していました。

SLIMが種子島宇宙センターに搬入されたのは、打上げから7ヶ月以上をさかのぼる2023年1月。寒い冬の日のことでした。南の島とはいえ種子島の1月はとても寒く、夜はマフラーやフリースが欠かせないほどでした。搬入の数日前には10年に1度と言われる大寒波が日本を襲い、種子島でもみぞれが降ったそうです。いよいよ打上げに向けた準備が始まるのかと、寒さと緊張で身震いしたものです。このとき、SLIMは5月に打上げ予定でした。

島に一足早く春の気配が訪れた3月。搬入後の電気試験を順調に終え、SLIMは燃料・酸化剤の充填準備を進めている頃でした。射場作業は予想外の事態によってストップすることになります。H3ロケット初号機の打上げ失敗です。SLIMが搭載されるH-IIAロケットも技術的な影響評価を行った上で次の打上げに臨むこととなったため、5月の打上げは絶望的になりました。SLIMの射場メンバーは一旦種子島を離れて宇宙研に戻り、あらためて次のウィンドウでの打上げと運用に向けて準備を進めることにしました。

2023年初夏。記録的な暑さが全国各地で猛威をふるい始めた頃、SLIMが搭載されるH-IIAロケットの打上げが8月に再設定されました。

貸与される作業服も夏服になり、射場作業を開始した1月の寒さを思い出しては季節の移ろいを感じたものです。ご存知の通り、今年の日本の夏は統計開始以降最も暑い夏とされています。関東でも連日のように猛暑日が観測されましたが、南の島である種子島は意外にもめったに猛暑日にはなりません。気温は高くても33度程度だったかと思います。夏に種子島空港でタラップを降りると関東に比べて空気や風が涼しく感じられ、なんとも奇妙な感覚に陥ったものでした。さて射場作業再開後、燃料・酸化剤充填、システム最終点検を終えたSLIMはH-IIAロケットの下部フェアリングに搭載されます。ロケットフェアリングのマンドア越しに内部を覗き込むと、暗がりの中にSLIMがしっかりとそこにいるのが見えました。ミッションの成否にかかわらず、探査機本体を肉眼で見られるのはこれが最後です。しっかり月に降りていよ、と念を込めます。

様々な困難を乗り越えてなんとかロケットフェアリングまでたどり

着いたSLIMでしたが、ここでもさらなる試練が襲いかかります。天気です。このとき日本周辺にはいつにも増して多くの台風が発生し、文字通り四方八方から迫ってきている状態でした。射場では連日のように雷や大雨、強風が発生していました。二度の延期を経て設定された8月28日の打上げは上空の風が強く条件を満たさなかったため直前に中止となりました(写真1)。再度天候判断となったその後も台風や熱帯低気圧が迫っており、いつ打ち上げられるかは全く見通せない状況となってしまいました。さらに試練は続きます。宿泊する宿がないのです。種子島は現在、慢性的に宿泊場所が不足しています。8月までも宿泊場所の調整には骨を折りましたが、さらに9月以降ともなると宿自体を全員分は確保できていません。したがって打上げの延期が決定した後は、南種子島中の宿泊施設に電話をかけ、客室の空き状況を都度確認し、毎日転々と宿を移動していくような生活を余儀なくされました。おかげさまで種子島(南種子限定)の宿事情にはだいぶ詳しくなったように思います。

複数回に渡る延期や中止を経て、とうとうH-IIAロケット47号機の打上げは、台風の合間を縫って9月7日に再設定されました。日程の前にも後ろにも台風が控えており、このタイミングを逃すといよいよウィンドウ内の打上げができなくなるのではないかと。あの日チーム全体が、一種の焦燥感に駆られていたように思います。そして夕方から開始された探査機打上げ準備を経て迎えた当日。種子島の空は雲もなく、とても穏やかな朝でした。風も問題ありません。打上げ前のすべての探査機の設定及びチェックを終えた我々「探査機準備完了」のコールをし、運用を相模原へと引き継いだのです。

SLIMは初期運用・地球周回運用・地球出発運用を終えて月へ向かう軌道に乗りました。各機器のチェックアウト(動作確認)も進んでいます。9月22日には航法カメラで地球を撮像し、10月4日の月スイングバイの直前には月の撮像も実施しています(写真2)。航法カメラは月面動力降下時に使用しますが、その撮像機能に異常はありません。宇宙で狙った写真一枚撮るにも入念な準備が必要です。姿勢は思った方向に向いているか?その姿勢で太陽電池はどれほど発電するか?カメラ起動・撮像のシーケンスは正常に動くか?データは抜けなく下ろしきれるか?などなど……。初期チェックアウトの1枚目の画像に10万キロ彼方にある地球が写っているのを確認したときは胸をなでおろしたものです(写真3)。長きに渡る射場作業を経て打ち上げられたSLIMの旅はまだ始まったばかり。世界中で月着陸ラッシュの今、SLIMもまた新しい景色を皆さんに見せてくれることでしょう。

(SLIMプロジェクトチーム 石田 貴行)



写真1：遥か月を望むH-IIAロケット47号機。SLIMが目指す38万キロ彼方の星は近そうで遠い(写真は中止となった8月28日打上げの機体移動時のもの)。



写真2：月スイングバイ時に航法カメラで撮影された月。



写真3：航法カメラで撮像された地球と月。

2023年度国内気球実験

例年5月中旬から9月初め頃まで大樹航空宇宙実験場にて国内気球実験を実施していますが、今年は5月中旬までオーストラリア気球実験を実施したため、開始時期を遅らせる必要がありました。その一方で、国内気球実験に適した季節風を期待できる時期は夏季に限られるため、時間的猶予はさほどありません。そこで、帰国後すぐに相模原キャンパスでの準備を進め、6月後半から大樹での最終準備も急ぎ整えることで、実験チャンスを待ち構える期間を最大化しました。今夏も酷暑や台風の連続発生などの異常気象が散見され、高層風が実験に適した日は限定的でしたが、早々に準備を整えたことで機会を逃がさず以下のように実験を実施することができました。

まず、7月8日と同9日に「新型大気圏突入カプセルの飛行試験」を目的とするBS23-07(略称RERA-2)とBS23-09(RERA-3)を実施し、昨年に続いて新型カプセルの空力データを取得しました。同26日にはB23-05実験「火星探査用飛行機の高高度試験(MABE2)」を行い、火星大気と同程度の低い気圧環境下で機体の空力データを取得しました。続く同27日はB23-06実験「GRAMS液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験」を実施し、世界初となる同検出器の飛行中の動作データを取得しました。また、B23-05やB23-06にはビギンバック実験として「分散配置9軸姿勢ロガー群による飛行中の気球各部の挙動測定実験」、「形状可変構造実証に向けた基礎実験(MEDUSA)」、「レーザ周波数比較による一般相対論



放球直前の大気球B23-05号機。

の高精度検証に向けた基礎実験」も搭載し、それぞれデータを取得しました。もう1つ、「火星飛行機用プロペラ推進器の高高度試験(HIGHPER)」も計画していましたが、実験機器に不具合が生じ、今期の実施を見送りました。異常気象の難しい条件下でも実験機会を確保し科学成果を最大化する方策として、実験要件の緩和や複数実験の相乗りを昨年から推進しており、今回もその効果を上記の4フライト・7実験の実施によって確認することができました。

また、今年は限られたチャンスを逃さぬよう、2日連続での実験実施となりました。連日の実施は、1つめの実験が完全に完了する前に2つめの実験の準備を並行して実施する必要があるなど、人員体制や作業手順を工夫する必要がありましたが、関係者・関係機関のご協力を頂くことで実現できました。

同じく近年の気球実験で注力している人材育成に関しても、今回は研修生の公募対象を全JAXAに拡大するなど裾野を広げ、JAXA内外から参加した計28名の研修生・若手研究者・大学院生などに実験現場を経験して頂きました。

今後もこのような取り組みを発展させていく所存です。実験実施にご協力頂きました関係者の皆様に深く感謝します。(福家 英之)

第6回NAOJシンポジウム「Hinode-16/IRIS-13」開催

第16回目となる「ひので」国際科学会議が、NASAの太陽観測衛星IRISと合同で、2023年9月25日から29日の日程で開催されました。今回は、国立天文台NAOJシンポジウムに採択されたことから「第6回NAOJシンポジウム」のタイトルを冠し、また、新潟大学の協力を仰ぎ、新潟市の朱鷺メッセを会場に開催されました。これまで「ひので」国際科学会議は日米欧の持ち回りで開催されてきましたが、完全オンラインとなった米国主催の第14回(2021年10月)、プラハで開催された第15回(2022年9月)に続いて、コロナ禍後、初となる日本での開催となりました。そのためか、科学組織委員会(各国研究者が主体)や現地組織委員会(国立天文台および新潟大学が主体)の予想を2倍以上上回る多数の講演申し込みがあり、最終的には、招待講演21件のほか、



現地組織委員会は、太陽や朱鷺に因んだ赤い法被を着用して会議に臨みました。

口頭一般講演31件、ポスター156件、現地参加者約200人という盛況となりました。

会議プログラムの策定にあたっては、「ひので」・IRIS両ミッションの科学成果の報告をベースにしつつ、本科学会議で初となる試みとして、開催期間の約3分の1を、次期太陽観測衛星SOLAR-C(「ひので」後継機:2028年度打上げ目標)やMUSE(IRIS後継機:2027年打上げ目標)を中心とした次世代太陽研究の議論に割り当てました。また、若手研究者や学生により多くの講演機会が与えられるよう配慮し、ポスター発表やコーヒープレイクの時間を長めに取ることで、パンデミックで失われた対面議論の機会を取り戻せるよう努めました。

高解像度の太陽観測を得意とする「ひので」・IRISやSOLAR-C・MUSEに加え、太陽に接近して観測を行うSolar Orbiterや、2022年に中国から打ち上げられたASO-S、9月2日にインドから打ち上げられたばかりのAditya-L1などによる多彩な科学成果の紹介や観測計画の議論がありました。その範囲は、太陽の大気加熱・太陽風加速やフレア爆発・コロナ質量放出に始まり、惑星間空間磁場・太陽圏プラズマの物理学や、さらには地球大気への太陽紫外線影響にまで及びました。

科学組織委員会と現地組織委員会は、これまで1年間に渡って準備を重ねてきましたが、会期中に参加者から多くのポジティブなコメントを得たことで、その努力が報われた思いでした。

(鳥海 森)

SLIM the MON sniper

降りられるところから、降りたいところへ

挑戦的なSLIM電源系！

2023年9月7日8時42分11秒、遂にSLIMは打ち上げられました。打上げから1週間が経過し、探査機の状態が正常であることを確認し—安心したところで、本原稿を執筆しています。

電源系は、名前の通り探査機の各機器に電力を供給する役目を担い、電源系の不具合は探査機の喪失に直結します。そのため、他のサブシステムに比べると新規技術を採用するハードルが高いことが一般的ですが、SLIMはミッション目的の1つである「軽量の探査機システム」を実現するため、電源系コンポーネントの小型・軽量化に励んだ結果、新規技術を積極的に採用した挑戦的な電源系になっています。ここでは、新規技術を盛り込んだ太陽電池パネル、バッテリー、統合化電力制御器の3つの電源系コンポーネントについて紹介します。

まずは日照中に太陽光を受けて発電する太陽電池パネルです。SLIMではシャープ株式会社が開発した軽量・高効率な薄膜3接合太陽電池シートを採用しています。薄膜3接合太陽電池シートは、13 μm と極めて薄く柔軟な太陽電池を透明な樹脂フィルムで挟んでラミネートしたものです。従来の太陽電池は10倍以上も厚く固くて脆いため、10mm程度の厚く丈夫なパネルに接着剤で貼り付けて破損を防ぐ必要がありました。しかし柔軟な薄膜太陽電池シートは薄いパネルや曲面にも貼り付けられ、しかもベルクロで簡単に固定できます。この特徴を生かして、燃料タンクを主構造としたSLIMでは、タンク周りの曲面CFRPパネル上にも太陽電池シートを設置することで支持構造物を最小限とし小型軽量化を実現しています。そもそも薄膜3接合太陽電池シートは最新の技術でフライト実績が少ないこともありますが、SLIMが飛翔する環境は通常の地球周回衛星とは異なるため、機能・性能に問題がないか、熱試験を中心に念入りにチェックした上で搭載しました。

次は、日陰時や太陽電池からの電力供給だけでは足りない時に機器に電気を供給するバッテリーです。SLIMでは、宇宙科学研究所と古河電池株式会社が共同開発したSUS(ステンレス)ラミネート型リチウムイオン二次電池セルを採用しています。従来の宇宙用電池は金属缶タイプですが、SUSラミネート型二次電池セルは、名前の通りSUS材を用いたラミネート型の電池です。ラミネート電池の採用により電池の外装の重量を削減できたことに加え、組電池にするための機構重量の削減も実現しています。SLIMではSUSラミネート型二次電池セル2つをCFRPの板で挟んで拘束し、小型・軽量を維持しながら打上げ時の振動・衝撃や真空下での充放電に耐えられるようにしています。SUSラミネート型二次電池セルの宇宙機搭載は世界初であるため、宇宙環境耐性を確保した拘束条件の確立に苦労しましたが、関係メーカーとひとつになって機械環境試験を繰り返し行って最

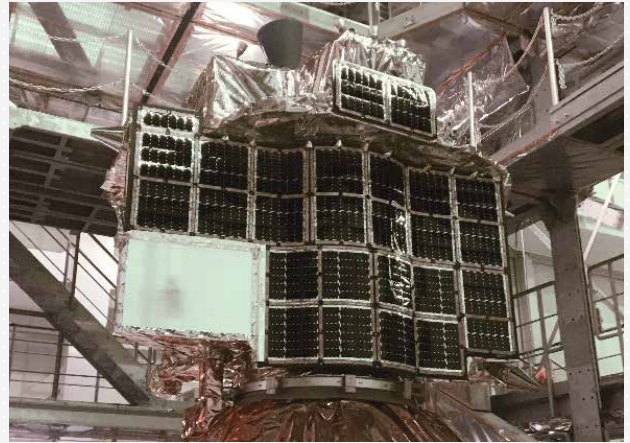


図1：SLIM外観（前面に太陽電池パネルあり）。



図2：SUSラミネート型二次電池セルが組み込まれた電池モジュール（SLIMには4台搭載）。

終的に困難を乗り越えたことが良い思い出です。

電源系のもう1つのコンポーネントが統合化電力制御器PCUです。従来は電力制御（太陽電池発生電力制御、バッテリー充放電制御、電力分配）、ヒーター制御、スラスタバルブ制御はそれぞれ別のコンポーネントで構成されていましたが、SLIMではこれらを1つのコンポーネントに集約しました。また、従来はアナログ回路で構成されていた制御をソフトウェア化しデジタル制御にしています。コンポーネント数の削減により筐体の重量が削減できたこと、デジタル化により部品数を削減したことで、大幅な小型軽量化を実現しました。また、電力制御系としては、太陽電池の出力電力制御であるPPT（最大電力点追尾）制御とバッテリーの充電制御をAPR（アレイパワーレギュレーター）で兼ねていることも特徴です。

ご紹介した電源系コンポーネントはどれも前例のない新規技術であるため、開発の過程には数々の困難がありました。トラブルが発生する度に部品の開発メーカーであるシャープや古河電池、システムメーカーの三菱電機とJAXAが一体となってトラブルの解決にあたり、無事に打上げを迎えることができました。月着陸、その後のミッション機器による観測まで油断できない日々が続きますが、最後まで搭載機器に電力を供給し続けられるよう、着実に運用していきたいと思います。

電源系担当：宮澤 優（みやざわ ゆう）



京都大学理学研究科 教授

松岡 彩子 (まつおか あやこ)

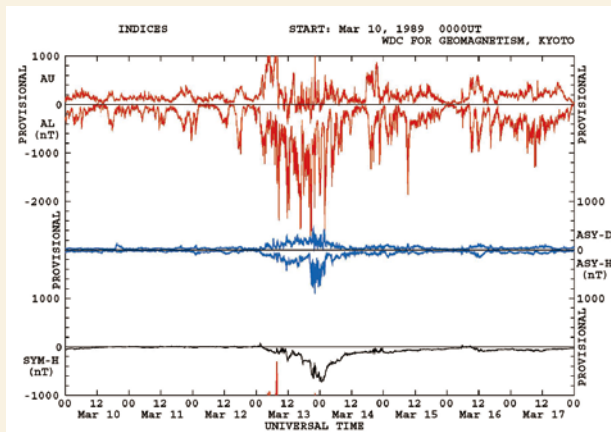
今日、磁気圏は荒れていますか？

26年間に在職した宇宙科学研究所を3年前に退職し、京都大学に籍を移した。新しい所属は、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターという、JAXAにいた時に負けない長い名称を持つ。普段は縮めて地磁気センターと称しているが、京大では「地磁気さん」と呼ばれることも多い。

移籍後も変わらず、BeiColombo、「あらせ」、JULICE、MMX、Comet Interceptor等、宇宙研のプロジェクトに参加しつつ地球や惑星の周辺の宇宙空間の研究を行っているが、大学での本務は、学生の教育とこの地磁気センターの運営である。本稿では、宇宙空間や惑星科学とも関係の深い、地磁気センターの活動を紹介します。

京都大学の地磁気センターは、国際的なデータセンターであるWorld Data Center for Geomagnetismの1つとして、世界各地の磁場観測点で取得された磁場データを収集、世界に提供するとともに、全世界的な磁場観測網のデータを収集・配布する国際事業であるINTERMAGNETに転送している。また、収集した磁場データを使って「地磁気指数」を計算し、同じく世界に提供している。

地磁気指数とは、地球の磁気圏を流れる大規模な電流の強さを反映した量で、地球磁気圏がどの程度「荒れて」いるかを表す指標である。地磁気指数にはいろいろな種類があり、用いる地磁気データの観測点の位置や計算方法の違いにより、意味するものや使い道が異なる。当センターではDst、AE、ASY/SYMの3種類の地磁気指数を作成し、Dst指数とAE指数は準リアルタイムで公開している。Dst指数は主には、地球の周辺の赤道領域を巡る環電流の強度の指標として使われる。環電流は2016年に打ち上げられたジオスペース探査衛星「あらせ」が観測している領域に重なり、Dst指数は「あらせ」のデータ解析にもよく用いられる。AE指数は極域のオーロラ活動に伴って発達する、オーロラジェット電流の強度の指標である。ASY/SYM指数は中緯度域の磁場観測データから計算される。図は、磁気圏観測衛星「あけぼの」の打上げ(1989年2月22日)から間もない3月13日に起きた、大規模な磁気嵐の時のAE指数とASY/SYM指数のプロットである。上から2番目の赤い線が繰り返しスパイク状に下に変化しているのは、オーロラサブストーム現



「あけぼの」衛星の打上げから間もない1989年3月に起きた大規模な磁気嵐の時のAE指数とASY/SYM指数のプロット。上から2番目の赤い線が、オーロラサブストーム現象に伴い繰り返し下に大きく変化している。

象によるものである。「あけぼの」にとっては千載一遇の観測チャンスであったのだが、当時は打ち上げられたばかりの「あけぼの」の観測機器がダメージを受けるリスクを考え、高電圧を使う機器の観測を見送った。「あけぼの」プロジェクトで後まで語り継がれる幻のイベントとなった。

Dst指数とAE指数は1957年から、後発のASY/SYM指数は1981年からデータがあり、長年地球磁気圏の研究の発展を支えてきた。これらの指数を考案し、また作り続けた諸先輩方の知恵と努力に改めて敬意を示すとともに、継承していくことの重要性和責務を感じている。

このような多点観測による宇宙空間の状況の把握という確立された手法に学び、我々はこの先どのような展開を目指していくべきであろうか。実現性を度外視して将来像を描いてみる。1つは、地球磁気圏の全体像のスナップショットである。衛星による観測の蓄積により磁気圏の平均像の理解は格段に深まった。近年では欧米を中心に、Cluster、Themis、MMS等、複数衛星の編隊観測による3次元的な磁気圏研究が盛んに行われている。後発のミッションほど衛星間距離を縮め、大小スケールの物理の関係(スケール間結合)の解明を目指した研究が進んだ。一方で磁気圏全体のスナップショットを観測により捉えることは出来ていない。遠い将来には、磁気圏を横断するスケールで宇宙空間の多点観測を行い、シミュレーションと組み合わせて磁気圏の瞬時的な全体像を描く試みがあっても良いと考える。

もう1つは、地球以外の天体への磁気指数の展開である。月や火星は、地球のような惑星規模の磁場を持たず局所的に磁化していることが、日本の月周回衛星「かぐや」や米国の火星探査機によって明らかになった。周辺の宇宙空間を流れる電流は地球の磁気圏とはかなり様相が異なるが、磁場の観測によって環境の電磁的な「荒れ具合」が把握できることは同じである。将来の地球の周りや月・火星の表面に、磁力計と環境計測機器を載せた「百葉箱」が多数展開する景色を想像すると楽しい。

編集後記

暑かった夏もようやく終わり、朝晩は肌寒いぐらいになってきました。昨年からハイブリッド開催となった宇宙研特別公開は11/3(現地開催)・4(オンライン)に開催されます。ISASニュースともども、見えたたっぷりでお届け予定ですので、是非ご参加ください。(坂東 信尚)
※特別公開の現地開催は事前予約制ですのでご注意ください。



ISASニュース No.511 2023年10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/>