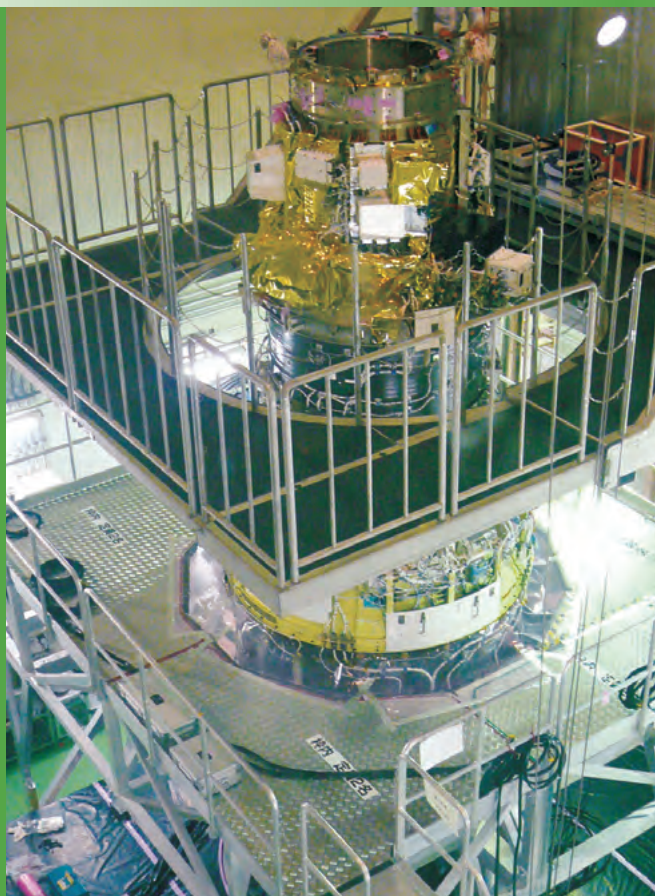




組立て中のイプシロンロケット(左)と、公開された惑星分光観測衛星(右)。

宇宙科学最前線

ソーラーセイルによる 深宇宙航行技術の実現

宇宙飛翔工学研究系 助教
津田雄一

2010年5月に打ち上がった小型ソーラー電力セイル実証機「イカロス (IKAROS)」は、すべての技術目標を完遂し、現在も太陽系空間を航行中です。2013年6月現在の総飛行距離は約30億km。3年間の飛行で、太陽光圧による加速は秒速400mに達しました。

本稿では、私の専門であるアストロダイナミクスの視点から、ソーラーセイル技術の研究・開発・運用の成果を振り返りたいと思います。

研究：遠心力展開技術の実現

私の専門からすると、ソーラーセイルを宇宙で航行させたい。しかしその実現のためには、ソーラーセイルをいかにつくり、いかに展開させるか、から考えなければなりません。そこには、

材料・構造・動力学の奥深い世界が待っていたのです。

ソーラーセイルの展開方式については、私たちは当初から、膜面全体が回転することによる遠心力だけで展開する方式に着目して研究を開始しました。世界のソーラーセイル研究の多くは、伸展式の帆桁に膜面を取り付ける方式を採用しています。それに対し遠心力展開方式は、展開機構が軽量で、セイルサイズの設計の自由度が高いなどのメリットがありました。また、世界とは違う方式を選ぶことで、研究に独創性と存在感を持たせるという戦略眼が働いた結果でもあります。

私たちのソーラーセイル研究では、特に展開挙動の把握と制御に重点を置きました。セイルは、非常に薄くて大面積でなければなりません。自然、

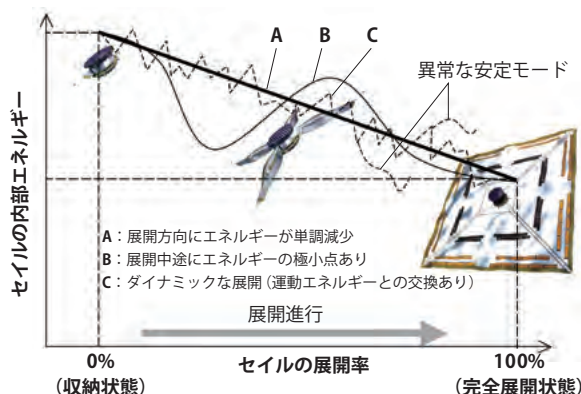


図1 遠心力展開のエネルギー遷移模式図

挙動の把握が難しいしわや折り目を扱うことは避けて通れません。図1は、遠心力展開における、セイルの折り目やしわに蓄えられたひずみエネルギー（ここでは、内部エネルギーと呼ぶ）の履歴を模式的に表したものです。理想的な展開とは、遠心力が働くことで内部エネルギーが単調に減る（図1A）ことです。そうすれば必ず、エネルギー最小の完全展開に至ることができます。しかし、現実はその単純ではありません。途中で極小点がある折り方（図1B）や、激しい展開挙動のために運動エネルギーと内部エネルギー交換が大きく異常モードに陥る状況（図1C）は、容易に起こり得るのです。どうすればAのような理想的な展開が実現できるか？それが、私たちが答えるべき究極の問いでした。

非常に薄い膜面は、空気中ではちょっとした気流でひらひらと揺らぎ、重力下ではすぐにだらりと垂れ下がります。実験の敵は、空気と重力。この2つの影響を消し、セイル展開を検証するために、最初の5年間、あらゆる実験を行いました。真空槽内でセイルを回転させながら落下させたり、大気球を使い高高度で展開実験をしたり、回転する密閉容器内でセイルを展開させたり……。一つの集大成として、2004年にはS-310観測ロケット34号機で、宇宙空間での10m級セイルの遠心力展開を成功させました。2007年には、大気球で20m級セイルの展開も成功させています。

これらの実験の結果を反映することで数値シミュレーション技術を向上させ、その上で、実験不可能な大きさのセイルを、計算のみに頼って設計できる環境をつくり上げました。

イカロスで採用されたセイルの折り畳み方は、当初は「津田折り」と呼ばれましたが、その後メンバーのいろいろなアイデアが加味されて、「正方形膜」と呼ばれるようになりました。折り目がすべて直線で構成されるため製造性が良く、遠心力展開方式と相性が良いなどの利点がある折り方ですが、私たちが特に気に入っているのは、この折り方にはまったく切れ目が要らないことです。日本の折り紙文化の美しいところは、まったくは

さみを使わずに、さまざまな造形ができることだと思っています。だからこの折り方は、日本が発信するソーラーセイル技術にふさわしいではないか！そんな日本人としての美意識も、このセイルに込められた私たちのこだわりなのです。

イカロスプロジェクト発足後、この正方形膜も含め数多くの折り方が候補に挙がり、所内外の構造・材料のエキスパートの先生方と共に「セイル構造部会」と「セイル材料部会」という2つの研究会を発足させて、微に入り細にわたる評価を行いました。候補の中には、正方形膜をはるかにしのぐ驚くべき数学的美しさを持ったものもありました。一つのセイル方式を決めるために、百を超える評価基準に照らして、議論を尽くしました。この検討会に加わった先生方との毎週のように続いた夜通しの議論は、忘れられない思い出(悪夢!?)です。

開発：システムとしてのイカロスの実現

イカロスを、実際に宇宙を飛ぶ探査機システムとして成立させるには、セイル展開技術以外に数多くの課題を克服する必要がありました。少人数のチームでイカロスを実現できたのは、開発メンバー同士の意思疎通が極めて良く、かつ皆が進んで自分の守備範囲・専門分野を超えた貢献をしたことと、献身的なサブシステムのスタッフ、Hard Workingなメーカーの方々との強い信頼関係に基づく良いチームワークがつくれたからこそです。

航行システムとしてのスピン型ソーラーセイルの最大の課題は、大面積膜が回転することによる角運動量をいかに自在に管理し、制御するかでした。そのためには、①展開後のセイルに生じるしわとそれによる太陽光圧擾乱を予想し管理する、②柔軟かつ大角運動量のセイルを省燃料かつ安定的に制御する、という2点を実現する必要がありました。②を解決するために行った数多くの技術的工夫は、『ISASニュース』2011年1月号(No.358)の記事に詳しいので参照ください。

他方で、①の課題は難しいものでした。柔軟なセイルに展開後どのようなしわができるかを前もって予想するのは、事実上不可能です。しかし、そのしわの形状によって、太陽光圧による擾乱トルクのかかり方が大きく変わります。イカロスの打上げ後、まさにそこに発見があったのです。

運用：渦巻き運動の発見

私たちは、先に述べた構造部会、材料部会と並んで、イカロスの展開後のソーラーセイル航行評価を行う「加速度部会」をつくっていました。こ

の部会は、宇宙研内外の軌道計算の専門家と学生十数名で構成され、実運用で得たデータから光圧加速性能を評価し、ソーラーセイルによる軌道・誘導・航法に関する研究題材なら何でも扱う大変アクティブな研究会でした。血気盛んな若者が多い会だけに、食欲も旺盛で、検討会後には「過食度部会」と称して、焼肉に繰り出すことも幾度か。

ソーラーセイル航行においては、軌道制御とは帆の向きの制御であり、それはすなわち姿勢制御ですから、姿勢運動の理解は最も重要な要素です。加速度部会は、イカロスの姿勢運動について、打上げ前から2つのことを予想していました。「風車効果」と「スピン軸の太陽追尾特性」です。

風車効果は、風により風車が回ると同じように、しわを有するセイル表面に太陽光が当たることによりスピンレートが変化する挙動で、これはまさにイカロスのセイル展開完了直後から観測することができました。

他方で、スピン軸の太陽追尾特性とは、光圧がスピン衛星に作用することにより、スピン軸が円弧を描きながら太陽を追尾する、という挙動です(図2左上)。この特性をうまく利用すると、スピン衛星を無燃料で太陽指向させることができます。燃料を喪失した「はやぶさ」を助けられたのも、この運用法のおかげでした。

ところが、私たちがイカロスの実運用で観測した姿勢履歴は、一定の半径の円弧ではなく、半径が徐々に縮まる「渦巻き」運動でした(図2右)。当初は、実世界と理想的な数式の世界のちょっとした誤差であろうと考えましたが、あまりに傾向が系統的なので、私たちは運用の傍ら管制室で紙と鉛筆で数式をいじって議論を戦わせたものです。

1ヶ月後、加速度部会が、この謎に答えを出しました。原因は、セイル表面のしわ。しわのパターンと姿勢運動の関係を、明快な数式で明らかにしたのです。その数式が示唆するのが、まさに渦巻き運動でした(図2左下)。

突き止めた後の私たちの行動は迅速でした。すぐさま運用システムに、新しい姿勢運動モデルを組み込み、軌道計画と姿勢制御計画を更新しました。

もともと太陽光圧を効率よく受け止めるようにできたセイル。太陽光圧により生じるトルクを外乱と捉えず、利用する方がよいのです。渦巻き運動を積極的に利用した運用法により、従来想定の数倍以上、燃料を長持ちさせることができました。今では、この研究はさらに進み、ソーラーセイル航行性能と、セイル表面の光学特性分布やしわの管理精度の関係を論じられるまでになっています(図3)。世界のどこよりも進んだ、ソーラーセイル

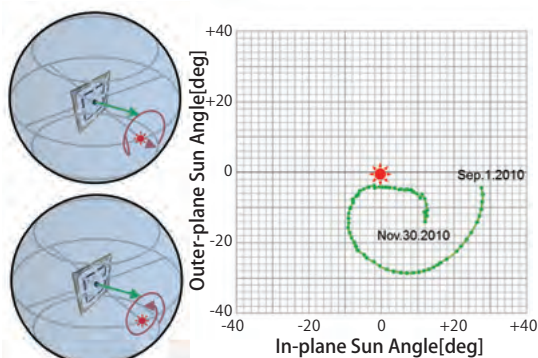


図2 イカロスの「渦巻き運動」
左上：従来想定していたスピン軸の円弧運動、左下：スピン軸の渦巻き運動、右：イカロスの実際の姿勢履歴

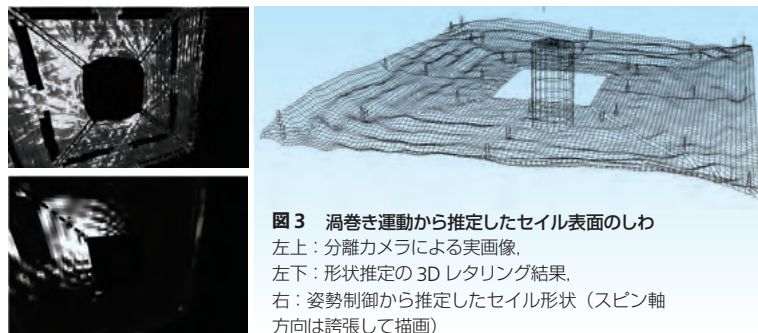


図3 渦巻き運動から推定したセイル表面のしわ
左上：分離カメラによる実画像、
左下：形状推定の3Dレンダリング結果、
右：姿勢制御から推定したセイル形状（スピン軸方向は誇張して描画）

のための「設計論」が構築できつつあるのです。

イカロス以前の私たちの研究水準は、世界と同程度でしたが、現在の私たちは、ソーラーセイル機の開発経験とフライトデータから学んだ知見を世界中のどの研究チームよりも多く持っています。これを活かすことが、日本の深宇宙探査の優位性・独自性につながることを信じています。

おわりに

イカロスは現在、燃料が枯渇したため太陽光圧任せの姿勢・軌道運動になっています。ハイゲインアンテナを持たないイカロスは、電波が極めて微弱なため、軌道決定に必要な測距ができない状態です。しかし、渦巻き運動のモデル化成功のおかげで、正確に姿勢と軌道を予測し、ソーラーセイル航行のデータを取り続けることができています。これからも、自らの光圧加速記録を日々塗り替えて、できる限り運用を続けたいと思います。

イカロスは、技術実証を目的としたミッションでした。この成功により、我々は太陽から遠方の外惑星領域に乗り出す足掛かりを得ました。次に目指すは、木星圏・トロヤ群小惑星探査。イカロスで獲得した大面積膜セイル技術と高比推力イオンエンジンを組み合わせることにより、人類未踏の地への到達を目標に掲げ研究を続けています。

今回受賞させていただいた第5回宇宙科学奨励賞は、もとより個人ではなし得なかったものであり、チームとしての研究開発活動の結果です。この場を借りて、同じ未来を共有し睡眠以外の多くの時間を共有したイカロスの開発チームのメンバー・研究会のメンバーに、感謝の意を表します。

(つだ・ゆういち)

惑星分光観測衛星 機体公開

惑星分光観測衛星 (SPRINT-A) は、相模原キャンパスでの一連の開発試験を終えたことを受けて、6月8日に報道関係者への機体公開を実施しました。当日は土曜日にもかかわらず、26社46名と多くの報道関係者にお越しいただき、にぎやかな公開となりました。この後、惑星分光観測衛星は内之浦での整備を受けて、いよいよイプシロンロケット試験機で宇宙を目指すことになります。2009年1月にプロジェクトとして発足してから、紆余曲折がありましたが、どうにかここまでたどり着くことができました。

この惑星分光観測衛星には、大きく三つの側面があります。一つ目は、惑星分光観測を実施する、という科学目的そのものです。極端紫外線で本格的に惑星環境を観測するというあまり前例がないことだけに関係者の期待も大きく、プロジェクトの若手研究者は大御所の某先生から「一流の観測成果が出なかったら殺す」と物騒なことまで言われています。某先生の人柄を知らなければ、パワハラ相談センター(?)の連絡先を検索するところですよ。

二つ目は、NESSIEという実験装置を搭載していることです。NESSIEは将来の衛星用電源系技術を実証する

ものですが、我々としては、電源に限らず、将来の衛星に役立つ新技術を研究開発する場を提供することは重要と考えています。衛星開発では高い信頼性を確保するため、どうしてもフライト実績がある技術を使いがちです。ただし、そうすると、いつまでも新技術が生まれなくなってしまいます。惑星分光観測衛星におけるNESSIEのように、ほかの主ミッションを持つ衛星にアドオンでオプション実験機器を搭載して新技術のフライト実証の場を設ける例が増えれば、そのようなジレンマが少しは解消できるのではなかろうかと期待しています。

三つ目は、バスそのものの新しいつくり方を試している、という点です。今までの衛星も過去の設計を流用することはあったのですが、それを「モジュール化」という考え方で明示的にガイドライン化しました。これにより、将来的にいろいろなミッションを持った惑星分光観測衛星の兄弟衛星が開発されることを期待しています。

惑星分光観測衛星は、これからいよいよ大きな正念場を迎えますが、今まで同様、プロジェクトメンバーの結束・モチベーションの高さで乗り切れるものと信じています。(澤井秀次郎)

平成25年度第一次気球実験

平成25年度第一次気球実験は、5月7日から大樹航空宇宙実験場において実施され、6月18日に終了しました。ご協力いただいた関係者の皆さまに深く感謝致します。

5月15日早朝に、オゾン、風速、気温、気圧の精密観測によって、地表付近から上部成層圏にかけてのオゾン高度分布と大気重力波などによるその微細構造を調べました。これまでは、高度30km以下で非常に高い精度を持つ電気化学式(ECC)オゾンゾンデと、高度30km以上で測定精度が良い光学オゾンゾンデの2種類のオゾン観測器を、大きめの一つの気球につり下げて放球していました。しかし、小さな気球やゴム気球を用いた方が放球時の天候の影響を受けにくく実験機会を得やすいと考え、今回は2つの観測器を別々の気球で打ち上げることにしました。2つの気球が同じ気塊の中を通過するように、まずECCオゾンゾンデを搭載したゴム気球を放球し、50分遅れで光学オゾンゾンデを搭載した薄膜ポリエチレン気球を放球しました。今回の観測では両観測器とも良好に作動し、高度43kmの上部

成層圏領域までの観測に成功しました。上部成層圏のオゾンを直接測定できる観測器はほかにはなく、これらの領域のオゾン変動を調べる貴重なデータを得ることができました。

5月25日未明には、皮膜に網をかぶせるという新しい手法を用いたスーパープレッシャー気球の飛翔性能評価を実施しました。ポリエチレン気球皮膜に網をかぶせることにより軽量で高い耐圧性能を実現できることの実証を目的として、長時間成層圏を飛翔できるスーパープレッシャー気球の開発の一環として行われたものです。今回の飛翔試験により、成層圏飛翔時の低温環境において、気球の構成要素である皮膜と網の双方が、科学観測に用いることができる大型の気球に要求される強度を有することが確認できました。今後は、より大型のスーパープレッシャー気球の開発を進めるとともに、昼夜で高度を変化させながら長時間飛翔できるという特徴を生かした超小型タンデム気球システムの科学観測への適用を進めることになります。

一方、気象条件が厳しい大型気球の実験はなかなか

実施できなかったのですが、ようやく6月5日未明に「大気球を利用した微小重力実験」の放球作業を始めることができました。ところが、気球を放球する際に気球部と搭載機器部の間の切り離しロープカッターが誤動作しました。安全機構により切り離し直後に浮力を失った気球部は実験場敷地内に着地し、幸い被害はありませんでした。しかし、この不具合に関しての原因究明および対策に時間を要することが分かったため、予定し

ていた大型気球3実験の実施を見送ることとしました。

なお、大型気球の飛行に適した気象条件の8月下旬までに十分な不具合対策を講じることが困難なため、本年度予定していたすべての大型気球による実験を見送ることとしました。第二次気球実験については、8月中旬より不具合対策を講じた機器を用いた地上検証試験を実施し、9月より小型気球を用いた飛行実験を実施する予定です。(吉田哲也)

次世代赤外線天文衛星 SPICA の国際科学会議および一般講演会が大盛況

ビッグバンから生命の発生に至る宇宙史の解明を目指す国際宇宙赤外線天文衛星計画 SPICA (スピカ, Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) の国際科学会議 “From Planets to Distant Galaxies: SPICA's New Window on the Cool Universe” が、6月18~21

日の4日間にわたり、東京大学伊藤国際学術研究センターで開催されました。この国際会議では、SPICAの科学的価値・独自性を示すとともに、次世代の天文学研究に SPICA をいかに有効に活用すべきかを議論することを目的としました。出席者182名のうち半数近くが海外からの参加者であるなど、SPICAへの世界中からの強い支持を感じました。

最近の赤外線天文学の科学的成果を牽引しているのは、今年5月に液体ヘリウムが枯渇し運用を終了したばかりのハーシェル宇宙天文台です。これまでにない



SPICA 一般講演会において、会場からの熱心な質疑に答える講師陣

高い感度・解像度を活かし多くの優れた成果を創出してきましたが、「これは氷山の一角にすぎない」という評価が多く研究者から表明され、SPICAへの期待が熱く語られました。また、「あかり」の成果を引用しつつ SPICA の観測への期待を述べる発表も数多くありました。国内外を問わず多くの

参加者の発表に、「あかり」の成果がなくてはならないものとして引用されるようになったことも印象的でした。

この国際会議で、SPICAに搭載される極低温に冷却された口径3m級の大型宇宙望遠鏡の優れた検出感度が次世代の天文学研究にとっていかに重要なものであるかが再確認され、SPICAの早期実現を切望する声が多く寄せられました。

続いて、21日の夕方に、霞ヶ関イイノホールにおいて、一般の方向けの講演会「ビッグバンから生命の誕



SPICA 国際科学会議の出席者

生まで一次世代赤外線天文衛星 SPICA の挑戦」が開催されました。中川による SPICA の紹介に続いて、各分野で世界を代表する 3 人の研究者に講演していただきました。まずオランダ宇宙科学研究所 (SRON) 所長のウォータース教授が「宇宙の物質輪廻」、続いて東京大学の田村元秀教授が「惑星系のレシピ」、最後に米国カリフォルニア工科大学のヘロウ教授が「銀河誕生のドラマ」というテーマで、それぞれ SPICA への期待を熱く語っていただきました。

今回は、講演者および聴衆のどちらにも海外の方が含まれていました。そこで、日英双方向の同時通訳シ

ステムを導入しましたが、これは大変に好評で、言葉の壁を気にすることなく、会場一体となつての議論ができました。

講演会は、平日の夕方ですという悪条件でしたが、約 400 名もの来場者がありました。またネット中継で数千人の方が講演を聴いてくださり、多くの方から SPICA への強いご支援の言葉を頂きました。

国際会議および一般講演会の両方で、冒頭のあいさつで力強く SPICA の推進を述べられた常田佐久 宇宙科学研究所長をはじめ、多くの方々のご支援に深く感謝致します。
(松原英雄, 中川貴雄)

報告：はやぶさウィーク

時間がたつのは早いもので、今年は小惑星探査機「はやぶさ」を打ち上げてから 10 年、「はやぶさ」が地球に帰還してから 3 年になります。これを記念して、相模原市が中心となり、6 月 9 日 (日) から 16 日 (日) までを「はやぶさウィーク」として、いろいろなイベントが行われました。

6 月 9 日には、ボーノ相模大野にてオープニングイベントが行われました。タレントの中川翔子さんが銀河連邦大統領補佐官に任命され、銀河連邦戦隊「サガミリオン」もデビューということで、銀河連邦を挙げてのイベントとなりました。中川さんは非常に宇宙好きで、橋本樹明先生を司会として川口淳一郎先生と筆者が加わったトークも、非常に楽しいものとなりました。また中川さんからは、「はやぶさ 2」に対して熱烈的な応援を頂きました。

6 月 13 日は、まさに「はやぶさ」が地球に帰還した日であり「はやぶさの日」ですが、この日には JR 淵野辺駅南北自由通路にて「ギャラクシーパネル除幕式」が行われました。JR や相模原市、JAXA の関係者、そして一般の皆さんが見守る中、相模原市長や漫画家の松本零士さんらによってパネルの除幕がなされ、ギャラクシーパネルがお目見えしました。松本零士さんの『銀河の旅 2012』、小山宙哉さんの『宇宙兄

弟』、池下章裕さんの『はやぶさ』と『はやぶさ 2』の大きなパネルは、淵野辺駅の改札を出る人の目に飛び込んできます。

以上のようなイベントに加えて、NPO 法人日本スペースガード協会と相模原市の主催で「はやぶさ打ち上げ 10 周年記念講演会」が 6 月 9 日と 16 日にボーノ相模大野で行われました。これは、「はやぶさ」に関わった JAXA メンバー 10 名が連続して講演するものです。10 名とは講演プログラムの順番に、川口淳一郎、山田哲哉、久保田孝、矢野創、安部正真、國中均、曾根理嗣、岡田達明、橋本樹明の各先生、そして筆者です。川口先生は、最後にも再度登場して講演していただいたので、合計 11 の「はやぶさ」関連講演が続いたことになります。これほどまとめて「はやぶさ」のことを聴くことができた講演会は、今までなかったと思います。また、未就学児を対象とした「キッズはやぶさ教室」も行われ、盛況でした。

最後になりましたが、「はやぶさウィーク」を企画・実行していただきました多くの皆さまに感謝致します。これからは「はやぶさ 2」にバトンタッチしていくことになっていきますが、今後も多くの人たちの心に「はやぶさ」が存在し続けてくれれば、それはプロジェクトを行った一員として望外の幸せです。(吉川 真)



ギャラクシーパネル除幕式の様子

ISTS 展示会開催

隔年で開かれる「宇宙技術および科学の国際シンポジウム (ISTS)」が6月2日 (日) から9日 (日) まで、名古屋国際会議場で開催されました。日本の研究者に最先端の知識と国際経験を与えるために糸川英夫先生が始めたとされるこの国際研究会は、今回で29回を数えました。これに合わせて展示会も行っていますが、

今回は、会期中の平日にシンポジウム会場で実施するテクニカル展示 (参加者と地元企業が主な対象) とは別に、期間全体にわたってパブリック展示 (一般市民が対象) を名古屋市科学館で実施することとなりました。

名古屋市科学館といえば、多数の学芸員を擁する科学展示の一大拠点です。大きなドームとゆったりした座席で楽しむ生解説のプラネタリウムと、リニューアル後さらにパワーアップした展示が人気で、赤外線天文衛星「あかり」のプロトモデルも展示されています。多数の来場者が期待されるため、相模原キャンパス展示室からも惑星分光観測衛星や小惑星探査機「はやぶさ2」、水星探査計画BepiColomboのMMO、X線天文



愛知県武豊町のボランティアが製作した「はやぶさ」の原寸模型

衛星ASTRO-Hといった、普段あまり貸し出さない模型を出展しました。

現地に行って驚いたのが「はやぶさ」の原寸模型です。愛知県武豊町 (固体燃料の故郷) のボランティアが製作したとのことで、イトカワに不時着した様子を再現しています。搭載機器もよく再現されており、模型としては相模原キャンパスの展

示ロビーのものより優れています。搭載機器の機能を理解した製作者が関与しているのでしょうか。「はやぶさ」への深い愛を感じました。

そのほかにも実物大の陸域観測技術衛星「だいち2号」を投影面に見立てたデモ映像の上映や、宇宙教育センターによる子ども向けの工作教室などが開催されました。最終日には2000名程度の来場があったようです。

ISTSの会期中に会場周辺の小中学校に研究者を派遣する「宇宙一日出前授業」も恒例化しており、宇宙研からも多数の研究者が現地に出向きました。次回は2015年夏、神戸での開催となります。(阪本成一)

お知らせ

月崎竜童さん、第3回日本学術振興会育志賞を受賞

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻で、宇宙研國中研究室に所属している月崎竜童さんが、第3回日本学術振興会育志賞を受賞しました。光ファイバを活用した新たなマイクロ波プラズマ診断法を提案・実証したことが、高く評価されたものです。

この診断法を小惑星探査機「はやぶさ」の主推進機であるマイクロ波放電式イオンエンジンμ10に応用し、従来設計の問題点を突き止

めることができました。これらの知見のもとに、イオンエンジンμ10の推力が向上しました。この成果の一部は「はやぶさ2」にも適用され、後続の宇宙ミッションへ貢献することでしょう。

日本学術振興会育志賞は、将来、我が国の学術研究の発展に寄与することが期待される優秀な大学院博士後期課程学生を顕彰することで、その勉学および研究意欲を高め、若手研究者の養成を図ることを目的に、2010年度に創設されたものです。

ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール(7月・8月)

	7月	8月
ASTRO-H	システム振動試験 (筑波)	一次噛合せ試験 (筑波)
BepiColombo	フライトモデル総合試験 (相模原)	
イプシロンロケット試験機 / 惑星分光観測衛星	フライトオペレーション (内之浦)	
観測ロケット	S-520-27・S-310-42 号機 フライトオペレーション (内之浦)	
大気球	第二次気球実験 (大樹町)	



イプシロンロケット 打上げへの カウントダウン⑤

第1段ロケットモータ，“無事”M台地へ

イプシロンロケットの第1段ロケットモータは、種子島の工場で最終製造工程・検査を終えて、内之浦宇宙空間観測所（USC）のM台地にいよいよ搬入となりました。イプシロンロケットの第1段モータは過去に内之浦に搬入されたもののモータよりも大きいものです。ですから私は、この前代未聞のロケット輸送作業をぜひともこの目で見ておきたいと思っていました。

6月1日、各段の組立て準備が始まるため、私は内之浦に向かいました。第1段モータはその日の夜中（6月2日の未明）に内之浦港からM台地に向けて移動予定でしたので、USCに到着して作業服などを受け取り、そのまま港に向かいました。港にはロケットモータ搬送船と大型のクレーン船の姿がありました。そして陸には、ロケットモータ輸送用の黄色いトランスポータ（後に全国的な話題になりました）が待ち構えています。港の中は輸送に関わる大勢のスタッフが動き、立ち入り規制を敷く外側にはロケットのクレーン運搬作業を見ようと町の方たちがたくさん集まり、内之浦港が大変にぎわっていました。

時折小雨の降る中、午後4時を過ぎたところからクレーンが動きだしました。第1段ロケットモータは搬送船の船底に格納されているため、外からはその姿を見ることができません。ほどなくクレーン船がロケットを少しずつ引き上げ始めました。すると、輸送船は軽くなりクレーン船が重くなるため、不安定な作業状況になります。バランスを取るためにクレーン作業は小刻みで行われます。2つの船が浮き上がったたり下がったりしているものですから、作業者は当然のこと、作業を見ているこちらも緊張します。そして、ようやくブルーシートに覆われたモータコンテナが姿を現しました。フックにつられたロケットモータはやはり巨大です。クレーン船からトランスポータに載せ換える

ところでは、船のわずかな揺れが作業の邪魔をします。打上げ前のロケットを台車にごちんとぶつけるわけにはいきませんから、この揺れをいなしながら、最後はかなり慎重に作業が進められました。結局、作業は19時すぎまでかかりました。

一服の後、23時30分にあらためて港に向かいました。地元の方や報道関係者の姿があつて、内之浦の真夜中とは思えない状況です。23時40分を過ぎたころ、トランスポータ周辺にいた大勢の輸送スタッフがリーダーの掛け声で一斉に集まりました。今夜の輸送が最後の大仕事ということで関係者全員に注意喚起した後、最後に「ご安全に!」という掛け声で、全体の空気がピリッと引き締まりました。いよいよM台地に向け出発です。

港から町のメイン通りに出るトランスポータは、さながらお祭りの山車のようなものでした。最初の左折をフェンスギリギリ見事に回り切り、次の見せ場の右カーブ（マツワキラーメンのあたり）に向かいます。ここは撮影ポイントとあって多くの見学者や報道関係者がカメラを構えて待ちました（写真参照）。そして総重量170トンのトランスポータは両車線を使って無事、町を抜けていきました。

次に、いよいよ9%勾配の上り坂に入ります。平坦な町の中と比べると圧倒的にスピードが落ちました。しかし、着実に前進しているので、少し遠目にトランスポータが上ってくる姿を見ながら、私はM台地に向かいました。あとちょっとで頂上。これで無事到着だな、と思って先に進んで待ちました。しかし、そのわずか5分後に大変なことが起きようとは……。

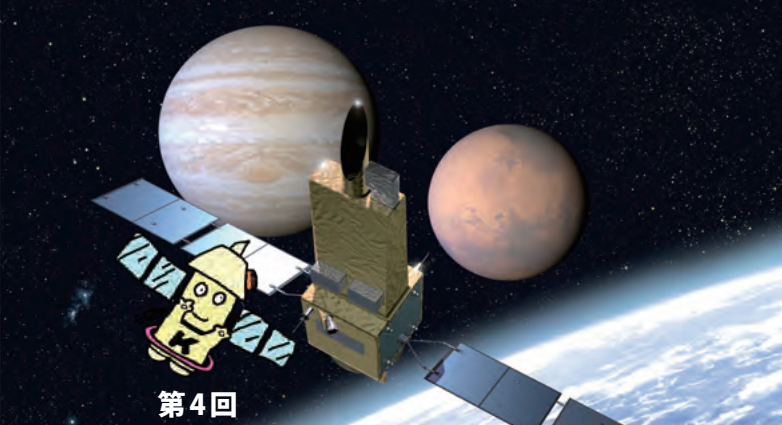
私はM台地の入り口、五運橋の手前で待ち構えていました。五運橋を渡る姿を写真に収めておこうと考えたからです。しかし一向に姿を現さない。それどころか音も聞こえない。どうかしたのかと心配していると、輸送スタッフの車が山を下っていくではありませんか。もしや、と思って後を追うと、300mほど手前でトランスポータが停止して、周囲に人が集まっていました。

「油圧系がおかしい」

トランスポータはたくさんの車輪が付いていて、これらはエンジンの動力で発生する油圧によって駆動する仕組みになっていました。その重要な油圧が立ち上がらない状態になってしまったわけですね。その後は報道でもあったように、しばし立ち往生してしまいました。輸送物は我が国最大の固体ロケットモータです。思わぬ事態に直面し、その対処の中で保安上の注意点が多々あることを思い知らされました。教訓にしたいと思います。（羽生宏人）



イプシロンロケットの第1段ロケットモータを載せたトランスポータが内之浦の町を行く



第4回

小さな衛星の大きな挑戦 惑星分光観測衛星の世界

惑星分光観測衛星の 熱制御システム

岡崎 峻

SPRINT-A プロジェクトチーム

惑星分光観測衛星は、下のバス部と、バス部の上に搭載されるミッション部に大きく分かれています。バス部の基本設計はさまざまなミッションに対応できるような熱設計になっており、ミッション部では各ミッションで熱設計を行います。惑星分光観測衛星は、ミッション部のみ、バス部のみ、そしてミッション部とバス部を結合させた総合試験などを経て、衛星の熱設計の妥当性を確認してきました。これら地上での試験は、多くの方の協力で24時間態勢、1週間以上も続けられ、温度などのデータを監視し続けます。そしてチャンバーに張り付いて試験をしてきた惑星分光観測衛星は今、内之浦宇宙空間観測所で宇宙に旅立つ準備をしています。

今回は、惑星分光観測衛星の熱制御システムに関する話です。

熱制御システム

惑星分光観測衛星には、さまざまな電子機器が搭載されています。宇宙でこれらの機器を使用するための一つの条件として、温度があります。打上げからミッションの終了まで、これら衛星に搭載される機器を使用するためには、機器を適切な温度に保たなければなりません。そこで、断熱・放熱などを目的とした熱制御材料とヒータを衛星の外表面や内部の適切な位置に搭載し、熱設計を行います。これらの熱制御材の組み合わせで、打上げ、日照中・日陰中、機器発熱が大きいとき・小さいときなど、ミッション終了まで、要求される温度に保つことが熱制御システムの仕事です。

熱制御材料

惑星分光観測衛星の外表面は、金色の部分と銀色の部分に分かれています。金色の部分はMLI（Multi-layer insulation）と呼ばれる断熱材です。よく見ると、惑星分光観測衛星の上の部分と下の部分の金色の具合が少し異なりますが、これは材料を製造しているメーカーの違いで、役割に差はありません。重要なのは中身です。MLI内部のつくりはそれぞれの部

分に適したものになっており、ミッション部MLIは高い断熱性能を発揮する設計になっています。銀色の部分の多くは、銀蒸着テフロンと呼ばれる材料が使用されています。銀蒸着テフロンは太陽の熱は吸収しにくく、衛星の熱は排出できる魅力的な放熱材です。衛星の熱を宇宙空間に逃がす役割を果たします。

惑星分光観測衛星の熱設計

惑星分光観測衛星の写真を見ていただくと、上のミッション部は金色の面積が広く、下のバス部は銀色の面積が広がっています。この面積から、衛星がどのような設計をしているのかが大まかに分かります。前述のように、金色の断熱材の面積が大きいミッション部は断熱したい熱設計で、銀色の放熱材の面積が大きいバス部は放熱したい熱設計という具合です。そうすると、銀色の面積が大きいバス部は放熱したい熱設計なので、熱を出す電子機器がたくさん搭載されていることが想像できます。また、金色の面積が大きいミッション部は断熱しているので、発熱機器はあまり搭載されず、宇宙の熱環境とは関係なく温度制御が必要なのかな、と想像することができます。

少し誘導的ですが、まさに惑星分光観測衛星のミッション部の熱設計の一つの特徴は、ほぼ構体全体が高性能の断熱材に覆われており、ヒータと高性能断熱材で、観測の要求に応えるように望遠鏡の構体温度を均一に保つ設計になっています。また、ミッション部の放熱面の位置から、太陽光がどちらから当たる衛星なのかといったことも想像できます。

熱制御材は衛星の外表面に搭載されるものが多く、衛星の外見を左右するので目立つ存在です。温度は見た目には変化しないので想像しにくいのですが、衛星の設計・運用などさまざまな部分と温度をコントロールする熱制御システムは関連しており、惑星分光観測衛星の宇宙での活躍を支えています。

(おかざき・しゅん)



惑星分光観測衛星外観



総合試験準備風景

ヒューストンでの 月惑星科学会に参加して

太陽系科学研究系 助教 大竹真紀子

毎年3月の中旬から後半のどこかで1週間、米国ヒューストンで開催される月惑星科学会という国際会議に、今年も参加しました。この会議は、私の研究分野においては最も大きな国際会議の一つで、ここ数年、毎年参加しています。

私が最初にこの会議に参加したのは2000年以前のことで、当時はNASAのジョンソン・スペース・センター（JSC）内で行われていました。そのため、会議の期間中は我々参加者もJSC内に立ち入ることができ、アポロ計画で持ち帰った月のサンプルが保管されている建物や管制室のある建物を外から見たりして、「これが本物なんだ」と一人感慨にふけたものでした。別な年には、アポロサンプルのキュレーション設備を見学する機会を得、これまた感動するとともに、「いつかは日本にも月からサンプルを持って帰りたい」と勝手な野望を抱いたりもしました。

お昼や夜もJSC周辺で食べることが多く、宇宙飛行士御用達と聞いていたハンバーガー屋さんにも行きました。壁に掛けられたたくさんの宇宙飛行士たちの写真やサインに見入っていると後ろが賑やかになったので振り向いたら、当時JSCで訓練をされていた日本人宇宙飛行士がトレーを持って並んでいた、ということもありました。

また当時は、会議期間の半ばのある日に、夕食を兼ねてチリパーティーというものが開かれていました。チリは豆と肉を煮込んだもので、ヒューストンにあるテキサス州のご当地グルメのようです。チリパーティーは、会議参加者が自由にグループで申し込み、各グループが会場でチリ鍋をつくって審査員や会議参加者に振る舞い、その独創性やおいしさを競う鍋の選手権でした。チリ鍋以外にも、これまたテキサス流というバーベキュー（とにかく何かの巨大な肉の

塊を焼いたものですが、ほとんど味が付いていないくてたいい生焼け）も毎年振る舞われていました。チリ鍋もテキサス流バーベキューも、そのおいしさは正直私にはよくは分からないものでしたが、とにかく会議参加者がテキサスの土地柄などを議論しつつ同じ場所であいまいご飯を食べるのは、楽しいひとときでした。会議で議論されている中身以外の部分でも惑星探査や宇宙開発の歴史（や現在）、多少たりともテキサス文化に触れることができる、いろいろな刺激があるパーティーでした。しかし、その後会議の開催会場が変更になり、JSCから離れた場所にあるホテルで開かれるようになってからは、残念ながらそういう方面での刺激は少なくなってしまったように思います。

ただし、研究者の数も先端性という面からいっても大きな勢力である米国で開かれるこの会議が、同分野の研究者が一堂に会する重要な研究発表・議論・情報収集の場であり、また宣伝の場でもあるという意義は、今もまったく変わりません。宣伝の場という意味では、個々の研究者としての宣伝はもちろん、惑星探査が往々にして国単位や複数国単位での大きなプロジェクトであり、たくさんの研究者がグループとして参加しているため、一見穏やかに見える研究成果発表の裏で各探査ミッション間での微妙な宣伝上の駆け引きも起こります。例えば、数年前に月周回衛星「かぐや」の成果が出始めたある年の会議でのこと。わざとではないと思いますが、ある研究者が先に出ていた「かぐや」データを使った結果を明には紹介しないまま、ほかの探査機で出した同様の結果を発表したために、それがほかの探査機による発見だと間違っって捉えられるのではないかと、という場面がありました。そのときには、午後の自分たちの発表に向けて、昼休みに「かぐや」の研究者チームで集まり、「かぐや」による成果を正当に理解してもらうための方策に頭をひねったものでした。

このように長く参加していてもその時々で異なる意義を持つ会議ですが、科学的意義に加えて最近の大きな意義の一つは、“緊迫感”を得ることだと思っています。世界中の研究者らの最新の成果を知り自分も頑張らなければ、という気持ちになれるという意味です（本当はそんな刺激なしでも研究に邁進できるのが理想ですが、理想通りにはいきません）。そんなこんなでいろんな刺激を受けつつ、楽しい会議の1週間はあっという間に過ぎ、日本に戻ると“緊迫感の維持”が毎年の課題になります。その意味で、これまで何度も同会議に出ているわりには“維持”の部分がありうまくいっていない気もしますが、次回こそ、と思いつつ来年もまたこの会議に参加したいと思っています。（おおたけ・まきこ）

2004年ごろのチリパーティーの様子。例年は屋外で行われるのだが、この年は雨のため屋内で行われた。奥に見える人だかりがチリとバーベキューをもらうための行列。





「はやぶさ」のダイエット

萩野慎二

日本電気株式会社
宇宙システム事業部
プロジェクト推進部

前々号の「いも焼酎」で、東映の菊池淳夫プロデューサーが小惑星探査機「はやぶさ」映画の逸話をご紹介されていた流れもあり、今回は「はやぶさ」の開発現場で最も苦労した軽量化の紹介をしたいと思います。

「はやぶさ」のシステム設計で最も苦心を強いられたところは、探査機の総質量を約500kgに収めなければならないという厳しい質量制約でした。

衛星開発において、システムや搭載機器の設計で何か課題が生じれば、その対策のために必ず質量増が伴うのが通例です。その貴重な質量を当初からまったく余裕なし（むしろ要改善）でスタートせざるを得ないところが、「はやぶさ」のシステム設計の大きな苦労の根源でした。

500kgという普通の数字に思われるかもしれませんが、推進薬と化学エンジン、イオンエンジンを除いた残余は270kg程度。その中に2.5kW級の太陽電池をはじめ、高利得アンテナ、カプセル、サンプラー、タッチダウン機器、観測機器を収める必要があるため、相当に質量の要求が厳しい小型衛星であることが想像されるかと思います。

この質量の中では、従来の科学衛星と同等の機器構成でシステム設計を成立させることは難しかったため、システムが成立するミニマムの機器構成をベースラインとすること、さらにそこから軽量化のためにあらゆる手を尽くすことが、システムアプローチの方針になりました。

ただし、探査機の軽量化は、火星探査機「のぞみ」開発時にすでに種々の対策が施されています。「はやぶさ」は、「のぞみ」で絞り切ったタオルをさらに絞るところからスタートすることになります。

軽量化は、システム担当者が号令を掛けても、また定量的なノルマを課しても、

それだけではなかなか進みません。軽量化を最も必要としているシステム担当者自身が、とにかく軽量化アイデアを出し、検討の段取りを付けて推進していくことが必須となります。

「はやぶさ」では、軽量化推進業務をシステム担当の最重要の業務として推し進めていった結果、新規の軽量化案の適用が何とか徐々に増えていきました。しかし設計が進捗すると、その軽量化分を簡単にのみ込んでしまう質量増加が発生し、結果的には設計確認会の時期になっても、総質量は制約内に収めることができませんでした。

「このままだと博物館行きになってしまう」との厳しいコメントをいただき、このコメントをばねに、いっそうの軽量化を

進めることになります。

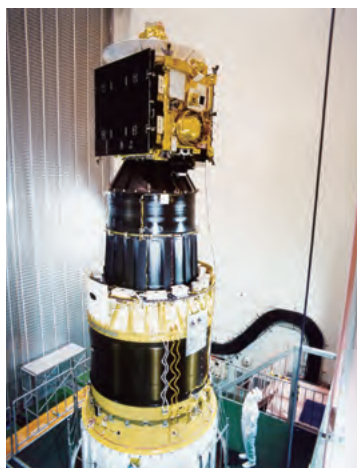
このフェーズまで来ると、システム設計の工夫で質量制約を緩和することも限界に近づきます。あとは、さらに細かい部品や材料レベルの軽量化を徹底し、ここまで絞ってきたタオルをさらにまた絞ることとなりました。公差のある材料は公差内で最も軽量なものを選択入手したり、という地道な活動を続けました。さらに、設計会議の場を借りて軽量化策の水平展開を行い、関係全メーカーさんには絶大な協力をいただきました。

また、社内では専任の軽量化大臣を置き、とにかく軽量化のアイデア出しと、対象機器のヒアリング、効果のローリングの活動をしてもらいました。

このような軽量化活動のほか、目標小惑星の変更に伴う目標質量緩和などもあって、辛うじて「はやぶさ」を目標重量に収めることができ、オプション機器の非搭載の発動も回避することができました。さらに、最終的にロケットの能力の積み上げが完了したところで、ロケットから当初の目標質量を大きく改善した探査機質量許容値を提示していただくことができました。

その結果、6年に及ぶグラム単位の地道な軽量化とロケット能力向上のおかげで、搭載可能推進薬質量を大きく増加させることができました。「推進薬を搭載能力いっぱいまで積めた」という川口淳一郎先生のうれしそうな言葉で、ここまでの軽量化の努力は無駄ではなかったと、やっと実感することができた次第です。

昨日まで減量に苦しみ抜いたボクサーが、計量をパスした後は満腹になるまで食事をするようなもので、昨日まで軽量化に苦しみ抜いていた「はやぶさ」は、2003年5月9日に満腹状態で宇宙へと出発しました。（はぎの・しんじ）



「はやぶさ」と質量問題をアシストしてくれたロケット

7つの顔を持ち、熱い宇宙に挑む

宇宙物理学研究系 教授

満田和久

—— 多くの職務を兼務されています。

満田：宇宙研の宇宙物理学研究系教授が主務で、研究総主幹、JAXA チーフエンジニア、宇宙研SE推進室長、「すざく」プロジェクトマネージャー、ASTRO-Hプロジェクトサイエンティストを兼務しています。ASTRO-Hに搭載する軟X線分光検出器(SXS)の責任者も入ると7つ。ばらばらな仕事に見えますが、すべて自分が研究者としてやりたいことにつながっています。

—— やりたいこととは？

満田：宇宙にあるバリオンと呼ばれる普通の物質の平均温度は数百万度だと考えられています。この熱い宇宙がどのように出来上がったのか、その過程を宇宙の始まりからすべて理解したいのです。そのために三つのことを同時にやっています。一つ目は、「すざく」など稼働中のX線天文衛星を使って研究を進めること。しかし、現在の衛星ではできないこともあります。それを可能にするために、2015年打上げ予定のASTRO-Hの開発を進めています。これが二つ目です。しかし、ASTRO-Hでできることの限界も見えています。そこで三つ目として、20年先を見据えた観測装置の研究を行っています。

—— ASTRO-Hでは、どのような観測を行うのですか。

満田：「すざく」などの観測によって、銀河系の周辺に数百万度の高温ガスが分布していること、銀河団は高温ガスに満ちていることが分かってきました。しかし、それらをすべて合わせても、宇宙に存在すると推定される高温ガスの量の半分にしかありません。残りの半分はどこにあるのか。銀河系と銀河団の領域が最有力ですが、銀河系が明る過ぎて詳しく観測できません。ASTRO-HのSXSで、それに挑みます。

SXSは、銀河団の高温ガスの運動を精密に測定できるので、銀河団が成長する様子を捉えることも可能です。宇宙では、銀河団が連なって大規模構造を形づくっています。銀河団の成長は、大規模構造をつくる過程にほかなりません。大規模構造がつくられる過程を直接見ることも、ASTRO-Hの使命です。

—— 「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」「ASTRO-E」「すざく」と、6機の衛星に携わってきたそうですね。

満田：幸運でした。そうした経験があることから宇宙研SE推進室長職の声が掛かったのでしょう。「すざく」のX線カロリメータ(XRS)の不具合のほかにも、大小さまざまな失敗を経験しました。



みつだ・かずひさ。1957年、神奈川県生まれ。理学博士。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。日本学術振興会研究員などを経て、1987年より宇宙研。専門は高エネルギー宇宙物理学。

失敗には共通性があり、そこから学ぶものがあります。SE推進室では、私の経験も踏まえて、ミッションを確実に実現するための方法を議論し、活動の支援を行っています。

いくつもの職務があると忙しいですが、悪いことばかりではありません。研究には発想

の転換が重要です。いくら考えても良いアイデアが浮かばないとき、別なことを考え始めると、ふと先ほどの案件についてアイデアがひらめいたりするものです。

—— 子どものころから宇宙に興味があったのですか。

満田：小学生のころに住んでいた長野は星がとてもきれいで、物の置の屋根に登って星を観察したりしていました。学校でも私の理科好きが知られていたようで、姉の担任がラジオをつくるキットをくれたほどです。それをきっかけに電気回路にも興味を持ち、6年生のときアマチュア無線の免許も取りました。捨ててあったテレビを持ち帰って分解したこともありますね。

そういう経験は今につながっているかもしれません。私たち実験物理屋は、やりたいことを実現する装置がなければ、勉強を自分でつくるというのが基本です。例えば、ASTRO-Hの次の衛星に搭載する観測装置にはシリコンマイクロマシンの技術が不可欠だと分かり、その分野で有名な研究者のもとで修業したこともありました。

—— 趣味は？

満田：音楽は昔から好きですね。中学時代ブラスバンド部で、今でもときどきサクスを吹いています。料理も好きで、最近はイタリアンにはまっています。ハーブも育てていました。料理は、人工衛星の開発と似ているところがあります。段取りが重要で、そこで手を抜くと、うまくいきません。

—— 2015年のASTRO-Hの打上げが楽しみです。

満田：X線分光観測は、可視光の天体写真と比べると地味で人氣がないのが悩みです。でも、分光観測は、そのデータから温度や元素組成、動きなどあらゆる物理を読み取ることができる、とても面白い研究です。どのような見せ方をしたら皆さんにX線分光観測に興味を持っていただけるか、広報戦略を練ろうと思っています。また一つ仕事が増えますね。

ISAS ニュース No.388 2013.7 ISSN 0285-2861

発行／独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧になれます。

デザイン／株式会社デザインコンビニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

「いも焼酎」の筆者の萩野慎二さんとは、知り合いの披露宴でお会いして以来でした。今年の夏休みの楽しみはイブシロンロケットですね。前任のM-Vロケットで打ち上げてもらった「すざく」は7月10日で8歳になりました。まだまだ頑張り〜。(前田良知)

* 本誌は再生紙(古紙100%)、植物油インキを使用しています。

R100
古紙配合率100%再生紙を使用しています

VEGETABLE
OIL INK