



夜空に向けた打上げを待つS-520-27号機(左)とS-310-42号機(右)

宇宙科学最前線

フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡で 探るフェルミ加速の物理

立教大学理学部物理学科 准教授
内山泰伸

2008年に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡は、宇宙分野の研究者と素粒子実験の研究者が連携して開発したガンマ線観測衛星であり、過去の衛星に比べて圧倒的に高感度のガンマ線観測を実現しています。主検出器であるLAT (Large Area Telescope) の開発と運用は、米国SLAC国立加速器研究所がホスト機関となっており、日米欧の国際協力で進められてきました。LATはさまざまな種類の天体からのガンマ線を新たに検出し、ガンマ線天文学を大きく躍進させています。

筆者は本年3月末までSLAC国立加速器研究所において宇宙ガンマ線観測の研究に従事してきました。特に興味を持っているのは宇宙の無衝突衝撃波における高エネルギー粒子加速現象で

す。本稿では、私たちの行っているフェルミ衛星による粒子加速の研究を、超新星残骸のガンマ線観測に焦点を絞って紹介します。また、日本が主導して開発中で筆者も参画している次期X線天文衛星ASTRO-Hに対する展望も簡単に述べたいと思います。

宇宙における粒子加速

宇宙の彼方から地球に飛来する高エネルギー粒子、宇宙線がどこでどのようにしてつくられているのかという問題は未解決ですが、数千テラ電子ボルト(テラは10の12乗)以下のエネルギーの銀河宇宙線は、超新星残骸の無衝突衝撃波によって生成されているという説が有力となっています。星の壮絶な最期である超新星爆発によって、星の

外層は超音速で星間空間を膨張し、超新星残骸を形成します。膨張する爆発放出物によって駆動された無衝突衝撃波が、高エネルギー粒子を加速するのです（超新星残骸については本誌2012年4月号の勝田哲氏の記事もご参照ください）。

また、実際に宇宙線の起源であるかどうかは別として、星から銀河団にわたるさまざまなスケールの天体で、宇宙線のような高エネルギー粒子の生成が観測されています。多くの場合、やはり衝撃波が粒子加速の現場になっていると考えられます。従って、衝撃波における粒子加速の機構を理解することは、宇宙物理学の重要課題といえます。

フェルミ加速

無衝突衝撃波における粒子の加速メカニズムは、フェルミ1次加速あるいは衝撃波統計加速と呼ばれる巧妙な物理機構です（図1）。磁気波動によって散乱されながらフラフラと「酔っぱらい歩き」をする荷電粒子が、衝撃波面の前後を何度も往復することにより倍々ゲーム的にエネルギーが増幅されていく粒子加速メカニズムです。20世紀を代表する物理学者エンリコ・フェルミが提唱した、星間空間における統計的な粒子加速のメカニズムを衝撃波に適用したのになっています。図1のように超新星残骸の衝撃波からシンクロトロンX線が放射されていることから、電子が数十テラ電子ボルトまで加速されていることが分かります。ヒッグス粒子を発見した大型ハドロン衝突型加速器（LHC）でさえ陽子ビームのエネルギーは7テラ電子ボルトであり、天然の加速器がこれを軽々と超えているのは驚くべきことだと思います。

フェルミ加速の研究は近年大きく進展していますが、まだ理論的にも観測的にもよく分かっていないことが多々あります。そのことが宇宙線の起源を解明する上でも障害となっているのです。特に粒子の加速機構の「入口」と「出口」が問題

となっています（図1）。熱的粒子がどのようにしてフェルミ加速のプロセスに入るのかというのが、「入口」の問題です。これはLHCでいえば、入射ビームをどうつくるのかということになります。この点が理論的に未解明なため、衝撃波でどのくらいの量の高エネルギー粒子が生成されるのか明確ではありません。一方、加速された粒子がどのようにしてフェルミ加速プロセスを終えるのか、すなわち「出口」は、最高到達エネルギーを理解する上で、そして宇宙線の超新星残骸起源説を検証する上で、鍵となる部分です。粒子加速に伴う乱流磁場の増幅が「出口」に与える影響や、星間ガス中の中性粒子の効果などが問題を難しくしています。これらの諸問題に対する解答は理論と観測の両面から追求されていますが、ここで紹介するのはガンマ線観測からのアプローチです。

フェルミ衛星による超新星残骸の観測

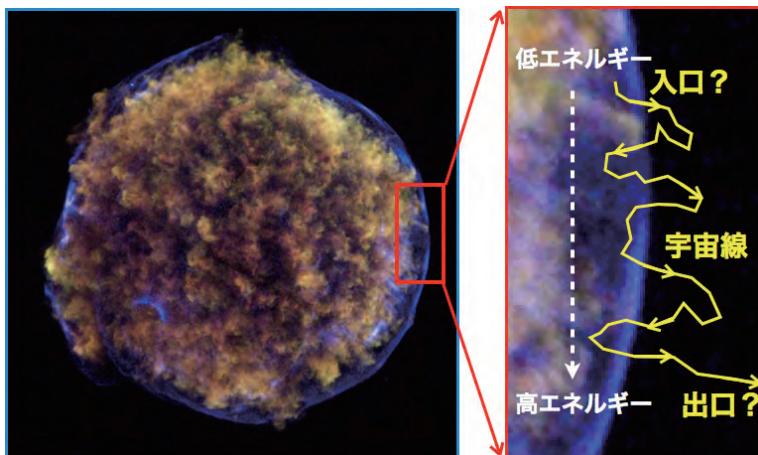
フェルミ衛星の主検出器であるLATは対生成望遠鏡と呼ばれ、宇宙から飛来したガンマ線が検出器内でつくる電子・陽電子対の飛跡とその全エネルギーを測定することで、20メガから300ギガ電子ボルトのエネルギーを持つガンマ線を観測することができます。LATの前身といえるコンプトン衛星搭載のEGRET検出器をはるかに凌駕する性能を持ち、超新星残骸のガンマ線観測もLATの登場によって大きく前進しています。

LATによる観測がもたらした重要な成果として、超新星残骸の衝撃波において高エネルギー陽子に分配されるエネルギー量を推定できるようになったことが挙げられます。このエネルギー分配量は、現在のフェルミ加速理論では上述の「入口」問題のため不確かでした。約300メガ電子ボルト以上のエネルギーを持つ高エネルギー陽子が、星間ガス中の水素原子核に衝突すると中性 π 中間子を生成し、それが直ちに2つのガンマ線光子に崩壊します。この π 中間子崩壊ガンマ線を捉えることができれば、高エネルギー陽子のエネルギー量を測定できます。そして有名なティコの超新星残骸からのガンマ線は、X線観測で得られていた結果と組み合わせると、 π 中間子崩壊ガンマ線であると結論づけられ、高エネルギー陽子に大きなエネルギー量が分配されていることが分かりました。これまで高エネルギー電子についての推定はありましたが、初めて陽子についての推定が可能になり、その結果、電子に比べてはるかに多いエネルギー量を陽子が担うことが分かりました。これは銀河宇宙線の起源の解明に向けた重要な一歩であり、またさまざまな天体における衝撃波加速の理解にも資することになります。

図1 ティコの超新星残骸とフェルミ加速の模式図

左：X線衛星Chandraで撮像されたティコの超新星残骸。青色はシンクロトロン放射に対応し、そのほかの色は熱的放射の分布を示す。

右：衝撃波におけるフェルミ1次加速の模式図。高エネルギー粒子（宇宙線）は衝撃波面を往復するたびに一定の割合でエネルギーが増加する。



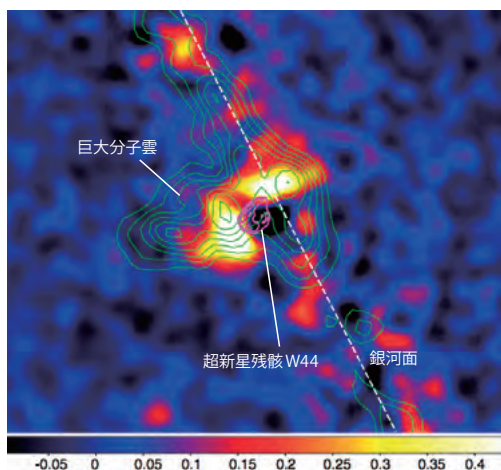


図2 フェルミ衛星で撮像された超新星残骸 W44 周辺部のガンマ線放射マップ

W44 は強い電波源であり（マゼンタ色の等高線）、ガンマ線放射も強いが、この図では周辺のガンマ線分布を見るために W44 本体からのガンマ線放射は差し引いてある。緑色の等高線は一酸化炭素（CO）ライン電波放射のマップであり、さしわたし 300 光年程度の大きさの巨大分子雲が W44 を取り囲むようにして存在していることを示す。

超新星残骸からの逃走

フェルミ加速のプロセスで粒子が加速されるためには、超新星残骸の外部である衝撃波上流においても粒子が十分に散乱され、衝撃波に戻ってこないといけません。衝撃波上流で散乱体として働く乱流磁場は、加速されている粒子自身によってつくられると考えられています。このような非線形性のため、上述の「出口」問題の理論的解決は難しい課題となっています。加速プロセスから抜け、超新星残骸から「逃走」した粒子を観測することが、この問題を理解する上で重要になります。

私たちはフェルミ衛星により、そのような観測例を初めて見つけることができました。図2に示すように、超新星残骸 W44 のガンマ線観測において、衝撃波の上流へ「逃走」した高エネルギー粒子が、周囲の巨大分子雲と衝突し、ガンマ線を放射している様子を捉えました。粒子の加速、特にその最大到達エネルギーと粒子の逃走は、いわば表裏一体の関係にあり、フェルミ加速の機構の理解へ向けた新しい情報をガンマ線観測から得ることが可能になってきています。

高エネルギー陽子の直接的証拠

ティコの超新星残骸の場合のように、X線観測の結果などを活用してガンマ線放射機構に強い制限を加えることもできますが、より直接的なのはガンマ線スペクトル形状からの放射機構の同定です。私たちは π 中間子崩壊ガンマ線が特徴的なスペクトル形状を示すことを利用して、フェルミ衛星により π 中間子の崩壊ガンマ線を同定すること

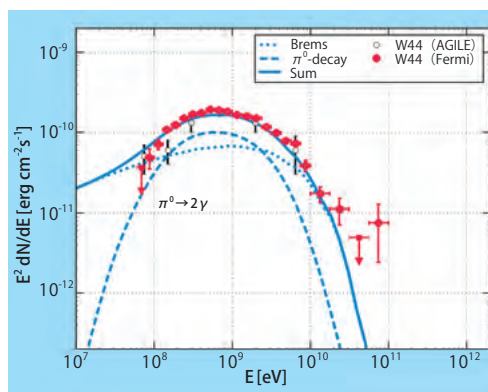


図3 超新星残骸 W44 のガンマ線スペクトル

データ点はフェルミ衛星で測定された超新星残骸 W44 のガンマ線スペクトル。破線は π 中間子崩壊ガンマ線のモデルで、点線は相対論的電子による制動放射のモデル。フェルミ衛星で得られた数百メガ電子ボルト以下のスペクトルデータに π 中間子崩壊ガンマ線に特有のスペクトル構造が見られ、これは高エネルギー陽子が生成した π 中間子の崩壊が主要なガンマ線放射機構であることを示す。

に成功し、陽子加速の直接的な証拠を得ました。

図3にガンマ線スペクトルの例を示します。数百メガ電子ボルト以下でガンマ線放射の強度が急激に下がっていますが、これが π 中間子崩壊ガンマ線に特徴的なスペクトル形状です。静止質量エネルギーが135メガ電子ボルトである中性 π 中間子の生成に関するハドロン物理を反映し、ガンマ線放射の環境などにほとんど依存しない普遍的なスペクトル構造です。私たちのガンマ線観測の結果から、陽子を主成分とする銀河宇宙線が超新星残骸の衝撃波において加速されていることの強い証拠を得ることができました。ただ今回は分子雲と相互作用している超新星残骸についての観測結果であり、今後はほかの種類の超新星残骸について同様の解析をすることが急務となっています。

超新星残骸に限らず、これまで天体高エネルギー粒子加速の現象は高エネルギー電子を通して観測されてきました。今回の私たちの成果は、初めて高エネルギー陽子を観測できるようになったという点で宇宙物理学上の重要な意義があると思っています。

ASTRO-Hへの展望

これまで主にガンマ線観測による研究について述べましたが、衝撃波における粒子加速を研究する上でX線観測も重要な役割を果たしています。日本は次期X線天文衛星ASTRO-Hの開発を主導していて、筆者もチームメンバーとして参画しています。ASTRO-Hに搭載されるX線マイクロカロリメータは、いわゆる非分散型分光器であり、超新星残骸のように広がった天体について今まで不可能であった超高分解能でのX線スペクトル解析を可能にします。熱プラズマのX線診断を通して、イオン温度や乱流の測定、マックスウェル分布からの逸脱の発見などの新たな成果が期待されています。ASTRO-Hは2015年の打上げが予定されていますが、超新星残骸に限らずさまざまなテーマにおいてブレークスルーをもたらすことでしょう。（うちやま・やすのぶ）

S-310-42号機・S-520-27号機打上げ実験報告

日本初！2種類の観測ロケットS-310型とS-520型の連続打上げ

電離圏E領域とF領域の相互作用に関する総合観測を目的とした、S-310-42号機とS-520-27号機の打上げ実験は、当初の予定通り7月20日に実施され、成功裏に終了しました。科学観測の成果報告は取得されたデータの解析を待つとして、ここでは主に観測ロケットを2機連続して打ち上げた現場の様子をご紹介します。

前回の連続打上げは、2002年8月3日にまでさかのぼります。今回と同じく電離圏の観測で、スプラディックE層に伴う準周期エコーの構造と成因の解明を目指し、S-310-31号機と同32号機を打ち上げました。このときは同じ型の観測ロケットでしたが、今回はS-310型とS-520型で型が異なります。S-310-42号機で高度約150kmまでの電離圏E領域を、高度約300kmまで到達可能なS-520-27号機で電離圏のF領域を観測し、各領域に存在する擾乱の電磁気的な結び付きを研究するという、それぞれの性能や特性を最大限に生かした野心的な観測です。型の異なるロケットを連続して打ち上げるのは日本初、異なる高度の現象を一つの実験で観測して解明しようとする試みは世界初です。打上げ現場は、やってやろう！と盛り上がります。しかし打上げに至るまでには、いくつかの課題を克服しなければなりません。

その一つは、リチウムの蒸気を放出して発光雲をつくる装置（LES：Lithium Ejection System）の改善に時間を要したことです。LESは日本が独自に開発した装置で、日本の観測ロケットに搭載されるのは今回で3回目です。赤い散乱光を放つ雲が風に乗って形を変えていく様子を地上から観測するのですが、初搭載のS-520-23号機（2007年9月2日打上げ）では、その美しい様子から「宇宙花火」とも呼ばれました。2回目の搭載はS-520-26号機（2012年1月12日打上げ）でしたが、予定通りに動作しなかったと思われる点もあり、改良することになったのです。アメリカの観測ロケットに搭載しての実験や、地上試験を数多く行っているうちに、S-520-28号機が先に打ち上がりました（2012年12月17日打上げ）。さらに、これまで2回の観測実験ではリチウムの雲は太陽の光を散乱して光っていたのですが、今回は（満月に近いとはいえ）月の光を散乱して光らせるという世界初の試



左：内之浦の地上から撮影されたトリメチルアルミニウム発光
右：JAXA実験用航空機「飛翔」から撮影されたリチウム発光

みだったのです。計算上では月明かりでも光るはずだと信じていた科学者も、予定の高度でちゃんとリチウム蒸気を放出するという確信を持っていた技術者も、実際に打上げ実験が終わるまで気が休まらない日々が続きました。

二つ目は、観測ロケットの搭載機器はS-520-26号機から統合型の新型アビオ

ニクスに移行したのですが、新型アビオニクス搭載機体の連続打上げは今回が初めてだったということです。一部の地上装置は以前のものをそのまま使っていることもあり、地上装置とロケット機体の間には中継装置が必要です。内之浦の射場に設置されている中継装置とは別に、海外打上げ用の中継装置が持ち込まれました。また、ロケット点火に関わる安全装置（SAD：Safe Arm Device）が、機体側における手動駆動から地上装置によるリモート駆動になり（新採用）、安全性がさらに向上しました。これら地上装置の設置から接続、そして動作確認が入念に行われました。すべてにおいて2機分の地上装置を準備できるとよいのですが、レーダーやデータを受信するテレメータのアンテナはそうはいきません。1機目の打上げ（S-310-42号機）が終わって2機目用の設定に切り替えるのは、時間との勝負です。慎重かつ正確迅速に切り替える練習が重ねられました。2機分の準備作業が連続して、ときには並行して行われ、射場に機体が搬入されてから12日目の7月19日にすべての準備が整い、打上げリハーサル（電波テスト）を迎えました。

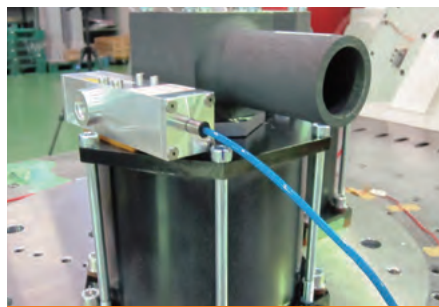
今回の打上げにはJAXAの新人や研修生、そして観測装置をつくった国内外の大学から学生も多く参加しました。小さいとはいえ、本物のロケットです。打上げ当日の、担当した機器が動作するまでのドキドキ感は、カウントダウンとともに高まります。そして7月20日23時00分、S-310-42号機は予定通り打ち上げられ、トリメチルアルミニウム（TMA）の白い発光雲がはっきりと夜空に輝きました。続いて、23時57分にS-520-27号機が打ち上げられました。そして航空機から、月光を受けて赤く輝くリチウムの雲が観測されました。搭載機器がすべて正常に動作しているというデータが、テレメータで送られてきています。数年かけて準備した実験が成功した瞬間でした。（竹前俊昭）

羽生君，リチウム発光雲はつくれましたか？

7月20日の深夜、観測ロケット2機（S-310-42 / S-520-27）が予定通り打ち上げられました。S-520-27号機にはリチウム放出装置（LES：Lithium Ejection System）が3個搭載され、月光によるリチウム発光雲生成実験が行われました。

LESは2007年のS-520-23号機実験以降、日本、米国と実験の機会を得てきたのですが、2010年、2012年に実施した日米双方の観測ロケット実験では作動が芳しくなく、発光雲観測が不調でした。実験後、観測状況など、さまざまな情報をいただいて不具合原因究明に取り組んできました。結局、点火系安全装置の設計と固体リチウムのガス化に必要なテルミット剤（金属と酸化鉄の混合物）の配合比が適切でなかったことが判明しました。その後、基本設計の再検討を実施、見直し後の設計の妥当性を審議いただいて、今回のロケット実験に再登板となったわけです。

LESの第1次地上試験（2012年10月）と第2次地上試験（2013年3月）は、あさる野実験施設の小型真空槽を使って実施しました。第1次地上試験は、主に不具合



S-520-27号機に搭載されたLESの外観



S-520-27号機打上げ後、ホッと一息のLES班

原因の調査と設計改良方針の妥当性確認を目的に実施しました。この試験では、テルミット剤配合比が不適正で所望の燃焼速度に達していなかったことによりリチウムのガス化に想定以上の時間を要したことや、点火系安全装置が火工品点火後にテルミット剤の着火を阻害する状態になってしまうことを確認しました。併せて見直したテルミット剤配合比が、想定した燃焼速度を有することも確認できました。そして、いよいよ第2次試験に臨みます。もしこの燃焼実験が失敗してデータ取得ができなかったら打上げ予定に間に合わないため、点火前はかなり緊張しました。結果、点火系安全装置

の機能が良好であることを確認し、テルミット剤の燃焼速度に関するデータも取得できました。

無事、S-520-27号機は打ち上げられました。LESの成果はあらためてご報告致します。LES改良に当たっては、多くの関係者、有識者の皆さまに貴重な助言をいただきました。ご支援、ご協力くださいましたすべての皆さまにこの場を借りて深く感謝申し上げます。

「〇〇先生、リチウム発光雲、つくれました」（羽生宏人）

液体水素の熱流動特性試験

能代ロケット実験場における平成25年度の一発の試験として、第9次液体水素の熱流動特性試験を5月27日から6月10日にかけて実施しました。この試験は、液体水素の熱伝達特性を理解して超電導応用機器の冷却設計への指針を与えることを目的として行ったもので、大学共同利用の一環として京都大学と宇宙科学研究所が共同で実施しました。

この試験が最終的に目指すものは、温室効果ガスの



実験装置への充填作業
（右から液体水素容器、液体ヘリウム容器および水素ガス）

削減への寄与です。温室効果ガス削減に向けては、太陽光や風力、波力といった再生可能エネルギーの利用拡大が喫緊の課題ですが、将来的にはエネルギー媒体である水素をうまく使って、さまざまな再生可能エネルギーを「水素ベースで統合する」ことが望ましいと考えられます。

本研究では、そのような水素社会の実現を目指して、液体水

素冷却による高温超電導技術に着目し、研究を進めています（ここで言う「高温」とは、液体ヘリウム温度よ

りも高い温度のことです)。液体水素による冷却は、液体窒素温度より50度も低い20Kレベルでの冷却が可能なことから、臨界磁場、臨界電流が大きくなり、高温超電導技術のブレークスルーにつながると期待されています。しかしこれまで、その冷却特性データベースはほとんど存在せず、研究は液体水素の熱伝達特性の取得からスタートする必要がありました。私たちは、液体水素に浸して冷却する（浸漬冷却）場合と、流して冷却する（強制冷却）場合のそれぞれについてデータベースをつくることを目指しており、今までに2000回を超えるケースについて試験しました。また今回の試験から、

高温超電導線材であるMgB₂（二ホウ化マグネシウム）の液体水素冷却における電気的特性が、磁場によってどのように変化するかについても調査を開始しました。

この研究は、宇宙研が今まで培ってきた液体水素取り扱い技術をエネルギーシステムへ展開するというだけでなく、その成果を搭載機器の開発にも生かせることから、意義が深いと考えています。なお、本研究は、平成23年から「新しいエネルギーインフラのための液体水素冷却超電導機器に関する研究」としてJST（科学技術振興機構）から補助金を受けて実施しています。

（成尾芳博）



イプシロンロケット 打上げへの カウントダウン⑥

イプシロンロケットTVC試験

イプシロンロケット試験機の打上げまであとわずかとなりましたが、6月末には1段モータの推力方向制御装置（TVC）試験が実施されました。

今回の試験は1段TVCの健全性の確認試験です。外観検査だけでなく、内之浦に搬入した後に実際にTVCを駆動させ、1段モータのTVCの機能・性能が以前の試験と変わらないことを確認しました。

1段TVCは、電動アクチュエータによってノズルの向きを変えることにより、1段モータ燃焼中のピッチ、ヨーの姿勢制御を実施するものです。2段目以降と異なり、ロケットの1段目燃焼中は大気中を飛行するため、ロケットは空力トルクの影響を受けます。また、突風などの外乱に対しても姿勢を維持しなければならないため、この1段TVCの制御はロケットの飛行制御で最も重要で、最も難しい部分です。そ

のため、今回の試験は、ロケットの射場作業の中でも、最も重要な試験の一つといえます。

試験ではまず、ノズルを最大舵角で振って、まわりの機器との干渉がないかをチェックしました。その後、いろいろなパターンでノズルを動かし、その応答を取得しました。私も駆動試験中は、ノズルの動きにおかしなところがないか、じっと目を凝らしてその動きを観察しました。当然のことですが、ロケットの姿勢制御系は、ノズルの動きの特性を考慮して構築されているため、ノズルがただ単に動けばよいというものではありません。ノズルの動きの特性が変わってしまうと、姿勢制御系が発散し、最悪の場合ロケットの姿勢は不安定となってしまいます。

TVCの応答の結果は、過去の試験結果とおおむね一致し、試験の結果は良好でした。イプシロンロケットの核ともいえるこの1段TVCの健全性が射場で確認されたことで、打上げに向けて大きく前進することができました。私自身も今回の試験に参加し、イプシロンロケットが大空に向けて打ち上がる姿がますますリアルに想像できるようになりました。

（佐伯孝尚）

ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール（8月・9月）

	8月	9月
ASTRO-H		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）	
大気球		第二次気球実験（大樹町）

相模原キャンパス特別公開2013

夏といえば特別公開。7月26日（金）・27日（土）の2日間の開催で合計1万3894名と、前年度の特別公開とほぼ同数の来場者がありました。近隣にお住まいの方や宇宙ファンの方からの「毎年楽しみに来ているよ」という声は、うれしい限り。大人と子ども数名のグループで見学される方も多く、夏休みのお出掛け先としても選んでいただいているようです。私は正門受付で来場者をお迎えするのが当日の主な仕事でした。遠方からお越しの熱心な方もお見掛けしました。蒸し暑い中、ありがたいことです。

今年の特徴的な展示を一つ挙げるとすれば、小惑星イトカワから持ち帰った微粒子の特別展示です。これは相模原キャンパスに隣接する相模原市立博物館で7月13日から9月1日まで開催の企画展「片道から往復へ～新たな宇宙時代の到来～」の特別展示として、JAXAが保管する微粒子のひと粒を光学顕微鏡で直接のぞけるよう展示したもので、7月17日から28日までの期間限定で

の公開でした。顕微鏡をのぞいてみると、粒径 $55\mu\text{m}$ の微細な粒子に光が当たり、やや黄色味を感じるカンラン石の特徴を確認することができました。小惑星から持ち帰った実物の持つ説得力があり、あらためて「はやぶさ」ミッションの現実感が湧いた方も多かったようです。博物館の集計によると、12日間の公開期間中に7146名の方がご覧になったということです。微粒子の実物を光学顕微鏡で直接のぞける形での公開は世界初。当日整理券を求める人の列ができましたが、帰還カプセルを展示した2010年のような大混雑はなく、整理券による誘導が整然と行われていました。「はやぶさ」への熱狂は、現在はだいぶ落ち着いてきていると感じます。

特別公開の内容は盛りだくさんで、「2日かけても見



光学顕微鏡で小惑星イトカワから持ち帰った微粒子を観察。
相模原市立博物館にて。



「はやぶさ2」に載せるメッセージは募集締め切りを延長したことで、特別公開当日も応募が集まった。

切れない」との声も聞かれました。2日間にわたる公開は2009年に始まり、今年で5年目になります。2日間開催を始めた当初も「1日では回り切れない」との意見に添えてのことだったのですが、ますます充実する傾向にあることは明かです。宇宙科学セミナーや宇宙学校スペシャルは相変わらず高い人気で、講師の研究者も熱心な聴衆に大いに触発されたようです。さらにほとんどの方は何か新しいものや珍しいものを見聞きしようと、会場内を広く渡り歩いていました。子どもたちに大人気のスタンプラリーも、普段立ち入ることのない研究所の中を歩き回って印象づける仕組みです。生協や銀河連邦物産展にも人が集まり、食事や休憩を取りつつ時間の許す限り見て回っているようでした。「はやぶさ」は今なお多くの人を引き付けますが、興味の対象は「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ、さらに特別公開をきっかけに、さまざまなプロジェクトや将来計画を知って関心の対象が広が

ることを期待できる充実ぶりでした。

来場者数かというと、2010年を例外とすれば近年は1万3000名以上で微増してはいるものの、それほど大きくは増えておらず頭打ちのような推移です。さらにたくさんの方に見に来ていただくには、どうすればよいのでしょうか。話題性のあるテーマをどのように打ち出していくのか、ここで働いたり学んだりしている人の姿をどのように見ていただくのかなど、相模原キャンパスの普段の展示の在り方とともに考えていくときが来るように思われます。通常時の展示室の見学者数は年間7万名を超え、さらに増え続けています。相模原キャンパスには展示館（仮称）の建設が予定されていますが、年1回の特別公開と相乗効果がある形で発展させていきたいものです。
(大川拓也)

『ISASニュース』の新たな試みとして2013年2月号から始まった誌上討論シリーズ。最初に議論の出発点となる問題を提起し、これについて読者の皆さまからご意見をお寄せいただきながら、複数名にわたって議論を深めていきます。なお、企画の性格上、掲載は不定期になります。また、皆さまからのご意見につきましては、必ずしもそのまますべてを掲載できるわけではないことをご承知おきください。ご意見の投稿の要領については、次のURLをご参照ください。
<http://www.isas.jaxa.jp/j/isasnews/index.shtml>

創造的な研究を進めるためには組織の管理が重要！

橋本樹明
宇宙機応用工学研究系
研究主幹・教授

本誌2013年2月号の徳留真一郎先生の記事、拝見しました。提起された問題点は、大きな組織で仕事が軌道に乗ると、ささやかな成功体験をよりどころに既存形態の維持が優先され、創造的な仕事ができなくなる、ということでした。その通りであると思いますが、ではどうすればよいかという点に関しては、相反する観点がでてくると思います。私は宇宙研に着任して23年、主に科学衛星の姿勢制御系に関する研究開発を担当してきました。最近ではJAXA月・惑星探査プログラムグループを併任し、月着陸探査計画の検討を行っています。また小惑星探査機「はやぶさ」プロジェクトにも関わっていた関係から、取材や講演会などで研究分野以外の方々とお話する機会も増えました。その経験も踏まえて意見を述べさせていただきます。

多くの研究者が「これこそが重要」と考えて研究開発の提案をしている中で、限られた予算の中からどれを選ぶかというときには、実績で選ぶことが公平と考えられます。そうすると「新しい創造的な研究」というのは採用されにくくなります。特に宇宙開発分野では、成果が出るまでに10年、20年かかるので、ささやかな成功体験をよりどころに、その分野を確実に育てていくしかない、という側面もあるでしょう。

研究開発組織は、本来ならば「実績がないけど、将来有望な研究」というのを選んで注力していくべきでしょう。しかし、それは誰が判断するのか。判断する人の個人的趣味で選ばれることはないのか。ということで、有識者を集めた「〇〇委員会」がつくられ、委員会の結論を別の観点から議論する上位の「〇〇審査会」がつくられ、ということになります。そうすると、どんどん角が取れて、真ん丸の研究だけが残ります。先日、放送作家の秋元康さんがテレビで「記憶に残る幕の内弁当はない」と言われていました。いろいろな人の意見を聞いて直していったら、全然つまらないものになってしまう。自分の良いと信じることをやれ、ということでした。しかし、国の予算で実施する我々の研究の場合、国民や政府に納得していただく必要があります。国民の皆さまから多くの支持をいただいた「はやぶさ」にしても、プロジェクト開始時には「小惑星なんかに行って何の意味があるのか」とか「こんな計画、できるわけないだろう」と言われた記憶があります。逆に考えれば、どうして当時の宇宙研執行部や

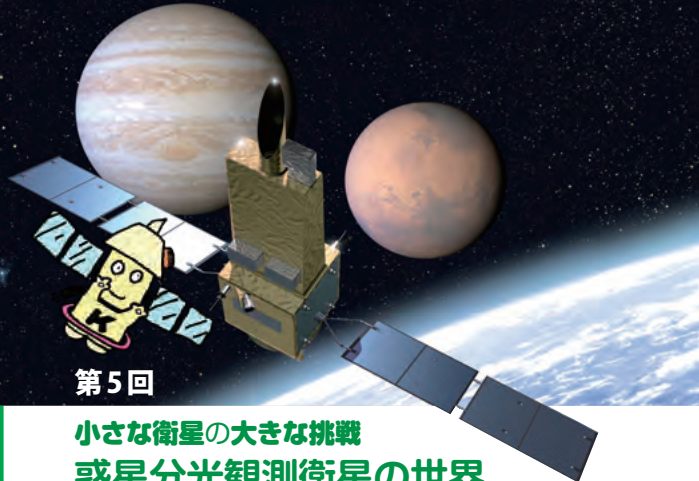
文部省はこの計画を認めたのか、ここに解決の糸口があるかもしれません。

とんがった革新的な研究を生み出すには、選定・審査の仕組みはなるべく少人数、なるべく階層を少なくする必要があります。そのためには、選定・審査する委員会などが、宇宙研内はもとより、JAXA内、政府、国民に対して絶大な信頼を得て、フリーハンドを持っていなければなりません。幸い、宇宙研は、これまでの成果に関しての評価は高いと思います。最近、計画の中止、コスト増加などの問題があり、信頼を失いかけているところもありますが、そこは早急に対策を取って改善していくべきです。その上で、今後の宇宙科学について戦略的に考え、ボトムアップ提案を競争的に選んでいく部分と、トップダウンで力を入れていく部分をバランスよく実施していく必要があると思います。

管理業務が肥大化していくということは、業務の管理がちゃんとできていない証拠でもあります。いわゆる研究開発に限らず、管理業務においても業務を効率化していくべきと考えます。例えば、Aさん（あるいはA委員会）が「こうすべき」とした判断を上位のBさん（あるいはB委員会）が逆の結論を出すのであれば、研究当事者はどうしたらよいのか分からなくなりますし、審査にかかった時間も資料などの準備にかかった時間も無駄になってしまいます。一つの観点で判断するのは一ヶ所にすべきです。なお、研究としてはこうする方がよいのだが、予算の制約、契約の透明性、情報セキュリティなどを考えると、現計画では問題あり、ということはあると思います。このような別の観点での評価は必要ですが、その場合にも、できるだけ並列に（同時に）判断を行って、後戻りが少ないようにすべきです。信頼性設計と同様に、なるべく直列システムを減らして並列システムとすべきだと思います。

以上、私の意見をまとめると、二つでしょうか。一つは徳留先生と同意であり、創造的な研究をどんどんやっていく。そのために、少人数の信頼されたメンバーが研究提案を選定し、真に「できる」メンバーに任せていく。もう一つは、徳留先生のご意見と逆に聞こえるかもしれませんが、宇宙研が十分な信頼を得て、かつ効率的に研究を進められるように、管理体制の改善・強化も重要ということです。

読者の皆さまには反論もお待ちしております。ご意見をお待ちしています。（はしもと・たつあき）



小さな衛星の大きな挑戦 惑星分光観測衛星の世界

構造の話

竹内伸介

宇宙飛行工学研究系 助教

惑星分光観測衛星は、衛星下部のバス部と、その上に搭載されるミッション部とで構成されています。タイトル絵下側の立方体と左右の板（太陽電池パネル）がバス部、その上に載っている竹やり状の筒（望遠鏡フード）の付いた直方体がミッション部です※。バス部が約240kg、ミッション部が約110kg（NESSIE含む）あります。

ミッション部は全体が望遠鏡になっています。直方体はほぼ空洞で、フードから入ってきた光（極端紫外線）は直方体の底の鏡で反射され、右肩の箱の中にある観測装置に集められます。光軸の精度要求が高いため、直方体は熱変形が小さいCFRP（炭素繊維複合材料）表皮のハニカムパネルを組み合わせてつくられています。

一方バス部は、これまでの連載でも触れられているように、一般に衛星で共通に必要な機能を集め、いろいろな衛星で使える標準バスとして設計されています。バス部の中身は図1に示すようにさまざまな機器が詰まっており、ミッション部とは逆に密度がかなり高くなっています。バス部は、安価なアルミ表皮のハニカムパネルを使用しています。

「標準バス」という以上、標準化のために、ミッション部の設計にはある程度制約があります。例えば、バス部上面にはある形状に取り付け用のメネジがあり、ミッション部はこの形状に合わせて取り付け部を用意します。それ以外に構造では、ミッション部の重量・重心高さ・偏心・外形の最大寸法・固有振動数などが制約になります。ほかに熱・電力などの制約もありますが、制約を満たすミッション部を設計することで、従来より容易に衛星をつくることができます。とはいうものの、皆さん欲張ってミッション部にいろいろ詰め込み、結局、重量超過で苦労する場合も多いのですが。

ここで、標準バスの構造設計で苦労したことをご紹介しましょう。図2は、この標準バスを使って計画中的ジオスペース探査衛星です。ご覧の通り、±Z面で大半の機器が入れ替えられており、ほかの面でも一部機器の位置を入れ替えています。太陽電池パネルも形状が変わっています。このような

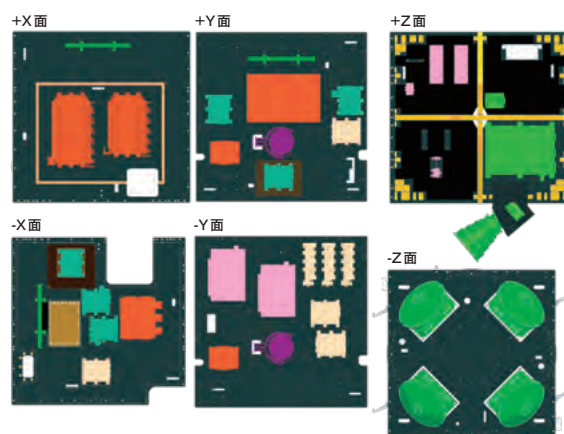


図1 惑星分光観測衛星バス内面機器配置図

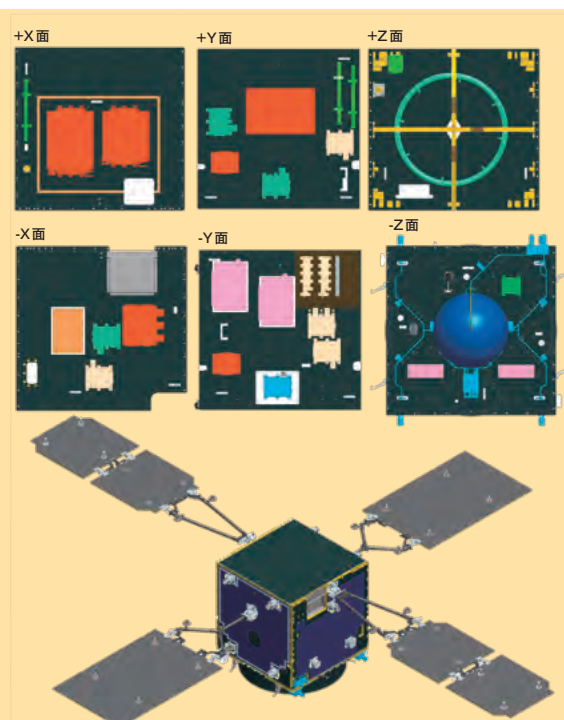


図2 ジオスペース探査衛星バス内面機器配置図およびバス外形図

変更柔軟に対応するため、例えば一部機器の底面形状を共通化して入れ替えを容易にし、さらに各面に付く機器の重量が偏らないように調整しています。太陽電池パネルも、パネル間ヒンジや保持解放機構などを共通化し、さまざまな連結方法・形状に対応可能になっています。また当然、構体（ハニカムパネル）も共通設計です。構体は、ロケットでの打上げ時にバス搭載機器重量と、さらにミッション部重量を支える必要があります。ミッション部重量は100～200kg程度を想定し、最大重量でも強度上大丈夫な設計です。つまり、この構体は惑星分光観測衛星のミッション部には強度が余る、すなわち余分に重くなっています。それがこの標準バス構造の最大の欠点で、開発初期から分かっていたが、コストなどの問題もあって解決できませんでした。

このように、惑星分光観測衛星はバスの標準化（＝コスト削減）を行った結果、実は少し重い衛星となっています。構造担当としては少し残念ですが、逆に打上げ時の強度には余裕があります。この記事が刊行されるころにはちょうど打上げが差し迫っていると思いますが、安心して打上げを見守っていただければと思います。（たけうち・しんすけ）

※厳密には立方体、直方体ではありませんが、文中ではそのように表現します。

東へ西へ、南へ北へ、 高地へ低地へ

宇宙物理学研究系 助教 朝木義晴

6月10日～16日：チリ共和国サンティアゴ

6月8日、成田空港からチリ共和国の首都サンティアゴへ向け、出発しました。台湾中央研究院の松下聡樹さんと共に、ALMA（アルマ）合同観測所（Joint ALMA Observatory：JAO）のエキスパート・ビジターとして赴くためです。

ALMAは国立天文台が中心的な役割で参加している国際プロジェクトで、口径12mないしは7mのミリ波・サブミリ波望遠鏡を66台、標高5000mのアタカマ高原に設置し、この波長域で史上最高の感度と解像度を実現する超大型天体観測装置です。アタカマ高原は、宇宙からのミリ波・サブミリ波を吸収してしまう大気中の水蒸気量が、低地と比べて10分の1から100分の1となる乾燥地です。それでも水蒸気はALMAにとって難物で、特に解像度を上げていく観測モードで、その影響を大きく受けます。私は宇宙研に採用される前にALMAのような装置で水蒸気の影響を軽減する観測手法について研究したことがあり、その経験と実績を買われ、ALMA高解像度観測のトラブル・バスターとなるべくJAOに招かれたのでした。一方、私の方は「将来のスペース干涉計プロジェクトはミリ波で」との考えを持っており、人脈づくりと最新のミリ波観測システムの勉強をするという思惑もありました。

サンティアゴは南緯33度に位置するので、季節は真冬で朝方の気温は氷点下近くまで下がります。時差は13時間あり、季節も生活時間帯も日本と真反対の日々を過ごすことになりました。

6月17日～23日：ロシア連邦モスクワ

ALMAエキスパート・ビジター期間中に、ロシアの電波天文衛星によるスペースVLBIプロジェクト「ラジオアストロン」の国際科学諮問委員会がモスクワで開催されることになっていました。この委員会で私はJAXA・機

関代表委員となっており、会議に出席するためチリからパリ経由でモスクワへ渡りました。サンティアゴからモスクワのシェレメチョボ空港まで、フライトだけで17時間はかかります。

モスクワは北半球ですから、再び東西・南北大移動、季節は冬から夏に逆戻り。ホテルでは、1日目は東向きの部屋、2日目以降は西向きの部屋でした。モスクワの緯度は高いため、滞在2日目の朝は午前4時に朝日が射し込み、その日の夜は午後11時ごろまで夕日を味わうことになりました。週替わりで半日・半年の時差ボケ・季節ボケが繰り返される状況に加え、さらに昼夜の境界の曖昧さが重なり、睡眠時間の調整に大いに悩まされました。

6月24日～7月9日：再びサンティアゴ

モスクワからサンティアゴに戻り、再びALMA試験観測に取り組みました。余談ですが、今回の長いチリ滞在中、趣味の剣道を続けるため、出張前にインターネットを利用して道場を探しておき、竹刀と防具を持参しました。チリ人は陽気で気さくですが、剣道に対する姿勢はとて真摯です。数人のチリの若者が日本の大学での剣道留学を経験しており、基本に忠実に技にキレのある剣道人が多くいて稽古相手には困りませんでした。チリ滞在中の最終日も激しい稽古会に参加し、おかげで帰国のフライト中は筋肉痛に苦しめられました。

7月10日～17日：アタカマ高原

ALMAの試験を集中的に行うためアタカマ高原に赴きました。サンティアゴから国内線でおおよそ2時間、さらに空港から標高2900mの山腹基地までバスで2時間かかります。山腹基地の空気は薄く、滞在を始めて数日間は息苦しさを感しました。天体観測は夜間に行われるため、深夜シフトでの生活です。チリに来てようやく慣れてきた時差13時間の生活パターンを反転させることになり、睡眠時間の調整にまたもや苦労しました。滞在中の天候は非常に良く、夜空を横切る天の川が本当に見事でした。

7月18日～20日：三度、サンティアゴ

JAOで過ごす時間は残り2日。取得したデータを整理し、試験結果についてJAOの研究者と議論し、結果を報告書にまとめ、試験で見いだされた技術的な問題をJAOの技術検証チームと共有するための会合を持つなど、大忙しでした。

7月21日：日本へ

前日の夜は雪が舞い、翌朝には首都を取り巻く山々の頂が真っ白になっていました。午後9時のフライトでサンティアゴを後にしました。松下さんと一緒に行ったALMAの試験観測について少しだけ紹介しておくと、私たちが提案した方法は良い成果を取め、エキスパートとしてJAOから期待された役割を果たせたのではないかと思います。今回、ALMAやラジオアストロン、剣道に関わる多くの人々と交流を持つことができ、充実した旅となりました。（あさき・よしはる）



チリ剣道協会のサンティアゴ市での合同稽古の様子



宇宙雑学とその効用

宇宙雑学

宇宙関係の仕事といってもその内容は広い。宇宙の何を調べ、どんな謎を解明すべきかは、宇宙科学研究の目的であり、その決定は宇宙科学者の役割である。一方、技術関係でいえば、まず宇宙に行くためのロケットの、そして人工衛星や探査機の開発がある。システム検討をはじめ、それを具体化する基本的な機械部品や電子部品、さらにそれらの基本材料の研究、開発など非常に幅広い活動が必要になる。こういった状況において、宇宙村の中で一個人が置かれる立場は、その人の専門分野によって変わる。

例えば、一つの観測機器を衛星に搭載して宇宙のある事象を調べる役目だったとしよう。すると当然、観測事象の物理現象に精通していなければならない。次に、この事象を観測するための観測器をつくる必要がある。これまで分かっていたいなかったことを観測するのに、どこかのカタログから選び出すなんてことはあり得ない。結局、自分自身が率先してその機器開発に当たることになる。それには多くの場合、最新の電子、機械、材料技術などが必要になる。関係する広範囲な知識を得た後、やっと観測器の開発に取り掛かる。ここまでは自分の研究を実現する上での当然の仕事であるとしても、実際に観測を始めるまでには、いまだ道は遠い。観測器は宇宙で作動する以上、宇宙の環境について十分な知識が不可欠である。さらに、ロケットで宇宙に運んでいってもらうためには、耐えなければならない振動や衝撃、急激な気圧の変動などについても熟知する必要がある。こうして何年も費やして、やっと自分の観測器が完成する。

しかし、これでおしまいではない。精魂込めてつくり上げた観測器を実際に衛星に搭載してもらうためには、これから衛星

橋本正之

東京工科大学
学修支援センター 相談員
元 JAXA 宇宙科学研究所
助教授

の開発スケジュールに合わせて、打上げ前の種々の試験をクリアしなければならない。衛星への組立て試験、動作試験、恐怖の振動試験を含む各種機械環境試験、ほかの機器と相互に干渉しないことの試験、熱真空環境試験など、打上げまでにこなさなければならないハードルが次から次へと続く。自分の観測器に直接関わる試験以外にも、いわゆる待ち時間も非常に長い。観測機器担当者としては、自分はこのように無駄な時間を費やしてよいのだろうか、これでは同じ専門分野の仲間たちに後れを取ってしまうのではないかと焦る。もちろん、誰もが自分の観測のためにもものすごく頑張ってくれていることは重々分かっているのだが……。

いよいよ打上げとなる。衛星は無事軌道に乗り、自分の観測器も健全であることを確認できたときは、これまでの長かった時間がうそのように感じられる。しかし、ここまで来るのに自分の専門分野以外に何と多くのことに関わったであろうか。自

分の観測装置を衛星に載せるということは、単に自分の担当する観測器をちゃんとつくり上げればよいということではないと実感する。一観測担当者になるには、自分の専門分野以外にもかなりの広範囲な宇宙技術の知識が必要となる。つまり、一観測者にとっては膨大な「宇宙雑学」を身に付けることが避けられない。

宇宙雑学の効用

そんなわけで、宇宙村で仕事をするかなりの人は「宇宙雑学」のために、自分が本来専念すべき仕事に集中できないという悩みを持つ。これはある程度、宇宙村で働く人たちにとっての宿命かもしれない。

一方、この「宇宙雑学」なるものは決して無駄ではない。まず宇宙村で全体の指揮を執る者やシステム全体の調整役をする人にとっては、このような広い知識は「宇宙雑学」ではなく自分の専門そのものとなる。広い知識を持たなければ良い仕事は不可能である。次に、そのような仕事が任務でなくとも、そこで得た知識はいろいろな場所で役に立つ。例えば、後輩たちの育成には、至る所でこれまでに得た広い知識の出番となる。とうの昔に定年退職した私も、脳細胞の老化防止を兼ねて若い大学生相手の学修相談のアルバイトをさせてもらっているが、ここでも宇宙研時代の「宇宙雑学」が大いに役立っている。

少し特殊な例としては、衛星、探査機健康状態を常時自動的に見守る自動監視・診断システムが挙げられる。ここには打上げ後の運用を含めた広範囲の豊富な経験と知識が有機的に組み込まれており、その内容によって性能が決まる。長い貴重な時間を費やして得た知識、経験を今後の科学の発展のために活用できることを考えると「宇宙雑学」もまんざら捨てたものではないと思うこのごろである。これも老化現象の現れか？（はしもと・まさし）



これは本業or雑学？（2006年7月、M-V-6号機／すざく、クリスマス島ダウンレンジ局にて）

燃焼のメカニズムに魅せられて

宇宙飛翔工学研究系 教授

堀 恵一

—— 燃焼の研究をされているそうですね。

堀：化学が専門で、固体ロケット用燃料の燃焼について研究をしています。ロケット用燃料は実績が重視されます。現在、使われている燃料は、ハレー彗星を観測するために1985年に打ち上げられたM-3SIIロケットの燃料と基本組成が同じです。それに替わる新しい燃料と推進装置の開発を続けてきました。

—— 新しい燃料に求められているものは何ですか。

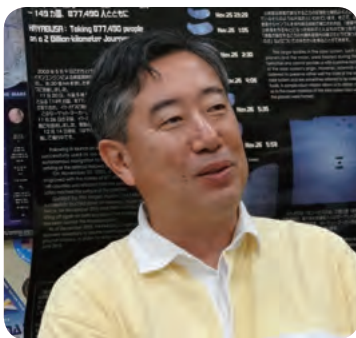
堀：推力を5～10%アップさせる高性能化です。推力が強くなれば、その分、同じ大きさのロケットでより重い人工衛星を打ち上げたり、ロケットを小型化したりすることができます。低環境負荷もキーワードです。これまで使われてきた固体ロケット燃料は、燃やすと塩化水素ガスやアルミナ微粒子が、微量ですが発生します。それらを発生しない燃料が必要です。そして高性能化や低環境負荷を低コストで実現することが求められています。

—— 新しい燃料と推進装置を開発する難しさは？

堀：高温・高圧で進む燃焼過程で何が起きているのか、よく分からないという点です。過去の経験の蓄積があり、そこから得られた知識に基づき新しい燃料と推進装置の開発を行っています。ただし、それらの知識はノウハウであって、燃焼のメカニズムそのものが十分に分かっているわけではありません。最近では、レーザー技術により、燃焼過程を観測できるようになってきました。しかし肝心なところはやはり見えません。コンピュータ・シミュレーションの技術も向上していますが、燃焼過程は複雑で完全に再現することはできません。燃焼現象を包括的に記述できる理論がまだないのです。そのように現象が複雑で理解するのが難しいところが、燃焼を研究する面白さでもあります。

—— もともと宇宙や化学に興味があったのですか。

堀：10歳のとき、アポロ11号が月に行きました。とても衝撃的で強く印象に残っています。私は工学よりも、現象のメカニズムを理解する基礎科学に興味があり、学部では基礎的な化学反応の素過程を探究する研究室に入りました。その研究も面白かったのですが、大学院ではもう少し複雑な現象の研究をしたいと思います。同じ化学分野でロケットの燃料の研究をしている研究室があり、そこへ入ることにしたのです。



ほり・けいいち。1959年、兵庫県生まれ。1987年、東京大学工学系大学院博士課程修了。工学博士。日本学術振興会PDを経て1990年、宇宙科学研究所助手。2009年より現職。

—— スポーツや音楽が趣味だそうですね。

堀：子どものころピアノを習い、高校を卒業するまでよく弾いていました。10年ほど前、自宅の近くにサックス教室があることを知り、通い始めました。ジャズのサックスの音色が好きで、ずっとやってみたかったのです。

最初は音を出すことも難しいのですが、その難しさがとても面白いところでした。

スポーツは中学・高校と軟式テニス部でした。その後、スキーを始めましたが、最近では時々ゴルフをやるくらいです。

スポーツ観戦も好きです。1998年に客員研究員として赴任したペンシルベニア州立大学はアメフトの強豪校です。そのチームを熱烈に応援するようになり、最近ではインターネット中継で観戦しています。時差がつかないところですが、9～11月のレギュラーシーズンの日曜日早朝には、パソコンの前にいます。アメフトはとても複雑なゲームで、戦術が多彩なところが魅力ですね。

お酒と料理も趣味ですが、やはり最も熱中してきたのは、仕事である燃焼の研究です。複雑な燃焼のメカニズムを知りたいという思いで研究を続けてきましたが、まだ分からないことだらけです。

—— 新しい燃料と推進装置を、いつごろ導入できそうですか。

堀：高性能化と低環境負荷を実現するため、新しい固体燃料と液体酸化剤を組み合わせた次世代型ハイブリッドロケットの開発を進めています。5年以内に、まずは小型の観測ロケットに導入できるようにしたいと思います。そして、観測ロケットで実績を積み、大型ロケットに採用されることを目指します。

人工衛星の軌道制御などを行うスラスターの燃料には、ヒドラジンという有害物質が使われてきました。そのヒドラジンを使わない新しい燃料を用いた低公害・高性能の新型スラスターの開発も進めてきました。有害物質がなくなれば、それを扱う高価な装置も不要となり、コストを下げることができます。その新型スラスターも数年以内には人工衛星に搭載したいと思います。私たちが長年進めてきた新しい燃料と推進装置の開発は、この先5年がとても重要な時期になります。

ISAS ニュース No.389 2013.8 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ピニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

今月の「ISAS ニュース」も多様な話題で盛りだくさんでした。さて、イプシロンロケットの打上げがいよいよです。「ひので」を軌道投入したM-Vロケットの最終打上げからもう7年がたとうとしています。月日が流れるのは早いです。(清水敏文)

* 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