空へ挑み、宇宙を拓く
JAXA 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所
ISAS ニュース
ISSN 0285-2861
2013.11
No. 392

能代ロケット実験場の特別公開で行われた
秋田大学によるハイブリッドロケット燃焼試験の様子

宇宙科学最前線

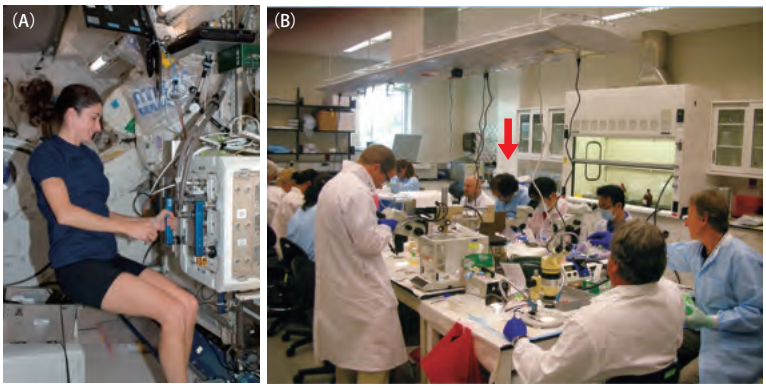
宇宙と老化

学際科学研究系 教授
石岡憲昭

はじめに

私たちは生まれるとすぐに加齢が始まり，加齢に伴い老化が始まります。そして死んだときが寿命ということになります。宇宙環境に適応する際，宇宙飛行士に急速に現れる異常な骨量の減少や筋の萎縮などさまざまな生体の機能変化は，老化による骨量の減少や筋力の低下などの諸症状に似ており，人の老化のすべての特徴を備えているといわれます。ただし，地上で長期間の加齢に伴う老化の過程が，宇宙では短期間で進行します。筋肉は寝たきりの人の2倍の速さで弱くなり，骨は骨粗しょう症患者の10倍の速さで弱くなるといわれています。さらに，宇宙飛行士は，地上でさらされる平均的な自然放射線量の約半年分の宇宙放射線量を1日で浴びています。また，狭い宇宙船や宇宙ステーション内で長期間生活する状況が精神や心理状態にもたらす影響など，宇宙では老化現象を加速させると思われるストレスの要因が多く存在しています。

今回，国際宇宙ステーション（ISS）での13週間にわたるマウス飼育実験とスペースシャトルでの13日間のマウス飼育実験，それぞれのサンプルシェア研究に参加して，マウスの体毛付き皮膚を得ることができました。それらの皮膚を用いて遺伝子の発現解析を進めています。遺伝子発現解析は，微小重力や宇宙放射線の影響だけでなく，酸化ストレスや細胞周期，老化，寿命に関わる遺伝子群などさまざまな遺伝子の動態と宇宙環境との関係を探る上で有用です。ここでは宇宙環境と老化や寿命との関係を，細胞老化の観点から解説します。



(C) 発現変化	遺伝子	タンパク質	機能
LF，SFで発現増加	*Gadd45g*	Gadd45g	DNA損傷，ストレス応答，細胞周期，CDK1活性阻害
LFで発現増加	*Cat*	Catalase	抗酸化作用
	SOD3	Cu/ZnSOD	細胞質外，抗酸化作用
	Cdkn1a	p21	サイクリン-CDK2/，4/6複合体の活性阻害（S期移行阻害）
	Cdkn2a	p16	CDK4キナーゼ阻害，老化組織の幹細胞増殖を減退
	GPx1	GPx1	抗酸化作用，酸化障害保護作用
LF，SFともに発現減少	*Nfe2l2*	Nrf2	酸化ストレス適応反応
発現に差がほとんどないかLFで減少傾向	*SOD2*	MnSOD	ミトコンドリア，抗酸化作用
	Sirt1	Surt1	カロリー制限，オートファジィ，長寿命遺伝子
	Trp53	p53	アポトーシス，細胞老化促進，細胞の守護神

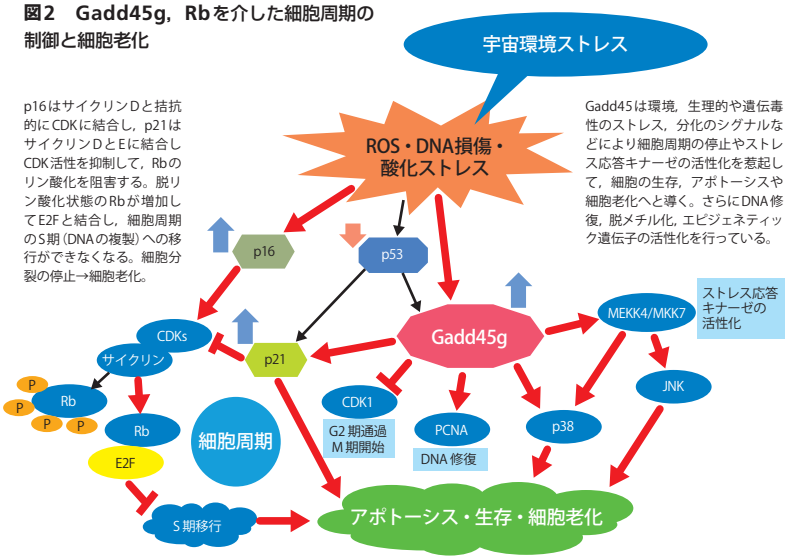
LF:Long-term space flight in ISS（長期間飛行） SF:Short-term space in Shuttle（短期間飛行）

図1
A：国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟のマウス飼育実験装置（MDS）で作業中のNASAの宇宙飛行士ニコール・ストット ©NASA
B：国際サンプルシェアの様子。矢印はNASAケネディ宇宙センター内の実験室で作業中の筆者。
C：細胞老化に関わる遺伝子群の発現変化例のリスト

細胞老化とは？

まず，細胞老化とは何でしょう？ 一般的に細胞分裂をする細胞において，細胞が分裂を停止して増殖できなくなり，その状態がずっと続いて元に戻らなくなることを「細胞老化」といいます。酸化ストレス，放射線，がん遺伝子の活性化，DNAの不安定化や損傷などによっても細胞老化が起こることが示されています。細胞老化を起こした細胞の多くは，細胞周期が停止しています。細胞老化は細胞の異常な増殖を防ぎ，がんの発生や炎症などを予防する生体の防御機構の一つと考えられていますが，長期的には老年病の要因になると考えられ，細胞老化から老年病や個体老化へと結び付く可能性があります。

図2 Gadd45g，Rbを介した細胞周期の制御と細胞老化



酸化ストレスや放射線によるストレスは，そのまま宇宙環境でのストレスに当てはまります。実際に宇宙ではどうなのでしょうか？

宇宙でのマウス飼育実験

ISSで2009年に，イタリアが開発したマウス飼育実験装置（Mice Drawer System：MDS）を用いて，野生型（WT）マウス3匹と，骨を壊して吸収する細胞（破骨細胞）の分化を抑えるタンパク質の遺伝子を導入したトランスジェニック（PTN）マウス3匹を，13週間にわたり長期飼育しました（図1A）。これは宇宙におけるマウスの最長継続飼育でしたが，残念なことにWTマウス2匹とPTNマウス1匹が健康状態などの理由から死亡しました。良好な健康状態で帰還した3匹のマウスについてサンプルシェア研究プログラムが実施され，我々の研究チームも6ヶ国20研究グループの一つとして参加，3匹分の皮膚を得ました（図1B）。その後，2011年で終了した最後のスペースシャトルミッションSTS-135でNASA小動物実験装置（Animal Enclosure Module：AEM）により13日間飼育されたマウス8匹の皮膚も得ることができました。

老化の要因の一つとして，加齢に伴う活性酸素障害の蓄積がいわれています。抗酸化応答の上昇による寿命の延長や，酸化ストレスをはじめとするさまざまな環境ストレスに対する抵抗性やDNA障害の修復能力が向上するとの報告もあります。これらの皮膚を用いて酸化ストレスや細胞周期，タンパク質合成に関与する遺伝子群，老化やDNA損傷などに関わる遺伝子群の発現変動を，DNAマイクロアレイおよび定量的リアルタイムPCR（qRT-PCR）で分析しました。

宇宙環境は酸化ストレスを上昇，蓄積させる！

太陽放射や電磁放射線（例えばガンマ線など）は生体内でヒドロキシルラジカルなど活性酸素種（ROS）を発生させ，脂質の過酸化を引き起こす連鎖反応を開始させます。ROSは酸化ストレスの主要因で，細胞老化を誘導する原因となります。宇宙環境ストレスによるミトコンドリアでのROS増加に伴う結果とも考えられますが，確かに宇宙飛行したマウスの皮膚を用いたDNAマイクロアレイおよびqRT-PCRの分析結果は，抗酸化に関わる酵素類，特にスーパーオキシドアニオンを過酸化水素に変換するスーパーオキシドジスムターゼ（SOD3），過酸化水素を除去するカタラーゼ，グルタチオンペルオキシダーゼ（GPx）の遺伝子発現が有意に増加していました（図1C）。13日間の短期飛行では大きな差ではありませんでしたが，13週間の長期飛行

マウスでの発現が大きく増加していました。さらに，グルタチオン転移酵素(GST)やNAD(P)Hキノン還元酵素(NQO1)，ヘムオキシゲナーゼ1(HO1)などの抗酸化酵素の遺伝子の発現も増加していました。これらは宇宙長期滞在における酸化ストレスの上昇と蓄積を意味し，細胞老化を引き起こす可能性が高いことを示しています。

宇宙環境は細胞周期に影響する！

細胞は一定の周期に基づいて，分裂し増殖します。この周期を細胞周期といいます。細胞周期は，DNAが複製されるS期，細胞分裂の準備を行うG2期，細胞分裂のM期，そして分裂終了から次のDNA合成開始までのG1期です。これに静止期(G0期)が加わります。完全に細胞分化した細胞や一時的に分裂を停止した細胞はG0期に入っています。細胞周期が正常に進行しているか監視するチェックポイント機構があります。

図1Cに示したように，長期間飛行によりp21やp16の遺伝子の発現が増加していました。p21は，チェックポイントの一つに関与するがん抑制タンパク質の一つであるレチノブラストーマタンパク質(Rb)のリン酸化を阻害して細胞周期のG1期からS期への移行を抑制します。さらに，短期と長期飛行で大きく発現上昇したGadd45gは，やはりチェックポイントで中心的役割を果たす酵素の一つCDK1を不活化し細胞周期のG2期の通過とM期の開始を阻害し，またp21を活性化します。よって，RbやGadd45gを介する細胞周期の抑制や停止が誘導されることになります。以上の結果は，宇宙環境は細胞老化を加速する可能性を強く示唆しています(図2)。

宇宙では寿命が延びる！

線虫（*C.elegans*）に緑色蛍光タンパク質（GFP）を結合させたポリグルタミンを発現させて蛍光観察すると，加齢に伴ってポリグルタミンの凝集体の数が増えていきます。このポリグルタミン凝集体が，宇宙環境で飼育した*C.elegans*の方が少なく(図3A)，宇宙環境が寿命に影響することを示しました。

さらに遺伝子の発現解析の結果，発現が減少する遺伝子群の中で，7つの遺伝子が寿命に関わることが分かりました。それぞれの遺伝子を地上で人為的に働かなくさせると，*C.elegans*の寿命が長くなりました（図3B)。宇宙環境では寿命を制御する遺伝子群が不活発になることを示唆する結果でした。一方，*C.elegans*の7つの遺伝子に対応するマウスの遺伝子の発現を調べたところ，2つの遺伝子の発現が宇宙飛行により同様に減少していました（図3C)。*C.elegans*で特定された遺伝子が細胞老化に関係するのか，マウスの2つの遺伝子が老化や寿命に関係するのかどうかなど，今後，詳細な解析が必要ですが，寿命に関して種を超えた共通の遺伝子が宇宙実験により特定されるかもしれません。

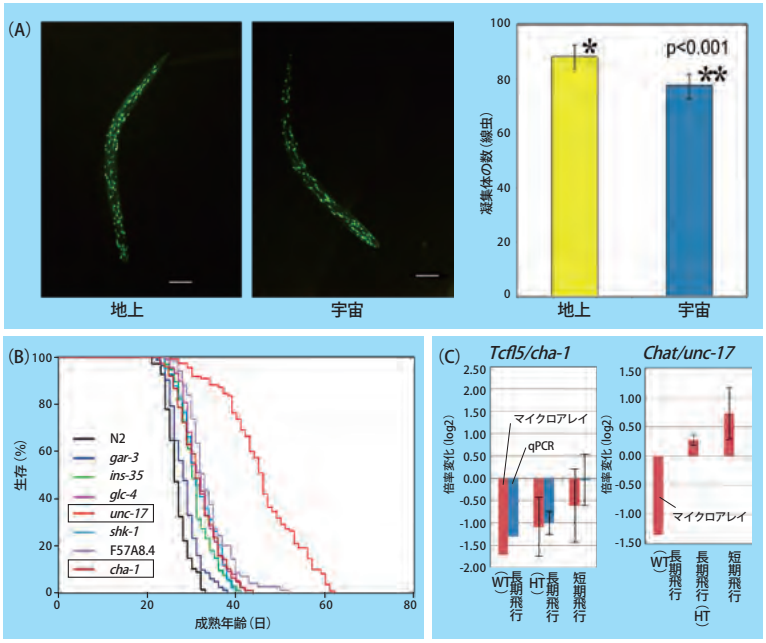


図3
A：GFP結合ポリグルタミン酸の蛍光顕微鏡像と凝集体の数
B：宇宙実験で特定された線虫の7つの遺伝子をそれぞれ地上で不活化させたときの寿命
C：線虫の寿命に関わる7つの遺伝子に対応するマウス遺伝子のうち*Tcfl5/cha-1*が長期飛行と短期飛行で，*Chat/unc-17*が長期飛行で，線虫同様に宇宙飛行で発現減少。(WT：野生型，HT：トランスジェニック)

おわりに

宇宙飛行したマウスの遺伝子解析の結果，宇宙環境は細胞老化の誘導と加速を強く示唆していましたが，*C.elegans*の宇宙実験の結果は寿命が延びることを示唆していました。宇宙での細胞老化の加速がどのように個体老化の現象につながるのでしょうか？ はたまた宇宙では生体機能の著しい低下により急速な老化現象が起こる一方で，基礎代謝の低下などにより逆に寿命が延びる可能性を示しているのでしょうか？ 老化現象解明を目的とするより詳細な宇宙実験と解析が待たれます。JAXAでは，今後の宇宙生物医学研究のために，マウスやラットなどの哺乳動物を用いる宇宙実験装置の開発検討を始めています。

宇宙環境下での宇宙飛行士の急速な生体機能変化が，地上における緩慢な老化現象のメカニズムと細胞や分子のレベルで同じであるという明確な証拠は今のところまだありません。しかし，*C.elegans*の寿命に関する遺伝子群を宇宙実験で特定できたように，哺乳動物を利用する宇宙実験を通して人間の老化に伴う生体機能変化の分子メカニズムに関する重要な知見が得られる可能性は大きく，老化や寿命に関する基礎科学から抗老化医学研究への有用な実験場として宇宙環境が機能するものと期待されます。

（いしおか・のりあき）

参考文献
- 高橋里佳，寺田昌弘，東端晃，石岡憲昭，「宇宙環境の細胞老化への影響：長期宇宙飛行したマウスの体毛付き皮膚の遺伝子解析」第27回日本宇宙生物科学会大会要旨集，p42, 2013
- 石岡憲昭，高橋里佳，東端晃，寺田昌弘，「宇宙哺乳動物実験から抗加齢医学へ」日本抗加齢医学会雑誌，9(3), 035(375)-041(381), 2013
- Y. Honda, A. Higashibata, Y. Matsunaga, Y. Yonezawa, T. Kawano, A. Higashitani, K. Kuriyama, T. Shimazu, M. Tanaka, N. J. Szewczyk, N. Ishioka & S. Honda, Genes down-regulated in spaceflight are involved in the control of longevity in *Caenorhabditis elegans*, Scientific report, 2:487, DOI: 10.1038/srep00487, 2012.

第1回「宇宙物質科学シンポジウム」報告

シンポジウム2日目講演終了後の集合写真

10月16日から18日にかけて，国際シンポジウム「第1回宇宙物質科学シンポジウム」が相模原キャンパスで開催されました。小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰ったサンプルの国際公募研究が開始されて最初の成果発表の場でもあり，海外所属機関研究者約30名を含む90名近くの研究者が一堂に会し，朝から夕方まで丸3日，ほぼ満員状態の2階大会場で非常に活発な議論が行われました。

初日は台風26号が関東に最接近した日であり，またアメリカ政府機関閉鎖の影響でNASA職員の参加がキャンセルされるなど，心配事が重なりましたが，11ヶ国の研究者により計60件以上の講演が行われました。

本シンポジウムの狙いは，「はやぶさ」サンプル分析結果の共有をきっかけとして，将来のサンプルリターンミッションに関する発表，新しい分析技術に関する発表，サンプル分析に隣接する分野と連携しての統合サイエンスの可能性をテーマとし，サンプルを持ち帰って詳細分析をすることはより広い範囲の惑星科学にどれだけのインパクトを与えるかを関係者がそろって考え，感じる場とすることでした。

「はやぶさ」サンプルの国際公募研究の成果については，まだ半分程度が分析進行中ということで，非破壊分析などの成果や，これから得られる成果の意義について語る講演もありましたが，「はやぶさ」が持ち帰ったサンプルの多様性についての講演や，イトカワ表層で微粒子に刻まれた情報から小惑星の活動史やイトカワ形成前の情報に迫る研究成果も発表され，各自が論文投稿前の情報を惜しみなく披露していました。

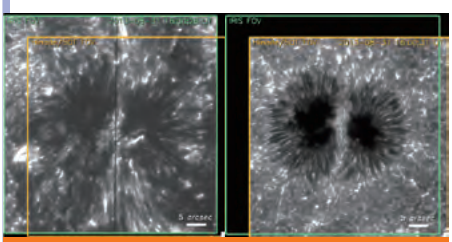
今回のシンポジウムの特徴は，こういった太陽系物質科学研究者だけでなく，地上観測や，実験，理論分野の研究者も多く参加したことです。そのため，参加者の感想として，「イトカワから持ち帰ったサンプルの分析結果を初めて直接聞くことができた。おかげで，これまで信じることができなかったことが信じられるようになった。新しい研究の動機付けにもなった」というのが印象的で，シンポジウム開催の狙いが一つかなったと感じた瞬間でもありました。もう一つ，「はやぶさ」帰還直後は「おかえり，はやぶさ」だった研究者のあいさつが，このシンポジウムでは「ありがとう，はやぶさ」に変わっていた，ということも付け加えて，報告の終わりとしたいと思います。

（安部正真）

「ひので」とIRISとの共同観測を開始

6月27日，NASAの新衛星IRISが打ち上げられました。太陽観測衛星「ひので」が捉えた活動的な彩層の動画は世界に多大なインパクトを与え，その結果開発されたのがIRISです。「ひので」によって陽の目を見た彩層の重要性。「コロナ加熱問題」の解明のためにも，彩層中でのエネルギーの振る舞いはとても大事です。しかし，「ひので」のみでは彩層物理量の精密な測定ができません。IRISによる分光観測が加わることで，「ひので」の研究は新たなステージに入ります。

そのためには，両衛星で有意義な共同観測を実施する必要があります。そこで，IRIS打上げの翌週より2ヶ月間，IRISの本拠地であるロッキードマーティン太陽天体物理学研究所（米国カリフォルニア）に単身乗り込み，衛星の初期運用に参加しました。7月17日以降，私は衛星指向安定精度の解析を集中的に行い，IRISチームメンバーと協力して周回変動の特性などを調べ，機上ソフトウェアの改修が行われました。その結果，周回変動による視野のずれを1秒角以下に，指向精度を3秒角以下に抑えることができ，1ヶ月で「ひので」との共同観測開始に必要な条件を整えることができました。


IRISと「ひので」による可視光望遠鏡の共同観測の一例。ターゲットは黒点内にある亀裂。

こうして8月末からIRISの本観測が，そして同時に「ひので」との共同観測も開始されました。ここで最も苦心したのは，位置合わせです。観測視野の狭い両衛星が同じ領域を見なければ意味がありません。そこで，朝から午後にかけてIRISの観測計画を一緒に立案し，その夜に「ひので」の朝会に電話参加して観測位置を厳密に伝え，運用終了後に次の観測計画のドラフト作成をするという方策で，何とか対応しました。その後，IRIS運用者と「ひので」との共同観測における注意事項の確認およびルール制定などを行って，IRISと「ひので」の共同観測は順調な滑り出しを見せています。彩層のスペクトル解析はかなり難しいですが，今後の成果にご期待ください。

（岡本丈典）

銀河フェスティバルin能代 開催

10月5，6日の2日間，「銀河フェスティバルin能代」が開催されました。能代ロケット実験場の50周年を機に昨年から開催されているこのイベントは，能代市内4ヶ所の会場を無料シャトルバスで結ぶという大掛かりなものです。JAXAからも，能代ロケット実験場に関わりの深い宇宙研をはじめ各本部から出展がありました。

5日朝に能代山本広域交流センターで行われた開会式は，能代市の教育長と宇宙研の常田佐久所長のあいさつで始まりました。続いて，徳留真一郎准教授によるイプシロンロケットについての講演。1時間半にわたって，イプシロンロケットの開発や打上げ実績の話をたっぷり（6日は阪本成一教授の講演）。午後は筆者たち（羽生・山村）による宇宙学校スペシャル。会場は若干寂しかったのですが，逆に質問一つ一つにたっぷりと時間をかけて答えることができました。小学校低学年くらいの男の子からの専門的な質問には，一瞬たじろぐ場面もありました。休憩時間には，9月19日に発表された，「のしろ（Noshiro）」と命名された小惑星の認定書の授与式もありました。

ほかの会場も紹介しましょう。能代エナジアムパークでは，久保田研究室によるローバの展示。完成したばかりの本邦初公開という新機種の実演では，来場者が操作できるということで，大変な人気でした。子ども館では，常設のM-3SⅡロケット試験機などの実物展示が迫力でした。

さて，能代ロケット実験場の特別公開では恒例行事となった，秋田大学のハイブリッドロケット実験が，真空燃焼試験棟海側のエリアで実施されました（表紙）。昨年は慣れない場所での作業に皆さん苦労していましたが，今回は準備を万全に進めて初日開場前のリハーサルはバッチリでした。能代ロケット実験場の特別公開にはこれを目当てに来場する方もいらっしゃるようで，人気の展示です。ロケット点火後，予想していなかった音の大きさに大人でさえ少々驚くのですが，小さなお子さんに至っては，突然の出来事にびっくりして飛び上がり，お父さんの後ろに逃げ込んで股の間で耳をふさぎつつわずかに顔を出して眺めているといった具合です。2日間でリハーサルを含め計7回の実験を行い，各回すべて問題なく終了しました。

（羽生宏人，山村一誠）

ノーベル賞を生んだ地で「宇宙学校・ひだ」を開催

10月27日に岐阜県飛騨市の船津座で「宇宙学校・ひだ」が開催されました。飛騨市神岡町は小柴昌俊先生がノーベル物理学賞を受賞する契機となった研究施設「カミオカンデ」があった場所であり，現在もスーパーカミオカンデなど世界最先端の宇宙物理学の研究拠点があります。

当日は，小学生，中学生やその保護者，約180名が参加し，2時限の授業を受講しました。最初に，阪本成一校長先生よりJAXAの果たす役割の説明があり，さまざまな分野の研究者が力を合わせて宇宙の成り立ちなどについて研究していることを教わりました。

1時限目の授業は「日本の惑星探査機いろいろ」というテーマで石井信明先生から，日本が打ち上げたいろいろな探査機について説明がありました。特に金星の大気を観測する「あかつき」について，模型を使い，「探査機に必要なものは何だろう」といった質問を会場に投げ掛けながら，小惑星探査機「はやぶさ」との違いなどにも触れて説明されました。石井先生からは「地球と条件の違う惑星などを調べて比較することで，逆に地球を知る手掛かりが得られる」など，今まで思ってもいなかった研究目的の一端を知ることができました。会場では「探査機の電池が切れたらどうなりますか？」「探査してみたい惑星はどれですか？」など多くの質問が飛び交いました。

宇宙に夢中！の飛騨の子どもたち

2時限目の授業は「宇宙線で見る神岡と宇宙科学」というテーマで福家英之先生から，気球による観測によって人類が初めて宇宙線の存在を知ったことなどの説明がありました。神岡にある東北大学の研究施設「カムランド」にもJAXAの気球技術が活かされていることなど，とても身近でありながら今まで知らなかったことを学ぶことができました。会場からは「気球をいろいろなところで飛ばして分かることは？」「ニュートリノは天気の悪い日でも観測できるの？」といった質問がたくさん飛び出しました。

JAXAの興味深い研究の一端を知ることができる貴重な時間でした。本当にありがとうございました。

（飛騨市役所／森田雄一郎）

イプシロン打上げオペレーション参加記（下）

イプシロンロケット試験機の打上げオペレーションには宇宙研に所属する5名の大学院生が実習として参加しました。
先月号に引き続き，北海道大学大学院の井上遼太さんと総合研究大学院大学の外岡学志さんの感想をご紹介します。

現場で感じたイプシロンの「次」

私は，ロケットの軌道計画の立案などを行うOP（オペレーション）班に配属されました。実習中は，任された仕事を全うする中で，現場の方々から貴重なお話を伺うことができました。イプシロンロケットはJAXA統合後に初めて新規開発されたロケットということもあり，M-Vロケットのオペレーション手法とH-ⅡAなどで行われてきた手法それぞれを融合，深化させるための現場での努力が印象に残っています。しかし，それ以上に印象的だったのが，全員がイプシロンの「次」を見据えて仕事をしているということでした。

イプシロンは，打上げシステム全体の革新という点で，すでに世界の先を行くロケットです。しかし現場では，さらにその先を創り出そうという心意気が随所に見られました。それは単に現状を改善することにとどまらず，宇宙への敷居をドラスティックに下げるためのまったく新しい宇宙輸送システムを創り出すことにまで及んでいました。そしてそのことが大きなモチベーションとなり，精神的にも体力的にも大変厳しい状況でもつぶれないチームがつくり上げられていました。

私の指導教員でもある森田泰弘プロジェクトマネージャーは，普段宇宙研でニコニコしながら指導してくださいます。そしてそれは，今回の打上げ直前やトラブル発生時といった最もストレスがかかるときでもまったく変わることなく，いつも会見で見せる笑顔で現場を指揮していました。私は最初，なぜあそこまで追い詰められた状況でそのように振る舞えるのか不思議で仕方ありませんでした。しかし実習中に森田先生を見ている中で，先生が「次の世界を創り上げる」という強い熱意を持って，どんな状況でも楽しんで仕事をしていることが伝わってきました。そんな森田先生や，主に学生の世話をしてくださった羽生宏人先生，そのほか現場の方々とお話をする中で，気付けば私たち学生も次の宇宙開発はどうあるべきか，熱く議論していました。

私たちは，今回の実習で学んだことを最大限に活かし，イプシロンの「次の次」を創り出していきます。（北海道大学大学院 井上遼太）

現場の最前線の緊張感

打上げオペレーションに参加して感じたこと，それはロケットを打ち上げているのが「人」であったということです。私はこれまでロケットの打上げはテレビでしか見たことがありませんでした。そこに人の姿はほとんどありません。しかし，現場には打上げを支援するたくさんの関係者がいて，それぞれの人が自分の仕事を全うし，打上げ成功に向けて全力で仕事をしていました。そして打上げ日が迫ると，現場の状況は目まぐるしく変化し，その中で下される判断や人の動きは加速していきました。人がうごめくそこは，まさに現場の最前線でした。

私は，打上げオペレーションでOP班に参加して，上空風の計測を行いました。ロケットの飛翔に上空風の情報は欠かせません。上空風のデータはロケットの姿勢制御プログラムの基礎となるばかりか，ロケットの発射判断にも用いられる重要なものです。OP班は8月上旬から打上げまで毎日，朝から一定時間ごとに，ゾンデと呼ばれる測定器を搭載した気球を使って，高度30km付近までの風データを取得しました。私たち学生は，野中聡先生や佐伯孝尚先生，山本高行さん，佐藤峻介さんにご指導いただきながら，取得データの整理を行い，OP班の作業のお手伝いをしました。

毎日続けてきた風計測ですが，打上げ日の緊張感はそれまでに体験したことのないものでした。風データがなければ発射できないかと思うと，作業にいっそうの力が入りました。作業には慣れてはきたものの発射直前の緊張感にのみ込まれてしまった私たちのところに，風の状況を聞こうと森田泰弘先生が時々笑顔でいらっしゃいました。発射直前にもかかわらず関係者と気さくに語らう森田先生のその振る舞いに，リーダーとしての在り方を教えていただいた気がします。

そして迎えた発射時刻。皆がロケットに向かって口々に「いけ！ いけ！」と力を込めて呼び掛けていた様子が脳裏に刻まれています。ロケットが奏でる音響の体感，上空に描かれる噴煙の軌跡。すべてが感動的でした。

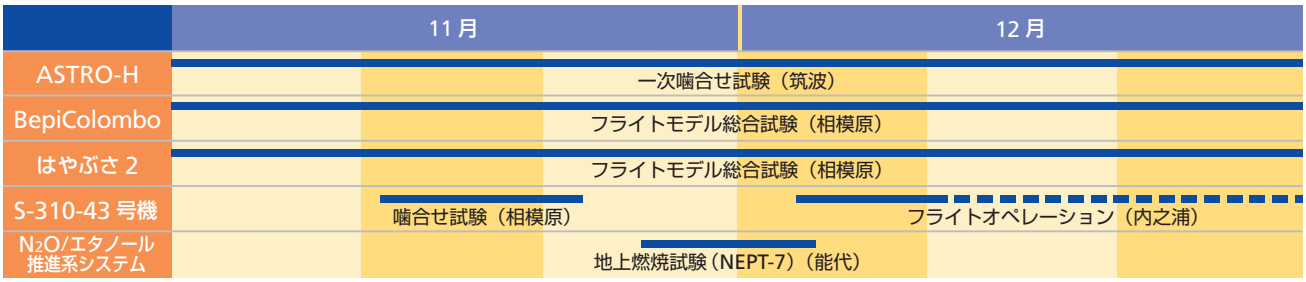
今回イプシロン試験機の打上げオペレーションに参加するに当たってお世話になった方々に深く感謝申し上げます。この貴重な経験を忘れることなく，そして将来の宇宙開発に貢献できるよう努めていきたいと思います。

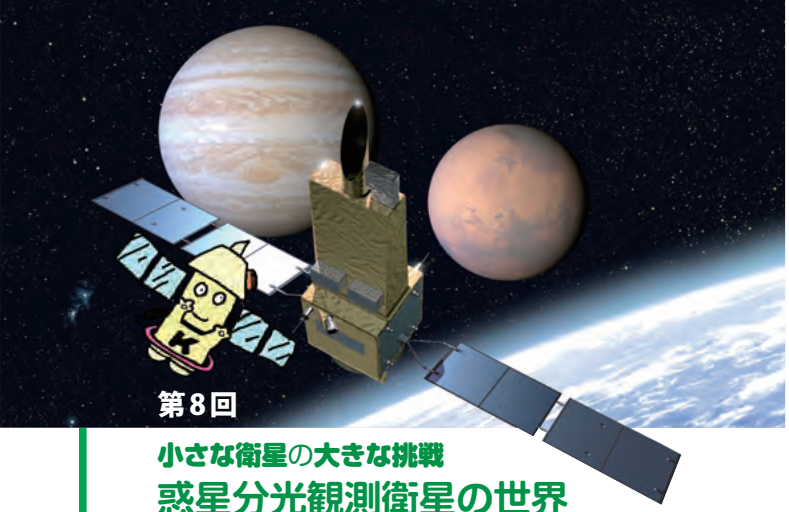
（総合研究大学院大学 外岡学志）

上空風を計測するゾンデを搭載した測風気球の放球

学生実習を通じて 試験機のオペレーションとはいえ，これまでのロケットオペレーションと同様にこの分野を志す学生が現場実習に参加できたことは大変意義深く，参加学生の皆さんがロケットの打上げに関して共通的に重要なことを感じ取ったようだということは，お分かりいただけたかと思います。ロケットのこと，射場のこと，人や町との関係のこと，宿のこと。すべて現場にいなければ分かりません。長期間の滞在で体調を崩さないかと心配していましたが，みんな意外とタフですね。（学生班統括 羽生宏人）

ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール（11月・12月）





第8回

小さな衛星の大きな挑戦

惑星分光観測衛星の世界

望遠鏡の力を借りて，姿勢の制御を

坂井真一郎
宇宙機応用工学研究系 准教授

本連載も第8回となりました。今回は，惑星分光観測衛星「ひさき」の姿勢制御システムについて述べたいと思います。これまで紹介してきた通り，「ひさき」の目的は惑星の分光観測です。そのためには，衛星の姿勢を精密に制御して望遠鏡を狙った場所に向け，惑星の極や赤道など観測したい場所を分光器と呼ばれる観測装置で正しく捉える必要があります。必要とされる指向制御の精度は，ざっと5秒角。

これは確かに厳しい要求ですが，今まで科学衛星で実現したことがない，というほどの精度でもありません。ただし，「ひさき」のコンセプトである標準バスを使って実現するとなると，話は違ってきます。5秒角の指向精度を実現するためにはさまざまな問題をクリアする必要がありますが，その一つに構体の熱歪みという問題があります。日陰・日照の変化，太陽方向と衛星姿勢の関係，地球からの太陽反射光の当たり方などによって，衛星内の温度は軌道上でさまざまに変化します。一般に暖められたものは膨張し，冷えたものは収縮しますから，温度の変動は衛星にわずかな歪み（熱歪み）をもたらします。特に，衛星各部の熱歪みにより，姿勢制御の基準となる恒星センサと望遠鏡光軸との関係にずれが生じると，大きな問題となります。5秒角，という精度を論じる場合，この熱歪みは無視することができません。

フルオーダーメイドの衛星であれば，なるべく熱歪みの

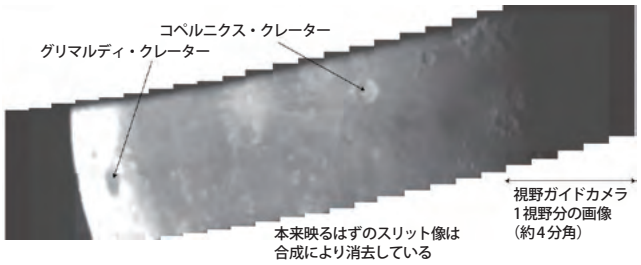


図1　視野ガイドカメラが捉えた月面とクレーターの画像

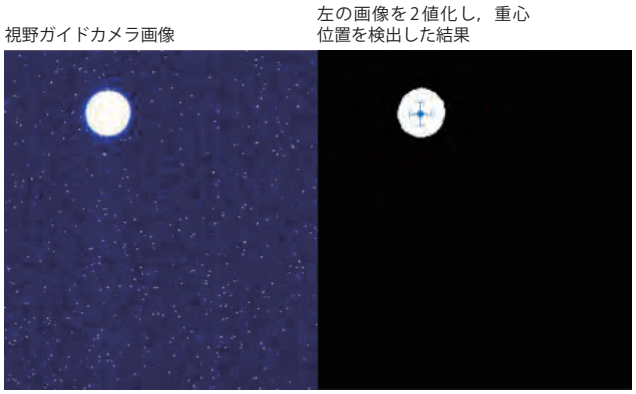


図2　視野ガイドカメラが捉えた木星の像と画像重心位置の演算結果

小さな材料で衛星をつくるといった対策があり得ます。しかしながら，このようなアプローチは熱歪みが小さい専用バスを特別に設計するということになりますから，「ひさき」で採用している標準バスという考え方にはなじみません。では，どうしたか。「ひさき」ではこの問題を，姿勢制御系と惑星観測望遠鏡とが協調する仕組みを設けることで解決しています。熱歪みの結果生じる誤差，つまり実際に望遠鏡で見えている方向と観測したい方向との誤差を，望遠鏡を制御する計算機から姿勢制御用の計算機へ，時々刻々送ってもらうようにしたのです。

この誤差を検出するための仕掛けが，視野ガイドカメラと呼ばれる装置です。望遠鏡が捉える惑星像は，最終的な観測装置である分光器の入り口（スリット）に比べて大きいため，スリットに入らない部分の像が分光器の入り口付近に映ることになります。視野ガイドカメラは，この“はみ出している”像を捉えて，望遠鏡制御用の計算機に送ります。計算機はその像の重心位置を計算し，およそ3秒に1回程度，姿勢制御系へ知らせてくれます。ですから，その重心位置の目標値をあらかじめ教えておけば，どのくらい姿勢を修正すればよいのかを姿勢制御系は知ることができる，というわけです。

このような協調をうまく実現するためには，望遠鏡制御用の計算機と姿勢制御用の計算機とが，きちんと連携する必要があります。そしてそれ以上に，観測機器の関係者と姿勢制御系の関係者とが，人が，密に連携して設計や試験や運用を行うことが重要です。そこでは，小規模衛星ならではの小回りの良さ，そして開発チームの連携の良さが，いかんなく発揮されてきたように思います。

この原稿執筆時点では，まさにこの協調観測機能の軌道上チェックアウトが行われているところです。図1は，まずは大きな対象として，試しに月を捉えてみたときの視野ガイドカメラ画像です。映っている大きな月面クレーターは，衛星姿勢などの解析から，コペルニクスと呼ばれるクレーターだと考えています。図2は，別の日の運用で木星を捉えた際の視野ガイドカメラ画像と，重心位置計算の結果です。その後はさらに，明るい恒星を対象として，視野ガイドカメラからの重心位置情報に基づいて姿勢を制御し，恒星像を指定した位置に捉えることにも成功しています。まさに“望遠鏡の力を借りる姿勢制御”の中核となる機能が確認できた瞬間であり，姿勢制御系の関係者が一様に安堵と満足の笑みを浮かべた瞬間でした。

無事にファーストライトをお届けできる日は，確実に近づいています。どうぞご期待ください。

（さかい・しんいちろう）

奥林匹克公园とLED凧

シニアフェロー
宇宙飛翔工学研究系 教授 川口淳一郎

何年かぶりで中国へ出向いた。IAC(International Astronautical Congress：国際宇宙会議）に参加するためである。IACが北京で開催されるのは，十数年前に次いで2度目。会場は，BNCC（Beijing National Conference Center）で，オリンピック公園（奥林匹克公园）の隣に位置する。

会議中のIACの運営は混乱の真っただ中にあるのが通例だが，今年はまた群を抜いてとんでもない状況だった。IAA（International Academy of Astronautics：国際宇宙航行アカデミー）のBOT（Board Of Trustee：理事）会議が，公式のletterにはBICC（Beijing International Conference Center）で開催と書いてある。実際に，その名の施設が存在する。駆け付けてみると，何と，そこでは中国神経学会が開催中だった。コンシェルジェにIAAのBOT会議について尋ねてみると，英語が通じない。どうして？ これで国際会議場がやっていけるのか？ 実に不思議だった。してやられたのかと嘆きつつも，BNCCへ回ってみて驚いた。そこでは堂々とBOT会議が開催されているではないか。皆letterなどまったく読まずに行動したのか，あるいは，当然誤った情報に違いないと先読み，深読みしたのか？

翌日，IACのIPC（International Program Committee：国際プログラム委員会）全体会でのこと。学生向けPoster Award Ceremonyが，25日にあるというスライドが突然出てきた。え？ 当初は26日だったのではないのか。出てみると，これがまたとんでもない。私はカテゴリーCチェアという役目で，まずカテゴリーCの受賞者名を読み上げた。ところが，事務局が用意したリストではLast Nameが切れていて分からない。中国のメンバーに聞くと，それは，きっと×××君だよと言う。それに従って名前を読み上げ，受賞した論文の題目名も読んだ。場内から壇上に駆け上がってくる歓喜の1人の学生がいた。いや，おめでたい。私が賞状を渡そうと演壇の前に出ると，おやおや？ 中国人事務局スタッフが「Congratulations!」と，授与者でもないのに勝手に手渡そうとしている。そうか，同胞を讃えようとしているのかな，よかったじゃないか。そう思った。ところが，である。かの駆け上がってきた学生氏は，賞状を受け取ってそれを見た途端，急に落胆した顔つきになった。「私じゃない」。そうか，後ろが切れていた名簿の受賞者は別人だったのだ。でも，彼もおかしいと思わなかったのか。受賞対象の論文の題目名も読み上げたではないか。何も考えずに，First Nameを聞いただけで駆け上がってきたのか。そりゃ，おかしいだろう。事務局は，あらためて真の受賞者名を読み上げた。残念なことに，当の御仁は会場に来ていなかった。何たることか。

明日帰国するという夜，オリンピック公園に近いホテルの窓から，うねうねと雲間に怪しい光列が。それは，LEDの凧だった。尻尾が気持ち悪く泳ぐ，その光列。大気汚染が取り沙汰される北京。夜空の星は見えずとも，LEDが夜空に光っても構わんのだろうか。

中国は，有人宇宙活動を展開し，全球をカバーする航法衛星システム「北斗」の展開をほぼ終え，運用段階に入った。中国が圧倒的にアジアでの宇宙活動の中心となっていることは明らかだ。中国は，すでに運用中だった月周回機を，太陽―地球のラグランジュ点に飛行させ，さらに小惑星トータティスをフライバイ撮影することにも成功している。

このIACの直前，中国は無人のスペースシャトルを打ち上げ，飛行に成功したと報じられた。おそらく，この記事が出るころには，インドが火星周回機を打ち上げているだろう。12月には，中国が月着陸機を打ち上げる予定だ。我が国は，1998年，成功すれば世界で3番目に火星を周回する探査機となる「のぞみ」を打ち上げた。いまや，アジアで3番になることを目指すほかはないのだろうか。いまさら火星周回機や月着陸機を打ち上げ，成功したとしても，それはアジアの中で辛うじて追い掛けただけにすぎない。

科学技術の切り羽は，常に夢でもある。夢が実現されたとき，人々はその実現に感動し，また自信と希望を手にする。「夢を見てメシが食えるのか？」。よく尋ねられる質問である。「夢も見られないような国で，果たしてメシが食えるのだろうか」

（かわぐち・じゅんいちろう）

研究所あれこれ

大西 晃
元 宇宙科学研究所

イプシロンロケット打上げ成功，おめでとうございます。成功することが当たり前とされる中，実際に成功させることは大変な努力かと思います。

さて本題ですが，私は研究所を離れ，すでに3年半が過ぎました。現役時代の宿題も残すところあと一つになり，これで何もなしと思いきや，この原稿の依頼が舞い込んできました。はたと考えましたが，現役時代の良き想い出を書かせていただくことにしました。

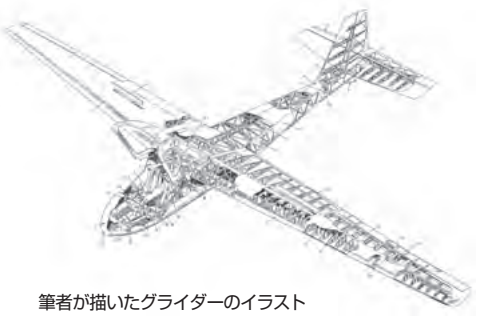
時間を使う

過ぎた時間に思いをはせると，訳もなく懐かしく感じることがあります。現在の方がはるかに科学的に進歩し，機能的であるにもかかわらず，不思議なことです。それはエネルギーにあふれ，夢に向かって邁進している若い時を懐かしく想う心でしょうか。時間も考えられます。一つのテーマに対して情報の少ない中，自身が納得するまでじっくり時間をかけて解決することができたから，かもしれません。そのときは確かに，知識や経験が乏しいために遠回りし，ただいたずらに時間を費やしたかにも思えますが，その時間こそが肉体や脳を刺激し，広く物事を考える力を培い，想像力を生み出す原動力につながっているのではないかと思います。知識を蓄え知恵を生む，若いときにそんな余裕のある時間の使い方に恵まれたことに感謝しています。

プロジェクトと研究

最初に勤めた東京大学宇宙航空研究所は，大学でありながらロケットや人工衛星などの研究から打上げまでを行う工学およびミッションを担当する理学がそろい，組織として機能していました。一見研究室がバラバラに存在しているかのように見えますが，問題を抱えると研究所が一体となり解決のために取り組む組織力は見事でした。ほかの分野の問題には口を出さない，決められたことに全体が従う，といったルールが暗黙のうちに存在していたような気がします。個の力に頼り過ぎることもありますが，それだけ責任を持つということが大切にされていました。また，縦横のつながりがスムーズで学ぶ環境が整っていました。コンパクトでエキサイティングであると，海外からも高い評価を得ていました。

ただ，良いことばかりではありません。小型・大型ロケットの打上げのために，年間100日近く内之浦に滞在したこともありました。その間，研究がディスターブすることへのイラダチもありました。それでも，基礎研究・開発・打上げと，アイデアから現場まで一貫して携わることができ，ほかの研究者の考え方，開発した装置をシステムに組み込みいかに機能させるか，物事をいかに判断し決断するかなど，一研究室にとどまっていたら学ぶことのできないことを学べました。当時の雰囲気は，ロケット・衛星も大切だが研究が第一であると教わり，何だかよく分かりませんが本郷に負けるなと後ろから声が聞こえていたような気がします。


筆者が描いたグライダーのイラスト

研究所と大学

東京大学から宇宙科学研究所に移行したとき，研究所とは何か，研究所の寿命は，などに思い巡らし，量子力学に関する研究所の本を何冊か読んだことがあります。研究所はご存知のように，特定の研究テーマについて深く探求し生み出す場であり，教育を基本とする大学とは異なります。それでは研究所の教育とは，宇宙研の場合，実践に即した教育ができることではないでしょうか。欲を言えば，所員が博士号を取得できる教育も必要ではないかと思います。また，研究所の生まれる要因は，言葉が適切ではないかもしれませんが，類が友を呼ぶように人が集まり組織化されていくもので，初めに組織が生まれるわけではないと思います。そのため，一般に創始者とその弟子たちによって業績の最初のピークがつくられています。宇宙研で言えば，第1のピークはペンシルロケットを出発点にしたロケット開発かと思います。第2のピークは，勝手に解釈しますと，私の育った時代ではないでしょうか。右肩上がりの日本経済のように，大きい衛星，つまり大きいロケットの開発を目指していました。事実35年の間に，質量約24kgの「おおすみ」から約1700kgの「すざく」まで，軌道投入に成功しています。逆に言えば，深く考えずに必然的に定められた目標に専念すればいい時代でもあったかもしれません。この間，もっと違った宇宙工学を考えてもよかったかもしれません。反省です。

いずれにしても研究所の存在感を示すには，グローバルな立場に立ち，社会に向けて時間をかけてピークをどのようにつくり上げていくかにあるのではないでしょうか。（おおにし・あきら）

宇・宙・夢・人

ロケット打上げは，やっぱり楽しい

宇宙機応用工学研究系 教授
臼田宇宙空間観測所 所長
山本善一

やまもと・ぜんいち。1958年，東京都生まれ。工学博士。東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了。1986年，宇宙科学研究所助手。助教授を経て，2003年より教授。2010年より臼田宇宙空間観測所 所長。

―― イプシロンロケットの初めての打上げでは，打上げ執行責任者代理を務められました。

山本：ある会議で森田泰弘先生からいきなり指名され，驚きました。M-Vロケットの打上げでは電気系主任として森田先生の補佐をしていましたが，打上げの現場は7年ぶり。しかも先進的なロケットの初打上げということで，役に立つかどうか不安もありました。

―― 8月22日の打上げで19秒前に緊急停止したときの気持ちは？

山本：打上げでは，たくさんの人がその瞬間に向けて全神経を集中しています。それが突然中止となり，緊張感が一気に脱力感へと変わりました。しかし，がっかりしている暇はありません。すぐに原因究明の作業を始めました。原因が搭載計算機と地上装置の通信時間のずれであると判明した後，特別点検チームが組織され，総点検が行われました。その中で，計算機が行うチェック項目のすべてを専門家の目でもう一度丁寧に確認しました。この作業は関係者にとっては非常につらかったですね。

―― 9月14日，打上げに成功しました。そのときの管制室の様子は？

山本：みんなで握手をして喜び合いました。しかし，私はその輪から抜けて，車で15分ほどのところにある34mアンテナに向かいました。私にはもう一つ，衛星の初期捕捉という仕事があったのです。ロケットから切り離されて地球周回軌道に投入された衛星が約1時間40分後に戻ってきます。その衛星からの電波を受けるのです。従来の固体燃料ロケットは衛星の軌道投入精度がさほど高くないため，予測した位置にアンテナを向けていてもうまく捕捉できませんでした。今回も，統合追跡ネットワーク技術部と一緒に困難な事態を想定してさまざまな作戦を練っていました。ところが，イプシロンの軌道投入精度が非常に高く，予測通りの位置で衛星を捕捉できました。PBS（Post Boost Stage）という小型液体推進系のおかげです。今回の衛星捕捉作業は，拍子抜けするくらい簡単過ぎましたね。

―― イプシロンの打上げを振り返って，どのように感じていますか。

山本：今回の打上げは，NASDAで開発されたH-ⅡAの文化で育った人たちと，宇宙研のM-Vの文化で育った人たちが入り交じって仕事をするという特殊な環境でした。M-V方式に慣れている私たちには戸惑うこともいくつかありました。しかし，最後には一体感が生まれ，素晴らしい打上げとなりました。一方で，多くの人が忙しく動き回りとても苦労している様子を見て，「これのどこが計算機でスマートに打ち上げられるロケットなのだろうか」と思ってしまったときもありました。森田先生，ごめんなさい。生みの苦しみとはいえ，これほど人に負荷がかかってしまったのは，森田先生にも想定外だったと思います。その点は，次号機へ向けての課題です。何はともあれ，打上げには独特の緊張感がありました。久しぶりにそれを味わうことができて，楽しかったです。

―― 電気系主任のほかにもさまざまな仕事をしてきたそうですね。

山本：通信系機器やロケットの追跡アンテナの設計など，いろいろな現場を歩いてきました。小惑星探査機「はやぶさ」では，搭載する通信系機器の設計に携わり，打上げでは電気系主任を務め，地球帰還のときは臼田宇宙空間観測所で最後まで運用の場にいました。弱々しかった「はやぶさ」からの信号が地球に近づくにつれて次第に強くなり，本当に帰ってきたんだなと実感しました。通信途絶や数々の危機的状況を乗り越え，通信系機器が一つも壊れずに探査機の生命線としての役割を果たせたことに，ほっとしました。

―― 臼田宇宙空間観測所ではどのような仕事をされていますか。

山本：臼田の64mアンテナは建造から約30年がたっています。今，関係者で新しいアンテナの建造を検討しています。30年前，先輩たちが立派なアンテナをつくってくれたおかげで，私たちは「はやぶさ」のような惑星探査ができるのです。私たちも30年先を見据えて，長く使えるアンテナを残さなければなりません。それには，情報量の多い，より高い周波数の電波を受信できることが必要です。周波数が高いほど技術的には難しくなります。これまでの経験を活かして，数々の技術的課題を克服していきたいと思っています。

―― 趣味は？

山本：天体観測と写真撮影です。小学4年生のとき，頼んでもいないのに親が天体望遠鏡を買ってきてくれました。それ以来，天文少年になりました。写真の被写体はアンテナが多いですね。季節や時間によってまったく違う顔を見せてくれます。内之浦でもアンテナの写真を撮っている方がいて，その写真がJAXAのカレンダーに採用されたときは，悔しかったですね。次の年，私が撮影した臼田のアンテナの写真がカレンダーに採用されました。しかも，内之浦より大きく掲載されました。うれしかったなあ。

ISAS ニュース No.392 2013.11 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ビア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記 暑い夏がようやく終わったと思ったら，急に寒くなりました。秋が短い年でした。でも実りの秋，宇宙科学分野での国際協力が実を結び始めています。（久保田 孝）

＊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