



ペンシルロケット記念碑と記念式典の様子

宇宙科学最前線

微小小惑星の質量を求める

吉川 真

宇宙情報・エネルギー工学研究系助教授
「はやぶさ」ミッション&サイエンスチーム

2005年9月12日、打ち上げられてから2年4ヶ月を経て、小惑星探査機「はやぶさ」が目的地である小惑星イトカワに到着した。到着したときの位置は、イトカワからの距離約20km。広大な宇宙のスケールから見れば、まさにピンポイントの到着である。その後、約3ヶ月間にわたって、「はやぶさ」はイトカワの周りを飛行し、まさにその名の通り、“獲物”の獲得のため、イトカワへの接近を繰り返したのである。差し渡し540mの小さな天体の周りを探査機が自由に飛行するミッションは、もちろん世界で初めてである。ここでは、この世界初の試みに関連して、「はやぶさ」の軌道とイトカワの質量推定について紹介する。

イトカワ周辺での「はやぶさ」の軌道

「はやぶさ」とイトカワ、そして地球・太陽の位置関係

は、図1のようになる。「はやぶさ」は常にイトカワと地球を結ぶ線の近くにあり、地球と太陽は、「はやぶさ」から見るとイトカワと反対の方向にある。「はやぶさ」は、イトカワを周回することはせずに、基本的には上下方向に運動した。ただし、単純な上下運動だけでなく、視線と垂直方向への飛行も行っている。到着から10月下旬までの実際の軌道図を描いたものが図2である。9月中はほぼ直線に沿った運動をしていたが、10月になると横方向にも飛行したことが分かる。

図1にあるように、ミッションチームでは、イトカワから20km付近をゲートポジション、7km付近をホームポジションと呼ぶことにした。イトカワに到着した9月12日は、ゲートポジションへの到着である。その後、2週間ほどはゲートポジション付近にいたが、9月末には高度をホームポジションまで下げた。さらに10月後半に

は高度を4km以下まで下げている。まったく初めての経験であるので、いきなり高度を下げることはせずに、慎重に運用を行っていったのである。

「はやぶさ」がイトカワ周辺にいた約3ヶ月間に取得されたレンジ(地上局から探査機までの電波の往復時間から計算される距離)とドップラー(電波の周波数変化から計算される視線方向の速度)のデータを示したものが図3である。図3ではO-Cと書かれているが、通常O-Cというのは観測値(O)と理論値(C)の差であり、探査機の場合のCは軌道決定値から計算されるものとなる。しかし、ここでは、Cとしてイトカワの軌道から計算された値を使っている。つまり、レンジのO-Cは、「はやぶさ」とイトカワの視線方向の距離の差(値が負であるのは、「はやぶさ」がイトカワの手前にいることを示す)であり、ドップラーのO-Cは、イトカワに対する「はやぶさ」の視線方向の速度(正がイトカワに接近する方向)と見なしてよい。図3は、「はやぶさ」の苦闘の足跡を示しているのである。

太陽輻射圧を実感

図3において、「はやぶさ」がまだゲートポジション付近にいたときは、レンジのO-Cのグラフが上に凸の放物線になっている。横軸が時間で縦軸が距離であるから、これは、まさに1次元の等加速度運動を示していることになる。つまり、地上でボールを垂直方向に投げ上げた場合の運動である。このことは、ドップラーデータによる速度が一樣に増加していることから分かる。なお、イトカワへの接近速度がある程度まで大きくなると、イトカワに近づき過ぎないように、イトカワから離れる方向に加速をする制御を行っている。

ここでちょっと注意をしておくと、「はやぶさ」のイトカワの周りの運動を考える場合には、太陽や惑星からの引力は取りあえず無視して構わない。それは、こ

れらの天体からの引力が、イトカワと「はやぶさ」の両方にほぼ同様に作用しているためである。また、イトカワに対する太陽輻射圧の効果は、無視してもよい。ここでは以上の近似のもとで、解析を行っている。

さて、図3のデータから小惑星の引力がすぐに計算できると思われるかもしれないが、それはちょっと早計である。それは、この等加速度運動をもたらしている主要な原因が、イトカワの引力ではなく、太陽輻射圧であるからだ。「はやぶさ」がゲートポジション付近にいたときの太陽輻射によって「はやぶさ」が得る加速度は、約 $1 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^2$ である。イトカワからの引力による加速度は、最終的に求められた質量から計算すると $6 \times 10^{-6} \text{ mm/s}^2$ 程度であるから、ゲートポジションでは「はやぶさ」に加わる加速度のうち95%くらいは太陽輻射圧によると考えてよい。図1に示されているように、太陽との位置関係によって、太陽輻射圧による加速度の方向とイトカワの重力による加速度の方向がほぼ同じ方向となり、太陽輻射圧があたかも重力のように働いているのである。

日常生活では、太陽輻射圧など気にすることはないが、深宇宙探査機の軌道決定においては、太陽輻射圧をいかに正確に推定するかが軌道決定精度に大きくかかわってくる。通常の探査機の運用では、太陽輻射圧が目に見える形で現れることはないが、イトカワ近傍の「はやぶさ」の軌道運動においては、それがあからさまに見えたことになる。

イトカワの質量推定

小惑星の質量は、小惑星近傍での探査機の運用を行う上で重要であるが、サイエンスとしても最も基本的な量として重要である。小惑星の質量と体積が分かれば密度が計算できるが、密度の値によっては、小惑星を構成する物質や内部構造なども推定できるからである。イトカワは、事前にレーダー観測が行われ、そのおおよその形状は分かっていた。従って、質量についても例えばミシガン大学のScheeres氏らが $6.27 \times 10^{10} \text{ kg}$ という値を出していた。これは、イトカワの体積を $2.41 \times 10^7 \text{ m}^3$ とし、密度を 2.6 g/cm^3 と仮定して出したものである。密度については小惑星の代表的な値を用いたもので、この質量が正しいという保証はない。そこで、「はやぶさ」がイトカワに到着するとすぐに、質量の推定が始まった。

すでに述べたように、最初のうちは「はやぶさ」は小惑星に対してほぼ上下方向に1次元的に運動していた。従って、高校物理の知識でも加速度が計算できる。得られた加速度は、太陽輻射圧と小惑星引力の両方の効果によるものであり、小惑星の質量を求めるためにはこれらを分離しなければならない。分離の方法は簡単で、高度の異なるところで加速度を求め、太陽輻射圧の方は一定だとして小惑星の引力に

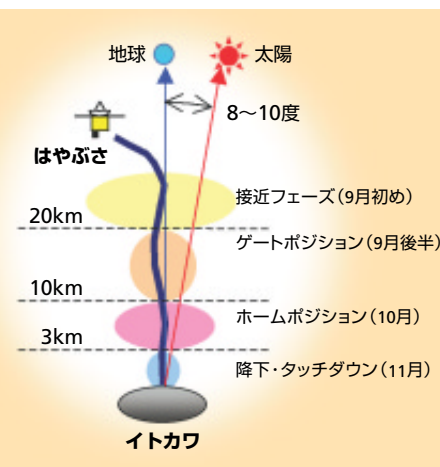


図1 「はやぶさ」とイトカワ、地球、太陽の位置関係
図は小湊隆氏による。

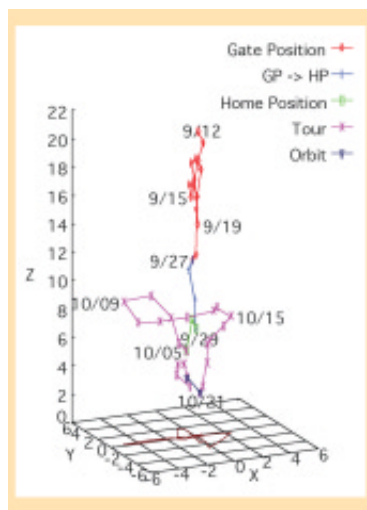


図2 2005年9月12日から10月下旬までの「はやぶさ」の動き
原点にイトカワがあり、Z軸の正の方向に地球がある座標系である。図は小湊隆氏による。

図3

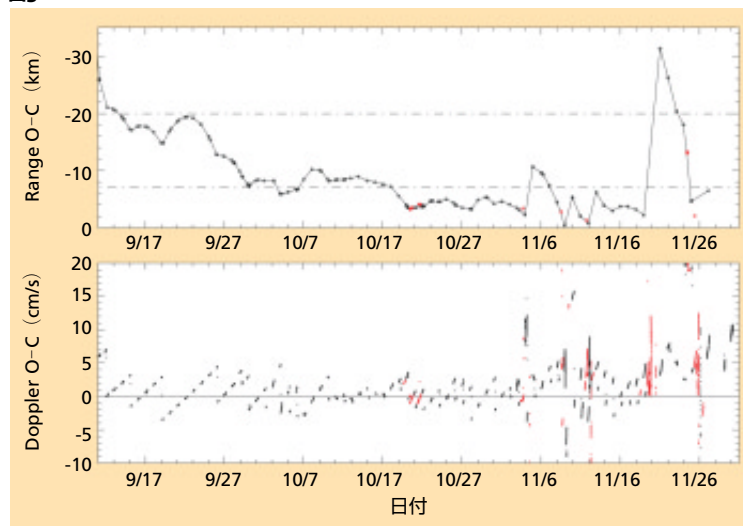
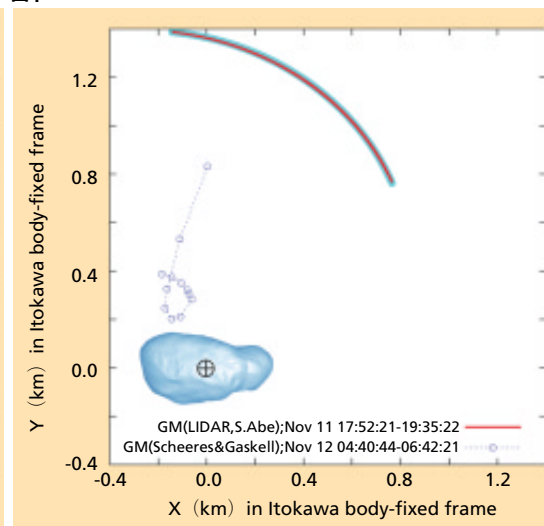


図4



よる加速を計算すればよいのである。実際には、太陽との距離が変化したり探査機の姿勢が微妙に変わったりするので、太陽輻射圧の計算においてはそれらの補正をすることになるが、いずれにしても、イトカワの質量は比較的簡単に求められそうに思えた。実際、到着から10月初めまでのデータを使って、イトカワの質量が最終的には誤差15%で求められた。

従って、「はやぶさ」がよりイトカワに接近すれば、質量の推定精度も上がると期待された。ところが、予期していないことが起こった。姿勢を制御するリアクションホイールの1台が、10月初めに故障してしまったのである。もともとリアクションホイールは3台積まれていたが、そのうちの1台は小惑星到着前に壊れていた。ここでさらにもう1台壊れてしまったことによって、姿勢制御はスラスタ(化学エンジン)を使わざるを得ないことになった。問題は、スラスタを使うと、どうしても軌道運動に加速度を生じてしまうことである。そのために、10月以降は、探査機の軌道データから小惑星の質量を推定することが難しくなってしまったのである。

そこで、10月21～22日に、意図的に姿勢制御を行わない期間を作って、そのときの「はやぶさ」の動きからイトカワの質量を推定することにした。また、11月にはタッチダウンも含めてイトカワへの降下が何度も行われたが、そのうち11月12日の2回目のリハーサル降下のときの軌道を使った質量推定もなされた。これらは、レンジやドップラー以外に、イトカワ表面からの距離の計測値(LIDAR計測値)やイトカワを撮影した写真のデータも使って、「はやぶさ」の正確な軌道を決定し、同時にイトカワの質量を求めたものである。特に、2回目のリハーサル降下の解析においては、神戸大学LIDARチームを中心にして二つの期間で質量の推定がなされた。質量が推定されたときの軌道図を図4に示す。イトカワのすぐ近くを「はやぶさ」が飛行していることが分かる。この場合には、イトカワは質点として扱うのではなく、物質分布(イトカワの形状)を考慮している。

以上、質量推定についてまとめると、表のようになる。これらは、独立のグループによって、別々のパスで異なる手法によって求められたものである。結果は誤差範囲内で一致しており、これらの重み付き平均をとった $3.51 \times 10^{10} \text{kg}$ が、イトカワの質量の推定値になる。サイエンスとして注目されるのは質量よりも密度であるが、密度を計算するためには、天体の体積を正確に見積もる必要がある。会津形状モデルでは、イトカワの体積は $1.84 \times 10^7 \text{m}^3$ と推定された。従って、イトカワの密度は約 1.9g/cm^3 となる。これは、イトカワと同じタイプのほかの小惑星に比べるとかなり小さいものであり、イトカワの構造や起源を探る上で重要な情報となろう。

さらなる解析へ

以上は、イトカワの質量についての最初の解析である。今後、さらに細かく「はやぶさ」の軌道が解析されれば、イトカワの質量についてもより細かいことが分かってくるかもしれない。今回、初めてイトカワのような小さな小惑星の質量の推定を行ったわけであるが、当初は、イトカワを周回しないでも質量が求まるのかとか、太陽輻射圧との分離などが課題として挙げられていた。実際には、これらは大きな問題とはならず、むしろ探査機の軌道制御や姿勢制御による軌道運動への外乱が、質量推定への大きな支障になることが分かった。今後も「はやぶさ」のデータの解析を進めるとともに、また別的小惑星についても探査の機会が訪れることを期待したい。

(よしかわ・まこと)

図3 イトカワ近傍における「はやぶさ」のレンジとドップラーデータ

ここでは、イトカワに対する値を示す(本文参照)。黒で描かれたデータは白田局で取得したもので、赤はDSN局で取得したものである。また、レンジは計測点の間を線で結んでいるが、計測間隔が粗いために正しい変化を示していない部分もある。

図4 11月11～12日の降下で質量推定を行った二つのパス

11月11日のデータでは、水色の実線が計測値で、赤い線が求められた軌道である。11月12日のデータでは、○印が計測値で、点線が求められた軌道である。それぞれ、表のCとDのケースに対応する。図は、阿部新助氏(神戸大学)・Daniel Scheeres氏(ミシガン大学)による。表示されているイトカワの形状は、会津形状モデル Ver.5.04による。

表 イトカワの質量推定の結果

	データの期間 (2005年)	データの種類	イトカワから の距離	イトカワの モデル	推定された質量 (10^{10}kg)	誤差 (%)
A	9/12-10/2	レンジ・ドップラー	20-7km	質点	3.51	15
B	10/21-10/22	レンジ・ドップラー 写真・LIDAR	3km	質点	3.43	5
C	11/11	LIDAR・写真	1427-825m	形状考慮	3.58	5
D	11/12	写真・LIDAR	800-100m	形状考慮	3.54	6

ペンシルロケット記念碑除幕式とタイムカプセル埋納

東京都国分寺のペンシルロケット水平試射の跡地に「日本の宇宙開発発祥の地」記念碑が建立され、うらかな花見日和となった4月1日(土)、除幕式とタイムカプセルの埋納が行われました。記念碑は、ロケットをイメージしたデザインの高さ1m余りの御影石製で、上面に国分寺市長による「日本の宇宙開発発祥の地」の文字、その下にペンシルロケットを持つ糸川英夫博士の姿が写真そのままに彫り込まれました。正面にはペンシルロケットの浮き彫りと碑文、両翼には当時の実験の様子も刻まれています(表紙写真左)。また、記念碑の前面下にはタイムカプセルを埋納し、松本零士さんの「銀河鉄道999」のイラストが彫り込まれた黒御影石が載せられています。記念碑は、早稲田実業学校正門前広場の道路寄りの目立つところに建っています。

除幕式とタイムカプセル埋納には多くの方が参列し、「未来のロケット」のイラストを描いた子どもたちも除幕のひもを一緒に引いてくれました(表紙写真右上)。タイムカプセルの中には、昨年8月開催のペンシルロケットフェスティバルで募集した「未来のロケット」のイラストに、国分寺の子どもたちのイラストも加えて約1400枚のはがきサイズのイラストと、フェスティバルで行われたペンシルロケットの再

現実験1号機、探査機「はやぶさ」が撮影した小惑星イトカワの写真載せたポスターも入れてあります。タイムカプセルは50年後の2055年に掘り出すことになっていますが、それはこの子たちに託すことになるでしょう。

記念式典第2部では、糸川先生にチェロを教えたことのある国分寺在住のチェリスト松下修也さんの献楽があり、糸川先生が好きだった曲も演奏されました(表紙写真右下)。的川泰宣宇宙教育センター長は、まさにこの地での29回のペンシルロケット水平試射から日本の宇宙開発が始まったこと、糸川先生の常識にとらわれない逆転の発想がペンシルロケットを生み、日本の宇宙開発を育ててきたことを話され、300人近い参加者が熱心に聞き入っていました。

記念碑の建立に当たっては、地元国分寺市民、早稲田実業学校関係者、ペンシルロケット開発に携わった方々、宇宙科学研究所のロケット開発関係者、ISASメ

ールマガジン読者など多数の方々からも寄付が寄せられました。募金の賛同者は1000人近くになり、目標額の500万円を無事達成、この日を迎えることができました。多くの方々のお力添えにより完成したこの記念碑、近くにお越しの節はぜひお立ち寄りください。

(周東三和子)



タイムカプセルの埋納

ロケット・衛星関係の作業スケジュール(4月・5月)

	4月			5月		
相模原			SOLAR-B FM総合試験			
		M-V-7号機 啗合せ試験				
つくば			SELENE システムPFM試験			

(FM : Flight Model PFM : Proto-Flight Model)

第2回「すざく」衛星 Science Working Group会議開催

昨年7月に打ち上げられた「すざく」衛星は、8月より観測を始めました。その初期の科学的成果を議論するため、2月20～23日に、打上げ後2回目のScience Working Group (SWG) 会議を開催しました。米国から22名、ヨーロッパから2名、国内から107名が参加し、これまでに観測されたデータの解析結果を議論しました。

「すざく」衛星では、本格観測の始まった昨年9月から3月末までをPerformance Verification Phase (PVフェーズ)として、主要な天体で衛星の機能を確認するため、SWGで観測計画を策定して実施してきました。この間、70個を超す天体が観測され、徐々に機器の較正が確立されてきています。その結果、「すざく」衛星が、これまでにない優れた性能を持つことが明らかになってくるとともに、それによる新しい科学的成果が出始めています。こうした新しいサイエンスをSWGのメンバーで議論し、論文にできるものは議論を煮詰めると同時に、これからの観測戦略を考えることが、今回の会議の目的でした。

会議は衛星運用の簡単な報告の後、解析が進んでいる7個の天体について20分の講演、19個の天体については10分、解析が始まったばかりの天体27個については3分の講演を行いました。2日目の最後にはこれらの講演を天体の種類別に四つのカテゴリーに分けて、そのカテゴリーのリーダーがまとめの講演を30分ずつ行いました。これと並行して、すべてのテーマについて、合計70枚を超えるポスターセッションを行いました。

「すざく」のもたらす新しいサイエンスとして、三つほど例を挙げます。一つは、CCDカメラの軟X線における高感度・高分解能を生かした、高温ガスの輝線によるプラズマ診断です。まず、死につくある星の周辺物質のX線観測から炭素、窒素、酸素の元素比を決めたところ、太陽組成比の数十倍という炭素超過が見られ、星での元素合成の現場を明確にとらえることができました。これは、天文学会の2006年春季年会でも記者発表をしています。このほかにも、我が銀河系内の高温の星間物質、



会議の合間に「すざく」の見たデータについて
熱心な議論をするSWGメンバー

超新星残骸、銀河団など、広がった天体の観測が進められています。中でも意外だったのは、巨大な太陽フレアが起きた直後の観測データをたまたま詳細に確認したところ、太陽風に起源を持つ炭素輝線がかなりの強度で見えてきたことです。これは、地球を取り巻くプラズマ圏の物理につながる、新しい

データです。

「すざく」の二つ目の特徴は、検出器バックグラウンドの低さです。これにより、大きく広がった天体に対して新しいデータをもたらします。この特性を活かし、「すざく」では戦略の柱として、銀河中心に長い観測時間を費やしています。鉄輝線を詳しく調べることで、放射体の物理状態を詳しく知ることができ、高温ガス、強い放射に照らされた反射星雲などの起源に鋭く迫ることができるようになってきました。これにより、さまざまな活動性が複雑に入り交じっている我々の銀河中心の謎が、一つ一つ解けていくものと期待されます。

「すざく」の三つ目の大きな特徴は、硬X線検出器を合わせた広帯域高感度のスペクトル観測です。活動的銀河では、数時間から数日で大きく変動する中心核からの放射成分と、その放射を受けた周辺物質からの反射・蛍光成分が見えています。広帯域スペクトルの時間変動を用いて、多成分の分離が可能となり、活動的銀河の構造と放射機構がクリアになります。

会議では、このほかにもさまざまなアイデアで観測と解析が進められていることが報告されました。そして、なるべく早くこれらの結果を投稿論文(特集号)にまとめて公表していくことが決められました。

会議3日目には観測機器について現状報告と解析のための情報交換が行われ、4日目にはそれぞれの天体ごとのチームにおける会議を持ち、今後の解析、論文投稿までの方針が議論され、終了しました。全体としては、「すざく」の持つ特徴を120%引き出し、その成果を世界へ発信しようという意気込みが強く感じられました。

(「すざく」チーム 文責・名古屋大学 國枝秀世)

M-V ロケット8号機搭載のサブペイロード実験

2月22日に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられたM-Vロケット8号機のサブペイロードには、ソーラーセイル膜面展開実験ペイロード「SSP」と、東京工業大学の超小型衛星「Cute-1.7+APD」が搭載されました。それぞれの結果について、ご報告します。

ソーラーセイル膜面展開実験SSP

SSP (Solar-sail Sub Payload) は、直径10m超級の扇子型セイルの展開制御(セイルをゆっくり展開する)を目的とするサブペイロード実験モジュールです。独自のテレメータを持ち、実験データ(カメラ画像、モーター回転数、Cuteステータス)の受信をオーストラリア上空(実験中)およびアラスカ上空(実験後)で行いました。しかし、受信時にトラブルがあり、受信データの質が非常に悪くなってしまいました。結局、実験中の画像は再生できず、実験後の画像が何とか数枚再生できたという状況です。

取得できた画像のうち2枚を図1, 2に示します。図1はSSPを第3段計器部下部から見上げた画像で、セイルの一部が展開していることが確認できます。また、図2は衛星接手越しにセイルが展開してくるはずの位置を見ている画像ですが、残念ながらセイルは見えていません(左手に写っているのは地球)。これらの画像と、実験中のモーター回転数のデータなどから、セイルは途中までは展開したものの、何らかの原因で停止したと考えています。詳細については、現在も解析を続けています。

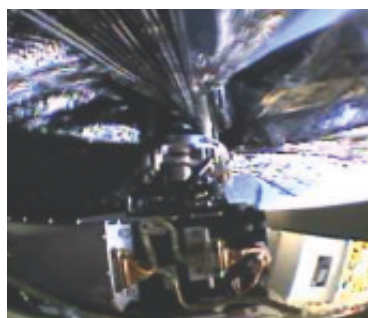


図1 第3段計器部下部カメラの画像



図2 第3段計器部上部カメラの画像

不本意ながら非常に残念な実験結果となってしまいましたが、サブペイロードSSPとしては無事に実験実施までこぎ着けることができました。ここに誌面をお借りして、ご協力いただいた皆さまにお礼を申し上げます。どうもありがとうございました。

(サブペイロードSSP班 竹内伸介)

東工大サブペイロードCute-1.7+APD

東工大サブペイロードは、東工大松永研究室によって開発された2番目の超小型衛星であるCute-1.7+APD(図3)と分離機構システム(図4)から成り、軌道上運用に成功しました。本衛星は10cm×10cm×20cmの小容積、質量3.6kg(軌道寿命延長のため、2003年に打ち上げられた1機目のCUTE-Iより重量化)と小粒ではあるが、工学ミッションに加え、理学ミッションとして基礎物理学専攻河合研究室の超小型高性能APD(Avalanche Photo Diode)センサを搭載するなど、高集積多機能を実現しました。

Cute-1.7+APDは、日本上空を朝5時ごろと夕方5時ごろに、毎日それぞれ2回程度通過します。アマチュア無線の混信が大変ひどい中で運用を行っており、何回かの危機を乗り越えましたが、現在、受信制御機器に不具合が生じ、復旧を試みている状態です。しかし今までに、APDセンサの粒子カウントのための基本機能や、2台の携帯情報端末(PDA)、USB入出力などの基本バス機器の機能を確認でき、貴重な軌道上データを継続して取得しています。

大学の一研究室が設計思想のまったく異なる超小型衛星を2機開発し、独自の地上局によって同時運用するという成果に対して、アマチュア衛星通信協会AMSATからオスカーの称号と連番が2機の衛星に付与され、両衛星は歴代のアマチュア衛星の仲間入りを果たしました。

CUBESAT-OSCAR-55(CO-55):CUTE-I

CUBESAT-OSCAR-56(CO-56):Cute-1.7+APD

執筆時点で、世界中のアマチュア無線家94局以上から、延べ750回以上の受信報告を受けています。

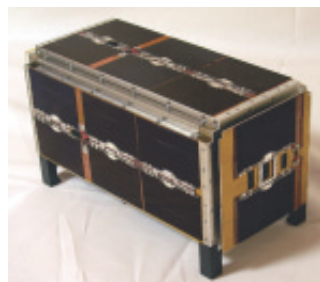


図3 超小型衛星Cute-1.7+APD

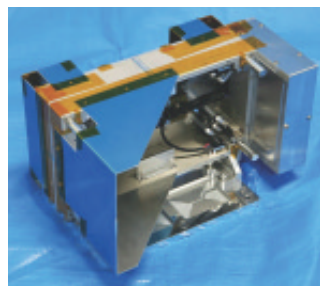
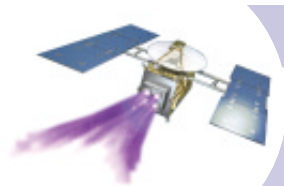


図4 分離機構システム

超小型衛星は、宇宙工学の実践的教育、先端科学技術の早期軌道上実証、新しい宇宙ビジネス手段として期待されており、松永研究室では今後とも研究開発を進めます。サブペイロードという大変有意義な機会を提案・実現・提供いただき、誠にありがとうございました。今後ともこのような機会を継続されることをお願い申し上げます。

(東京工業大学 松永三郎)



はやぶさ近況 交信復活

「はやぶさ」は、一連の近傍観測の最後を2回の着陸で飾ったものの、まさに離陸を完了した昨年11月26日に燃料漏れ事故を起こし、厳しい状況が続きました。その後、12月8日には新たな燃料の漏洩に起因すると考えられるガスの噴出によって姿勢が大きく変動し、以来、1月末まで交信が途絶えていたところでした。

この間、地上の管制ソフトを更新して、指令を短時間で到達させる方法や、地上局にプログラマブルなスペクトラムアナライザーを動員してビデオ記録をする体制を採りました。凍り付くほどの低温下に置かれたため、搭載されている受信機の待ち受け周波数が不確定で、それに対応するため、地上から小刻みにスweepする方法を採用せざるをえませんでした。また、同様に搭載送信機の発信周波数も不確定であったため、地上局側で受信周波数を小刻みに監視するなど、あらゆる不確定性を考慮して監視する対策を採り、日々の運用を続けてきました。一通りの網羅的なサーベイだけで数週間を要する、根気のいる運用が必要だったわけですが、数学的には、向こう1年間に60～70%の確率で通信が復旧するはずでしたが、正直なところ、1年がかりではないかと考えていたところでした。「はやぶさ」からの電波が発信されていても、それを見逃してしまうと、通信の復旧はできなくなります。スーパーバイザの皆さんも、実は、復旧は無理かもしれないと心のどこかで思っていたのですが、毎日、返事の来ない交信・運用を根気よく続けていただきました。皆さん、本当にあきらめずに、よく頑張ってくださいと思います。

それは、1月23日の運用中に、急に起きました。大空の中の、まさに「はやぶさ」が見えるべき方向から、明らかに人工的な電波が発せられていることに、スーパーバイザ西山が気付いたのです。それは、予想を超えた強度で受信されていて、彼は間違いないかと、地上局のアンテナをわざと振って、確かに「はやぶさ」がいるべき方向からの電波だと、いわば自らのほおをつなげて確認したほどです。しかし、「はやぶさ」は高速でスピンしているらしく、1周期50秒余りで強度が変化し、20秒ごとに大幅に信号が弱くな

る現象を伴っていました。まるでおぼれる「はやぶさ」が、浮かんで消え、もがいて手を伸ばしているかのようです。信号強度が大きく変わるのは、地球方向から70度も離れた方向にスピン軸（アンテナ軸）が向いていたため、太陽電池の方向に電波の干渉が起きて、強度が低下していたわけでした。これは地球から指令を送る場合も同じですから、指令も20秒以内に完結しないと解読されないことを意味しています。実際、「はやぶさ」からの電波は1月23日に受信できましたが、その後1週間は、指令が送達できませんでした。

しかし、ここでもスタッフ全員が本当に一生懸命考えてくださり、地上運用のソフトウェアを急遽改修して、切れ切れでも何とか指令を送達させる工夫を編み出し、ついに1月末には、地上からの質問に対して応答させることができるまでになったのです。質問が正しければ電波の変調を切るとか、2-way modeに変えるなどして、「はやぶさ」に返事をさせることができるようになりましたが、これは「のぞみ」で経験したぎりぎりの運用方法が、有効に反映されたといえるでしょう。

2月からは、搭載のイオンエンジンの作動ガスであるキセノンを用いて、姿勢制御が始まりました。といっても、スピンの速過ぎて、軌道姿勢制御コンピュータが使える状態ではありません。データ処理コンピュータに新たな論理を組み込み、例えば太陽方向がサンセンサのある軸をよぎったらキセノンガスを流すといったような、非常に原始的な方法で姿勢制御を行わせました。「はやぶさ」は3軸姿勢制御の探査機ですが、今はスピン安定の探査機として運用しています。

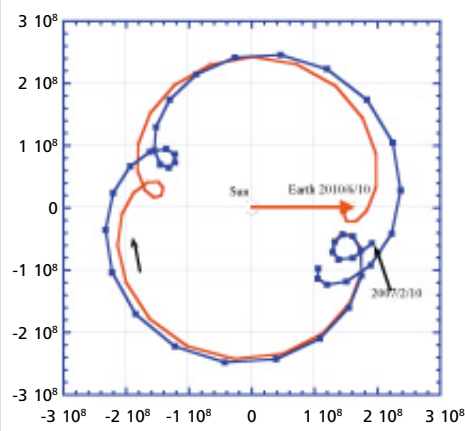
このかいあって、「はやぶさ」の姿勢は3月初めには、ほぼ地球方向を指向できるまでに回復し、また地上局との間の距離を計測することにも成功して、「はやぶさ」探査機の位置はかなり正確にわかるまでに至っています。今は、探査機全体の温度を上昇させて、残存の燃料やガスを排斥するベーキング作業を実施しています。二度と不慮の姿勢喪失が起きないようにするためです。イオンエンジンの試運転も、連休前後に予定しています。キセノンガスは姿勢を制御しはじめてから、急速に消費量が増えています。このベーキング作業は短期間で終わらせなくてはけません。しかし、現在のキセノン残量があれば、何とか地球に戻るイオンエンジンの運転は可能です。今は我慢して静養を行わせたいと考えています。

どうぞ、これからもご支援をお願いします。

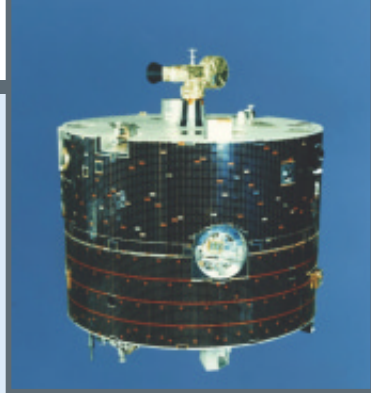
(川口淳一郎)

2007年2月にイトカワ軌道からの離脱を行い、地球に2010年6月に帰還させる探査機軌道計画案（赤線）。帰還までの飛行時間が長くなるものの、現在のキセノン残量で飛行可能である。太陽-地球線を固定して描いた軌道図。

2010年に地球に帰還する軌道



浩三郎の 科学衛星秘話



「ジオテイル」



井上浩三郎

プラズマ観測装置のラッチアップ

さて、プラズマ観測装置(LEP)のラッチアップを解消する唯一の方法として、日陰を利用して衛星を一度仮死状態にするという結論を得たものの、いざ実施する上では、プロジェクトを預る西田篤弘先生は胸の詰まる想いだったことでしょう。その大変なリスク覚悟のオペレーションについて、向井利典先生の記述。

——1993年9月1日深夜、ジオテイル衛星の打上げ後初めての日陰の最中に、バッテリーを衛星電源システムから切り離すというウルトラCのオペレーションが行われました。(中略)当日、相模原衛星管制センター、臼田、内之浦には、ジオテイル衛星や地上系システムに熟知した宇宙研やメーカーのベテランが駆けつけ、万全の体制が敷かれました。できる限りの検討を重ねてきたとはいえ、やはり未経験のオペレーションです。一種異様な雰囲気漂っています。22時34分(日本時間)、少しずつ太陽電池の出力が落ち始めました(半影の開始)。搭載の観測装置、共通機器の大半をコマンドで正常にオフ。本影終了3分前の23時25分、ついにバッテリー切り離しのコマンドを送信、電波が途絶える。約10分間、なんと長かったことか。衛星が半影に出てきて、太陽電池出力の上昇に伴って徐々に電波強度が復帰、さらに数分置いて安定したところでコマンド送信、PCMテレメータの復調機がロック。衛星の状態をチェック、目的としていたLEP



「注液」作業をモニターするRCS(リアクションコントロールシステム)チーム

磁気圏尾部観測衛星ジオテイル その4

のラッチアップ解消に成功したことが確認されました。——

上記の文章中「日陰」とは、月による陰のことです。上杉邦憲先生の指導のもと、ミッション達成に影響しないように当初の軌道計画を変更し、衛星を意識的に月の陰に入れました。

先日、西田先生に伺ったところ「あのオペレーションは、日米の研究者の信頼関係があったからできたことです」とおっしゃっていました。

科学的成果

ジオテイル衛星の研究目的は、地球磁気圏尾部の構造とダイナミクスおよび磁気圏の高温プラズマの起源と加熱・加速過程を明らかにすることです。そのため、月との二重スウィングバイ技術などを駆使して、衛星軌道の遠地点が常に地球磁気圏の尾部にくるように制御されました。

1992年7月に打ち上げて以来、2006年3月で13年8ヶ月が経過しましたが、現在も衛星の状態は良好であり、7つの搭載科学観測機器は順調に観測を続けています。ジオテイルは、これまでに幾多の成果を挙げ、宇宙プラズマ物理学の研究進展に大きく貢献して、世界的に高く評価されています。

そしてこの原稿を執筆している最中に、西田先生のCOSPAS賞受賞といううれしいニュースが舞い込んできました。ヴァン・アレン博士を第1回の受賞者とする、この栄誉ある賞を受けられる西田先生のご業績に、ジオテイルの成果は重要なものの一部として含まれているでしょうから、誠にめでたく、ジオテイル・チームとしても誇らしいことです。

休日のひととき

一貫してジオテイル・ミッションをリードされた上杉先生は、長期滞在に備えて、ケネディ宇宙センターの近くの河畔に建つ低層マンションの一室を借りておられました。先生は試験のために日本から到着する実験班を、1週間に一度の休日のたびに自宅に招かれ、庭先の川に仕掛けた網に入ったカニを酒の肴にもてなしてくださいました。現地での緊張から解放されたひとときでした。その気配りに皆、感謝しました。このような心尽くしが、初めての本格的な国際共同計画を大勝利に導くチームを作り上げたのだと、今しみじみと思います。

(いのうえ・こうざぶろう)

宇宙の一番新しい客人

日本福祉大学情報社会科学部助教授 宇野伸一郎

超新星とは、星がその一生を終えたときに起こす大爆発のことを指す。その爆発はすさまじく、たった一つの星が銀河と同じくらいの光度に輝くように見える。人類の歴史上、10個ほどの超新星が記録に残されている。しかしその昔は、夜空にひととき輝いて消えてゆく「客星」とされ、それが星の最期の姿だとはまだ誰も気が付いていなかった。SN1987Aは近代天文学が発達して以来、地球から最も近い距離に現れた超新星だ。その距離は約16万光年(約150京km)。我々の銀河系のすぐ隣の大マゼラン雲に出現し、最大3等級の明るさで輝いて見えた。

星の内部では、水素がヘリウムへ、ヘリウムが炭素／酸素／窒素などへと核融合反応が繰り返されており、星はそのエネルギーで光っている。星の内部は、酸素や炭素、鉄などの重い元素を生成している場所でもあるのだ。星は、その内部で元素を合成しながら、輝き続ける。しかし、いつかはその燃料を使い果たす時が来る。静かに光を失う星もある一方で、特に太陽の数倍という大きな星では、劇的な最期が宿命付けられている。それが大きな星の生涯の終わり、「超新星爆発」である。

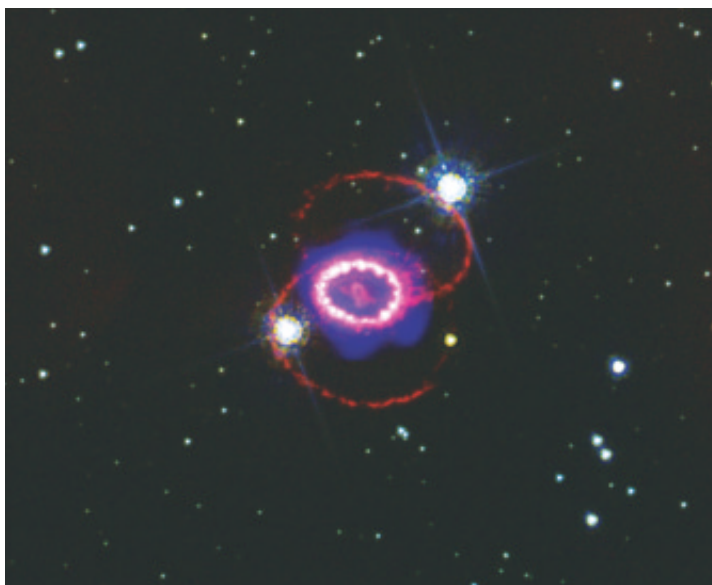
星は重ければ重いほどその寿命は短く、短いものでは数百万年から数千万年しかないといわれている。数千万年という時間を人間のタイムスケールで考えれば、そのあまりの長さに気が遠く

なるだろう。しかし同じその時間を、星は一生をかけてたどっていく。数千万年を一生としてみる視点に立てば、人間の世界の小ささにあらためて驚かされるだろう。この数千万年、地球では数多くの種の生命が生まれ、そして滅びていった。恐竜が栄え、ローマ帝国の興亡があり、ベートーヴェンが魂を揺さぶり、数限りない喜びと悲しみを浮かべながら、地球は回っていた。それを、一つの星が、その一生の中で静かに見守っている。そんな時間軸を持つ世界が、この宇宙には存在する。それが星たちの時間であり、SN1987Aの時間である。もしかしたら、雑務に忙殺される人間の時間よりも、星たちの時間の方がはるかに人間的なのではないだろうか。そして、その悠久の時間を持つ星の一生の最期が、超新星爆発、という現象なのだ。

もう一つ。それがいかに華々しかりと、その死が未来の創造に加担するものでなければ、爆発はその一瞬で終わるむなしい破裂にすぎないであろう。しかし、安心していただきたい。超新星爆発は、確かに、一つの星の終焉ではある。が、そこで飛び散った星のかけらは、宇宙空間に広がって、いつの日かまた新たな星を作るための材料となるのだ。しかもその爆発は、星の内部で作られた鉄や炭素などの重元素を宇宙に供給するという重要な役割を担っている。現在、SN1987Aは、爆発以前に星自身が放出したガスと爆発で飛び散った物質がぶつかって、再び光り始めている。その様子は2006年現在、X線天文衛星「すざく」などによって観測されつつある。宇宙空間へのガスの広がりには、まだ始まったばかりである。この天体のおかげで、超新星になる直前の星がガスを放出する様子について、初めて詳細なことが分かってきた。近代天文学始まって以降、最も近い超新星とは、「見る事なす事、すべて新しい」という、非常に大きなインパクトを持った天体ということなのである。

星の内部で作られた元素が、超新星爆発で宇宙空間にばらまかれる。それらはまたいつの日にか集まって星を、惑星を形作る。地球もそうして作られた惑星の一つである。そして、そこに生きる生命も。我々の体を作る炭素や窒素も、超新星爆発でばらまかれた星の一部である。超新星のかけらを受け継ぐ宇宙の〇人。それは、あなた自身なのかもしれない。

(うの・しんいちろう)



SN1987Aの現在の姿。ハッブル宇宙望遠鏡の可視光のイメージに、チャンドラX線天文台のX線イメージを紫で重ねている。超新星から発した光や高速の衝撃波が、かつて放出してきたガスに衝突し、さまざまなリング構造が可視光やX線で見えている。
©NASA/CXC/SAO

「はやぶさ」特別セッション

NASA月惑星科学会議

2006年3月は、記念すべき節目の一つとなりました。アポロ計画以来連綿と続いてきたNASA・LPI (Lunar and Planetary Institute) 主催の第37回月惑星科学会議において、初めて日本深宇宙探査プロジェクトの特別セッションが組まれたのです。日本からは運用・解析に携わった私たち若手研究者・ポストドク・大学院生が大挙して乗り込みました。会議初日の小惑星サイエンス一般のセッションでも「はやぶさ」を意識した発表や議論が見られ、前夜のポスターセッションを経て大きく盛り上がり、当日は「はやぶさ」の成果を13人でリレーしながら午前いっぱい語り、そのたびに万雷の拍手とどよめきがありました。夢のような1週間を振り返ります。

3月12日(日)

現在進行中の深宇宙探査は、多かれ少なかれNASA深宇宙局ネットワークの恩恵を受けており、米国内プロジェクトだけでなく国際協力ミッションの成果をアピール・議論するために世界中から人が集まってきました。この月惑星科学会議LPIレセプション会場は、プロジェクトをまたぐ年1回の再会の場でもあり、あちこちで「お久しぶり、元気?」という光景が見られます。

3月13日(月)

会期中の成果発表で群を抜いて多いのは「火星探査」。全43セッション中、火星絡みは13もあり、小天体関係はそれに次ぐ7つが組まれました。そこでは、「はやぶさ」を意識した質問が何度かありました。昨秋、ウェブで公開したイトカワの素顔が瞬く間に世界を駆け巡りましたが、画像がみんなの共通理解の基盤となっていることをあらためて実感しました。

3月14日(火)

「はやぶさ」メンバーの“ほっと一息”。JAXAヒューストン駐在事務所の山本さん、土井宇宙飛行士、そして海外共同研究者であるAbell, Zolensky

両博士のセッティングで、NASA施設の特別見学ツアーがありました。Stardustミッションの分析室は、「はやぶさ」キュレーション施設(回収試料の初期分析、分類、カタログ化、保管などを行う施設)を想起させ、印象的でした。

3月15日(水)

ディナー・イベントに向かうバスで、海外生活の長い日本人研究者のご家族とたまたま同席に。専門外であっても聴きに來たいとのこと。「はやぶさ」の注目度の高さに、少しうれしくなりました。

3月16日(木)

「はやぶさ」合同サイエンス会議。川口プロジェクトマネージャーより復旧運用に至る経過と現状が説明され、次いでデータの取り扱い、論文成果公表について確認がなされました。直後から「はやぶさ」のポスターセッション。芋を洗うような大混雑、大盛況でした。

3月17日(金)

冒頭に述べた通り、歴史的なセッションとなりました。川口プロジェクトマネージャーのコメントを引用することで、この文章を締めさせていただきます。

「400人も入る大きなホールは聴衆でいっぱいになりました。(中略) 藤原先生は別として、こちら側の発表者はみな若い。これは、とても良いことだと思います。みな物おじせずに、堂々として素晴らしかった。質問にはこの分野の著名な研究者、小惑星研究の大御所が次々と立ち、こちらの若手発表者にとっては、教科書や文献でしかお目にかからない人もたくさんいたはず。逆に彼ら専門家にとっても、疑問がいっぱい、面白くて仕方ない様子でした。質問に織り交ぜて、*“beautiful work”* *“great achievement”*と賛辞を頂きました。会場からは拍手が起き、私は理学者ではありませんが、非常に誇らしく思いました。観測をしてデータを手にした者だけが語れる、真実のみが語れる迫力があつたと思います。時として、観測データや精細画像に息をのみ、聴衆が静まり返る瞬間もありました。こちらの発表者は、事実を背景に自信に満ちていたと思います。(中略) 観測器を搭載できて、本当によかったと思います」

皆さま、本当にありがとうございました。

(でむら・ひろひで)



「はやぶさ」特別セッション会場の様子

出村裕英

会津大学コンピュータ理工学部講師



初陣

奥田治之

宇宙科学研究所名誉教授

東の地平線が朝焼けで茜色に染まり始めたころ、一瞬の閃光がきらめき、轟音をとどろかせながらM-Vロケット8号機は明けやらぬ中天の空を急上昇して行った。やがて、上空日の出とともに航跡雲が鮮やかな青白色に輝いて雲間に消え去るのを見送る。ふと我に返ると、遠い昔のことを思い出していた。

私が、小田稔先生のお誘いで宇宙研に来ることになったのは、1980年のことだった。当時、長野県の上松に建設した手作りの赤外線望遠鏡でささやかな地上観測を行っていた自分に、スペースからの赤外線観測など大それたことができるか不安で移籍を躊躇したが、今は故人になられた長谷川博一先生の後押しもあって、やっと決心することができた。宇宙研に移ってはみたものの、教授一人の研究室で、これからどうしたものかと途方に暮れたものだった。技官の成田正直さんと、学振研究生の小林行泰君とで、まずはスタートすることになった。1年後に、京大から芝井広君が助手としてきてくれることになり、また、東大から中川貴雄君が修士学生として飛び込んでくれて、一通り格好はついたものの、本格的なスペース実験など思いも及ばなかった。取りあえず、京大時代から始めていた気球による観測を進めることにした。

そのころ、アメリカでは赤外線衛星IRASの打上げ直前で、スペース観測で太刀打ちするのは容易ではなかったが、電離炭素の157ミクロン線を狙うことで特色を出したいと思った。オーストラリアやアメリカへの遠征を繰り返したが、度重なる失敗に涙をのんだ。やっと成功して、銀河面の美しい分布図ができたときの感激は忘れられない。それでも、いずれはスペース実験を考えると、極低温冷却が必須では簡単に始めるわけにはいかなかった。そのころは、名大から村上浩君も加わり体制も整ってきていたが、松本敏雄さんとSFUの一角を借りて、口径15cmの液体

ヘリウム冷却望遠鏡を打ち上げたのは1995年であった。幸い、観測機は完ぺきに働き、拡散赤外線の分光観測に成功した。観測時間の制約から、観測範囲が全天の7%にとどまったのは返す返すも残念であった。もしもこれが全天に及んでいたら、IRASやCOBEの観測に匹敵するものになったであろう。同じ年に、ヨーロッパでは本格的な赤外線衛星ISOが上がった。田中靖郎先生のご尽力で、このプロジェクトに参加できることになり、原始銀河の探索などでは興味深い成果が得られた。そのころになって、念願のM-Vロケットを使った我が国初めての赤外線衛星ASTRO-F計画が認められ、名大から移ってきていた松本さんを中心に開発が進められた。

データセンターのドアに、的川泰宣さんが選り周東三和子さんを中心とする実験班が見事に改竄してパロディ化した清酒「初陣」のラベルが貼られているのを見つけた。そこには“Distilled by Dr. Okuda and Dr. Matsumoto”とあった。しかし私はせいぜい蒸米に麹菌をまぶした程度で、杜氏の松本さんを中心に多くの若い研究者の日夜を分かたぬ努力によって、見事に吟醸酒「あかり」が出来上がったのである。冒頭に述べたように、打上げは順調に行われ、現在、衛星は予定の太陽同期軌道に乗って運行している。4月13日に、待望のふた開けが無事行われ、

「あかり」に灯（ファーストライト）がともされた。今後の活躍を心から祈りたい。

ただ、心配は消えることがない。特に、打上げ後の運用体制の弱さである。これは今回に限らず科学衛星共通の悩みであるが、観測機の性能を最大限引き出す観測運用と、そこから出てくる膨大なデータを取得、解析するには、あまりにも貧弱な体制で進められている。アメリカでは、内容的にはASTRO-Fよりも単純なIRASの場合でさえ、数十人の専従研究員の解析センター(IPAC)を用意してミッション遂行に当たったものである。それを、我が国では無給の大学院生が支えている。M-Vになって、実験内容の質、量ともに格段に向上している。また、将来計画では、大構想が目白押しだ。これでは、事態はますます深刻になる。

いまや、我が国は世界第2位の経済大国を誇っている。それにもかかわらず、科学研究への投資の低さには驚かされる。確かに、大金をはたいて大装置は作るが、それから成果を引き出す運用、維持の費用は出ない。これでは、仏作って魂入れず、である。こんな不経済な研究投資はない。一体、我が国の膨大なGDPはどこへ消費されているのであろう。また、こんな状態では、科学研究で本来必要なリスク（非予見性）を冒すことが許されなくなり、反対に、してはならない技術的なリスク（安全性の欠如）を犯さざるを得なくなる。研究者の意識も含めてこの点の改善が図られない限り、我が国の科学研究は一人前になれない。

なにやら、花見酒を少々飲み過ぎて考えがまとまらなくなってきたようだ。飲みつづける前に筆をおくことにしたい。

それにしても、我が国の赤外線天文学の生みの親、育ての親であった、いまや故人になられてしまった早川幸男先生、長谷川先生に初陣の成果をご報告できないのは、寂しい限りである。

(おくだ・はるゆき)

衛星の声を届けるJAXA第1期生

システム運用部情報処理グループ

関 妙子

——JAXA第1期生ですね。宇宙研への配属を希望していたのですか。

関：はい、希望通りでした。大学では磁気圏観測衛星「あけぼの」のデータを使って磁気圏の研究をしていましたから、データ処理など宇宙科学に携わる仕事をしたいと思っていたのです。

——**どういう仕事をされているのですか。**

関：SIRIUSという科学衛星テレメトリデータベースシステムの運用と構築がメインの仕事です。

SIRIUSには、宇宙研の科学衛星から送られてきたデータがすべて、ほぼそのまま収録されています。しかし、SIRIUSは表に出るデータベースではないため、誰もが知っているわけではありません。私自身、大学で「あけぼの」のデータを使っているながら、SIRIUSの存在を知りませんでした。皆さんが使っている理学データベースDARTSと工学データベースのEDISONは、SIRIUSに収録された生データを処理したものです。

——**SIRIUSを運用していると、科学衛星から送られてきたデータを、いち早く手にしていることになりますね。**

関：科学衛星からのデータは内之浦宇宙空間観測所や海外の受信局で受信し、一度別のサーバーに保存されます。私たちの仕事の一つは、毎朝そのサーバーからデータを受け取り、時刻の修正などを行った上でSIRIUSに収納することです。その場でデータを解析するわけではないので内容は分かりませんが、極端にデータ量が減ったり増えたりすると、その衛星に何かあったという程度のは分かれます。「あけぼの」は1989年に打ち上げられた長寿衛星です。海外で受信した「あけぼの」のデータは週に一度送られてくるのですが、データを確認できると、「ああ、生きている」と安心します。通信が途絶えていた「はやぶさ」からのデータが久しぶりに届いたときは、うれしかったですね。「はやぶさ」からデータが届いたことを、運用している研究者と同じように喜ぶことができたのが、とても印象的でした。

——**ISASメールマガジン71号(1月17日発行)では、「ドンガラ出張記」と題して、オーストラリア・ドンガラでのテレメータ受信試験の様子を紹介されています。ロケットから送られてくるデータを受信する仕事もされているんですね。**

関：そうなんです。私の上司がSIRIUSを開発したのですが、その方がロケットのテレメータについてもやっているので、成り行きで私も参加することになったのです。正直に言うと、ロケットにはまったく興味がありませんでした。でも、やってみたら、これが面白い。

ものすごいスピードで飛ぶロケットを追尾して信号を受信するのは、とて



せき・たえこ。1979年、神奈川県生まれ。東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了。2004年、システム運用部情報処理グループ。2006年4月、システム開発部情報システム開発グループ。科学衛星データベースシステムSIRIUSの開発・運用、ロケットテレメータの受信・解析、小型テレメータの開発・試験などを行う。

も大変。新米の私は毎回ヒヤヒヤです。実はこの仕事をするまで、ロケットというのは打ち上げたら、あとはただ飛んで行くだけのものだと思っていました。

実際は、ロケットから送られてくる信号を受信して、それを解析し、制御や誘導の信号をロケットに送る、ということをリアルタイムでやっている。驚きました。希望通りデータ処理の仕事ができて満足していましたが、意外なところで新しい世界が広がりました。

——**子どものころの夢は？**

関：幼稚園のとき、将来の夢は“科学者”と書いた覚えがあります。白衣を着てカッコいい、というイメージがあったのでしょう。

——**実際、宇宙科学に携わる仕事に就いて、どうですか？**

関：作業着を着て力仕事をしています。ずいぶんイメージと違いますね。SIRIUSやテレメータは、主に室内の仕事です。でも、宇宙研の特色というか、それがいいところなのですが、現場で実際に物に触る機会も多いのです。昨年、ペンシルロケットの再現実験に参加したことは、とても勉強になりました。能代多目的実験場での予備実験では、猛暑の中、作業着にヘルメット、軍手という姿で朝から晩まで汗だくになって走り回っていました。こんなことをしている女の子って……とも思いましたが、嫌いじゃない。性に合っているのでしょう。

——**この先の夢は？**

関：SIRIUSをより使いやすいものに改良していきたい。「あけぼの」やGEOTAILに続く磁気圏の科学衛星ミッションにも携わりたいです。データを処理するという立場で参加する人がいることも、ミッションにとって必要だと感じています。

——**今年も宇宙研に新しい仲間が加わりました。後輩たちに期待することは？**

関：2年前に私が入ったとき、JAXAの名前はほとんど知られていませんでした。でも、「はやぶさ」が活躍し、ロケットの打上げも連続で成功し、新しい衛星が順調に動き始めているおかげで、日本の宇宙開発も一般の人から注目されるようになってきました。今では、JAXAあるいは宇宙機構という名前を、多くの皆さんが知ってくださっています。日本の宇宙開発を支えていくぞ、という意気込みのある人に、どんどん入ってきてほしいですね。私も頑張ります。

ISASニュース No.301 2006.4 ISSN 0285-2861

発行／独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL: 042-759-8008

本ニュースに関するお問い合わせは、下記のメールアドレスまでお願いいたします。
E-Mail: newsedit@adm.isas.jaxa.jp

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。

*本誌は再生紙(古紙100%)を使用しています。 古紙配合率100%再生紙を使用しています

R100

編集後記

この編集後記を書いているのは、「あかり」の目が開いた翌日です。これから新しい宇宙の姿を我々に見せてくれることでしょう。四月。新しい生活を始めた方も、そうでない方も、新しい何かが見えてくると良いですね。

(山村一誠)

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