

「はやぶさ」が撮影した小惑星イトカワ

宇宙科学最前線

月の重力場地図を作る  
～SELENEの小型衛星  
Rstar/Vstarの活躍に向けて～

岩田隆浩

固体惑星科学研究系助教授

月惑星の重力場は、その表面の地形からはうかがい知れない内部の様子を知らせてくれます。月は、地球のほかでは最も我々人類に身近な天体であり、重力場も地球以外では最も詳しく調べられています。月周回衛星SELENE(図1)では月の重力場地図をさらに飛躍的に改善する計画です。では、そのお話の前に、月の重力場の観測から何が分かるのかを見てみましょう。

重力場で調べる内部構造

図2は、NASAのコノプリフ博士らによって2001年に発表された、月の重力場の地図です。Lunar OrbiterやApolloから最新のLunar Prospectorに至る米国の探査機が取得したデータを総合的に解析した結果です。左半分は地球から見えている表側、右半分は裏側です。重力場の地図は、月の重力の等ポテンシャル面であるセレノイ

ド上の標準重力からの差として表され、これを重力異常と呼びます。重力を測定した点の高度を補正して得られた重力異常をフリーエア異常、重力測定点とセレノイドとの間の物質の影響を補正して得られたものをブーゲ異常と呼びます。大きなクレータなど地殻均衡(アイソスタシー)が成立している場所ではブーゲ異常が高くなり、地殻均衡のない小さなクレータではフリーエア異常が低くなるので、地殻の厚さなどの内部構造を知ることができます。

月の表側に見られる丸くて色の濃い領域(図2)は特に重力が大きい場所で、内部に質量が集中していると推定されていることから、マスコンと呼ばれています。重力異常の地図と地形図とを比較すると、マスコンの位置がちょうど大きなクレータに一致していることが分かります。このような様子から、月の進化の初期に巨大な隕石によってクレータが形成された際に、高密度マントル物質の貫入や盆

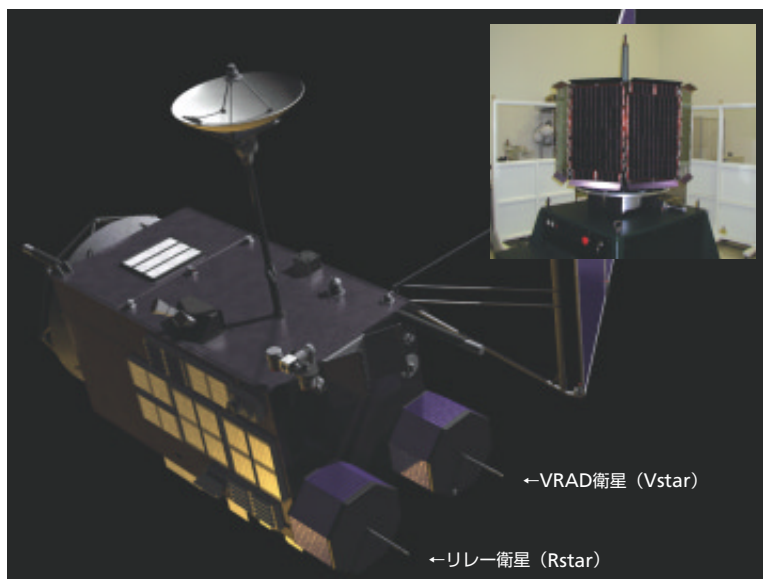


図1 SELENEの小型衛星分離前の軌道上予想図と、リレー衛星(Rstar)の質量特性計測中の写真(右上)。

地への溶岩の集積が起きたことを表しているものと考えられています。

重力場の地図は、球面調和関数の展開係数として表すこともでき、月については推定モデルにも依存しますが、150次ほどまでが推定されています。次数が高いほど細かい構造に対応し、逆に低次では大局的な内部構造を表します。特に2次の項 $C_{22}$ の値から月の慣性モーメントを求めることができ、地震計のデータなどから月のコアのサイズが決まっていればコアの密度が求まり、コアを構成する物質を推定して地球と比較することができます。

では次に、重力場がどのように測られるのかを見てみましょう。

### 探査機の軌道決定から得られる重力場

地球上ではさまざまな場所で重力計を使って重力を測定することもできますが、月や惑星ではこれらの天体を周回する探査機の軌道に対する摂動から重力場を推定します。図3左は、これまでの一般的な重力場の測定方法を表しています。地球上の管制局のパラボラアンテナから発射されたマイクロ波などの電波は、探査機の中継器を使って地上管制局に送り返されます。このときに経過する時間から両者の距離が、地上に戻ってきた電波の周波数のドップラー効果から両者の視線方向の相対速度が求め

られます。これを2ウェイ測距・距離変化率計測(RARR)といいます。軌道上のさまざまな位置で測定することにより、正確な軌道が、さらには軌道に対する重力異常による摂動が算出されます。

ところで、天体の裏側ではマイクロ波が届きませんので、軌道を直接測ることができません。そして側面では、重力による摂動方向が視線方向に直交していることから感度が悪く、計測誤差が大きくなります。月は自転周期が地球に対する公転周期と同期していることから、月の表裏は地球に対して固定されており、裏側は常に直接計測ができません。そこで、表側に出てきたときに軌道に蓄積された摂動から、カウラの法則という拘束条件を用いて推定されてきました。もう一度、図2をご覧ください。月の裏側の地図では、縦や横に連なった不自然な分布が見られますが、ここでは観測精度が粗く、どこまでが実際の分布なのかを正確に知ることができません。一方、月の表側の重力場は、探査機が飛んでデータが増えれば徐々に改善されますが、個々の観測精度は時系の精度に依存し、同じ計測方法を用い続ける限りは抜本的な精度改善は望めません。そこで登場するのが、SELENEの小型衛星を使用するミッションです。

### SELENE小型衛星のミッション: RSATとVRAD

SELENEは、15の観測ミッションで月のグローバル観測を行って月の起源と進化を解明する、日本初の大型科学探査機です(図1)。2007年のH-II Aロケットによる打上げを目指して、現在開発が進められています。SELENEには主衛星から分離される2機の小型衛星「リレー衛星(Rstar)」と「VRAD衛星(Vstar)」が搭載されます。このRstarとVstarは、月の重力場測定を目的とした衛星です。

以下にそのミッションを紹介します。

#### (1)リレー衛星中継器による4ウェイドップラー計測

「リレー衛星中継器(RSAT)」は、Rstarと主衛星に搭載される中継システムで、4ウェイドップラー計測に使用されます(図3中)。SELENEの主衛星が月の裏側を飛行中にJAXA白田局の64mアンテナから発射される電波は、図の①→②→③→④の経路で中継されます。白田局に戻ってきた電波の受信周波数に蓄積されたドップラー効果が測

図2 月の重力場モデルLP165Pによるフリーエア重力異常の地図。左半分は地球から見えている表側、右半分は裏側。(Konopliv et al. 2001からSugano 2004が改良)

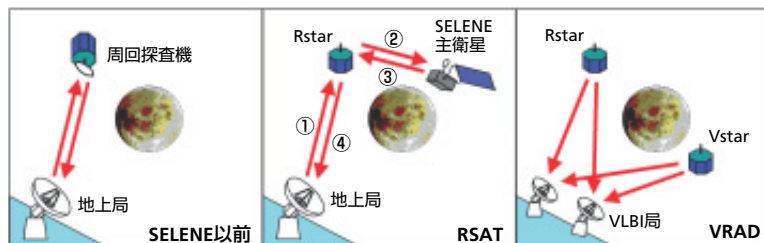
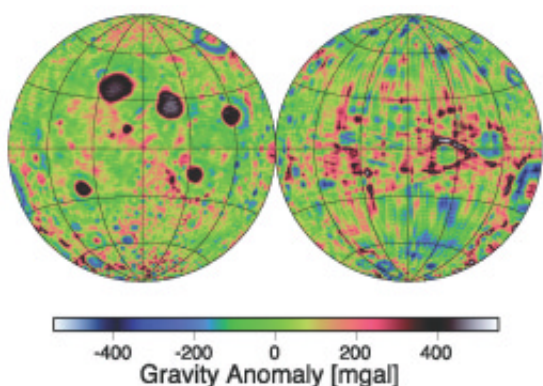


図3 月の重力場の測定方法

左: SELENE以前(Lunar OrbiterからLunar Prospectorまで)の2ウェイ測距・距離変化率計測(RARR)  
 中: SELENEのリレー衛星中継器(RSAT)による4ウェイドップラー計測  
 右: SELENEのVLBI電波源(VRAD)による多周波相対VLBI観測



定され、これを4ウェイドップラー計測と呼びます。Rstar自身の軌道は2ウェイRARRで計測されるので、Rstarに対する主衛星の相対軌道が求められることから、月の裏側の軌道が初めて直接測定されることになります。4ウェイの中継は、これまでは地球の静止衛星と周回衛星間の通信で行われていません。相互にドップラー効果で変動する電波を低電力のシステムで中継するところが、RSATの腕の見せどころです。4ウェイの測定を行える時間は通信経路の相互可視や電力の節約などさまざまな制約を受けますが、それでも試算によれば、重力場展開係数の70次まではカウラの法則を用いることなく、従来の重力場モデルを確実に上回るデータが得られることが分かりました。

月の地形は、海と呼ばれる平らな地形は表側だけに広く分布するなど、表と裏で性格が異なる二分性が知られています。しかしこれまでの重力場データでは、裏側に顕著なマスコンがないことが実際の分布を表しているのかなど、決め手がありませんでした。RSATはこのような重力場の二分性に初めてメスを入れ、月の自転周期と地殻厚さの相互作用をはじめ、月の進化初期の物理現象と内部構造との関係が解明されるものと期待されます。

## (2) VLBI電波源による多周波相対VLBI観測

「VLBI電波源 (VRAD)」はRstarとVstarに搭載される電波源で、多周波相対VLBI観測に使用されます(図3右)。VLBI(超長基線電波干渉計)は、本来はクエーサーやメーザー源などの電波星が発する電波を距離の離れた複数の電波望遠鏡で同時受信して、望遠鏡の位置や電波星の詳細な構造を精密測定する方法です。近年では、「のぞみ」や「はやぶさ」など、探査機の軌道決定にも用いられています。SELENEでは、RstarとVstarの電波を交互に観測する相対VLBI法によって地球電離層の補正を行うことにより、精度向上を図ります。

VRADミッションのもう一つの工夫が、S帯(2GHz)3波、X帯(8GHz)1波を用いる多周波位相遅延VLBIです。位相遅延VLBI法では、幾何学的遅延時間を電波の位相差から直接求めます。このため、これまでの探査機で行われてきた、フリンジ位相の観測周波数に対する傾きから求める群遅延VLBI法と比べて、低電力で高精度な推定が可能です。ただし、位相遅延量が $2\pi$ を超えると解が一意に決まらなくなるので、周波数の異なる複数の電波を用いる必要があります。複数の周波数を合成した低周波も使用すれば、粗い位置決めから細かい位置決定までが可能になります。VRADでは、月周回軌道を20cmの精度で求めることができ、これは2ウェイRARRより2桁以上の精度改善になります。

VRADが搭載される2機の小型衛星は、能動的軌道・姿勢制御を行わないことから、特に重力異常の長期成分が観測されます。従来の重力場モデルに対して、重力場展開係数の10次までの項では、1~1.5桁の精度向上が見込まれます。また、VLBIは視線直交面方向に感度があることから、巨大なクレータであるサウスポールエイトケン

盆地など月の側面の観測精度も向上します。RSATのデータと組み合わせることにより、月全体の詳細な重力場地図が描かれることになります。

## Rstar/Vstarの開発

RstarとVstarは、先に述べた通り重力場観測に特化した衛星であり、姿勢制御のためのニュートンダンパはありますが、重力異常の検出を邪魔するスラストによる軌道・姿勢制御を行わないスピン衛星です。両衛星の形状はほぼ同じで、八角柱の主構体に地球向けの通信を行うS/X帯垂直ダイポールアンテナなどが搭載されています(図1右上)。幅が約1mと、小型衛星と呼ぶにはやや大きめですが、これは側面の太陽電池セルの面積を大きくするための措置で、内部は比較的空いており、質量は約45kgです。

RstarとVstarは、軽量化のためのさまざまな工夫がなされていますが、その代表が分離機構です(図4)。Rstar/Vstarはスラストやホイールによる姿勢制御がないため、分離時に与えられる姿勢とスピンの命です。このため、軽量ながらも安定した分離特性を与えられる機構が必要です。一般にスピン衛星の分離には、ターンテーブル上でスピンを与えて切り離すタイプが使用されますが、Rstar/Vstarでは二つのリングを伸展バネでつないで、ねじりを与えて保持する機構にしました。3ヶ所のブラケットにある火工品で固縛が解放されることにより、伸展バネがリングを押し出して分離速度を与えるとともに、小型衛星下部に設置されたフックが上部リングの回転を伝えて、スピンを与えます。この方式によって分離機構の設計質量が4分の1程度に低減されました。この分離機構の性能を測定するには微小重力での試験が必要ですが、大掛かりなものである場合は条件を変えて多数の測定データを取得したり、測定結果を設計にフィードバックさせて再測定を行ったりすることが困難になります。そこで、ゴムひもで模擬衛星をつり下げて張力と重力が釣り合う位置に分離機構を置くことによって、微小重力を模擬する装置を考案して試験を行いました。図5の中央にある箱が質量特性を小型衛星と一致させた模擬衛星、その上に少し見えているのが衛星をつり下げるショックコードです。こうして得られたデータをもとに開発モデルが作られ、ピギーバック衛星  $\mu$ -Lab Satによる軌道上実証も行いました。

RstarとVstarは、現在プロトフライト試験が続けられており、本稿が皆さんのお手元に届くころには熱真空試験が佳境に入っているでしょう。月の重力場の地図を表も裏も飛躍的に改良し月の内部構造を解明する決定打として、世界中の注目を集めながら、RstarとVstarの開発は最終段階に入りつつあります。

(いわた・たかひろ)

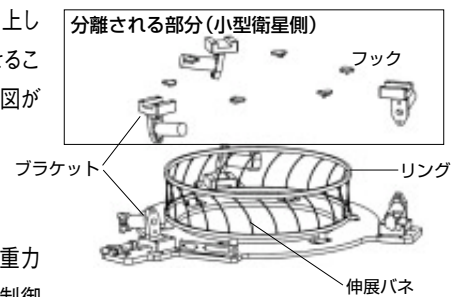


図4 SELENEの小型衛星Rstar/Vstar用に開発された軽量型分離機構。上の長方形の内側が、分離される小型衛星側の部品。

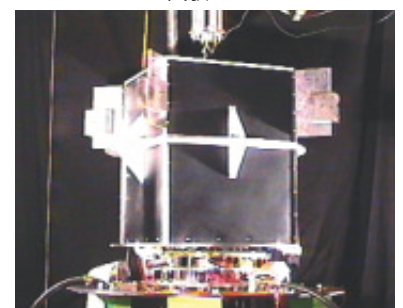


図5 模擬衛星とショックコードを用いた、分離機構の地上分離特性計測試験。

## VSOPチームがIAA「チーム栄誉賞」を受賞

VSOPチームが、国際宇宙航行アカデミー(IAA)の「チーム栄誉賞」を受賞しました。授賞式は、福岡で行われた国際宇宙会議に先駆けて10月16日に行われ、世界各国のVSOPの仲間たちが福岡に集合し、受賞の喜びを分かち合いました。

VSOP(VLBI Space Observatory Programme)は、電波天文衛星「はるか」を使ってスペースVLBIを行い、ハッブル宇宙望遠鏡で得られるより約200倍も解像度の高い電波画像を実現しました。VLBI(Very Long Baseline Interferometry)とは、距離の離れた複数のアンテナを組み合わせる一つの仮想的な巨大望遠鏡を作る技術で、世界各地の電波望遠鏡群を組み合わせることによって、地球規模の電波望遠鏡を作ることができます。1997年に内之浦から打ち上げられた「はるか」では、軌道上の「はるか」の電波望遠鏡も加えてアンテナの広がりを宇宙まで延ばし、地球の大きさの約3倍もの

電波望遠鏡を作ることに成功しました。

この抜群の解像度を駆使して、はるか彼方のクエーサーから噴き出すジェットの詳細な姿をクローズアップして見せ、世界をアッと言わせました。今回の受賞は、世界をまたにかけた見事なチームワークに対して与えられたものです。過去にはこの賞を、ロシアのミール宇宙ステーション(2001)、アメリカのスペースシャトル(2002)、太陽観測衛星SOHO(2003)、ハッブル宇宙望遠鏡(2004)などの各チームが受賞しています。これらと比べても、遜色ない高い業績が高く評価されました。

授賞式の当日は、チームリーダーである平林久教授が受賞記念講演を行い、満場の喝采を浴びました。「はるか」を中心とする強い絆で結ばれたVSOPチームの皆さん、おめでとうございます。皆さんは、このプロジェクトを実現するために努力したロケットのチームを含めた、みんなの誇りです。(的川泰宣)



授賞式での世界各国のVSOPの仲間たち。IAAのストーン会長、松尾副会長、コンタン事務総長と一緒に。

## カーナビ用から転用した宇宙用超小型GPS受信機 「れいめい」の新技术

今回は、「れいめい」のために開発された、超小型GPS受信機をご紹介します。

衛星用のGPS受信機は従来からありましたが、重量が10kg以上、価格は1億円に手が届きそうなものでした。一方では、カーナビ用のGPS受信機は重量数十g、サイズは2×4cm程度、価格は数万円程度です。カー

ナビ用GPS受信機を衛星に搭載すると、どうでしょうか？残念ながら、それでは動作しません。衛星の軌道運動による毎秒約7kmという速度のために、ドップラー効果によって受信GPS信号の電波の周波数が大きくずれてしまうからです。

そこで私たちの研究室では、軌道上でのドップラー

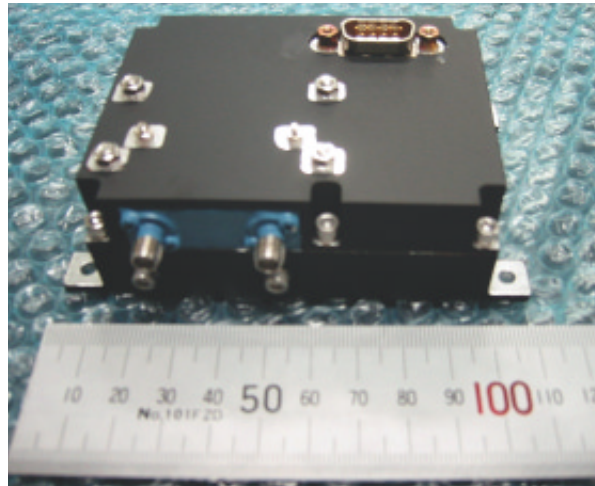


周波数を統計的に計算して、受信機がGPS電波を探す周波数範囲を広げるようソフトウェアを一部変更してくれないかと、カーナビメーカーに頭を下げてお願いしました。改修後のGPS受信機は宇宙研で引き取って、研究室の学生とGPSシミュレーターを用いた試験を精力的に実施しました。放射線にも堅固であることが放射線照射試験で判明し、トータルドーズ耐性20krad、200MeVプロトンに対してSEL（シングルイベントラッチアップ：放射線の影響で回路に過大電流が流れて永久損傷になる可能性がある障害）は起きません。こうして「れいめい」の超小型GPS受信機は完成し、現在では軌道上から毎秒ごとの衛星位置を知らせてくれています。軌道上での試験データでは、測位位置のランダム雑音は0.5m程度です（地上試験からは絶対精度は10m程度だが、GPS測位よりも精度の高い位置決定方法はないので軌道上では確認はできない）。

今では、衛星製造メーカーやJAXA筑波のグループ

からの経済的な支援が出るようになり、このGPS受信機は宇宙ステーション、SERVIS-2号や多くの小型衛星に搭載される計画になっています。

（齋藤宏文）



FM-GPS受信機

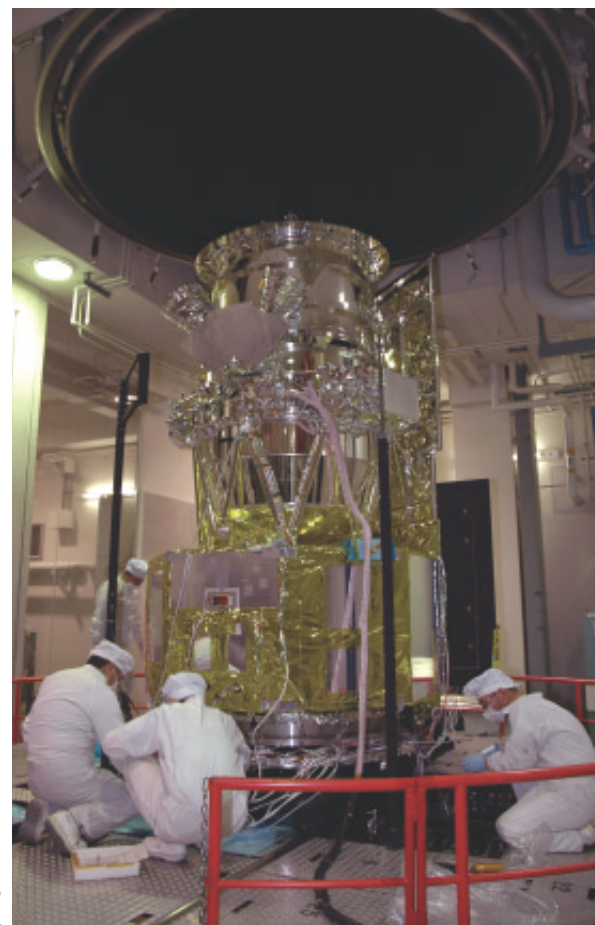
## ASTRO-Fの現状

日本初の本格的な赤外線天文衛星ASTRO-Fは、来年初めの打上げに向けて、衛星試験の最終段階に入っています。10月半ばには熱真空試験を無事終了しました。これは、宇宙の環境を模擬するスペースチェンバに衛星を入れ、温度制御がうまく働くことを確認する試験です。今後は質量や慣性モーメントなどの最終測定や、打上げ直後の衛星運用の練習などを行い、12月末には内之浦の射場に運ぶ予定です。

ASTRO-Fは、7月の「すざく」から約半年というM-Vロケットとしてはこれまでにない短い間隔での打上げになるため、M-Vチームは大変忙しいスケジュールをこなしています。

衛星側でも、衛星追跡を行う国内・外の地上局の準備や、衛星運用のための各種整備を急ピッチで進めています。打上げ後の観測計画も主要部分がほぼ決まりました。観測時間の一部については、一般の天文研究者からの観測提案も現在受け付け中です。遠くの銀河や、生まれたばかりの星や惑星系などの面白いデータが得られることを楽しみに、関係者一同、最後の詰めに頑張っています。

（村上 浩）



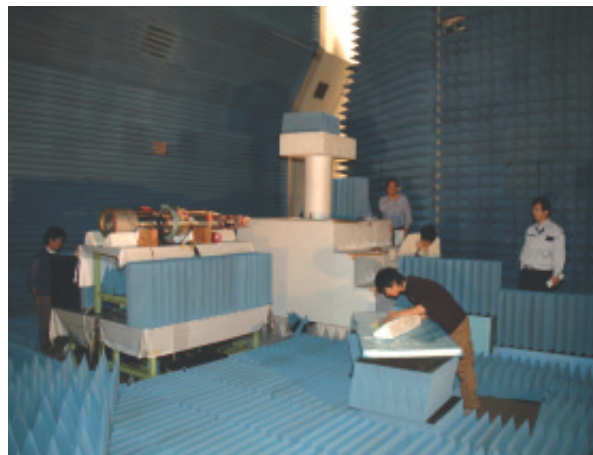
熱真空試験準備中の  
ASTRO-F衛星

## 観測ロケットS-310-36号機の噛合せ試験

観測ロケットS-310-36号機の噛合せ試験が10月14日から始まり、2週間余りの日程がちょうど終了した。本号機の目的は、複数衛星によるアレイアンテナの構成実験である。アレイアンテナは、ロケットから分離された親衛星を中心として、三角形端点の3機の子衛星との計4機で構成されることになっている。また、親子間通信や地上への送電実験などに種類の電波を使うため、噛合せ試験期間中に電波暗室でアンテナ試験の日を設けたことが特色となった。

本号機の実験は、神戸大学賀谷研究室と東京大学中須賀研究室の共同提案によるものである。将来の大型宇宙構造物の一つの形態として、膜や網の端に小型衛星を取り付け、その小型衛星の推進力を利用して膜や網を広げる方式が研究されており、超大型の太陽電池やアレイアンテナの構成方法などへ、この概念が利用できる。今回の実験は、この方式による大型宇宙構造物構築法の実証実験であり、また、アクティブフェイズドアレイアンテナの宇宙空間における基礎実験である。

ロケット共通機器部組み込み、実験機器部組み込み、頭胴部組み上げ、タイマーシーケンス試験、機械環境試験、電波暗室におけるアンテナ構成試験と通信試験など、今回予定していた試験を終え、来年早々の最終チェックを経てフライトオペレーションに入る予定である。  
(樋口 健)



電波暗室におけるアンテナ構成試験

## 第6回 宇宙科学シンポジウム

日時：2006年1月5日(木)～6日(金)

場所：宇宙科学研究本部 本館2階大会議室

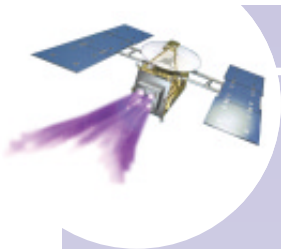
詳細は、下記Webページをご参照ください。

<http://www.isas.jaxa.jp/j/symp/sss6/index.shtml>

## ロケット・衛星関係の作業スケジュール(11月・12月)

	11月	12月
相模原	M-V-8号機 モーションテーブル試験	
		ASTRO-F FM総合試験
		SOLAR-B FM総合試験
筑波		M-V-7号機/SOLAR-B 頭胴部(衛星)仮組 (IA富岡)
		SELENE システムPFM試験
内之浦	M-V-8号機 第1組立オペレーション	
		M-V-8号機 第2組立オペレーション

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



# はやぶさ近況

## イトカワの観測速報

「はやぶさ」は9月12日に小惑星イトカワの太陽側20kmのところ<sup>1</sup>に到達し、さらに9月30日にはホームポジション(イトカワから7km)に到達しました。搭載観測機器である、多波長撮像カメラ(AMICA)、近赤外分光器、蛍光X線分光器、レーザー高度計(ライダー)はすべて正常に動作し、順調な観測が続いています。10月8日からは、イトカワに対する相対位置をいろいろ変えながら観測を続け、イトカワまでの最短距離約3km付近での近接観測も実施しています。今回は、これらの観測によって得られたイトカワについて書いてみることにします。

自転周期12.1時間、自転軸下向き(地球とは反対向き、南極が上側)という結果は、打上げ前の地上観測による予想とほぼ一致していましたが、とらえられたイトカワの姿は驚くべきものでした。表紙の写真で見ると、何となく二つのブロックがくっついているような形をしており、大きさは540m×270m×210mです。これまでNASAの探査機によって撮像された10km以上の小惑星では、表面はレゴリスと呼ばれる厚い砂や礫の層で覆われており、のっぺりとした中にクレーターやところどころに岩が散見されるというもの<sup>2</sup>でした。ところが、今回のイトカワの表面はこれらとはまったく異なる多様な状態を見せており、表面は大きな岩だらけで、部分的にレゴリス地域が見られます。普通レゴリスは、隕石などが外部から高速度で衝突して放出した破片のうち、脱出速度以下の破片を再集積させてできると考えられています。イトカワのように非常に小さな天体では、衝突で出された細かい破片(一般的に細かい破片ほど高速度で放出される)を表面にとどめておくのが難しく、その結果、厚いレゴリス層が発達しにくく、表面の岩や石が露出しているのでしょう。ということで、今回初めてレゴリスで覆われてしまっていない天体の表面を見たことになります。

イトカワ上に見られる岩の大きいものには、50mぐらいのものがあります。過去の研究から、このようなものはイトカワの上に見られる最大級のクレーターからでも作ることができないと考えられます。きっと、この天体が母天体から衝突破壊で作り出されたときに、同時に出された破片の一部を降り積もらせているのでしょう。イトカワが受けた衝突の歴史を読み解くために、クレーターや岩石のサイズ分布の詳細な解析が進行中です。

近赤外線分光器によっては、表面の近赤外線スペクトルが取られています。これによって表面を構成する鉱物の種類や、この小惑星がどのタイプの隕石と対応するのかが議論されています。特にAMICAのデータとも合わせて、宇宙風化現象による表面の光学特性の変化がどれくらい進行しているかは、小惑星タイプと隕石タイプの対応関係を明らかにする上で重要な検討課題となっています。

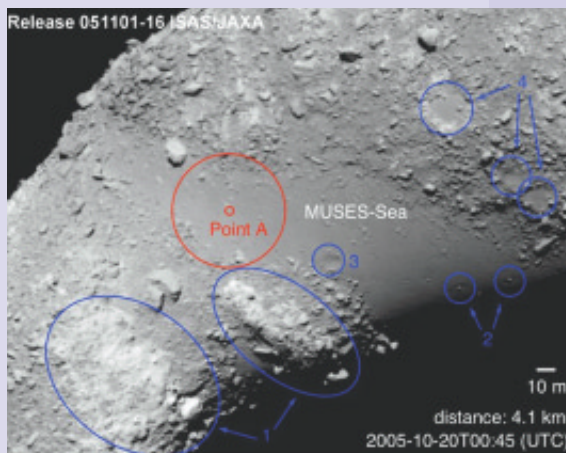
画像やライダーのデータを用いてイトカワの数値形状のモデルが作られつつあり、それから体積が求められています。これと、イトカワ近傍での探査機の運動の解析から得られる質量推定値とを合わせて、

密度が $2.3 \pm 0.3 \text{g/cm}^3$ と見積もられました。地球上の普通の岩石と比べると、幾分小さめの値です。

10月末には、観測データを持ち寄り検討して、小惑星試料採取のための候補地点として、岩だらけの中でも比較的平坦な2ヶ所が提案されました。いよいよ11月にはサンプル採取のために表面に向かって降下し、このミッションにとって最もエキサイティングな瞬間を迎えることとなります。

(藤原 顕)

着陸・試料採取候補点A。MUSES-Sea域は、イトカワ中央部に広がるレゴリス地域である。周辺には、露出した岩肌(1)、岩塊(2)、くぼみ(3)、クレーター(4)も見られる。





# 浩三郎の 科学衛星秘話



「あすか」



井上浩三郎

「あすか」は軌道投入後、衛星の基本共通系統の作業を正常に終了し、姿勢制御、パドル展開が行われました。そして観測機器の高圧電源投入、CCD冷却系の確認、CCDカメラのふた開けなどを行い、観測態勢に入りました。

## ノイズ低減の苦勞

「あすか」衛星は「ようこう」衛星と同様、総合試験で電源ノイズ低減に多くの時間を費やしました。特に衛星の温度などアナログ信号を計測するハウスキーピング装置(HK)には電源からくるノイズが重畳し、その低減に苦勞しました。温度を計測するセンサーにセンサーインピーダンス50オーム(2.5V)の張り付け型白金センサーを使用しており、センサー1個(1チャンネル)当たりの電流が1mAで、64チャンネルで計64mAが流れていました。そのためターンのとり方によっては信号にノイズが乗りやすく、HKでは設計上共通リターンになっていたため、電源ノイズの影響が大きく出てしま

ました。

このためコンデンサーを付けたセーバーコネクタを製作し、計装のコネクタとコネクタの間に挿入してノイズの低減努力が図られました。その効果は大きく、信号ノイズは劇的に低減されました。このコネクタを製作し、HKを担当された松下通信の古橋五郎さんは「現在では、センサーインピーダンスは1キロオームで作られているためノイズも少ないし、かつ測定時のみ電流を流すため消費電力も少ない」と、当時苦勞したことを懐かしげに語っておられました。

## 姿勢制御チームの疲勞の中での満足感

無事衛星軌道に投入した後、太陽電池パドル展開までの初期姿勢制御作業は緊張の連続でした。まずは、ヨーヨーデスピナによってスピンを落とし、磁気トルカと地磁気センサーで歳差運動を抑えた後、4台のリアクションホイールを起動し、角運動量を機軸と直角方向に移し、衛星をフラットスピン状態になる軸変更制御を行いました。

この軸変更動作を行う前に、太陽角と通信条件から大きなマヌーバを伴う衛星スピン軸を変更する必要が生じました。定常運用姿勢制御のための運用ソフトは自動化され整備していましたが、初期運用のクリティカルフェーズの姿勢制御コマンドは手作業で作る必要があり、作業者にとって大きな負担になりました。

チーム一体になり懸命の努力で、太陽電池パドル展開に必要な姿勢条件に衛星姿勢を向けた後、無事太陽電池パドル展開が行われました。この間、緊張と連続作業のためメンバーの1人が貧血を起こすハプニングもありましたが、大事に至らず、皆で大変な作業が無事成功裏に終了した満足感に浸りました。

当時、姿勢制御を担当されたNECの前田健さんは、「大変しんどい作業で疲れましたが、衛星主任の田中靖郎先生から『無理をかけました』と、ねぎらいの言葉を頂き感激しました」と語っておられました。

(いのうえ・こうざぶろう)

# X線天文衛星「あすか」その2

## 「あすか」搭載観測機器



X線反射望遠鏡 (XRT)



X線CCDカメラ (SIS)



撮像型蛍光比例計数管 (GIS)



# 宇宙の麗人

## 惑星になれなかった惑星——小惑星ベスタ

技術開発部開発員 長谷川直

太陽系には、いくつの惑星があるのでしょうか？最近、10番目の惑星発見か!?というニュースが時折、飛び込んできます。この惑星探しは、実は今に始まったわけではありません。ヨハン・ダニエル・ティティウスが今から約240年前に、当時知られていた6個の惑星（水星～土星）の太陽からの距離はある関係で示されるという法則を発見しました。その約15年後に天王星が発見され、太陽からの距離がこのティティウスの経験則に当てはまったために、がぜん注目されました。ティティウスの式では、実は火星と木星の間に抜けがあり、その間に惑星が存在するはずである、となっていました。そこで、火星と木星の間に存在するであろう惑星の搜索がされることとなりました。

その結果、今から約200年前に、火星と木星の間に存在している天体（セレス）が発見されることになりました。火星と木星の間には一つの惑星が存在した、めでたしめでたし、と思った矢先に、二つ目の天体（パラス）が発見されました。フレデリック・ウィリアム・ハーシェルは、パラスが発見されたその年にこの二つの天体の大きさを測定し、月より小さな天体であることを見いだしました。ハーシェルは、この二つの天体がその当時発見されていたほかの七つの惑星とは同じでないと考え、まるで恒星のように点に見える星、つまり星もどきの惑星だということで、「アステロイド（日本語では小惑星という訳）」と名前を付けました。その後、3番目にジュノー、4番目にベスタが発見され、これらの四つの星

は惑星というよりは、むしろ惑星の破片であると考えられるようになりました。そして破片ならもっとたくさんあるだろうと考えられ、小惑星の搜索が現在に至るまで続けられています。現時点で、軌道が確定しているものだけでも、小惑星は12万弱発見されています。

地球型惑星の内部は金属コア・マントル・玄武岩質地殻といった層構造に分かれています。内部が融けて層構造になる前は太陽系形成初期にできた物質で構成されていたと考えられています。ほとんどの小惑星は、惑星の破片というよりはこの太陽系形成初期にできた物質の生き残り、と現在考えられています。

しかしながら4番目に発見された小惑星ベスタは、実は大多数の小惑星とは異なり、内部に層構造を持つ、まるで地球型惑星のような天体なのです。しかも、金属コア・マントル・玄武岩質地殻といった層構造を現在も持っている小惑星は、ベスタのみと考えられています。ベスタは、その大きさが小さかったために、惑星になれなかった惑星、ともいえるかもしれません。

ベスタの名はローマ神話の竈の女神ベスタに由来していますが、内部に火を宿す竈の女神の名を、その天体内部が一度融けたであろう小惑星に付けたのは、命名者である（電磁気学のガウスの法則で有名な）カール・フリードリヒ・ガウスの先見の明でしょう。神話ではこの女神は自らの子供はもうけずに、孤児や迷子の保護者であったともされていますが、小惑星ベスタは自身の由来であろう小さな小惑星群とグループを成しており、この点においては残念ながら神話通りではなかったといえます。10年ほど前にハッブル宇宙望遠鏡がベスタ表層を観測（図1）して、表層に巨大なクレーターを発見していることも、上記のことを後押ししております。ベスタから放出されたであろう破片の一部は地球の近くにもやって来ており、その一部は隕石として落下しているであろうことが考えられ、実際にベスタ由来と考えられる隕石も見つけられています（図2）。そういう意味では、ベスタは隕石の故郷とははっきりと同定されている天体の数少ない例の一つでもあります。

ベスタはこれまでに、考えられる観測がほとんど行われ、すでに調べ尽くされた感もありますが、人間は知れば知るほどまた知りたくなるという性を持っているようで、NASAは、Dawn計画にて探査機をベスタ（とセレス）に送り込み、詳細に調査しようとしています。この惑星になれなかった天体ベスタは、今なお私たちに魅了し続ける女神のような天体ということなのでしょう。

（はせがわ・すなお）

図1 左上：ハッブル宇宙望遠鏡で観測された小惑星ベスタ  
右上：ハッブル宇宙望遠鏡の観測から作られた形状モデル  
下：形状モデルに地表の高さを色で表している。赤系は高度が高く、青系は高度が低い。  
©NASA

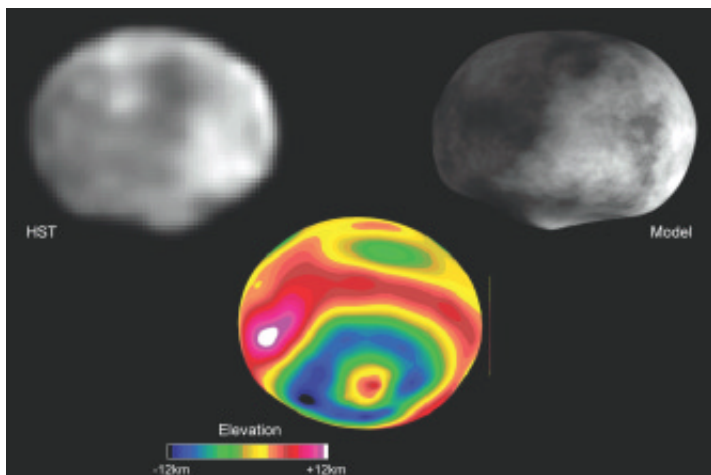
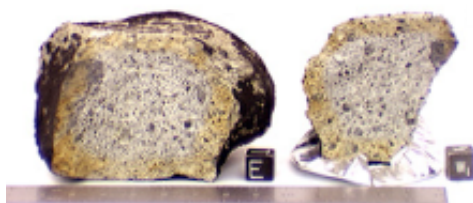


図2 ベスタから来たと考えられている隕石  
©NASA



魅惑のサントリーニ島へ

ヨーロッパ低重力学会 (ELGRA) の隔年会議が9月21日～23日にギリシャのサントリーニ島 (ギリシャでの正式名はティラ) で開催され、参加した。往復路とも、途中スキポール空港 (オランダ)、アテネ空港 (ギリシャ) を乗り継いで2泊5日 (機中泊、空港泊含む) という時間的な無駄の多い旅程であったが、その苦勞もさまつなことに思えてしまうほどに、サントリーニ島は魅惑的な観光地であった。

白い壁と青い屋根の家々がエーゲ海を見下ろすサントリーニ島は、キクラデス諸島に属する大きな三日月形の島である。紀元前15世紀に島の中央にあった火山が噴火して山腹を吹き飛ばし、この火山の外縁が残って現在の島の外観となった。真偽のほどは定かではないが、プラトンによる古代アトランティス大陸沈没の伝説はこの島の爆発を指すとする仮説が、歴史学者から近年提案されている。そして、その火山の噴

火の際に火山灰の下に埋もれたアクトイリ遺跡はポンペイ遺跡に例えられ、数多くの観光客を引き付けている。サントリーニ空港から島の中心であるフィラの街までは、タクシーで5分程度だ。

学会開催会場である P. M. ノミコス・コンファレンスセンターはフィラにあり、陸海空を一望

できる断崖上に立っていた。学会のトピックスは生命科学、物理科学、材料科学、流体科学、生理学、生命工学であり、特に今回は日欧の流体セッションが設けられた。初日の基調講演では、微小重力科学分野で日本とヨーロッパの共同研究がいかに多く、また長年にわたって続けられてきたかが紹介された。日本からは20件を超す発表があり、私自身は大気球を利用した新しい微小重力実験に関する研究を報告した。

古代に思いを巡らし

学会主催の遠足は、ワインの試飲、アクトイリ遺跡の見学、そしてイアの夕陽見物であっ

た。サントリーニワインは火山性の土壌にはぐくまれた葡萄から作られ、フルーティーな味わいを持つことで知られている。アクトイリ遺跡では、ガイドがヨーロッパ地図を地面に広げながらユーモアを交えてギリシャ神話、アトランティス伝説、そして遺跡発掘に至る経緯を語ってくれたおかげで、興味深く古代に思いを巡らすことができた。ここで発掘された遺物の多くはアテネの考古学博物館に展示されているらしいが、いざ自分の足で遺跡に立つと、某映画の主人公のセリフではないけれど「歴史は現場で起こっているんだ!」という気になるから不思議なものである。

フィラの街にはレストランや土産物屋、両替商、旅行会社などが所狭しと軒を並べている。夕食時に、学会参加者とともにタベルナ (伝統的なギリシャ式の料理店) でサガナキ (チーズの揚げ物)、ムサカ (ラザニアのようなもの)、スブラキ (魚や肉のくし焼き)、カラマリ (イカの唐揚げ) を堪能した。「タベルナで うまい料理を食べている イカの揚げ物 舌にカラマリ」。一句できた! などとくだらぬことを考えながらこの土地の料理をいただけたのは、私にとって至福の一時であった。

夕陽の沈むときに

イアは島北端の街である。世界で一番美しい夕陽が見られるというキャッチフレーズは、あながち誇張ではなかった。視界に広がる水平線に沈みゆく夕陽。青からオレンジに、そして赤く染まっていく西の空。夕焼けに染まる白い壁、風車。浮かび上がる小島のシルエット。そういえば先述のガイドが、「イアの夕陽を見るとき、日本人は写真を撮る。イタリア人はキスをする。ギリシャ人はウヅを飲む」と言っていた。そう、この場はやはりウヅ (リキュールの一種) が似合う。

以上、誌面の終わりに来て振り返ると、まるで観光ガイドのような文章になってしまった。ともあれ短い滞在期間ではあったが、研究発表や議論だけでなくギリシャの魅力の一端に接することができる喜びを味わったのは、私だけではなかったはずである。今回の学会参加者たちとは別の機会にまた会えることを祈念しつつ、ここに筆をおく。

(いなとみ・ゆうこう)



イアの夕陽 (撮影: 帝京科学大学 高木喜樹先生)



# 外野の応援団から

東京大学定年で宇宙観測業務とのご縁が切れて20余年。本業の非破壊検査の対象としての宇宙機器への関心は続いていたが、内之浦の「いも焼酎」の味も忘れていたところへ、ペンシルロケット50周年記念行事のご案内を受領。

脳硬塞の退院後、外出は避けていたのに懐かしさのあまり、老妻の介添えを得て幕張メッセへ強行出席。古巣の皆さんとの再会を喜んでいるところが川編集委員長の目に留まったらしく、古いことでも何でもよから書け、とのことで困惑。

## 秒読みを 電車が止める 観光地

国分寺でのペンシルロケットの水平発射が、先日の幕張での記念行事の際、屋内の多数の観客の前で見事に再現された。国分寺実験は屋根のない半地下壕で、南側のコンクリート板塀の外側は国鉄の中央本線。塀の上に腰掛けた総務班の菅家氏が見張っていて、電車・列車が近づくとストップをかけ、秒読みが中断されるのであった。

東大のロケット開発30年を記念した『軌跡』（宇宙研編、1986年9月刊）が企画され「ペンシル・ベビーの頃」と題して初期の思い出を書いた際は、コンクリート板塀の記憶を頼りに水平発射実験の現場を確かめるべく国分寺駅から東へ歩いて探し回り、現在は早稲田実業学校となっているグラウンドの南端と同定した。国分寺市の観光地図には、「日本の宇宙開発発祥の地」と朱書されている。

## 初期の非破壊検査

一般的な構造物としてのロケットの検査は、例えばNKK川崎などで実施したほか、固体燃料ロケット特有の検査としては、ケース内面とライナー・燃料の接着不良などが重要な項目であった。特に同じ姿勢で長期間保存すると、燃料の自重による圧縮で頂部に接着不良部やすき間ができるのだ。長期保存前後の透過写真を並べてあるのを米誌で見

## 丹羽 登

東京大学名誉教授

て、はく離検査の重要性を知った。銅板の裏面の接着不良は超音波探傷器で分かるので、日産川越で実験した。接線方向に放射線を通した写真を見ると、非接着部分の限界と超音波検査による不良部の境界とがほぼ一致することが分かった。日産の荏林久男氏が、この実験と情報収集に大奮闘された。

問題はその判定基準で、我々にはその基準となる前例・データがまったくない。1967年12月、駒場の宇航研での「宇宙航空工学におけるFRPシンポジウム」への報告では、東大のロケットで同一機種での最大数が、わずか約20機と少ないのだ。

固体燃料ロケットの有名メーカーであるAerojet General社の報告によると、「当社はすでに40万機のロケットを作ったが、その総合信頼度は99.99%であった。それに要した非破壊検査の費用は、開発段階では制作費の35%にも達し、最終段階ではわずか5%に低下した」とのこと（その根拠、計算方法は不明）。

取りあえずは、この検査作業はロケット班に渡し、データを増やしてもらうようになった。そのためには検査機器の予算も必要と、上記データをセンターメンバーの諸氏へ宣伝していたところ、糸川教授の帰朝報告の後、小生に「超音波検査などしていなかった」と言われたのには苦笑した。この種の製品への非破壊検査の適用状況、その結果などを話すことは恥部をさらけ出すようなもので、非破壊検

査屋として可能ならば隠したい気持ちはよく分かる。強く質問されても適当に答えるのが普通なのだ。

## 外野の応援団

敗戦の前年に卒業研究で高木教授から与えられたテーマが、パルスレーダー調整用エコー発生装置であった。当時のレーダーは動作不安定で、調整に水晶遅延回路の疑似エコーを使った。同盟国ドイツから潜水艦で伝えられた技術と聞いた。様子の分からぬまま苦心<sup>さんたん</sup>で作り上げ、試作機を抱えて空襲下の関東地区のレーダー基地を回っていた。敗戦直前の7月には双発機の機首のレーダーの調整も要求され、徹夜で組み上げて富山の基地へ通うこと3回。空襲と機銃掃射で寸断の国鉄を乗り継ぐ苦難の旅で、敗戦は富山で迎えた。

拾得していたパルス技術の知識と経験をもとに超音波探傷器を作り、復興途上の製鋼・造船業界での検査に試用、非破壊検査グループの立ち上げに貢献し得ていた。さらに検査技術の開発、検査法のJIS化、ISOとの協調、国際組織への日本代表等々、多忙を極めていた。

9月号の本欄に平尾教授は「外野席での応援から、後半はチームの一員へ」と書かれた。小生はペンシルロケットのころ、発射場の地上通信系を担当するよう高木教授から指示されたが、上記のような極端な多忙と、勤務先の主要テーマへは協力すべきとの矛盾から、外野の応援団に徹しざるを得なかったのは残念であった。（にわ・のぼる）



球形モータのはく離を調べる非破壊検査



# JAXAの中で“宇宙研の原点”を輝かせたい

宇宙科学研究本部長  
井上 一

—10月1日に、宇宙科学研究本部の本部長に就任されました。宇宙科学の展望をお聞かせください。

井上：宇宙科学には、大きく分けて二つの夢があると思います。一つは、宇宙でどのようにして銀河や星、惑星系が生まれ、地球や生命が生まれてきたのか、自分たちのルーツを知りたいという夢です。

もう一つの夢は、宇宙がどのように進化してきた、これからどうなっていくのか、宇宙を支配している基本的な物理法則を知ることです。この数年の観測により、宇宙の膨張が加速していることが分かりました。また、宇宙を構成しているエネルギーや物質のほとんどが、正体不明のダークエネルギーやダークマターであることも明らかになりました。その正体を解明することが、天文学の大きな課題の一つです。

—どのようにして、その正体を解明するのですか。

井上：こうすれば解明できるという答えはありません。しかし、新しい観測装置を向ければ、宇宙は新しい姿を見せてくれます。そこから従来の常識を覆すことが見つかる。それが天文学の歴史です。私の専門はX線天文学ですが、X線で宇宙を見ると、地上の実験では再現できないエネルギーが非常に高い状態や、ブラックホールの近くのように重力が極端に強い状態を観測できます。そこには、今の理論では理解できない現象が潜んでいるはずで、そのような従来の常識を破る現象を観測することが必要です。

—宇宙研は、天文学にどのような形で貢献しようとしているのですか。

井上：宇宙の新しい姿を見るために、より大きな望遠鏡をつくり観測していくことが、天文学の大きな流れ、王道です。ただし、計画の規模が大きくなるとコストもかかるので、これからますます国際協力が必要になります。世界と協力して天文学のフロンティアを切り開いていくことが、宇宙研の重要な役割の一つです。

ただし、宇宙の新しい姿の一面を見ることは、非常に鋭い切り口を持った独自の観測装置をつくれれば、比較的小さな衛星でも可能です。要は知恵次第。もともと宇宙研の良いところは、鋭い目標を一つ立て、理学と工学の人が一緒になってアイデアを凝らし、規模は小さくてもこの部分は世界一だといえる観測装置や衛星をつくり、世界に負けない重要な観測を継続的にやってきたことです。それが宇宙研の原点です。

—井上本部長は、一貫して日本のX線天文衛星の計画に携わり、



いのうえ・はじめ。1949年、東京都生まれ。理学博士。1975年、東京大学大学院理学系研究科天文学博士課程を就職のため退学。同年、東京大学宇宙航空研究所助手。1981年、宇宙航空研究所の改組により宇宙科学研究所助手。1988年、助教授。1994年、教授。2005年10月、宇宙科学研究本部 本部長・JAXA理事。専門はX線天文学。

世界をリードしてこられましたね。

井上：1970年、私が学生のときに、X線天文衛星の草分けであるアメリカのUhuruが打ち上げられました。当時はX線で光る天体の正体がよく分かっていなかったため、私はその問題を研究するようになりました。その後、幸運にも宇宙研の前身である宇宙航空研究所に助手として採用していただきました。学生のときは理論研究だけだったのですが、実験のやり方を教えてもらい、ものづくりも行うようになりました。しかし、最初に携わったCORSAというX線天文衛星はロケット打上げに失敗しました。私が最初に経験したのは、失敗だったのです。その3年後、1979年に私たちは日本初のX線天文衛星「はくちょう」の打上げに成功しました。

当時のチームの規模は20人くらい。しかし最近では宇宙研の衛星もどんどん大きくなり、準備から衛星打上げまで約10年、チームも100人規模になってきました。若い人たちが自分たちの手でものをつくり、アイデアを試してみる機会が少なくなっています。比較的小さな規模のチームの中で試行錯誤し、失敗も経験することで、初めて計画全体を見る目が訓練されます。すると大きな計画に参加しても、いろいろなところに目が行き届くようになります。現在の宇宙研において、大きな衛星計画はもちろん大切ですが、アイデアを磨き澄ませて世界と勝負する、規模の小さな計画を大事に育てていくことも、本部長としての私の課題だと思っています。

—どのような計画が考えられますか。

井上：今、バイオやナノテクなどの分野では、若い研究者も競争的資金を獲得して、数年のサイクルで独自のアイデアで研究を進めています。それに近いやり方を宇宙科学でもぜひ実現したい。例えば、宇宙研や大学などの研究者の小さなグループが自分たちのアイデアで作製した観測装置を、安く早く打ち上げられるシステムをつくれませんかと考えています。若い人が、ある時期に自分たちの手でもとんとん工夫して観測装置や衛星をつくることは、JAXA全体にとっても必要です。そのような経験により、大きな衛星を確実につくるようになります。宇宙研の原点をJAXAの中で発展させ、みんなで新しいJAXAを築いていきたいですね。

—どのような計画が考えられますか。

井上：今、バイオやナノテクなどの分野では、若い研究者も競争的資金を獲得して、数年のサイクルで独自のアイデアで研究を進めています。それに近いやり方を宇宙科学でもぜひ実現したい。例えば、宇宙研や大学などの研究者の小さなグループが自分たちのアイデアで作製した観測装置を、安く早く打ち上げられるシステムをつくれませんかと考えています。若い人が、ある時期に自分たちの手でもとんとん工夫して観測装置や衛星をつくることは、JAXA全体にとっても必要です。そのような経験により、大きな衛星を確実につくるようになります。宇宙研の原点をJAXAの中で発展させ、みんなで新しいJAXAを築いていきたいですね。

ISASニュース No.296 2005.11 ISSN 0285-2861

発行／独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部  
〒229-8510 神奈川県相模原市山崎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



編集後記 衝撃的な「イトカワ」の表紙画像。編集作業をしていても、ついついこの画像に目移りしてしまいます。自然の不可思議さには驚かされるばかりです。宇宙や惑星を探索することの意義をひしひしと感じる今日このごろです。(田中 智)

デザイン／株式会社デザインコンビピア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト