



磁気圏観測衛星「あけぼの」の停波作業実施直後の管制室の様子。2015年4月23日。

## 宇宙科学最前線

# 大気圏突入機の新コンセプト 畳んで、広げて、膨らむ、大気圏突入機

宇宙飛行工学研究系 助教  
山田和彦

### 宇宙と地球を普通に行き来できる 時代に向けて

将来、宇宙と地球を普通に行き来する時代がやって来たときに、宇宙から地球に帰ってくる乗り物はどのような形なのでしょう？①アポロ宇宙船や小惑星探査機「はやぶさ」帰還カプセルのようなカプセル型？②それとも、スペースシャトルのような翼のある飛行機型？③いや、浮き輪とやわらかくて大きな膜が取り付けられたちょっと変わった乗り物かもしれません。

今、我々はそんな時代に向けて、③のようなこれまでにない特徴を持った新しい大気圏突入機についての研究を進めています(図1)。

### なぜ展開構造物が必要なのか

宇宙開発に共通した大きな課題は、宇宙へ運ぶものはすべて狭いロケットの中に収納しなければいけないことです。つまり、宇宙に持っていけるものの「大きさ」が決まっていることが、大きな制約となっています。それならばと、畳んで広げることができる、いわゆる展開構造物が宇宙開発では重宝されています。人工衛星に取り付けられている太陽電池パネルや伸展アンテナなどは、その代表例です。さらには、電波天文衛星「はるか」に搭載された巨大なアンテナや小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSで有名になったソーラーセイルは、宇宙展開構造物の最たるものです。その課題は、宇宙から地球へ帰ってくる乗り物にも当てはまります。

皆さん、宇宙には空気(大気)がほとんどないことは、ご存知だと思います。だからといって、宇宙開発において大気のことを考える必要がないかといったら、そうではありません。特に、宇宙から地球に帰ってくる時や、火星や金星など大気のある天体の探査では、大気を通らなければ目的地にはたどり着けません。しかも、日常では考えられないような速度で大気に飛び込んでいかなければならないのです。

大気圏に突入する乗り物は、大気抵抗を利用して減速して、安全に着地しなければなりません。そのため、軽くて大きい乗り物の方が大気のを効率よく利用できて有利です。しかし、その大きさはロケットの大きさによって制約されています。宇宙空間へ向かって打ち上げられるロケットにとって空気抵抗は邪魔なものなので、ロケットは細長くつくられています。逆に、再突入帰還機にとって空気による減速は必須なものなので、なるべく大きく広くつくりたい。これまでの再突入帰還機は、この矛盾した要求の中で満足できる妥協点を見つけて開発されてきました。

この制約をブレークスルーする一つの考え方が、再突入機に展開構造物を利用することです。つまり、打上げ時は小さく畳んで狭いロケットの中にコンパクトに収納し、大気圏に突入するときにそれを大きく広げることができれば……。これまでになかった新しい特徴を持った再突入帰還機ができると考えたわけです。

私が今回、第7回宇宙科学奨励賞を頂いたのは、このような考え方から生まれた、展開型のアロシェル(大気抵抗によるブレーキ装置、つまりパラシュートのような減速効果を得るためのデバイス)を使った大気圏突入機の研究開発においてです。この展開型の大気圏突入機の開発が始まった経緯やその特徴については、『ISASニュース』2012年10月号(No. 379)に

詳しく書かれています。JAXAに整備されている風洞設備、宇宙研で多くの実績を挙げてきた大気球や観測ロケットを使い、大学発の自由な発想や思い切りの良さで、観測ロケット(S-310-41号機)を使った再突入飛行実証までたどり着いた道のりを紹介していますので、ぜひご覧になってください。ただし、この技術は、そこにも書かれているように、まだ中間試験に合格した段階です。今、我々は、最後の卒業試験に向けての準備を始めています。本稿の後半では、このコンセプトが真に実用となるために残された技術課題や、その進捗状況について紹介させていただきます。

## 卒業試験の課題は？

我々は、この展開型エアロシェルの研究開発の卒業試験として、実際に宇宙(例えば宇宙ステーションの軌道)から少量の物資(1kg程度で、突入機の全体重量は15kg程度を想定)を持って帰ってくる乗り物をつくることを課題に決めました。この実験に成功すれば、小型衛星などで得られた成果を地球に持って帰る乗り物としても使えることになると考えています。宇宙ステーションから帰ってくることを想定すると、その大気への突入速度は秒速8km(観測ロケットの実験では秒速1.32km)になり、大気抵抗による加熱や加わる力は、観測ロケット実験に比べて格段に過酷なものとなります。

そのような厳しい環境に耐えるためには、観測ロケット実験用に開発したエアロシェルをさらに進化させる必要があります。そのための大きな課題は二つあります。一つは重量をあまり増やすことなくエアロシェルをより大きく、より精度よくつくること、もう一つはエアロシェルの耐熱性能を向上させることです。これらは、卒業試験に臨むために最低限クリアすべき課題

図1 浮き輪と大きくてやわらかい膜面を取り付けた再突入帰還機の想像図

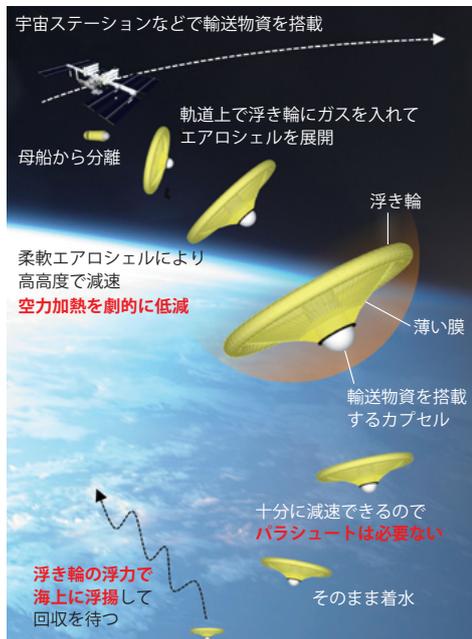


図2 大型(直径2.5m)のエアロシェルを使った風洞試験の様子



です。目標は、直径は2.5m、150kgの空気力に対して壊れることなく、100kW/m<sup>2</sup>程度の加熱に耐える柔軟なエアロシェルをつくることです。最後の加熱の条件がどれほどなのかを分かりやすく正確に表現するのは難しいのですが、表面温度が最大で1000℃程度の環境だと思ってください。つまり、表面が1000℃になっても空気が漏れない“風船”をつくるということです。

## やわらかいけど頑丈なエアロシェル

今、我々は、これらの課題を解決するための研究開発を進めています。図2は、直径2.5mの展開型エアロシェル試作品の風洞試験の様子です。エアロシエルの外周に取り付けられている浮き輪の形が12角形となっているのが分かると思います。これは、やわらかい材料で、きれいな立体形状をつくるために工夫したところなのです。

この試作品を使って、実際にエアロシェルに風を当てて、空気力に対する強度を調べる試験を行っています。実験では、図2右上の写真のように、空気力を受けて膜面が引っ張られて富士山のような形に変形しながらもしっかりとエアロシエルの形を保つことができます。そして、大きな空気力を発生し再突入機を減速できることが確認できました。この試作品では、200kg以上の空気力にも耐えることが確認できています。ただし、想定以上の空気力をかけてしまうと、図2右下の写真のようにつぶれてしまいます。数百kgもの大きな空気力にも耐えることができる構造なのですが、このようにつぶれる姿を見ると、やわらかいけど頑張っているというのを再認識します。このような試験を繰り返し、展開型柔軟エアロシエルの設計を洗練させていきます。

## 空力加熱に耐える“風船”

次に加熱対策です。先に、このエアロシェルは再突入時に表面温度が1000℃に達すると述べました。それに対して、スペースシャトルでは再突入時の最大温度は1600℃、「はやぶさ」帰還カプセルに至っては3000℃といわれているので、それよりはるかに楽な環境といえます。実は、それこそがこのシステムの特徴で、再突入時の加熱は、大きくて軽い展開型のエアロシェルによって、これまでの再突入機に比べ大きく低減されています。

さて、実際の開発では、そのような環境に耐えるエアロシェルをつくり、本当に大丈夫であることを確認しなければなりません。そのためには、まずは、そのような環境を実験室でつくり出す必要があります。図3は、我々が実験室につくった再突入時の加熱環境を再現する装置です。電気によって空気を加熱して高温の空気をつくり出します（分かりやすく言うと、電子レ

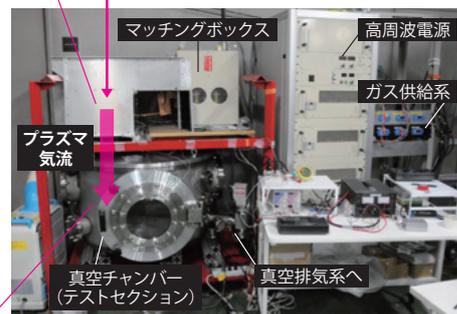
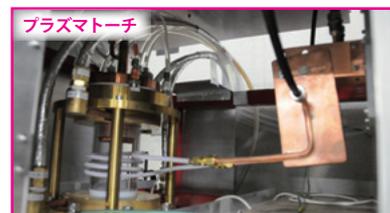


図3 再突入環境を模擬するために開発した誘導結合プラズマ（ICP）加熱装置と、その設備を使ったエアロシェル模型の加熱試験の様子

ンジのようなもの)。

量1量程度の設備ですが、内部の空気の温度は8000℃にも達しています。そのような温度になると空気は発光し、いわゆるプラズマという状態になります。図3左の写真は、そこで作り出されたプラズマ化した空気の流れに、将来の再突入機のエアロシェルを模擬してつくった“風船(!)”を投入したときの様子です。この風船は、高温の空気のプラズマにさらされ、表面温度が1000℃近くに達しますが、数分間、破れることなく耐えることができています。この実験は始まったばかりですが、この装置を使い、材料の構成を変えたり風船の内部の温度などを詳細に測定したりして、実際に使うエアロシエルの構造を決めていきます。

## 結び

大気圏突入技術、そして着陸回収技術は、今より自在な宇宙活動、探査活動の実現への鍵を握る重要な技術です。これに新しい選択肢を加えるべく、展開型の再突入機の実現に向けて、日々努力をしています。この展開型の再突入機の研究開発は、観測ロケットによる大気圏突入実験の成功の後も着々と進められており、まずはスペースの限られている小型衛星の再突入システムとしての応用が目前に迫っています。また、この方法は空気を効率よく利用できるため、空気の薄い火星のような惑星を目指す探査機への応用も考えられています。

本稿では、新しい再突入機、つまり展開型のエアロシエルの開発と技術課題に焦点を当てて紹介してきましたが、大気圏突入～着陸回収技術の進化は、これだけにとどまりません。

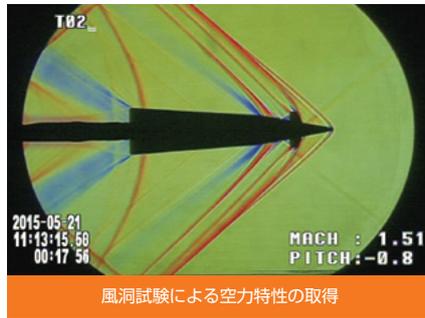
例えば、柔軟エアロシェルで大気圏突入した後に、その柔軟性を使ってパラグライダーのように、狙った所に着地できたら？さらには、衛星電話とGPSを使って自分のいる位置を常に連絡してくれる再突入機ができたら？宇宙からの宅配便が直接、家の玄関前に届く時代が来るかも……。将来の再突入機は、我々の想像を超えた形で実現するかもしれません。

(やまだ・かずひこ)

## 再使用観測ロケット機体システム技術実証

『ISASニュース』2015年3月号でエンジン試験、5月号でリサーキュレーション予冷システム試験の報告があったように、再使用観測ロケットの各技術実証試験が進められています。再使用観測ロケットでは、機体・エンジンを使い捨てずに繰り返し使う、そのために帰ってきて着陸する、飛行中にどこかが故障しても安全に帰還する、というこれまでのロケットとは形態が大きく異なるシステムの構築を目指しています。従来のロケットにはない技術的な課題を解決するため、エンジンや機体システムに関する技術実証に取り組んでいます。

昨年度は主に再使用エンジンの技術実証を進めてきましたが、今年度は機体システムに関する各種技術実証試験に取り組んでいます。これまでに推進システムの技術実証として、推進剤タンク内の液面挙動について極低温スロッシング試験、推進剤の吸い込みについてタンク液流し試験を実施し、機体からエンジンに液体水素／液体酸素を確実に送るための機能について実証しました。リサーキュレーション試



験は2回目の試験を実施して、エンジン再起動前の予冷を行うためのシステム仕様とオペレーション方法を定める計画です。

また構造系の技術実証として、着陸脚の衝撃緩衝試験と推進剤タンク断熱材の繰り返し使用試験を行います。さらに、飛行中に推進システムから燃料の水素が漏れた場合の検知

と安全に帰還するためのヘルスマネジメントシステムの構築を目指し、搭載型の水素センサの開発と検知システムの技術実証を行います。そして最も重要な技術実証の一つとして、小型モデルによる滑空試験を実施します。全長2mほどの小型実験機をヘリコプターでつり上げ、上空から滑空させ、安定した滑空飛行と着陸に必要な姿勢運動の実証試験を行う計画です。現在は、風洞試験による空力特性の取得、運動解析、機体および搭載品の設計・製作などを進めています。

今年度は、各種技術実証試験がめじろ押し的一年になりそうです。チームの皆さん、力を合わせて頑張りましょう。皆さま、応援をよろしくお願いいたします。(野中 聡)

## EarthCARE 搭載 雲プロファイリングレーダの主反射鏡ベーキング試験

EarthCARE (雲エアロゾル放射ミッション) は、JAXA と ESA (欧州宇宙機関) が協力して開発を進めている地球観測衛星です。搭載する4種類のセンサ (雲プロファイリングレーダ、大気ライダー、多波長イメージャ、広帯域放射収支計) により、気候変動予測の主な誤差要因となっている雲

やエアロゾルの全球観測を行うことで、気候変動予測の精度の向上に貢献します。JAXA は、雲プロファイリングレーダ (CPR) の開発を担当しており、現在はプロトフライトモデルの製作を完了し、プロトフライト試験を開始したところです。CPR はプロトフライト試験完了後に ESA へ引き渡し、欧州において衛星システムとの組み合わせ試験を実施します。EarthCARE は、ソユーズロケットで打ち上げられる予定です。

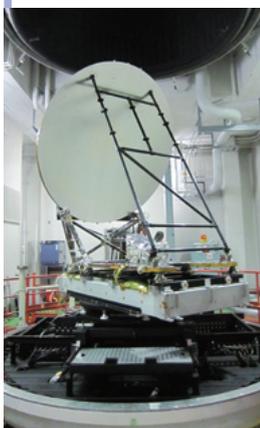
このたび EarthCARE/CPR プロジェクトでは、宇宙研のスペースチャンバを用いて、CPR の主反射鏡のベーキン

グ試験を行いました。宇宙機を構成する部材からは、宇宙空間のような真空中でさまざまなガス (アウトガス) が放出されます。ベーキング試験とは、宇宙機を地上であらかじめ真空・高温環境に長時間さらし、このアウトガスを出し切るために行う試験です。EarthCARE 搭載センサのうち、特に大気ライダーはアクティブな光学センサであるため、アウトガスによる汚染に敏感です。光学センサが汚染されてしまうと、機器の機能・性能を劣化させてしまう恐れがあります。

今回、主反射鏡のベーキング試験を完了したことで、衛星システムとの組み合わせ試験や宇宙空間において、CPR から放出されるアウトガスが光学センサを汚染してしまうリスクを低減しました。なお、主反射鏡以外は、別途コンポーネントごとに必要なベーキング試験を実施済みです。

CPR の主反射鏡は直径 2.5m と大型であり、かつベーキングのための温度調節に技術的課題がありました。しかし宇宙研のスペースチャンバは、これらの課題を克服する機能・性能が備わっていたため、無事にベーキング試験を完了することができました。関係各位のご協力に深く感謝致します。

(丸山健太／関 義広)



ベーキング試験直後の雲プロファイリングレーダ (CPR) の主反射鏡

## 「あけぼの」運用終了

磁気圏観測衛星「あけぼの」は、1989年2月22日にM-3SIIロケット4号機で打ち上げられて以来26年間、科学観測を行ってきました。スプートニク1号が世界初の人工衛星となったのが58年前なので、人工衛星の歴史の半分以上の間、観測を継続してきたこととなります。

「あけぼの」の第一の使命は、地球の極域で起こるオーロラ現象の観測でした。オーロラ発光域が時間とともに拡大する様子を上空から撮影し、また、当初の目標寿命である1年を大きく超える期間、オーロラ現象に関連の深いプラズマ、電場、磁場、波動のデータを蓄積し、オーロラ出現に関連する多くの物理を明らかにしました。しかし運用の年月を重ねるうちに、9種の科学観測機器の中には、観測を停止したり、性能が劣化したりするものが出てきました。性能を維持している観測機器の長所を生かすべく、主な観測対象をオーロラから中低緯度の放射線帯・内部磁気圏へと次第に変えていきました。放射線帯という電子機器には極めて過酷な環境で、衛星の基本的な機能を26年間維持し科学観測を続けたことは、海外も含めてほかに類を見ず、また今後も簡単にはなし得ないであろうと思われま

す。このように頑強な「あけぼの」ですが、近年では太陽電池やバッテリーの劣化が進み、運用に大きな支障を来すほどになってきました。また、打上げ時に約1万kmの高度にあった遠地点が、大気との摩擦のために4000kmまで低下

し、日陰（衛星が地球の陰に入り太陽光が当たらない）の割合が増加してきました。軌道上で日陰が起ると、日陰中はもちろん日照中もバッテリーの充電に電力が必要となり、観測機器に使える電力がほとんどなくなってしまいました。ジオスペース探査衛星ERG打上げ後の2017年まで「あけぼの」の観測を続ける計画を立てていました。しかし、現在の衛星の状態では想定している観測ができず科学成果も期待されないと、昨年12月の運用会議で結論し、今年4月末をめどに運用を終了することを決定しました。

4月23日に停波運用を行いました。「あけぼの」の開発に携わった方々や長年データを解析してきた方々に、管制室で立ち会っていただくことができました。先にS帯送信機を停止しました。S帯の停止は、1997年の電波天文衛星「はるか」打上げ時にM-Vロケット1号機の電波との干渉を避けるために行って以来、18年間実績がありません。本当にコマンドが効くのか緊張しましたが、「あけぼの」はあっさりコマンドを受け付け、S帯の信号が止まりました。続いて15時59分にU帯送信機停止コマンドを送信し、「あけぼの」からの電波は完全に停止しました。

「あけぼの」プロジェクト実現に尽力された先達の方々にあらためて深く敬意を表すとともに、長い間運用をご支援くださった皆さまに心よりお礼を申し上げます。

(松岡彩子)

## 「宇宙探査イノベーションハブ」新設

日本は、国際宇宙ステーションの根幹部分を担い、世界15ヶ国と協働しながら地球近傍での有人宇宙活動を行っている。また、「かぐや」による月、「はやぶさ」「はやぶさ2」による小惑星への無人探査を独自に進めている。ここまでの達成をもとに「宇宙科学」「宇宙工学」「有人宇宙活動」と連携しつつ、今後推し進めたい「宇宙探査」とは、人類の生存圏・活動領域を太陽系宇宙に拡大し、新たな宇宙開発利用の価値を創出する事業である。人類のフロンティアを切り開く宇宙探査は、産学官を魅了し糾合するには有り余るトピックスだ。しかし残念なことに、狭い仲間内と古典的手法にとらわれ過ぎて斬新なアプローチが取れず、次々と魅力的なミッションを創造できていない。このような分析と反省のもと、JAXAは宇宙探査を未来の事業として見定めて、産学官の英知を結集する新たな施策でここに乗り出そうとしている。

新しい部門「宇宙探査イノベーションハブ」（以下、探査

ハブ）は、既成組織でない新たな参加者を募り、新機軸として宇宙探査に資する技術研究開発を目指している。ここで培った技術を基に革新的な宇宙ミッションを実現させるだけでなく、参加組織が宇宙のみならず地上への応用展開を図り、成果を波及拡大させたい。これまでのJAXAからの「発注型」形態から脱却し、共同開発に基づいた「参画型」の宇宙開発利用を実現し、社会にGame Change（現状を打破する／革新的な／考え方を根本から変える）を巻き起こすのだ。地上との親和性の高い月や火星など重力天体表面でのロボットによる探査活動に着目し、分散協調・自動化・自律化と遠隔操作のベストミックス、およびその場資源利用といった研究課題を想定し、まず研究開発に着手する。これらを端緒に研究課題を宇宙探査活動全般に拡大させたい。

具体的に、次のような施策を準備している。研究課題を広くJAXA外にも求めるため、日本各地で複数回のワークショップを開催し、対話や議論、課題抽出を行う。産学官

から人材を糾合し異分野融合を加速させるために、クロスアポイントメント制度<sup>\*</sup>にて雇用環境を整えて、企業技術者・国内外研究者をJAXAに招聘する。探査ハブをJAXA内の特区と位置づけ、ここから生み出された知財権は参画組織に有利に委譲する。

この記事を読まれているJAXA内外の方々、皆さんの専門領域と宇宙探査の接点や共通課題を共に見いだして、探査ハブに集い協働しましょう！

1990年代のこと、欧米露に比べ劣勢な宇宙技術を挽回・克服し超遠距離飛行を実現させるため、日本独自のマイクロ波放電式イオンエンジンを完成させ、これを主推進として駆る「はやぶさ」は世界で初めて地球-小惑星往復探査(2003～2010年)に成功した。そして「はやぶさ2」(2014年～)は今この瞬間、宇宙を航海している。よき指導者に巡

り会い、有能な同僚の協力を得て、挑戦する組織の指揮のもと、私が体現したイノベーションをJAXA内外に伝える責務を感じている。冒頭で説明した状況は決してJAXAだけの窮地ではなく、日本中でイノベーションができず社会の成長が停滞している。これを打破してお手本となれど、政府から強く要請されている(「科学技術イノベーション総合戦略2014」2014年6月24日閣議決定)。このミッションは非常に難しく険しい事業なのだが、心新たに挑戦者としておじけづくことなく新領域に分け入る意気込みである。

(宇宙探査イノベーションハブ ハブ長 國中 均)

<sup>\*</sup>クロスアポイントメント制度：研究者や技術者が大学、公的研究機関、企業など複数の組織に所属し、各組織における役割に応じて研究、開発、教育に従事することを可能とする制度。給与は勤務割合に応じて各組織が負担するが、医療保険や年金は一つの組織がまとめて対応するなど、研究者や技術者が不利にならないようにしている。

## 日本地球惑星科学連合 2015年大会 開催

本年度も日本地球惑星科学連合(JpGU)大会が行われた。パシフィコ横浜から幕張メッセに開催地が戻り、雰囲気も戻ったという印象を受ける。しかし、そこはJpGU大会。諸外国の学会機関との将来セッションなど、初イベントが企画されていた。その中で私にとっての初は、NASAとの共同展示における中学生向け企画である。

NASAとの共同展示は、JpGU 2014年大会から行っている。NASA側は地球科学分野のディレクターであるMichael Freilich氏を中心に、JAXA側は宇宙研の太陽系科学研究系と地球観測研究センターが参加している。私は、藤本正樹教授を補佐してきた。動き始めようという年明け、中学生向け企画を行いたいと伝わってきた。昨年度、高校生向け講演を非公式に行ったが、高校生は発表で忙しく参加率は良くなかった。そこで、中学生を対象に公式企画を行いたいという流れである。9枚のディスプレイシステムであるハイパーウォールでの講演を基軸に、いくつかの科学アクティビティ(真空実験や偏光板など)を回る形式に決まった。実行に際して、地学オリンピック日本委員会や東京大学サイエンスコミュニケーションサークルCASTにもサポートいただいた。千葉県教育委員会へイベントの趣旨を説明し、大会1週間前まで県内各中学校へ参加募集が行われた。最終

的には約80名の千葉県の中学生在が集まった。

イベントはFreilich氏と藤本教授のあいさつから始まり、講演や科学アクティビ

ティなど滞りなく行われた。中学生は初め緊張していたものの、慣れると、しきりに質問をしていた。4時間ほどであったが、JAXAやNASAの科学者と触れ合ってもらえたのではと思う。本原稿を執筆しているとき、アンケートが返ってきた。中学生は正直で、イベント前は「JAXAはNASAに少し劣っている」というイメージだったが、イベント後は「予想以上に考えている」と印象が変わった、というものもあった。私たちがやっていることを社会に伝えることは、私たち自身にとって重要であると再認識させられる。「7割は科学の面白さ、3割は英語の必要性を感じた」という感想もあり、国際的な世界に触れてもらえたのではと思う。また、中学教員から来年度以降もぜひ参加したいという声もあり、初年度としては成功であったのではと感じられた。

(飯田佑輔)



NASAブースのハイパーウォールを使ってJAXAによるプレゼンテーションも行われた

### 特別公開のお知らせ

通常の見学では見ることができない施設の公開や、最新の研究内容を分かりやすく紹介します。詳細は宇宙科学研究所ホームページでご確認ください。 <http://www.isas.jaxa.jp/>

日時：2015年7月24日(金)・25日(土) 両日ともに10:00～16:30

会場：宇宙航空研究開発機構 相模原キャンパス

## 前略,こちら 地上系



第2回

### 探査機・衛星追跡地上局の設備

#### 山本善一

白田宇宙空間観測所 所長

JAXAの探査機や科学衛星を追跡する地上局設備について簡単に紹介する。

#### 白田宇宙空間観測所(UDSC) 64mアンテナ局

1984年10月に完成した、我が国最大の口径64mパラボラアンテナを備えた地上局。ハレー彗星探査機「さきがけ」「すいせい」と交信する目的で、長野県南佐久郡白田町(現 佐久市)の標高1450mの山中につくられた。市街地雑音の影響を極力避けるため、人里離れ、周囲を低い山々で取り囲まれた場所をわざわざ選定している。

当初はS帯(約2GHz帯)での送受信測距機能しかなく、その後、磁気圏尾部観測衛星GEOTAILで科学衛星として初めてX帯(約8GHz帯)ダウンリンクが採用されたので、それに対応するX帯受信機能が付加された。さらに、小惑星探査機「はやぶさ」からのアップリンクもX帯に変更されたため、それに対処すべくX帯送受信測距機能も付加された。

深宇宙探査機など回線が厳しいミッションとの交信を行うため、UDSC 64m局にはクライストロンと称する電子管を用いた20kWの大電力送信機を備えている。アンテナ自身は可動部分の自重が約2000トンもあり、自重変形の影響を軽減するために、副反射鏡位置を仰角の関数としてリアルタイムに補正するホモロジー補正機構を採用している。機械系の癖を除去する器差補正システムと自重変形の影響を受けずに高精度で絶対角度基準を形成するマスターコリメータ方式を採用することで、半値幅わずか0.034度しかない非常に細い電気軸を0.003度rmsという超高精度で駆動している。

また、受信系の徹底した低雑音化を図るため、最も感度の高い初段の増幅器には、素子を極低温まで冷却したガス・ヘリウム冷却式LNA(低雑音増幅器)が採用されている。深宇宙探査機の回線はそれでも厳しいので、受信機のPLL(位相ロックループ)帯域幅を1Hz以下まで絞って雑音をそぎ落としている。そのために探査機と地上局との相対運動で発生するドップラーシフトを止める必要があり、軌道予報値に基づくドップラー補償も行っている。ドップラー計測は積分型計測方式を採用し、低SN比での動作を可能にしている。測距もシーケンシャルPN(疑



図1 白田宇宙空間観測所(UDSC) 64mアンテナ局



図2 内之浦宇宙空間観測所(USC) 34mアンテナ局

似雑音) レンズ方式のほか、さらに能力の高いPN再生レンジング方式(JAXAオリジナル)を開発・採用している。狭帯域受信、高精度ドップラー計測、高精度測距という目的を実現するには、非常に高安定の周波数基準と高精度の時刻系が必要となるが、UDSCでは水素メーザ発振器3台を用いた時刻系を構築し、対応している。

#### 内之浦宇宙空間観測所(USC) 34mアンテナ局

近地球衛星追跡用アンテナとして世界最強を目指したアンテナであり、口径34mであるにもかかわらず、方位角回転速度5deg/s、仰角回転速度2.5deg/sという高速駆動および自動追尾機能を実現している。このクラスの大型アンテナで、これほど高速駆動できるものは世界に類を見ない。

USC 34m局は大口径を活かし、UDSC 64m局のバックアップ運用もできるよう設備が構築されている。口径が小さくビーム幅の広い捕捉アンテナ受信系も装備されており、ビーム幅が細いにもかかわらず、衛星の初期捕捉能力は強化されているのが特長である。S帯1kWの固体増幅器が導入され、アップリンクの信頼性が格段に向上した。

#### USC 20mアンテナ局

GEOTAILからX帯ダウンリンクが採用されることとなったため、これに対応できる近地球衛星追跡局として1989年につくられた。製造から26年が経過したが、駆動系の更新、角度検出系の更新などのテコ入れが行われ、運用で混み合っているUSC 34m局からあふれてしまった衛星の運用をこなしている。

#### USC 11mアンテナ局

ロケットテレメータ受信と、惑星分光観測衛星「ひさき」や磁気圏観測衛星「あけぼの」といったS帯ダウンリンクのみを有する科学衛星の追跡局とを兼務する地上局としてつくられた。USC 11m局は種子島から打ち上がるロケットの飛翔保安上、極めて重要な役割を果たしている。(やまもと・ぜんいち)

# ロケットを安全化する

宇宙飛行工学研究系 教授

嶋田 徹

## —— 宇宙開発に興味を持ったきっかけは？

嶋田：小学校6年生のときに見たアポロ11号の月面着陸です。京都大学工学部航空工学科へ進学したのも、その影響だと思えます。流体力学の方程式をコンピュータで解いて、ガスの動きをシミュレーション解析する数値流体力学（CFD）を学び始めたのは、東京大学大学院に入ってからです。

その後、1985年に日産自動車宇宙航空事業部に入り、宇宙研の固体ロケット設計に必要なガスの動きをCFDで予測することに取り組みました。予測すればするほど、実験すべきポイントを絞り込むことができ、開発コストの削減に貢献できます。ちょうどCFDの計算手法に革新が起きて高速流体や衝撃波などを安定に計算できるようになり、計算機の性能も急速に向上して、さまざまな現象を再現できるようになり始めた時代です。自分のやりたい研究を思う存分やらせてもらいました。目の前の効率ばかりを重視しては新しいものは生み出せない、そう上司の方々は考えていたように思います。

## —— 2000年4月に宇宙研に移られました。

嶋田：その2ヶ月前、M-Vロケット4号機の打上げが失敗し、着任早々その原因究明を担当することになりました。CFDによる解析だけでなく、ロケット製造過程における品質管理の検討やロケット燃焼実験にも携わりました。実験後、みんなで飲みに行く機会が増え、運動不足も重なり、2006年までには体重が15kg近くも増えてしまいました（笑）。2003年5月、改良したM-Vロケット5号機が小惑星探査機「はやぶさ」を積んで無事に打ち上げられましたが、11月にH-IIAロケット6号機が固体ロケットブースターを分離できず打上げが失敗し、その原因究明も命じられました。さまざまな可能性を検証して失敗に学ぶことで、今まで解析が手付かずだった現象の理解を深めることができましたが、痩せる暇はなかったですね。

## —— 現在、どのような研究をされているのですか。

嶋田：ロケットの安全化による宇宙輸送の低コスト化を目指しています。そもそもロケットは、燃料を燃やしたガスを高速に噴き出した反作用で推進します。固体ロケットでは、燃料に酸化剤を混ぜた火薬を燃やします。液体ロケットでは、水素と酸素の液滴を混ぜて燃やします。それらは酸化剤と燃料の混合の観



しまだ・とおる。1957年生まれ、奈良県出身。工学博士。東京大学大学院工学系研究科航空学専門課程 博士課程修了。1985～2000年、日産自動車機宇宙航空事業部。2000年、宇宙研 助教授。2007年より宇宙研 教授および東京大学大学院 教授（委嘱）。

点では効率的ですが、ロケットの持つ危険性の根源もそこにあり、危険物を安全に扱う手間が低コスト化の阻害要因となっています。その燃焼方式を木材やろうそくが燃えるときのような「境界層燃焼」に替えることで、ロケットを安全化することができま

す。境界層燃焼では、燃料が気化したガスと酸化剤が接する薄い層の内部に火災ができます。私たちは、液体酸化剤と固体燃料を用いたハイブリッドロケットによって境界層燃焼を起こして推進させる技術の開発を行っています。その固体燃料には、火薬ではなく、ろうやプラスチックなどの一般工業製品を使うため、取り扱いが容易になり安全管理のコストを大幅に下げることができます。再使用ロケットなどの技術と組み合わせることで、打上げコストを従来の100分の1以下にできる可能性があります。

## —— いろいろ実用化できそうですか。

嶋田：ハイブリッドロケットは、高度100km程度までの打上げならば、1970年代から成功例があります。最近、米国の民間企業が高度約100kmの宇宙旅行用に開発しているスペースシップも、ハイブリッドロケットを搭載しています。しかし、さらに高度を上げて人工衛星を地球周回軌道に投入することには、誰も成功していません。ぜひ10年以内に、衛星の軌道投入を実現したいですね。そのような未来を大きく変える技術を築くこそがJAXAの使命です。私たちは、燃料を改良したり酸化剤を旋回流にして吹き込んだりするなど、燃えにくい燃料を急速に燃やして推進力を高める技術の開発を進め、実現のめどが付いてきました。さらに推力制御と同時に、燃料発生量と酸化剤流量の比を制御する技術の開発を進めているところです。

## —— ところで、趣味はありますか。

嶋田：趣味はジョギングと弾き語りです。早朝ランニングを5年ほど続けています。弾き語りは昔から好きで、今でも年1回、「シマダラボライブ」と称してライブハウスを借り、知人呼んで演奏しています。ボーカルは、なかなかうまくなりませんね。その原因をコンピュータで解析して、音程が低いことは分かったのですが……（笑）。

ISAS ニュース No.411 2015.6 ISSN 0285-2861

発行／国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
発行責任者／ISASニュース編集委員会 委員長 山村一誠  
〒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ビア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

### 編集後記

このところ、会議資料の作成に明け暮れて外の空気を吸うことなく過ごしてしまったため、気分転換に三浦半島の観音崎まで足を延ばしてきました。梅雨入り前の初夏の潮風はリフレッシュに最適。地元で獲れた新鮮しらすのピザは風味抜群でした。（羽生宏人）

\*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

