

木星観測包囲網。右上から時計回りに、チャンドラX線望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、XMMニュートン、「すざく」、「ひさき」。
(提供：J. Spencer, NASA/CXC/Curtin University/R. Soria et al., NASA, D. Ducros, XMM Team, ESA, JAXA)

宇宙科学最前線

X線で白色矮星の重さを測る

ASTRO-H プロジェクト研究員
林 多佳由

白色矮星

恒星は、誕生してからその一生のうち約9割の時間、水素の核融合によって輝きます。水素を使い果たすと、水素の核融合でつくられたヘリウムなどの核融合が始まり、星の中心温度は1億度以上に達します。この温度上昇に伴って恒星は膨れ、表面温度が下がり、赤色巨星になります。太陽の8倍以下の重さの恒星では、外層を吹き飛ばして中心核が残ります。それが白色矮星です。

白色矮星は、重さは太陽と同程度ですが、大きさは地球ほどしかなく、1cm³当たりの重さが1000kgもある、とても高密度な天体です。また、ここで重要なのは、白色矮星には重さの限界が存在することです。これを「チャンドラセカール限界」と呼び、太陽の重

さの1.4倍と算出されています。

少し専門的ですが、それは以下のように説明されます。白色矮星の構造を支えているのは、電子の「縮退圧」です。電子などのフェルミ粒子は二つとして同じ状態を取ることができません。つまり、「ある電子」より低いエネルギーの状態をほかの電子が占有していると、「ある電子」はほかの電子と同じ状態になれないので、そのエネルギー以下にはなり得ません。このときのエネルギーをフェルミエネルギーと呼び、これに対応する圧力が縮退圧です。ここで、フェルミエネルギーに対応する電子の速さが光速に達しても重力を支え切れない重さ、これがチャンドラセカール限界です。

白色矮星と恒星が重力的に結び付き、恒星から白色矮星へガスが流れ込む系（近接連星）では、ガスが

降り積もり、白色矮星は太ります。そして、星の重さがチャンドラセカール限界に達すると、星の重力を支えられず、Ia型超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こします。

Ia型超新星爆発では、急激に核融合が進み、鉄などの重元素を生成して宇宙空間へばらまき、宇宙の化学進化を進めます。また、爆発の条件から、Ia型超新星爆発を起こす白色矮星の重さは太陽の1.4倍で一定であると仮定すると、明るさも一定と考えられ、見掛けの明るさから遠方銀河の距離を測ることができます。得られた距離と光のドップラー偏移から測定できる宇宙の膨張速度を比較することで、宇宙は加速膨張していると示されています。この結果は、宇宙の主成分がダークエネルギーである証拠とされています。

このように、白色矮星は宇宙の化学進化や宇宙論研究において重要な役割を果たしています。特に、将来Ia型超新星爆発を起こす可能性がある近接連星内の白色矮星の重さを知ることは重要です。それはIa型超新星爆発の頻度に影響するため、宇宙の化学進化の鍵を握ります。また、太陽の重さの1.4倍というチャンドラセカール限界の値は、理論計算の結果であり、真の値は観測的に調査する必要があります。この近接連星内の白色矮星の重さを測る強力な方法が、今回紹介するX線による測定法です。

X線で輝く白色矮星

単独の白色矮星は恒星のころの余熱で光りますが、次第に冷えて暗くなり、最後には見えなくなります。しかし、ほかの星と近接連星を組むと状況は一変します。白色矮星は高密度であるため、表面の重力が非常に強くなります。従って、近接連星の相手の星（伴星）からのガスは、白色矮星へ落下する際に、温度に換算すると数億にもなる莫大なエネルギーを獲得します。それが白色矮星を輝かせるエネルギー源になります。

白色矮星へガスが落ちるとき、白色矮星の磁場が強い（10万ガウス以上。10万ガウスは地磁気の20万倍）場合、ガスは磁場に捕らえられます（図1）。磁場に捕まったガスは磁力線に沿って自由落下し、その速さは毎秒数千kmに達します。

この落下速度はガスの音速を超えているため、ガス流は白色矮星表面の近くで「衝撃波」を発生させます。衝撃波とは、超音速で運動する物質のまわりに行ける圧力や温度が不連続的に変化する波です。物質の運動の速さが音速に比べて十分に速いと、衝撃波へ流れ込む超音速のガスの運動エネルギーのうち4分の3が熱エネルギーへ変換されます。これを白色矮星へ落下するガスに適用すると、ガスは数億度にまで加熱され、原子は電離してプラズマになります。

物質は温度に対応したエネルギー（波長）の電磁波で光っており、人間の体温は約40度なので赤外線、太陽表面は約6000度なので可視光、数億度のプラズマはX線で光ります。衝撃波で生成されたプラズマは、X線を放射することで冷えながら、白色矮星に落下します。逆に、電磁波のエネルギーから、それを放射している物体の温度を測ることもできます。

すでに述べた通り、白色矮星に落下するプラズマの熱エネルギーの源は、白色矮星の重力です。重力は白色矮星が重いほど強くなるので、重い白色矮星に落下するプラズマほど高温になります。このように、白色矮星に落下するプラズマの温度はX線で測ることができ、その値から白色矮星の重さを推定できます。

X線による白色矮星の重量測定法

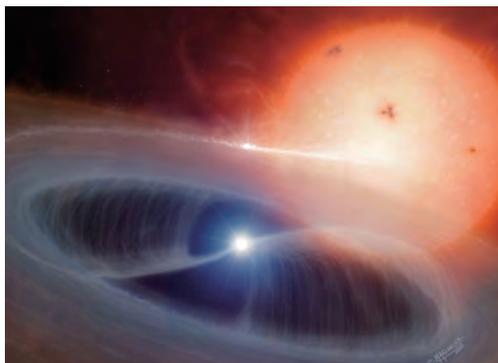
強磁場白色矮星のプラズマは、衝撃波で生成された後、X線を放射しながら白色矮星へ落下します。私たちはこのプラズマ流からのX線のエネルギーに対する強度分布である、X線スペクトルの詳細なモデルをつくりました。以前から取り込まれていた白色矮星の重さの違いに加えて、プラズマ流の形とその流量の違いを新たに取り込んだのです。

これまでのモデルではプラズマ流の形は円柱としていましたが、実際は磁力線に沿った形、つまり白色矮星に近づくほど細くなるラッパのような形が考えられます。このような形の流れでは、温度が下がる代わりに流れが速くなる作用が働きます。これは、川の流れが川幅が狭い所で速くなるのと同じです。また、白色矮星へ落ちるプラズマの単位面積当たりの流量は、伴星からのガスの量などによるためそれぞれの系で異なり、プラズマが冷める早さを決めます。そして、白色矮星の重さは、重力の強さを決めます。

このようなより現実に近い条件のもと、物理学の法則である運動方程式、エネルギー保存則、質量保存則、状態方程式（圧力と密度の関係）の連立方程式を解くことにより、プラズマ流内の温度や密度の分布を得ます。得られた温度や密度分布からプラズマ流全体からのX線スペクトルを算出し、強磁場白色矮星のX線スペクトルモデルをつくりました。このモデルを観測データに適用して、白色矮星の重さと単位面積当たりのプラズマ流量を測定するのです。

図1 強磁場白色矮星の近接連星の想像図

伴星からのガスが磁場に捕まり、磁力線に沿って白色矮星へ落下する。(http://apod.nasa.gov/apod/ap060521.html ©Mark Garlick)



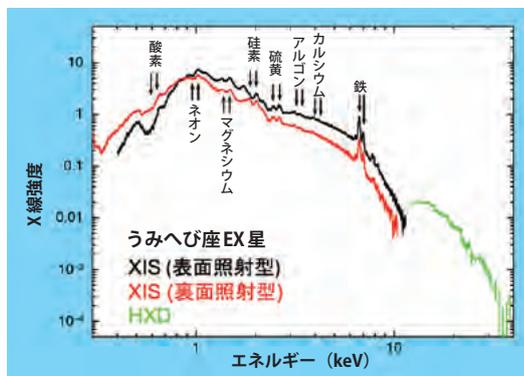


図2 「すざく」によるうみへび座EX星のX線スペクトル
黒線はX線 CCDカメラ(XIS)のうちの表面照射型、赤は裏面照射型、緑は硬X線検出器(HXD)で取得。矢印で示した構造は、それぞれの元素の輝線。

X線天文衛星「すざく」による 白色矮星の観測

私たちのモデルの問題点は、白色矮星の重さだけでなく、単位面積当たりのプラズマ流量も同時に測定する必要があります。そのため、精度が不十分な観測にこのモデルを適用すると、白色矮星の重さがうまく求められません。その問題を解決してくれたのが、X線天文衛星「すざく」です。

「すざく」は2005年7月に打ち上げられ、現在も活躍中の日本で5番目のX線天文衛星です。アメリカとの国際協力で作成されました。「すざく」には、X線望遠鏡(XRT)とX線CCD(XIS)の観測システムが4組と硬X線検出器(HXD)が1台搭載されています。XRTとXISの観測システムは0.2～12keV(電子ボルト。1電子ボルトは電子1個が1Vの電位差で獲得するエネルギー)のエネルギーのX線を観測でき、HXDは10～600keVをカバーしています。

これまでに20個ほどの強磁場白色矮星の良質なデータが「すざく」によって得られています。図2は、「すざく」によって得られた、うみへび座EX星と呼ばれる強磁場白色矮星のX線スペクトルです。

強磁場白色矮星に流れ込む数億度のプラズマが放射する10keV以上のX線は、HXDによる高感度な観測が可能です。図2の緑の線で示した通り、40keVまでしっかりとシグナルが得られており、プラズマの最高温度を高い精度で決定できます。

また、白色矮星のX線にはさまざまな「輝線」が含まれています。輝線とは、原子内の電子がより原子核に近い内側に落ちたときに放射される特定のエネルギーの光(X線)です。輝線の構造は元素の種類や温度で決まるため、輝線はそれを放射するプラズマの情報を与えてくれます。宇宙には鉄が豊富にあり、6～7keVに現れる鉄の輝線はX線天文学で特に重要です。「すざく」のXRTとXISのシステムは、この領域で高い集光力と優れたエネルギー分解能を持っています。図2の矢印で示したように、「すざく」による観測では、鉄をはじめとするさまざまな輝線ははっきりと得られています。これにより、プラズマの温度や密度分布を精度よく測れます。

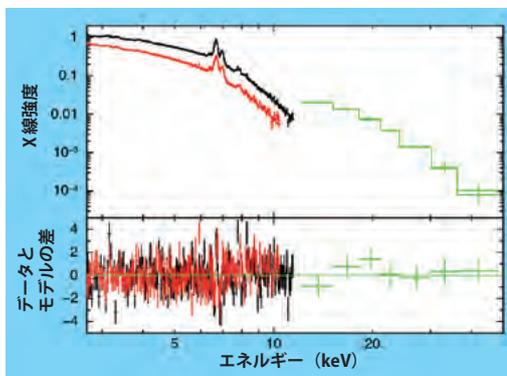


図3 うみへび座EX星のX線スペクトルに私たちのモデルを適用した様子(上段) 十字の点がデータで、十字の大きさはデータの誤差を示している。実線はモデル。下段はデータとモデルの差。

うみへび座EX星の白色矮星の重さは、従来のX線モデルと星の運動から求めた値が2倍も違いました。星の運動による測定は、白色矮星と伴星の両方の運動速度が測られ、さらに互いの陰に隠れる「蝕」も観測される系で、非常に高い精度が得られます。このような系は非常にまれですが、うみへび座EX星はこれを満たします。また、従来のモデルでは、プラズマ流の長さは白色矮星の半径に対して十分短いと算出されましたが、白色矮星の半径に匹敵することを示す観測もありました。

「すざく」によって得られたうみへび座EX星のデータに、私たちのモデルを適用すると(図3)、白色矮星の重さと単位面積当たりのプラズマ流量が見事に求まりました。得られた白色矮星の重さは太陽の重さの 0.63 ± 0.14 倍となり、従来のX線モデルで求められた 0.42 ± 0.02 倍より有意に重い結果になりました。一方で、星の運動から得られた 0.79 ± 0.023 倍と、ギリギリですが誤差の範囲で一致しました。また、プラズマ流の長さは白色矮星半径の3分の1もあると見積もられ、上記の観測結果と一致しました。これらから、従来のX線モデルはプラズマ流の物理の取り込み方が不十分であり、私たちのモデルがより現実を表していることが分かってきました。こうして、私たちはX線による白色矮星重量の測定手法を、今までにない高い精度で確立しました。現在、磁場によるプラズマの冷却も取り入れたX線モデルの構築に取り組んでおり、さらなる精度向上を目指しています。

X線による白色矮星の重量測定法の強みは、星の運動によるものと違い、蝕などが観測されなくても高精度な測定が可能なこと。この手法を用いれば、系によらず、多くの近接連星内の白色矮星の重さを測定できます。

さらに高精度な測定に向けて

2015年に、「すざく」をしのぐ強力な観測機器を搭載した次期X線天文衛星ASTRO-Hが打ち上げられます。ASTRO-Hをもってすれば、白色矮星の重さを格段に精度よく測ることができます。

また、私たちのモデルが不十分であったり、もしかすると間違えであることを思い知らされるかもしれません。しかし、私たちはそれをとても楽しみにしています。(はやし・たかゆき)

新生 JAXA の経営理念



宇宙航空研究開発機構 理事長

奥村直樹

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、2013年10月1日に創立10周年を迎え、「新生JAXA」としての経営理念を「宇宙と空を活かし、安全で豊かな社会を実現する」と定め、コーポレートスローガンに「Explore to Realize」を掲げました。

この経営理念を実現するための行動宣言として、我々 JAXA は、

- ①人々の生活の進化に伴う喜びを目標とし
- ②常に高みを目指した創造する志を携え
- ③社会の信頼と期待に応えるため責任と誇りをもって

「実現する」組織として、新しい時代を切り拓こうと考えます。

そして本年度は、新型ロケットの開発や重要な役割を期待される人工衛星の打上げ運用において、この理念を実現していく年としたいと考えておりますので、これからも皆さまのご支援、ご協力をお願い致します。



ISAS 事情

史上最強の木星包囲網

皆さんはハンマー投げをご存知ですか？ 鉄球にひもを付けて、ぶんぶん振り回して遠くまで投げる陸上競技種目です。宇宙でそれを毎日やっている巨大なものがあります。それは木星です。私たちは、惑星分光観測衛星「ひさき」と、世界中の宇宙・地上望遠鏡をそろえた史上最強の布陣で木星を監視し、木星の「ハンマー投げの謎」を解明しようとしています。

木星の「ハンマー投げの謎」

木星の衛星イオにある火山からは、毎秒1トンものガスが周囲の宇宙空間に放出されます。火山ガスは、電離して木星のつくる強力な磁場に捕まり、木星の自転運動に引きずられます。例えば、火山ガス＝鉄球、木星磁場＝鉄球に付けたひも、木星＝投てき手、としたハンマー投げのような状態です。

火山ガスの速さはイオの付近で毎秒70km以上もあります。鉄球は毎秒1トンずつ重くなるので、いくらひもが強くて、切れて鉄球を放り出すときが必ず来るはず。鉄球の重みで勝手にひもが切れるという説と、太陽から吹く高速ガス「太陽風」が木星を襲ってひもを切

るという説が提唱されています。ひもが切れたとき、火山ガスが持つ運動エネルギーは、火山ガス自身の加熱や、木星の極域のオーロラ発光で消費されると考えられています。ただし、どのような経路をたどって加熱やオーロラにエネルギーが与えられるのか不明です。ひもが切れる過程とエネルギー経路は、自転が高速な木星や土星の研究分野において、大きな謎として研究されています。

「ひさき」—ハッブル協調観測

それらの謎の解明を目的に、「ひさき」とハッブル宇宙望遠鏡を軸にした協調観測の計画が数年前に始まりました。当時宇宙研に在籍していたサラ・バッドマン研究員、埜千尋研究員、筆者の3人の若手研究者の行動が発端です。学生時代から木星をずっと研究してきた私たちは、アイデアを練りに練ってハッブルへの観測提案を行いました。ハッブルによる超高解像度のオーロラ撮像と、「ひさき」による火山ガスの同時観測というものです(詳細は『ISAS ニュース』2014年2月号の山崎敦助教の記事参照)。実はその前年にも、異なる課題で観測提案に挑戦していましたが、激しい選考競争に敗れました。今回は「ひ

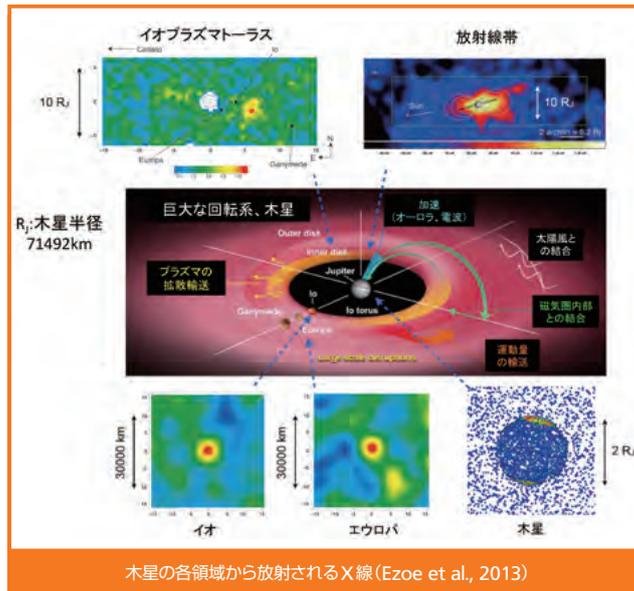
さき」の助けを借りた雪辱戦でした。そして見事採択されました。そのときの喜びと興奮は今でも忘れられません。

この採択をきっかけに、2014年1月の観測に向けて、世界中の望遠鏡による観測が20以上計画され、史上最強の木星包囲網が完成していきます。

「ひさき」—X線望遠鏡協調観測

「ひさき」打上げの約半年前、さらなるチャンスが舞い込みました。それがX線望遠鏡との協調です。私たちの木星包囲網が、米国ハーバード・スミソニアン天体物理学センターの研究チームの目に留まり、「ひさき」とチャンドラX線望遠鏡の協調観測提案へ誘われました。筆者は、木星X線の研究を行っており「ひさき」メンバーだったこともあり、この提案に参加しました。うれしいことに、チャンドラとXMMニュートンという世界有数のX線望遠鏡2機を、「ひさき」と同時に木星に向けるという特別枠での提案が採択されました。この観測は2014年4月に実施される予定です。

この観測計画のコンセプトは「高エネルギー」です。木星では、太陽系惑星の中で最高エネルギー（光速の99%以上の速度を持つ）の粒子があり、それに関連するガス加熱やオーロラ発光が起きています。それらの高エネルギー現象では、X線や電波の放射が強く起きます。それらも「ハンマー投げ」がエネルギー源になっている



はずと考えています。

ハッブル協調観測との違いも、このコンセプトにあります。ハッブルでは超高解像度の紫外線画像を実現する代わりに、最高エネルギーの1000分の1以下の粒子によるオーロラしか測定できません。それに対しチャンドラX線望遠鏡では、分解能を多少犠牲にして、最高エネルギーの粒子から放射されるX線オーロラを直接撮像できます。XMMニュートンでは、オーロラや火山ガスの「色合い」を見て、含まれる物質の種類やその温度を推定します。「ひさき」の紫外線観測では、最高エネルギーになる前段の冷たい火山ガスを見ることができます。X線と紫外線の同時観測によって、今までにない幅広いエネルギー範囲を初めて見渡すことができるのです。

4月のX線協調観測は、「ひさき」、チャンドラ、XMMニュートン以外にも、「すざく」や地上の赤外・電波望遠鏡が参加を決めており、1月の「ひさき」—ハッブルに匹敵する観測網が完成しつつあります。ハッブル協調観測もX線協調観測も、筆者は仕掛け人なのですが、こんな大ごとになるとは夢にも思っていませんでした……。とにかく、これらの史上最強の包囲網によって、木星の謎が解明される日は近づいています。この観測結果は、いつかまた別の機会にお話しできればと思います。

（木村智樹）

BepiColombo MMO の近況

ESA（欧州宇宙機関）との共同で水星探査を行うBepiColombo計画においてJAXA側が製作する水星磁気圏探査機（MMO：Mercury Magnetospheric Orbiter）の日本における最後の試験であるFM（フライトモデル）総合試験を、相模原の環境試験棟クリーンルームで行っています。

MMOの姿から受ける印象は、側面パネルを取り付けたときと、それがなくなるときとは、大きく異なります。高さ1mほどの側面パネルの上半分には太陽電池が取り



付けられています。この部分の温度をできるだけ下げするために太陽電池が取り付けられている部分の裏側は放熱面となっており、搭載観測機器などは太陽電池面の下端より下の部分、上部デッキと下部デッキの間の約30cmの空間にほとんどすべてのものが搭載されているためです。

MMOのFM総合試験もずいぶん進み、環境試験の大物の一つである正弦波振動試験および、中利得アンテナ・高利得アンテナの展開に伴う高周波衝

撃の試験までが終了しました。これで残る大物の試験は、8～9月に予定されている4mチェンバーを使った熱真空試験のみとなりました。その後は重心測定・慣性能率測定・アライメント測定を行い、日本における最終の電気試験、バッテリー容量確認試験をもって、MMO単体での総合試験が終了することとなります。

来年1月にはESAのESTEC（欧州宇宙技術センター）へ輸

送し、ESA側が製作・試験をしているモジュールである水星表面探査機（MPO：Mercury Planetary Orbiter）、巡行軌道中の電気推進モジュール（MTM：Mercury Transfer Module）、MMO用のサンシールドと組み合わせた母船総合試験を、来年末ごろまで実施します。全体確認を行った後、射場である仏領ギアナのクールーへ輸送。射場試験を経てAriane 5ロケットによって打ち上げられる予定となっています。（早川 基）

再使用観測ロケットのエンジン技術実証試験

宇宙研では、将来のSSTO（単段式宇宙輸送機）による高頻度大量宇宙輸送を実現する礎として、S-310などの観測ロケット（使い捨て型）を再使用型に置き換えることを計画し

ており、現在、再使用観測ロケット開発の技術的な課題について実証試験を行っています。

再使用観測ロケットは、仮にエンジン1基が故障して停止した場合でも機体を失うことなく射点に帰還できるよう、エンジンを4基搭載します。このエンジンは、液体水素と液体酸素を推進剤とし、100回のフライトに耐え得るよう高信頼・長寿命の設計を行っています。また、垂直離着陸で飛行することから、広範囲な推力制御機能（40～100%）、着陸前のエンジン再着火機能、1エンジンが故障した場合に残りのエンジンを迅速にスロットルアップする応答性を有しています。さらには、過酷な条件で使用されるターボポンプの軸受け・軸シールに点検ポートを設けて射点でも簡単に劣化や摩耗の状態を観察できる構造とするなど、従来のエンジンにはない新しい機能を持たせています。



液体水素ターボポンプ単体試験が終了

次はエンジンシステム燃焼試験を実施予定

昨年より、このエンジンの技術実証試験を角田宇宙センターで行っています。昨年5～6月に行った液体酸素ターボポンプ単体試験に続き、12月から今年2月にかけて液体水素

ターボポンプ単体試験を実施しました。供試体である液体水素ターボポンプの性能、機能、健全性を確認するため、試験装置に関連する項目も含め100点以上の計測を行っています。試験中は10名ほどの実験班メンバーが、各自担当する監視項目をモニターして刻一刻と変化するデータをにらみながら、供試体に異常の兆候が見られないか神経を集中させます。全8回の試験を無事に終了し、実機開発に向けて必要なデータが取得できました。

現在、液酸／液水ターボポンプと新たに製作した燃焼器を組み合わせたエンジンシステム燃焼試験に向けた準備を行っています。今後は、これらエンジン技術実証試験で得られた成果をもとに、再使用観測ロケットの早期フライトを実現すべく、実機開発に向けたエンジン／システム設計を進めていきます。（八木下 剛）

はまぎん こども宇宙科学館でイトカワ微粒子展示を実施

1月4日から2月23日まで、横浜市磯子区にある「はまぎん こども宇宙科学館」において、特別企画展「はやぶさ？ アポロ！ ちきゅう？！ 宇宙の石大集合！」が開催されました。この企画展では、アポロ17号が持ち帰った月の石や、海洋研究開発機構（JAMSTEC）が所有する地球深部探査船「ちきゅう」によって掘削された海底下

1750mの岩石試料と共に、JAXAが所有する小惑星イトカワの微粒子を展示しました。月の石、地球深部の岩石試料、そしてイトカワの微粒子と、人類が到達したいわば「最果ての地」の石を同時展示する試みは、世界初でした。

開催期間中、2週連続で関東地方を襲った記録的大雪のため、来館者数は一時伸び悩みましたが、最終的には約3

万1000名のお客さまにご来場いただきました。特に、東北大学の中村智樹教授をお招きして開催したイトカワ微粒子に関連するトークイベントでは、定員260名のところ約1200名の応募があり、あらためて「はやぶさ」の偉業に対する注目度の高さを実感することとなりました。

企画展では、本物のイトカワと同じ密度の1/2000模型と、イトカワ表面の物質である普通コンドライトの代表的な密度の同じ縮尺の模型を、JAXA吉川真准教授からお借りして展示しました。来館者はそれらを実際に持ち上げて重さを比べ、イトカワの密度がどれくらい小さいかを体感できることから、好評を博していました。阪本成一教授よりアイデアを頂き、イトカワの微粒子のサイズとほぼ同じ粒子のサイズのサンドペーパーを貼



イトカワの微粒子を観察する来場者

り付けたものも展示しました。当館は低年齢層の来館が多いのですが、子どもたちも微粒子の大きさを体感できると人気がありました。大人の来館者からは、そのアイデアに感心したという声も聞かれました。

それらの展示の中でも横浜市における初の展示となったイトカワの微粒子がやはり注目度が高く、老若男女問わず、興味深く顕微鏡をのぞく姿が見受けら

れました。とても小さな55 μ mの微粒子を観察することが、子どもたちだけでなく大人にとっても、宇宙や科学に興味を持つ「きっかけ」となったのではないかと思います。

最後に当館で企画展を開催するに当たり、JAXAの皆さまには多大なるご支援ご協力を賜り、誠にありがとうございました。(はまぎん こども宇宙科学館/櫻井英雄)

第6回宇宙科学奨励賞，米徳大輔氏に授与

公益財団法人宇宙科学振興会の「宇宙科学奨励賞」は、2013年度に第6回を迎えた。表彰式は、3月11日に霞が関ビル内東海大学校友会館で開催された。第6回宇宙科学奨励賞は、宇宙理学関係では金沢大学理工学域准教授の米徳大輔氏に、研究課題「飛翔体搭載ガンマ線偏光検出器の開発とガンマ線バーストの放射機構の研究」により授与することになった。残念なことに今年度は、工学関係では推薦件数も少なく、奨励賞を授与する該当者はなしとなった。

米徳氏の受賞理由は、①超小型ガンマ線バースト偏光検出器(GAP)を開発し小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSに搭載し、その運用に伴ってガンマ線バーストのデータ取得とその解析に当たった、②IKAROSが宇宙航行中にGAPが観測したガンマ線バーストのうち明るい3例から世界に先駆け有意(有意度3.5 σ)なガンマ線偏光を検出した、③そのGAPにより観測された偏光データを用いて量子重力理論におけるCPT対称性(C:電荷, P:空間, T:時間)の破れを検証し現代の基礎物理学に対して重要な仮説を提唱した、の3点であることが選考委員会



受賞者を囲んで記念写真(写真左より松尾弘毅 代表理事、米徳大輔 受賞者、森尾裕 評議員会長の各氏)

から報告された。小型の技術試験衛星にビギーバック検出器として搭載された小型軽量観測装置で、このような重要な成果を挙げられたのは、大変喜ばしいことである。今後新たな観測により、偏光放射の有意度を上げ、その放射メカニズムなどをいっそう明確にしてもらいたいと思う。

実は昨年度の工学関係の奨励賞は、「ソーラーセイルによる深宇宙探査・航行技術の実証的研究」の研究課題によりインハウスで製作され運用されたIKAROSの開発の中心となった津田雄一氏に授与された。今年度、そのIKAROSに搭載した10kg級の超小型検出器による科学的成果で米徳氏に理学関係の奨励賞が授与されたことは、宇宙研OBとしても財団関係者としても、誠に感慨深いものがある。日本の宇宙科学の成果は、当然ながら優れた宇宙工学技術の発展に依存している。宇宙技術開発の分野で良い成果を挙げている若手精鋭研究者が今後多数、本賞受賞候補者として推薦されることを期待している。

(公益財団法人 宇宙科学振興会 常務理事兼事務局局長/長瀬文昭)

2013年度所長表彰



左から、福島洋介氏、浅村和史氏、永松弘行氏、常田佐久 所長。

「れいめい」の開発と長期間の省力化運用——「れいめい」プロジェクト関係職員

「れいめい」は、重量70kgの低コスト（開発費約5億円）小型衛星です。宇宙研職員と学生とが衛星開発の主体となり、搭載品の実証試験からFM（フライトモデル）総合試験までを実施しました。さらに相模原キャンパスに設置された3mアンテナ局も含めた「運用省力化システム」をつくり上げ、2005年夏の打上げ以後8年以上にわたって運用しています。

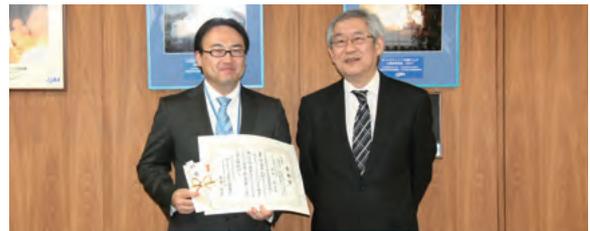
「れいめい」のミッションは、オーロラ微細構造解明に向けたオーロラ現象の多波長時間分解撮像と粒子計測の同時観測、民生品を含む低価格部品を使用した高信頼性小型搭載機器の開発、0.05度程度の分解能を有する高精度三軸姿勢制御の実現でした。それらの目的はすべて達成され、査読学術論文30編以上の成果が得られ、2009年度には航空宇宙学会技術賞を受賞しました。

宇宙科学研究所の大学共同利用システム利便性の向上に向けたユーザーズオフィスのシステム設計と設置及び運営のアウトソーシング化の実現——山本邦正氏

宇宙機関統合後、大学共同利用の機能が大学側から見えにくくなったことが、宇宙研内外で危惧されました。調査の結果、煩雑な手続きと敷居の高さが課題ということが判明し、「ユーザー視点のワンストップサービスを提供するオフィス」というコンセプトが生まれました。

ユーザーズオフィス設置に当たり、煩雑な規程類の一本化、担当者間の口承のマニュアル化とともに、ユーザー自ら手続きを行うための「ポータルサイト」、ワンストップ窓口の「ユーザーズオフィス」、審査と称号付与を行う「大学共同利用課」という運営システムを構築しました。

初年度（2012年度）は、集約した業務の効率化と標準化を進めました。次年度（2013年度）は、業務範囲の拡大、業務のIT化とアウトソーシング化を進めました。



科学推進部大学共同利用課の山本邦正氏（左）と常田所長

お知らせ

ISAS ニュース編集委員長交代

今月号より編集委員長が、森田泰弘 教授より山村一誠 准教授にバトンタッチされました。これを機に誌面構成を見直し、よりコンパクトで内容の充実した『ISAS ニュース』を目指します。どうぞご期待ください。

第13回「君が作る宇宙ミッション」参加者募集

「君が作る宇宙ミッション」(きみっしょん)は、高校生を対象にした研究体験型の教育プログラムです。高校生は、数名のチームを組んで、仲間と共に一つのミッションをつくり上げます。

実施期間：2014年8月4日(月)～8月8日(金)

対象：高校生あるいは相当年齢の方(高専は3年次まで)

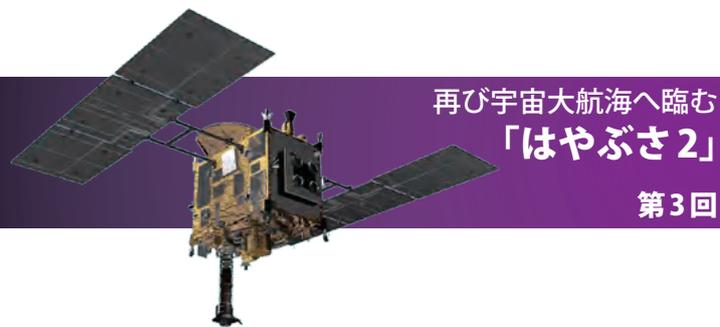
会場：JAXA相模原キャンパス

応募締切：2014年6月2日(月)必着

詳しくは <http://www.isas.jaxa.jp/kimission/> をご覧ください。

ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール(4月・5月)

	4月	5月
ASTRO-H		一次囀合せ試験(筑波)
BepiColombo		フライトモデル総合試験(相模原)
はやぶさ2		フライトモデル総合試験(相模原)



再び宇宙大航海へ臨む 「はやぶさ2」 第3回

イオンエンジン・ 化学推進の改良点

西山和孝 「はやぶさ2」プロジェクト イオンエンジン担当

森 治 「はやぶさ2」プロジェクト 化学推進担当

今回はイオンエンジンと化学推進について紹介します。イオンエンジンは、地球と小惑星との往復航行を、化学推進の10分の1という少ない推進剤消費で可能にします。化学推進は、イオンエンジンの1000倍以上の推力を発生させることができ、打上げ直後の姿勢制御や軌道の微調整、小惑星周辺での探査機位置制御や小惑星表面への離着陸時などに使用されます。このように性質が異なる二つの推進系が役割分担して「はやぶさ2」の原動力となるわけです。

「はやぶさ2」搭載のイオンエンジンは、「はやぶさ」当時の設計を基本的に踏襲しています。「はやぶさ」では2つの大きなエンジントラブルが生じました。一つは初期に発生したイオン源1基のプラズマ点火不良であり、もう一つは1万時間から1万5000時間の運転後に発生した中和器3基の劣化や故障です。「はやぶさ2」では、これらの不具合の原因を推定した上で対策を講じました。前者に対しては、イオン源の推力発生効率の向上と点火確実性とを両立するように各部の調整作業を入念に実施しました。後者に対しては、中和器の長寿命化のために放電室内壁をプラズマから防護し、電子放出に必要な電圧が低減されるように磁場の強化を行いました。試作中和器で実使用環境を忠実に模擬した毎週1回のオンオフによる高温・低温のサイクルを印加する耐久試験を2012年夏から実施し、2013年度末には「はやぶさ2」で要求される1万4000時間の運転を無事に達成しました。今後も2014年末の2万時間を目指して試験を続行する計画です。

満身創痍の「はやぶさ」の姿勢制御に役立った「キセノンガスジェット」や、異なる系統のイオンエンジン間で中和器電流を融通し合う「クロス運転」、通信条件悪化時の「1ビット通信」などの機能も健在で、一部ではさらなる使い勝手の向上や堅牢性強化を行っています。不具合対策以外の変更点としては、1台当たりの最大推力を従来の8mN（ミリニュートン）から10mNに増強することに成功しています。これは「はやぶさ」以降の研究成果を反映し、イオン源内のキセノンガス噴射口配置と流量配分、イオン加速用電極の穴径・板厚などの小さな設計変更だけで実現しました。

「はやぶさ2」の化学推進は「はやぶさ」同様、燃料と酸化剤を用いる2液式で20Nの推力を出すスラスタが12基搭載されています。「はやぶさ」では姿勢制御装置であるリアクションホイールが小惑星到着直前と直後に1つずつ故障したため、化学推進系は小惑星滞在時に、位置制御だけでなく、短パルス噴射による姿勢制御も担いました。しかし2回目のタッチダウンを成し遂げた直後に燃料が漏洩し、その後配管が凍結したこともあり、化学推進は2系統とも使用できなくなってしまいました。「はやぶさ2」ではこの漏洩原因として考えられる項目に対してすべて対策を施してあります。例えば、バ



図1 真空チャンバーの中で運転中のイオンエンジンフライトモデル
口径10cmのイオン源の855個の小さな穴から秒速47kmで噴射されるキセノンイオンビーム(左から右上方向)と中和器プラズマ(イオン源の左上)の発光。

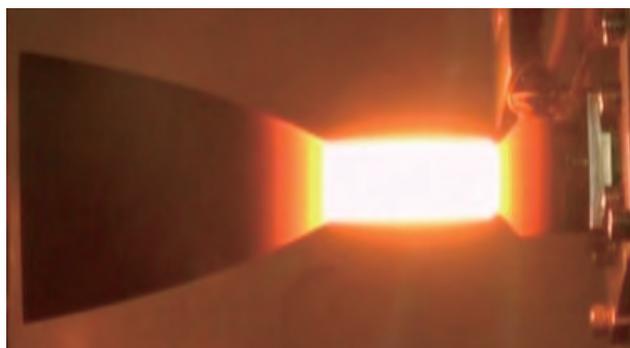


図2 化学推進系フライトモデルの慣らし燃焼の様子
連続燃焼ではスロート部が1000℃以上となる。

ルブに異物が詰まることがないように、清浄度管理を徹底すると同時に気密試験を強化しました。配管などの溶接失敗を避けるため、溶接箇所を最小化し、溶接プロセスも改善しました。また、絶縁不良が発生しないよう、推進剤電線は信頼性の高いコネクタを介してつなぐこととしました。運用についても見直し、スラスタの作動回数を常時モニタできるようにしています。さらに、「はやぶさ」で2系統の配管が凍結したことを踏まえ、配管のルーティングを分けて、独立に熱制御を行う設計としました。

化学推進系は「はやぶさ」以外のプロジェクトでも多数の教訓が得られていて、「はやぶさ2」に広く反映されています。特に金星探査機「あかつき」の周回軌道投入失敗に係る原因究明と対策を受け、燃料と酸化剤を押し出す高圧ガスの系統を完全に分離しました。「はやぶさ2」では「はやぶさ」で急ぎ実施した短パルス噴射はもちろん、衝突回避運用で長時間の連続噴射も達成し、地球帰還まで確実に任務を果たすべく開発を進めています。(にしやま・かずたか、もり・おさむ)

DubaiSat-2の初期運用

宇宙飛行工学研究系 助教 月崎竜童

2014年1月18日から21日にかけて、DubaiSat-2の初期運用に、JAXA月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC)の國中均プログラムディレクター、東京大学の小泉宏之准教授と共に参加してきた。夜10時に日本を飛び立ち、朝5時にアラブ首長国連邦(UAE)のドバイに到着すると、そのまま運用に入り、1泊して翌日26時半には帰途に就く弾丸ツアーだった。

DubaiSat-2は、UAEの先端科学技術研究所(EIAST: Emirates Institution for Advanced Science and Technology)が韓国の衛星メーカー「サトレック・イニシアチブ」に発注した、リモートセンシング衛星だ。昨年末にドニエブルロケットで打ち上げられて太陽同期軌道に投入され、韓国製のホールスラストという電気推進機が軌道制御用に搭載されている。この作動に必要な電子源として、マイクロ波放電式中和器に白羽の矢が立ち、2007年ごろにJSPECにオファーが舞い込んできた。その後、日本における囀合せ試験にて技術的成立性を確認し、2009年にJAXA-EIAST間の正式協力協定を取り交わし、JSPEC事業として開発に着手した。日韓における複数回の囀合せ試験を経て、2012年に完成した。小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ の中和器と比べ、電子電流が4倍以上流れるように設計された増強型で、長寿命化された「はやぶさ2」用中和器や中型イオンエンジン $\mu 20$ のための中和器の先行宇宙実証として絶好の機会となった。

朝8時にEIASTに到着すると、意外にもセキュリティチェックもなく入ってしまった。NASAへのインターンの際に、同僚が「こんなにセキュリティが厳しくなったのは9.11の後からだ」とボヤいていたが、イスラム圏の宇宙機関には、9.11は関係ないのかもしれない。その一方でこの国は、国営メディアしかなく報道や通信がコントロールされている絶対

君主制国家で、現地コーディネータが「ハッピーな北朝鮮」と言っていたのが印象的だった。

今回の運用では二つの地上局を使った。EIASTのアンテナは、砂漠の地平線が見えるほど開けている場所にあり、地上から数度の角度でも衛星を追跡できるのが利点だ。山並みがあり空が混雑しているためにアンテナ仰角が10度以上にならないと送受ができない日本とは大きな違いだ。もう一つは、ノルウェーの企業が運用するアンテナである。地上回線をつないで数万円程度で利用できるほど格安な上に、太陽同期軌道は必ず極域を通過するので90分おきに管制できる便利なアンテナだ。

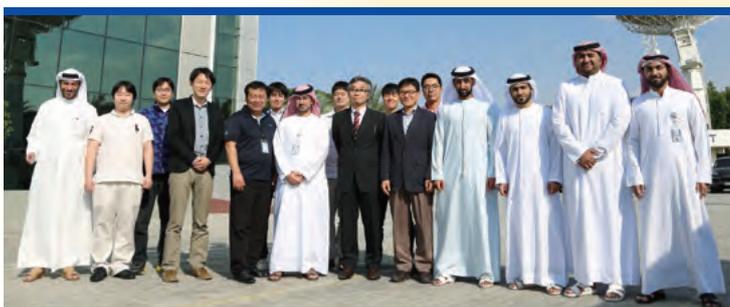
学生時代に務めた「はやぶさ」の運用当番では、白田の64mアンテナにつなぎ、コマンドラインを送った後、数十分の往復伝播遅延を経て運用が始まるような、非常にのんびりとしたものだった。そんな運用しか経験したことがない自分にとって、韓国人・アラブ人との低軌道衛星の運用は驚きの連続だった。当然、衛星からのレスポンスが速く、そして通信できる時間が10分前後と短い。高い緊張感の中、AOS(入感)からLOS(消感)まで、怒濤のように過ぎていく。深宇宙の運用がマラソンなら、低軌道はインターバルトレーニングのような激しさだ。早朝から「緊張の10分間とデータ解析の80分」を何セットも行うと、さすがに夕刻には疲れが見え始める。3時ごろに民族衣装を身にまとった現地スタッフがさっそうと帰っていくのとは対照的だ。

初日の運用では、通信途中にマイクロ波中和器をONにしたままLOSTしてしまう事態が発生した。中和器には自動停止装置は機能しないかもしれないという半ば「死亡宣告」のような説明がされ、メンバーには喪失感が漂ったが、90分後にふたを開けると、きちんと自動停止され中和器も健全だった。2日目には南極上空での非可視中の自動運転を試みた。これまでの地上試験や初日の運用で、ホールスラストと中和器の作動パラメータを細かく追い込んできた。ここまで調整しないと正常に作動しないのが、イオンエンジンにはないホールスラスト特有の難しさだ。見事に自動運転に成功したことで無事に役割を全うでき、ドバイ運用室駐在員を拜命せずに済んだ。

帰国直前に立ち寄ったブルジュ・ハリファは、広大な砂漠に突如として現れる高層ビル群の頂点に立ち、砂塵によって頂点がかすむほど圧巻だった。宇宙技術が唯一の共通項となって、日本・韓国・UAEの技術者が共に仕事ができることは夢にも思わなかった。今回の小さな国際協力活動が、日本の宇宙開発の国際交流にとって一助となることを切に願う。

(つきざき・りゅうどう)

初期運用に成功したDubaiSat-2の日本、韓国、UAEのプロジェクトメンバー(國中:右から8人目、小泉:13人目、筆者:11人目)





研究会集録！

北澤幸人、

宇宙科学研究所 受託研究員
研究開発本部 客員
(株) IHI 宇宙開発事業推進部 主幹

「SOCCER」というプロジェクトをご存知だろうか？ 1980年代にNASAとの共同ミッションとして宇宙研で検討された「彗星ダストのサンプルリターン」ミッションである。この計画はキャンセルされ、宇宙研は「はやぶさ」へ、NASAは「Stardust」ミッションへとかじを切っていた。私がこの計画のことを知ったのはすでにプロジェクトがキャンセルされた後であり、もちろんこのプロジェクトには関わったことはない。残された数冊の研究会集録を見ただけであった。しかし、その集録が微小なスペースデブリ(宇宙ごみ)の捕獲回収分析のためのエアロゲル・ダストコレクター研究開発のきっかけとなった。

スペースデブリが問題となりつつあった1990年代初頭、日本でもその研究が本格化していた。しかし、デブリの存在分布を把握する上で重要な微小なデブリの軌道上計測に関する研究は、国内ではほとんど進んでいなかった。欧米では微小デブリ計測に理学分野の固体ダスト計測方法が適用されていたが、宇宙工学分野での研究が主体であった日本国内ではデブリ計測の研究は根付いていなかった。メーカー勤務であるが学生時代に固体地球惑星物理学を専攻した私は、「デブリ」と聞いてすぐダスト計測に考えが及んだが、学生時代の不勉強がたたたり、わずかに宇宙研の工学実験衛星「ひてん」に搭載されたダストカウンター(Munich Dust Counter : MDC)が思い浮かぶのみであった。

そこで、惑星科学系の関連文献を探し始めた。そのころは今のよう情報ネットワークも発達しておらず、文献探しも容易ではなかった。当時の「文献調査」といえば「国会図書館に通うこと」であり、週末は国会図書館に通い面白そうな

資料を探すのが正しい(?)休日の過ごし方であった。当時は図書館への入館、閲覧、コピーなどそれぞれに申請書類が必要で、またコピー代も高額な上、枚数制限もあった。面白そうな資料を借り出しては、大急ぎで眺め必要な部分のコピーを申請、といった作業の繰り返しであった。

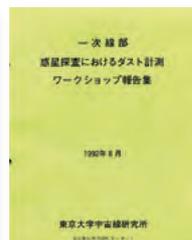
その中で出会ったのが「SOCCER」関連の2冊の集録であった(写真)。それは、最近のきちんとした体裁の「プロシーディングス」ではなく、手書きあり、計算メモあり、本の目次や論文紹介ありと、種々雑多な文書を集めたものであったが、おかげで研究に関する「アイデア」や国内外の最新動向を幅広く知ることができた。そして特に目に留まったのは、藤原願先生(当時 京都大学、後に宇宙研教授)の書かれた、低密度物質への模擬ダストの衝突実験に関するレポートであり、そして「エアロゲルがダストの捕獲に有望」とのメモであった。直感的に「これだ!」と思いつてを頼って藤原研究室に飛び込み

ご指導をお願いしたのを、つい昨日のことのように思い出す。

幸い、当時の宇宙開発事業団(NASDA)の「委託業務」の一環としてダストコレクターの研究開発に携わることが可能となり、開発された「エアロゲル・ダストコレクター」はスペースシャトル(STS-85)、国際宇宙ステーション(ISS)のロシア・サービスモジュール(3セット)、そして「きぼう」日本実験棟と、計5回にわたり軌道上でダスト捕獲・回収を行うこととなった。特にISSのサービスモジュールに搭載したエアロゲルからは、連鎖衝突で生じたデブリの存在を示唆する微小デブリを確認でき、さらに茨城大学の野口高明教授(現 九州大学)らによってまったく新しい天然の鉱物「Hoshi」が発見されるという大きな成果が得られた。個人的には藤原先生のご指導のもと、先生の「SOCCER」での研究をベースに「集録」の研究者の方々に支えていただきながら「理学」の学位論文を書き上げたが、これは「集録」を発見したときにはまったく夢にも思っていなかったことであった。

最後に、「SOCCER」のようなチャレンジな計画を考えられた宇宙研の先生方へ敬意を表させていただくとともに、お願いが一つ。先生方が関与された研究会集録を握りしめて研究室に飛び込んでくる怪しげな人間がいたら、ぜひ温かく迎えてあげていただきたい。その人間は先生の教えをこの世で最も必要としているに違いない。そして、集録には先生の「論文」に加え、「思い付き」や「余分な実験データ」「計算メモ」など、ぜひ雑多な内容、言い換えれば先生の「思想」を散りばめ、研究テーマを「考える」きっかけを与えていただければと思う。

あつ、お願いが二つになってしまいましたね。ご容赦を。(きたざわ・ゆきひと)



国会図書館で「発見」した2冊の集録

数百年後の人類に恥じない宇宙開発を

科学推進部 部長
石井康夫

—— 科学推進部では、どのような業務を？

石井：宇宙研の広報を含めた総務全般、予算の立案を含めた事業計画検討、そして大学共同利用に関わる事務をしています。宇宙研の主役は、宇宙科学の研究開発をしている人たちです。皆さんが良い活動をして、良い成果を挙げられるように支えていくことが、科学推進部の仕事です。

—— そのために必要なことは？

石井：説明責任と信頼関係です。新しいことが決まったら、こうしてくださいと命令するのではなく、それがなぜ必要なかをきちんと説明するように心掛けています。宇宙研に所属している全員がベクトルを合わせて仕事をすることが重要です。もし誰かが不満を持っていると聞いたら、すぐ連絡を取って話を聞き、対応するようにしています。その一手間をさぼると、信頼関係がなくなり良い成果を挙げられなくなります。

—— これまで、さまざまな部署を経験されたそうですね。

石井：エンジニアとしてNASDAに入り、数々のプロジェクトに参加してきました。その経験は、現在の科学推進部、その前の経営企画部での仕事にも役立ちました。研究者、技術者が何を言いたいのかが容易に想像できますし、政府や行政機関に説明する場でも自信を持って話をできるという強みがあります。

—— これまでの仕事で大変だったことは？

石井：たくさんありますが、一つは経営企画部に異動して1ヶ月で自民党から民主党に政権が代わったときですね。先行きが不鮮明になり、事業仕分けへの対応にも苦心しました。もう一つは、国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟に搭載するロボットアームの飛行実証プロジェクトです。予算も時間も限られていて、フライトモデルをつくらずにエンジニアリングモデルを宇宙に持っていくことに途中で変更したため、改修や追加の試験、NASAの手続きなどすべてが大変でした。当時、私は30代半ばでしたが、すべてを懸けて取り組みました。ISSプロジェクトは1980年代からやっていますが、日本はずっとペーパーワークや地上作業ばかりでした。1997年に、このプロジェクトで初めて実際にISSに行くものをつくって宇宙に打ち上げて動かすことに成功しました。それを見た人たちが日本もできるんだと自信を持ってたと言っているのを聞き、苦勞が報われる思いでした。

—— なぜNASDAに？



いしい・やすお。1962年、群馬県生まれ。東京大学大学院工学系研究科航空工学修士課程修了。1986年、宇宙開発事業団 (NASDA)。種子島宇宙センターでH-Iロケット初打ち上げなどの地上設備、筑波宇宙センターでマニピュレータ飛行実証プロジェクトなどを担当。ボン派遣員事務所長、経営企画部企画課長などを経て、2013年より現職。

石井：高校生のとき、宇宙開発に携わりたいと思うようになりました。学校でクラス対抗の行事があると、クラスがまとまって頑張りますよね。学校対抗、国対抗でも同じです。さらに大きな宇宙という視点で考えれば、

地球で暮らす人類が一つにまとまるのではないかと。つまり、宇宙開発の仕事は人類の平和につながると思えました。

書店で赤本を立ち読みして、東京大学の宇宙航空研究所でロケットを打ち上げていることを知り、東大に行こうと決めました。航空宇宙学科で構造力学を学び、卒業後は日本の宇宙開発を引っ張っていきような仕事をやりたいと思うようになりました。NASDAならばそういう仕事ができると考えたのです。

—— どのような宇宙開発をやりたいと思いついていたのですか。

石井：きちんと考え始めたのはNASDAに入ってからでした。宇宙開発は数百年単位の事業です。具体的に何をしたいというのではなく、未来の人たちが振り返って、あのころによくやってくれたから今があるよね、と言われるようにしたいと思っています。

—— 今の宇宙開発に必要なことは何だとお考えですか。

石井：自分たちは今まで素晴らしい成果を挙げてきたのだから、これからも国民の皆さんにサポートしてもらえらるだろう。そんな甘い考えでは日本の宇宙開発に将来はありません。宇宙開発の魅力や成果をもっとアピールしていくことが必要です。それには計画・進行中のプロジェクトやその成果について、もっと分かりやすい言葉で伝えなければいけません。国民の皆さんの知的好奇心をかき立て、ぜひそのプロジェクトを実現してほしいと思っています。それが不可欠です。

—— 趣味は？

石井：テニスです。高校時代は軟式で、社会人になってから硬式を始めました。相模原は単身赴任なので、筑波の自宅に帰る週末に練習しています。大会にも出ていますが、昨年は肉離れをやってしまい、執務室へ行く階段がつかない状態でした。テニスをやっているときは、仕事のことはすべて忘れられます。仕事に集中するためには、気分転換も大事ですよ。

ISAS ニュース No.397 2014.4 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 宇宙研では桜の花が咲き始めた中、セキュリティ強化のための敷地境界線工事が進められています。そのアンバランスに戸惑いながらも、『ISASニュース』は常にオープンな存在を心掛けるよう、編集委員一同決意を新たにこの春です。(田中 智)

*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

