ISSN 0285-2861

JAXA 宇宙科学研究本部

ISASニュース

2006.5
No. 302

赤外線天文衛星「あかり」の望遠鏡蓋開けを無事に終え，喜びの内之浦運用チーム

宇宙科学最前線

ジオスペース最高エネルギー粒子誕生の謎を追う 放射線帯の研究

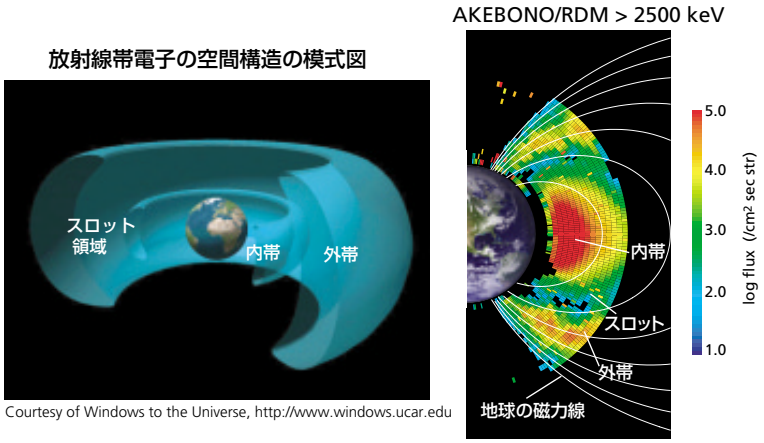
三好由純
名古屋大学太陽地球環境研究所助手

地球周辺の宇宙空間は，何もないように見えても，希薄な，しかしエネルギーの高いプラズマ粒子（イオンや電子）が，地球の磁場の中で飛び回っています。このプラズマや磁場に関して，地球からの影響が，そして逆に地球への影響が強く及ぶような宇宙空間を「ジオスペース」と呼びます。このジオスペースの中の，スペースシャトルが飛ぶような高度から気象衛星「ひまわり」がいる静止軌道の間の空間は「内部磁気圏」と呼ばれ，そこには「放射線帯」が存在します。放射線帯は，数百keV（キロ電子ボルト）から数十MeV（メガ電子ボルト）のエネルギーを持つイオン，電子から構成され，ジオスペースで一番エネルギーの高い粒子が集まっています。

図1に，放射線帯電子の空間構造の模式図（左）と日本の「あけぼの」衛星による2500keV以上の電子の観測結果（右）を示します。電子の放射線帯は，「内帯」と「外帯」という地球を取り囲む二つのベルト状の分布と，その間に「スロット」と呼ばれる間隙を持っています。一方，図には示していませんが，イオンの放射線帯はこのような二重構造ではなく，単一のベルト状になっています。

放射線帯の発見

放射線帯は，1958年にアメリカのExplorer衛星によって発見されました。発見したバン・アレン教授の名前をとって，放射線帯のことを「バン・アレン帯」と呼ぶこともあります。その後，1960～70年代にかけて放射線帯の観測および理論的な探究が精力的に進められ，平衡状態における放射線帯の空間構造について，定量的に説明することができるようになり



Courtesy of Windows to the Universe, http://www.windows.ucar.edu

図1 （左）放射線帯電子の模式図。（右）「あけぼの」衛星によって観測された2500keV以上の電子の空間分布。色で粒子のフラックスを示しています。

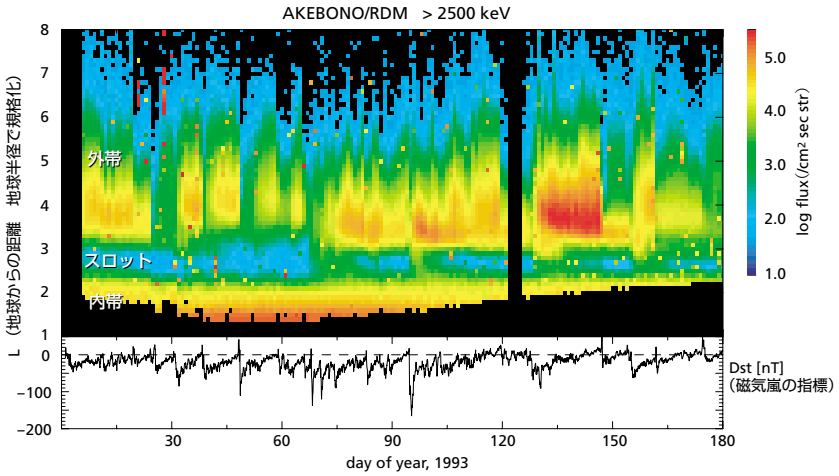


図2 「あけぼの」衛星によって観測された，1993年の2500keV以上の放射線帯電子フラックス。横軸にtotal day，縦軸に地球半径で規格した地球からの距離を示しています。下段は，磁気嵐の強さを表すDst指数。

ました。その後1980年代になると，人工衛星による探査領域が，オーロラ帯の北極・南極域やそれにつながる磁気圏の尾部領域，そして太陽系の惑星へと移ったこともあり，放射線帯の研究は一時下火となりました。

激しく変動する放射線帯

図2の上パネルに，「あけぼの」衛星が観測した2500keV以上の電子の時間変化を示します。横軸は1993年1月から6月までの半年間の期間を示し，縦軸は地球からの距離です。下のパネルは，Dst指数と呼ばれる磁気嵐の指標を示しています。この指数がマイナスに大きく振れると，磁気嵐が発生していることを意味します。磁気嵐が起きると，外帯の電子はいったん消失し，その後ゆっくりと増加し，外帯が再形成されていることが分かります。この再形成の際，電子フラックスは2桁以上も増大することがあります。また，すべての磁気嵐で再形成が起こるわけではなく，消失した後しばらく戻らないような場合があることも分かります。このように，放射線帯の外帯は，磁気嵐によって激しく変化する領域です。

外帯が磁気嵐とともに大きく変化することは，1960～70年代の研究でも指摘されていましたが，この現象に再び関心が集まるようになったのは1990年代のことです。その理由の一つは，1990年代に内部磁気圏を探査した米国のCRRES衛星や「あけぼの」衛星によって，放射線帯が激しく変化している様相が「再発見」されたことです。もう一つの理由は，放射線帯の高エネルギー粒子によって引き起こされる人工衛星の故障が，一般社会にとって大きな問題となってきたためです。

宇宙天気研究と放射線帯

GPS衛星や気象衛星のような宇宙インフラは，現代社会の生活と切り離せないものですが，このような衛星群は，まさに放射線帯の中で運用されています。スペースシャトルなど有人宇宙活動が行われているのも，放射線帯の下端です。エネルギーが高い粒子は人工衛星の動作異常を引き起こしたり，宇宙での人類の長期滞在にとって大きな障害を及ぼしたりします。実際，増大した放射線帯の粒子によって人工衛星に不具合が起こり，テレビ中継が途絶した例も報告されています。人間活動と密接にかかわる太陽地球系科学のことを「宇宙天気研究」と呼びます。人類が宇宙空間で安全に安心して活動していくためにも，放射線帯の研究は，宇宙天気研究において特に重要なものとなっています。

放射線帯再形成のメカニズム

どうやって増えていくのか?

放射線帯が変動する際，そこでは何が起こっているのでしょうか？　外帯の「消失」と「再形成」は共に重要な課題ですが，ここでは特に「再形成」，すなわち，一度なくなった放射線帯が再び高エネルギー粒子で満たされていく過程に焦点を当ててみたいと思います。「再形成」の鍵となるのは粒子の加速ですが，この加速の問題は宇宙空間物理学の重要な研究課題です。

磁場中の荷電粒子は，磁場の強度と粒子のエネルギーの比が一定になるような性質があります。従って，太陽から吹き付けてきた太陽風のプラズマは，磁気圏に入ってきて地球に近く磁場が強いところに輸送されると，そのエネルギーは増加します。このような加速を，断熱加速と呼びます。しかし，この太陽風起源のプラズマが断熱的に加速されるよりも，放射線帯の粒子は，はるかに高いエネルギーを持っています。そこで，磁気圏の中のどこかに，断熱的ではない（非断熱）加速機構が存在することが考えられてきました。しかし，そのような非断熱的な加速が，磁気圏の「どこで」「どのように」起こっているのかは，いまだに決着のついていない重要な問題です。過去10年間，「外部供給説」と「内部加速説」と呼ばれる二つのメカニズムをめぐって，理論・観測両面から精力的な研究が行われてきています。

外部供給説

磁気圏の太陽と反対側（磁気圏尾部）で非断熱的な加速が行われ，その後，磁場が強い地球方向に輸送されるにつれて断熱的に加速されていくと考えるのが，「外部供給説」です。1970年代の古典理論は，このプロセスによって放射線帯の形成を説明していました。また，1990年代後半の研究では，磁気流体波と呼ばれる磁気圏の波動が高エネルギー電子の効率の良い輸送を引き起こすことが可能であることが理論的に指摘され，観測による実証も進められています。

内部加速説

放射線帯の内部で非断熱的な加速が行われると考えるのが，「内部加速説」です。この場合，放射線帯粒子よりもエネルギーの低い「種粒子」が，磁気圏内のプラズマ波動とミクロな相互作用をすることによって，より高いエネルギーへと加速され，マクロな放射線帯構造を形作っていきます。この加速プロセスには，波動の特性に影響を与える冷たいプラズマ（数eV）を含めて，6桁以上にもわたる広いエネルギー範囲のプラズマや粒子がかかわってきます。

従来，「内部加速」は，理論的には可能でも，実際のプラズマ環境や加速の効率を考えた場合，放射線帯を形成するためには不十分であると思われてきました。しかし，1990年代になって，「あけぼの」衛星などによって，このプロセスを引き起こすプラズマ波動や「種粒子」が存在し，背景のプラズマ環境がこの加速過程を促進させる状態になっていることが観測され，「内部加速」が放射線帯粒子の形成に重要な役割を果たしていることが，断片的ながら分かってきました。

赤道面での直接観測の重要性

「外部供給説」と「内部加速説」。この二つのプロセスのどちらがより効率的に起こっているのかを調べるためには，粒子の位相空間密度（速度分布関数）と呼ばれる量を測る必要があります。放射線帯の外帯が増えていく際に，「外部供給説」では位相空間密度が放射線帯の外側から内側に向かって増えていくことが，一方「内部加速説」では内側から増えていくことが予想されます。位相空間密度を計測するためには，広いエネルギー範囲での放射線帯の粒子の計測，および背景の磁場の計測が必要です。

実は1990年代初頭のCRRES衛星以降，このような観測能力を持った科学衛星は，磁気圏赤道面には打ち上げられていません。そこで，極軌道衛星の観測データを用いて，位相空間密度を算出する努力が続けられてきました。その結果，「外部供給」を示唆するような位相空間密度のデータが報告される一方，「内部加速」を示すようなデータも数多く報告され，両者の議論は混沌としてきています。また，放射線帯の中でも，地球からの距離や地方時の違い，さらに磁気嵐の違いによっても，二つのプロセスの起こり方が異なっていることも示唆されてきました。しかし，位相空間密度の計測は，磁気圏の赤道面で行わない限りその計測にどうしても不確定性が生じてしまうため，この二つのプロセスについての決定的な理解を得るには至っていません。

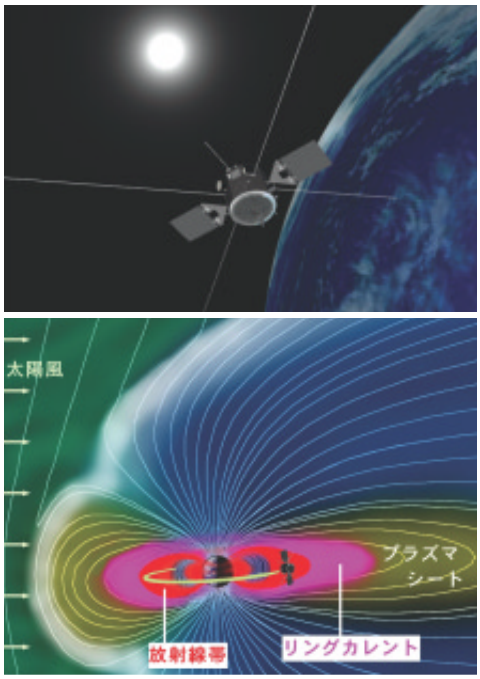


図3 ERG衛星の想像図（上）とジオスペースの中での探査領域図（下）

第24太陽活動期に向けて——ERG計画——

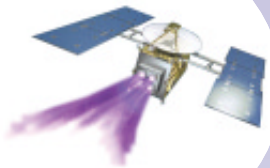
これまで述べてきたように，1990年代以降の放射線帯の研究は，磁気圏赤道面での観測がないことによる大きなフラストレーションの中で進められてきました。このような状況を打開するために，2010～2012年に予想される次の第24太陽活動極大期に向けて，磁気圏赤道面での世界的な放射線帯探査計画が，International Living With a Star（ILWS）という国際共同プログラムの中で立案されています。ここではRBSP衛星（米国），ORBITALS衛星（カナダ）といった計画が提案されており，これらの複数の衛星によって，放射線帯の中で異なる場所（距離，地方時）を同時にカバーしながら観測していくことが計画されています。そして私たちも，国際的な観測計画の一翼を担う形で，ERG（Energization and Radiation in Geospace）というプロジェクトを現在検討しています。

図3にERG衛星の想像図，および探査領域を示します。ERG衛星は，磁気圏赤道面において，放射線帯粒子の加速に関連するプラズマ粒子，電磁場，波動を同時に，かつ十分に広いエネルギー範囲・周波数帯で観測することで，「外部供給説」と「内部加速説」を切り分け，それぞれのメカニズムの詳細な解明を目標にしています。また，米国やカナダの衛星計画との協力により，これまでにない規模でジオスペースの包括的な探査を実現します。

さらにERGプロジェクトでは，ERG衛星による観測を補強する形で，近年急速に発達してきた地上からのリモートセンシング技術を活かすべく，地上観測もプロジェクトの一部を担っており，ジオスペースを宇宙から，そして地上から同時に探査することを計画しています。また，IT技術の進化に伴って，ジオスペ

ース研究においても，従来のコンピュータでは難しかった大規模な数値シミュレーションが行われるようになっています。ERGプロジェクトでは，こうしたジオスペースのシミュレーションを行っている研究者も参画して，「衛星による観測」と「地上からのリモートセンシング」を「数値計算」を通じて結合するなど，三者が一体となって，ジオスペースにおける高エネルギー粒子生成過程を理解しようとしています。

高エネルギー粒子加速の問題は，地球磁気圏だけではなく，惑星磁気圏，天体磁気圏での粒子加速にもつながる普遍的な問題です。遠くの惑星や天体では難しい「加速の現場の直接観測」が唯一可能な領域であるジオスペース。ERGプロジェクトは，そのジオスペースで，最も高いエネルギーの粒子が生まれている現場を探査し，粒子加速メカニズムを解明することを目指しています。　（みよし・よしずみ）



はやぶさ近況

イトカワの素顔をとらえるONC-T（AMICA）

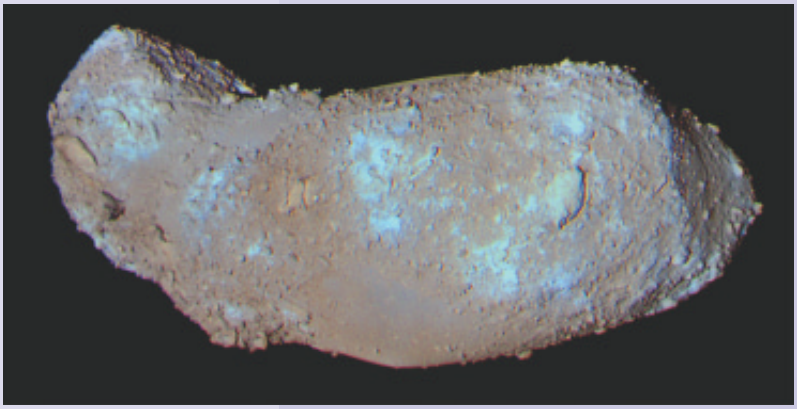
「小惑星の理学観測といえばカメラ！」と筆者としては言いたいところではあるのですが，残念ながら「はやぶさ」には理学観測専用のカメラは積まれていません。実は，宇宙機の目として使われる航法用カメラを一部理学観測のために使わせていただいて，サイエンス目的の画像を取得しているのです。そのため，同じカメラでもONC-T（望遠光学航法カメラ）とAMICA（Asteroid Multiband Imaging Camera）という2通りの名前が付いています。前者が工学側の呼び名で，後者が理学側の呼び名です。ここでは，AMICAと呼ぶことにしましょう。

ご承知の通り，AMICAは数多くのイトカワの画像を取得し，その特異な形状や表層の姿を明らかにしました。しかし，カメラの真骨頂は，やはり色フィルタを用いたカラー情報の取得だと思います。

AMICAには，7バンドの色フィルタと偏光子が搭載されています。色フィルタは小惑星の望遠鏡による分光観測で実績のあるシステムとほぼ等価のものを搭載していて，小惑星表層のわずかな色の違いも判別することができます。幸いイトカワは，明るさだけでなく色のバリエーションも豊富だったため，この7バンド撮像による色の違いの判別は非常に有効で，かつ興味深いものでした。

イトカワの表面を見ると，傾向として明るい部分が青っぽく，暗い部分が赤っぽくなっていることが明らかになりました。小惑星表面の物質が宇宙放射線や微小隕石の衝突などにより劣化するという現象があるらしいとされているのですが，これは，その程度の違いを示している可能性があると考えています。

今後の議論のため色をきちんと定量的に決めるには，キャリブレーションが不可欠です。そのためAMICAは，イトカワへ向かう途上でいくつもの標準星を撮像して情報を集めてきました。現状ではまだ定性的な色の違いしか示すことはできませんが，キャリブレーション担当のメンバーたちが今も，標準星データを用いた定量的な色の表現をするために奮闘中です。その作業のめどが立って，初めてAMICAの性能がフルに発揮されることになると期待しています。　（齋藤 潤）



AMICAの3バンドの画像を合成した，イトカワの合成カラー画像（色とコントラストは強調している）

目を開いた「あかり」

日本初の赤外線天文衛星「あかり」は，4月13日に望遠鏡の蓋を開けて試験観測を開始しました。「あかり」の望遠鏡は，望遠鏡自身が赤外線を放射して観測の邪魔をするのを避けるため，液体ヘリウムを搭載して−270℃近くまで冷却されています。この冷却のため，望遠鏡は魔法瓶のように真空断熱された容器に納められています。従って観測を開始するためには，容器の蓋を開ける必要がありました。

内之浦宇宙空間観測所のアンテナで「あかり」からの信号を見守る中，あらかじめ送っておいた指令通りに「あかり」は姿勢を変え，日本時間4月13日午後4時55分に蓋が分離されました（表紙参照）。分離信号や姿勢制御系の信号が蓋が開いたことを示し，また赤外線観測装置の信号でも正常な分離が確認できました。蓋の内側は−200℃程度に冷えていますが，それでも感度の高い天体観測装置にとっては非常に強い赤外線を放射しています。「あかり」の遠赤外線サーベイ装置は，この蓋からの赤外線で信号が飽和していましたが，蓋が開くと信号レベルが大きく下がりました。望遠鏡と赤外線観測装置が，初めて暗い宇宙を見た瞬間でした。

現在，天体のデータを使って，観測装置の機能・性能の確認や調整を行っています。また，望遠鏡の焦点調整（ピント合わせ）もほぼ終了しており，5月には本格的な天体観測が開始できる見込みです。　（村上 浩）

牧島一夫さん，「林忠四郎賞」を受賞

X線天文学グループでおなじみの牧島一夫さん（東京大学大学院教授・理化学研究所主任研究員）が，2005年度の日本天文学会「林忠四郎賞」を受賞されました。牧島さんは東京大学へ移られる前，大学院を含めて約10年を宇宙研で過ごし，初代の『ISASニュース』編集委員でもありました。「林忠四郎賞」は，分野への寄与が大きく独創的な研究に対して天文学会から贈られるもので，今回が10回目に当たります。X線天文学では，京都大学の小山勝二さんが第3回に受賞されています。牧島さんがいまさら，という感を持たれる方も多いかと思いますが，とにかく大変おめでたいことで，心からお祝い申し上げます。

受賞記念講演を行う牧島一夫 東京大学教授

牧島さんの受賞対象となる業績は，ブラックホール天体と銀河団のX線観測研究です。ある程度シニアな方はよくご存知のように，牧島さんは小田稔先生の遺志を継ぐ形で，日本のブラックホール研究の牽引車としてパワフルな仕事を続けてきました。降着円盤の内縁の温度からブラックホールの質量を導いたり，ULXという名で世界的に広く知られることになった超光度のブラックホール天体を系外銀河の中にいくつも見つけています。一方，銀河団では，それまで信じられていたクーリングフローという仮説に合わない現象をいくつも見つけ，銀河団の中心で銀河の磁場や巨大ブラックホールが莫大なエネルギーを生み出しているらしいことを示しました。

牧島さんの仕事は，宇宙に存在するブラックホールやダークマターや磁場（つまり，えたいの知れないもの）のしっぽを何としてもつかんでやろうという意気込みに満ちたもので，牧島さんにあこがれた何人もの若い人々が研究者として成長し活躍しています。個人的には東大牧島研の立ち上げ時期に，「あすか」衛星のGIS検出器を中

心に，若い人たちと夢中で実験や解析や酒をやっていたころのファミリー的な雰囲気が懐かしく思い出されます。

牧島さんの「林忠四郎賞」受賞を，みんな大変喜んでいます。受賞を機に，ますますパワフルな研究を展開し，X線グループを引っ張っていってください。

（首都大学東京　大橋隆哉）

M-Vロケット7号機嚙合せ試験

M-Vロケットは昨年7月にX線天文衛星「すざく」，今年2月には赤外線天文衛星「あかり」の連続打上げを成功させていますが，今年度夏期に太陽観測衛星SOLAR-Bを打ち上げるべく，4月3日よりゴールデンウィーク前にかけて，嚙合せ試験を相模原キャンパスで実施しました。

駆動試験中の第1段ノズル（前部）と動作を見守る担当者

嚙合せ試験とは，工場で製造完了したM-Vロケットの全機器を所定の位置に搭載し，その機能および電気的インターフェースを確認することが目的です。搭載機器はここでつながれ，初めて一つのシステムとして機能するのです。この「初顔合せ」はM-VとSOLAR-B間でも行われ，ロケットと衛星をつなぐ「接手」の機械的フィットチェックや信号ラインの電気的確認試験が無事終了しました。300点にも上る機器・計装ラインの搭載作業も順調に進み，機器に「灯を入れて」（電源をONにして）機能・動作の確認試験を実施しました。嚙合せ試験の終了をもって，M-Vロケット7号機は内之浦の打上げ場に行く準備を完了しました。

「すざく」打上げから「あかり」打上げまでは，M-V始まって以来の半年間隔でした。それに加え，「あかり」の打上げは初の南向きでした。7号機は，これら2機の打上げと並行するタイトなスケジュールをこなして製造してきたものですが，この試験で正しく製造されたことが確認されたのです。

長寿命で大活躍した「ようこう」（SOLAR-A）なき今，SOLAR-Bの一刻も早い打上げが世界から望まれています。SOLAR-Bをきちんと軌道に届け，M-Vロケット半年間隔の連続打上げの最後を，7号機でしっかり飾りたいと思います。

（竹前俊昭）

総研大から7人の博士が誕生

今年の3月で総合研究大学院大学（総研大）宇宙科学専攻が設置されてから3年が経過し，宇宙科学専攻から初めての博士が7人誕生しました。写真は学位授与式直後のもので，修了生6人と専攻長が写っています。初年度に入学した学生数は14人でしたので，半数が規定年限内に学位獲得したことになります。博士後期課程の3年間で学位取得するには学生の絶え間ない努力が要求されますが，この難関を突破した学位取得者は，2名がJAXAの宇宙航空プロジェクト研究員に，2名が国立天文台に研究の場を見つけるなど新しい職場を得て，この4月から研究者・技術者への道を歩き始めています。残りの7人の中には学位取得をあきらめた学生も若干名いますが，多くは学位取得を目指し今も研究を継続していると聞いています。

宇宙科学専攻にとって，今年4月は大きな転換期になっています。本年度から宇宙科学専攻は5年一貫制博士課程に移行しました。この制度では，従来の博士後期課程の学生だけでなく，博士前期課程の学生も受け入れます。今年度は2名の学部卒業生が入学しました。この制度に対応できるように，特に基礎科目を充実するようカリキュラムの改定を行いました。また，設置から3年たち，学年進行の制約（大学設置審の監視）から解放されたことも大きな出来事です。これにより，例えば担当教員の任用が研究科の教授会の承認でできるようになり，また，宇宙科学専攻から論文博士を出すことが可能になりました。

（八田博志）

「第5回　君が作る宇宙ミッション」参加者募集！

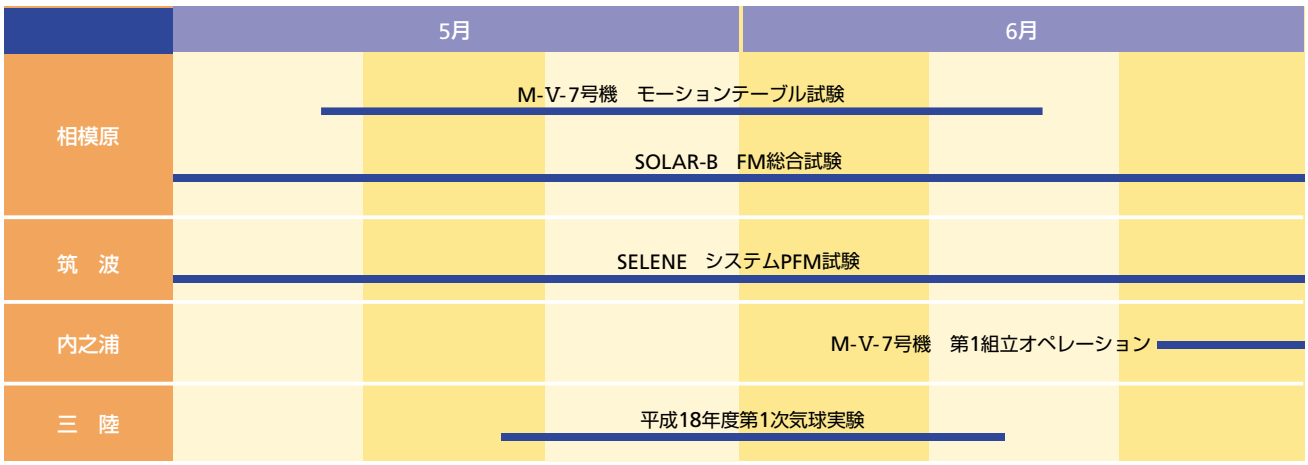
開催期日：**2006年7月31日（月）～8月4日（金）**

場所：**宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 相模原キャンパス**

宇宙航空研究開発機構では，高校生（および相当年齢の方）を対象とした体験学習プログラム「君が作る宇宙ミッション」の参加者を募集します。

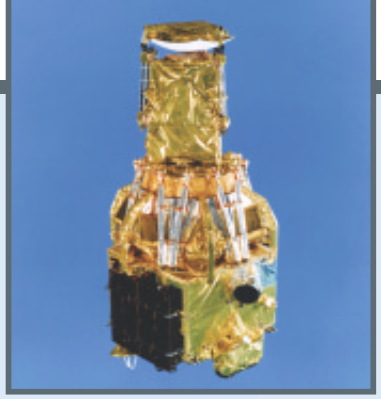
詳しくは http://www.isas.jaxa.jp/j/new/event/2006/0731_kimission.shtml をご覧ください。

ロケット・衛星関係の作業スケジュール（5月・6月）



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

浩三郎の
科学衛星秘話


「はるか」

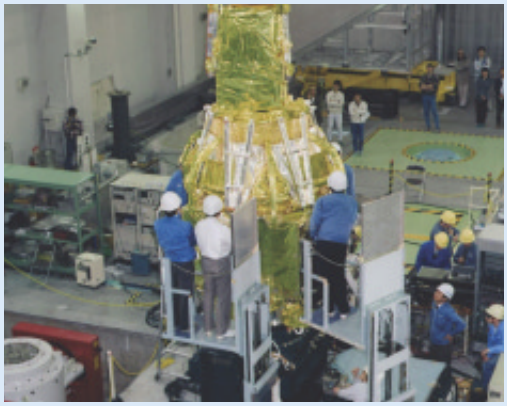
井上浩三郎

スペースVLBI衛星「はるか」その1

工学実験衛星の2番機であるMUSES-Bは，軌道上での大型アンテナ展開をはじめ，精密姿勢制御，多周波低雑音受信，大容量データ伝送，位相基準信号の伝送，高精度軌道決定などの工学実験，ならびにスペースVLBIによる電波天文観測を行うことを目的として，1997年2月12日，新型のM-Vロケット1号機によって，内之浦から打ち上げられました。近地点高度220km，遠地点高度2万1000km，軌道傾斜角31度の軌道に投入され，「はるか」(HALCA；Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy)と命名されました。重量は約830kgです。

初期運用状況

軌道に乗った衛星の内之浦での第1可視で，太陽電池パドルの展開とKuバンドアンテナの展開が確認され，電源系をはじめとするさまざまなバス機器の動作はすべて正常でした。しかし，衛星の姿勢が予定した太陽角から外れており，かつ角速度制御が予想した状態と異なっていたため，いったんセーフホールド制御に待避し，翌日の第2可視において正規の3軸姿勢制御を確立しました。2月14日から近地点高度を上げるため，RCSによる軌道制御を3回にわたって行い，近地点高度560km，遠地点高度2万1400km，軌道傾斜角31度，軌道周期6時間20分という，実験や観測を行うのに必要な軌道を実現しました。そして2月24日から28日にかけて，本衛星の重要課題であった大型アンテナの展開実験を行い，有効開口径8mの主鏡面の展開，ならびに副反射鏡の伸展に成功しました。


有効開口径8mの展開アンテナを衛星本体に取り付けての振動試験。試験中にアンテナの状態を近接目視チェックする面々。

搭載した観測系機器の初めての電源投入は2月18日に行われ，VLBI観測システムとしての搭載観測系の基本的性能を順次確認した上で，3月24日，天体からの電波の初受信に成功しました。5月7日には「はるか」と地上電波望遠鏡との間の干渉実験に入り，5月13日，「はるか」と臼田(64mアンテナ)間で干渉縞の検出に成功しました。この成功により，「はるか」がスペースVLBI衛星として基本的な機能を満たしていること，臼田地上局，相関装置など地上系を含めてスペースVLBIのための基本システムが実現していることが確認されました。世界初のスペースVLBI衛星が誕生したのです。

射場で行った修復作業

それにつけても思い出されるのは，相模原での長期にわたる衛星総合試験を無事終了し，衛星を内之浦へ運んだ後のことです。射場での試験も順調に進み最終整備も終えて，衛星をロケットに引き渡す日の最後のチェックにおいて，太陽電池パドルを押さえているワイヤーのテンションが規定を若干外れて緩んでいることが発見されました。

予想もしないトラブルで，調査した結果，ワイヤー受け金具を取り付けている衛星ハニカムパネルの座に問題があることが判明しました。強度計算の見直しなど，関係者による懸命の検討の結果，ハニカム(ハチの巣)構造の一個一個に充填剤を充填し補強すれば問題ない，との結論に達しました。材料の手配，徹夜で行った充填作業など，厳しいトラブル修復作業でありましたが，何とか間に合い，打上げに臨みました。その頑張りは見事でした。

打上げ後，軌道に乗った衛星の太陽電池パドルが非可視のところで正常に展開したときのうれしかったこと。関係者の努力が実り，その処置が適切であったことが実証されました。また，この不具合を発見したこと自体が素晴らしいことです。最後まで衛星を慎重にチェックし，小さい問題点も見逃さなかった熟練技術者の目こそが，成功の鍵を握っているのだということの好例として，今後に受け継いでいかなければと考えています。

(いのうえ・こうざぶろう)

宇宙の人

18人目

宇宙の巨大な蛸

エイベル851銀河団

自然科学研究機構 国立天文台 光赤外研究部 助教授 児玉忠恭

銀河団とは，100個以上もの銀河が差し渡し500万光年程度の空間に群れる宇宙最大の天体であり，その美しい姿は我々の周りに広がる銀河宇宙への浪漫(ロマン)をかき立てる。エイベル851銀河団は，そんな天体の一つである。この銀河団は，1950年代に米国パロマー山天文台が，口径48インチの望遠鏡で行った大規模な銀河探査によって発見され，1958年発表のエイベル銀河団カタログの851番目に登場する。それから30年近く後になって，この銀河団が我々から43億光年の彼方にあることが分かった(Gunn et al., 1986)。銀河団から発せられる光が我々に届くまでに43億年かかるということは，宇宙の歴史130億年をおよそ3分の1さかのぼった，昔の銀河団の姿を我々は眺めていることになる。

エイベル851銀河団は，その後も銀河天文学者の格好の研究対象となり，数々のエポック・メイキングな成果とともに歩んできた。米国のハッブル宇宙望遠鏡は1992年から1994年にかけてこの銀河団を観測し，その驚異的な空間解像度で，このような遠方の銀河団として初めて，個々の銀河の形態を詳細に分類することに成功した(Dressler et al., 1994)。

近傍の宇宙では，銀河が混んでいない場所では我々の銀河系のような渦巻銀河の割合が多いが，銀河団のように銀河が密集したところでは赤い楕円の形をしたものが多く占めることが知られていた。この観測で，昔の銀河団においてもまったく同じ傾向が見られることが明らかになった。つまり，楕円銀河は銀河団のような密度の高い領域で，宇宙の比較的早い時代に生まれたことになる。

日本のすばる望遠鏡がこの銀河団を最初に観測したのは，その完成直後の1999年1月のことである。地上観測でありながら解像度0.45秒角を達成し，すばるの優れた撮像性能が最初に確かめられることになった(図1)。日本の天文学者にとっては縁起の良い，なじみ深い天体といえる。すばる望遠鏡が世界に誇る広視野カメラは，ほかの大型望遠鏡に比べて視野が1桁広く，満月に匹敵する30分角四方の天域を一度に写すことができる。この特長を活かして，2001年1月にエイベル851銀河団の本格的な観測が行われ，従来の研究対象であった中心部だけでなく，ずっと外側にまで至る広大な銀河団の全体像が，初めて我々の眼前に広がったのである。まるでナスカの地上絵を初めて上空から眺めたように。

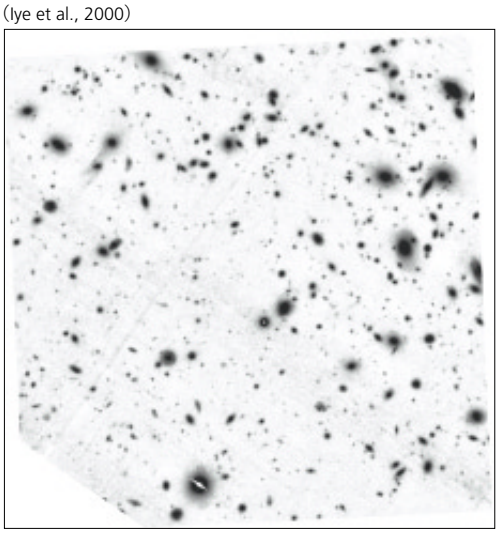
その結果……，この銀河団は蛸(タコ)だったのである(図2)。

中心には丸い巨大な銀河のかたまりがあり，そこから四方八方に多数の足が伸びていたのだ。足の長さは1000万光年以上にもなる。これらの足に沿って並んでいる銀河の小さなかたまり(銀河群)は，あたかも吸盤のようである。中心の丸い頭と多数の足は，どれも赤い銀河で彩られており，さながら「ゆで蛸」である。なぜこのような形をしているのだろうか? 宇宙初期に，密度のむらむらがひも状に成長し，その密なところで銀河が生まれる。そのため銀河は，蜘蛛(クモ)の巣のようなネットワーク状の構造に分布していると考えられている。蛸足は，まさにこのようなひも構造の一本一本に相当し，その交差点に銀河団があるのだ。銀河団はその強い重力で，周りの銀河集団をひも構造に沿って引きずり，飲み込みながら成長しているのだ。

すばる望遠鏡による遠方銀河団の探査は今も続いており(Kodama et al., 2005)，蛸だけではなく，海蛇(ウミヘビ)やヒトデなど，さまざまな魚介類が見つかっている。大漁，大漁! ちなみに，このプロジェクトは「魚プロジェクト」と呼ばれている(正式名はPanoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaruで，その頭文字を取ってPISCES，つまり魚座の意味)。これは，果たして偶然か??

(こだま・ただゆき)

図1 すばる望遠鏡で撮影したエイベル851銀河団の中心部（2.5分角）
(Iye et al., 2000)



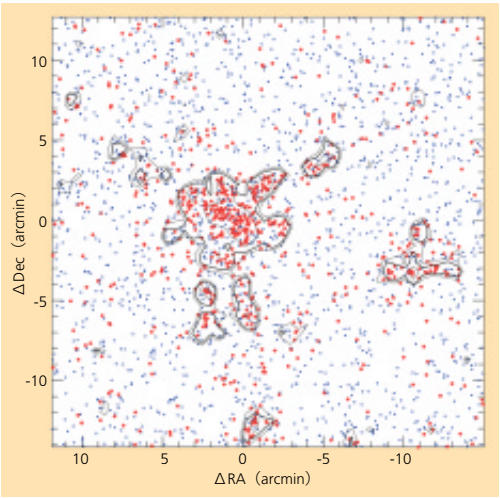


図2 すばる望遠鏡の広視野カメラで初めてとらえられた，エイベル851銀河団の全体像。一辺は27分角で，銀河団の距離ではおよそ3000万光年になる。赤い点は赤い銀河，青い点は青い銀河を表す。等高線は銀河の密度を表しており，中心の赤い銀河の大きなかたまりと，そこから四方八方に伸びる蛸足構造が見て取れる。(Kodama et al., 2001)

アメリカ・台湾出張記

固体惑星科学研究系助手
安部正真

3月は年度末の慌ただしい中，2回の海外出張があった。一つはアメリカ，一つは台湾である。

アメリカ出張は，先月号の「東奔西走」に出村さんが寄稿したヒューストンでのLPSC（月惑星科学会議）参加なので，ここであらためて詳しくは書かない。「はやぶさ」ミッションの科学的な成果を世界中にアピールできた，歴史的な1週間であった。

山道を登って鹿林天文台へ

その興奮と感動も冷めやらぬうち，翌週には天体観測のために台湾に出張した。観測は，台湾中部にある鹿林（ルーリン）天文台で行った。鹿林天文台へは，台湾北部の中正国際空港から車で5時間以上かけて移動する。台湾では国際免許証が使えないので，車の運転は天文台のアシスタントにお願いした。天文台は標高2862mにあり，最後の30分は車を降りて，自力で山道を登って，ようやくたどり着く。鹿林天文台の近くには，日本の富士山よりも標高が高い玉山（ユー）（標高3952m）があり，登山客が訪れるようなところである。

観測が終了した後，観測ドームから撮影した台湾・鹿林天文台周辺の夜明けの風景。雲海が朝焼けに照らされてきれいですが，この雲海が観測中に上がってくると観測ができなくなって困ります。

今回の観測ターゲットは，「はやぶさ」に続く次の小惑星探査の候補天体である。台湾の中央大學の研究者との共同研究で，鹿林天文台を年数回使わせていただいている。前回私が訪れたのは約1年前で，その際は20年ぶりの大雪に見舞われ，まともな観測ができなかったばかりか，最終日に山を降りることもできないという経験をした。今回の天候はまずまずで，目的の成果が得られ，大変有意義な出張であった。

テレビ電話のおかげで

最近は世界中どこへ行ってもインターネットにつなげる状況で，アメリカのホテルや学会会場はもちろん，台湾の山奥の観測所でも状況は同じである。出張中，アメリカでは日中は会議に出席し，夜中にホテルで日本とメールのやりとりを行う。一方，台湾では夜中は観測で起きているが，日中に日本とのメールのやりとりを行うので，常に睡眠不足である。

今回の出張では，初めて日本にいる家族とインターネットを用いて電話をしてみた。スカイプというツールをご存知の方も多いと思うが，最新版はビデオ画像も送信できるので，回線がそれなりに太ければCCDカメラを接続することで，無料でテレビ電話をかけることができる。今回，我が家のパソコンにもCCDカメラを取り付けて，出張先から何度かテレビ電話の試験を行った。月の半分以上も海外出張すると，家族の不満もそれなりに高まり，家庭不和の危機にさらされることになるのだが，今回はこのツールのおかげで，電話をかけると家族も喜んでくれた。皆さんも，お試しあれ。

台湾の楽しみ

最近の出張は時間的に余裕がないせいか，滞在中に観光的なことをする暇がないのだが，食事をとると海外に来たことを実感する。

アメリカではいつも食事に苦労をして，1週間もいると身体の調子がおかしくなるのだが，台湾ではそのようなことはない。同じアジアだということもあるが，台湾での食事は，何を食べてもおいしいと感じる。観測所では現地スタッフの人々が手料理をごちそうしてくれるので，いつも食事の時間が楽しみである。また今回，観測が終わって，台湾北部にある中央大學に戻る長時間の移動の途中，嘉義（チアイー）という町の食堂で昼食をとったのだが，ここで食べたどんぶり飯（魯肉飯（ルーローファン））とスープ（貢丸湯（コンワンタン））も非常においしかった。

アメリカと台湾の出張が重なって，どちらも同じ重要度だったとしたら，きっと私は台湾出張を選ぶでしょう。

（あべ・まさなお）

H-ⅡAロケット燃料充填完了

園田昭眞
宇宙基幹システム本部
鹿児島宇宙センター所長

種子島宇宙センターから今年の1月，2月にH-ⅡAロケット8，9号機が連続して打ち上げられたのは，記憶に新しいところです。さて，H-ⅡAロケットの燃料は，液体水素，液体酸素ですが，どのようにしてロケットに充填されるのでしょう。

種子島宇宙センターで使用する液体水素は，ほとんどが大分市の化学プラント工場で作られます。プラントで発生させた水素ガスを精製，液化し，種子島へは専用のタンクローリまたはコンテナで運びます。液体酸素は，霧島市（旧国分市）の工場で空気を材料として空気分離装置により酸素ガスを取り出し，液化します。種子島へは水素と同様，専用のタンクローリで運びます。

種子島宇宙センター内に貯蔵タンクを整備しており，液体水素および液体酸素をタンクローリから移します。貯蔵タンクには，燃料充填後の打上げ延期も考慮して，打上げ時に使用する約2倍の量を準備します。

それでは，いよいよ打上げ当日の燃料充填です。燃料充填作業は危険作業のため，ロケットから500m離れた発射管制棟（通称ブロックハウス；地下約12mに設置）から遠隔操作で行います。貯蔵タンクから機体のタンクへ，一気に充填はできません。その理由は，両燃料とも極低温状態（液体水素は－250℃，液体酸素は－180℃）であり，途中の地上配管でボイリング（沸騰）してしまい，機体のタンクまで液体が流れないからです。また，大量の液体を急激に流すとトラブルとなり，危険な状態になりかねません。

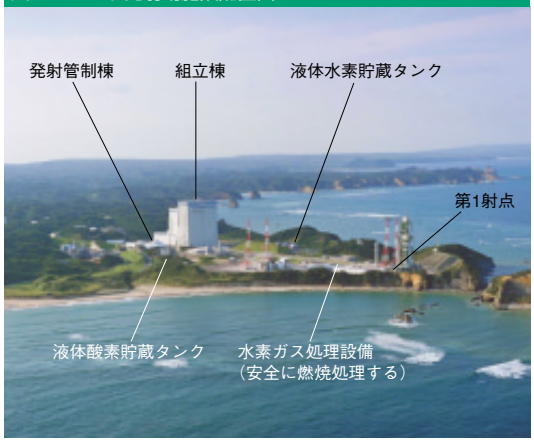
このため，設備の予冷作業から開始します。それぞれの常温の設備配管に少量の液体を流し，徐々に配管を冷やしていきます。機体タンクに近い設備側温度センサが液体水素，液体酸素温度まで低下したときが設備側の予冷終了です。配管内は，液体燃料で充満しています。この後，機体側の充填バルブを開いて，機体タンクへ液体を流し始めます。機体のタンクも当初は常温状態です。液体で徐々に冷やされ，液体水素，液体酸素温度になったときが，ロケットへの燃料充填のスタートです。

機体のタンクには，0%，5%，30%，70%，100%のポイントレベルセンサを設置し，燃料の充填量が分かるようになっています。0%センサ点灯が，機体タンクに燃料がたまり始めた合図です。100%センサ点灯まで充填を続け，点灯後も打上げまで補充填を行い，100%充填状態を維持します。100%センサが消灯の状態では，発射はできないシステムです。

0%センサは，もう一つ重要な役割を持っています。液体ロケットエンジンの点火後から徐々に燃料は消費され，最後に0%センサが消灯することになります。0%センサ消灯の信号が，ロケットエンジン停止の命令です。このため，0%センサは3個設置し，1個が誤作動を起こしても停止することがないように，2個以上のセンサが消灯したときに停止するシステムとしています。昨年の野口聡一宇宙飛行士が搭乗したスペースシャトル「ディスカバリー」の打上げ直前に燃料タンクセンサの異常が発見され大騒ぎになったのは，このセンサが同じ役割をしていたためです。

以上のようにH-ⅡAロケット打上げの場合，燃料充填は大変な作業です。ロケットへの最終充填量は，液体水素が1・2段合計約300キロリットル，液体酸素が合計約60キロリットルです。予冷，補充填などを含めて1回の打上げで使用する量は，液体水素が約450キロリットル，液体酸素が約170キロリットルです。貯蔵タンクと地上配管は真空二重断熱構造にし，また機体タンクへも断熱材を吹き付けて熱の進入を可能な限り抑えていますが，たくさんの水素，酸素が蒸発してしまいます。その金額は数千万円です。「燃料充填はお札が飛ぶ」の一席でした。（そのだ・しょうしん）

大型ロケット発射場施設配置図



燃料充填中のH-ⅡAロケット8号機

宇宙・夢・人

予想外の現象が面白い

JAXA技術参与
向井利典

むかい・としふみ。1943年，徳島県生まれ。工学博士。1968年，京都大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年，東京大学宇宙航空研究所助手。1981年，改組に伴い宇宙科学研究所惑星研究系助手。1993年，教授。日本のすべての磁気圏観測衛星，ハレー探査機に搭載されたプラズマ粒子観測の主任研究者を務める。2005年10月よりJAXA技術参与（統括チーフエンジニア）。

――宇宙にかかわるようになったきっかけは？

向井：私は工学部電子工学科の出身ですが，たまたま入った研究室が前田憲一教授という電離層研究の世界的権威のところだったんです。今では知っている人は少なくなりましたが，1957～58年の国際地球観測年にロケット観測をしようと糸川英夫先生に持ち掛けたのが前田先生です。私が大学院に入った1960年代後半，宇宙研の前身の東京大学宇宙航空研究所がロケットを打ち上げて，電離層の観測が盛んに行われていました。しかし，電離層のエネルギーの高い電子を観測する技術が，日本にはありませんでした。その計測装置の開発からやってみないかと言われて，自信はありませんでしたが，誰もやっていないなら，面白そうだからやってみようと思ったのです。

実験室でセンサーの開発を始めたのですが，最初は何一つうまくいきませんでした。やっと3年くらいたって，ロケットに観測装置を載せて電離層光電子のエネルギースペクトルを観測することに成功しました。やがて日本でも衛星による観測も始まり，たくさんの衛星にかかわるようになりました。

――最も印象に残っている衛星は？

向井：何といってもハレー彗星の観測を行った「すいせい」です。ハレー彗星に接近して計測したプラズマのデータを初めて見たときの感激は，今でも忘れられません。まったく予想外のよく分からないスペクトルがたくさん現れ，いったい何が起きているのだろうと想像をめぐらしました。やっぱりサイエンスは面白い。誰も見たことがないものを見る，その感激は格別です。ハレー彗星という76年に1回しか来ないチャンスに，世界的にも評価される観測ができた。そういう巡り合わせはラッキーだったという以外にないですね。

磁気圏のしっぽを観測する「ジオテイル」でも，最初に見たデータが印象に残っています。データの中に正体不明の点がポツポツと見え，それがシステマチックに変化していて，ノイズではないのは明らかでした。地球の上層大気から電離したイオンが流れてきていたのです。観測した場所は地球からかなり離れたところなので，そこまで電離層起源のイオンが流れくることは想定外でした。

衛星計画には，もちろん設定した目的がありますが，実際に観測を始めると，当初の目的以上の，予想外の姿を自然は必ず見せてくれる。それが面白いんです。

――現在は，統括チーフエンジニアとして，JAXAのすべてのプロジェクトに責任を持つ立場ですね。

向井：システムズ・エンジニアリング（SE）といいますが，ロケットや衛星システムをきちんとつくるためのプロセスや体制の整備を行っています。SEでは最初が肝心で，ミッション要求からシステムの機能分析・開発・試験・打上げ・運用を一気通貫で見通した計画を立て，個々の技術の成熟度やマージンの考慮，リスクの識別・低減を図っていくことが重要です。

ロケットや衛星に搭載した観測装置で，きちんとデータを取る成功率が，私は高い方でした。しかしどの計画でも100％成功ではなく，うまくいかない部分が必ずありました。モットーにしていたのは，何か不具合が起きても，最低限の成果は出すこと。そのため，開発の最初の段階からスケジュールやチェックリストをつくり，開発途上の試験で何か不具合などが現れるごとにチェックリストに加えていくようにしていました。そして打上げの前には，チェックリストを1回では危ないので3回，間を置いて点検していました。途中，ベターは求めず，確実を旨としていましたので，若いころは，石橋をたたいても渡らない，と言われたこともありましたね。

地上で何回も試験をしますが，たまたま1回だけ不具合の兆候が現れる場合があります。次に試験してもなかなか再現されない，そういうのが危ないんです。

――そういうノウハウや危険な兆候を見抜く目は，どうやったら身に付くのですか。

向井：私の場合，最初の3年間，何一つうまくいかなかった経験が大きいですね。毎日，実験室にこもっていましたが，問題が出てきては解決するという繰り返しです。その詳細をメモに残しました。失敗は成功の母といいますが，今の若い人たちは，すでにうまくいくようにできた装置を使ってデータが取れるという環境にいます。こういう環境では，本当のノウハウはつかめないかもしれません。

長年，私は宇宙で面白いことをたくさん経験し，楽しませてもらったので，これからはプロジェクトがうまくいくように，若い人たちの手助けをしていきたいと思っています。

ISASニュース No.302 2006.5 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

編集後記 新緑の候，目に優しい季節がやってきました。今年は花粉が少なく，大変助かりました。でも黄砂が飛んできたり，地震があったり，5月でも朝晩寒い日があったり，地球の気候が何かおかしくなっているように思います。どうぞ体調には十分に気を付けましょう。（久保田 孝）

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