



宇宙科学最前線

超薄膜型高々度気球(BU60-1号機)の気球頭部よりヘリウムガスを注入している様子。放球場の先端に観測装置を保持している大型放球装置がある。(撮影:新倉克比古)

高度50km以上を目指す
気球の研究

山上隆正

大気球観測センター教授

10kg程度の軽量観測器による科学観測を50km以上の高度で——。要望が出たのは1991年のことであった。高度50km到達はこれまで経験がなく、気球工学としてどのような研究・開発が必要かが話し合われた。この高度の達成にはシステム全体の見直しが必要で、気球本体はもちろんのこと、気球製作方式、気球頭部保持方式、放球方式、基本搭載機器の軽量化に至るすべてに対して、従来の利点を生かしつつ新しい発想の下に開発・研究を進めることになった。

高度50km以上まで飛翔させるための必要条件は、

- (1) 気球本体の自重をいかに軽くすることができるか
- (2) 気球飛翔環境に耐え得る大容積の気球を

高い品質管理の下で安定に製造することができるか

- (3) 気球に損傷を与えずに、保持することができるか
- (4) 大容積の薄膜型高々度気球を安全・確実に放球することができるか
- (5) 限られた搭載重量の中で、気球に搭載する基本搭載機器である送信機、テレメータ、コマンド、バラスト弁などの軽量化・小型化および低消費電力化が実現できるか、である。

(1)の実現は、ポリエチレンフィルムをいかに薄く、かつ気球飛翔環境である -80°C 以下でも伸びがあるポリエチレンフィルムを開発できるかにかかっている。(2)については、従来の長さ2m程度の電磁石圧着型熱接着機による気球製作では、十分な品質管理下での製造



図1 新型ベルトシーラ

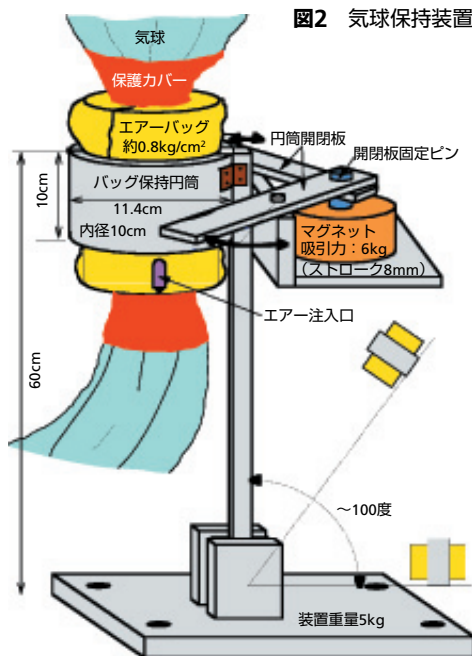


図2 気球保持装置

が困難である。それを解決するためには、工場の広狭にかかわらず高い品質管理下で連続した熱接着が安定してできる新しい接着機の開発が必要となる。(3)の問題では、大容積の気球になると総浮力が50kg以上となり、気球頭部を人の手で保持することが困難となる。人の手のひらと同じ感触で気球に損傷を与えることなく、気球頭部の保持ができる装置の開発が必要となる。(4)は、狭い三陸大気球観測所の飛揚場の拡張も視野に入れた、日本独特の放球方式の研究開発ができるかにかかっている。(5)に関しては、電池も含めた基本搭載機器の重量を全搭載重量の約1割、1kg程度に軽量化することを目指す。

以上5項目の研究開発を進めることによって、高度50km以上まで飛翔可能な薄膜型高度気球の開発が始まった。

気球製作用接着機の開発

1991年度は熱接着機の開発から研究を始めることとした。従来の日本における大気球製作は、長さ2mの電磁石圧着型熱接着機で行って

いた。この接着方式は取り扱いが簡単で、メートル単位の接着方式のため、限られた空間での接着には適しているが、散発的な接着方式であるため気球製作に時間を要し、長さ100mを超える大容積の気球製作に適した接着装置とはいえなかった。そこで、連続接着が可能で接着中でも任意の位置で停止・開始の機能を持ち、製作場所の広狭によらず、大きな気球を能率良く高い品質管理下で製作できる自走式新型ベルトシーラ接着機を開発した。開発した接着機は、接着温度を92～250℃に設定でき、温度精度は比例制御方式を用い、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下とした。接着圧力は0～2kg/cm²の範囲で設定でき、フィルム膜厚20～3μmまで幅広い接着が可能である。この接着機は0～6m/分の速度で連続熱接着が可能である。図1の新型ベルトシーラは特許も取得した気球製作用接着機で、高い品質管理下で気球製作が行えるようになった。

薄膜型気球保持装置の開発

気球容積が大きくなると総浮力も大きくなり、人の手による気球頭部保持は不可能になる。そのため、人間の手のひらを想定した気球頭部保持装置の開発が不可欠で、エアバッグを用いた気球保持装置を開発した。装置は図2に示す通り、気球保持用エアバッグ、エアバッグ固定保持円筒板、円筒板の解放用電磁石などで構成される。エアバッグに空気を注入し、総浮力に見合う圧力を加えることで気球を保持する。開発した装置は、フィルム厚3.4μmの気球でも皮膜に損傷を与えずに保持することができる。

大型放球装置の開発

開発した大型放球装置は、直径6mの回転テーブル上に固定され、回転により地上風の風向に合わせた放球ができる。観測器を置く4m×3mの台は昇降機により5mの高さまで観測器を持ち上げることで、5m/sまでの風速下でも放球ができる。図3に示す大型放球装置の完成によって、気球を完全に伸展した状態で放球することが可能となった。ダイナミック放球方式とほぼ同じ方式であるが、観測器を放球するランチャーが固定されており、飛揚場が狭い日本独特の放球方式が完成した。われわれは、この放球方式を「セミダイナミック放球方式」と呼んでいる。

基本搭載機器の軽量化

テレメータについてはシリアル出力型ADCを用いたPCMエンコーダ回路の開発、コマン

図3 大型放球装置



ドは符号の複数回一致方式を用いたPCMエンコーダおよびデコーダの開発、バラスト弁はソレノイドによる永久磁石の移動方式の開発などを行うことにより、基本搭載機器重量を1kg以下にすることに成功した。

3.4 μ m ポリエチレンフィルムの開発

インフレーション製造法で高活性チーグラ触媒を用いた方式では、5.6 μ m以下の厚さのフィルムを作ることができなかった。1995年ごろよりメタロセン触媒の研究が行われるようになり、われわれはこの触媒に着目し、1997年より超薄膜ポリエチレンの開発を始めた。従来のポリエチレンと比較して次のような特徴がある。

- (1) メタロセン触媒はコモノマー組成分布が均一であるため、低分子量高コモノマー成分が極めて少なく耐ブロッキング性に優れている。また高分子量低コモノマー成分が少ないため、低温シール性および透明性に優れている。
- (2) 分子量分布が狭いため、均一な成形加工ができる。
- (3) 均一なコモノマー分布と狭い分子量分布により、衝撃強度、各種機械的物性に優れている。

このような特徴を生かし、最終的に世界に先駆け厚み3.4 μ m、折径80cmの新ポリエチレンフィルムを開発することに成功したのが1998年暮れのことであった。開発したフィルムの機械的性能は、常温で破壊強度が400kg/cm²、伸びが500%であり、-80℃で破壊強度が650kg/cm²、伸びが200%と気球飛翔環境下で十分使用できる性能を有している。

1999年9月、この超薄膜フィルムで製作した容積1000m³の気球が高度37km到達に成功し、超薄膜型高々度気球誕生の記念すべき実験となった。薄膜型および超薄膜型気球大型化開発の経過を図4に示した。

2001年の晩秋までに、気球工学班で議論された研究・開発項目はすべて期待した良好な結果を得ることができた。そこで、2002年度に世界最高到達高度を目指した容積6万m³の超薄膜型高々度気球(BU60-1号機)を開発し、飛翔性能実験を行うことにした。

BU60-1号機の飛翔実験

開発したBU60-1号機は、自重34.37kg、長さ74.5m、直径53.7mであり、パラシュート・荷姿0.8kg、観測器4.6kgを含んだ総重量は39.77kgであった。観測器には、気球が膨張していく様

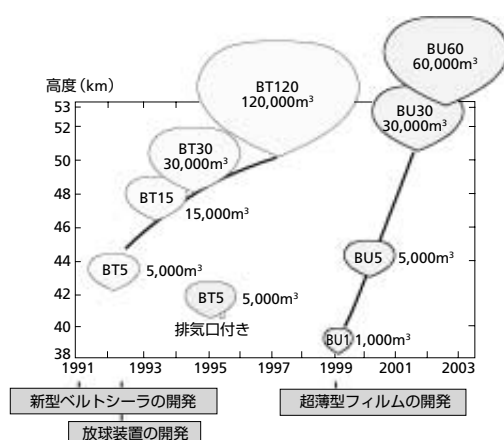


図4 高々度気球開発経過

子を撮影する2台の小型ITVカメラ、高度の計測にはソニー製のGPS受信機を搭載した。

BU60-1号機は、2002年5月23日6時35分に気球実験班および気球関係者の夢を乗せて三陸大気球観測所より放球された。放球方式は、開発した気球保持装置と大型放球装置を用いたセミダイナミック放球方式で行った。気球は毎分260mの上昇速度で正常に上昇し、10時7分に最高高度53.0kmに到達した。図5にGPSによる気球の高度曲線、図6に気球の満膨張の様子を示した。

「高度60km」を合い言葉に

世界に先駆け開発した厚さ3.4 μ mフィルムを用いた容積6万m³のBU60-1号機は、高度53.0kmに到達することに成功した。この高度は、1972年にアメリカにおいて容積135万m³の超大型気球で達成した高度51.8kmの世界記録を30年ぶりに更新するものであった。この成功は、フィルムの開発、気球製作用接着機の開発、気球保持装置の開発、気球放球装置の開発、セミダイナミック放球方式の開発および基本搭載機器の軽量化の研究が実を結んだものと考えている。

現在気球工学班は、「高度60km」を合い言葉に、気球材料であるレジンの研究、フィルム製造方法の改善を行っており、この夢も近い将来実現できるものと確信している。

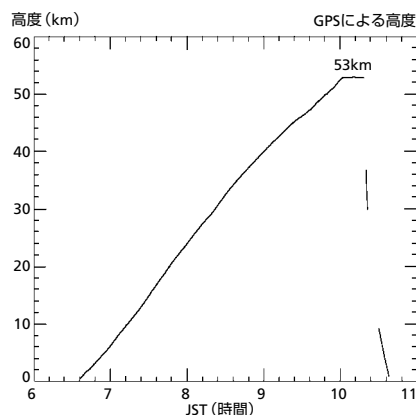


図5 BU60-1号機高度曲線

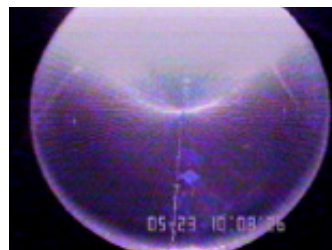


図6 満膨張の様子

宇宙科学研究本部の発足に際して

宇宙科学研究本部長 鶴田浩一郎

宇宙航空研究開発機構，JAXAの誕生

去る10月1日に、わが国の宇宙開発の中核機関として独立行政法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA；Japan Aerospace Exploration Agency）が発足した。文部科学省 宇宙科学研究所（ISAS）、独立行政法人 航空宇宙技術研究所（NAL）、特殊法人 宇宙開発事業団（NASDA）を1つに束ねた組織である。これら3つの機関はそれぞれ宇宙科学、宇宙航空技術、大型ロケットや実用衛星開発で30年以上の実績を誇っており、1つにまとまることで、現在考え得る最強の宇宙開発軍団が出現するはずである。事実、新しい機構の職員数は約1800人となり、数の上でも米国NASAの約1割、ヨーロッパのESAの約半分となる。その気になって頑張れば、たいていのことができる可能性のある組織が出現したわけである。

JAXAの活動は、理事長の下に置かれた4つの本部に分かれて行われる。ロケットの開発、打上げ、射場管理、衛星の追跡運用を一元的に担当する「宇宙基幹システム本部」、地球観測、通信・測位などの宇宙利用を主務とする「宇宙利用推進本部」、宇宙航空に関する先端・基盤技術の開発を担当する「総合技術研究本部」、宇宙科学の研究、大学院教育を担当する「宇宙科学研究本部」である。これら4本部の活動を円滑に進めるためにHQ（本社）が置かれ、共通の管理事務を行う。4本部制を実のあるものにするために、各本部の役割を明確にし、それに応じた作業や人の再配置が行われた。例えば、これまで宇宙科学研究所で行われていたM-Vロケットの開発や打ち上げを、宇宙開発事業団のH-IIAロケットと同様に宇宙基幹システム本部に移し、宇宙開発事業団で行われていた宇宙環境利用の「科学」部分を宇宙科学研究本部に移すといったことが行われた。



鶴田浩一郎 宇宙科学研究本部長。相模原キャンパスの正門には「宇宙科学研究本部」の看板が掲げられた。

宇宙科学研究本部に求められるもの

私たちが属する宇宙科学研究本部は、このような位置付けで誕生した。本務は「大学との共同等による宇宙科学に関する学術研究」である。宇宙科学研究所が全国大学共同利用機関であったように、宇宙科学研究本部も大学との協力を行う仕組みが作り込まれている。理事長の下に置かれる宇宙科学評議会と、本部長の下に置かれる宇宙科学運営協議会である。前者は大学の学長等の有識者で構成され、本部長の推薦などを行う。後者は約半数がJAXA外の研究者から成り、宇宙科学研究本部の「教育職」の選考などを行う。ここで教育職に「 」が付いているのは、独立行政法人の職員であるが、教育公務員に準じた職務規定と俸給表を適用した職員という意味である。これは、大学との人事交流を円滑にするために採用されたものであると同時に、現在200人近く在籍している大学院学生の教育にも好都合である。また、これまで宇宙科学研究の質の向上に寄与してきた宇宙理学委員会、宇宙工学委員会もほぼ同じ位置付けで継承される。この統合を準備した宇宙3機関統合準備会議で、注意深い制度設計がなされたおかげである。

宇宙科学研究本部の業務は、文部科学大臣から提示される中期目標に示された「研究者の自主性を尊重した独創性の高い宇宙科学研究」と「衛星等の飛翔体を用いた宇宙科学プロジェクトの推進」の2つである。前者は、研究者が個人あるいはグループを作って行う研究で、萌芽的な性格のものである。後者は、科学衛星プロジェクトに代表される研究で、衛星の開発からデータ解析、成果の公表までの一連の作業を含む活動である。これらは、宇宙科学研究所で行われてきた研究活動を大筋で踏襲したものとなっている。

過去2回の変革による大いなる発展

日本の宇宙科学の仕組みは、これまでに2回大きな変革を経験した。最初は1964年の東京大学宇宙航空研究所の設立である。これによって宇宙科学推進の中核が形成されると同時に、初の人工衛星「おおすみ」の成功と、それに続く科学衛星の打ち上げによって宇宙科学発展の道を開いた。東大宇宙航空研究所は1981年、全国大学共同利用の宇宙科学研究所に生まれ変わった。宇宙科学研究所は、ハレー彗星探査を機に開発された名機M-3SⅡ型ロケットによって「さきがけ」「すいせい」「ぎんが」「あけぼの」「ひてん」「ようこう」「あすか」を打ち上げ、国際舞台で高い評価を得ることになった。

この時期における宇宙科学研究所の成功の要因はいろいろ考えられようが、私は大方の意見と同様、以下のものではなかったかと考えている。第一は、「ロケットから衛星まで」の開発を1つの比較的小さな組織で一貫して行うことにあった。この過程で理学研究者と工学研究者の緊密な連携が生まれ、製造メーカーとの間にも目的を共有する連帯が生まれていった。また、M-3SⅡ型ロケットで打ち上げられる衛星のサイズが、このような開発体制にマッチしていたともいえる。第二は、全国大学共同利用制度の採用である。大学の研究者が科学衛星プロジェクトに主体的に参加することにより、実質的なプロジェクト推進グループの規模は5倍から10倍に膨れ上がり、プロジェクトの推進力と活気のもととなっていた。

融合のエネルギーを活力に

今回の3機関統合は、先の2回の変革に比してはるかに大きな変化を、宇宙科学研究にもたらすことになるだろう。変化のエネルギーは、3機関がこれまで培ってきた研究方法、開発方法などの「文化」の違いである。大げさに言えば「異文化との融合」エネルギーである。私のささやかな経験の中に、統合前に宇宙開発事業団と宇宙科学研究所の間で始めた、大型の月探査計画SELENEプロジェクトがある。このプロジェクトは、異文化を小出しにしながら、融合のエネルギーを活力に転化しつつ進んできた。今後は、大規模にこれが起きるだろう。「融合」エネルギーの制御と有効利用の方法を学ぶ必要がある。

統合がもたらすもう一つの側面は「規模のメリット」であろう。冒頭にも述べたように、新しい機構は宇宙航空のあらゆる分野の専門家を擁するわが国最大のテクノ集団を形成する。このテクノ集団が力量を上げていくことは、宇宙科学研究本部が行う科学衛星の能力アップにとっても極めて重要である。また、宇宙科学が要求するややエキセントリックな技術要求は、技術開発の刺激ともなる。間違っても狭いセクショナリズムに陥って「規模のデメリット」にならないよう注意が肝要だ。



JAXAの
パンフレット

宇宙科学に第三の飛躍を

先にも述べたように、わが国の宇宙科学が経験した2回の組織変革は、宇宙科学に大きな飛躍をもたらした。1981年の宇宙科学研究所発足から今年で22年になる。M-3SⅡ型ロケットに引き続き、惑星探査まで視野に入れたM-Vがすでに実用化されている。宇宙科学の研究分野も当時のX線天文学、太陽物理学、地球物理学の3分野から、今では赤外線天文学、電波天文学、惑星科学、宇宙環境利用科学などを含む広い範囲の研究分野が、宇宙へのアクセスを求めている。年に一度の打ち上げでは、需要を賄いきれなくなりつつある。また、高度化する観測技術、探査技術もより広範なテクノ集団を必要とするようになってきた。そろそろ、組織変革を必要とする時期が近づいていたのかもしれない。今回の3機関統合が宇宙科学に第三の飛躍をもたらす契機となり、JAXAの強固な組織に支えられた宇宙科学研究本部が、世界の宇宙科学研究のメッカとして活気に満ちた研究の場であり続けることを願って、拙文を終わりたい。

ロケット・衛星関係の作業スケジュール（10月・11月）

	10月			11月		
相模原	LUNAR-A 母船—ベネトレータ 噛合せ試験 中旬			M-V-2 簡易モーションテーブル試験 23 14		
				S-310-33 噛合せ試験 11 26		
	ASTRO-EⅡ 1次噛合せ試験					
能代	再使用型ロケット離着陸実験 14 28					

宇宙科学の新たな推進体制

宇宙科学研究本部の新組織紹介

宇宙科学研究本部科学推進部長

中島 節夫

10月1日、大学共同利用機関として親しまれてきた宇宙科学研究所は、宇宙関係のほかの2機関（宇宙開発事業団、航空宇宙技術研究所）と統合され、新たに独立行政法人 宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency；JAXA）として発足した。また従来、宇宙科学研究所が担ってきた「宇宙科学に関する学術研究および大学院教育を核とする高度な研究人材養成」の機能は、「宇宙科学研究本部」という新組織に改編の上、相模原キャンパスに展開することとなった。

さらに、円滑な統合効果を発揮していく観点から、これまで宇宙科学研究所の附属施設であった鹿児島宇宙空間観測所（内之浦）と臼田宇宙空間観測所は新機構の「宇宙基幹システム本部」へ、能代ロケット実験場は同じく「総合技術研究本部」へそれぞれ所属替えとなった。

JAXAの組織概要

JAXAの組織概要を俯瞰してみる（図1）。

まず、理事長の経営・管理を支えるHQ（本社）機能として、「経営企画部」「産学官連携部」「広報部」「評価・監査室」「総務部」「人事部」「財務部」「契約部」「国際部」「セキュリティ統括室」などがある。また、機構の基幹的な研究開発などの中核的業務を行う組織として、「宇宙基

幹システム本部」（ロケット・宇宙ステーションの開発・運用、追跡、衛星試験などを担当）、「宇宙利用推進本部」（通信・測位、地球環境観測などのプログラム取りまとめ、利用促進などを担当）、「総合技術研究本部」（先端的・基盤的技術研究、航空科学技術などを担当）、「宇宙科学研究本部」（宇宙科学研究、大学院教育などを担当）の4本部が置かれている。さらに、これらの研究開発業務に関して共通的な支援業務を行うものとして、「安全・信頼性管理部」「情報化推進部」「施設設備部」「周波数管理室」が置かれている。

宇宙科学研究本部の組織編成

次に、宇宙科学研究本部の組織編成について概観してみる（図2）。

宇宙科学研究本部の使命は、従来の大学共同利用システムを継承し、大学との共同などによる宇宙科学に関する学術研究や大学の要請に応じた大学院教育への協力とともに、科学衛星をはじめとする各種宇宙科学プロジェクト推進などを行うことである。宇宙科学研究本部長は、このような重要な業務の総括責任者であることから、JAXAの理事として任命されている。

大学共同利用システムを具体的に組織に反映するもの

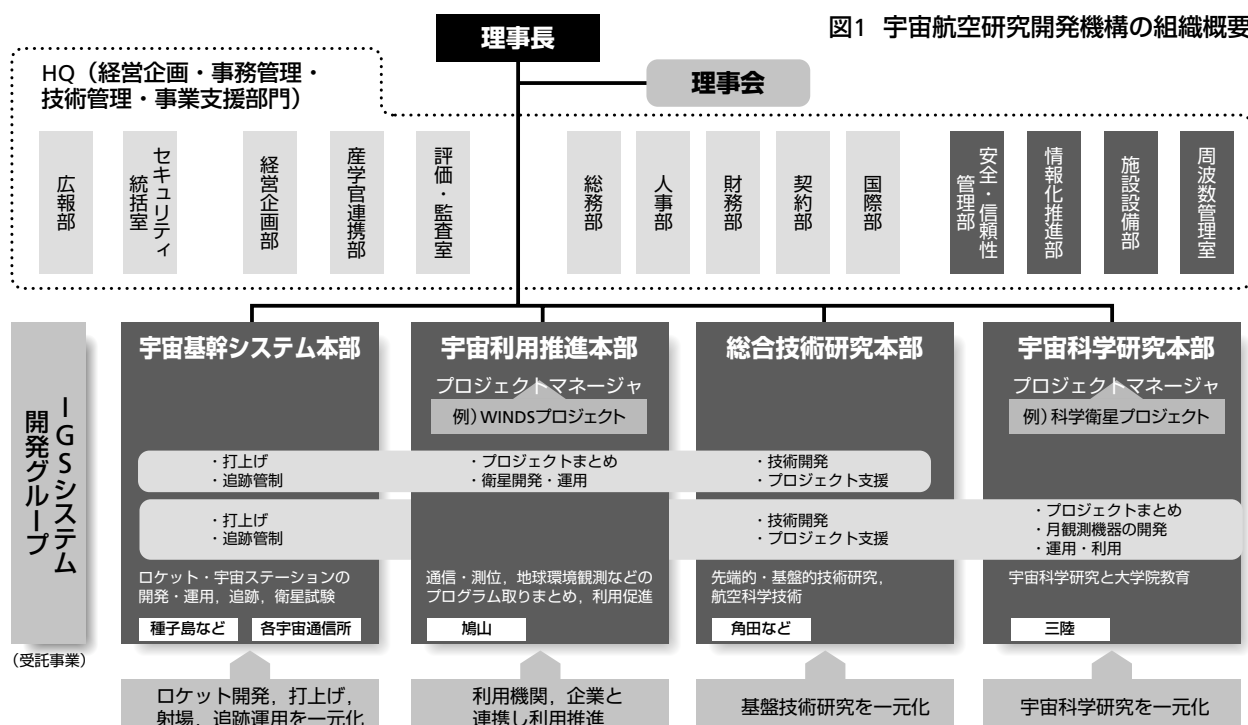
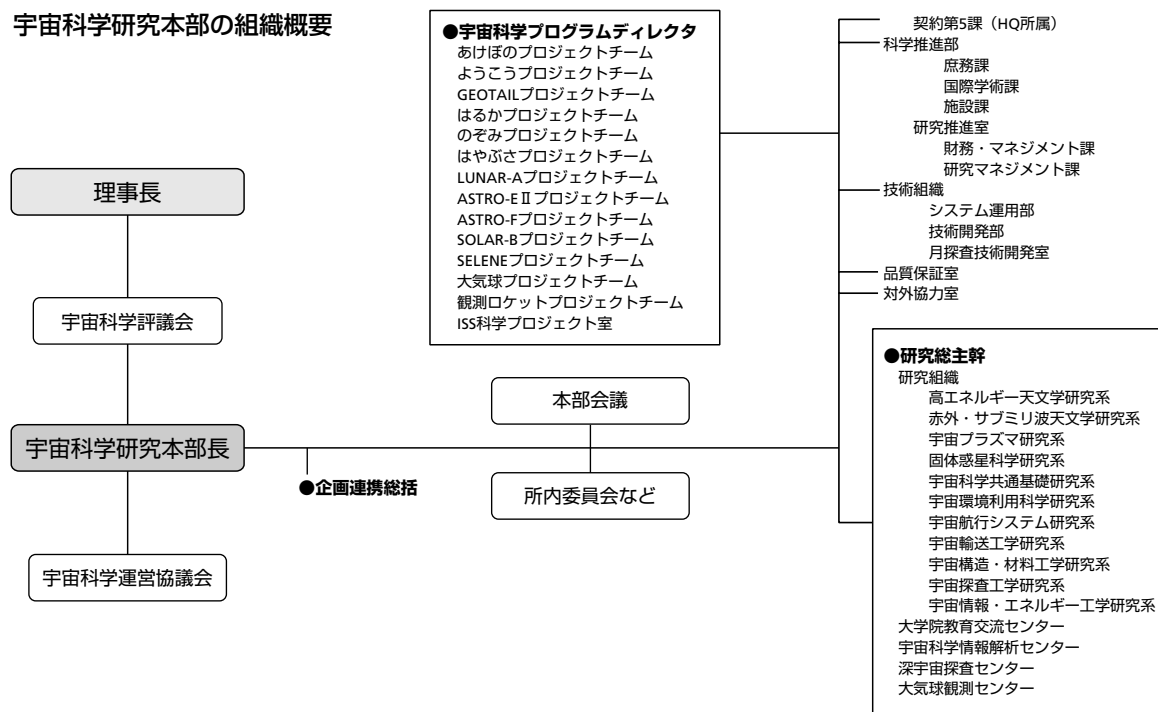


図2 宇宙科学研究本部の組織概要



として、従来、大学共同利用機関として有していた評議員会と運営協議員会の機能を継承して、理事長の下に「宇宙科学評議会」（宇宙科学研究本部長の候補者を選考し、理事長に推薦〔当該推薦に当たっては、宇宙科学運営協議会の意見を聞くものとされている〕するとともに、必要に応じ、宇宙科学関連業務に関して助言が、また本部長の下には「宇宙科学運営協議会」（当該本部に所属する科学研究および教育を行う研究者の候補者の選考、および宇宙科学関連業務に関する重要事項について本部長の諮問に応じる）が置かれている。

本部長の補佐体制としては、従来置かれていた企画調整主幹に替えて、次のような職務内容を有する「企画連携総括」「研究総主幹」「宇宙科学プログラムディレクタ」の3名を配置し、機能的かつ迅速・的確な対応を図ることとしている。

- ・企画連携総括……本部長を補佐し、その命を受け、本部における企画および機構内の連携を推進する。
- ・研究総主幹……本部長を補佐し、その命を受け、研究系・大学院教育交流センターなどの指導、研究業務などの取りまとめを行う。
- ・宇宙科学プログラムディレクタ……本部長を補佐し、その命を受け、宇宙科学プログラムに関する業務を総括する。

これらの補佐体制は、その具体的内容にかんがみ、いずれのポストも教授が併任することとしている。

次に、本部における共通業務支援などを行う「科学推進部」の体制について概観する。科学推進部は、単なる事務管理部門という位置付けでなく、本部予算の配算・資金計画管理、中期計画などの取りまとめ、産学官連携、共同利用研究、その他業務全般に関して、HQと緊密に連携しつつ本部業務の取りまとめを行うものである。そ

の構成としては「庶務課」「国際学術課」「施設課」という業務全般の共通統括的部分と、「研究推進室」の「財務・マネジメント課」「研究マネジメント課」のように、中期経営計画、予算・資金管理、予算執行管理や共同利用、共同研究・受託研究、産学官連携という中核的業務の取りまとめの部分から成っている。

なお、契約関係については、機構全体を通じて一元的に対応する必要があることから、HQの「契約部」に所属する「契約第5課」が、宇宙科学研究本部の所在する相模原キャンパスに在勤するという形態を採っている。

技術系の支援部局は、従来、観測部、技術部として位置付けられていたが、月探査にかかわる技術開発部分も加え、新たに「システム運用部」「技術開発部」「月探査技術開発室」として再編された。

その他、機構全体を通じて大学院教育を推進する観点から「大学院教育交流センター」を新設するとともに、名称・内容などを見直して、「宇宙科学情報解析センター」「深宇宙探査センター」「大気球観測センター」などを設置した。

以上、宇宙科学研究本部の新組織を概説してきた。従来、独立機関として存在していたときと比べて異なるのは、内外にわたるインターフェースがアウトソーシングされ、さまざまな制約条件下で十分とはいえないが、曲がりなりにも本来業務の重点化がより図られる体制となった点である。古来から「天の時は地の利にしかず、地の利は人の和にしかず」との名言があるが、まさに「生き生きとして躍動する職員のエネルギーをいかに総合化・統合化するか」が新機関の試金石となろう(宇宙科学研究本部の英文名称は、従来と同じISASですので、関係者の皆様、今後ともよろしくお願い致します)。

セルシウスの
温度計

リンネが暮らしたウプサラの町へ

7月下旬、スウェーデンのストックホルム大学で開かれた「第23回 光・電子・原子衝突国際会議」に参加してきた。この会議は1年おきに開催されており、原子物理・原子衝突の分野で最も規模が大きい。今回も48の国と地域から710名が参加し、90件の講演と1000件を超えるポスター発表が行われた。本会議の前後には、6つの衛星会議が、近隣諸国およびバルト海上で開かれている。新しい話題から刺激を受けるとともに、分野を全体的に眺める良い機会であった。

この会議では伝統的に、1週間の会期の途中で週末を挟むように日程が組まれている。参加者は、土曜と日曜の2日間、自由に行動することになる。私は土曜日、ストックホルム中央駅から急行

電車に乗ってウプサラに遊びに行った。ウプサラは、1477年創立の北欧で最古の大学を中心とする落ち着いた町だ。古くは植物学者のリンネで有名である。現代においてもノーベル賞受賞者を7名輩出しているそうだ。そういう歴史を体感したいと思った。

駅を出て、にぎやかな広場を通り抜け、川を渡って歩いていくと、2本の尖塔が印象的なゴシック様式の大聖堂がそびえている。ここは13世紀以来、スウェーデン大司教の本拠であり、国王の戴冠式が行われていた。大聖堂の正面に向かい合うように、不思議な建造物がある。左右対称な建物の中央部分にキューポラを載せ、さらにその屋根の頂点に球形の飾りが付いている。ここが目当てにしていた、グスタヴィアムと呼ばれる博物館だ。もともとは17世紀に建てられた校舎であったが、今は改装されて大学博物館になっている。

3階の一角に、18世紀から19世紀にかけての物理の実験装置が展示されていた。検電器やブリズムを使った分光器といった、理科の実験室にあるようなものだが、当時の最先端の装置だった。

教科書で学ぶ光や電気・磁気の理論が、本当にこういう器具を工夫しながら形作られてきたのだと思うと、感慨深い。

温度計の変遷

温度計の変遷

片隅の展示ケースに、さりげなく温度計が置いてあった。目盛りを振った木の板に水銀柱が取り付けてあり、今日でも見かけるレトロな寒暖計のスタイルだ。これは、天文学の教授だったセルシウス(1701-44)が作った温度計である。例えば、「気温が10度を下回って寒い」というように、私たちが普段使う温度(℃)はセルシウス(中国語では音訳して摂厘修, つまり摂氏)が導入したものであり、この温度計に基づいている。

ものの本によると、温度計を最初に考案したのは、ガリレイとその友人のサグレドらしい。倒立したバルブ内の液体(水かワイン)の高さ(つまり蒸気圧)を見て温度を測ったと言われている。その後、いろいろなタイプの温度計が工夫されたが、精度が不十分なことと、目盛りに客観性を欠いていたために、正確な測定を行うには無理があった。この欠点を克服したのが、北ドイツに生まれ、商人としてオランダに渡ったファーレンハイト(中国語では華倫海, つまり華氏)である。彼は、広い温度範囲で液体である水銀に注目し、その熱膨張を利用した温度計を作った。オランダでは以前からガラス器具の技術が発達していた。彼はその技術を身につけ、気象機器の製作を仕事としていたため、気圧計の水銀柱の高さが温度に左右されることを知っていたらしい。彼はさらに、「水と氷と塩化アンモニウムの混合物から得られる、最も厳しい寒冷」の温度を0度とし、氷点を32度とする目盛り(華氏温度, °F)を定めた。

沸点0度、氷点100度の温度計

しかし、この目盛りでは、もっと高い温度を正しく測れない。水の氷点を0度、沸点を100度とするアイデアは以前からあったようだが、それを実現するのは容易でなかった。沸点が気圧によって変化するからである。セルシウスは、水銀気圧計を使って、気圧を測定しながら沸点を定めた。それによって、誰がどこで作っても、温度計が同じ温度を示すように目盛りを振ることができたのである。

博物館の土産売りに、この温度計の絵はがきがあった。買って来た絵はがきをよく見ると、板の上の方に0という数字が見える。つまり、セルシウス自身は、沸点を0度、氷点を100度としていたようだ。これを現在のように逆にしたのはリンネだったらしい。セルシウスは、「90度を超えて寒い」と言っていたのだろうか。



ウプサラ大学グスタヴィアム博物館
©Museum Gustavianum



宇宙研とNASAが対等に

1992年に打ち上げられたGEOTAIL衛星は、現在も磁気圏物理学の分野で大活躍している。GEOTAIL計画は、宇宙科学研究所とNASAがほぼ同規模の予算を投入した大型の国際協力プロジェクトである。今年2003年は、この計画の構想がまとまった1983年からちょうど20年目に当たる。

磁気圏の構造や活動を支配するのは太陽風である。1978年ごろから地球周辺の宇宙空間に衛星ネットワークを張り巡らせて磁気圏物理の研究を前進させようという気運が高まり、アメリカの研究者を中心にOPEN計画の立案が始められた。OPENはOrigin of Plasmas in the Earth's Neighborhoodの略である。私も企画委員会のメンバーであったが、立案に参加しているうちに、宇宙研も同じ時期に科学衛星を打ち上げてこの計画に自主的な立場から参加すべきだと思うようになった。理由の一つは、原案では磁気圏の主要な領域が十分にカバーされず、“重要な問題”を解く鍵が得られないおそれがあるということであり、もう一つは宇宙研がNASAのOPENと対等に取り組む力を獲得しつつあるということであった。ハレー彗星探査計画が走り出し、ロケット、衛星、通信など、さまざまな面で飛躍的に発展しつつあった時期である。

GEOTAIL計画誕生まで

“重要な問題”とは、磁気圏尾部で起きる磁力線リコネクションのことである。磁力線リコネクションは磁場に蓄えられたエネルギーを開放してプラズマを加速する過程で、磁気圏ダイナミクスの要の役割を果たすメカニズムである。それにもかかわらず、OPENの原案には、リコネクションが爆発的に発生する地球から20ないし30Re (Reは地球の半径)の尾

GEOTAIL計画 の構想から20年

西田篤弘

元・宇宙科学研究所長

部領域を観測できる衛星が含まれていなかった。そこで、宇宙観測専門委員会のもとにOPEN-J研究班を設け、 20×7 Re、 $i = 0^\circ$ 軌道での実験計画を作った(1980年、1981年に改定)。輸送系の先生方には当時開発中のM-3S II ロケットに新規のKM-Pを加えて $20 \text{ Re} \times 1000 \text{ km}$ 、 $i = 0^\circ$ の軌道に170kgを投入する案をベースに、衛星重量を250kgに増すことに向けて検討をお願いしていた。

ところが、1983年初めにNASAのOPEN担当者から、OPEN衛星の一つであるEMLをOPEN-Jに置き換えてスペースシャトルで打ち上げるという提案がもたらされた。NASAがスペースシャトルで打ち上げるというのであれば、ロケット開発経費が節約できるだけでなく衛星を大型化することができる。しかし、EMLは放射線帯観測を主目的とする衛星であって高度も数Re程度でしかなく、OPEN-Jの目的を果たすことはできない。その年の5月に来所したOPEN担当者代表はこの不整合に弾力的に対応し、EMLでなくGTL(磁気圏尾部の遠隔領域を探索する衛星)との置き換えも考慮することを

約束した。その背景には、OPEN提案がNASAで行き詰まっていたということがあつた。彼らは4基の衛星を打ち上げる計画を作っていたのであるが、これには約800億円を要するため、OSSA(科学・応用部)部長から、国際協力によって経費を分散することがOPEN計画実現のための必要条件だと告げられていたのである。OPEN代表は9月に再び来所し、GTLとOPEN-Jを統合して新たな衛星計画を作ること、この衛星の軌道は2段階に分け、最初はGTL的な遠隔尾部観測衛星とし、その後軌道を低くしてOPEN-J的な近尾部観測を行うことで合意した。こうしてGEOTAIL計画が生まれたのである。同時にOPEN計画は再編成されてISTP(International Solar Terrestrial Physics)計画となり、ESAも参加した。

この動きには、さらに深い背景もあった。宇宙開発における国際協力が1982年のヴェルサイユ・サミットで取り上げられ、1983年のウイリアムスバーグ・サミットで報告が行われることになっていたが、具体案の策定に当たるワーキング・グループの一つとして太陽地球系科学を含む太陽系探査ワーキング・グループが作られていた。国際政治のひのき舞台まで借りて大きな仕掛けをこしらえた策士がいたようである。

難題を乗り越えて

GEOTAIL計画が日米共同計画として滑り出したばかりの1987年にChallenger事故が起き、打上げがシャトルからデルタIIロケットに変更された。不測の事態であったが、発足直後だったために大きな支障もなく計画を改定することができた。

発足時には予想できなかった難題は、協力協定の「損害賠償請求権相互放棄」条項で日米両政府が真っ向から対立したことである。GEOTAIL計画だけでなくこれに続くSFU計画でも、当時の文部省に多大なご苦勞をおかけした案件だったので、今月から発足した宇宙航空研究開発機構の業務方法書に「宇宙の開発および利用に関する条約その他の国際約束をわが国が誠実に履行するために機構が講ずる措置」が明記されているのを見て感慨深かった。



1983年5月に来所したNASAのOPEN担当者代表。左から、Sizemore氏、Wiskerchen氏、Alexander氏。

金星雷論争

地球における雷放電

地球全体で発生する雷放電は、平均すると1秒間に40回から100回程度といわれる。このうちの多くは雲内あるいは雲間での現象であるが、雲地上間で起きるのが落雷である。非線形的な破壊現象である雷放電は、個々の現象は大変複雑でメカニズムの解明は容易でない。しかしながら、積乱雲全体や地域ごと、世界全体で見たときの、ある程度統計的な振る舞いは、大気の活動を示す一つの指標として非常に有効であることが分かってきた。

例えば、地球全体の雷放電活動はELF電波や大気鉛直電場の観測などから見積もられるが、それが地球平均気温の変動や衛星から観測された水蒸気量と、高い相関のあることが示されている。また、雷放電データの長時間分解能を活かした、積乱雲の中での潜熱輸送量推定や、集中豪雨を直前に予測する手段としても検討に値する。最近では全球雷放電活動に顕著な太陽自転と一致する周期が発見され、太陽活動と地球大気変動の関係を示唆するものとして注目を集めている。一方、大気組成への影響という点でも、対流圏におけるNO_x生成量の2~8割が雷放電に起因するともいわれている。また、落雷は雷雲地上間の電流を担っているが、雷雲上空の電流は電離圏、さらには磁気圏へとつながっている可能性(グローバルサーキットモデル)も指摘されてきており、磁気圏物理という観点からも興味深い現象である。この10年余りは、落雷時の雷雲上空発光現象(スプライト、エルプスなど)が、大気電気と中層・超高層大気を結合するものとして、研究が盛んである。

金星における雷放電現象はあるのか

雷放電の持つこうした特色は、地球だけでなく、他の惑星の大気・プラズマ現象の研究にとっても有効なデータとなることを期待させる。もし、周回衛星から雷放電発光の分布を時々刻々観測する

ことが可能になれば、惑星大気活動の時間空間変動モニターとして力を発揮するだろう。特に巨大な惑星面発光は、地上望遠鏡から検出することも可能かもしれない。

これまでに、地球以外で確実に雷放電発光が観測されているのは木星である。ガリレオ探査機によって得られた画像からは、高い積乱雲の近傍で活発な雷放電発光が確認されており、地球同様、大気の運動との強い関係をうかがい知ることができる。また、木星では、エチレンなどの一部の気体分子は雷放電によって作り出されたとする説もあり、化学的效果も無視できない。

金星における雷放電現象については、その有無をめぐって20年以上も論争が続いている。電波観測では、旧ソ連のベネラ11号と12号の着陸機や、米国のパイオニアビーナス周回衛星、ガリレオ探査機が、雷放電が起源と思われる電波をとらえている。光学観測では、ベネラ9号に搭載された測定器が、70秒間にわたり、初めて雷発光らしい現象を検出した。またアリゾナ大学は地上望遠鏡と高速CCDカメラによる観測を試み、3時間のうちに6~7個の雷放電の発光を撮像したと報告している(図参照)。

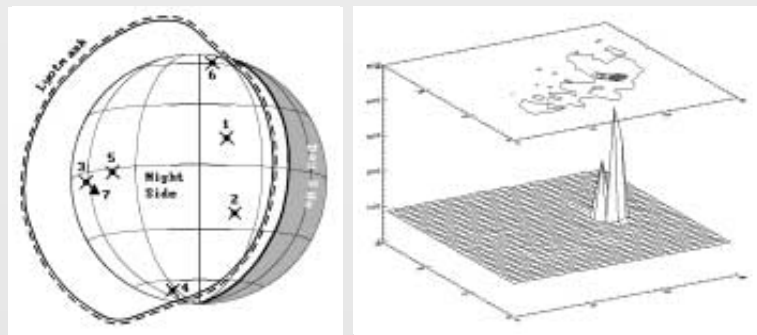
このように多くの観測が雷放電の存在を強く示唆しているにもかかわらず、論争に決着はついていない。電波観測は、雷放電による電波と電氣的なノイズや他のプラズマ波動現象との区別が難しいといわれており、光学観測では計測器が感度などの面で雷放電発光に対応しておらず、また観測領域が極めて狭いことから、雷放電の存在に懐疑的な結果もあるためである。発生機構については、高温で乾いた金星大気中では、地球の雷のような氷晶とあられによる電荷分離プロセス起きないという意見もある。しかし、たとえ水はなくても、硫酸の雲粒が電荷分離を引き起こしている可能性は十分ある。雷放電発生高度の観測的な手掛かりはほとんどないが、金星地表付近は気圧が高いため絶縁破壊しにくく、また雲底高度が45kmと地球に比べて高いことから、地球のような雲地表間の落雷は考えにくい。むしろ、スプライトのように、雲から高度100kmぐらいにある電離層に向かう方が容易かもしれない。

長年の論争に終止符を

Venus Climate Orbiter (Planet-C)では、雷放電の動かぬ証拠をつかんで長年の論争に終止符を打ち、さらには有効な大気活動のモニターの一つとなるべく、惑星探査機としては世界で初めて、雷放電発光専用の高速サンプリングセンサの搭載を検討している。同時に、最近の超高速CCDカメラを利用した、地上望遠鏡観測も準備が進められている。一方地球においても、静止軌道衛星に雷放電発光センサを載せることができれば、世界初の試みとして成果が目されるだろう。

アリゾナ大学によって地上から観測された金星雷放電発光の位置。右はCCD画像の3次元表示で、鋭いピークが雷放電発光。

<http://www.lpl.arizona.edu/~hansell/lightning/poster.html>より
(Hansell, S., et al., Icarus, 117, 345-351, 1995.)



浩三郎の 科学衛星秘話



「じきけん」



井上浩三郎

「じきけん」の観測は、先端間60mの長いアンテナが長時間の微動の結果疲労し、欠損した時点が終結点となりました。この間、初めて磁気圏まで衛星が飛翔し、直接探査して多くの観測成果を挙げることができました。

この成果の詳細については述べませんが、報告されたものから主なものを挙げると、

- (1) サウンダーによるプラズマ観測
- (2) オーロラキロメートル電波の観測
- (3) プラズマポーズ付近の諸現象の明確化
- (4) プラズマ圏の波動粒子相互作用を実証的に解明

などが代表的な観測成果です。

毎日連続8時間の長時間受信で 生まれた「トラッキング数え歌」

「じきけん」が長楕円軌道のため、トラッキングチームは今までにない長時間受信を毎日続ける、かなりきつい運用になりました。毎日受信されるペンレコーダ記録とアナログテープ記録によるデータは見る見る増えて、その整理と処理で大変でした。コンピュータで記録し、処理される今では考えられないこ



丹精込めて作りあげた衛星を囲む「じきけん」チームの面々



衛星主任を務められた大林先生

第6号科学衛星「じきけん」

その2

とです。当時はメーカーの方も一緒に実験場に泊まり込んでの作業でしたが、長い1日が終わると、次の日に備えるアフターの盛り上がりは大変なものでした。そのとき生まれた歌に「トラッキング数え歌」があります。10番までありますが、その一部を紹介します。

「トラッキング数え歌」

レボ1 や～レボ1 や～
北極回って内之浦～内之浦
教授も喜ぶ一回り～一回り

レボ2 や～レボ2 や～
にここ受けるは追跡班～追跡班
これから始まる祝賀会～祝賀会

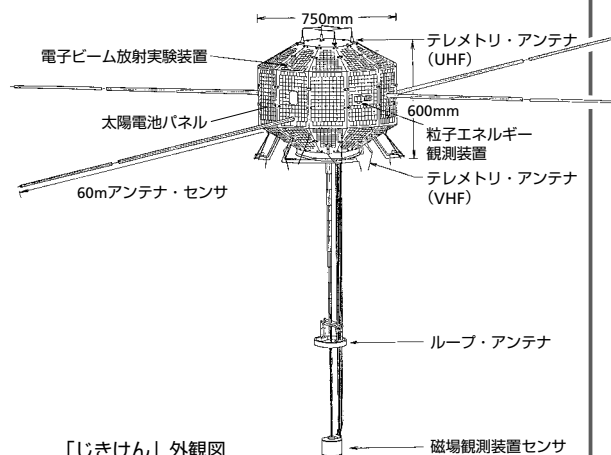
レボ3 や～レボ3 や～
さんざん苦勞して打ち上げた～打ち上げた
これからたのむぞ よかデータ～よかデータ

レボ4 や～レボ4 や～
4人でできるは麻雀や～麻雀や
4人でできないトラッキング～トラッキング

……中略……

レボ9 や～レボ9 や～
くるくる変わるは平尾ちゃん～平尾ちゃん
おかげでこまるはコマンドマン～
コマンドマン

(注) レボとはRevolution (周回) の略。この歌は、「ぎょっこう」「じきけん」をトラッキング中に生まれたものと思われます。休まず回ってくる衛星を追跡した当時の追跡班の心情が伝わってきます。平尾ちゃんとは恐れ多くも平尾邦雄教授 (現・名誉教授) のことです。



「じきけん」外観図

だからサイエンスは面白い！

高エネルギー天文学研究系教授

高橋忠幸

——巨大ブラックホールの周りなど宇宙の高エネルギー現象から発生するX線やガンマ線の観測をされているそうですね。

高橋：現在は、2005年に打上げ予定のX線天文衛星ASTRO-E IIや将来の科学衛星に搭載するガンマ線や硬X線（波長の短いX線）の検出器を開発しています。新しい観測技術を使って宇宙を見ると、今まで思ってもみなかった現象がいろいろと見つかる。そこが宇宙観測の面白いところです。ガンマ線はそもそも天体から届く量も少なく、波長が短いので物質を突き抜けてしまうので、検出することがとても難しい。ガンマ線での宇宙観測は未開の分野です。新しい原理に基づく感度の高い検出器を開発して、ガンマ線観測で世界の先陣を切りたいと思っています。

もともと私は加速器による素粒子実験をしていました。その後、素粒子実験の技術を使ってガンマ線検出器を開発し、大きな気球に搭載して観測を行ってきました。その技術と、ISASでX線の観測を行ってきた人たちの技術を融合させる形でASTRO-E IIの開発を進めています。

——将来はどのようなことを目指しますか。

高橋：それは簡単には言えませんよね。学問はあっという間に細分化してしまいます。いつの間にか自分が幹から外れて細かい枝を進んでいることもあるわけです。私は、あらゆるものの基本となるところへ向かって、太い幹を進んでいきたいのです。すでに開かれた道を進むのではなく、新しい道をつくっていくことがサイエンスです。この先に何があって、どういう方向に行くか分からない。常に賭けです。ですからサイエンスは、どのように進めていくかがとても重要です。

例えば、2002年にノーベル物理学賞を受賞された小柴昌俊先生にしても、最初から道が分かっていたとは思えない。そのときの状況から何が大事かを敏感に判断して、非常にダイナミックに進む道を変えてこられた。サイエンスにはそういうダイナミズムがあって、その波に乗って新しい道を切り開いていく感覚そのものが、とても面白い。波に乗る続けるには、やり方を常に変えていく力を持続ける必要があります。視野を広く持ち、明日には違うことを勉強



1959年、新潟県生まれ。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。専門は高エネルギー宇宙物理学。1988年、東京大学理学部物理学教室助手。1995年、宇宙科学研究所入所。X線、ガンマ線による宇宙の高エネルギー現象の観測、および新しい検出器の開発を行っている。

して、今までまったく関係ないと思われていた技術を融合しないと、新しいものはつくれません。アイデアを現実にごう展開して、こんな面白いことができるのでは、と考える時間が一番楽しいですね。よく電車を乗り過しますよ（笑）。

——科学者を志したきっかけは？

高橋：小学校のときから物理の本や、それこそSFや手塚治虫などの漫画を山のように読んで育ちました。そういう下地はありましたが、それがきっかけというわけではないですね。文系に進んでもいいと思ったこともあったし……。とにかく、そのとき、そのときに面白いことだけをやり続けてきたら、ここにいたのです。

いろいろな現象のもととなる最も基本的なもの、さまざまな現象を記述できる理論に興味を持ってきました。そのような基本的な問題に取り組みたいという思いが、素粒子や宇宙をやってきた理由ですね。

大学院生のとき、アメリカのスタンフォード大学で加速器実験に参加しました。そこで自分の思っている疑問が、世界のトップの人たちが抱えている疑問と同じだと分かり、とてもエキサイティングでした。ISASでも同じことを感じています。私たちは世界をリードする立場にあり得るのです。ISASは、自分たちが本当に面白いと思うことをやる非常に恵まれた環境です。もちろん責任を持って結果を出していかなければいけないし、大変なことはたくさんあります。しかし自分が面白いと思うことはやり続けられますよね。

——先生のように面白いことをやり続ける秘けつは？

高橋：面白いと思うことを中途半端ではなく、ちゃんとやらなければいけない。私の研究室のモットーは、“マニアになれ”です。人と違う何かを持ち、それを伸ばしてプロフェッショナルになる努力をしなければ。自分が面白いと思えるもので、頑張ればよいのです。

ISASニュース No.271 2003.10 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、上記の電話（庶務課広報係）までお願いいたします。本ニュースは、インターネットでもご覧になれます。
(<http://www.isas.jaxa.jp>)

*本誌は再生紙（古紙100%）を使用しています。

編集後記

新生ISASニュース第1号の編集を担当できて光栄です。統合効果を活かしつつ、研究者がつくる情報誌ならではの良き伝統を継承していきたいと思います。

（宇宙探査工学研究系助教授 橋本樹明）

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otonクリエイト