



3月3日に開催された「宇宙学校・東京」の様子

宇宙科学最前線

X線分光観測で探る 激変星の物理

石田 学

高エネルギー天文学研究系 教授

太陽の8倍以下の質量の恒星は、中心部で核燃料（水素やヘリウム）を使い果たすと自己重力のために収縮し、太陽ほどの質量を持ちながら大きさが地球程度しかない「白色矮星」になります。白色矮星は普通の星と違い、電子の縮退圧で自己重力を支えています。白色矮星と普通の星が極めて接近した軌道を回っていて、普通の星（以下では伴星と呼ぶ）から重力圏を越えて白色矮星へ物質が流れ込んでいるような連星系を「激変星」と呼んでいます。

激変星はその名の通り、明るさが激しく変動することを特徴とする変光星です。激変星にはさまざまな種類がありますが、その中で最初に認識されたのは「新星（Nova）」と呼ばれるグループです。新星は、1日程度の間に1万倍以上も増光し、その後、数ヶ月かけて緩やかに減光していきます。その正体は、伴星

から白色矮星へ降着した物質が表面の強い重力で圧縮され、主成分である水素が暴走的な核融合反応を起こすものです。

現在、激変星の中で最も多数派となっているのは新星ではなく、「矮新星（Dwarf Nova）」と呼ばれるグループです。矮新星も新星と同様、1日程度で増光しますが、その増光幅は100倍以下と、新星の増光幅の1/100以下であることから、その名（「矮」は小人という意味）が付いています。矮新星と新星のもう一つの大きな違いは、爆発頻度にあります。矮新星はどれも数週間から数ヶ月に1回の割合で不定期に爆発を繰り返しますが、新星の場合、爆発の間隔は最も短いものでも12年、多くは歴史上1回しか爆発の記録がなく、典型的な新星の繰り返し周期は1万年ともいわれています。

図1 激変星の模式図
(<http://www.star.le.ac.uk/~julo/nmcv.gif>)

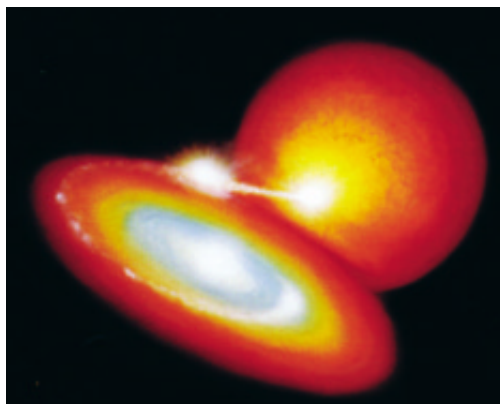
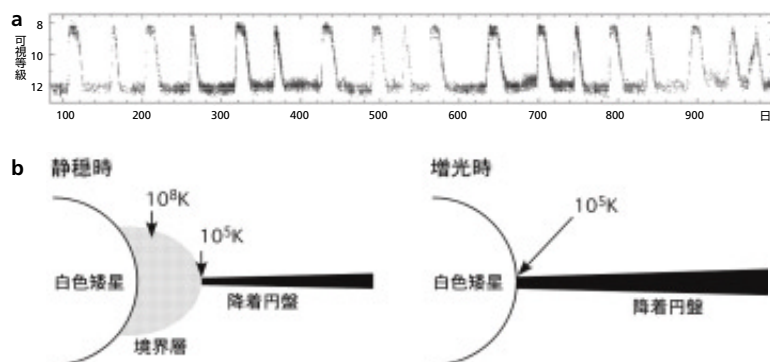


図1は激変星の模式図です。伴星の重力圏からあふれ出した物質は角運動量を持っているため、局所的にはケプラー回転をする薄い円盤を形づくりながら白色矮星表面に降着します。この円盤は「降着円盤」と呼ばれています。円盤の温度は白色矮星に近づくほど高くなり、最も内側では10万度に達します。激変星は一般的にはどれも非常に青い色をしています、それは激変星からの光の大半が高温の降着円盤を起源としているためです。降着円盤は中性子星やブラックホールのまわりにも存在し、X線強度の激しい変動を引き起こすなど、X線天文学とは切っても切れない関係にあります、その基本的な性質は激変星の降着円盤を調べることによって解明されてきました。

矮新星SS Cygni (はくちょう座SS星)

矮新星SS Cygniは、1855年のふたご座U星(U Gem)に続いて1896年に2番目に発見された矮新星です。図2aに示す通り、ほぼ50日の間隔で爆発を起こし、可視光で静穏時の12.4等から最大7.7等に増光します。この激しい明るさの変化は、円盤の熱的不安定によって起きると理解されています。円盤の外縁部では、温度が数千度以下で水素が中性の状態と、温度が1万度以上で水素が電離した状態の二つしか安定状態がありません。前者では円盤の粘性が低いため、伴星からの物質は角運動量を十分逃がすことができず、円盤外周部にたまっていきます。このとき、内側の円盤は十分な質量供給を受けられないので暗くなります。一方、後者では円盤外周部の粘性が高く、たまっていた物質

図2
a: SS Cygの可視光の光度曲線。縦軸は可視等級、横軸は経過日数 (Wheatley, Mauche & Mattei 2003より転載)
b: 矮新星の静穏時と増光時の境界層の様子



が円盤を通過してずっと白色矮星へ落ち込むため、円盤は明るく輝くことになります。前者が静穏時、後者が増光時に対応しています。矮新星では、伴星からの質量供給率が、たまたまこの二つの安定状態の間にあるために、暗い状態と増光状態が繰り返されるのです。

可視光に比べて波長の短い紫外線やX線は、降着円盤のより内側から放射されており、特にX線は、降着円盤の最内縁と白色矮星表面の間にできる「境界層」から放射されていると考えられています。白色矮星は、普通は表面でのケプラー速度よりも十分遅い速度で自転しています。ケプラー速度で回転している降着円盤の物質が白色矮星へ落ちるためには、白色矮星表面との速度差分の回転エネルギーを摩擦による減速で熱に変え、さらにそれを放射で捨てなければなりません。この急減速・急加熱が起きているのが境界層です。図2bに示す通り、質量降着率が低い静穏時には境界層入り口で10万度ほどだった円盤は、加熱のため境界層の中では1億度以上の高温になって膨れ上がり、X線を放射します。一方、質量降着率が高い増光時には、円盤の密度が高く冷却効率も高いため、円盤は境界層に入っても幾何学的に薄く、白色矮星表面でも10万度ほどの「低温」のままで、X線は放射しないと考えられてきました。

図3に「すざく」で観測したSS Cygの静穏時と増光時のX線スペクトルを示します。鉄輝線付近の拡大図を見ると、ヘリウム様、水素様に電離した鉄からの6.7keVと7.0keVの特性X線に加え、6.4keVの中性の鉄からの特性X線も観測されます。6.4keVの輝線は、温度100万度以下の環境で連続X線にさらされた鉄原子が最内殻の電子を1個失い、そこへ一つ上のレベルから別の電子が落ち込むときに放射されるものです。よく見ると6.4keVの輝線は、幅の狭いもののほかに、幅の広がった成分が混ざっていることが分かります。前者は境界層からのX線が白色矮星表面の鉄を照らしたもので、後者は降着円盤の鉄を照らしたものであり、エネルギー幅が広がっているのは、円盤のケプラー回転によるドップラー効果と解釈されます。

幅の狭い6.4keV輝線からは、境界層プラズマの空間的広がりが推定できます。境界層プラズマが白色矮星の上空の、より高いところまで広がっていれば、反射体である白色矮星を見込む角が小さくなって反射の効率が落ちるので、輝線の強度は弱くなります。このことを利用して境界層の広がりを見積もったところ、白色矮星の半径のせいぜい15%であることが初めて明らかになりました。幅の広い成分からは、境界層が軌道面からどの程度の高さまで分布しているかを見積もることができます。現在、詳細な解析を行っているところです。

一方、可視光での増光時のスペクトルには、0.5keV以下に低温の降着円盤からの放射成分がはっきりと

認められます。静穏時のスペクトルには見られないことから、増光時のみに降着円盤が白色矮星のより近くまで降りてきていることは、どうやら間違いなさそうです。しかし、増光時には出ないはずの硬X線は、静穏時よりは弱いものの、「すざく」でしっかりと観測されています。増光時の硬X線がどこから放射されているかは明らかではありません。しかし「すざく」による鉄輝線の観測で、解決への糸口が得られました。図3に示すように、6.4keVの鉄輝線は、今度は幅の広がった成分が大勢を占めています。これは、境界層からの反射のほとんどが、降着円盤から来ていることを示しています。現在、定量的なシミュレーションにより、この広がった6.4keV輝線の起源、増光時の境界層の空間的な広がりの様子についての研究を進めているところです。このように、「すざく」のX線分光観測により、これまであまりよく分かっていなかった境界層の様子が解明されつつあります。

強磁場激変星AE Aquarii (みずがめ座AE星)

白色矮星が10テスラ以上の磁場を持つ場合、伴星からの物質は途中で円盤を離れ、磁力線に沿って磁極に集中的に降着します。X線は白色矮星の自転で見え隠れする磁極領域から放射されるので、X線強度は自転周期に同期して変動します。このような激変星を「強磁場激変星」と呼んでいます。

強磁場激変星AE Aqrからは、可視光の観測で33.08秒の自転周期が見つっています。これは強磁場激変星の中では最速であり、赤道での回転速度は、そこでのケプラー速度の実に35%にも達します。X線強度はこの周期で変動していたため、AE Aqrは長い間、普通に質量降着をしている強磁場激変星と考えられてきました。ただし、ほかの強磁場激変星ではX線を放射しているプラズマの温度が2億度を超えるのにAE Aqrでは3000万度程度と低い、数時間おきに電波からX線に至る波長帯で同期したフレアを起こす、フレア中にはX線強度が数倍にも達するのに奇妙なことにX線パルスの振幅がまったくといっていいほど変わらない、さらにはTeVのエネルギーを持つ γ 線が観測されるなど、ほかの激変星には見られない特異的な振る舞いを示すことで特別視されていました。

AE Aqrの特異性の原因究明は、我々が行ったXMM-NewtonのX線分光データの解析で大きく進展しました。XMM-NewtonにはCCDよりもエネルギー分解のよい反射型の回折格子が搭載されており、図4に示す通り、窒素、酸素、ネオンのヘリウム様イオンからの特性X線を三つの成分に分光することができます。このうちの2成分の相対強度から、プラズマの密度を知ることができます。そしてその密度の情報と、3成分の絶対的な明るさから、プラズマが連星軌道スケールに広がっていることが分かりました。つまり、AE Aqrか

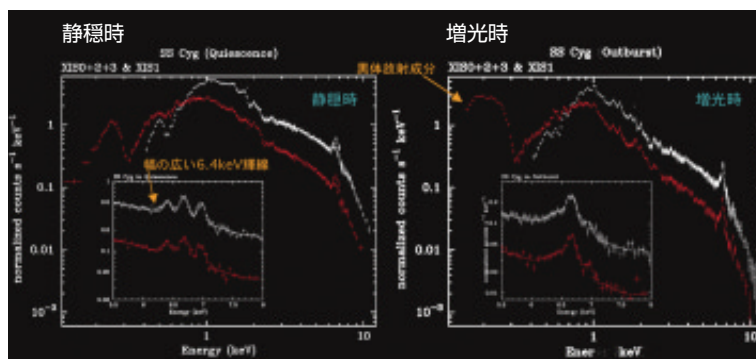


図3 「すざく」で観測したSS Cygの静穏時と増光時のスペクトル。挿入図は5.5~8keVを拡大したもの。赤は背面照射型CCDカメラ(1台)、白は前面照射型CCDカメラ(3台合計)。静穏時には鉄の6.4keV輝線に幅の広がった成分が見える。増光時には、この幅広の成分が卓越する。また、増光時には0.5keV以下に、白色矮星近傍まで下がってきた降着円盤からの放射成分が見える。0.5~10keVのX線では、(可視光での)増光時の方が(可視光での)静穏時よりも暗くなることに注意。

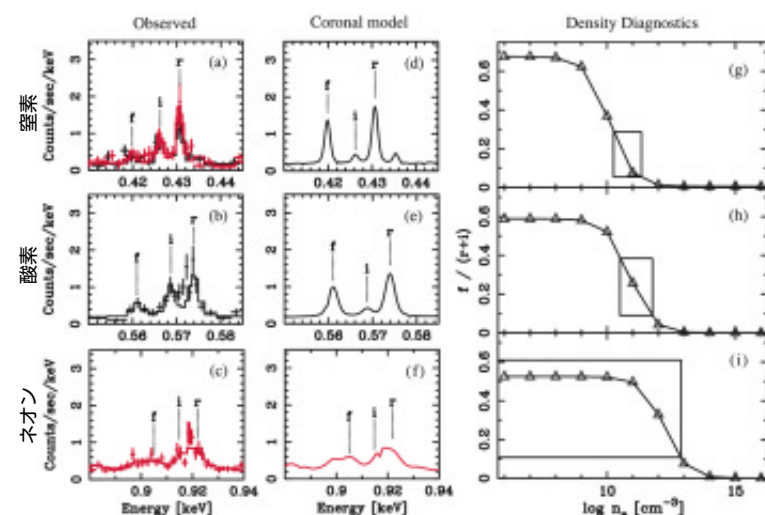


図4 (左列)XMM-NewtonのRGSで得られたAE Aqrの窒素、酸素、ネオンの輝線スペクトル、(中列)観測時と同じ温度条件で密度が十分低いときに期待される輝線のスペクトル、(右列)プラズマ密度と輝線強度比の関係。

らのX線は磁極からではなく磁気圏の辺りから放射されており、伴星からの降着物質は白色矮星の速い自転のために、白色矮星へ降着することなく連星系外へ吹き飛ばされていると考えられるのです。

それでは、自転周期に同期したX線の強度変動の起源は何なのでしょう？ AE Aqrは発見以来、年におよそ1.8マイクロ秒の割合で自転周期が遅くなっています。我々は、AE Aqrはこの減速エネルギーを使って光っている、電波パルサーの白色矮星版ではないかと考えています。実際、「すざく」の硬X線検出器による観測で、激変星からは初めて非熱的なパルス成分の端緒が見え始めています。

AE Aqrからの非熱的X線パルスの検出には大きな意味があります。10秒程度の周期で自転する磁場を持った白色矮星は、 10^{14} ~ 10^{15} eV程度までの粒子加速能力を持ちます。白色矮星は銀河系の中でごくありふれた星であり、あまり知られていませんが太陽系近傍では星の三つに一つは白色矮星です。もしAE Aqrをはじめとする高速回転の白色矮星から非熱的なパルスが検出されるようになれば、白色矮星が高エネルギー宇宙線の加速源として大きくクローズアップされるようになると考えられます。

(いしだ・まなぶ)

X線の影法師が明かす巨大なアウトフロー

ブラックホールに落ちるガスと流れ出すガス

JAXAが2005年に打ち上げたX線天文衛星「すざく」は、着々と成果を挙げています。今回は、私たちの天の川銀河に存在するブラックホール連星の観測結果についてお話しします。

太陽の30倍以上の重い星は、進化の果てに自らの重力でつぶれてブラックホールになると考えられています。こうしてできたブラックホールが普通の星と連星をなしている(図1、ブラックホール連星と呼ばれる)と、相手の星からガスが流入して、ブラックホールのまわりに降着円盤と呼ばれる回転するガスの円盤ができることがあります。降着円盤の中心付近では、強い重力のためガスが光速に近い速さで回転し、摩擦熱で数千万度にもなり、X線が放射されます。

ところで、降着円盤のうち、X線で輝くのはブラックホールのごく近くだけで、大部分はX線をまったく放射しません。ですから、仮にブラックホール連星に近寄ってX線で写真を撮っても、図1のような絵が写るわけではありません。では、図1のようにガスが外に流れ出している降着円盤の様子は、どのようにして分かったのでしょうか？ 明るいブラックホール連星からのX線放射を詳しく観測すると、鉄などの元素に特有の「色」の吸収線が観測されることがあります。しかも多くの場合、本来の「色」よりも青くドップラー偏移した吸収線が観測されます。吸収線ができるということは、X線を吸収する(影を作っている)ものがある。それがまさしく降着円盤外縁部から高速で吹き出すガス(の中の鉄などの重元素)というわけです。

このように、「X線の影法師」を観測することによって、降着円盤から宇宙空間に放出される大量のガス(すなわちアウトフロー)の存在が初めて分かるようになりました。X線の影法師は、「あすか」衛星によって発見されて以降、ニュートン衛星やチャンドラ衛星によってさまざまな天体で確認されてきましたが、ブラックホールの重力圏にとらえられたガスはいずれブラックホールのみ込まれてしまうと考えられていたのです。このようなアウトフローの存在は驚きです。今回、「すざく」衛星

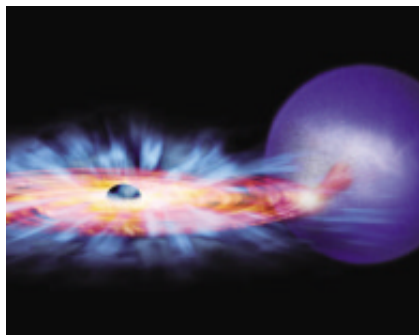


図1 ブラックホール連星の模式図。降着円盤中心部からX線が放射されると同時に、外縁部から多量のガスが吹き出ている。(©NASA/CXC/M.Weiss)

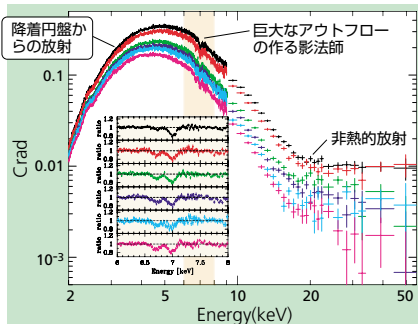


図2 4U1630-472の「すざく」スペクトルと鉄のK吸収線の拡大。縦軸はX線帯域で使われる明るさの単位の一つ。かに星雲の明るさを基準にしている。

で高エネルギー分解能かつ広帯域の観測が初めて可能になり、円盤の放射状態や光度の変化に伴ってガス放出がどのように発展するか、初めて調べることができるようになりました。

天の川銀河には現在、30個ほどのブラックホール連星が知られていますが、2005年12月、じょうぎ座にある4U1630-472というブラックホールがアウトバーストを起こしたと、アメリカのロッシ衛星全天観測装置による速報が流れました。これはブラックホールに落ち込むガスが突如増大し、その後、数ヶ月をかけて徐々に穏やかになる現象で、「すざく」は2006年2月から3月にかけて4U1630-472を6回観測しました。これにより、ブラックホールに落下するガスの量の変化とともに、降着円盤からの放射や巨大なガ

ス放出がどのように発展するかを詳細にとらえることに成功しました。

「すざく」によって得られたX線スペクトルを図2に示します。すべての観測で、20キロ電子ボルト以下で卓越する降着円盤からの明るい軟X線放射と、それ以上で顕著になる非熱的な硬X線放射という、ブラックホール連星の高光度状態の特徴をよくとらえたと同時に、X線CCDカメラにより、高電離した鉄による2本の強い吸収線(=X線の影法師)を、この天体に初めて発見しました。詳しい解析の結果、ブラックホールから数万km離れた降着円盤の外縁部では、ブラックホールに落ち込むガスの実に30%にも及ぶ量のガスが宇宙に放出されていること、さらにガス降着の減少とともにガス放出も徐々に穏やかになっていくことが分かりました。

今後、「すざく」によってさまざまなブラックホールの観測を積み重ねることで、ブラックホール質量、X線光度、降着円盤の状態の違いによってアウトフローがどのように変化していくか、解明が進むことでしょう。これは、ガス降着によって成長すると考えられるブラックホール成長史を解き明かす鍵となることは間違いありません。

(理化学研究所 久保田あや、宇宙科学研究本部 堂谷忠靖)

「ひので」極端紫外線撮像分光装置で見る新しい太陽

太陽観測衛星「ひので」の極端紫外線撮像分光装置(Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer: EIS)は、極端紫外線領域において分光観測を行い、太陽大気の診断を行う観測装置です。地球上では大気によって遮られる極端紫外線の輝線を、地球大気の影響のない宇宙空間で撮像することによって、数万度から100万度程度の太陽大気を観測します。

太陽大気中には鉄、カルシウム、ヘリウム、酸素など、さまざまな元素が存在しています。これらの元素は、存在する領域の温度に応じて、特定の波長の光を放出します。太陽大気の温度、密度の構造によって、どの高さの層からどのような放射が出るかが違うので、それぞれの原子が放射する光(輝線)ごとに太陽の「見え方」が異なります。EISの観測波長(17~30nm)は、太陽の大気層である遷移層(数万~100万度)およびコロナ下部(約100万度)に存在する、さまざまな元素からの極端紫外線の輝線を観測できるように設計されています。これらのさまざまな輝線を観測することにより、遷移層からコロナまでの画像を取得することができます。これまでの太陽観測衛星にも極端紫外線領域における分光観測装置は搭載されてきましたが、設計、光学素子(反射鏡、分光器)、CCDカメラの性能向上により、これまでの最高の極端紫外線撮像分光装置(SOHO搭載CDS)と比較して、空間分解能で約3倍、波長分解能(分光性能)で3倍以上、感度(有効面積)で約10倍の性能向上を達成しています。

図1はEISによって得られた極端紫外線領域のスペクトルの一部分です。鉄(Fe)やヘリウム(He)やシリコン(Si)など、さまざまな輝線が見えます。EISでは、スリットの位置を少しずつずらしてスキャンすることによって、空間の2次元マップを取得することができます。図2は活動領域周辺をスキャンして得られた2次元マップです。左上から右に向かって温度の低い順に、輝線He II (256.3 Å, およそ10万度), Fe VIII (185.2 Å), Fe X (184.5 Å), 左下から右にFe XII (195.1 Å), Fe XIV (274.2 Å), Fe XV (284.2 Å, およそ200万度)の2次元マップを表しています。He II とFe XVの輝線で得られたマップを比較すると「見え方」の違いに気が付くと思います。He II の輝線では太陽の表面に近い低温の領域を見ているため、太陽表面の構造を反映したまだらな模様が見えます。一方、Fe XVの輝線ではその上空の

コロナという高温の領域を見ているため、少し広がった雲のようなものが見えます。

太陽の表面より上空の温度の方が高いことに驚く方も多いかもしれません。実際、太陽の大気は表面付近で6000度なのに対し、コロナでは200万度のプラズマが満ちています。どのようにして上空の大気が加熱されるのかはよく分かっておらず、大問題として残されています。EISが観測している領域は、まさに太陽の下層と上層の大気をつなぐ層であり、極端紫外線を分光して観測することにより、放射領域の温度だけでなく密度や速度の情報を詳しく調べることで、どのようにエネルギーが太陽表面から上空へ伝わるのかといった問題を解明します。これは「ひので」衛星全体の重要な研究テーマです。

EISの観測によって、今まで観測されたことのない新事実が次々と得られています。順次詳細な解析を行い、さまざまな新しい太陽の姿を数多く発表していきたいと思いますので、ご期待ください。(今田晋亮)

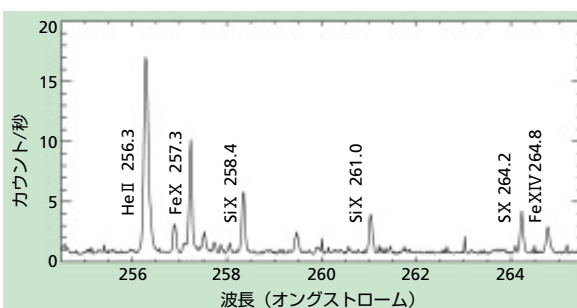


図1 EISによって得られた極端紫外線領域のスペクトル

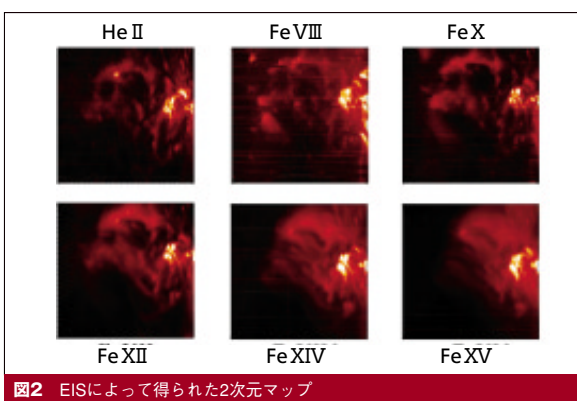


図2 EISによって得られた2次元マップ

ロケット・衛星関係の作業スケジュール (3月・4月)

	3月	4月
筑波	SELENE システムPFM試験	

(PFM : Proto-Flight Model)

「宇宙学校・東京」は雛の日に行われました

今年度3回目にして最終回の「宇宙学校」はここ数年のならで東京大学駒場キャンパスで3月3日(土)に行われました。雛の日です。開校式の中で、コンビニエンスストアで買ってきたチョコレート入りのお雛様セットを、壇上に飾りました。

1時間目は「ロケットと惑星探査」の時間で澤井秀次郎さんと岡田達明さん担当。澤井さんは分かりやすくする工夫を、岡田さんは研究者らしい誠意を感じさせるものでした。そして、「はやぶさ」の22分ビデオ上映。

昼休みに、30分間の映画『3万kmの瞳—宇宙電波望遠鏡で銀河ブラックホールに迫る—』を上映しました。ほとんどの出席者が観てくれました。

2時間目は川口淳一郎さんの『これからの太陽系探査と、その準備』と題した講演でした。川口さんは、ヨーロッパから夜行便で当日午前着の成田から直行というスケジュールでした。「川口探査機」が無事に間に合って帰ってこられたのだから、「はやぶさ」も無事でしょう。川口さんの講演は、「はやぶさ」の運用、成果から未来へとじっくりと素晴らしいものでした。「未来のことは教科書では学べない」という言葉は、いいメッセージだったと思いました。

3時限目、「宇宙と生命」の時間です。講師の山村一誠さんの身内にご不幸があり、急遽、和田武彦さんに代役をお願いしました。このような事情をお話してから、お雛さまのように並んで座っていた和田さんと黒谷明美さんを紹介しました。生きものの振る舞い



黒谷画伯によるポスターは梅花の下にたえず美人でした

そして宇宙での惑星、さらに文明に話がおよぶ佳境で時間となりました。そして、「あかり」の10分ビデオ上映。

閉校式では、宇宙学校始まって以来初めての卒業証書の手渡しを試みました。私たちが子どもころは、それぞれが卒業証書をもらいに出るのではなく、(時間節約のために)総代が代表して頂いたものでした。最前列に熱心な5歳と7歳の女の子がいました。代表でこの2人に受け取ってもらいました。この小さなセレモニーを皆さんも喜んでくださったと思います。

宇宙学校では今まで何度か校長役を拝命しましたが、若き日を過ごした駒場での、現役最後の役となりました。学生時代以来、星霜40余年、まさに「少年老い易く学成り難し」、そのまます。

今回は時間入れ替え制はとらず、出席者は332名でした。回収率68%のアンケート結果によると、小学生9%、中学生4%、高校生3%でした。それぞれ、この宇宙の質量エネルギーで見たときのバリオンの比率ぐらいです。人の世は、さまざまな世代が織りなして次の世代に文化をつないでいくもの。宇宙もバリオンだけでいくものでないことは明らかでしょう。若きバリオンにどのようにかわれるか、今後、宇宙学校が意識してかかるべき大きな問題でしょう。

今回のポスターデザインも黒谷さんの作品です。鈴木春信の絵をもとにしていますが、すべて新たに描かれたものです。すっきりと優美なデザイン、たいしたものです。(平林 久)

セレーネ「月に願いを！」キャンペーンに41万人

今年夏打上げ予定の月周回衛星セレーネに皆さんの名前とメッセージを載せて月に届けるというキャンペーンが、昨年12月1日から2月28日まで行われました。火星探査機「のぞみ」の「あなたの名前を火星に」キャンペーンではハガキに直筆で応募してもらい27万人、小惑星探査機「はやぶさ」の「星の王子さまに会いにいきませんか」ミリオンキャンペーンはインターネットでの申し込みで88万人の応募がありました。

今回はメッセージを書くということも一因と思われますが、出足が悪かったため、宇宙研のホームページにキャンペーンページを開設、応募状況や著名人のメッセージを紹介しました。また応募ハガキや団体応募用紙の作成、大高郁子さん提供のイラストを活用したシ



ールやしおりの配布などで宣伝を広げられました。募集期間を1ヶ月延長し、多くの著名な方々の応募やマスコミで取り上げてもらったこともあって、日を追うごとに応募が増えました。学校や保育園・幼稚園、科学館などからの団体応募も続々と届けられ、多くの方々のご協力により、最終集計で約41万人の応募となりました。一部の方のメッセージはキ

ャンペーンページで紹介しています。

寄せられた名前とメッセージは、シートに刻んでセレーネに取り付けられ、種子島宇宙センターに運ばれ、夏の打上げに向けての準備が進められます。キャンペーン成功のためにご協力いただいた皆さん、本当にありがとうございました。(周東三和子)

第1回SELENEサイエンスワーキングチーム国際集会開催

打上げを半年後に控え、SELENEチームは、海外からの研究者を迎えてSELENEのデータによる月の科学のテーマや進め方について議論する国際集会を開催した。1月9日から11日までの3日間、JAXA筑波宇宙センターの総合開発推進棟1階大会議室で行われた。SELENEチームメンバーは、総合試験の最後の山場である熱真空試験との掛け持ち参加であった。国内から79名、フランス、ドイツ、スウェーデン、スイス、イギリス、アメリカ、中国、韓国から18名が参加した。

初日は滝澤プロジェクトマネージャ、佐々木プロジェクトサイエンティストによるSELENE計画の開発現状サマリーに始まり、次いで14の観測機器について個々の開発現状と目指すサイエンスの紹介があった。

2日目はSELENEの複数機器データによる統合サイエンスのテーマの紹介と議論があった。月の地殻構造進化、極域探査などの研究テーマが紹介された。午後からは、月ラッシュの現在に特有な複数探査機データによる校正と検証の進め方について議論が行われた。海外からの参加者のうち3グループは、インドの月周回衛星「チ



SELENEサイエンス国際集会に参加した月研究者。筑波宇宙センターにて。

ャンドラヤーン1」の観測機器の主研究者も務めており、SELENEと「チャンドラヤーン1」との共同研究の主体となる。特にNASAの「クレメンタイン」衛星のマルチバンドカメラデータの解析で著名なブラウン大学のピータース教授と、ESAのSMART1搭載の蛍光X線分析計の主担当者であったウェールズ大学のグランデ教授は、三つの月探査機のデータの相互検証を行うことになる。参加者全体での議論に加え、観測機器チームごとの分科会も開かれ、観測運用やデータ解析、月科学での具体的な協力の方法について議論が進められた。

最終日は、筑波宇宙センターの試験施設見学が行われた。SELENEそのものは熱真空試験催行中で13mφスペースチャン

バー内にあったため、見ることはできなかったが、チェックアウト室での各機器のQL(クイックルック)画面に、特に海外からの参加者は非常に強い関心を示していた。観測機器データが最初に見られる画面だからであろう。

今回は最初のデータが取れ、衛星が定常運用に入ったところ、観測運用をしながら開催することになるであろう。(加藤 學)

LUNAR-Aプロジェクトの中止について

LUNAR-Aについては、2004年に実施された総点検の結果、二つの改良点が指摘され、その対策に3年程度かかる見通しから、当面ペネトレータの完成に集中し、プロジェクトに関しては、それまでの技術的判断およびプロジェクト運営に関する総括を行った上で、JAXAとしてプロジェクトを見直し、今後の対応策を立案することとしていました。そして昨年6月に実施したペネトレータの貫入試験で、総点検で指摘された二つの改良点への対策の確認が終わり、ペネトレータの耐衝撃性についてもほぼ確認が取れ、最終形態による貫入試験を2007年度に実施すれば、ペネトレータ技術は完成する見込みというところまで到達しました。

この間、プロジェクトの総括に関しては、外部委員等から構成される検討委員会等による評価が行われ、厳しいご指摘、また有益なご提言を頂きました。これらの評価で共通していたのは、ペネトレータを利用した月惑星内部探査方式の意義が現時点でも高いこと、および、その耐衝撃技術水準が世界的に見ても高いということでした。これらの評価を受け、JAXAでは今後の対応策を検討し、次の4案のトレードオフを実施しました。

- 1 母船を改修し完成見込みのペネトレータを搭載して打上げ
- 2 母船を再製作し完成見込みのペネトレータを搭載して打上げ

- 3 JAXAが行う今後の月・惑星探査の中でペネトレータを搭載して打上げ

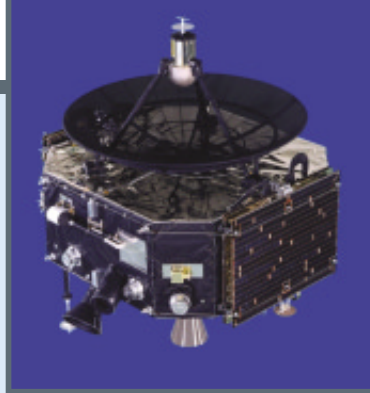
- 4 海外の衛星/宇宙機にペネトレータを搭載して打上げ

この4案に関しては最終的にチーフエンジニアオフィスの評価が行われ、JAXAとしては、LUNAR-Aプロジェクトは中止して第3案・第4案を採るべきこと、また、母船は、一部機器は研究開発へ適用し、構体は検討中の次期小型固体ロケットまたはGX初号機の環境計測用ペイロードへの適用を考えるという結論に至りました。この方針は、今年1月宇宙開発委員会推進部会で審議され、2月7日の委員会で承認されました。審議の詳細は、宇宙開発委員会のホームページをご参照ください。

LUNAR-Aプロジェクトを、当初の目標を達成できていない状態で中止せざるを得なくなったことは、誠に残念で遺憾なことで考えています。プロジェクト開始から17年の長い道のりでしたが、これまでご協力いただいた役職員、メーカーの方々に深く感謝致します。

最後に情報。最近、ロシアからLUNAR-A方式のままのペネトレータをロシアの探査機で打ち上げたいという話があり、調整が始まっています。ほかの国からも打診があります。(中島 俊)

浩三郎の 科学衛星秘話



「のぞみ」



井上浩三郎

2002年4月26日、探査機がビーコンモードからテレメトリモードへ切り替わらない状況の中、どのようにしたら探査機からの情報が得られるか、また、どのようにしたら探査機の状態を診断できるか、関係者の英知を集めた取り組みが始まりました。

原因究明に威力を発揮した自律化機能

まず、衛星の頭脳の役割をしているDHU（データ・ハンドリングユニット）の中で使用しているE2PROMの一部をアップロードして、テレメトリの回復を試みましたが、回復に至りませんでした。しかし4月29日に行ったコマンドによるXバンドアンプのオフ・オン制御（ビーコンがオフ・オンになる）は正常に動作し、コマンド、DHUの正常動作が確認されました。

そこで、このビーコンのオフ・オン機能と自律化機能を組み合わせて、衛星の中の各種機器の状態（HKデータ）の推定を行うという画期的な方法を編み出しました。ビーコンのオフ・オンのモニターにはスペクトラムアナライザを使用し、この方法によって「姿勢制御電子部は正常だが、共通系電源（CI-PSU）がオフ状態になっているため温度制御が不能になって推進系の配管系が凍結している。また、この電源を使用しているいくつかの機器も機能していない」ことが明らかになりました。

CI-PSUがオフ状態になっている原因の一つとして、この電源から供給している下流機器のどこかでショートが起き、過電流が流れ、ブレーカが作動し、電源の供給を遮断していることが考えられ

ました。この電源の遮断により、テレメトリモードへの変更のリレー不動作と、熱制御回路の不動作による推進系燃料の凍結で、姿勢制御機能の停止が生じている、と推定されました。このままだと配管系のどこかで破裂するおそれがあるため、2002年5月3日に観測機器を順次オンして緩やかな昇温を図りました。その結果、9月ごろには探査機内部のタンクおよび配管内の燃料の解凍が見られ、ひとまず胸をなで下ろしました。

CI-PSU回復への涙ぐましい壮絶なオペレーション

その後予定されていた2回の地球スウィングバイを経て2003年末～2004年初めの火星軌道投入を成功させるためには、現在の探査機不具合箇所を回復させなければなりません。現象を解析した結果、これらの不具合はCI-PSUがオフになっていることが重大な要因であることが明らかになったため、この電源の回復に全力を注ぐことになりました。

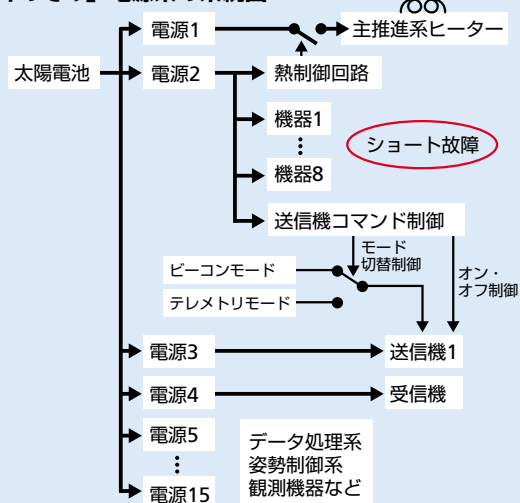
回路解析や地上試験結果も踏まえ検討を重ねた結果、CI-PSUに連続オンコマンドを送ることによって下流のショート箇所を繰り返し短時間の電流を流し、その箇所を焼き切って機器の過電流回路を切り離し、CI-PSUを復活させる、という方法が取られました。

この方法は電源が不安定領域を通過するため、電圧の不完全な立ち上がりによりビーコン通信系の制御リレーがランダムにオン・オフされ、途中ビーコンがオフすることも予想されたので、電源を回復させるための長期にわたる涙ぐましい壮絶なオペレーションが続けられました。連続オンコマンドにより2002年5月15日ビーコン喪失、2002年7月25日までの約2ヶ月間、7500回程度のオンコマンド施行後ビーコン復活。その後2002年12月20日と2003年6月19日の2回にわたる地球スウィングバイを成功裡に実施した後も、焼き切るための連続オンコマンドオペレーションが続行されました。

そして2003年7月9日、再びビーコンが喪失しましたが、連続オンコマンドは2003年12月の初めまでに総計1億3000万回送り続けられました。この間、「のぞみ」チームは搭載計算機の誤動作の可能性を排除するために搭載ROM書き換えなどを試みましたが効果なく、連続オンコマンド運用を終了しました。（いのうえ・こうざぶろう）

火星探査機「のぞみ」その4

「のぞみ」電源系の系統図





ロケットの追跡

M-Vロケット・レーダ班

川原康介

ロケットの電気屋さん。今回は、ロケットの追跡についてお話しします。衛星や人を宇宙に運ぶ大型ロケットには必ず誘導制御装置が搭載されていて、あらかじめ決められている軌道を正しく飛ぶように、常にロケットをコントロールしながら飛んでいます。

その肝心の誘導制御装置に異常が発生して、ロケットを正しくコントロールできなくなったらどうなるでしょう？ 最悪の場合、ロケットは思いもよらぬ方向へ飛んでいき、重大事故を引き起こしてしまう可能性も考えられます。ロケットは宇宙と地球をつなぐ夢の輸送機ですが、一つ間違えると、恐ろしい凶器へと変身してしまうのです。

そこで、地上にいる実験班員たちは、ロケットが凶器に変わってしまわないように、常にロケットの動きを監視し、もしものときには、ロケットを破壊してでも暴走を止めるための用意をしておく必要があります。このとき、ロケットを追跡しながら正確にロケットの位置を割り出すことが、レーダ班の仕事なのです。

レーダは、電波 (RADio) を目標物にぶつけて、そこからの反射を検出し (Detecting)、同時に (And) 距離を測定する (Ranging) 装置であるので、すべての頭文字を取って「RADAR」と呼ばれています。

レーダはロケット追跡に特別な装置ではなく、空港で飛行機の管制に使われている航空管制レーダや雨雲の動きをとらえるための気象レーダなど、多種多様なレーダが世の中に存在します。これらのレーダは、地上の基地局から送り出した電波が目標物に当たり、その反射波を受けることで目標物の位置情報を得ているので、「1次レーダ」と呼ばれています。

1次レーダは、飛行機や船、雨雲のように、不特定多数の目標物の位置情報を瞬時に知る方法としては有効ですが、必ずしもロケットの追跡に適した方法とはいえません。ロケット追跡の場合、目標物が決まっているので、むしろ、ほかの物体からの反射波は見たくないのです。

例えば、人込みの中で友達とはぐれてしまった状況をイメージしてみてください。ただ単に「おーい!」と叫ぶと、みんながこちらを向いてしまいます。でも「○○君!」と名前と呼べば、特定の人だけがこちらの呼び掛けに応えてくれます。そのとき、返事の聞こえてくる方向をたどっていけば、人込みに邪魔されることなく友達のいる場所が分かるというわけです。

実は、ロケットの追跡でも、これと似たようなことをやっています。まず、地上の呼び掛けに応えてくれる装置を、あらかじめロケットに搭載しておきます。次に、地上からコードを付した信号 (これが名前に相当する) をロケットに送ってあげます。そうすれば、ロケットだけから返事が返ってく



レーダアンテナ


 M-Vロケット
搭載カメラの画像

るという仕掛けになっています。

この方法は「2次レーダ」と呼ばれており、1次レーダと比べて遠くまで、かつ安定して目標物を追跡できるメリットがあります。また、ロケットに搭載されている応答装置は「レーダトランスポンダ」と呼ばれています。トランスポンダとは、地上の呼び掛けに応じて (Responder)、返事を返す (Transmitter) という意味の合成語です。いつもは「トラポン」と呼ばれ、みんなから親しまれています。

さて、ここからはロケットの追跡について少しだけ具体的に紹介したいと思います。レーダによるロケットの追跡は高精度に行われていて、角度にして約 0.003° 、距離にして約2mの精度でロケットの位置を瞬時にとらえることができます。そして、その位置データは、ロケットの飛行安全に役立てられています。また、M-Vロケットの場合、レーダ班の仕事は追跡だけでなく、ロケットの誘導を担当しているRG班やロケットの飛翔安全を担当しているRS班からの命令をロケットに伝える仕事も行っています。この命令は「コマンド」と呼ばれており、M-Vロケットに搭載されているトラポンを通じてロケットへコマンドが届けられています。

これだけでもたくさんなのに、地上のレーダ基地局では、ロケットが撮影したTV画像の受信もしています。受信されたTV画像はリアルタイムで監視することができ、ロケットに異常がないか視覚的に確認する手助けになっています。

どうですか、レーダ班の仕事を理解していただけたでしょうか？ さながら、ロケットの安全をつかさどる監視員といったところでしょうか。
(かわはら・こうすけ)



南米の宇宙へ

宇宙科学について旺盛な科学的好奇心にあふれる(?)谷本部長と私は、国内の宇宙科学ミッションだけではなく、海外で日本の宇宙天文観測がどのように行われているかを知るために、ブラジルとチリを訪問しました。

どうして南米かというと、ブラジルでは大気球観測センターとINPE(ブラジルの国立宇宙科学研究所)が推進するブラジル大型ペイロード気球実験シリーズの幕が切って落とされ、チリでは日米欧が推進するALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)プロジェクトと、日本の研究チームによる先進的な天文観測が、同じアタカマ高地

で着実に進められているからです。

ブラジルでの気球観測プロジェクトは、気象状況が乱調を極め、放球に適した日程を組み立てるのに、山上センター長以下、スタッフ全員が大変苦労されていました。また、日本の事情と違う現地ならではの課題・問題が発生し、その対応が大変そうでした。放球場であるカシュエラパウリスタは、のんびりした田舎町で、早朝の鶏と犬の鳴き声以外には騒音らしい騒音もありません。現地での食事とビールがとてもおいし

く、大気球グループの皆さんや名古屋大学國枝研究室、大阪大学常深研究室の皆さんとの一期一会の交流は、楽しい思い出の一つです。

今回の日本・ブラジル共同気球実験は、上述した通り気象条件の影響で長期化しました。しかし、このたび、唯一ISASにおいて海外展開を行っている大気球プロジェクトに短期間ながら同行を許されたことは、宇宙科学プログラムを遂行するシステムとプロセスについて、どのような形がよいのかを考える契機となりました。それは、私たち科学推進部の重要な検討事項でもある「科学推進部員としての人材育成を図るということです。例えば、海外プロジェクトのスタッフに合わせて科

学推進部から2名程度の要員を参加させ、プロジェクトの業務分担を明確にし、現地のロジスティックなマネジメントを一括担当させる、などが考えられないでしょうか。

チリ・アタカマ高地。標高5000mを超す岩と砂の台地に、国立天文台のASTEと名古屋大学のNANTEN2という二つの電波望遠鏡が隣接して設置されています。これより奥地に進むと、ALMAプロジェクトの電波望遠鏡群が設置される広大な台地が広がっています。つまり、日本の天文観測はALMAを先んじたといってもよいでしょう。

ここでは、国立天文台と名古屋大学の若手研究者によるリーダーシップのもと、外国の研究者や大学院生らが天文観測を行っています。常に高山病の危険と隣り合わせにある厳しい観測環境の実態は、私が身をもって体験しました。4000m辺りまではのんきに構えていた私ですが、この望遠鏡エリアに到着して車から降りた途端、まるで泥酔者のように足元がおぼつかなくなり始めたのです。酸素吸入器を生まれて初めて装着して、酸素がこんなにもありがたいものかと思い知らされた瞬間です。このような厳格な観測環境で、長期間日本を離れて昼夜を問わず精神的な天文観測に集中する若い研究者の皆さんには、感動すら覚える力強さを感じました。ここに日本の科学者が世界をリードしていく姿を見た気がします。私は、アタカマでの日本の若手研究者たちとの出会いを誇らしく思っています。

チリ大学のサンチャゴ局では、休日のアポなしにもかかわらず、当番の局員から懇切丁寧な施設説明を受けることができました。JAXAのアンテナを撮影していると、宇宙に秘められた謎めいた魅力に対する人類共通の科学的好奇心が、このような地球規模の協力関係を産み出す原動力になるのだと実感しました。

今回の訪問では、日本研究者チームの頑張りと科学に対する真摯な姿勢に触れた思いがします。もちろん、今回の訪問が日本の学術研究を支援する立場で働く私にとって、貴重な経験であったことは言うまでもありません。これからの学術研究をより強力に支援できるよう、これらの見聞を活かしていかなければならないと考えています。

(ふじい・のぶはる)



チリ・アタカマ高地の標高5000mに設置された国立天文台のASTE望遠鏡

藤井修治

科学推進部 国際学術課 課長



宇宙に馳せる思いは まず映画から始まった

谷川賢作

作/編曲家・ピアニスト

私の映画好きは両親に影響されてのことであるが、「子どもまんが祭りのたぐいは観る必要にあらず。大人が観る映画をどんどん観なさい」という方針もあり、普通の家庭では「ん、これは子どもに理解できるかな?」と思われる映画でもどんどん連れていってもらえた。中でもSF映画のジャンルは大好きで、いつも熱心に新作をチェックしていた。

新聞広告に載ったときから期待で胸がいっぱいだった『2001年宇宙の旅』は1968年、私が小学2年生のとき、京橋の「テアトル東京」という大きな映画館で「シネラマ」で観た。シネラマとは、湾曲した特製大スクリーンに、3本の35mmフィルムを横に並べて3台の映写機で同時に映写する方式。でっかい画面は迫力満点。7本のサウンドトラックで構成される音響もすごいものの。今のドルビーデジタルに引けをとらない臨場感!

猿同士の争いの後、骨を投げ上げて、それが宇宙船になる映画史上最高のジャンプカットから、宇宙ステーション、月面探査、モノリス、わくわくするような前半を経て、木星探査に向かうあたりから次第に哲学的、観念的になっていく映画の後半に8歳の頭はまったくついていけなくなり、謎が謎を呼んだまま映画館を後にする。それでも「宇宙って想像を絶する広さなんだ、本当に無限なんだ」という強烈な印象を残したのが、船外修理に出された船員がコンピューターHALの反乱で命綱を切られて宇宙のかなたにはじき飛ばされてしまうシーン。このシーン、音もなく滑るようにものすごいスピードで宇宙船から遠ざかっていく船員の姿に、心の底から恐怖を感じた。「あの人がいつまで生きているんだろう」「さあね。100年たっても1000年たっても、まだ宇宙空間を漂っているかもね」などと親と交わした会話を、今でもはっきりと

覚えている。

『アンドロメダ……』という映画は中学1年生のときに観た。回収された宇宙船に付着していた謎の病原体により、ある小さな村が全滅するのだが、アルコール依存症の老人と赤ん坊だけが生き残った。なぜその二人だけが感染しなかったのかを解明することが人類存続の鍵だと、砂漠の中の施設で研究が続くのである。結果、血液が極端に酸性かアルカリ性になっていけば感染しないということが判明する。そのときミスで病原体が漏洩してしまい、施設ごと爆破を企てるのだが、実は爆破することによって病原体が大増殖してしまうので、それを阻止しようと主人公が大活躍。確かに後半の活劇は見どころではあったが、それより何より「人は宇宙に対してなんと無防備なんだ」と、あらためて実感させてくれる映画だった。

無防備といえば、昨今の隕石落下映画。今や子を持つ身となった私だが、「こ～んなでっかい地球なのに、バスケットボールくらいのが落ちてても町ごとなくなっちゃうの?」



「道歩いてて隕石来たらどうしよう。よけられない」「この隕石痕写真いつの? 恐竜絶滅したころの?」と子どもたちに質問攻めにされても「そーねえ、まっ、大丈夫だよ」などと根拠のない生返しかしてやれない。

ここで思い出すが、我が日本の誇る特撮映画の快作(怪作!)『妖星ゴラス』(監督/本多猪四郎、1962年東宝制作)。隕石より強力な、地球質量の6000倍もの星が地球を襲ってくるのであるが、あまたのハリウッド作品が隕石を核爆弾などで破壊して危機を脱しようとする、あくまでもアメリカ的パワープレイを敢行するのに対し、この作品ではなんと南極に巨大なロケット基地を作り地球そのものを動かして、襲ってくる星から「逃げよう」とするのである。この荒唐無稽さ。でも楽しいではありませんか。「押しても駄目なら引いてみな」的なこの発想こそが、あらゆる創造の世界において大切なことなのではないだろうか。作曲もそうです。力み過ぎていると駄目で、鼻歌なんか自然に膨らんでいくと、逆にいい曲になったりするのである。しかし、この映画ではゴラスをなんとかよけることができたのだが、その後、地球の軌道をいったいどうやって元に戻すのだった!?

宇宙への思いは映画を通じて培ってきた。皆さんと同じく私も、一度でいいから宇宙に行ってみたい。しかし、地上のどんな場所でも体感できない、その圧倒的な奥行き感、無限が眼前に広がったら、自分はどれくらいおびえてしまうのだろう。あるいは、その無限を見て、己の有限をあらためて感じて、悟りを開いていい曲が書けるようになったりして! あはは。(たにかわ・けんさく)

スタジオでピアノに向かい編曲中の筆者

さらに遠くへ、誰も見たことのないところへ

宇宙プラズマ研究系 助教授

高島 健

——宇宙に興味を抱いたきっかけは？

高島：小学生のころ、アメリカの探査機ボイジャーが木星や土星に行って、鮮明な写真を地球に送ってきました。そのとき、「実は、この写真は何時間も前の木星の姿です。木星はとても遠いため、電波の速さでも何十分もかかるのです」という説明を聞きました。過去の姿しか見ることができないなんて、宇宙は広いのだと、興味を持ち始めました。

——大学ではどの分野に進んだのですか。

高島：学部で4年生になるとき、研究室を選びます。最初は、宇宙論を研究する理論の研究室に行こうと思っていました。そんなとき、学生実験の授業で表面物性が専門の教官がこう言ったのです。「実験屋は、実験をやって自然現象を自分の目で見るができる。その観測や観測結果に基づいて理論を新たにすることもできる」。なるほど！と思い、実験の研究室へ行こうかなと考え直しました。

その後、研究室の合同説明会があり、ほとんどの先生は学生に来てほしいので、うちの研究室はこんな面白いことをやっている、と丁寧に説明してくれました。ところが、後に師匠(?)となる道家忠義先生だけは、実験で忙しいからと3時間も私たちを待たせたあげく、自分の研究を一方向的に話して、「興味があるんだったら来なさい」と。この先生は本当に研究を楽しんでいるのだと感じて、加速器実験を中心に放射線検出器開発をしている道家先生の研究室に行くことにしたのです。人との出会いは不思議なものです。

——宇宙研では、宇宙を飛び交う高エネルギー粒子の研究をしているそうですね。

高島：加速器で粒子を加速させるには、さまざまな条件を精密にコントロールする必要があります。ところが宇宙では、地上の加速器では到底つくり出せないような高いエネルギーの粒子が生み出されています。私たちはこんなに苦労して条件を整え、粒子を加速させているのに、宇宙における自然現象はいとも簡単にやっている。しかも理論的な予測よりも高いエネルギーの粒子を生み出している。いったい、どこで、どうやって？それが知りたくて、高エネルギー粒子の観測を始めました。

——どのような場所を観測しているのですか。

高島：少しエネルギーは低いのですが、太陽系の中にも粒子が加



たかしま・たけし。1969年、神奈川県生まれ。早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。早稲田大学理工学総合研究センター、名古屋大学大学院理学研究科を経て、2002年、宇宙科学研究所次世代探査機研究センター助手。2006年より現職。水星探査計画BepiColombo/MMO衛星システムの検討、粒子検出器の開発、次世代高エネルギー粒子イメージャの開発と将来ミッション（地球磁気圏編隊観測、木星探査）の検討を行っている。

速されている場所があります。私たちはその現場に探査機を飛ばして、観測を行っています。例えば、地球の周りの磁気圏。そこで加速された粒子が北極や南極に降ってきて、

大気とぶつかり光ります。それがオーロラです。私たちは、できるだけ多くの衛星を地球の磁気圏に飛ばして観測するSCOPEという計画や、地球を取り巻く放射線帯を観測するERGという計画を検討しています。水星にも磁気圏があります。今、ESAと共同で水星探査計画BepiColomboを進めていて、MMOという探査機で水星の磁気圏を調べる予定です。

——計画を成功させるには何が必要ですか。

高島：やはり人との出会いやつながりが大切だと思います。ものづくりは一人ではできません。例えば一つのセンサーをつくるのにも、大勢の人がかかっています。その人たちに面白いと思ってもらいながら、ものづくりを進めることが重要です。より良いものをつくるために議論し、時にはけんかをして、互いのやりたいことを理解し合いながら一つの目標に向かっていく。すると、そういう人たちのつながりで、「こんな技術を使えば解決できるよ」と新しい人や技術に出会い、難問を乗り越えられることがあるのです。

——これからの夢は？

高島：木星には、地球よりもけた違いに強い磁気圏があります。私たちは今、木星探査計画を立ち上げようとしています。さらに将来は、より遠くへ、誰も見たことのない現場を目指したいですね、ボイジャーのように。そして次の世代のためにも「そんなミッションは日本ではできないよ」という状況にならないように努力していきたいですね。

——研究で一番うれしい瞬間は？

高島：予想とはまったく違う現象を見つけたとき。それが今の物理法則では説明のつかない現象ならば、最高に面白いと思います。そういった未知の現象に出会えるのは、研究者の中でも一握りの人でしょう。しかし、それを見たいという気持ちは、みんなの心の中にあるはずです。

ISASニュース No.312 2007.3 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ビニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

今年は暖冬と思いきや、寒くなったり、強風が吹いたり。でも、いつもの冬景色はどこへやら。世界的な異常気象到来。宇宙研を取り巻く環境にも大きな風が押し寄せています。今こそ元気をもって……。本『ISASニュース』を読むと、元気が出てきます。(久保田 孝)

*本誌は再生紙(古紙100%)、大豆インキを使用しています。

古紙配合率100%再生紙を使用しています

R100

PRINTED WITH
SOYINK