

© JAXA/SELENE



月周回衛星「かぐや (SELENE)」地形カメラの立体視画像

## 宇宙科学最前線

# 超新星残骸で加速される宇宙線

内山泰伸

高エネルギー天文学研究系  
宇宙航空プロジェクト 研究員

### 宇宙線の起源

宇宙の彼方から地球にやってくる謎の高エネルギー粒子の存在に、人類が気付いたのは、およそ100年前のことでした。「宇宙線」と呼ばれる、宇宙を飛び交う非常にエネルギーの高い荷電粒子(主に陽子)です。近年の電波、X線、ガンマ線天文学の発展により、宇宙線のような高エネルギー粒子が宇宙で果たしている役割の重要さに、私たち宇宙物理学者は気が始めています。と同時に、その理解の難しさに手を焼いている、と言わなくてはいけないかもしれません。

宇宙線発見以来の伝統的な課題が、地球に到達する宇宙線がどこでどのように生成されているのか、という宇宙線起源の問題です。特に銀河系内に起

源をもつ宇宙線(銀河宇宙線)は、超新星残骸の衝撃波でほぼ光速に加速され、極めて高いエネルギーの粒子となって、生成されるという考えが有力な説となっています。この問題を解決する上で鍵となる観測結果が、日米のX線天文衛星「すざく」「チャンドラ」を用いた、若い超新星残骸のX線観測によって得られました。本記事で、その最新の成果を報告します。

### 超新星残骸

宇宙にある重い星は必ず壮絶な最期、重力崩壊による超新星爆発を迎える運命にあります。超新星爆発によって、中心にはブラックホールや中性子星といったコンパクト天体が残る一方、星の外層は爆風となって星間空間を超音速で膨張します(実はそのような「イジェクタ」と呼ばれる超新星の放出物こそ

が、地球上の万物の素となっています)。イジェクタの爆風は、超音速ジェット機のように、星間空間に衝撃波をつくります(外部衝撃波)。そして爆風の運動エネルギーが熱エネルギーに転化して、星間ガスが100万度から1000万度に熱せられます。一方、イジェクタ自身の内部にも衝撃波が発生し(内部衝撃波)、やはり1000万度程度に熱せられます(図1)。高温となったガスはX線を放射し、「超新星残骸」として輝くこととなります。

現在知られている、銀河系で最も若い超新星残骸は、約340年前に爆発した超新星の残骸カシオペアAです。図2左に「チャンドラ」X線衛星(NASA)の観測によるカシオペアAの現在の姿を示しました。「チャンドラ」は1秒角を切る非常に優れた空間分解能のX線反射望遠鏡を持ち、美しい残骸の様子が見事に撮像されています。主に内部衝撃波で加熱されたイジェクタがX線を放っています。X線画像の赤色と青色は、星内部の核融合反応や爆発時に合成されたケイ素と鉄による輝線をそれぞれトレースしています。

X線天文衛星「すざく」は、X線CCDカメラ「XIS」と硬X線検出器「HXD」の2種類の検出器をもっています。図2右に「すざく」によって得られたカシオペアAの広帯域X線スペクトル、つまりX線エネルギーの分布を示します。このように、軟X線から硬X線にわたる広いエネルギー帯域での高感度観測を可能にするのが「すざく」です。イジェクタのケイ素、硫黄、鉄といった元素による輝線のほか、熱電子による熱制動放射(高速の熱電子が原子核のクーロン力を受けて放射するX線)による連続X線が、スペクトルを構成します。さらに第3の成分、いわゆる「非熱X線」が高エネルギー側に現れています。この成分が、宇宙線の謎を解く鍵なのです。

## 宇宙線加速の「瞬間」とらえた

私たちはこのような「非熱X線」放射が強い超新星残骸であるRX J1713.7-3946を、「チャンドラ」衛

星と「すざく」衛星によって観測しました。まず「チャンドラ」によるX線観測の結果は、驚くべきものでした。図3に示すように、残骸外縁部の2000年、2005年、2006年のX線イメージを比較したところ、年々変化する非熱X線放射の様子が明らかになったのです。外部衝撃波に対応すると思われるフィラメント状の放射領域が現れたり消えたりしています。この観測事実は、非熱X線が「シンクロトロン放射」であることを明確に示しています。衝撃波において極めて高いエネルギーを得た(「加速」された)極めて少数の電子が、磁場中をらせん運動することで放出される放射です。このような高エネルギー電子は、まさに宇宙線です。フィラメントが滅光するのは、シンクロトロン放射によって高エネルギー宇宙線電子がエネルギーを失ったためと考えられ、フィラメントが新たに現れるのは、宇宙線の加速がまさにその場所で進行していることを示しています。私たちは宇宙線の加速現象を初めて「リアルタイム」的にとらえることに成功したのです。今まで、超新星残骸の衝撃波で宇宙線が加速されていることは研究者によって広く支持されていましたが、今回はどうとう宇宙線加速の「瞬間」を目撃した、といえます。

また、観測された年スケールでの強度変動を説明するためには、磁場が星間空間の100倍程度、1ミリガウスの強度に増幅されていることが必要です。宇宙線加速に伴う磁場の非線形増幅に起因すると考えられ、宇宙における衝撃波加速の基本的特性を解明する上で新たなヒントを与える結果となっています。

また、前述の超新星残骸カシオペアAの「チャンドラ」X線データを解析した結果、やはりX線フィラメントの時間変動が明らかになりました。ただ、カシオペアAでは内部衝撃波を受けたフィラメントが明滅している点が、RX J1713.7-3946の場合とは本質的に異なります。高エネルギー宇宙線の加速が、星間空間に形成される外部衝撃波だけではなく、イジェクタ内の衝撃波でも起こり得ることを示している

図1 若い超新星残骸の構造の模式図。X線を出す高温プラズマは2層の殻状になっている。外側は外部衝撃波で加熱された星間ガスで、内側は内部衝撃波で加熱されたイジェクタ(超新星の放出物)。衝撃波で「加熱」された電子は熱制動放射(X線)を出し、高エネルギーに「加速」されたごく一部の電子が電波からX線にわたるシンクロトロン光を出す。

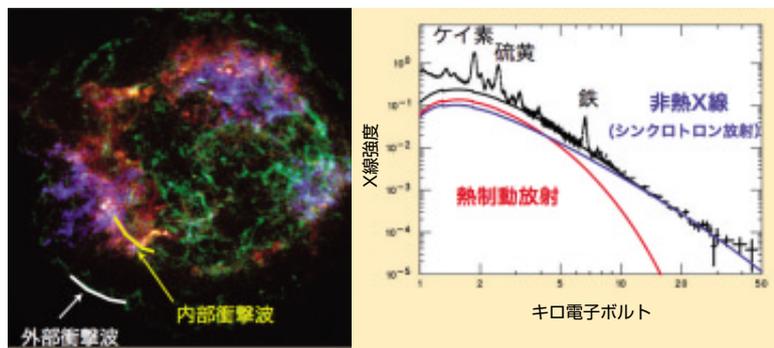
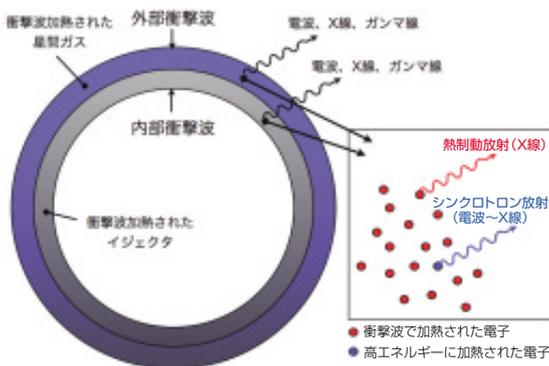


図2 左: 超新星残骸カシオペアAの「チャンドラ」衛星によるX線イメージ(赤: ケイ素輝線1.7-2.2keV, 緑: 連続成分4-6keV, 青: 鉄輝線6.4-6.9keV)。右: 「すざく」衛星によって得られたカシオペアA全体の広帯域X線スペクトル。10keV以上に「非熱成分」があり、私たちの解析からシンクロトロン光(図1参照)であることが分かった。

点で、とても重要な結果です。

私たちは「すざく」衛星でも超新星残骸RX J1713.7-3946を観測しました。その結果、硬X線領域でスペクトルが折れ曲がり、理論的に予想されていた「カットオフ」が実在することが確認されました。これは宇宙線電子の加速が頭打ちになったこと、すなわちシンクロトン放射冷却によって正味のエネルギー増加がゼロになったことを示しています。この観測結果と衝撃波加速の理論との照合により、十分に乱れた磁場の中で、とても効率よく宇宙線の加速が進行していることが分かりました。「チャンドラ」による観測で判明した0.1~1ミリガウスの磁場と、「すざく」で明らかになった十分に乱れた磁場中の加速という2つの観測結果から、宇宙線陽子が10の15乗電子ボルト以上の超高エネルギーに加速されることが導かれ、陽子を主成分とする銀河宇宙線が超新星残骸の衝撃波において加速、生成されていることの強い証拠を得ることができました。

### 超高エネルギーガンマ線の起源は？

超高エネルギーガンマ線(10の12乗電子ボルト程度のエネルギーをもつ光)の観測は、超新星残骸での宇宙線加速を語る上で欠かせません。ドイツのマックスプランク研究所を中心として開発されたステレオ型大気チェレンコフ望遠鏡H.E.S.S.による超高エネルギーガンマ線観測によって、天体粒子加速の研究における記念碑的な成果が次々と得られています。ステレオ型大気チェレンコフ望遠鏡は、天体から放射されたガンマ線が地球大気に入射した際に発生するカスケードシャワー(電子・陽電子とガンマ線のねずみ算的増殖)からのチェレンコフ光を、地上に配置した複数の望遠鏡でとらえて、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを測定する装置です。図3左に示すように、超新星残骸RX J1713.7-3946では、超高エネルギーガンマ線で残骸の殻構造が「撮像」されています。超高エネルギーガンマ線による天文学が創成されたことを最もよく表す例で、大気チェレンコフ望遠鏡による最近の成果にはノーベル賞級の意義があるといわれています。

X線と超高エネルギーガンマ線は、ともに超新星残骸における最高エネルギー領域の粒子によって放射されます。X線は前述のようにシンクロトン放射であり、ガンマ線は(1)高エネルギー「電子」が宇宙マイクロ波背景放射と相互作用する逆コンプトン散乱、あるいは(2)高エネルギー「陽子」が残骸中のガスと衝突して生ずる中性パイ中間子の崩壊、によるものが考えられます。いずれの場合も、X線とガンマ線は同じエネルギースケールの粒子に起因するため緊密に関係し、統合的に研究することが肝要になってきます。私たちはH.E.S.S.のグループと協力して、

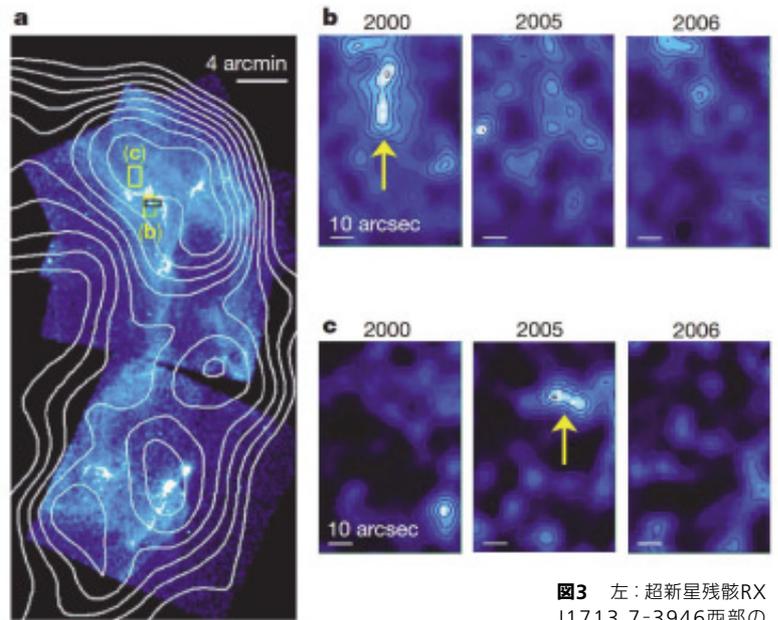


図3 左：超新星残骸RX J1713.7-3946西部の「チャンドラ」X線イメージ(カラー)とガンマ線イメージ(H.E.S.S.:等高線)。H.E.S.S.チームとの共同解析から、X線とガンマ線の強度分布がおおよそ一致していることが明らかになっている。右：北西部box b, cの拡大図。年々、変動するX線フィラメントがある。宇宙線が加速される様子が初めて「リアルタイム」的にとらえられた。Uchiyama et al. Nature 449, 576 (2007) より転載

X線とガンマ線の詳細な比較を行っています。図3左はその一例です。

超新星残骸RX J1713.7-3946においてシンクロトンX線の強度変動を発見したことを、先に説明しました。その結果は、この超新星残骸の超高エネルギーガンマ線が、中性パイ中間子の崩壊ガンマ線であることを、ほぼ決定づけることになります。強度変動するフィラメントは、前述のように1ミリガウス程度の磁場をもちます。残骸の殻全体の平均では0.1ミリガウス程度の磁場が存在することが、X線データから推定できます。この磁場強度では、ガンマ線を逆コンプトン散乱で説明することはできません。したがって、中性パイ中間子の崩壊ガンマ線であることになります。私たちはガンマ線放射機構の「縮退」を解き始めました。今まで天体高エネルギー粒子加速の現象は、超新星残骸に限らず、高エネルギー電子を通して観測されてきましたが、初めて高エネルギー陽子を観測できるようになったのは画期的なことです。

超新星残骸RX J1713.7-3946において、1ミリガウスにまで増幅されている磁場が発見されたこと、宇宙線加速がとても乱れた磁場中で進行していること、超高エネルギーガンマ線の放射機構が宇宙線陽子に起因する中性パイ中間子の崩壊ガンマ線であること、これらの新しい観測結果から、銀河宇宙線が超新星残骸の衝撃波において加速されているという可能性が極めて有力になりました。「すざく」や「チャンドラ」などのX線観測とガンマ線観測を組み合わせる研究は、まだ始まったばかりです。H.E.S.S.に加え、MAGIC, CANGAROO-III, VERITASなど世界各地に大気チェレンコフ望遠鏡があるほか、私たちも参加しているガンマ線天文衛星GLASTが2008年春には打ち上げられる予定です。今後X線、ガンマ線による天体高エネルギー粒子加速の研究は、さらに「加速」して進んでいくことでしょう。

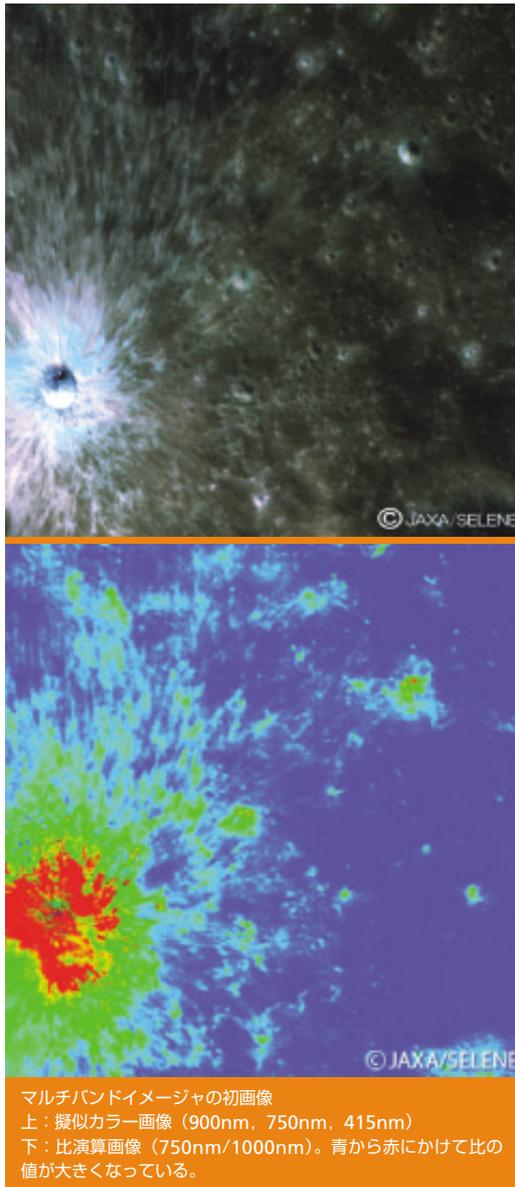
(うちやま・やすのぶ)

## 「かぐや」の初期機能確認

2007年9月14日に種子島から打ち上げられた月周回衛星「かぐや(SELENE)」は、10月18日に月の高度100kmの定常運用軌道へ投入され、19日には観測機器が常に月の中心方向を向く定常制御モードに移行しました。その後、バス機器の詳細な特性把握およびミッション機器の機能性能を確認する初期機能確認作業を、12月中旬完了を目標に実施しているところです。

各ミッション機器の初期機能確認作業では、機器が期待される通りに動き所望の観測データが得られるかを、ミッション機器の主研究者(PI)を筆頭とする機器チームメンバーと共同で検証しています。そのため、毎日各ミッション機器のチームメンバーが入れ替わり立ち替わり、昼夜を問わず、相模原キャンパスのSELENEミッション運用・解析センター(SOAC)運用室に詰めています。この初期機能確認作業は12月中旬から始まる定常観測のために必要不可欠なものであり、この一環として、観測データの取得およびそのデータの処理ができるか、などといった作業を行っています。ここで得られる観測データは、「かぐや」のミッション機器から初めて実際に得られるデータです。そのため、機器チームおよびSELENEプロジェクトメンバーが緊張する一瞬であり、まさにかたずをのんで見守るという表現がぴったりの状況が、SOAC運用室では展開されることとなります。そして、データが処理でき、画面上に期待される画像やグラフが出たときには、緊張感から解放され、まさに喜びに満ちあふれる瞬間がSOACの中に広がります。

「かぐや」では、すでに「上弦の地球」や月を撮影したハイビジョンカメラ(HDTV)が、初期機能確認として、待望の“地球の出”と“地球の入り”を試写しました。月の上にいる人にとっては常にほぼ同じ高さで地球が見えるので、地球の出や入りを見ることはできません。しかし、月を回っている「かぐや」か



マルチバンドイメージャの初画像  
上：擬似カラー画像(900nm, 750nm, 415nm)  
下：比演算画像(750nm/1000nm)。青から赤にかけて比の値が大きくなっている。

らは、あたかも地球が出たり入ったりするような光景を見ることができます。“地球の入り”は、月の南極近傍で撮像されたため、オーストラリアなど地球の南半球の人たちになじみの深い、南極を上にした地球が映っていました。この青い地球がモノトーンの月面上で漆黒の宇宙空間に浮かぶコントラストは、1つしかない地球の大切さを訴えているようで、とても感動的でした。2008年には、我々になじみ深い北極が上になる真ん丸い地球が昇る様子を、HDTVで撮影することが予定されています。

国内外を問わず大反響のあったHDTVの動画撮影に引き続き、いよいよ11月3日には、「かぐや」の主目的である月の起源と進化の研究のためのミッション機器である地形カメラ(TC)やマルチバンドイメージャ(MI)の初期機能確認のための撮像およびそのデータ処理が、機器チームによって行われました。地形カメラでは、10mの細かさで月のクレーターの情報や3次元の地形情報を得ることができると、またマルチバンドイメージャでは月の鉱物の分布などを20mの細かさで得られることが分かりました。

表紙の画像は地形カメラによる月の立体視画像、このページの画像はマルチバンドイメージャによる擬似カラー画像(3つの異なる波長のデータにRGBの光の3原色を割り当てたもの)と、2つの異なる波長のデータの割合を計算した比演算画像です。過去の衛星よりも鮮明で、クレーター分布や地表の物質分布を詳細に見ることができ、定常観測が待ち遠しくてたまらなくなるような画像となっています。

今後も残りの観測機器の初期機能確認を確実に進め、12月中旬からの定常観測運用に備えていく予定です。また並行して、初期機能確認の途中に得られた画像や機能確認結果を、「かぐや」ホームページなどを通じて国民の皆さんに提供していく予定です。ますますの応援をよろしくお願い致します。

(祖父江真一、大竹真紀子、春山純一)

## 宇宙科学研究に関する外部評価の実施

JAXAの中期計画では、宇宙科学研究（宇宙理工学の学術研究）の成果についての外部評価を中期目標期間中に1度実施すると定めている。それに基づいて、海外5名、国内8名



Executive Summaryについて議論中の委員会

の著名な宇宙科学と関連分野の研究者およびジャーナリストに評価委員となっただき、宇宙科学研究を中心に、教育・広報活動、宇宙科学プロジェクトと基礎研究のかかわり、プロジェクトの進め方について審査をお願いし、ご意見・助言を頂いた。宇宙科学研究所時代にも1993年と2001年に外部評価を実施しており、それらを含めると外部評価は今回で3回目となる。

2007年7月から10月にかけて、多くの宇宙科学研究所本部スタッフの協力により外部評価資料（Report of ISAS/JAXA Activities）を作成、10月半ばには、この評価資料と評価の視点（案）を評価委員に発送し、10月31日と11月1日の外部評価委員会当日を迎えた。まず委員長として河野通方教授（専門は航空宇宙工学）、副

委員長としてMartin Harwit教授（専門は赤外線天文学）を選出し、宇宙科学研究所本部からの口頭およびポスタープレゼンテーション、相模原キャンパス見学、委員議論を経て、Executive Summary（案）の作成までを行った。委員から評価の視点への最終回答とExecutive Summaryへの修正意見を頂いた上で、12月末までに評価報告書をまとめる予定である。

Executive Summary（案）は、まず、中期計画期間の宇宙理工学研究成果と、それを可能にした宇宙科学研究所本部の特色を高く評価している。続いてJAXAへの統合を積極的に評価し、宇宙科学研究所時代の良さを維持しながらJAXAへの統合を利用して宇宙科学を発展させることが、日本が宇宙科学において世界のMajor playerであり続けるために必要であるとしている。ぜひ、日本の宇宙科学研究の発展のために、外部評価委員会の提言を今後に生かしたい。（満田和久）

## 公開シンポジウム「宇宙科学と大学」開催される

公開シンポジウム「宇宙科学と大学」が、急逝された「ひので」プロジェクトマネージャー小杉健郎さんの一周忌に当たる2007年11月26日、東京大学本郷キャンパスで開催された。宇宙科学研究所の前身である宇宙科学研究所が東大から1981年に独立し、1987年より「学際理工学併任」の仕組みにより東大の大学院教育に宇宙研の研究者が引き続き参加できる基盤が確保されてから20年。この催しは、多大な成功を収めてきた「学際理工学」を記念して、東大と宇宙研の有志が共同で企画したものである。3機関が統合し、水と油が徐々に混じり合う中、浮上しつつある大学共同利用の位置付けを、少しでも後押しできればという思いが込められている。

司会は、余人をもって替え難い川泰宣さんと、売り出し中の東大大学院理学系研究科の横山広美准教授にお願いした。当日は幸い穏やかな天候で、220名ほどの参加者は広い安田講堂にほどよく散らばった。平日で大学生の参加が難しく、JAXAの若手の参加も少ないのは残念だったが、

宇宙研のOB諸先輩には、歴代所長を含め多くの参加をいただいた。

午前は、井上一宇宙科学研究所本部長、小宮山宏東大総長、立川敬二JAXA理事長、文部科学省の久保公人審議官、西村純元宇宙科学研究所長、向井利典JAXA統括チーフエンジニア、岡村定矩東大副学長、坂田公夫JAXA総合技術研究本部長、松尾弘毅宇宙開発委員長から異口同音に、「学際理工学は重要で、今後も大いに推進し広めるべし」という心強いメッセージを頂いた。

午後はトーンを変え、名古屋大学の関華奈子准教授、宇宙研の中川貴雄教授、同じく橋本樹明教授が学際理工学のハイライトを語り、宇宙研から京都大学に移られた山川宏教授は「大学院生にそこまで任せるのか?」というタイトルで、大学院生がスタッフと並びプロジェクトを担ってきた現場を紹介。土井隆雄宇宙飛行士のビデオレターの後には、ロケットメーカーの木内重基さん（㈱アイ・エイチ・アイ・エアロスペース取締役）、衛星メーカーの北出賢二さん（NEC㈱宇宙システ

ム部長), 宇宙研に関する多くの著書をもつ松浦晋也さんから, 宇宙研では衛星の企画・設計・製作から運用とデータ利用までが一貫していることの意義が強調された。最後はスタンフォード大学の釜江常好教授に, 国際的視点で締めていただいた。総じて, 大きな成功を収めたと自画自賛している。

最後にこの場を拝借して, 司会のお二人, 実行委員の皆さん(特に宇宙研の山崎典子准教授, 対外協力室の利岡加奈子さん), また日本宇宙フォーラムの折井武さんに深く感謝したい。(東京大学大学院理学系研究科教授・実行委員代表 牧島一夫)

## 第51回「宇宙科学技術連合講演会」の報告

「宇宙科学技術連合講演会(宇科連)」とは, 年1回行われる学術講演会で, 宇宙に関係した技術や科学が主なテーマとなっています。主催は日本航空宇宙学会ですが, いくつかの学会の共催となっており, この種の講演会では国内で最大のもので。2007年度は, 10月29日から31日にかけて, 札幌市の札幌コンベンションセンター「SORA」で開催されました。



「宇宙を楽しむ 市民シンポジウム」におけるゲストトークショーの様子(2007年10月28日, 北海道新聞社本社にて)

研究発表は, 3日間にわたって11会場で行われ, 合計で530件余りの講演がありました。テーマは, 宇宙輸送・推進, 軌道・姿勢制御, 空気力学, 熱, 構造, 材料, 通信, ロボット・ローバなどの基礎的なものから, 実際の宇宙ミッションとして太陽観測衛星「ひので」や月周回衛星「かぐや」, 陸域観測技術衛星「だいち」, 技術試験衛星「きく8号」, 国際宇宙ステーションなどに関連する講演が多数ありました。また, 今後のミッションとして, 金星探査機「PLANET-C」, 電波天文衛星「ASTRO-G」, 準天頂衛星, 太陽発電衛星, フォーメーションフライト, そして小型衛星などや, 今後の月探査についての発表もありました。そのほか, 宇宙法・宇宙基本法, 商用化・スピンオフ, センサ,

スペースデブリ, 地域発の宇宙開発, そして宇宙教育などの分野の講演もありました。このように, 非常に多岐にわたった講演会となっており, 宇科連に参加すれば日本の宇宙開発の最新状況が分かると言っても過言ではありません。

また, いくつかの招待講演があり, 地元の方としては

旭山動物園園長の小菅正夫氏のお話を伺うことができました。宇宙の分野とはまったく異なりますが, 絶滅しそうな動物の飼育や, 旭山動物園で行われているユニークな試みについてなど, 大変興味深く面白いお話でした。

今回の宇科連では, 新しい試みとして, その教育セッションが主催する一般向け講演会を直前の10月28日に開催しました。「宇宙を楽しむ 市民シンポジウム—宇宙への限りなき挑戦の軌跡—」と題し, 「かぐや」と「はやぶさ」をはじめとして「だいち」「すざく」「あかり」「ひので」の各ミッションについてのとっておきの話題を紹介したり, ゲストトークショーを行ったりと, 非常に盛りだくさんでした。お客さんも会場いっぱいになり, 宇宙について楽しんでもらったことと思います。(吉川 真)

## ロケット・衛星関係の作業スケジュール (12月・1月)

	12月	1月
相模原	S-310-38号機 噛合せ試験	
	PLANET-C 観測装置電気性能試験	
	PLANET-C 熱真空試験	
	ASTRO-G 設計確認会	BepiColombo 基本設計審査会
内之浦		S-310-38号機 フライトオペレーション
能代	NAL-735-2・3 大気燃焼試験	

## 電波と粒子線で迫る月の謎

## ■電波で見る月の電離大気 (RS)

電波科学 (RS: Radio Science) が狙うのは、月を覆う電気を帯びたガス、電離層です。おかしいな、月は真空のはず、そう思う方が多いでしょう。実は月面の近くには、月から飛び出したアルゴンやネオンといった原子が飛び回り、とても薄い大気があります。ここに太陽からの紫外線が当たると、電子とイオンが発生して電離層ができます。

月の電離層の濃さは、理論的な予想によれば $1\text{cm}^3$ あたり電子が1個程度で、これは地球の電離層 ( $1\text{cm}^3$ あたり100万個) に比べれば、ないに等しいものです。そう予想するのは、太陽風という電気を帯びた希薄なガスが太陽から吹き付けて、月の電離層をはぎ取ってしまうはずだからです。ところが、月面から50kmの高さにわたって $1\text{cm}^3$ あたり1000個もの電子があるという報告が、1970年代にソ連の電波科学観測によってもたらされました。月周回機が地球から見て月の裏側に隠れるとき、周回機から地球に向けて送られる電波が月の縁のあたりでわずかに屈折したのです。この屈折は、電波が月の電離層の中を通ったために起こったと結論されました。しかしこの報告は、理論的な予想とあまりに違うこととデータが少ないことから、あまり受け入れられていません。

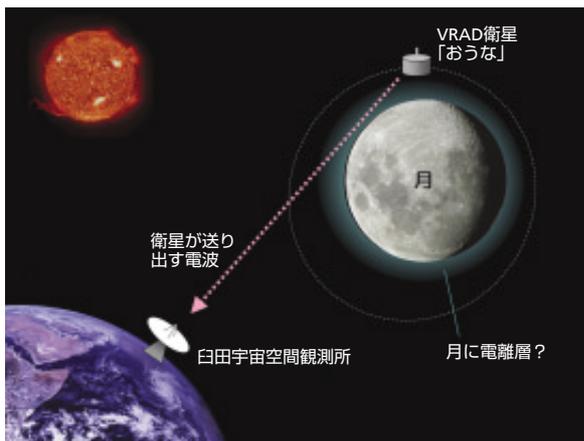


図1 電波科学のイメージ



図2 「かぐや」に搭載され打上げを待っていたARD検出器

月に電離層はあり得るのでしょうか？例えば、月の地殻に点在する残留磁気太陽風から電離層を守るかもしれませんが。月の内部から局所的にガスが染み出て、濃い電離層のもとになるかもしれません。また、月の上空には細かなちりが静電気で舞い上がっている可能性があるのですが、一緒に電子が漂っているかもしれません。いずれにせよ、従来の月面のイメージを変えるものですし、月での電波観測など将来の人類活動にもかかわってきます。

「かぐや (SELENE)」の電波科学は月の電離層の有無に決着をつけ、あるとなればそのメカニズムを探ります。子衛星の1つであるVRAD衛星「おうな」が発する電波が月面近くを通る様子を、繰り返し調べます (図1)。電波は長野県にある直径64mのアンテナで受信されます。38万kmの距離を電波で結んで行く、壮大な実験です。

## ■粒子線で見える月の科学 (CPS)

粒子線計測器 (CPS: Charged Particle Spectrometers) は、月面から放出される希ガスであるラドン元素 (元素記号Rn) が放射線崩壊する際に放出する $\alpha$ 線を計測するARD (Alpha Ray Detector) と、月周辺での宇宙粒子線 (太陽や遠い銀河からやって来る粒子線) 環境を計測するPS (Particle Spectrometer) の2つの装置からなっています。CPSは、いずれの装置もシリコン半導体検出器という非常に高いエネルギー分解能をもったセンサを、複数枚組み合わせることによって構成されています。

Rnという元素は、「ラドン温泉」という名前で聞いたことがある人も多いかもしれません。Rnは気体で、月の進化や月表面の短期変動をとらえる手掛かりとなる、 $\alpha$ 線を放出する放射線ガスです。ARDは、アポロやルナ・プロスペクタに搭載された検出器に比べて20倍以上の観測感度をもっています。過去の観測ではRnガスからの $\alpha$ 線の空間分布しか調べられませんでした。が、 $\alpha$ 線の時間変化も調べることができます。Rnガスの放出量は、月表面の地下構造や月表面の地殻変動と密接に関係していると考えられています。ARDはRnガスの放出を観測することにより、月の内部構造や進化の歴史を調べることができます。「かぐや」の観測期間中にRnの大きな時間変動が観測されれば、ガスの放出場所を特定できる可能性があります。ガスの放出場所では、Rnガスだけでなくほかの気体の放出も期待されるため、「かぐや」に搭載された別の粒子検出器との同時観測により、月の地殻にどんな気体が閉じ込められているかを知ることができるかもしれません。

PSによる月周辺環境での宇宙粒子線計測は、太陽活動に伴って太陽から放出されるエネルギーの高い粒子や遠い銀河で加速された宇宙粒子線を計測します。これらのデータは、将来の月面における人類の活動において必要となる、宇宙放射線環境の基礎データを提供するものです。

(いまむら・たけし, たかしま・たけし)

馬車は走る

●偶然の一致

沢木耕太郎という作家がいる。代表作はバックパッカーのバイブル、『深夜特急』だ。デリーからロンドンまで乗り合いバスで旅する物語であり、実体験がモデルとなっている。その『深夜特急』の中で、氏はこう述べている。

「何か想像もつかないことをやるチャンスは、今しかないのではないか」。氏はそのとき27歳。海外を移動するというに何かを期待していたように思う。そして2007年、当時の氏と同じ年となった自分に新たな海外渡航の機会が訪れようとは、何か感慨深いものがあつた。

●金星探査機「PLANET-C」

PLANET-Cの姿勢軌道制御系(通称:AACS)を担当して1年半、2010年の仕上げを目指し、来年からはフライトモデル(FM)の製作が始まる。金星は地球よりも太陽に近い惑星だ。太陽光強度が増し、熱環境は地球周回と比べて

厳しいものとなる。価値ある観測を行うために、AACSでは多くの機器を搭載するが、その中には海外に製作を依頼するものも多い。AACSの機器は金星探査を実現できるのか? 製造前に設計を確認する設計確認会(CDR)が海を越えて行われる。

今回確認する機器は3種類。ちょうど時期が重なったこともあり、1ヶ月の間にNY, Boston, Parisと3ヶ所の企業に出掛けることとなった。どの企業も都心から少し離れており、移動の足が必要になる。そのため、レンタカーを相棒に回ることにした。私の心は沢木氏と同様、何かを期待していた。

●Ithaca/NYにて

最初はNY州のIthacaで製作されているリアクションホイール(RW)だ。この企業のRWは、月周回衛星「かぐや」にも搭載されている。RWは、衛星の姿勢を制御するために、化学燃料を用いるスラスタと並んでなくてはならない必須機器だ。

Ithacaは五大湖に近い北部の地方都市だ。ドライブの相棒はPeugeot。ワインのように深紅な顔色をした重量感のあるやつだ。周りは絶好の紅葉シーズンである。その色鮮やかさは、どこことなくアメリカのカラフルなお菓子を想像させた。もっとも運転手である

私は、紅葉よりも右レーン走行と見慣れぬ道路標識に集中する道中であつたが。

●Marlboro/Bostonにて

2番目はBostonに隣接する都市Marlboroの太陽センサ(SAS)である。AACSでは軌道上で多様な運用を考えているが、熱制御や発電の関係から太陽の方向を知ることは常に重要である。SASは、そのためのセンサだ。

今度の相棒はどんなやつだろう。なんと面長の水色Mercedes。ほかのアメ車と比べても鼻が飛び出る。右レーンにも慣れたなと思っていたら、ナビは空港から海底トンネルへ入っていく道を示し、そのまま都会のBoston市内を横切るHighwayへ。首都高ばりに道はうねり、車線変更を要求される。時はちょうどワールドシリーズ。HighwayからRed Soxの本拠地であるFenway Parkが見えたようだが、車間の狭さとスピードの出し過ぎに、相棒の鼻をぶつけないように注意を払う旅路であつた。

●Limeil/Parisにて

最後はParis郊外のLimeilで製作されているスタートラッカ(STT)である。ミッションを達成するために、衛星の姿勢を高精度に決定する恒星センサである。

今度の相棒は、我が日本のToyota/Prius。遠くParisで同郷の相棒とコンビを組むことになるとは、これは移動にも力が入る。3回目で楽に運転できるだろうと思っていたが、花の都、Parisを甘く見ていたことをすぐに知らされる。入り組んだ路地に路上駐車当たり前、前後の車をバンパーでゆっくりと押ししてじわじわとスペースを広げることもあるそうだ。当然ホテルにも駐車場はなく、相棒の無事を祈りながら路上駐車する日々であつた。ホテルの主いわく、Parisでの路上駐車を取り締まりは9~18時の間だけらしいので参考にされたい。

●激しく移動せよ

沢木氏は『深夜特急』の中で、またこうも述べている。「旅で移動が多くなると、移動そのものを目的として感じるようになる」。まさにCDRを達成するために、移動を遂行しなければならなかつた。

PLANET-Cの開発に際し、宇宙研で普段から力を尽くしていることは言わずもがなである。しかし、いつもとは異なる場所に足を運ぶと、見えないことが見えてくる、本当は見えていても気付いていないことに気付けるようになる、ということは多い。製作の現場に赴いて、担当者と機器の設計について議論をすることで、機器の技術的な点とともに、自分が担当している仕事の意義が鮮明に見えてくる。この感覚がとてモチモチよかつた。激しい移動の果てに気付けたこと。そうだ、期待していた何かは、このことだつたんだ。(なりた・しんいちろう)



NY州Ithacaでの相棒と街並みの風景から。街は収穫祭とハロウィンの季節でにぎわっていた。

技術開発部 探査機器開発グループ 開発員

成田伸一郎



# 「市民と宇宙を語る」 JAXAタウンミーティング

2004年5月から「JAXAタウンミーティング」が行われています。第1回目は宮崎県都城市で行われました。土井隆雄宇宙飛行士の発案で、的川泰宣先生、樋口清司理事の理解を得て、初期のタウンミーティングが行われてきました。

2006年度からは、共催していただく自治体などを公募しています。理事、執行役、宇宙飛行士あるいはプロジェクトマネージャなどが登壇し、市民と意見交換を進めてきました。タウンミーティングは、JAXA内の組織的な企画・実行・報告・指示という経営管理サイクルの中にきちんと位置付けられるようになり、登壇者は理事長ほか、経営層のほとんどが当たり、市民から頂いた多様な意見を経営層が共有するよう進めてきています。

共催の地方自治体、教育委員会あるいはNPOのJAXAに対する希望も取り入れ、実りのあるプログラム構成を考慮することはもちろんですが、特に宇宙飛行士が登壇、あるいはTV会議システムを使ってヒューズトンから出演する場合には、地元の宇宙少年団の分団などとの交流会をタウンミーティング前に開催し、子どもたちへの貢献も行っています。

さて、私は2006年6月の第6回(佐賀県多久市)から第20回を超えた現在までコーディネータとして参加しています。どのようにタウンミーティングが進められているかをご紹介します。

まず地元の代表のごあいさつ、JAXA事業概要の説明が行われ、いよいよ登壇者の出番となります。通常は2名の登壇者がそれぞれ1部、2部を受け持ち、1人50分ほどの持ち時間のうち、最初の20分でプレゼンテーション、会場の皆さんとの意見交換が30分という割合です。コーディネータとしてはリラックスした雰囲気をつくりながらご

矢代清高

広報部 部長

意見を引き出すのが重要な役割になります。最初のご質問が出るまでに微妙なタイムラグがありますが、1問目が出てしまうと後は結構質問が続くというのが実態です。

タウンミーティングでのご意見などを以下にご紹介します。

まず、「小型固体ロケットの開発」です。M-Vロケット終了に絡み、どのような状況にあるのか、M-Vをやめた理由についての質問がよく出ます。

「日本の独自の有人宇宙開発計画」についても、いつごろならできるのか、どのくらいの経費になるのか、技術課題は何かなどの質問が出ます。この質問は、中国が有人宇宙飛行を行ったことも念頭にあってのものと思われれます。

「日本の探査計画」については、支持する傾向が大です。その中で際立つご意見は、「はやぶさ」「かぐや」のように感動を覚えたミッションを日本として今後も継続してもらいたい、予算獲得に苦勞しているようならそれを支持する国民(会場では私たちという表現でした)から募金を受け付け、

次代の探査プロジェクトを立ち上げる方策はないのかというものです。「募金を受け付けて探査プロジェクトを行えるか」は、課題として現在検討中です。

ユニークなご意見としては、ロケットや人工衛星の失敗を貴重な経験として、それを次代の子どもたちに伝えてほしいというものです。失敗し、落胆し、その後何くそとって品質改善し、成功に至るまでに人間的なストーリーやドラマがあるはずで、そのような失敗の裏にある人間ドラマを子どもたちへ教育として広めてほしいという趣旨でした。非常にいい意見だと思いましたが、実際担当している者としては、「人間ドラマ」として皆さんにご披露するほどのものはなかなかないのが実情のようです。

最後に、「マスコミと失敗との関係」です。日本のマスコミはロケットや人工衛星の失敗は大々的に報道するが、地道に成果を挙げているものや成功が続いているものについて、報道の量が少ない。そのため国民からは、日本の宇宙開発が何をしているのかよく分からないことになってしまう、というご意見です。最近は月周回中の「かぐや」がハイビジョン映像などを撮影し、国民の皆さんに「日本の月探査機」として、大いに認識していただいています。しかし、常日ごろの成果を報道発表し、新聞などにも取り上げられている一方で、国民の皆さんには印象に残らないのが実態かと思えます。

JAXA広報の本質的課題は、国民の皆さんから私どもの事業内容・成果を理解いただき、さらに進めて宇宙航空の研究開発に対する「熱い支持」を得るために、地道に、また効果的に広報を進めていくための方策を常に探ることにあると思っております。

JAXA内外からの広報へのご協力を、あらためてお願い致します。(やしろ・きよたか)



2007年10月28日に鳥取市さじアストロパークで開催されたタウンミーティングの様子

# ブラックホールの写真を撮りたい！

宇宙科学共通基礎研究系 教授  
坪井昌人

—— 地上の電波望遠鏡で、銀河系やほかの銀河の中心の観測を続けてこられたそうですね。そこには何かあるのですか。

坪井：例えば、銀河系の中心には太陽の400万倍もの質量をもつ見えない天体があります。野辺山の電波望遠鏡を使うと、その周辺からの電波をとらえることができます。そのような観測データから、そこでどんな現象が起きているのかを推定することができます。しかし、実際に写真を撮って現象を見ているわけではないんです。地上の望遠鏡はどれも分解能が低く、細かいところの写真は撮れないのです。

こんな話があります。友達が山道をハイキングしていたら、水がザーザーと流れる音が聞こえた。水煙も上がっていた。これは滝があるに違いない。どんなすてきな滝があるのだろうと見に行くと、ダムがあり、がっかりしたそうです。これまでのブラックホールの研究も、この話に似ています。こういう電波が観測されているから、ブラックホールのまわりはこうなっているはずだと。そういう研究に飽きてしまいました(笑)。百聞は一見にしかず。実際に写真を撮って確かめてみないと、何が起きているのかわかりません。

—— 写真を撮る方法はあるのですか。

坪井：それがスペースVLBI、電波天文衛星「はるか」が実証した方法です。電波天文衛星と地上の電波望遠鏡を組み合わせることで、高い分解能を実現するのです。私たちは2012年に、「はるか」の技術を発展させたASTRO-Gを打ち上げる予定です。ASTRO-Gと地上の望遠鏡を組み合わせることで、1億分の1度の角度を見分ける分解能を実現できます。それはハッブル宇宙望遠鏡の2000倍の視力に相当します。人類がもつ最も視力の優れた眼となるのです。

—— どんな写真が撮れそうですか。

坪井：ブラックホールには、ガスやちりが円盤状になって落ち込む降着円盤という構造があると考えられています。残念ながら銀河系の中心は観測しにくいのですが、ほかの銀河の中心で降着円盤の写真が撮れるかもしれません。今まで理論や観測で推定されてきたものが本当にあるかどうか、写真を撮って確かめることができる。それはとても魅力的なことです。例えば、実



つばい・まさと。1957年、東京都生まれ。1988年、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。理学博士。国立天文台助手、茨城大学助教授、国立天文台教授、国立天文台野辺山宇宙電波観測所所長などを経て、2007年より現職。次世代電波天文衛星ASTRO-Gプロジェクトに携わる。

はブラックホールのまわりに降着円盤など存在しないんだとか、意外な事実がぎっと見つかるはずですよ。地上の電波望遠鏡で観測を続けてきた私にとって、衛星プロジェクトに携わることは大きな冒険。しかし

ASTRO-Gにはチャレンジする価値があると考え、宇宙研に来ました。

—— 子どものころから科学に興味があったのですか。

坪井：ラジオ少年でした。中学生のころ、秋葉原の電気街に通って真空管などの部品を見つけてはラジオやトランシーバーを組み立てました。アマチュア無線もやりましたね。親が望遠鏡を買ってくれて、天体観測も楽しみました。だから子どものころから電波と天文が好きだったんです。

—— ただし、大学の学部は最初、化学科に進まれたそうですね。

坪井：化学も好きだったんですよ。私の通った高校では、今では考えられないことですが、放課後に実験室を生徒に開放してくれました。薬品を混ぜて色が変わったり、爆発して天井に染みをつくったり(笑)。これは面白いぞと思いました。

大学で学科を選ぶとき、化学科か天文学科か悩んだ末に化学科を選びました。化学の実験は得意だったのですが、化学を一生の仕事にするかどうかで迷いました。化学科の仲間には新しい材料の開発など工学志向の人が多かったのですが、私は自然の原理を追求する研究が面白いと思い、天文学科へ移りました。

—— ASTRO-Gの次の夢は？

坪井：2機の電波天文衛星を打ち上げて組み合わせることで、ASTRO-Gは地上の望遠鏡と組み合わせる、いわばハーフ・スペースVLBI。地上の望遠鏡が大気の影響を受ける分、性能が下がります。複数の電波天文衛星を組み合わせるのが、本当の意味でのスペースVLBIでしょう。ASTRO-Gが成功すれば、その後10年以内に十分実現可能です。アインシュタイン理論の間違いなど、現在の物理理論のほころびを示す現象の写真が撮れるかもしれません。そうなれば本当に面白いですね。

ISASニュース No.321 2007.12 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ピビア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

ピンチヒッターということで編集担当を急ぎよ拝命し、怒濤の原稿チェックでした。忙しい中、快く対応していただいた著者の皆さまに感謝致します。それにしても、あっという間の1年でした。歳のせいでしょうか……。皆さまの来年のご多幸をお祈りします。(山村一誠)

\*本誌は再生紙(古紙100%)、大豆インキを使用しています。

100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH  
SOYINK  
Trademark of American Soybean Association