



月に向かう月周回衛星「かぐや（SELENE）」のイメージ図 © 池下章裕

宇宙科学最前線

フオルミネッセンスを用いた 太陽電池用半導体基板の品質評価 ～1秒以下で微細な欠陥分布をとらえる～

田島道夫

宇宙探査工学研究系 教授

活況な太陽電池市場

近年、環境・エネルギー問題への関心の高まりから、持続可能なクリーンエネルギーとして太陽光発電が注目されています。そのような中で、太陽電池の生産量は毎年30%以上の急成長を継続しており、Si（シリコン）原料が不足するような事態にまで至っています。

地上用としては安価で光電変換効率も高めの多結晶Si太陽電池が主流で、全体の6割以上を占めています。従来の単結晶Si太陽電池と合わせると、結晶Si系太陽電池は9割を占めます。残りは薄膜系や化合物系の太陽電池で、割合は少ないですが次世代の太陽電池の担い手として重要です。特に、高効率のGaAs（ヒ化ガリウム）

系多接合太陽電池や放射線耐性の極めて高いCuInSe₂（CIS：セレン化銅インジウム）系太陽電池は宇宙用として最適であり、最近の衛星に搭載され始めています。

渴望される品質評価技術

太陽電池需要の爆発的な増加に伴い、太陽電池の高品質化が急務となっています。太陽電池の効率が上がればそれだけ設置面積は小さくなるため、低コスト化し原料も少なくて済みます。また、宇宙用としてもモジュールの重量を削減することができるので、効率の改善が非常に重要です。

現在の太陽電池の効率は理論限界にはまだ到達しておらず、さまざまな改善の余地があります。

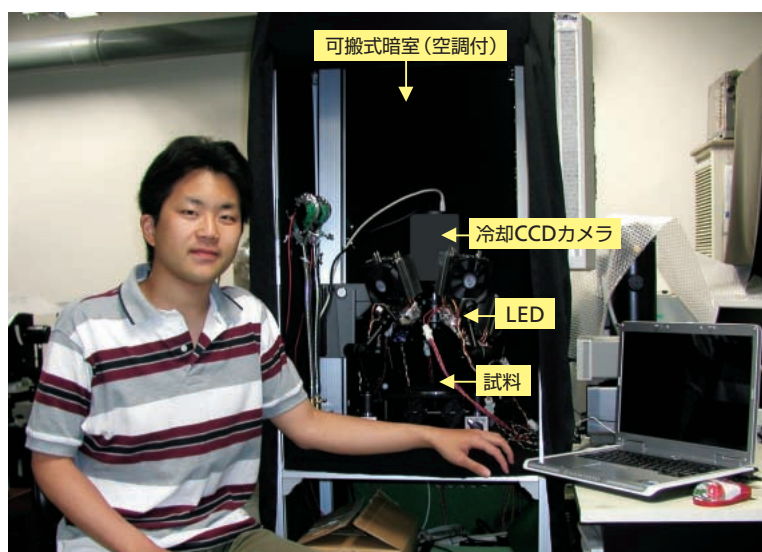


図1 PLイメージング装置とそれを組み立てた大学院生の杉本広紀君

太陽電池の高品質化のためには、品質を劣化させている要因がどのようなもので、どこにあるのか、それがどの段階で発生するのかを検査する技術が必要です。つまり、インゴットやブロックの状態から基板、セル、モジュールに至るまで、各製造工程における品質をミクロンオーダーの細密さをもって評価することが不可欠です。また、大量の試料を評価するためには、秒オーダーの検査速度が要求されます。さらに、評価が試料の特性に影響することや、生産性を損ねることを避けるため、評価法は非破壊・非接触かつ特別な前処理を必要としないことが要求されます。

太陽電池の評価は主に電流電圧特性などの電気特性で評価されていますが、太陽電池セル化したものでしか評価できず、セルのどの部分が悪いのかといった空間分解能を上げた評価は不可能でした。セル化前の基板を評価する手法としてマイクロ波光導電減衰法や表面光起電圧法などがありますが、測定時間が1枚数十分と長く、空間分解能も数mm程度と不十分でした。

このように、従来法は現在の太陽電池産業の要求を満たしておらず、革新的な評価技術が渴望されていました。そこで我々は、太陽電池の高品質化に貢献すべく、新しい評価技術の開発を進めてきました。

フォトルミネッセンス・イメージング法の開発

我々の研究室では、「フォトルミネッセンス(PL)」を利用した半導体の品質評価を行っています。半導体に禁制帯幅以上のエネルギーを持つ光を照射すると、光の吸収に伴い、電子—正孔対が過剰に生成されます。これらが再結合する際に発生する光をPLといいます。蛍光剤にブラックライトを当てると特有の光を発するのをご存知か

と思いますが、これも身近なPLの例です。PL強度は半導体の品質をストレートに反映するため、PL強度の試料面内分布を見ることで、半導体の品質を2次元的に高分解能で評価することができます。この方法は光を当て、出てきた光を検出するだけです。非破壊・非接触という利点を持ちます。また、特別な前処理を必要とせず、基板の状態でもセルの状態でも品質を評価することができます。

これまでは「PLマッピング法」と称する手法で、レーザーを試料に当て、試料をXY方向に走査して1点1点PL強度を測定して、PL強度分布を得ていました。しかしそれでは測定に時間がかかり過ぎるため、新たに「PLイメージング法」を開発しました。この手法は、一様な光を試料全面に照射し、発生したPL像の写真を撮るという非常にシンプルなものです。光源には高出力LEDアレイを用い、近赤外領域に感度を持つ冷却CCDカメラで写真を撮ります。

図1に装置の外観を示します。コンパクトで可搬式のため、太陽電池製造ラインへの組み込みも問題ありません。本装置の開発により、100万画素の高空間分解能と1枚当たり1秒以下の測定時間で、表面処理済みSi基板や太陽電池の品質を評価できるようになりました。

HF水溶液浸法による超高速・高精度化

PLイメージング法は、それだけでも十分強力な評価法ですが、すべての製造工程をモニターするためには、もうひとひねり工夫が必要です。製造工程初期のインゴットやブロックの状態、またそこから切り出された基板の場合、表面はそのまま特に処理をしているわけではありません。このような試料では表面状態が悪く、電子—正孔対が発光せずに再結合してしまうため、PL強度が低くなり、高速で正確な評価を行うことが困難になります。

そこで我々は、デバイスの製造工程で一般に用いられるフッ酸(HF)水溶液が、非常に良好な表面状態をつくり出すことに着目しました。そして、図2に示すように試料を希薄なHF水溶液に浸し、表面状態を最良にしたまま品質を評価する「HF水溶液浸PLイメージング法」を開発しました。プラスチック容器越しに光を当てPL像を撮影するだけなので、振動もなく液漏れやガス漏れの心配はありません。また、希薄な溶液を用い短時間で測定できるので、安全性の問題もありません。これにより、インゴットやブロック、基板の状態でも高速・高空間分解能評価が可能となりました。

図3は、従来法にて多結晶Si基板を評価した

例(左)と、HF水溶液浸PLイメージング法を用いて同一試料を同様の空間分解能にて評価した例(右)の比較です。暗い領域は品質の悪い部分を示し、黒い筋のように見えるのが基板の品質を特に悪化させている転位クラスターという欠陥です。

これまで我々のPLマッピング装置では、世界で最高の性能とはいっても、試料1枚当たり40分の測定時間を要していましたが、HF水溶液浸PLイメージングにより、測定時間が100ミリ秒まで劇的に短縮されました。また、基板の表面状態の影響を受けにくくなったため、より高精度に品質を評価できるようになりました。

宇宙用太陽電池にも応用

我々はさらに、単結晶Siや多結晶Siだけでなく、宇宙用として注目される高効率InGaP/GaAs/Ge(リン化インジウムガリウム/ヒ化ガリウム/ゲルマニウム)3接合太陽電池やCIS系太陽電池にも、PLイメージング法による評価を応用しました。これらの太陽電池は複数の異なる半導体材料が積層した構造をしているため、これまで各層を選択的に評価することが困難でした。

そこで我々は、多層セルは上部の層ほど禁制帯幅が広い材料であるため、長波長の光は上部の層を透過し、下部の層から発生したPLも上部の層を透過するという特性を利用し、複数の波長の光を用いて選択的に各層を評価できる「選択励起PLイメージング法」を開発しました。

これにより、宇宙用化合物太陽電池の各層ごとの品質評価も高速・高空間分解能で行えるようになりました。さらに最近では非破壊・非接触性や前処理不要の特長から、衛星搭載用太陽電池の不具合解析でも大きな役割を果たすようになってきています。これらについては、機会があれば、またご紹介したいと思います。

装置開発余話

筆者は博士論文の研究以来、ここで紹介したようなPLを利用した結晶評価の研究に取り組んできました。当初はPL評価法があまり普及していなかったもので、装置を自分で設計し、組み立て、調整していました。その後大きなプロジェクトに加わることで相応の予算が使えるようになり、また大掛かりな装置構成となり、そしてさらに個人的にも時間的余裕がなくなってきたこともあって、光学測定器メーカーと共同で装置開発することが多くなりました。しかし、今回のPLイメージング装置は、一見単純に見えるのですがいくつか課題があり、いつも協力してもらっている測定器メーカ

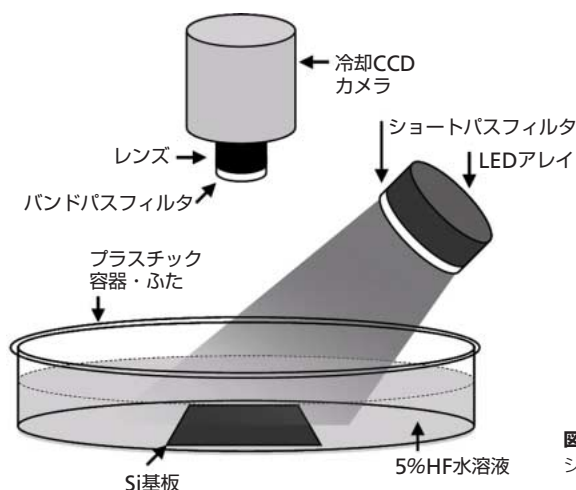


図2 HF水溶液浸PLイメージング装置の概略図

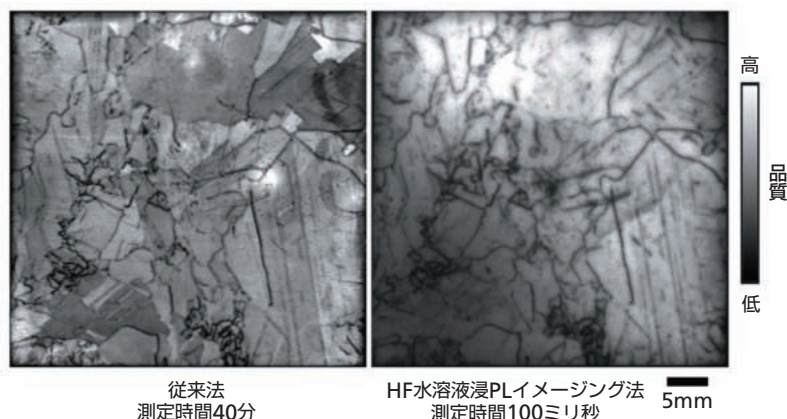


図3 太陽電池用多結晶Si基板の欠陥分布。左は従来法、右はHF水溶液浸PLイメージング法による評価。

一も共同開発に消極的でした。

このような状況で、モノをつくるのが得意な東京大学博士課程院生の杉本広紀君が装置作製に乗り出しました。これまで当研究室で培ってきたノウハウを背景に、専門メーカーに最高性能の光学部品を特注したり、通販で使えそうな部品を集めたりして、研究室のほかの学生も協力して装置を組み上げました。自分たちでつくった強みで、気付いたところはすぐに改良することができ、HF水溶液浸法への展開も迅速に行えました。

この分野は競争が激しく、Si太陽電池では世界最高の変換効率を実現させたオーストラリアのニューサウスウェールズ大(UNSW)のM. Green先生のグループが強力なライバルです。この装置の特許を申請し、関連の速報論文の採択も決まった後、プレプリントを担当者にお送りしたところ、「ほとんど同じことを狙っていたが先を越されてしまった」と悔しがっておられました。今回は、インハウスで装置を組み立てた機敏さが功を奏しました。

現在もさらなる高性能化を目指して改良に取り組んでいます。今年の夏から冬にかけてのいくつかの国際会議での発表が決まっています。また、商品化の引き合いも舞い込んできました。ここでご紹介した技術が、地球の温暖化対策に貢献するよう、また宇宙プロジェクトを成功に導くよう、研究室一丸となって努力しています。

(たじま・みちお)

微細なオーロラを観測する「れいめい」

オーロラは、極地方の上空100～300kmで大気が発光する現象です。明るくなったり暗くなったり、渦巻いたり、カーテン状の形で波打ったり、くしの歯のように見えたりします。色もいろいろで、緑や赤、ピンクなどがあります。

オーロラが発光する直接の原因は、地球に向かって降り込んでくる電子やイオンなどのオーロラ粒子です。これらの粒子は比較的高いエネルギーを持ち、大気粒子に次々と衝突しながらそのエネルギーを失っていきます。大気粒子が受け取ったエネルギーの一部は光として放出されます。光の波長は粒子種によって決まり、酸素原子の緑(波長557.7nm)や赤(630.0nm)、窒素分子のピンク(670nm)、窒素分子イオンの青(427.8nm)などは、オーロラの中でも明るく光ります。

オーロラを肉眼で見ると、解像度は良くても1kmくらいです。高感度カメラで観測する場合は、100m程度、またはそれ以下の細かな構造も多く見つかります。オーロラの形や動きは、地上に置いた高感度カメラを使って細かく調べられてきました。オーロラ粒子も、FAST衛星(アメリカ)などによる高時間・高空間分解能観測の結果、100mスケールの現象が見つかっています。

また、衛星を使って地球スケールでのオーロラの全体構造を観測し、太陽活動との因果関係なども調べられています。ところが、オーロラ発光層の微細な構造とオーロラ粒子の振る舞いが対応付けられた例は、ほとんどありません。これまでのオーロラ観測衛星が、発光層の撮像と粒子の観測を微細なレベルでは両立させていないからです。

多くのオーロラ粒子は、極域上空1000～1万kmで加速され、地球に向かって降り込むと考えられています。オーロラ発光層上空の加速域は、発光層の微細構造をつくり出す上で重要なはずですが、それは、加速によって得られたエネルギーの大小が、オーロラ発光の強弱に直接か

かわるからです。このため、オーロラ観測衛星はオーロラ加速域での加速現象をターゲットとし、オーロラ粒子だけでなく、電場や磁場なども含めた総合的なプラズマ観測を行ってきました。プラズマ観測には多くの場合、スピニング型衛星が適します。ところが、オーロラ発光層を詳細に、時間分解能も高めて撮像しようとする、スピニング型衛星では困難です。

「れいめい」衛星は、オーロラ発光層を高分解能で撮像観測するために三軸姿勢制御衛星とし、オーロラ粒子(電子・イオン)観測器の形状と配置を工夫、さらには観測時に磁場方向を追尾する姿勢制御を行います。スピニング型衛星でないことのデメリットを補い、撮像観測と粒子観測を両立させています。

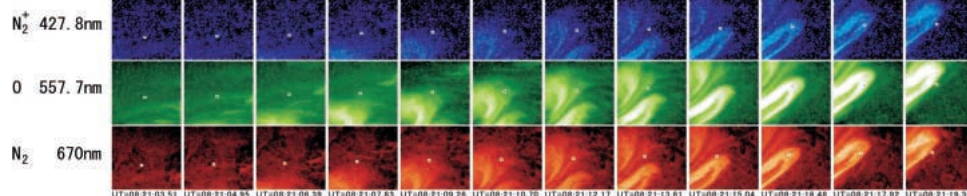
次ページの図は「れいめい」衛星によるオーロラ画像と電子の同時観測例です。画像中の白点はオーロラ発光高度を110kmとした場合、「れいめい」衛星自身と磁力線でつながっている場所を示します。図下のパネルは電子の観測結果で、電子の運ぶエネルギー量を色で表しています。3個のパネルのうち、一番上が降り込んでくる電子に対応します。オーロラ粒子は磁力線に沿って降り込むため、オーロラ画像中、白点での発光強度がオーロラ粒子の降り込み構造と対応していると期待されます。細かく解析することで、2km以上の大きさを持つ構造では、よく対応することが分かりました。

「れいめい」衛星では、ブラックオーロラもとらえられています。ブラックオーロラは、オーロラ帯の低緯度領域でよく観測される、はっきりとした構造を持たない広がったオーロラの中に、発光しない領域が見られる現象です。ブラックオーロラは、微細な形状を持つことが知られています。その成因として、オーロラ加速域に通常と逆の電圧差がかかり、オーロラ電子が存在したとしても上向きに加速されてしまっているのだろうと考えられてきました。ところが、

ロケット・衛星関係の作業スケジュール(7月・8月)

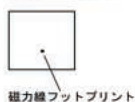
	7月	8月
相模原		S-520-23号機 噴合せ試験
		PLANET-C ミッション機器単体性能試験
		PLANET-C ミッション機器総合機能試験
	PLANET-C 構造モデル試験	PLANET-C プロトモデル総合機能試験
内之浦		S-520-23号機 フライトオペレーション
種子島	SELENE 衛星の射場作業・フライトオペレーション	

オーロラ画像 REIMEI/MAC Date=2007 Jan. 27

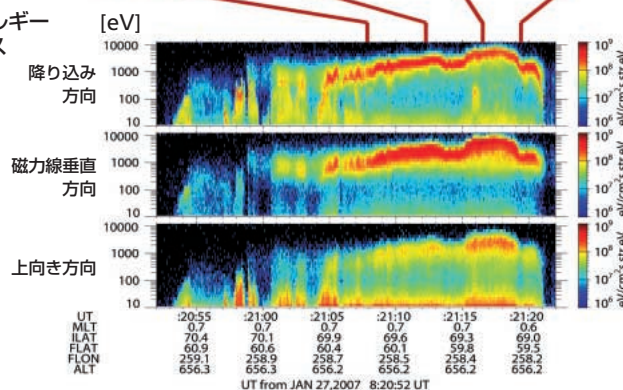


「れいめい」衛星では、下向きに加速されたオーロラ電子が存在する領域であってもブラックオーロラを数多くとらえています。オーロラ電子の加速自体は可能であっても、オーロラ発光のために必要な量の電子が加速領域に供給されていないことを意味する観測結果です。

「れいめい」衛星の運用は、相模原キャンパス新A棟屋上の直径3mアンテナとノルウェーの民間局(KSAT)で行っています。2007年5月からは、国立極地研究所との共同観測により、南極昭和基地にて「れいめい」衛星のデータ受信を開始しました。衛星回線を利用し、観測データは受信後30分ほどで相模原に到着しています。(浅村和史)



電子エネルギー
フラックス



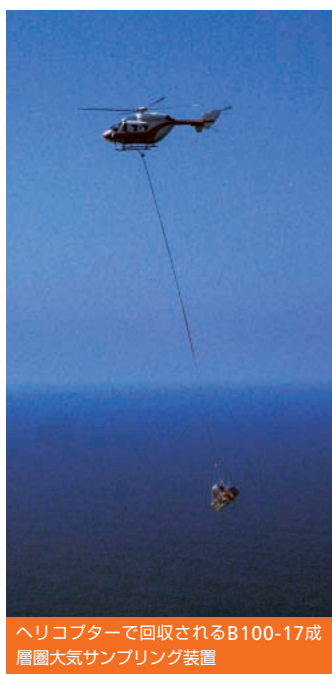
「れいめい」衛星によるオーロラ画像とオーロラ電子の同時観測例。画像中の白点は「れいめい」衛星自身と磁力線でつながっている場所(磁力線フットプリント)を示す。

平成19年度第1次気球実験

平成19年度第1次気球実験は、5月11日から6月15日まで三陸大気球観測所において実施されました。気球実験は来年度より北海道大樹町において実施されることとなり、これまで以上に地元の方々の注目を集める中、大気球3機と小型気球1機が放球されました。

BVT60-3号機では、世界で最も薄い厚さ2.8 μ mの気球用フィルムを用いた容積6万立方メートルの気球により世界最高高度53.0kmの更新を目標としましたが、放球直後の気球頭部のフィルム破損のために気球が降下しました。不具合の原因については、今後詳細な解析を行い、次回に向けた対応を検討する予定です。

B300-1号機は、気球からの自由落下による無重力実験システムの実証を目的としました。落下開始から超音速パラシュート開傘までの約35秒間にわたって、長時間の安定した良質の微小重力環境が得られたとみられ、詳細なデータ解析によって気球落下式無重力実験システムの開発に役立てていきます。また、無重力環境を利用した科学実験として搭載した、微小重力環境での燃焼状態を観測する実験では、熱対流



ヘリコプターで回収されるB100-17成層圏大気サンプリング装置

の有無の違いによる火炎状態の相違が確認されました。

B100-17号機では、気球の上昇・下降中に高度14.5kmから34.6kmまでの11高度において、希薄な成層圏大気を大量に採取しました(写真)。今後、採取された成層圏大気試料の高精度分析が行われ、温室効果気体の地球規模の収支や成層圏大気の化学・物理過程の理解に直接貢献する、各種温室効果気体や化学的に活性な気体の濃度、同位体比の高度分布、経年変化が明らかにされます。また、今年出発する第49次南極観測隊が昭和基地で実施する成層圏大気採取実験用の新開発小型クライオサンプラーについても、高度20kmにおいてあらかじめ設定した大気採取シーケンスを実行し

たことが確認されました。

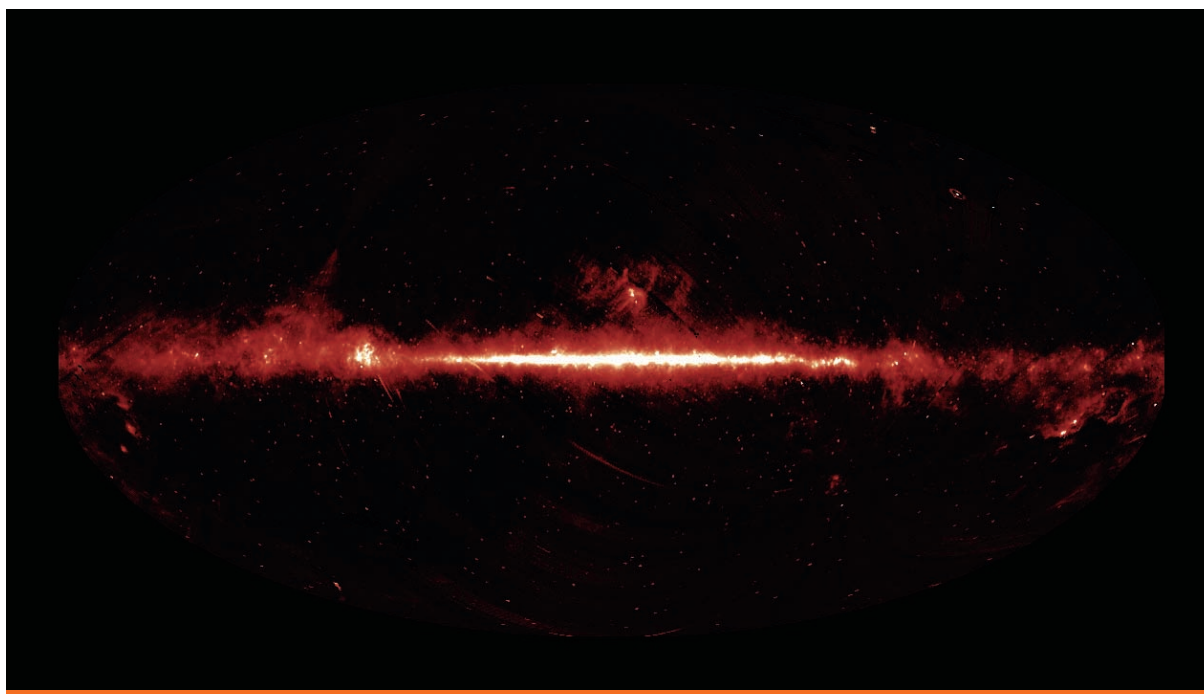
B50-49号機では、新しいPCMテレメータシステムおよびシリアル通信コマンドシステムの遠距離通信性能と、夜天観測用CCDカメラからの遠距離画像転送性能を試験し、今秋の日本・ブラジル共同気球実験での遠赤外線干渉計実験実施に必要な性能を有することが確認されました。(吉田哲也)

観測開始から1年、「あかり」が見た宇宙

「あかり」が2006年5月に本観測を開始してから、1年がたちました。この間、「あかり」には大きなトラブルもなく、赤外線全天サーベイ観測と約3500回の指向観測を、順調に行ってきました。1年間に全天を2周巡り、確実に天体を観測するために我々が課した「2回以上の観測」が達成できた領域は、全天の90%以上になりました。全天を赤外線で観測するのは、1983年に打ち上げられ

たIRAS衛星以来。そして「あかり」はIRASよりも長い波長のデータを加え、数倍詳細な宇宙の地図を作成することができます。このような観測は、今後もまずないでしょう。「あかり」は観測装置を冷却する液体ヘリウムがなくなるまで、引き続き観測を続けていきます。

今回発表するのは、これまでに得られた全天サーベイデータから作成した、赤外線で見えた宇宙の姿です。

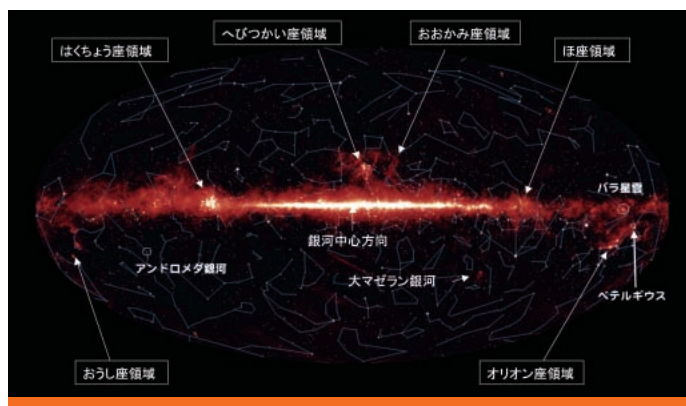


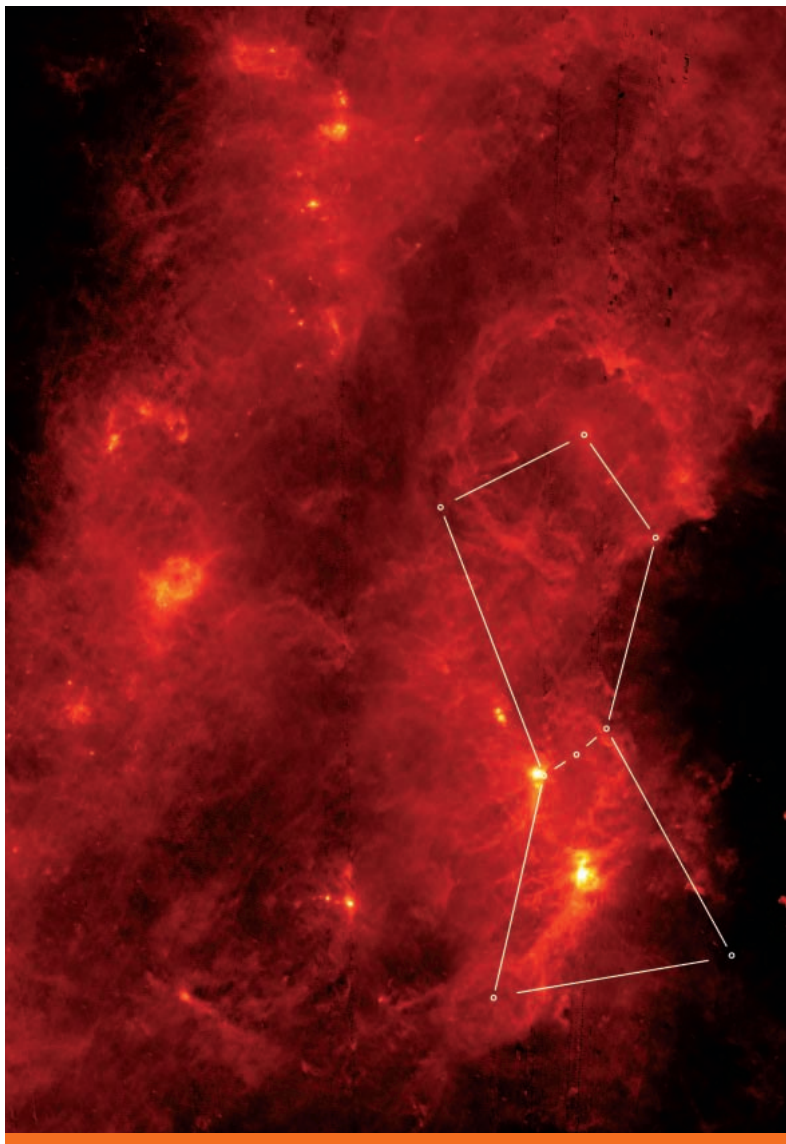
この図は、波長 $9\mu\text{m}$ で見た全天の地図です。実際には、太陽系内の塵が放つ赤外線（黄道光）が圧倒的に明るいのですが、その成分をデータ処理で差し引いて、遠方から来る赤外線を示しています。この図は、ちょうど世界地図のように、全天の地図を平面上に広げています。中心から帯状に左右に広がる明るい部分は、銀河系の渦巻き状の円盤部分を、その中にある地球から真横に見たものです。太陽系は、銀河系の中心から外れたところにあるので、明るさに偏りがあります。画像の中心付近の明るくなっている部分が、我々の銀河系の中心の方向です。この方向は、塵だけでなく、年老いた赤く明るい星（赤色巨星）が密集していて、特に明るく見えています。帯の中、あるいはそれから連なる部分には、所どころ明るく光っている場所があります。そこでは星が盛んに生まれていて、生まれたての星で暖められた塵が強い赤外線を放ち、明るく輝いて見えるのです。

上と同じ画像の上に、星座の線や著名な天体、活発に星が生まれている場所を示しました。おなじみの星座が分かりますか？

宇宙の中には、銀河全域で活発に新しい星を生み出している天体もあります。画面右下に見える大マゼラン銀河も、そのような天体の一つです。大マゼラン銀河は、我々の銀河系のすぐそばにある小さな銀河ですが、はるか彼方の銀河にはさらに激しい活動をしているものが数多くあります。この画像では見えませんが、そのような銀河は宇宙の歴史を探る「あかり」の格好のターゲットです。

この図は、株式会社アストロアーツのステラナビゲータを使用して名古屋市科学館によって作成されました。

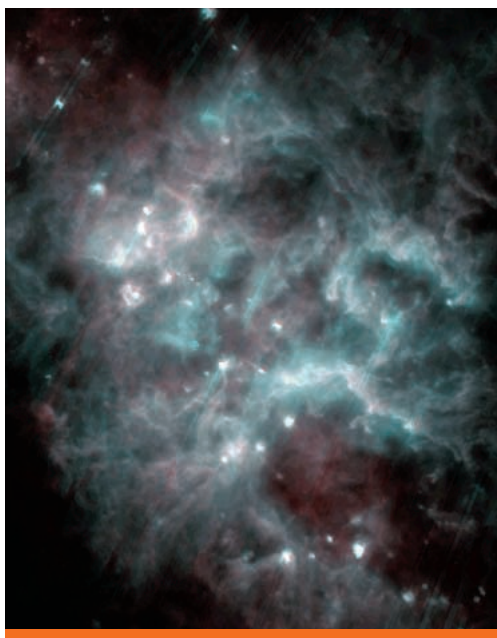




オリオン座を含む $30^{\circ} \times 40^{\circ}$ の領域を、波長 $140\mu\text{m}$ の遠赤外線で観測した画像です。これほど広い領域を一望する画像を作成できるのは、全天サーベイ観測を行っている「あかり」ならではのことで、画像の右半分がオリオン座、左側はいっかくじゅう座を上下に通る天の川です。画面全体がぼんやりと光っているのは、天の川の中に漂う冷たい塵が放つ赤外線によるものです。

オリオン座の下側にひとときわ明るく輝くのは、オリオン大星雲。ここでは大量の星が生まれ続けており、それによって暖められた塵が強い赤外線を放っています。また、三つ星の左側の明るい部分は、有名な馬頭星雲を含む領域で、可視光では暗黒星雲として見える冷たい塵の雲も、赤外線では輝いて見えることが分かります。左側中央付近に見える広がった明るい星雲はバラ星雲で、ここでも新しい星が生まれつつあります。それ以外にも、画像の中にはたくさんの星が生まれつつある場所が、明るく光っています。

オリオンの頭に当たる星を中心に大きく広がった輪が見えるでしょうか？これは、この質量の大きい高温の星の出す強い光が、周囲の塵を押しつけているところだといわれています（過去の超新星爆発によってできたという説もあります）。



「はくちょう座X領域」と呼ばれる領域の「あかり」による遠赤外線イメージです。波長 $90\mu\text{m}$ と $140\mu\text{m}$ の画像から、疑似カラーの合成をしました。大きさは $7.6^{\circ} \times 10.0^{\circ}$ 。この領域は、銀河系の渦巻きの腕のうち太陽系が属するものを、内部から腕の伸びる方向へ透かして見えています。そのため、太陽系から $3000 \sim 10000$ 光年程度の範囲にある天体が、見掛け上、狭い範囲に集まって見えています。画像の左上から右下にかけて、天の川が横切っています。

画像の中にたくさん見える明るく輝いている天体は、質量の大きい星が生まれている場所です。生まれたての星からの光が、周囲のガスを電離し、塵を暖めて赤外線でも明るく輝かせています。このように質量の大きい星が誕生する場が密集して見える領域は、全天でも多くありません。また、この画像をよく見ると、大きく空洞になったような暗い部分が見えます。これは、成長した高温の星の集団が、強い光により周囲のガスと塵を吹き払ってしまったものです。

(山村一誠)

月周回衛星「かぐや (SELENE)」種子島で衛星公開

6月18日、種子島宇宙センターにおいて、「かぐや※ (SELENE)」のプレス向けの衛星公開を実施しました。3月末に筑波宇宙センターから種子島に搬送されて以降、衛星の再組立、最終的な電気性能試験など各種試験が行われ、打上げの形態に組み上がったところで今回の公開となりました。

当日は午前中、雷警報が出るなど不安定な空模様で、プレスの皆さんを乗せた飛行機の種子島着陸や衛星の見学に支障が出るのではないかと、関係者一同大変心配しておりました。しかしながら、衛星公開が始まる1時間前に雷雨もびたりとやみ、梅雨空を裂いて、久しぶりに太陽がさんさんと輝く青空の下でのプレス公開となりました。光り輝くという意味を持つ「かぐや」の素晴らしい未来を暗示しているかのようで、とてもうれしく思いました。

今回は、種子島宇宙センターにおける衛星公開としては最も多いプレスの皆さんのご参加をいただき、大変盛況でした。竹崎観望台の記者会見室において「かぐや」の概要が説明された後、衛星組立棟で「かぐや」のフライトモデル、「月に願



い」を」キャンペーンのネームシートの展示品、ならびに種子島宇宙センター展示館へ来場された皆さんが応援メッセージを寄せ書きしてくださった「かぐや」の旗などを紹介し、プレスの皆さんによる撮影が大変精力的に実施されました。なお、搭載用のネームシートはすでに6月5日に「かぐや」への貼り付けを終えており、「かぐや」とともに月に向かうことになります。

今後、「かぐや」は推進薬の充填などが実施された後、7月には、いよいよ到着するロケットへの搭載など射場整備の最終作業が行われ、9月半ばに打ち上げられる予定です。

日本人の最も身近な天体である月を目指して、国民の皆さまのご期待に沿うようにSELENEプロジェクト関係者一同、全力を尽くして「かぐや」の成功を目指して努力致しますので、今後もしっそうの応援をよろしくお願い致します。

(祖父江真一)

※月周回衛星SELENEの愛称は、約1万1000の応募の中から、日本人が月のイメージとして連想する竹取物語のかぐや姫にちなんで、最も多くの票を得た「かぐや」に決定しました。

「すざく」衛星が2歳になります！！

2005年7月10日に打ち上がったX線天文衛星「すざく」は、宇宙空間で2歳の誕生日を迎えます。思えば、この1年間で「すざく」にはいろいろなことがありました。残念ながら昨年11月に、4台あるX線撮像分光カメラ(XIS)の一つが壊れました。直後の12月に「すざく」の観測結果を主題にした国際会議を京都で開催したところ、予想をはるかに超える約400人の研究者が集い、世界の研究者を巻き込んで活発な議論が行われました。会議で発表された主な成果は、今年1月に日本天文学会から、欧文報告『「すざく」特集



地上の天体望遠鏡で撮影された「すざく」衛星。2007年5月31日20時24分30秒、西はりま天文台にて。露光の間にカメラの視野を通過した「すざく」衛星の残像が線状に写っている。(写真提供：西はりま天文台 飯塚亮)

号」として出版されました。「すざく」はその後も第一級の成果を出し続け、今年9月には『「すざく」特集号」第2弾も刊行される予定です。

生き残った3台のXISと、もう一種類の検出器である硬X線検出器(HXD)は、順調に観測を続けています。この記事が世に出る7月には、世界中の研究者に誕生日を祝福されていることと思います。5

月には初期観測のデータが一挙に世界に公開されました。今まで以上に多くの世界中の科学者がこぞって、「すざく」を用いて宇宙の謎を探ろうとしています。

(前田良知)

月の鉱物分布探査

月周回衛星「かぐや(SELENE)」はマルチバンドイメージャ(MI)とスペクトルプロファイラ(SP)を搭載し、月表面で反射された太陽光を観測することにより、月全球の鉱物分布を調べます。MIでは月面観測史上最高の空間分解能で表層分光画像を、SPでは世界最初となる可視～近赤外波長域の連続反射スペクトルを月全体にわたって取得します。

■月全球の鉱物分布把握の重要性

月表層の鉱物分布は、従来の探査機データでは定性的にある種の鉱物が多い、少ないといったことしか分かっておらず、今回MIやSPのデータにより初めて詳細な鉱物分布(鉱物の種類や量比、化学組成)を調べることができます。月表層の鉱物分布を調べることで、鉱物が生成される元マグマの温度・圧力条件や、その化学組成に関する情報が得られます。さらに、それらの情報から、月の形成初期にあったと考えられているマグマオーシャン(マグマの大洋)からの地殻の形成や、海(月表面のうちウサギなどの模様として見られる暗い部分で、噴出した溶岩流が固まった領域)の溶岩流活動の歴史など、月の進化過程や、月の起源を大きく制約するマントルなど月深部の化学組成を推定することができます。

また、アポロ計画やルナ計画によって地球に持ち帰られた試料はすべて月の表側から採集したのですが、つい数年前までは、これらの試料を研究することで月全体の起源や進化を知ることができると考えられていました。それが、最近の月隕石に対する研究などから、月の裏側には表側とは異なる元素の割合(Feに比べてMgの量が多い)を持つ鉱物が分布している可能性があるといわれ始めており、月裏側の鉱物分布を知ることにも注目が集まっています。

■マルチバンドイメージャ(MI)

MIは、LISM(月面撮像/分光機器)観測機器の一つで、可視および近赤外波長域用各1本ずつ合計2本の集光系を持っています。これら2本の集光系により合計9つの波長での月表層分光画像を取得して、鉱物の種類ごとに異なる特徴的な色(吸収帯)を識別し、全球にわたり月表層の鉱物分布を知ることが目的としています。MIのデータは、これまでに得られているデータと比較して1桁高い月面空間分解能(月面から高度100kmで観測する場合、可視域で約20m/画素、近赤外域で約60m/画素)と高い信号/ノイズ比(可視波長域で100以上、近赤外波長域で300以上)を持っています。

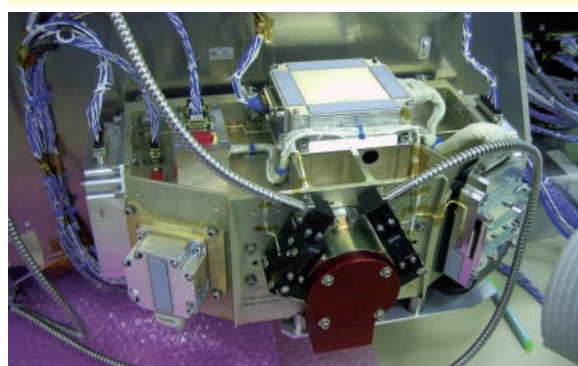
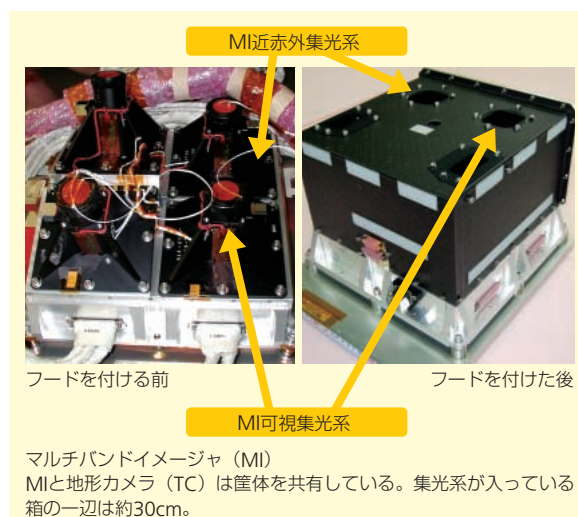
これらの性能を活かし、月の内部物質が露出していると考えられているクレータの中央丘や内壁に存在する数百mの微細な層構造の探査をすることで、地殻の垂直構造に関する重要な情報が得られると期待されます。また、形成年代が古いため鉱物の色(吸収帯)が不明瞭になっていて解析が困難であった月高地(月表面で明るく見えている領域)の調査にも、威力を発揮すると考えています。

■スペクトルプロファイラ(SP)

SPは、MIと同じくLISM観測機器の一つで、月表面で反射された太陽光を0.5～2.6 μm の波長範囲で連続分光観測を行い、得られた反射スペクトルより月表層の鉱物量比や鉱物の化学組成を求めることを目的としています。月表面に存在する主要な鉱物は、輝石、かんらん石、斜長石、イルメナイトの四つであることが知られています。SPで得られる反射スペクトルを用いて、鉱物の種類ごとに決まっている吸収帯を詳細に調べることで、例えば輝石に含まれる元素の割合(CaやMg、Feの割合)に応じて吸収帯の中心波長位置がシフトする性質に基づいて、鉱物の化学組成を推定することができます。

またSPにおいてもクレータの中央丘や内壁は重要な観測対象であり、SPデータを用いて月表層の鉱物量比や鉱物の化学組成を求め、MIデータからそれらの分布状態を把握することによって、統合的な解析を行うことができます。

MI、SPともに、これまでに観測機器フライトモデルの製造および光学性能試験など観測機器単体で実施するすべての性能試験を終了しており、現在は種子島宇宙センターにおいて、最後の試験や打上げに向けた準備を行っています。(おおたけ・まきこ、まつなが・つねお)



スペクトルプロファイラ(SP)

英国での1年

英国入りしたのは3月末だった。イギリスに行くのは初めてだったが、おそらくとても寒いのだろうと想像してジャケットにコートまで羽織っていたのだが、Heathrow空港に降りてすぐに、自分の選択を悔やむことになった。蒸し暑い。脱ごうにも、もうスーツケースは満杯。汗だくになりながら、Woking行きのバスに乗る。バスの中でコートとジャケットを脱ぐと、車内はそんなに暑くはなく、快適だったと記憶している。正直、1年も前のことなのでよく覚えていない。ただ、バスの車窓から見えた風景はとても記憶に残っている。バスはWokingに続く森の中の道を走っていたが、まばらにレンガづくりの民家が目に入ってくる。空は曇っていて薄暗く、逆にそれが車窓から見える情景を印象深いものにしていった。

2006年3月末より、英国のGuildfordにあるSSTL (Surrey Satellite Technology Ltd.)に1年間ご厄介になった。SSTLは小型衛星の開発で世界的に有名な会社だ。元はサリー大学の一研究機関だったが、1985年に株式会社として独立した。最近では、ヨーロッパ版GPSであるGalileo

の試験機GIOVE-AおよびGIOVE-Cの開発をESAから受注するなど、活発に活動している会社だ。

私が英国に着いた当初は、SSTLはまだサリー大学内のSSC (Surrey Space Centre)という建物に本拠を構えていた。通称BAと呼ばれる建物だ。中はオフィスというより、大学の研究室といった感じだ。2人1部屋になっていて、私は、Keith Clarkという通信系のシステムエンジニアと相部屋となった。彼は、元はテレビ会社のエンジニアとして働いていたらしいが、その後SSTLに勤めるようになったそうだ。SSTL創設当初からの数少ない「古株」メンバーだが、まだ未婚らしい。年齢は、あえて聞かなかった。気さくな人で、昼食などには必ず誘ってくれた。

SSTLには、日本人のスタッフもいた。Hashida

さんという姿勢・軌道制御系の技術者だ。元は日本で軌道関係の仕事をしていたらしいが、SSTLの仕事の方が性に合っていたらしく、奥さんと一緒に英国に移住したそうだ。私にはとうてい、まねのできない転職だ。

イギリスに着いた当初は、Hazel Farmというサリー大学の宿泊施設を借りて住んでいたのだが、新学期(9月)には出ていってくれと言われていたので、さっさと自分で部屋を借りることにした。早速、HashidaさんにGuildfordの不動産屋を紹介してもらったが……、高い、高過ぎる。一番安い部屋でも750ポンド。当時は1ポンド=210円だったのだが、単純計算で月15万7500円！信じられない。郊外に出ればもっと安い部屋もあるが、車がなければとても通える距離ではない。車を買って郊外に住むか、家賃が高くても便利な場所に住むか。

結局、後者を選んだ。家賃は最終的に光熱費等込みで800ポンドとなったが、立地条件は最高だった。Friaryという3階建てのショッピングセンターの屋上にあるアパートだ。取りあえず住処が整い、だいぶ落ち着いた。

SSTLでは、GPSと加速度計を併用して長楕円軌道を精密に決定する手法に関して研究を行った。GPSシミュレータで長楕円軌道におけるGPS測位データを取得してくれたReynolt、いつも私の研究を気に掛けて仕事の手を休めて話をしてくれたGPSチームリーダーのMartin、寡黙だけど時々冗談を言うRob、クリスマスパーティーに誘ってくれたRudy、Michel、日本好きでよく話し掛けてくれた受付嬢のFaiza、そして公私にわたっているいとお世話をしていただいたHashidaさん。

旅行にも出掛けた。普通の観光では行かないであろう、風情のある田舎町Rye、英語のBathの語源になった町Bath spa、巡礼地として有名なCanterburyなど。特にSalisburyの大聖堂が印象に残っている。1000年も前にどうやってあんな建物をつくったのか。先人たちの知恵と努力に頭が下がる。

1年前、右も左も分からず、不安いっぱいになり込んだWoking行きのバス。1年後、退屈そうに、半分眠りながら揺られていたHeathrow行きのバス。

あっという間の英国生活だった。

(いけなが・としのり)



SSTLのスタッフと。左からMartin, Michel, 筆者, Reynolt。

月・惑星探査推進グループ開発員
池永敏憲



昔話あれこれ

村山定男

国立科学博物館 名誉館員

「あの人、まだ生きているんですか?」と皆さんに言われそうな私、83歳になりました。脳梗塞4年、がん9年の「車いす人間」。もう何のお役にも立ちませんが、的川先生のご依頼なので、昔話でもさせていただきます。

今年は西暦2007年、ソ連が最初の人工衛星スプートニク1号を打ち上げてから満50年というので、あちこちで話題になっているようです。50年前の1957年は、国際地球観測年(IGY)、それに日本の南極観測船「宗谷」が初めて南極に向かった年でもありました。

そのころは何となく一般の人たちの宇宙への関心が高まっていたようで、その前年(1956年)には17年ぶりの火星の大接近があって私たちは忙しい思いをしましたし、後年私も館長を務めた東京・渋谷の五島プラネタリウムが開館したのも1957年の4月でありました。

しかし、当時私たちにとって一番大きな関心事は、近く人類初の人工衛星が打ち上げられるということでした。米国ではヴァンガードと名付けられた人工衛星打上げ計画が進んでおり、多くの情報が寄せられていました。今の若い方々には想像ができないかもしれませんが、当時は人工衛星が打ち上げられても、地球周回軌道に乗ったかどうか、正確な軌道は予測できず、いつごろどこを飛んでいるのかもつかめませんでした。そのため、発射後なるべく早く軌道を決めるため、人海戦術でいこうということになっていました。そこで考えられたのが、なるべく大勢の天文アマチュアの人たちに協力してもらって、人工衛星の飛来を見張ろうという方法です。日本ではいくつかの大新聞社がスポンサーになって、たくさんアマチュアの観測班が組織されました。私は読売新聞社が後援したグループのお世話をしましたが、全国の総指揮官は当時の東京天文台長、宮地政司先生でした。そのころ、天文台からの指令や予報には電報が使われていました。私もどこかにその見本を保存してあるはずですが、今では本当に隔世の感といったところです。

さて、衛星を見張るには朝夕の薄明のころ、地上は暗くても衛星には日光が当たっているときでなければ駄目でしたが、多くの小望遠鏡を、少しずつ仰角を変えて南北に並べ、それぞれに1人ずつの観測者が付いていました。衛星が視野に入ってきたら「何番!」と声を上げて、中央を通過するときに「ハーイ!」と言って時刻が記録され、星図と照合して高度と子午線通過時刻を記録するというものでした。のぞきやすいようにダイアゴナルプリズムを入れた望遠鏡を特注し、像が反転するため裏返しに印刷した星図までつくりました。ヘリコプターを飛ばし模擬実験をしたり大変な騒ぎでしたが、アメリカのヴァンガードが失敗を重ねているうちに、10月4日になってソ連の人工衛星が上がったというので大騒ぎになりました。

慌てて望遠鏡の角度や方向を変えたりしましたが、最初に発見したという班の成功?が新聞の第一面に載ったところ、なんと通過方向が反対で間違いだったことが分かり、落胆するやら大笑いするやらという事件もありました。スプートニクからは電波信号も発信されていて、大急ぎで受信器をセットしましたが、ピーピー

ーピーという信号音は今も耳に残っています。

私は国立科学博物館に勤めていたもので、いつの間にかマスコミの人たちとの付き合いが多くなりました。日食だの、火星接近だの、流星雨だのという、必ず質問攻めにあいました。何でも記者さんたちが言うには、三鷹の天文台は遠いので上野が近くて便利とのこと。これまた今昔の感に堪えませんが、当時の大学や天文台はまだ「象牙の塔」的な気風が残っていたので、近寄りにくかったのかもしれない。

当時はテレビの放送が始まってまだ数年しかたっていませんでしたが、テレビにもよく引っ張り出されました。そのころよくお相手をしたのが、糸川英夫先生でした。先生は私より12年年長の子年のお生まれだったことなどもあって、何かと仲良くしてくださいました。先生は天衣無縫な方だったので、本番が始まってしばらくしてからスタジオに飛び込まれ、それまで私が1人で頑張るということもありました。

あるとき、私と目を合わせ「村山さん、学者はあんまりこんなことはしない方がいいんだよね」と言ってニヤリとされたこともありました。昔、学者は「通俗講演」をしたり、「啓蒙書」を書いたりするものではないという気風があったのですが、博物館屋の私はその点、気楽でした。その後もマスコミとの付き合いは延々と続き、いろいろ面白い体験をしました。

初めて地球を周回したガガーリン少佐とNHKで対談したとき、握手した手の意外に柔らかく温かった記憶、1969年のアポロ11号月着陸のときの大騒ぎなど、思い出はたくさんあります。

この半世紀、人類史上最もすさまじい科学技術の発展に「自分は何一つ貢献していないや」という無念さ?もありますが、その経過をつぶさに見させていただいたというのは得難い幸せでした。昔話はまだいろいろありますが、この辺で失礼致しましょう。

(むらやま・さだお)



人工衛星観測風景(1957年)。中央後方が筆者。

思考せよ！

高エネルギー天文学研究系 助手

尾崎正伸

——いきなりですが、趣味は？

尾崎：最近、スポーツ用自転車に乗っています。大学以来ですから十数年ぶり。自転車も進化しているんですね。軸受けと車輪の抵抗が小さく、タイヤも高い空気圧に耐えられる。だから、少しこぐだけでぐんぐん加速して、氷の上を滑るように進むんです。単純に気持ちいいのですが、そういうとき、つい物理屋の癖が出てしまいます。いちいち分析してしまうんですよ。良い自転車はペダルをこぐとこいだ分だけ加速し、こぐのをやめてもそのまま進みます。ブレーキをかけるとようやく速度が落ちる。これって慣性の法則なんですよ。すっかり自転車にはまってしまって、慣性の法則を実感しながら走っています。

——ほかにも、いろいろ考えていますよね。

尾崎：はい。今日の服は空気抵抗が大きいな、とかね。何かを見るたび、感じるたびに注意して観察し、これはなぜだろうと考えることが大事です。私の専門はX線天文学ですが、研究でも同じ。人工衛星が観測した天体のデータを手にしたとき、なぜこう見えるのか、なぜこう動くのか、背景にある原理を常に意識して、とことん考えなければいけません。そうすれば、何が自然で何が不自然かを見分けることができるものです。『レンズマン』という古典SFの中でよく出てくる「思考せよ！」というフレーズが好きですね。考えることを途中で放棄してしまいたくなることもありますが、データが足りないなど原理的に無理だということまで、とことん考えることが重要です。

——なぜX線天文学の研究を？

尾崎：子どものころからものをつくるのが大好きでした。大学院に進むときに、自分で装置をつくり、それを使って実験ができて、しかも私の頭でも理解できる内容、という条件で研究室を探していたら、X線天文学になったのです。足を踏み入れてみると、空の彼方の研究対象から来る光を見ることしかできず、直接温度計を挿し込んだり、プラズマを網ですくってこることもできない世界。とてもややこしいところに足を突っ込んでしまった……。

——現在は主にどういう仕事、研究をされているのですか。

尾崎：X線天文衛星「すざく」が観測したデータは、使いやすい形式に変換して整理した後、研究者に渡されます。そのためのシステムの維持や改良に関する仕事が多いですね。私も研究者



おさき・まさのぶ。1970年、東京都生まれ。京都大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。1997年、宇宙科学研究所助手。専門はX線天文学。電子機器およびコンピュータシステムの設計と開発を得意とし、「すざく」「はやぶさ」「ひので」などの検出器や共通系機器の開発に携わる。現在は、「すざく」のデータを科学解析向けに加工する業務とともに、データ解析、将来の衛星に向けた開発研究を行っている。

としてデータを解析したいのですが、それに時間を取られ、本来の仕事がほとんどできていません。システムを滞りなく回すことは

大事ですが、研究者にとってはやはり雑用。昔は研究者が下支えもこなすこの体制でうまく回っていたのですが、組織も大きくなり、衛星もたくさん動いている今、体制を見直す時期かもしれない。そもそも、研究者が整理されたデータだけを見ていればよいかというと、それは違う。配布されるデータは、万人向けの無難な処理しかしていません。性能ぎりぎりのところを引き出そうとしたら、解析をする研究者自身が元データから見ていく必要があります。

——「すざく」では、どんな観測をしているのですか。

尾崎：第1回の一般観測公募で採択されていた観測が、ようやく3月に行われました。観測したのは、IC443という超新星残骸です。超新星爆発のエネルギーによって原子が1億度もの高温に熱せられ、元素ごとに特有のX線を出します。実は、原子の温度には、運動で定義されるものと内部状態で定義されるものがあり、普通は後者の温度の方が低くなっています。ところが、「あすか」衛星の観測から、IC443では温度の高低が逆転しているらしいことが分かりました。そこで、精度も感度も高い「すざく」で観測し、本当に逆転しているのか、またその原因を明らかにしようとしています。さすが、「すざく」。きれいなデータを取ることができたので、解析が楽しみです。

——その先は？

尾崎：「すざく」には自分で設計した装置が載っていないので、今は他人のふんどしで相撲をとっている状態です。装置を立案し、製作し、衛星を打ち上げ、データを取って解析するまで、全部にかかわりたい。これは本来当然のことですが、なかなかできないのが現状です。多くの研究者が当然のことをするためには、小さなプロジェクトを増やしていく必要があるのかもしれない。早く自分のふんどしで相撲をとりたいですね。

ISASニュース No.316 2007.7 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

参加した大気球実験（@三陸）が無事終了し、軽い虚脱状態のときに編集担当が回ってきました。職場復帰を兼ねて校閲させていただきました。「すざく」はもう2歳なのですね。時の流れの早さを痛感します。

（石川毅彦）

*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

