

「はやぶさ」に続く次期小天体探査機案(原図出典: NASA/JPL, NASA/JSC, APL, NAOJ, NIPR, ISAS/JAXA, MEF, A. Ikeshita, Honda & Honda, T. Noguchi & H. Yano)

宇宙科学最前線

宇宙科学ビジョンにおける太陽系探査の役割  
～次期小天体探査への挑戦～

矢野 創  
固体惑星科学研究系助手

「はやぶさ」探査機が小惑星イトカワ往復の旅路に出発してから、1年がたちました。電気推進エンジンを連続運転する「はやぶさ」の運用は、ケプラー軌道に沿った従来の人工惑星と違い、まるで石炭をくべながら進む蒸気機関車のようです。実験科学者である私が運用スーパーバイザーの一人として「運転手」の任務にやりがいを感じるのも、毎日の運用自体が「はやぶさ」とそれに続く太陽系探査の発展に必要な工学実験だからです。

そう、電気推進や小惑星サンプル採集など、「はやぶさ」が実証する多くの新技術は、次世代の探査機でも活用されることが期待されています。では、2010年代初頭に「はやぶさ」を引き継ぐ太陽系探査は、どのような科学目標に挑むべきなのでしょう？ これはJAXAが掲げる宇宙科学への「ビジョン」に直結する問い掛けであり、(驚いたことに!) E. クランツがア

ポロ13号の飛行主任を務めた年齢に並んでしまった36歳の私にとって、もはや自分の世代が真正面から考えるべき問題なのです。

惑星科学の成立と「はやぶさ」の使命

その問いに答える前に、そもそもなぜ科学者は太陽系探査を行うのかを考えてみます。

狭い領域「科」の専門家としての「科学者 (scientists)」がヨーロッパに出現したのは、19世紀半ばだといわれています。そんな近代科学の中核を成した「物理学」を朝永振一郎は、「我々を取り囲む自然界に生起するもろもろの現象——ただし主として無生物に関するもの——の奥に存在する法則を、観測事実をよりどころに求めつつ追求すること」と定義しました。一方E. シュレーディンガーは、「我々は、すべてのものを包括する統一的な知識を求めようと

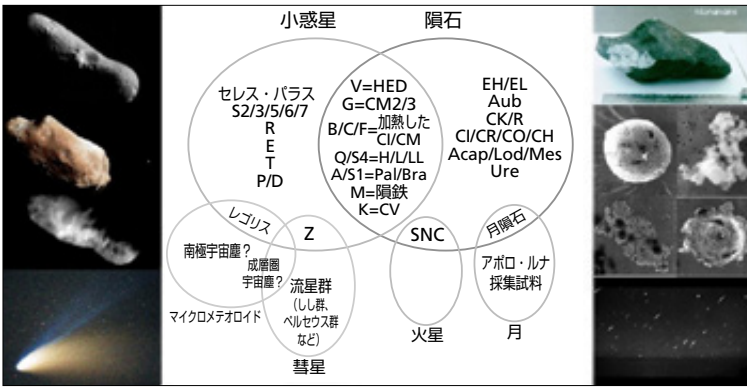


図1 月・火星起源以外の隕石・宇宙塵試料の母天体については、まだ仮説の域を出ていない。(図版：廣井・矢野)

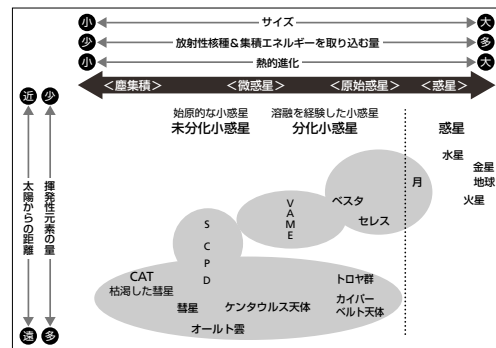
する熱望を、先祖代々受け継いできました」と認めて、自然を要素分割して理解していく「物理学の世紀」から、多様な「科」を統合する学問「生命科学の世紀」へと、20世紀が変遷していく流れを作りました。

そんな中で「惑星科学」は、古典物理学を基盤にしながらも、天体観測・物質分析・再現実験・理論計算などの研究手法を「統合」した学際領域として成長してきました。20世紀後半には宇宙機による「その場探査」という武器も手に入れて、今日の姿になりました。ですから「太陽系探査」とは、単独ミッションで目標天体すべての謎を解くというよりも、他の手法では得られない現地情報を収集して、全体像を総合的に描くのに貢献する活動なのです。

「はやぶさ」を具体例に考えてみましょう。望遠鏡観測で発見された数十万個の小惑星のうち、反射スペクトル型で分類されているものは2000以上に上ります。ただしこれらのデータは、各小惑星の表層物質のみを反映した低空間分解能の情報であって、そのパターンはローカルな地形、粒子の形状・サイズ、宇宙風化作用の強さなどに大きく依存します。また、小天体の破片である隕石・宇宙塵もすでに数万個が地上で採取、カタログ化されています。しかしながら、すべて大気突入以後に地球環境と反応しており、月・火星・ヴェスタを除くと個々のサンプルの母天体は特定できていません。

河原で拾った小石を見ただけでは産出した上流の地層の位置、集積時期、形成条件を推定するのが難しいように、起源が不明な隕石のみでは太陽系内の空間分布の情報に読み直せません。そもそも地上の

図2 原始太陽系の異なる場所でどんな進化段階を調べたいかで、探査すべき小天体は変わる。(図版：矢野・安部)



隕石・宇宙塵コレクションが太陽系全体の特徴をバイアスなく反映しているかどうか判断できません。小惑星イトカワ(S型)を「はやぶさ」の搭載カメラや分光計で全球的に計測した上で、産状の情報を持ったサンプルを地球に持ち帰り、特定の隕石グループ(普通コンドライト)と直接比べる。そこまでできて初めて、小惑星のスペクトル型データベースと隕石・宇宙塵の分類データベースの間を研究者が往来できる橋が一本架けられます。これこそが、サンプルリターン探査ならではの貢献です(図1)。

## 21世紀の太陽系探査が挑むテーマ

最初の質問に戻りましょう。「はやぶさ」の成果を踏まえた次世代探査は何を目指すべきか?

まず、21世紀の宇宙科学すべてに共通した目標があるとすれば、それは「宇宙の始まりから私たち一人ひとりの人生に至るまでの、連続したストーリー」を紡ぎ出して、人類の世界観を刷新することだと思います。その中で惑星科学が果たす役割は、天文学と宇宙論が構築しつつある、「ユニバースが誕生から現在の構造を持つに至った歴史物語」と、地球科学が描き出しつつある「全地球史」の間を、(1)太陽系内のすべての天体の誕生と進化、(2)太陽系以外の多様な惑星系の形成、そして(3)生命前駆物質の化学進化、それぞれのシナリオに矛盾がないようにつなぎ合わせる法則を導き出すことでしよう。

1990年代のNASAは、「Origin」というたった一つのキーワードを掲げて、宇宙、恒星、地球、生命それぞれの「起源」を探ることに観測・探査の目標を集約させました。原因と結果は自然法則の連鎖で結ばれていますから、「起源」という初期条件を明らかにすると並行して、それぞれの時間・空間スケールでの「進化(Evolution)」のベクトルを支配する法則を見つけ出さなくてはなりません。私はこの「進化」こそ、JAXAのすべての宇宙ミッションを貫くキーワードになるのではないか、と思っています。JAXAの「太陽系科学探査の中長期的目標」は、(A)太陽系の起源・進化、(B)惑星の多様性、(C)生命の起源、(D)磁気圏の統一的理解、の4つです。(A)~(C)は、原始太陽系の情報を保持している小天体の進化過程を解明することが鍵となります。その際、ガス雲の収縮、塵から天体への成長、微惑星の合体、内部の熱的分化に至るまで、原始太陽系の進化過程のどのイベントを調べるかによって、訪問すべき小天体を正しく選ばなくてはなりません(図2)。

以上から、「はやぶさ」に続く太陽系探査では、原始太陽系の異なる進化段階の痕跡をとどめる小天体を複数訪問して、それぞれの時間スケール・物質・構造・環境などの情報を明らかにしていくのが一つの道筋でしょう。具体的なテーマとしては、第一に、「は

やぶさ」のようなサンプルリターンを主要スペクトル型の小惑星に少なくとも一例ずつ行い、隕石・宇宙塵のデータベースとの対応付けを、なるべく早く決着させること。第二に、太陽系の時間スケールで生命前駆物質の化学進化がどれほど進むかを調べる。第三には、未分化小惑星から月や固体惑星の大きさまで成長する過程での内部構造の進化を追うこと、だと考えます(図3)。日欧米では現在、1980年代の国際ハレー艦隊に続く、彗星・小惑星探査の「第二の黄金期」を迎えています。これら3つのテーマは、十年後も解決すべき目標として私たちの挑戦を待っているはずで

### 次期小天体探査の始動

さて、90年代後半から私たちはMUSES-C計画の一環として、行きやすい小惑星を探査観測やミッション設計の改良を続けてきました。その後、全国200名以上の有志が参加した「小天体探査フォーラム(MEF)」を通じて、次期ミッション案を4年にわたって検討しました。そして今年3月の宇宙理学委員会で「小天体探査ワーキンググループ(WG)」の設立を申請し、認めていただきました。

現在は、理工学の若手が作るコアメンバー会議を毎週開き、5月末の第1回WG全体会議と、重点開発項目ごとに分けた「探査機計測」「サンプラー改良・試料分析」「表面探査パッケージ」「ミッションデザイン」「航法・誘導制御」の5つのサブグループの始動に向けて準備中です。今後の詳細検討では、「はやぶさ」の設計・試験・運用で学んだ教訓を活かして、科学的意義と工学的実現性が共に高いミッションの実現と、開発期間・コストの抑制につなげたいと思います。以下に、これまで検討された代表的な2案をご紹介します(詳細は以下を参照、[http://www.as-exploration.com/mef/mef\\_report/mef\\_report.html](http://www.as-exploration.com/mef/mef_report/mef_report.html))。

#### ●ミッション案1: スペクトル既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン

小惑星は反射スペクトル観測から、1ダースほどのスペクトル型に分けられています。現在の小惑星帯の一番内側にはS型やE, M, V型、次にC型、さらに外側にはP型、そして木星トロヤ群などにはD型が多く分布していることが統計的に明らかになっています(図4)。ここから、火星と木星の間では原始太陽系の形成後、半径方向に物質があまり混ぜられなかったことが予想されます。そこでこの案では、1~2機の探査機を主要なスペクトル型に属する近地球型小惑星複数個にランデブーさせ、全球マッピングや表面・内部構造の調査後に、サンプルを地球に持ち帰ります。探査対象としては、S型は「はやぶさ」で訪問するので、S型に次いで多く、炭素質コンドライト隕石の母天体と目される未分化小惑星のC型、母天

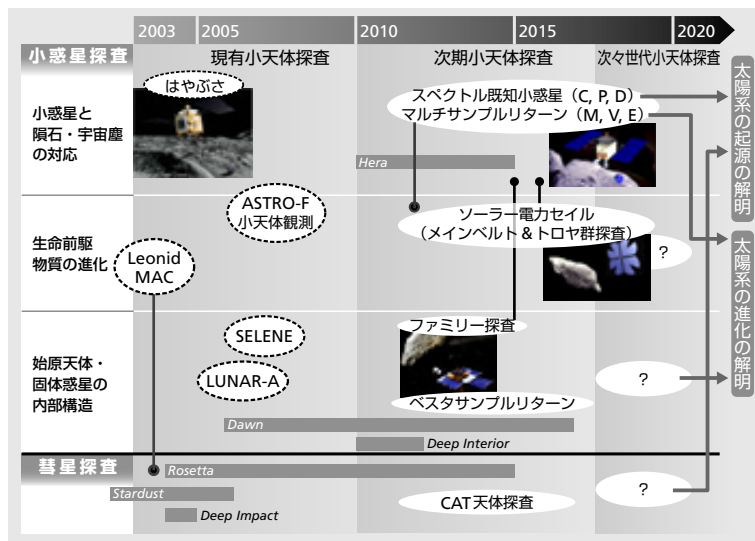


図3 独自に検討した小天体探査ロードマップ。破線のだ円は現行の日本のミッション、白いだ円は将来ミッション案。帯は海外の探査機。(図版: 矢野・安部)

体内部の熱的分化を探るためのM型、E型、V型、そして生命前駆物質の宝庫と予想されるD, P型に注目しています。そして小惑星と隕石・宇宙塵の分類の対応付けを決着させ、原始太陽系における物質の空間分布に焼き直します。なお、複数の小惑星からサンプルを持ち帰るためのミッション設計には、ロケットの本数、探査機の台数、探査機1機が訪問する小惑星の数というパラメータの組み合わせを、理工学の要求・コスト・リスクなど、さまざまな面から評価しなくてはなりません。

#### ●ミッション案2: 「ファミリー」ミッション

似た軌道要素を持つ小惑星帯天体の一群「族(ファミリー)」は、原始惑星が衝突破壊してできたと考えられています。この案では、同じファミリー内の複数の天体を訪問することで、母天体の内部構造、衝突破壊・再凝集の履歴、その物理・化学的素過程の解明を目指します。探査機は、(1) 3大ファミリーの1つである「コロニス族」のS型小惑星に3~6年間で3~4個、または(2) 同一族ながら多様なスペクトル型を持つために、2つの小惑星が最近衝突した現場ではないかといわれている「ナイサ・ボラーナ族」の中で、3年間で2個、スペクトル型が異なる小惑星に接近します。その後フライバイしながら、各天体表面へ自律航法型の子機を衝突させ、地下数mの深さから放出される破片を採集して、地球に持ち帰ります。これは次期小天体探査の3つのテーマのうち、特に小惑星の内部構造探査に挑むものですが、新しい開発要素がやや多いのが課題です。(やの・はじめ)

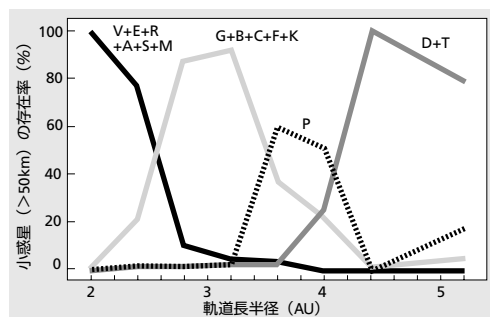
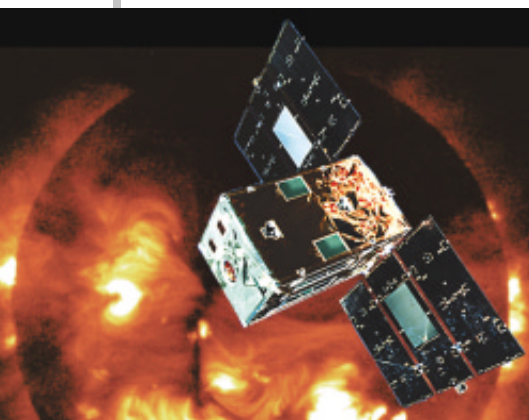


図4 小惑星帯では日心距離によって小惑星のスペクトル型ごとの存在率が大きく変化する。(図版: 廣井より改変)

## 「ようこう」(SOLAR-A)の停波，運用終了

「ようこう」は1991年8月30日、宇宙科学研究所の鹿児島宇宙空間観測所からM-3SIIロケット6号機により打ち上げられた。日米、日英米の国際協力で製作されたX線望遠鏡とX線分光計を含む4種類の科学観測装置により、太陽コロナとそこで起こる太陽フレアをほぼ連続的に観測してきた。そして太陽コロナがさまざまな時間スケールで激しくダイナミックに構造を変えていること、フレアなどの爆発現象が太陽コロナ中の「磁気リコネクション」現象であることを、世界で初めて観測的に疑問の余地なく示すという画期的な成果を筆頭に、数多くの科学成果を生み出してきた。



「ようこう」と軟X線望遠鏡で撮影した太陽

当初想定されていたミッション寿命3年を超えた時点でも、衛星およびすべての搭載科学観測装置がすこぶる健全な状態であり、結果として10年3カ月の長期にわたって科学運用を継続することができ、太陽活動周期の1周期(約11年)をほぼカバーした世界初の太陽観測衛星となった。この間、軟X線望遠鏡が取得した太陽画像は600万枚を超え、硬X線望遠鏡が検出した太陽フレアは3000例を上回った。これらの太陽観測データはインターネットに乗って世界中を駆け巡り、リアルタイムで太陽活動を監視する最適なデータのの一つとして国の内外で広く使われるとともに、世界中の太陽研究者によって貴重な科学データとして活用されてきた。(『ISASニュース』2003年新年号の「ようこう」特集参照)

しかし、運用の長期化に伴い、各種部品の性能劣化が目立つようになった。とりわけ運用9年を経過した2000年秋からは、姿勢制御系の各種センサ/アクチュエータの劣化の進行により、これに対処するため複雑で困難な衛星運用を余儀なくされるようになっていた。そして2001年12月15日、南太平洋上空で金環日食帯に「ようこう」が突入するという状況に直面し、通常姿勢制御を中断して待機姿勢に移行する過程で、衛星が予期せぬ回転を始めてしまった。太陽指向姿勢を失った結果、太陽電池パドル

の発電量および搭載蓄電池の充電量の減少を来し、観測機器の電源が遮断され、科学観測が中断されるに至った。科学観測を再開するためには、搭載蓄電池を充電し、その電力を用いて太陽指向姿勢を回復する必要がある。衛星はスピン状態に陥っており、太陽電池パドルの発電量が下がっているため、消費電力を最小化する措置を取り、スピン状態(軸方向、周期)の変化により搭載蓄電池の充電が可能となる条件が整うのを待つこととした。この間、太陽電池パドルに日照があるときには衛星としての最低限の機能を発揮させることができたので、衛星状態監視のための最小限の運用を継続してきた。

残念ながら、2年間にわたって搭載蓄電池の充電を再開できる条件が整わなかったこと、また衛星の軌道高度が落ちてきており、仮に科学観測が再開できたとしても「ようこう」の大気圏再突入までの期間はたかだか3年程度と見積られることから、このたび、断腸の思いで科学観測再開の追求を断念することとした。

4月21日、この経緯と状況を宇宙開発委員会に報告、了承を得て、4月23日「ようこう」最後の運用として、電波発信停止作業を行った。運用終了後、「ようこう」プロジェクトを成功に導いた小川原嘉明名誉教授(前「ようこう」衛星主任)を囲み、ご苦労さん会を開いた。振り返ってみると、衛星の提案から運用終了までほぼ20年もの長きにわたって、「ようこう」は我々の生活の中心に座っていた。思い出話は尽きなかったけれど、長寿を飾った衛星だけに、「お通夜」に付きものの湿っぽさはまったくなかった。

「ようこう」10年有余の科学運用で取得された観測データは、今もなお、世界中の太陽研究者により貴重な研究資料として活用され続けている。このデータベースを引き続き維持・管理してさらなる成果を得るとともに、データ解析ツールを次期太陽観測衛星SOLAR-B(平成18年度夏季打上げ予定)に引き継ぐこととする。

皆さん、本当にご苦労さまでした。(小杉 健郎)



最後の運用を終えて  
NEC航空宇宙システム(株) 木村雅文氏撮影

## 日本化学会化学技術有功賞を受賞

「超薄膜ポリエチレンを用いた高高度気球の開発」

社団法人日本化学会が主催する平成15年度化学技術有功賞に「超薄膜ポリエチレンを用いた高高度気球の開発」が輝きました。これは、「極めて薄いフィルムを用いて、高度50km以上を目指した新しい気球を開発し、科学観測用飛翔体として実現する」というテーマから進めた研究でした。ポリエチレン素材を担当して下さった宇部興産株式会社の市村晃司氏、ポリエチレンフィルムの製作を担当して下さった柴田屋加工紙株式会社の小林勉氏、気球フィルムの統括を担当した私の連名による受賞でした。3月27日には関西学院大学西宮上ヶ原キャンパスで表彰式が行われ、3名とも出席しました。

化学技術有功賞の受賞は、気球に携わる人々がテ

マに掲げられた一つ一つの問題を解決し、藤倉航装株式会社の人々が非常に高い品質管理下で気球を製作して下さったことで、世界最高高度気球を実現に至らした結果が評価されたものと考えています。化学技術有功賞への応募を推薦して下さった宇宙航空研究開発機構の井口洋夫顧問をはじめ、候補者として推薦していただいた大気球観測センター長の山上隆正教授に心より感謝の意を表します。(松坂幸彦)



左から市村さん、小林さん、筆者。

## 日本航空宇宙学会技術賞を受賞

「M-Vロケット開発研究」「マイクロ波放電式イオンエンジンシステム」

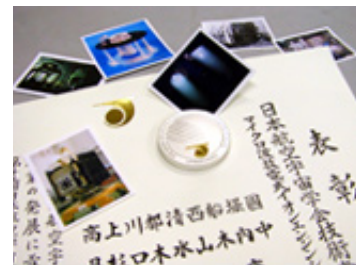
4月6日、東京大学山上会館において、平成15年度日本航空宇宙学会技術賞を「M-Vロケットの開発研究」とともに「マイクロ波放電式イオンエンジンシステム」に賜りました。

思い起こせば、私が大学院生として駒場の宇宙研に来たとき、「さきがけ」を打ち上げるM-3SIIロケットがロールアウト(完成)しました。M-3SIIロケットの深宇宙投入能力は150kg程度であり、電気推進の搭載は適いませ<sup>かな</sup>んでしたが、しばらくすると搭載能力を3倍に増強するM-Vロケットの開発が始まりました。M-Vロケットに電気推進を載せて宇宙推進の一翼を担いたいと誓い、研究を続けました。このイオンエンジンはマイクロ波駆動されるため「 $\mu$ 」と呼称していますが、 $\mu$ ロケットの最上段高比推力モータとしての活躍をひそかに願ってのことです。イオンエンジンはよ

うやく「はやぶさ」にて宇宙実証できたばかりで、運用履歴や軌道マヌーバ(変換)の結果に一喜一憂する毎日のため、完成の域にあるM-Vロケットと並び評されるのは心苦しい限りです。技術の洗練とさらなる性能向上のため、電気推進の次なる宇宙への挑戦を願ってやみません。

M-Vロケットならびにマイクロ波イオンエンジンの技術研究開発にご尽力された多くの方々に感謝申し上げます。

(國中均)



授与された表彰状とメダル

## ロケット・衛星関係の作業スケジュール (5月・6月)

	5月		6月	
相模原	始		LUNAR-A FM総合試験	末
	始		ASTRO-EII FM総合試験	末
				中旬 ASTRO-F FM確認試験 末
	始		SOLAR-B FM姿勢系評価試験	末
				中旬 SOLAR-B FM一次囀合せ 末
	始		INDEX FM総合試験	末
	11日~12日	S-310-34号機FM計器合せ		中旬 S-310-34号機 FM囀合せ 下旬
			(IA富岡)	中旬 M-V-6号機 頭胴部仮組立 下旬
三陸	中旬	大気球実験	上旬	
筑波	始		SELENE FM単体環境試験	末

(FM : Flight Model)

# 浩三郎の 科学衛星秘話



「おおぞら」



井上浩三郎

EXOS-C衛星は1984年2月14日17時00分、M-3Sロケット4号機によって打ち上げられ、遠地点高度865km、近地点高度354km、軌道傾斜角74.6度、周期96.9分の準極軌道に投入され、「おおぞら」と命名されました。

大気については、それまで地表に近い高度10kmから100km程度までの中層大気の観測と研究が取り残されていました。1970年代を経て、中・上層大気の観測が地上からのリモートセンシングで行われるようになり、中層大気中の大気組成や温度の測定が可能になってきました。このようなさまざまな手段による観測に室内実験やデータ解析などを総合して、国際的に中層大気の研究を進めようという計画が各国の研究者間で検討され、「中層大気国際協同観測計画(MAP)」が1982~1985年の間実施されることになりました。

「おおぞら」は、そのMAP計画への積極的な協力の一環として、全地球的な中層大気の観測を行うために計画されたものです。データ受信は、内之浦(KSC)だけでなく、南極の昭和基地とスウェーデン北部のエスレンジ基地でも1日5回行われました。これは、データ取得率を上げるためと、オーロラ現象の解明に好都合なことから選ばれたものです。

## 中層大気の観測に大きな成果

後述するように、打ち上げてすぐバッテリーの劣化というアクシデントに遭遇しましたが、関係者の粘り強い努力によって4年にわたり多くの貴重な観測データを取得し、中層大気の観測で貴重な成果をもたらしました。(1)中層大気中の微量成分による太陽光の吸収スペクトルの観測、(2)極域および南太平洋地磁気異常帯上空における高エネルギー粒子の観



衛星軌道投入で重要な役割を担う衛星タイマーの試験風景。後川昭雄先生(右)と古橋五郎さん。

# 中層大気観測衛星「おおぞら」

測などが主なものです。特に大きな成果の一つは、磁場に関する電子温度の非等方性を確認したことであり、これにより電子温度測定に関するいくつかの混乱を説明できるようになりました。

## 再び残留推力の恐怖

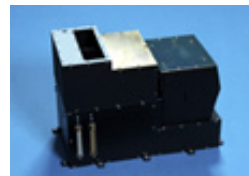
第3段モータとの分離5秒後に、衛星が約1.3Gの衝撃を受け、それ以降半頂角約2.5度のコーニング運動が生じました。これは、おそらく第3段モータがその残留推力によって衛星に接近し接触したため、と推測されました。さらにこのとき、衛星は残留ガスによる汚染(コンタミ)を受け、太陽電池パドルおよび外被表面の分光特性が変化したので、その後の運用に重大な支障が生じました。

## 高温によるバッテリーの容量低下

軌道投入直後の全日照とコンタミによる衛星表面の分光特性変化が重なり、予想をはるかに超える高温にさらされたバッテリーの容量が、定格8AHに対し1.6AHまで劣化する不具合が発生しました。この劣化により衛星の運用が大変な制約を受けるため、地上でのシミュレーションなどいろいろとその回復方法を試みましたが、有効な方法は見つかりませんでした。衛星運用管理を担当された中村良治先生は「容量が5分の1に減少したバッテリーが過放電にならないように、残容量を注意深く計算しながら観測装置をオン・オフして運用しました」と、当時の苦勞を語っています。

## 役割を終えて 太平洋上空で消滅

「おおぞら」は、日本時間1988年12月26日14時11分53秒(周回数2万6799)、KSCでの受信を最後に、再びその上空に帰って来ることはありませんでした。計算によれば、同日の日本時間23時39分、ニューギニア上空の高度90kmにおいて消滅したと思われます。(いのうえ・こうぞぶろう)



上は太陽光の地球大気による散乱・吸収量を測定するエアロゾルオゾン観測装置(ALA)、下は大気周縁赤外分光器(LAS-S)。

# 電波を通して眺めた金星の地形

## 明らかになってきた金星表面の姿

金星の表面の姿は長い間、謎であった。厚い二酸化炭素の大気に覆われていて、しかも硫酸から成る雲が可視光を遮るために、外側からは表面の様子が分からない。

1960年代から金星探査が始まり、旧ソ連の着陸船が次々と金星表面に着陸した(計10機!)。厚い大気で減速されるため、金星着陸ミッションは比較的容易なのである。金星表面は、地球の火山性の岩石、玄武岩であることが分かったが、観察したのは着陸船の周囲だけである。Pioneer Venus, Venera 15, Venera 16, Magellan探査機は、合成開口レーダーにより厚い大気に隠された表面地形を明らかにした。特にMagellanは、Sバンド(波長12.6cm)のレーダーにより金星表面の97%をカバーする最高120mの解像度の画像を得ることに成功した。

## コロナ、ノバ、テセラの形成メカニズム

地球や他の惑星に存在する地形もあるが、金星に特徴的な地形も多い。特に「コロナ」と呼ばれる巨大な円環状地形は、金星で初めて確認されたもので、直径数百kmから1000kmを超えるものもある(図1)。地形の盛り上がりと溶岩流を伴うことから、地下のマントルの対流ブリュームの上昇によって形成されたと考えられている。中には、中心から放射状の割れ目を伴うものもある。地下の岩脈の上昇に伴うもので、円環状地形のないものは「ノバ」と呼ばれている(図2)。岩脈とは、地殻の割れ目に溶岩が流れ込んで固まったものである。地球の火山でも円環状や放射状の岩脈を伴うものはあるが、金星のコロナとノバの規模は、はるかに大きい。

割れ目は、その地域の水平応力の最大圧縮軸の方向に伸びることが知られている。そのため、火山に走る岩脈の方向から火山形成時の応力の方向が求まる。我々は、金星で最も火山が多いベ

ータ=アトラ=テミス地帯でこの手法を適用して応力分布を求めた。そこにはアトラ地域を中心として、放射状にコロナやノバが連続している構造があり、「コロナチェーン」と呼ばれている。溶岩流などを使った層序判定と、クレーター密度年代を使い、コロナチェーンより古い火山・新しい火山を分類して、形成時の応力分布を求めたのである。その結果、コロナチェーン形成前には南北圧縮(もしくは東西伸張)方向であった応力場が、コロナチェーン形成後にはアトラ地域を中心とした放射状の応力場に変化したことが分かり、アトラ地域にマントルから巨大な対流ブリュームが上昇したというモデルを立てることができた。

金星表面の半分以上は、溶岩で覆われた平原地域である。クレーター密度年代から、金星表面の全体が今から4~7億年前の短い期間に溶岩の噴出により更新され、平原地域が形成されたと考えられている。平原地域には、水平方向の圧縮や伸張で形成される山脈や割れ目が存在しているが、横ずれ断層のように、地球で見られるようなプレートテクトニクスの直接の証拠はない。

さらに、断層や褶曲が複雑に入り組んでいて変化の激しい「テセラ」と呼ばれる地域があり、平原地域よりは標高が高くなっている(図3)。テセラの端では平原の溶岩に覆われている地点もあることから、テセラは平原地域よりも古い時代の地殻変動で形成されたと考えられている。

金星で最も標高が高いのは、イシュタル高地にあるマクセル山で、標高12kmである。この高地は、内部の対流でダイナミックに支えられているというモデルがある。

## 金星探査計画PLANET-Cへの期待

惑星地形の科学では、表面の解像度が数倍良くなると、得られる新しい情報が1桁以上、向上する。将来の探査では、20m程度の解像度で表面の様子をぜひ調べてほしいと思う。

日本の金星探査計画PLANET-Cでは表面電波探査は行われませんが、大気を比較的よく通る1μm帯などを使い、火山活動による表面温度変化を探る計画がある。また、火山と雷活動の関係は以前から指摘されている。さらに、イシュタル高地などの地形が、大気の運動に影響を与えるかどうか興味がある。(ささき・しょう)

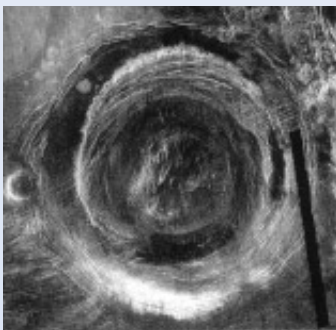


図1 コロナ(写真の横幅は350km)

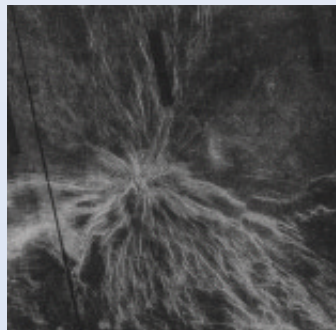


図2 ノバ(写真の横幅は350km)

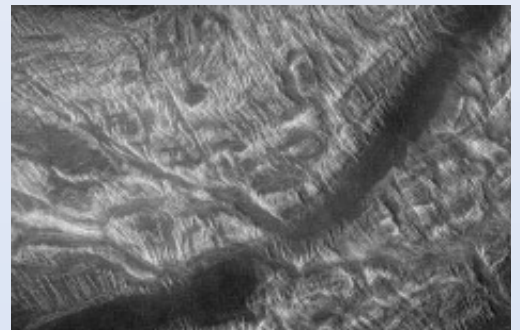


図3 オドバ領域のテセラ(写真の横幅は225km)

## SOLAR-BのX線望遠鏡,ゴダードへ

太陽観測衛星SOLAR-Bに搭載するX線望遠鏡の環境試験に参加するため、ワシントンDCの郊外、メリーランド州にあるNASAのゴダード宇宙飛行センターに、昨年の秋から年末まで出張していました。

SOLAR-BのX線望遠鏡は、「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡SXTと同じく斜入射光学系の望遠鏡ですが、全長はSXTの2倍の3m弱と大型になっています。宇宙科学研究本部と国立天文台、そしてボストン近郊にあるスミソニアン天文台(SAO)による日米共同で開発が進められており、NASAのマーシャル宇宙飛行センターが米国側プロジェクト管理の任に当たっています。昨

年秋、SAOにて日本側が開発した焦点面CCDカメラのフライト品を米国側担当の鏡筒に結合した後、望遠鏡全体の環境試験に進みました。しかし、SAOには自前の環境試験設備がないため、ボストンからはるばるメリーランド州まで運んでの試験となったわけです。

## ゴダードの環境試験棟事情

ご存知の方も多いと思いますが、ゴ

ダードは周囲を林や牧草地に囲まれた研究所で、広々とした敷地の中に建物が点在し、シカやカモもあたりを闊歩かっぽしています。車でないと、来所も構内の移動もままなりません。我々も、レンタカーを使ったり、SAO参加者の車に便乗させてもらうことで、移動の足を確保していました。周囲にバスも走っているのですが、時間がまるで当てにできないらしく、「朝出発して、午前中に到着できればいいのなら使える」と聞いたこともあり、お勧めではありません。

今回の試験では、敷地の奥にある環境試験棟に連日通いました。この環境試験棟は、後から建て増ししていったのでしょうか。複数の建物が棟続きでつながった複雑な造りをしていて、初めのころはどこから入ればいいのか、中に入ったら入ったでどう進めばいいのか、まるで分かりませ

ん。ドア一つの小さな入り口があちこちにあり、その中のいくつかはタバコを吸う人たちが屋外に出て一服するのに愛用されています。ドアは一度閉まると外からは開かないようロックされてしまうので、よく小石や木片が挟まっており、警備員が見つけると取り除いているようです。

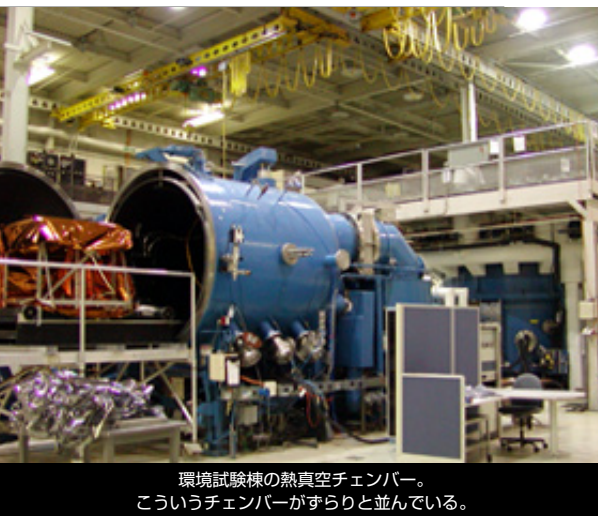
## 試験ストップも

さて、X線望遠鏡は環境試験棟に搬入された後、まずクリーンブースの中に設置され、そこを拠点として機械環境試験(音響・振動・低周波衝撃)と熱真空試験に供されました。どの試験設備へも、一つの建物(建て増しされているが)内の広々としたフロアを歩いて望遠鏡をそのまま運んで便利です。日本側のカメラを触るにも、フライト品ではNASAの認定を得なければならぬということで、静電気講習・クリーンルーム講習を受けさせられました。試験中にはさまざまなトラブルが起き(実は現在も熱真空試験のトラブルで試験が中断している……)、また試験実施に当たってゴダードとマーシャルとが大げんかをしてしまい、試験が10日間ストップしたこともあり、なかなか大変です。

我々のクリーンブース以外にも、近くいくつかブースがあり、さまざまな衛星プログラムが入れ替わり立ち替わりで使っています。すぐ隣のクリーンブースではハッブル宇宙望遠鏡の姿勢系機器の試験を行っていましたが、大統領の宇宙政策発表と何か関係があるのでしょうか、今年になって訪問したときにはもぬけの殻となっていました。また別のブースでは、ガンマ線バーストスワフトを調べるSwift衛星のBAT観測装置の試験が、24時間体制で懸命に続けられていました。建物の奥にあるクリーンルームには衛星本体が、明らかにBATが取り付けられるのを待っているという体で保管されており、掲示されていたBATチームのパーティーの案内には「Should Have Been Integrated」Happy Hourへご招待」とありましたが、我々の試験状況を振り返るとまったく笑えません。

昨年末の最終日には、ちょうど米政府の対テロ警戒レベルが平時より1ランク高い「オレンジ」に上がり、その途端「構内の外国人ビジターは直ちに退去せよ」というお達しが出て、急ぎ荷物をまとめた上に職員のエスコート付きで、慌ただしくゴダードを去りました。

(さかお・たろう)



環境試験棟の熱真空チェンバー。  
こういうチェンバーがずらりと並んでいる。





18年前の4月26日、ウクライナで起きたチェルノブイリ原発事故は、人類史上、例を見ない放射能汚染を引き起こした。私は当時科学番組部でディレクターをしており、NHKスペシャルの取材で、事故直後から数回、通算半年間ほど汚染地帯で暮らしたことがある。食料や水、ほこりを通して私の体に蓄積されたセシウムやストロンチウム、プルトニウムなどの放射性物質は、今も体内で放射線を出し続けているはずだ(放射線は皮膚に届くまでに減衰し、私とお話する人には影響ありません。念のため)。

## 放射能汚染の現場に立つ

初めて汚染地帯に立ったときの気持ちを忘れることができない。透明な空気、美しい湖、川、草原地帯、青空をゆっくりと飛ぶコウノトリ、鮮やかな麦畑をうねらせながら風が通り過ぎていく。まるで童話の世界を絵にしたような風景の村。しかしそこに住民はいなかった。汚染勧告で全員が避難したのだ。生活の様子を残したまま、人間だけがすっぽりと消えている。不気味なほどの静寂。遠くに事故を起こした4号炉がシルエットのように見える。

「色もなければおもしろくない」放射能汚染の現場――。

風景が美しくれば美しいほど、五感では分からない放射能汚染が、恐怖感を増幅させた。

問題が深刻化したのは、事故から4年目だった。事故直後、原発から周囲30km以内は立ち入り禁止ゾーンとして無人化したが、ゾーンの外は放射能汚染がなく、立ち退きの必要がないとされていた。しかし事故の4年後、恐るべき事態が明らかになった。チェルノブイリ原発から放出された放射性物質が、予測不能の気流に乗り、「ゾーン」をはるかに越えた北方のベラルーシ共和国に、大量に降り注いでいたのだ。しかも所々に、水が作り出す「ホットスポット」と呼ばれる超高濃度汚染地域ができており、住民は大パニックに陥った。「水」が集まる場所は穀倉地帯であり、結果的に自然の恵みのメカニズムが裏目となった。公表されていた放射能汚染地図も、根本的に

# チェルノブイリ に見た 「心」の被曝

室山哲也  
NHK解説委員

書き換えなければならない最悪の事態であった。私たちは、そのベラルーシにカメラを入れた。

## 傷つくものはもう一つある

ベラルーシの村々の畑には、たわわに実った麦が、汚染のため収穫されないまま放置されていた。すでに住民避難が始まっており、歯が抜けるように住民が減り始めていた。避難は赤ちゃんを持つ若い夫婦から始まった。若い人が集まる店がつぶれ、学校が消え、共同体が機能を失いつつあった。老人と一緒に住む大家族では、若夫婦だけが子供を連れて逃げた。「老人たちは見知らぬ新しい場所に逃げるより、村に残ることを望んだ」と役場の人は説明した。

しかし実際は、老人とともに新しい人生を始める経済的余裕がなく、「現代の姥捨山」とでもいえる状況が起きてい



事故を起こしたチェルノブイリ原発4号炉

た。老人たちは、行く当ても、生活のすべもないまま放置された。放射能汚染が村人や家族の絆を引き裂き、ずたずたに崩壊させ始めていた。

その近くに、住民全員を引き連れて、知人のいる場所へ避難する決意をした小さな村の村長がいた。奇妙なことに、その村は汚染レベルとしては国が定める基準値以下の地域だった。

「逃げる必要がないのになぜ避難するのか?」

私の問いに村長は答えた。

「確かに放射能は遺伝子DNAを切断し、人体にダメージを与える。しかし傷つくものはもう一つある。それは心だ。汚染地帯にいますと、たとえ汚染レベルが低くても、共同体が壊れ、人の絆がずたずたに切れていく。そこでは体は生きてても、心が死んでしまう。“心が死ぬ場所”に、人間が暮らすことはできない」

村長の言葉が私の心に突き刺さった。私の25年のディレクター人生で、忘れられない言葉の一つとなった。

## 「体の被曝」と「心の被曝」

東京に帰って私は考えた。人間が人間として生きていくとはどういうことなのだろうか。

科学番組をやっていると、人間を精密な機械として見、物理的のものさしだけで判断をする癖がついてくる。健康上安全な場所から「気分だけで」避難する人をまるで愚か者のように感じてくる。しかし人間には、生物的(物理的)存在としての側面のほかに、社会的、文化的存在としての側面がある。「人はパンのみでは生きない」。この当たり前のことを私たちはすぐに忘れ、無慈悲なシステムを作り上げてはこなかっただろうか。人間の顕在意識だけを尊重し、その底流にある潜在意識の世界を忘れてはいないだろうか。形あるものだけを信じてはいないだろうか。形のないものに内在する価値を忘れ去ってはいないだろうか。

チェルノブイリで私は、被曝には「体の被曝」と「心の被曝」があることを知った。あの日から18年。あの重く苦い記憶は、まだ心の底に沈殿したまま残っている。

(むろやま・てつや)

# 「はるか」で活動銀河核の謎を解く

宇宙情報エネルギー工学研究系助手

Philip EDWARDS

——電波天文衛星「はるか」で観測をしているそうですね。

EDWARDS: 電波は波長が長い光(電磁波)なので、1基の電波望遠鏡ではあまり細かい像は得られません。しかし、世界中の電波望遠鏡で同じ天体を観測してデータを記録し、後で時刻を合わせて観測データを合成すると、高い解像度が得られます。望遠鏡同士の距離を基線と呼びますが、基線が長いほど高い解像度を得ることが可能となるのです。

宇宙研では、1997年に「はるか」を打ち上げ、地上にある世界中の電波望遠鏡と協力して最長約3万kmの基線を実現し、波長18cmと6cmの電波を観測しています。VSOPというプロジェクトです。波長6cmの観測では、例えば私の母国オーストラリアから日本にある1円玉が見えるほどで、これはハッブル宇宙望遠鏡と比べても150倍も高い解像度(0.0003秒角)です。

——どんな天体を調べているのですか。

EDWARDS: 銀河には、中心部の狭い領域が異常に明るく光っているものがあります。その領域は「活動銀河核」と呼ばれ、中心に太陽質量の1000万~100億倍という超巨大ブラックホールがあると考えられています。活動銀河核は、宇宙の中で最もエネルギーが高く、激しい現象が起きている場所の一つです。そこで何が起きているのか知りたいのです。

超巨大ブラックホール自体は直接見えませんが、そこに物質が激しく流れ込み、一部の物質はジェットとなって噴き出しています。私たちはVSOPで、そのジェットを詳しく観測しています。例えばジェットの根元の明るさが、初めて分かってきました。5兆度以上の温度に相当する明るさのものも見つけました。でも理論的に考えると、そんなに高温であるはずがありません。ジェットが私たちの方向へ噴き出していて、見かけ上、異常に明るく見えているのだと考えられます。また、ジェットの根元では物質が常に様に噴き出しているのではなく、らせんを描いたり、途中で折れ曲がったり、時々高エネルギーのプラズマの塊が噴き出しているらしいことも分かりました。しかし、なぜそんな現象が起きているのか、まだ誰にも分かりません。

——日本で研究することになった経緯は?

EDWARDS: オーストラリアのアデレード大学で宇宙線の勉強をしました。地球大気に飛び込んでくる宇宙線のほとんどは陽子ですが、エ



フィリップ・エドワーズ。1962年、オーストラリア生まれ。アデレード大学Ph. D. (物理学)。専門は電波天文学およびガンマ線天文学。東京大学宇宙線研究所研究員、アデレード大学研究員を経て、1994年宇宙科学研究所研究員。1999年助手。VSOPによる活動銀河核の観測、次期電波天文衛星VSOP-2プロジェクトの検討などを行っている。

ネルギーの高いガンマ線もやってきます。そのガンマ線の研究でPh. D.を取りました。その後、ポストを探しているとき、日本の文部省の奨学金のことを知りました。指導教官に相談すると、「宇宙線のいろいろな計画があるので、良いと思いますよ」と、日本の先生を紹介してくれました。1987年から3年間、

東京大学の宇宙線研究所で研究を行いました。

1990年にアデレード大学に戻り、ガンマ線が大気に衝突するときの光を観測する日本とオーストラリアの共同プロジェクトCANGAROOに参加しました。活動銀河核が出す高エネルギーのガンマ線の観測を行っていたのです。あるとき、電波望遠鏡の観測の手伝いをする機会がありました。そこで「あなたは日本での経験もあるので、宇宙研に行ってVSOPプロジェクトに参加してみたらどうですか」と誘われました。解像度の高いVSOPで活動銀河核を観測してみたいと思い、1994年に宇宙研にきました。

——現在、宇宙研で唯一の常勤の外国人研究者ですね。

EDWARDS: VSOP室の先生たちは英語がうまいのですが、学生との会話では、自然な英語ではなく“国際的な英語”を話さないと通じない場合もありますね。でもアメリカから宇宙研に来たポスドクには「日本で、オーストラリア語を勉強しました」と言われました(笑)。

オーストラリア人の妻との間に2人の息子がいます。上が5歳になるので、日本で学校教育を受けさせるかどうか決める時期です。家族のことも考えなければいけませんし、研究者として宇宙研でやりたい夢もあります。

——その夢とは?

EDWARDS: NASAが2007年ごろにGLASTというガンマ線天文衛星を打ち上げる予定です。一方、私たちは現在、次期電波天文衛星VSOP-2プロジェクトの検討を行っています。GLASTとVSOP-2で同時に活動銀河核を観測することが私の夢です。例えば、ガンマ線で爆発的に光った後に、電波で明るく輝く高エネルギーのプラズマの塊が噴き出してくると理論的に予想しています。しかし本当にそうなのか、観測で確かめてみたいのです。予想外の結果が出てくると面白いですね。

ISASニュース No.278 2004.5 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。

編集後記

新緑が目優しい、とてもいい季節になりました。そう言えば、今年の桜は早い時期から比較的長く楽しめましたね。

逆に花粉は少なく、私は本当に助かりました。

「気候変動」が収束すれば、見事な花が咲く季節がやって来ます。今年度、JAXAがどんな大輪を咲かせるか、乞うご期待!

(M-Vプロジェクトチーム 竹前俊昭)

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