

特集 第5回宇宙科学シンポジウム



## 宇宙科学ミッションの新しい出発

2005年1月6日～7日に宇宙科学シンポジウムが開かれました。このシンポジウムは、「理学、工学の研究者が一体となってこれからの夢を語り合う」という趣旨で2001年に始まり、今年で5回目となりました。将来のミッションの具体的選定にかかわる白熱した議論を分野を越えて戦わせることのできる、宇宙研で最も重要なシンポジウムとなっています。今年も2日間にわたり、「NeXT」、「VSOP-2」、「ソーラーセイル」など提案中のミッションの議論を中心に、「SPICA」、「月惑星表面探査技術」、「SCOPE」、「JASMINE」、「次期小天体探査」、「JTPF」、「次期月探査計画検討」の10ワーキンググループ(WG)からの活動報告と、小型ミッションを中心に10件の将来計画の講演がありました。

一昨年の宇宙関係3機関の統合により、宇宙研はJAXAの宇宙科学研究本部として新しく生まれ変わり、JAXA全体のビジョンの中での宇宙科学の位置付けと、社会への新たな貢献が求められています。ちょうど今作成中のJAXAの「長期ビジョン」の議論に参加している方々の報告を中心とした企画セッション「JAXAの長

期ビジョンと宇宙科学」を1日目に開催しました。日本の宇宙開発が逆境にある中で、20～30年先の将来まで見通した非常に迫力のある意見交換がなされました。2日目には、JAXAの本部間での技術交流の展望を議論するセッション「宇宙科学を支えるテクノロジー」が開催されました。ここでレビューされたJAXAが培ってきたテクノロジーについては、この特集号でも多くの方に執筆をお願いします。

研究管理棟2階の大会議場は、机を運び出しては席にし、大人数を収容できるよう準備したにもかかわらず、2日間とも満杯となる盛況でした。この特集号の記事では、発表の内容を分かりやすく伝えたいと思っているのですが、同時に、研究者の持つ熱気の片鱗を行間に感じ取っていただければと思います。166件のポスターを含め215件の講演を収めた後刷集も後日発行されます。分厚いものですが、手に取っていただく機会があれば、努力いただいた世話人(橋本、今村、川勝)諸氏の苦勞も報われるはずです。

(シンポジウム代表世話人 前澤 冽)

特集によせて

第5回宇宙科学シンポジウムに登場した一連の魅力あるプロジェクトをお届けします。世界のトップ・サイエンスセンターを目指す、日本の宇宙科学・宇宙工学の人々の迫力ある心意気を楽しんでください。20世紀に一時代を築いた宇宙の科学が、新しい世紀に踏み出して5年目を迎え、宇宙科学の課題がますます生命の世界や極限の世界との連携を深めて行くのが、目に見えるようです。著者はいずれも、日本の知的存在感を双肩に担う人々たちです。(ISASニュース編集委員長 的川泰宣)

## 激動する宇宙を探る新しい窓NeXT

次代を担うX線天文衛星

NeXTは、2010年代初頭の打上げを目指して、日本を中心に検討・開発を進めている、次世代のX線天文衛星です(図1)。NeXT(Non-thermal energy eXploration Telescope)はこれまでのX線天文衛星よりも1桁高いエネルギーの光子まで、高い感度の観測を初めて実現します。これにより、NeXTは分厚いガス雲の向こうに隠れて見えなかった高エネルギー天体を探る、世界で最も透過力の高い天文台となります。さらに、これまで感度が足りないがために人類が触れることが難しかった、宇宙の大規模な非平衡・非熱的な物理現象にも、大きく迫ることが可能となります。

### 宇宙をX線で見るといふこと

大空に輝くおなじみの太陽は、表面温度6000度の水素ガスの塊であり、その温度に対応した光である「可視光」を強く放射します。一方で、数百万度から数億度にもなる高温の物質から放射されるのが、よりエネルギーの高い光の一種である「X線」です。宇宙X線は、大気に遮られてしまうので見るのができなかつたのですが、1970年代に人工衛星を用いて本格的に始まったX線天文学は、宇宙のたくさんの場所に、このように極めて高温の物質が存在すること

を教えてくださいました。銀河の中には、星の進化の最終段階としてのブラックホールや中性子星、さらに銀河中心には巨大なブラックホールが存在し、ばく大な重力エネルギーを主にX線という形で解放しています(図2)。さらに、数千万度にもなる高温ガスが、銀河の中や、銀河の大集団、「銀河団」の数百万光年にわたる広大な空間に広く存在し、X線でギラギラと輝いているのです(図3)。

X線天文学の進展は、人類に多くの知識をもたらしました。我々は今、ブラックホールに物質が吸い込まれる直前に引き延ばされる様子について議論しています。さらに、数百万光年の広がりを持つ「銀河団」において、実は重さの9割を占める暗黒物質(ダークマター)がどのように分布しているかを、X線ガスの助けを借りてトレースしています。人類はこれまで、宇宙空間に出ることで、新しい“宇宙を見る窓”を広げてきました。地上には届かない電磁波や粒子をとらえることで、天体が発するあらゆる情報に耳を澄ますことができるようになるのです。X線天文学は人類に“活発な宇宙を探る新しい窓”をもたらし、その成果に対して、功労者の一人のリカルド・ジャッコニ氏は2002年のノーベル物理学賞を授与されています。

日本は、1979年の「はくちょう」衛星以来、積極的にX線天文学に貢献してきました。特に1993年に打ち上げられた「あすか」衛星は、世界中の科学者が共同利用する国際天文台として、その優れた能力を遺憾なく発揮し、1400編を軽く超える査読論文を生み出すなど、多くの学術成果を挙げました。今年の夏には、期待の新衛星、ASTRO-E IIの打上げも予定されています。昨年2月に行われたジャッコニ氏の講演にもあったように、日本のX線天文衛星は、その優れた狙い、高い技術力、世界に開かれた運用、そして一つの発見を次の解決につなげる継続的な発展により、世界から高い評価を受けており、日本の宇宙科学における国際競争と国際協調の両面において一つのモデルケースとなっています。

### 新しい時代に新しい窓を

～硬X線の高感度観測がもたらす新しい世界観～

X線天文学はこの30年で大いに発展し、「熱い

図1 NeXT衛星の想像図

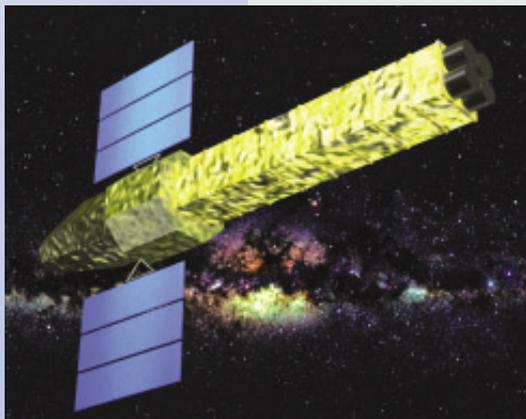


図2 巨大ブラックホールが中心に隠れているNGC4945銀河(左, ©NAO)とガスに隠された巨大ブラックホールのイメージ(右, ©GLAST web)。分厚いカーテンに隠され、まだ人類に知られていないたくさんの巨大ブラックホールが、宇宙にはいるようだ。

宇宙」の存在を我々に教えてくれました。ところがよくよく見てみると、この熱い宇宙の影で、「熱さ」とは異なるエネルギーの解放が、それも極めて大規模に起きていることが分かってきました。

例えば、宇宙の巨大ブラックホールは、周囲から物質を吸い込み、その超高速の落下物が巨大なエネルギーをブラックホール至近の空間に注ぎ込むため、明るく輝きます。しかし、その輝きの大部分を担う高エネルギーX線は、流入ガスから予想される温度だけでは説明できず、実際のところどのようなメカニズムで放射されているのか、今もって分かっていません。ブラックホールの至近でいったい何が起きているのでしょうか？ さらに、宇宙から来るX線の全体を詳細に分析したところ、実は今はまだ見えていない、厚いガスで隠された巨大ブラックホールがたくさんあることも明らかになってきました。

我々が今見ている巨大ブラックホールは、まさに冰山の一角でしかないかもしれないのです。隠された巨大ブラックホールを見つけ、そのエネルギー放射の本体に迫るには、X線よりもさらに桁違いの透過力を誇る、高いエネルギーのX線「硬X線」を優れた感度で観測するしかありません。ブラックホールの至近でいったい何が起きているのか？ 宇宙にはいったいどれだけの巨大ブラックホールがあるのか？ この2つの疑問に答えるのが、新しい「硬X線」観測なのです。

これとは別に、星の最期の大爆発「超新星残骸」を観測していくと、爆発の衝撃で数百万度に加熱された高温ガス以外に、もっとも高いエネルギーを持っている粒子が存在していることが分かってきました。ごく少数の粒子が、多数の仲間を尻目に、温度に換算すると10兆度を超えるような高いエネルギーを持つようになるこの現象は、「粒子加速」と呼ばれており、まさに宇宙的規模の不平等の極みといえます。しかし、実はこの現象、太陽表面の数万km(～0.1光秒)のサイズの大爆発から、1000万光年を超えるスケールの銀河団の中に至るまで、宇宙の多くの場面で見られます。皆で仲よくエネルギーを分け合う物理現象「加熱」と対比して、「非熱的」と呼ばれるこの現象が、実は宇宙のエネルギー解放の多くの場面で主役を担っているかもしれないのです。

粒子のエネルギーがそろっているために、数千度なら可視光、数億度ならX線と、そろった光を放射する「熱的」な現象と比較して、「非熱的」な現象は、いろいろな波長の光を放射します。このため、熱的な放射があまり強いと、非熱的な放射は隠されてしまて見ることができません。X線天文学は、宇宙には数億度までのガスが多く存在することを

示しました。「非熱的」な放射をとらえるには、熱的なX線放射が薄れるエネルギー帯域の観測が重要です。すなわち、ここでもより高エネルギーのX線「硬X線」の高感度観測がカギを握るのです。

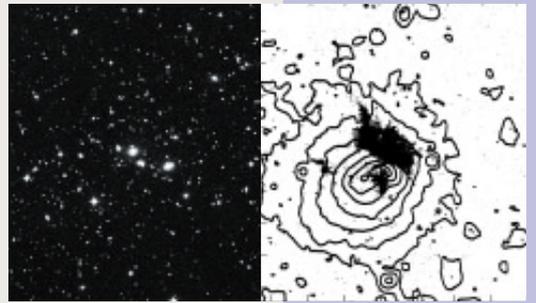


図3 Abell2256銀河団 (Roettgering et al.)。数百の銀河が、1000万光年に広がる「銀河団」。X線で光る熱いガス(等高線)の中に、黒いシミのように高エネルギー粒子の影が広がっている(電波)。さまざまなエネルギーの放出が起きているらしい。

## NeXT衛星の狙いと仕組み

厚いガスを貫く高い透過力を持ち、隠されたエネルギー解放の準主役「粒子加速」の正体に迫る「硬X線」。その高感度観測は、これまで技術的に不可能でした。NeXTはこの感度の不足を解決する新技術を採用することで、隠された宇宙の姿、そして非熱的でダイナミックな宇宙の姿を明らかにします。

NeXT衛星は重さ1.7トン、長さ13mで、その先端には2種類、計4台のX線望遠鏡が搭載され、逆の端には望遠鏡それぞれに対応するカメラ4台と、これらとは別にガンマ線検出器が1台搭載されています。望遠鏡のうち3台は、新技術の「硬X線対応型」です。これまでのX線天文衛星の望遠鏡にとって技術的限界であった10キロ電子ボルトというエネルギーを超えて、80キロ電子ボルトまでのX線を集めることができます。これにより、10-80キロ電子ボルトの帯域で、2桁もの感度向上が実現します。もう1台の望遠鏡は、世界最高レベルの「X線分光系」とペアになっており、極めて高い感度で宇宙のプラズマの性質を探ります。その分光能力を活かせば、例えば銀河団のX線ガスが激しく沸き立つ姿や、ブラックホールの強烈な輝きに照らされて周囲の物質が特殊な「色」でキラキラときらめく姿を、精度よくとらえることができます。また、隣に搭載されているガンマ線検出器は、80キロ電子ボルトよりさらに高いエネルギーのX線(ガンマ線)を、これまでの衛星よりも桁違いに優れた感度で観測します。より高いエネルギーの放射を探ることで、我々は「粒子加速」のパワーを知ることができます。

NeXTは、国際競争と協調の中で、世界に開かれた天文台として運用します。単なるX線天文衛星の殻を破って、より広い観測性能を得るNeXTの技術は、その次の世代に計画されている国際共同の大型X線天文台のコンセプトや、ガンマ線衛星のコンセプトの先駆けとしての位置付けも担っており、この分野で日本が世界をリードする足掛かりとなると期待しています。

(次期X線天文衛星ワーキンググループ)

# 3万kmの瞳で観る宇宙の極限領域 VSOP-2観測計画

## すべての銀河は中心に 超巨大ブラックホールを持つ!?

最近の天文学で分かってきた面白いことに、すべての銀河がその中心に巨大なブラックホールを持っているらしいということがあります。宇宙史の中で銀河の形成にかかわる大事な問題であり、また、ここでは一般相対論もかかわる極限的な現象が引き起こされます。

「私たちの銀河」はおとなしいのですが、やはり中心に巨大なブラックホールを秘めているらしいことが、年々現実味を帯びてきています。ほかの銀河の中で特に元気な中心核(活動銀河核という)では、そこから何万光年にも及ぶジェットを噴出しています。ブラックホールに向かって落ちこぼれ渦が、磁場を媒介してジ

ェットを噴出するのでしょうか。巨大なジェットは根元ではほとんど光速に近いことが分かっています。しかし、このからくりは分かったようでも分からない、「藪の中」なのです。何億光年、何十億光年彼方のこのような極限領域を「観る」には、ハッブル宇宙望遠鏡の100倍も1000倍もの解像度が必要です。このような解像度を達成できるのが、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) を使った電波望遠鏡なのです。

## スペースVLBIを本格実現した 日本がさらに飛躍を!

離れた複数の望遠鏡で電波を波としてとらえ、合成すると、望遠鏡の距離と同じサイズの口径の望遠鏡で見たのと同じ解像度の天体の画像が得られます。VLBIは、地球規模に広がった電波望遠鏡を組み合わせた地球サイズに広がった電波望遠鏡ですが、解像度をさらに上げるために、宇宙空間のアンテナも含めたスペースVLBIが考えられるようになりました。

1997年、「はるか」によって史上初のスペースVLBI天文衛星が実現しました。「はるか」は、軌道上での大型アンテナの展開などの工学実験を成功させ、0.4ミリ秒角という高解像度観測を実現しました。世界中の研究機関との大規模で密接な協力のもとにVSOP (VLBI Space Observatory Programme) 計画 (<http://wwwj.vsop.isas.jaxa.jp/>) を実現し、延べ700回を超える観測を行い、活動銀河核のジェットの構造や運動、ブラックホールを取り巻くプラズマ円盤構造などを明らかにしました。これは工学実験衛星の枠組みをはるかに超えた大きな成功です(図1、図2)。

「はるか」によって得られた成果をもとにしてさらに未知の領域の天文学を切り拓くため、次期スペースVLBIワーキンググループは、ほかのいかなる計画も成しえなかった、高空間分解能による天体現象の直接撮像ミッション「VSOP-2計画」を作り上げました。

## VSOP-2の科学目的

我々は、VSOP-2で活動銀河核の研究に決

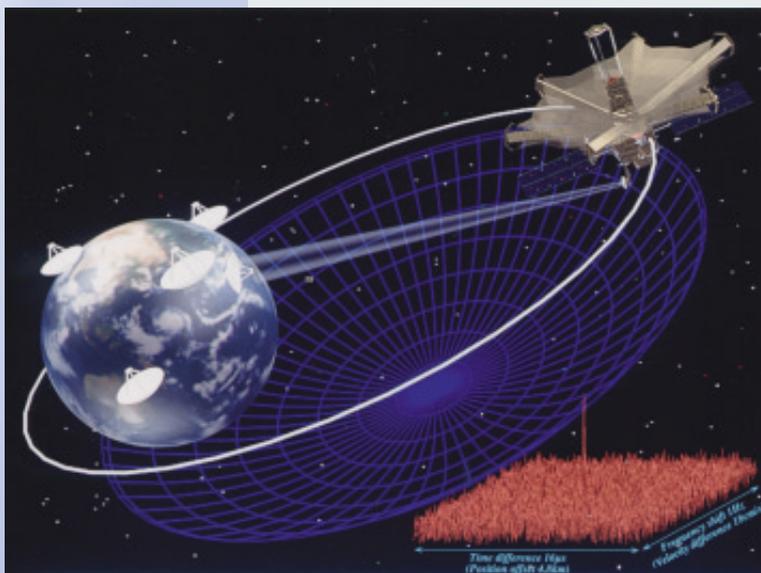


図1 「はるか」はスペースVLBIの歴史を作った

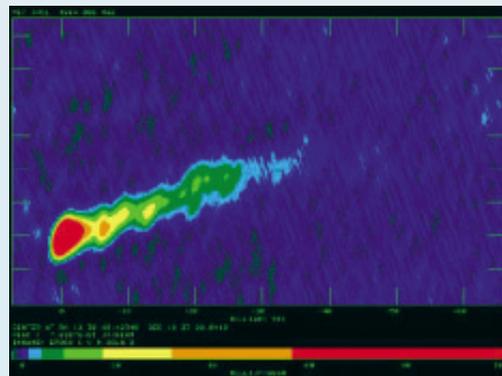


図2 VSOPで見たこの1.6GHzのM87画像は、VSOP-2でさらに30倍の解像度で見えてくる!

着を迫りたいと考えています。ジェットが生成、加速されている領域の解明が大きな成果となるでしょう。さらに、活動銀河核のブラックホール周辺の降着円盤の構造、もしかすると、ブラックホールの微かな影が見え始めるかもしれません。

原始星ではX線、電波で観測される大変強いフレアーも興味ある対象です。この大規模フレアーは星と降着円盤とをつなぐ磁力線がねじれて発生すると考えられていますが、VSOP-2の高解像度の画像によって、その構造に迫り、発生メカニズムを明確にすることが可能と考えています。

VSOP-2は、約5000万光年遠方の銀河M87では中心にあるブラックホールの数倍、400光年ほど遠方の原始星周辺では原始星の大きさの解像度で撮像ができます。日本では、このような極限領域をシミュレーションによって計算機の中に実現する研究が、大変進んでいます。VSOP-2の観た宇宙と計算機シミュレーションの宇宙とを比べながら、理解がどんどん進むことでしょう。

## 性能の大幅な強化

このような科学を担うため、VSOP-2では「はるか」からの大幅な性能強化を狙っています。

- VSOPで主に成果の出た5GHzの約10倍の周波数、43GHzまでの観測を行うことで、解像度の向上、およびプラズマを見通す能力を高めます。高周波数化および遠地点高度を高くすることにより、達成できる最高解像度は、43GHzで0.04ミリ秒角となり、VSOPが5GHzで実現した解像度0.4ミリ秒角の、約10倍の性能向上になります。
- 高周波数の2バンド(22GHz, 43GHz)では冷却受信機によって高感度化を図り、また、観測データを8倍高速にとらえ観測周波数を広帯域化することで、感度が1桁向上します。これに伴い、地上へのデータ伝送は1Gbpsへ広帯域化する必要があります。
- 磁場は、ブラックホールや原始星の降着円盤のまわりで重要な役割を果たしています。VSOP-2では偏波観測の能力を強化し、磁場を定量的に観測することを可能とします。

## 衛星を支える技術

これまでの5年間の基礎開発によりVSOP-2を実現できる技術を蓄積しました。これらは通信などの分野にも波及効果があります。

大型展開アンテナは口径9mのオフセットパラボラ方式。波長7mm(43GHz)の観測まで使用するため、鏡面精度は0.4mm rmsです。主鏡面は7個の要素アンテナをつなげた方式で、展開構造は技術試験衛星ETS-VIIIで開発されているアンテナの方式を利用しますが、要素アンテナの鏡面精度を上げるために新規技術を積極的に取り入れています。

精密な観測のためには、観測天体と基準天体とを交互に観測する必要があります。VSOP-2では高速に衛星全体の向きを変える能力を強化します。また、精密観測に必要な3cm以下の高精度軌道決定を行います。

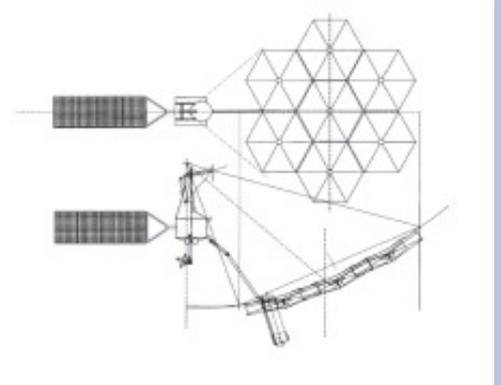
図3にVSOP-2衛星の概略を示します。衛星重量は約910kg。打上げにはM-V型ロケットを使用し、目標軌道は、遠地点高度25,000km、近地点高度1,000km、軌道傾斜角31°、周期7.5時間の楕円軌道です。これは「はるか」よりちょっと高めですが、いい画像を作ることから決まる軌道です。

## 観測と国際協力

VSOP-2衛星では、リンク局から送信されるきれいな信号を基準にして受信機が動作し、観測データをリンク局網に送信します。リンク局はこのデータを記録します。これに世界の電波望遠鏡群が参加し、各電波望遠鏡からの観測データは関連局に送られて関連処理され、画像処理によって天体の画像が得られます。VSOP-2では、VLBA(米国)、EVN(欧州、中国)、AT(豪州)などの国際VLBI望遠鏡群が参加します。韓国では、2007年までに3つのVLBI局が建設されVSOP-2への参加を表明しています。国内では、VSOPで使用している臼田64mと情報通信研究機構(NICT)鹿島34mに加え、国立天文台VERA 20mの4局、野辺山45m、山口32m(山口大と共同で管理運用)などが増え、研究コミュニティも拡大しました。

VSOP計画を協力して行ってきた国立天文台ではスペースVLBIプロジェクト室ができて、宇宙科学研究本部の推進グループとともにVSOP-2計画を進めています。

(次期スペースVLBIワーキンググループ)



# ソーラー電力セイル実証計画について

## ハイブリッド推進宇宙船

太陽光(光子)の運動量を利用して推進する宇宙船を、ソーラーセイル(太陽帆船)といいます。ソーラー電力セイルとは、この光子による推進と太陽電池で駆動する電気推進機関を組み合わせて航行する、ハイブリッド(複合)推進の宇宙船を指しています。ソーラーセイルは燃料を必要としない点で理想的ですが、帆の面積当たりに得られる推進力が非常に小さく、現実的な期間での飛行を考えると途方もない大きさの帆が必要になり、帆以外に何も輸送できなくなってしまいます。一方、イオンエンジンなどの電気推進機関は、推進力を得ることは難しくありませんが、加速に「燃料」を必要とするため、大きな軌道変換を行うには輸送力を犠牲にしなければなりません。

ソーラー電力セイルは、両者の長所を組み合わせ合わせて補い合う複合推進で航行します。これは従来にないまったく新しい考え方です。JAXA宇宙科学研究本部では、この新型宇宙船により、太陽系の大航海時代を先駆ける、外惑星探査法の実証を計画しています。目指すのは、外惑星の代表である木星と、トロヤ群という小惑星です(図1、図2)。

## 7つの世界初を目指すミッション

このソーラー電力セイルは、探査機本体、木星オービター、木星プローブ(オプション)の3

機で構成されます(図3)。木星通過(フライバイ)時に木星オービターが分離され、木星を周回する軌道へ投入されます。木星プローブを木星の大気へ突入させ、木星極域の大気観測を行うことも計画されています。

この計画は、以下の7つの「世界初」を目指す、新世紀を先駆ける画期的なミッションです。

- (1) 世界初の太陽電池を動力源とする木星以遠に到達する外惑星探査機であること
- (2) 世界初の木星オービター、フライバイ複合機であること
- (3) 世界最高性能のイオンエンジンで推進すること
- (4) 世界初の光子セイルハイブリッド推進で航行すること
- (5) 世界初の黄道面ダスト<sup>\*1</sup>外からの背景放射<sup>\*2</sup>観測を行うこと
- (6) 世界初のトロヤ群小惑星探査を行うこと
- (7) 世界初の編隊飛行による木星磁気圏観測を行うこと

この計画の主目的は、エンジニアリング(工学技術)の実証にあります。(1) 直径約50mに及ぶ超薄膜の大型太陽帆を惑星間で展開する技術、(2) 光子および高性能イオンエンジンを併用する軌道変換技術、(3) 薄膜の太陽電池によって太陽から非常に遠い木星域での動力の確保、(4) 低温で動作する新型の液体燃料式推進機関、(5) 推進機関用の燃料を兼ねた

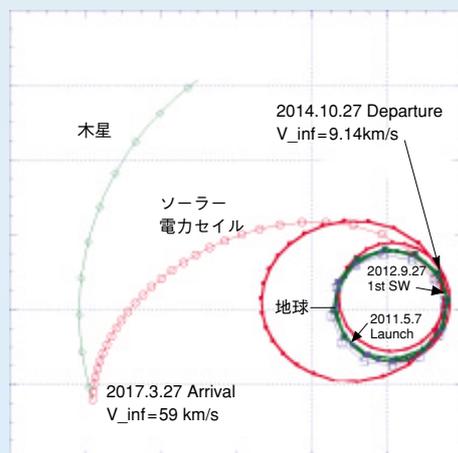


図1 2011年発の軌道計画

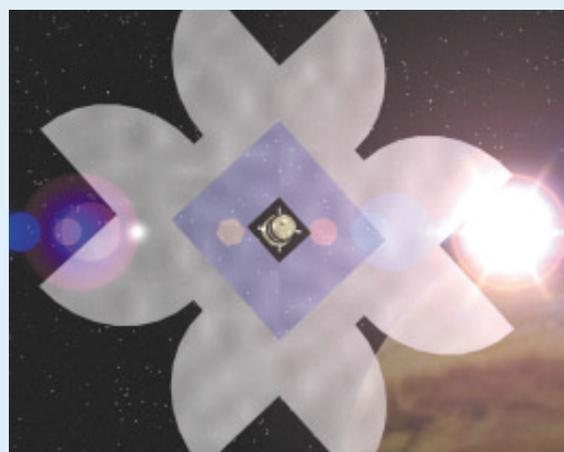
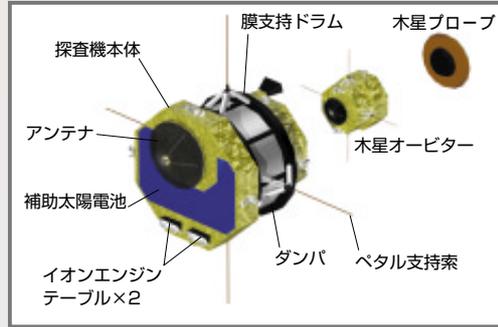


図2 ソーラー電力セイルの想像図

図3 ソーラー電力セイルの構成



統合型の燃料電池など、将来の外惑星探査に必須となる技術の実証を目的としています。

しかしその一方では、木星までの惑星間空間、木星やトロヤ群域を飛行することを最大限に利用した複数の観測を行い、理学面においても世界第一級の成果を目指しています。(1) 従来は黄道面ダストによって遮られてきた赤外線域での全天観測、(2) 黄道面ダスト分布観測、(3) 木星の極域磁気圏観測、(4) 太陽-木星系のラグランジュ点※3 (L4) に存在するトロヤ群小惑星のフライバイ観測、(5) ガンマ線バースト観測、などにより惑星科学、プラズマ、宇宙物理学など理学面でも新しい大きな成果が期待されています。

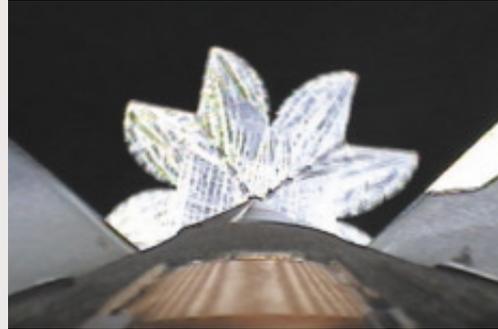
この計画にて開発される技術は、宇宙開発のみならず広範な産業・社会的な応用につながる明確な説明性(アカウンタビリティ)を持っています。(1) 大型の膜構造に関する技術は圧縮力に強い大型の建造物に、(2) 燃料当たりの加速量が非常に大きいイオンエンジン技術は先端デバイス産業が必要とする成膜・コーティング技術に、(3) 薄膜の太陽電池技術は低価格の太陽電池の大量生産に、(4) 統合型の燃料電池技術は耐腐食性の極板開発に、(5) 編隊飛行・自律機能は広く産業・介護ロボットに、(6) 耐放射線機器開発はSOI※4など新しい電子デバイス開発に、それぞれ貢献すると期待されています。

膜構造物の展開実験として、2004年に候補材料であるポリイミド製膜面の遠心展開に世界で初めて成功しました(図4)。この成果をもとに、大型膜を確実に展開するメカニズムの研究開発を行っています。

### 惑星間航路への発展

深宇宙探査は、小惑星、惑星周回衛星から、資源を輸送する大航海時代へとつながっていく点で、経済効果につながり得るものです。この実証計画には、深宇宙港構想で実現される往復の惑星間航路へと発展する重要な意義があります。この計画は、何よりも、再使用できる宇宙船で太陽系の往復飛行を現実のもの

図4 2004年に行われたS-310ロケットによる膜展開実験



とさせ、航路としての惑星間飛行を定着させることにつながるわけです(図5)。

ソーラー電力セイルは、まさに次世代への理工学教育を先導する、明快なターゲットといえるでしょう。「見える」先進性を具体的に与えるミッションでもあります。技術開発で頂点に立つことが、逆にすそ野を広げて、世界を牽引する新しい技術を創生していく型の産業育成への転換技術力をもたらし、経済効果を産むことにつながると考えられます。

20世紀は、航空機が生まれ、育ち、そして産業に育った時代でした。航空航海時代は、グローバルな物流を促し、世界経済を牽引する原動力にもなり、今日の安全保障の確保も、ここに裏打ちされているといえます。21世紀は、宇宙機が生まれ、育ち、そして産業に育つ時代といえるでしょう。航空機から宇宙機への連続的な接続、成長が起こり、太陽系航海時代は惑星間規模での物流を産むでしょうし、世界経済を牽引しうるものとなるでしょう。安全保障上の優位性も、まさに宇宙機技術に裏打ちされると思われるところです。地球周回の宇宙開発から、世界を牽引する惑星間へと活動を移す時代になっているわけです。

(ソーラーセイルワーキンググループ)

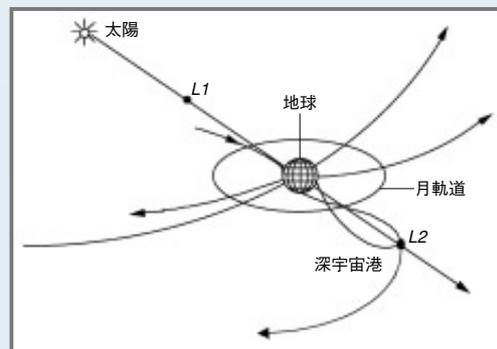


図5 太陽系大航海時代へつながる深宇宙港とそれを核とする運行例

- ※1 黄道面ダスト: 惑星の公転する面(黄道面)付近に集積しているちり
- ※2 背景放射: ビッグバンの残骸が宇宙空間全面に残って非常にわずかの熱を放っている現象
- ※3 ラグランジュ点: 8ページ参照
- ※4 SOI: 29ページ参照

# 宇宙史の解明に挑む 次世代赤外線天文衛星SPICA

「この広い宇宙の中、私たちはどこから生まれて、どこへ行くのでしょうか」

この問いは、宇宙というものを認識して以来、人間が常に持ち続けてきた根源的な「問い」です。この「問い」に答えるためには、まずこの宇宙に存在する銀河・星・惑星という多様な天体が、どのように誕生・進化してきたかを調べることで、すなわち「宇宙史を解明」する必要があります。

「宇宙史の解明」のためには、赤外線での高感度、高空間分解能の観測を欠かすことができません。生まれたての銀河、生まれたての星、惑星、これらすべてが、赤外線で強く輝くと考えられているからです(図1)。

そこで私たちは、まず全天にわたって赤外線

で輝く天体の分布を調べようと、ASTRO-F衛星の開発に取り組んでいます。ASTRO-Fには、高感度の赤外線観測のために、口径70cmの望遠鏡が搭載されています。これにより全天にわたる

「サーベイ観測」を行い、100万個を超える赤外線天体を発見できると期待しています。このように多くの天体が発見されると、次の段階は、発見された個々の天体を詳しく

観測することです。そのために、次世代の赤外線天文衛星計画として、私たちはSPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) 計画を提案しています(図2)。詳細観測には、大口径の望遠鏡が必要となります。大口径の望遠鏡は、多くの赤外線を集めることによって暗い天体の観測を可能にすると同時に、より細かな構造を明らかにすることもできます。そこで、SPICAでは、口径3.5mという大口径望遠鏡を搭載することを計画しています。

SPICAの技術的な最大の特徴は、その冷却系にあります。従来の赤外線天文衛星では、望遠鏡の冷却のために大量の液体ヘリウムを搭載していました。そのために、比較的小口径の望遠鏡しか搭載できないという大きな欠点がありました。さらに、寿命が短いという問題もありました。SPICAでは、これらの欠点を払拭するために、液体ヘリウムを用いず、放射冷却と機械式の冷凍機だけを用いるという画期的な冷却システムを採用します。これにより、従来よりもはるかに大型の望遠鏡の搭載を可能にしています。

上記のような冷却システムを有効に働かせるため、SPICAでは、地球と太陽が作るいわゆるラグランジュ点\*の1つであるL2点(正確にはその点の周りを巡るハロー軌道)を軌道の有力候補としています。L2点では、地球と太陽という熱的に赤外線観測の大敵である2つの天体がほぼ同じ方向に並ぶため、これら熱源からの熱遮蔽が容易になります。これにより、宇宙への放射冷却を有効に働かせることができるからです。

SPICAの観測能力は極めて優れたものです。例えば、SPICAでは、私たちの太陽系外の惑星の姿が直接にとらえられると期待されています。また、宇宙で最初に誕生した星たちの証拠を見つけられる可能性もあります。SPICAの画期的な観測能力により、冒頭に挙げた人類の根源的な問いへの答えに迫ることができると、私たちは期待しています。

(次期赤外線天文衛星ワーキンググループ)

図1 可視光線で見たオリオン座(左)と赤外線で見えたオリオン座(右)。若い星が生まれている領域は、赤外線ですく輝いている。

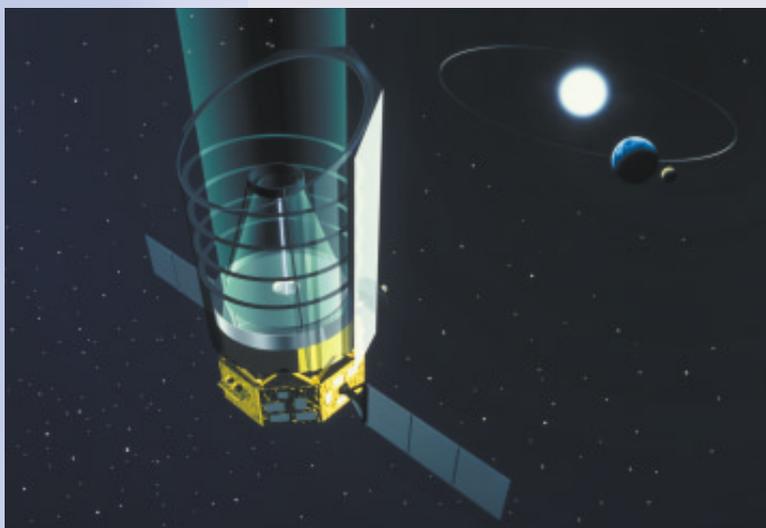
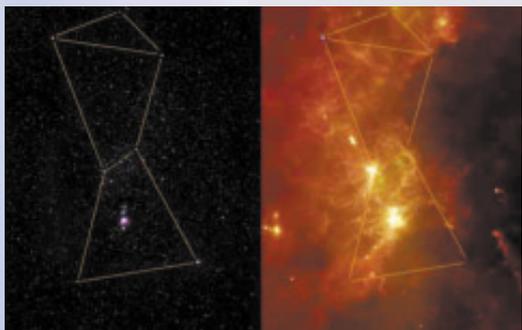


図2 軌道上のSPICAの想像図。絶対温度で4.5Kという極低温まで冷却された3.5mの大口径望遠鏡を搭載する。

\* ラグランジュ点: 2つの天体の重力が釣り合う点 L1~L5点まで5つある。

# 月や惑星の降りたいところに降りて 観たいものを観る技術

月や惑星などを調べる最初の段階は、探査機が天体の近くを通過する、あるいは探査機を天体の周回軌道に入れて、搭載したいろいろな装置で観測することです。遠隔観測が一通り終わると、着陸して表面を詳しく調べ、さらに表面のサンプルを地球に持ち帰ったり、人間が降り立って詳しく探査するようになります。現在のところ、金星、木星、土星は遠隔探査の段階、火星は着陸探査が盛んに行われており、月は人間が降りて月の石を地球に持ち帰っています。

JAXAは今年の夏、「はやぶさ」探査機を小惑星イトカワに送り、着陸して表面のサンプルを集める技術の試験をします。そのために高度な着陸誘導制御技術の開発をしましたが、小惑星は重力が非常に小さいので、ゆっくりと考えながら降りることができます。また、未知の天体からサンプルを採ってくること自体が重要なので、着陸地点を厳密に決める必要はありませんでした。

次に我々が目標としているのは、最も身近な天体である月への高精度着陸探査です。月にはすでにアポロ探査機などが何回も着陸していますが、人類はまだ安全で平坦な地点に数km程度の精度で着陸する技術しか持っていません。しかし、月は場所によって表面の特徴が違っていることが分かっています。月の謎を解くには、100m程度の精度で指定した場所(例えばクレータ中央部の地下物質が噴出している地点)に着陸し、移動ロボットで周辺を探査する必要があります。そのために必要ないろいろな技術を開発しています。

例えば、目標点に高精度な着陸を行うためには、地球から探査機の位置を測る方法では限界があり、目標点に対する相対位置や速度を高精度に計測するセンサが必要です。我々は、探査機に積んだカメラで撮った画像とあらかじめ持っている月の地図とを比べながら、探査機が自分で判断して目標地点に精度よく着陸する方法を研究しています(図1)。また、表面に激突せずそっと降りるためには、表面との相対速度や高度を測定するための着陸レーダが必要です。月面にはクレータや岩などがありますから、これらを瞬時に判断してよける必要があります。このため、カメラで撮った画像から自動的に障害物を判断する方法を研究していま

す。表面に着陸したときの衝撃で探査機が壊れたり倒れたりしないように、着陸脚の研究もしています。また、月表面の砂の特性を調べ、計算機シミュレーションで着陸の瞬間の挙動を検討しています。

さらに、着陸した後にローバと呼ばれる小型の移動探査ロボットを使って周辺の岩石の観測、岩石の表面の研磨、サンプル収集などを行うための技術開発や、将来の地球へのサンプルリターンにつなげる技術として着陸機までサンプルを持ち帰る手法の開発などを行っています(図2)。これらの作業では、月との通信回線は十分には取れませんから、地上からの指示は最低限にして、ローバが自分で判断して動く機能が必要です。将来、火星探査などに応用する場合を考えると、さらに電波の通信遅れが数十分になるので、地上からの遠隔操縦は現実的でなく、自律化が必要です。

これらの技術は、地上で実験したり、計算機シミュレーションで月での環境を模擬して試験したりすることはできますが、やはり実際の月に着陸してその技術を実証することが重要だと考えています。我々は着陸時重量500kg程度の探査機を月面の指定した地点に着陸させ、ローバを使って地質探査をする計画を考えています(図3)。しかし大規模な探査機の実現機会は少ないので、まずはもっと小型の50kg程度の探査機を用いて、月でしかできない実験を行う計画も検討しています。そして将来は、火星や木星、土星の衛星などへの着陸につなげていきたいと考えています。

(月惑星表面探査技術  
ワーキンググループ)

図1  
高精度な自律的着陸誘導法

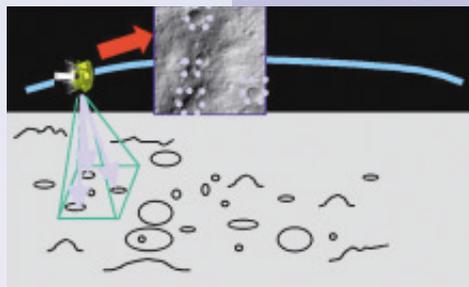
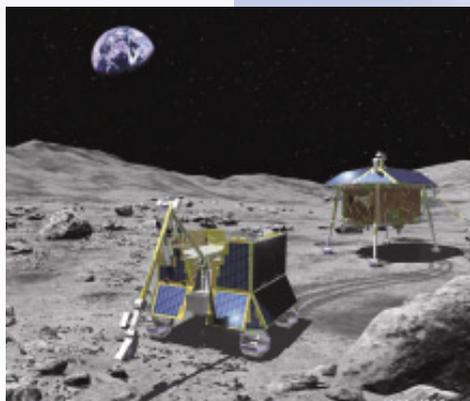


図2 開発中のローバ

図3 月面探査の想像図



# 編隊飛行によって磁気圏の謎を解く SCOPE

SCOPEは、編隊飛行する5機の人工衛星によって宇宙空間を探ろうという観測計画です(図)。地球のまわりの宇宙空間には、太陽から吹き出すプラズマ(電磁場と相互作用する電離したガス)の風が吹いていて、地球の磁場とぶつかり、多彩な電磁現象を起こしています。地球の後ろの空間(磁気圏尾部)に高温のプラズマが蓄えられ、オーロラの起源となるサブストームと呼ばれる突発的、爆発的な現象が発生することが知られています。この現象は、地球の何百倍もの体積で起こる非常に大規模な現象なのですが、爆発を支配する物理過程が起こるのは、実は中心近くの数kmくらいの狭い領域であることが最近分かってきました。爆発前後にこの領域がどのように変化するかを明らかにするために、5機(親1機と子4機)の衛星を立体的に配置して、中心近くから周辺に広がるプラズマと磁場の変動を3次的にとらえようという計画です。

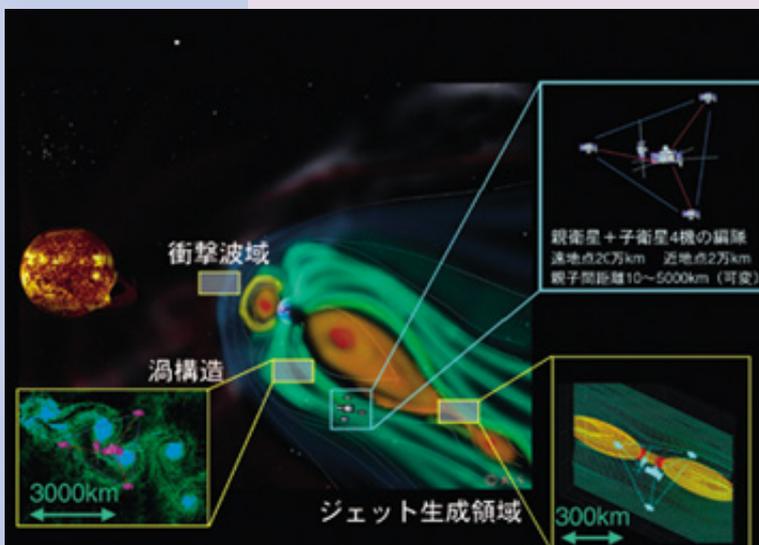
現在軌道上にいるGEOTAIL衛星により、地球を囲むプラズマの躍動的な姿が明らかになってきましたが、同時に多くの謎が生まれました。これまで宇宙プラズマを記述するのに使われてきた電磁流体力学(MHD)では理解しきれない様相が、観測され始めたのです。電磁流体力学は、星のまわりから銀河のスケールまで、宇宙のプラズマ現象全般の記

述に使われている学問ですから、これはゆゆしいことです。解明するためには、今までの観測技術を超える新しい試みが必要です。GEOTAIL衛星は、世界に先駆けた高時間分解能の観測(12秒で3次元情報を取得)で、サブストームが起こる際、陽子の運動がMHD近似から外れることを見いだしたのですが、鍵を握る電子の運動のスケールに迫るには、もっと高い時間分解能が必要です。SCOPE計画は、プラズマ観測器の時間分解能を今までの1000倍にして、電子の挙動を明らかにし、地球のオーロラから宇宙のスケールに至る、突発的な爆発現象や加速現象の謎を探ろうとしています。

SCOPEミッションの中心となる2つの技術、つまり(1)世界で初めてのミリ秒単位の3次元電子計測と、(2)日本で初めてとなる編隊衛星観測、を達成するための準備が進んでいます。5つの衛星群は、親機1機と子機4機で編成され、M-Vロケットで地球を回る軌道(遠地点は地球半径の30倍)に打ち上げて、軌道上で編隊を組んで観測します。数kmから数千kmにわたる空間構造を探るため、編隊間隔を段階的に変えながら観測します。5衛星の分離技術、親子衛星間の通信およびデータ転送技術、マイクロ秒の時間精度を各衛星が保持する技術、衛星相対位置決定(測距)技術、編隊の隊型維持技術、子衛星の軽量化技術、衛星スピン軸方向のアンテナ伸展技術など、非常にチャレンジングな開発要素が並んでいますが、一つ一つ具体的な解決策を見いだしつつあります。我々はぜひ、このミッションを実現して宇宙プラズマの理解に新しい一章を刻みたいと思います。

(次期磁気圏衛星ワーキンググループ)

図 編隊飛行磁気圏ミッションSCOPE



# 天の川を探る 赤外線位置天文観測衛星JASMINE

## 天の川の地図作り

古来より、人類は太陽と月、そして夜空に輝く星々の位置や運動に関心を持ってきました。紀元前2世紀のギリシャの天文学者であるヒッパルコス<sup>1</sup>は、約1000個の星を観測し、初めて星の体系的なカタログ(星図)を作りました。これは地球の歳差運動(コマが倒れる寸前に見られる「みそすり」運動)の発見につながりました。また、16世紀の天文学者チコ・ブラーエは数十年にわたり、約1分角という当時としては大変な高精度で惑星の位置観測を行い、惑星の運動を求めました。このデータを用いて、ケプラーが、惑星は太陽の、まわりを楕円運動していることを導き出しました。さらに、ケプラーが導き出したこの法則を、ニュートンが万有引力の法則を用いて力学的に説明し、近代物理学が誕生したことも有名なお話です。

その後も地上から星の位置や運動の観測が続けられていましたが、大気の乱れた流れによる星像のふらつきなどが悪影響して、観測精度には限界がありました。そこで1989年、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)が、世界で初めて星の位置と運動を大気のないスペースで観測する衛星(ヒッパルコス衛星)を打ち上げました。約1ミリ秒角という精度で太陽系近傍(約300光年以内)の星の位置、運動を正しく求めました。

星の天球上での運動は、おのおのの星が独自に動いていることに伴う運動(固有運動)と「年周運動」の2つに大きく分けられます。年周運動とは、地球が太陽のまわりを公転していることに伴い、地球上からある星を眺めると、天球上の星の位置が見かけ上、移動するものです。つまり、星は天球上を1年の周期で小さな楕円を描いて移動します。この楕円半径が年周視差と呼ばれ、その大小によって星までの距離も分かります(視差が小さければ小さいほど距離は遠い)。つまり、三角測量の手法です。こうやって、星までの距離という天文学にとって重要な基本情報も、星の運動を測定することから直接知ることができるわけです。

さて、JASMINE(Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration)は10マイクロ秒角(10万分の1秒角)という、ヒッパルコス衛星より100倍の高精度で、星の位置測定を目指している位置天文観測衛星です(図)。この精度は、

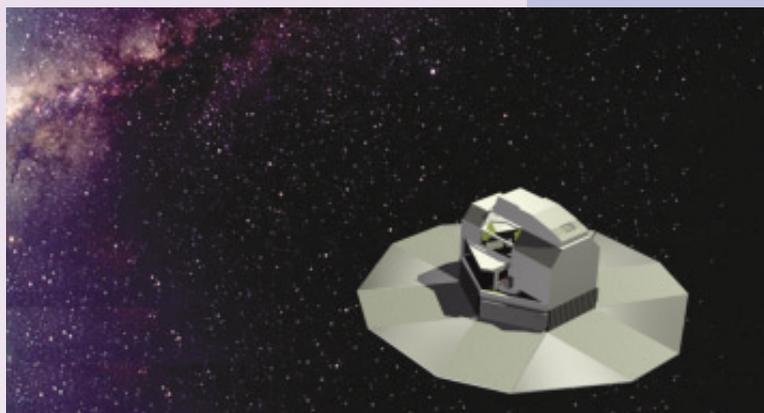


図 赤外線位置天文観測衛星JASMINEの想像図

チコの測定に比べると何と600万倍の向上になり、我々の天の川銀河の中心(約2万7000光年の距離)を越えて、天の川銀河円盤部の約半分の領域にある約1億個の星々の位置や運動を高精度で測定できるものです。また、JASMINEは高精度で天の川領域の大量の星を観測できるように、天の川に漂う塵に吸収されにくい、近赤外線と呼ばれる可視光よりは長めの波長の光を観測します。これが欧米の計画にはない特徴で、世界で唯一の赤外線位置天文観測衛星計画です。JASMINEは、まさに天の川の星々の“地図”作り(運動情報も含む)をするわけです。

この人類が初めて手にする天の川の星々の“地図”により、ギリシャのヒッパルコスや、チコ、ケプラー、ニュートンたちと同様に、宇宙の真の姿や新しい法則の発見がもたらされるものと期待しています。例えば、天の川銀河の真の姿、「見えない物質」の分布や運動とその規則性、天の川銀河の生い立ち、星の形成と進化、惑星を伴う恒星の発見、一般相対論の検証など、多様な分野での画期的な発展に役立つ“地図”となるでしょう。このように、可能な限りの精度で測定を行うことで、自然の法則を見いだす試みは、科学の基本でもあります。位置天文観測もまさに何千年にもわたり人類が新たな発見を目指して続けている営みであり、JASMINEも人類史の中でその一翼を担えるように検討を進めているところです。

JASMINEに関して詳しくは、以下のホームページもご参照ください。

<http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html>

(郷田直輝[国立天文台], JASMINEワーキンググループ)

# 次期小惑星サンプルリターン計画

小惑星からカイパーベルト天体、彗星に至るまで、我が太陽系内にはおびただしい数の小天体が、サイズ、存在位置、スペクトルなど大きな多様性を持って存在しています(図)。それらは微惑星形成から原始惑星形成に至る進化過程の、いろいろな段階の“化石”といえるでしょう。小惑星に関していえば、地上観測によって反射スペクトルが明らかになったものが数千個あり、それらがC、D、P、S、M……など、約1ダースのグループに分類されています。一方、小惑星タイプと特定隕石グループとの対応関係が、両者のスペクトルの比較から提案されています。しかし、それらの対応関係には問題が多く、従って小惑星の物質的知識は極めて乏しいのが実情です。そして格段に情報が多い隕石の物質的知識とは大きなギャップがあります。

このギャップを一気に埋めるのがサンプルリターンです。スペクトル型のうち最も数の多いものがS型とC型、D型なので、これらの物質を明らかにすることで、小惑星全集団の物質理解を大きく進展させることができます。小惑星探査機「はやぶさ」は、このうちS型小惑星から試料を採取します。次の計画では、C型(あるいはD型)の探査が必要です。C型、D型小惑星は一般に日心距離とともに存在の割合が増えていき、S型よりさらに始原的な天体であろうと考えられています。従って、太陽系のより初期状態の解明を目指そうとする我々にとって、C型、D型の小惑星の探査は欠かすことができません。地球に接近する小惑星はほんのわずかで、小天体全体から見ると氷山の一角のようなものですが、これらの中の行きやすいS型やC型小惑星への探査に

て、従来の地上からの観測と隕石による物質的研究まで、初めて切れ間なくつながります。そして技術的には、サンプルリターンに必要な諸技術(電気推進、自律航法、試料採取、リエントリ、サンプル受け入れ、分析技術など)が習得されます。

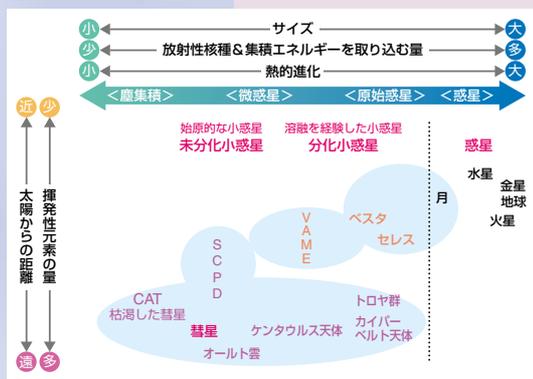
次の小惑星サンプルリターンミッションでは、これらの知見と技術を最大限に生かし、できるだけ早期に、より始原的で主要なタイプの近地球型小惑星(C型など)からのサンプルリターンを目指します。C型小惑星探査では、水をはじめとする揮発性物質や有機物質など、宇宙においてはより主要な成分から成る始原的物質や化学進化関連物質に特に興味があるので、サンプルは表層部のみならず深部まで、できれば層序を保持して採取します。同時にローバは探査機「はやぶさ」に搭載のミネルヴァをさらに知能的にして、上空の探査機からのリモートセンシング観測と協調して、サンプルの産状記載をしっかりと行うことが要求されます。

ワーキンググループ活動の初年度であった昨年は、M-Vロケットの2倍程度までの搭載能力を持つロケットを想定し、3つの候補ミッションを作りました。今後、これらの案のトレードオフ作業を進めていこうとしています。その中の一つは、次のようなミッションです。打上げは2012年で、3年後に1998KY26というC型近地球型小惑星に行き表面から試料を採取します。続いて、2017年の地球スイングバイの際にその試料を地球に投下した後、さらに2003YN107という近地球型小惑星に行き2回目の試料採取をします。続いて、2019年にこの試料を持ち帰る、という7年がかりのミッションです。現在開発が進んでいる高出力電気推進器 $\mu 20$ を使えば、M-Vロケットによってこのミッションが実現可能です。

より原始の物質を手にしたという研究方向は、いずれ将来、彗星や太陽系のより外の領域へと向かって先鋭的な探査を拡大していくことを意味しています。このようなさらに先の探査も視野に入れて、本計画を進めていきたいと考えています。

(藤原 顕[ISAS/JAXA], 小天体探査ワーキンググループ)

図 小惑星の多様性



よって、上記の大きな課題を解くことができます。

2007年には、「はやぶさ」が世界で初めて小惑星のサンプルを地球に持ち帰ります。現地での観測および試料の分析を通じ

# 太陽系外地球型惑星探査ミッションJTPF

この広い宇宙で、私たち人類は特別な存在なのでしょうか？ それとも、生命が生まれているような第2の地球は存在するのでしょうか？ これは天文学者の興味のみならず、この『ISAS ニュース』を読まれる多くの方が広く抱かれる疑問だと思います。太陽系外地球型惑星探査ミッション(JTPF)はこの問いに答えるために、第2の地球を直接に撮像し、そこに生命の有無を探ることを最重要目標とし、かつ、一般の天文観測にも広く応用できることを目指す野心的なミッションです。

私たちの太陽系以外にも惑星(略して系外惑星と呼ぶ)が存在することが分かったのは、わずか10年ほど前です。その後、すでに約150個の系外惑星が発見されているのですが、これらはすべて間接的に観測された木星のような巨大惑星で、惑星(特に地球型のもの)を直接に画像に写した例はありません。従って、私たちの太陽系を遠方から眺めたような、恒星の周りの第2の地球を直接観測することに期待がかかります。

系外惑星を直接に観測するためには、(1)暗い惑星を検出するだけの高い感度、(2)恒星のすぐ近くにある惑星を見分けるためのシャープな画像、さらに(3)暗い惑星が明るい恒星からの光に埋もれてしまわない高コントラストの三者が同時に必要になります。あたかも、明るく輝く灯台の近くでほのかに光る蛍を探すようなものです。

このようなミッションの可能性の一つとして、JTPFワーキンググループでは現在、とりわけコロナグラフを応用したスペース望遠鏡を検討しています(図)。コロナグラフは、明るい太陽の外側に広がる淡い構造を皆既日食時以外でも観測するために開発された高コントラスト技術で、最近さまざまな新規アイデアが提案されています。また、惑星のスペクトルを調べると、地球の大気の特徴づける水や酸素の存在量が分かるので、その惑星に生命が存在するかどうか推定できると考えています。H-IIAロケットで打上げ可能な最大限の一枚鏡として口径3.5mから成る特殊望遠鏡を用い、鏡の小さな凸凹

を化粧できる工夫(補償光学と呼ぶ)なども利用すると、惑星が存在すると考えられる領域で、恒星より10桁程度も暗い天体が観測できます。これによって、太陽近傍の数十個の恒星の周りに地球に似た惑星があるかどうかを調べることができるでしょう。コロナグラフ装置は恒星のすぐ近くだけを調べる装置ですが、その星から離れた天空の広い領域を観測できる装置を搭載すれば、初期宇宙天体などの研究も並行して行うことができます。

地球型系外惑星検出は人類の共通の興味であり、国際的にも同様の検討が進んでいます。中でもNASAのTPF計画、ESAのDarwin計画は、すでに過去数年間にわたって検討が行われてきました。惑星探しの一番乗りも大事ですが、このように大きな計画では国際協力の可能性も追求してゆくべきであると考えています。

JTPFは、これまで日本の宇宙科学研究にはなかった新しい研究分野を切り開こうとするもので、かなり長期の組織的な準備が必要な分野です。さらに、地上観測、理論研究も含めた検討が必要であるため、今後もISAS/JAXAという枠を越えて、国立天文台や大学などの国内諸機関の密接な協力のもとに、将来宇宙開発に携わりたいという若い方々の力を得て、進めべきプロジェクトであると考えています。

(田村元秀[国立天文台]ほか、JTPFワーキンググループ)

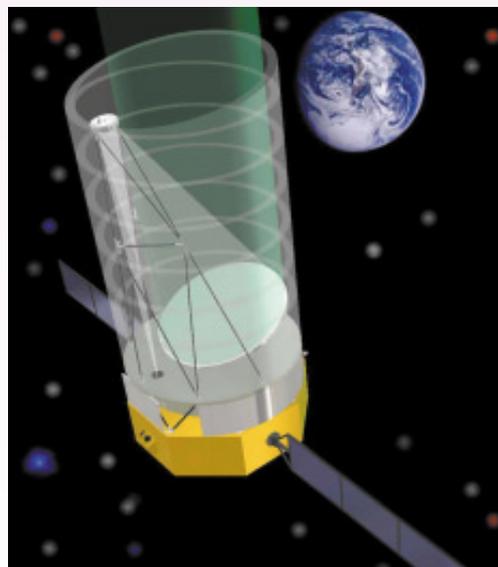


図 コロナグラフを応用した高コントラスト望遠鏡案。口径約3.5mの軸外しの一枚鏡をH-IIAロケットのフェアリングに収めて打ち上げる。

# 次期月探査計画

固体惑星探査のゴール、理解すべき目標として、我々の地球や火星など地球型惑星の起源と進化の解明を掲げています。その目標に対する具体的な対象として、始原小天体探査、および地球型惑星の内部構造探査を提唱しています。地球型惑星の原材料物質の探査と、月、火星へと続く地球型惑星探査です。月は天体形成後に内部の分化過程を経ているものの地球・火星に比べて大きさが小さく熱源が少ないので、単純な地殻・マントル分化過程を経たのみで内部活動を停止し、今もそのまま保存されていると考えられています。従って月の内部構造探査は、地球型惑星の内部構造進化の初期過程を明らかにするのに役立ちます。また表面にたくさんのクレータが見られ、惑星集積後期過程の隕石重爆撃の歴史を表面にとどめているため、惑星集積後期過程を明らかにする対象として絶好です。

我が国の月の科学探査は、地球型惑星としての月の起源と進化を解明するため、まず月の全体の組成と内部構造を明らかにすることから探査を開始しています(1)リモートセンシングによる表層物質の同定、(2)ネットワーク月震観測による内部構造の決定、(3)典型的な地質構造地形の地質学精査、(4)月の岩石試料を地球に持ち帰ってそ

の岩石の年代学研究を行うことが、必要な探査として想定されています。項目(1)のためSELENEが、項目(2)のためLUNAR-Aが準備中です。また(3)は探査の性格上一点のみの観測で完了するものではなく、(2)(4)や月利用の他項目との組み合わせでも実施される必要があります。次期月科学探査では、月面に典型的な地質構造地形の精査が行われることになります。

地質構造学的に、直接着陸して探査すべき月面上の地域・地形は4種類あると考えられます。地殻深部物質が露出している(1)中央丘型クレータ、巨大隕石衝突で深いマントル物質が露出している(2)南極エイトケン盆地など地殻の薄い地域、高地の岩石を同定するための(3)裏側の典型的高地地域、大きなクレータが分布し高度差が大きく険しい地形の(4)極域を地質精査し、その地形を構成する岩石、物質、層構造を明らかにすることで、月の表層・地殻・マントルの全体の元素組成、表層進化過程が明らかになります。また、クレータの観測によってクレータの形成や惑星集積最後の隕石重爆撃の歴史が理解できるようになります。

月の科学探査における私たちの計画の位置付けを図に示します。全球的観測項目はリモートセンシングにより実施され、SELENEにより決定的なデータ取得が行われようとしています。最近では欧州や中国、インドも月探査に乗り出しています。一方、ローカルな地質拠点の観測は米口の「アポロ」「ルナ」によって行われたのみで、大部分がこれから実施されます。全球的な観測データとローカルな拠点観測データを統合して、月の物質組成と内部構造が明らかになります。さらに地球に持ち帰った岩石の絶対年代測定により、月の起源と進化の歴史を年表にすることが可能になります。

私たちのワーキンググループでは、月面に着陸して直接地質探査するための科学観測機器の開発と、2週間の寒い月の夜を越して科学成果を挙げることを可能にするための越夜技術の開発を行っています。近い将来、「月惑星表面探査技術ワーキンググループ」と協力して月表面に到達し、科学探査を行いたいと考えています。

(次期月探査計画検討ワーキンググループ)

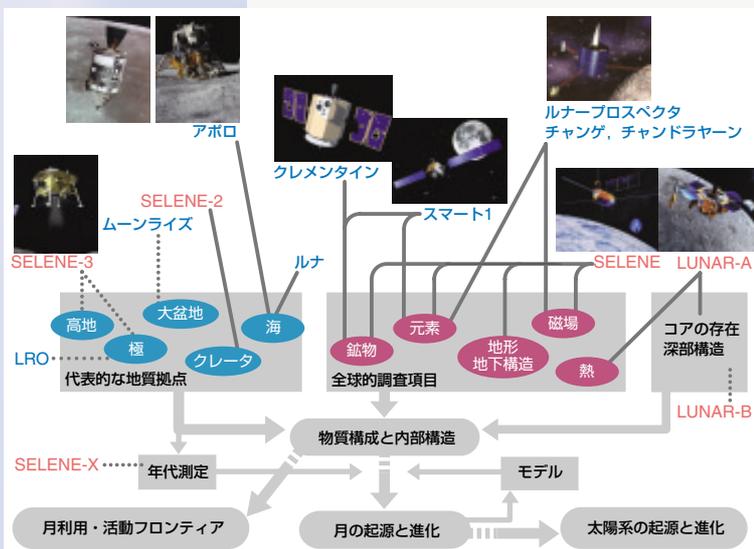


図 月科学ロードマップ。これまでの月科学探査の歴史と次期月探査計画の位置付けを表す。アポロ(米)、ルナ(旧ソ連)、クレメンタイン(米)、ルナープロスペクタ(米)、スマート1(欧)は既実施。SELENE(日)とLUNAR-A(日)、チャンゲ(中国)、チャンドラヤーン(インド)、LRO(ルナーリコネッサンスオービター、米の新政策月探査一号)は打上げ準備中。ムーンライズ(米)は審査中の衛星計画で、月岩石を持ち帰る構想。LUNAR-B(日)は次期月探査構想中にあるもので、多点ペネトレータ月震観測により月深部構造を明らかにする。

# ダークバリオンの直接探査を目指した 小型衛星計画DIOS

我々の宇宙は、ダークマターとダークエネルギー※という未知の存在によりエネルギー的に支配されています。しかし、よく知っているはずの普通の物質（バリオン）ですら、存在するはずの量の半分以上が未検出で、ダークバリオンとなっています。宇宙の構造と進化を探るためには、直接検知可能なバリオンの観測が必須であり、ダークバリオンをとらえることは非常に重要です。

ダークバリオンの多くは温度100万度ほどの希薄なガスとして、宇宙の大構造に沿って広く分布していると予想されています。小型衛星DIOS（Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor）は、ダークバリオンの電離酸素からの輝線放射をとらえ、それが描き出す宇宙の大構造を3次元的に明らかにします（図）。DIOSは、4回反射X線望遠鏡と撮像型X線マイクロカロリメータにより、これを世界で初めて実現します。このような広視野のサーベイ観測は、遠方の微弱天体の観測を目指す大型X線天文台では不可能で、DIOSのような小型衛星でこそ実現可能です。

衛星は重量約400kg、3軸制御を備え、視野約1度、有効面積約100cm<sup>2</sup>で0.3-1.6キロ電子ボルトのエネルギー範囲をASTRO-E IIをしのぐ2電子ボルトのエネルギー分解能で観測します。ダークバリオン以外にも、銀河系内や銀河団の

高温ガスのダイナミクス、ガンマ線バーストのX線残光など、小型ながら非常に多くの科学的成果が期待されます。

（大橋隆哉 [都立大・理], DIOSグループ）

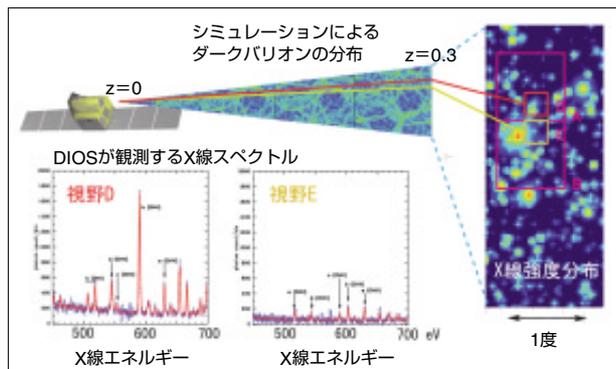


図 宇宙論シミュレーションから予測されるダークバリオンの空間分布（左上）、奥行き方向に積分したX線強度分布（右）、DIOSで得られるX線スペクトル（左下）。X線スペクトルに見られるピークは電離酸素の輝線で、その赤方偏移から距離が分かる。

※ ダークマターとダークエネルギー：  
20ページ参照

## X線偏光観測衛星Polaris計画

レントゲン撮影でおなじみのX線は、電波や目で見える光（可視光）、そして赤外線などと同じ電磁波の一種です。電磁波は電場（電気の強さ）と磁場（磁界の強さ）の振動が波として伝わる現象ですが、波の進行方向に対して振動が特定の方向を向いている場合、それを偏光と呼びます。偏光は大変身近な現象で、例えば皆さんが使用している液晶画面も偏光を利用しています。X線より長い波長の偏光測定は、天文学では昔から行われてきた観測方法です。X線だけは例外で、今までに太陽と、かに星雲くらいしか偏光観測に成功した例がありません。このX線偏光観測を人工衛星に積んだ最新の装置で観測しよう、というのがPolaris計画です。Polarisは英語で「北極星」の意味ですが、偏光観測衛星（Polarimetry Satellite）の略称にもなっています。

天体から放射されるX線の偏光を測定することで、何が分かるのでしょうか。一つの目的は、天体の磁場を測定することです。高速の電子が磁場中でローレンツ力を受けて回転運動をすると、シンクロトロン放射と呼ばれるX

線が放射されます。このX線は、磁場の方向によって偏光になります。そこから逆に、磁場の測定をするということもできます。もう一つの目的は、直接X線画像を撮ることができないような小さな天体の構造を、コンプトン散乱と呼ばれる現象を利用して測定することにあります。例えば、ブラックホールを囲む円盤の存在や、その傾きを知ることができると考えています。

我々が現在検討しているPolaris衛星は、波長の短いX線を反射する特別な鏡（スーパーミラー）を使用します。この焦点に、我々が開発してきた最新の偏光測定装置を設置して、いろいろな波長のX線の偏光を測定します。ブラックホール、中性子星、超新星残骸といった代表的なX線天体数十個について観測する予定です。人工衛星には予算も時間もかかりませんから、いつ実現できるかまだめどは立っていませんが、2006年度にはX線偏光測定装置のみを気球に搭載して、かに星雲の偏光測定をする予定です（22ページ参照）。

（林田 清 [大阪大学] ほか, Polaris検討グループ）

# 惑星宇宙望遠鏡TOPS

惑星大気的气象現象や惑星を取り巻く磁気圏が形成・維持され、時には大きく変動する仕組みを解明するためには、探査機を惑星に送って直接探査するとともに、望遠鏡による遠方からの連続的な観測が有力な手段です。しかし、地上からの観測では、地球大気の影響で紫外線などの光は吸収されて観測できませんし、観測機会は天候に大きく左右されてしまいます。

そこで私たちは、地球を周回する小型人工衛星を利用した、惑星観測専用の宇宙望遠鏡TOPS (Telescope Observatory for Planets on Small-satellite) の開発を進めています(図1)。望遠鏡の反射鏡は直径30cmとハッブル宇宙望遠鏡に比べれば超小型ですが、空気の影響がない宇宙環境を活かすと、紫外線から赤外線まであらゆる波長で、地上の大望遠鏡に匹敵する精細さで、天候や時間、季節の制約なく撮影することができます。

この計画が実現すれば、これまでの惑星観を一変させるような成果が得られると期待されます。例えば、これまでほとんどデータのない木星オーロラ(図2)の時間変化をとらえることにより、太陽風と木星磁気圏の不思議な関係に迫ることができます。また、気象衛星による雲写真のように鮮やかな金星や木星、土星の雲画像は、「惑星気象学」という新しい研究分野の進展に大きく貢献するでしょう。さらに、惑星

から宇宙空間へ流れ出している大気の撮影も目指しており、成功すれば、その量やメカニズム、ひいては惑星大気の変遷の解明に役立つと期待されます。

(高橋幸弘, 坂野井健, 吉田和哉 [東北大], 田口真 [極地研], 山崎 敦 [東北大], TOPS検討グループ)

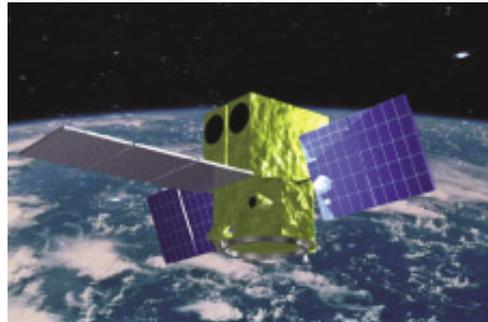


図1 地球周回軌道上の惑星宇宙望遠鏡TOPSの想像図

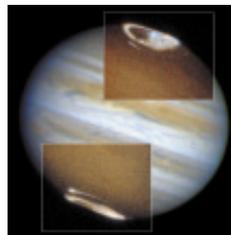


図2 ハッブル宇宙望遠鏡によって観測された木星の紫外線オーロラ (NASA提供)

# 太陽系小天体インターセプタ計画

太陽系的小天体は、軌道が確定しているものだけでも30数万個存在します。太陽系の起源や進化を知るためには、代表的な小天体にランデブーして、重点的に調査することが必要です。一方で、まだ探査機による小天体観測例がほとんどない現状では、フライバイして小天体を撮像するだけでも非常に意義があります。フライバイするには、カメラで小天体をとらえ航法誘導を行う必要があり、相対速度は秒速5km程度にもなるため、高度な制御技術を要します。

私たちはフライバイ探査機として、わずか10kgの「インターセプタ」を開発しています(図)。インターセプタは、小天体の十分近傍をインターセプト(通過)し、詳細画像を取得するだけではありません。カメラに取り付けた可視多色フィルターで測光観測を行い、小天体のスペクトル型を同定します。また、最接近前後のインターセプタの軌道変化を計測し、小天体の密度を推定します。これらによって、小天体の地形・地質を明らかにできます。複数のインターセプタを運搬専用機に搭載し、地球スイングバイ直前にそれぞれを別方向に切り離し、各目標小天体軌道に投入すれば、一度に多数のフライバイを実現できます。一方で、ピギーバックとして相乗りや、

探査機に小天体付近まで運搬してもらうなどのミッション形態も可能です。

インターセプタは、小型・軽量・安価ゆえに打上げ機会が得やすく、多数の観測を行うことで、従来とは質の異なったサイエンスを目指します。

(森 治 [ISAS/JAXA] ほか, インターセプタ検討グループ)

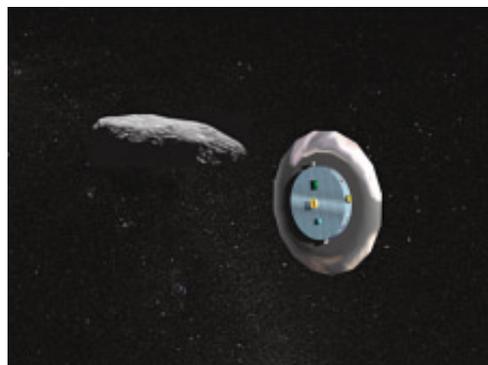


図 インターセプタの想像図

# 月面望遠鏡による月の回轉變動の観測計画ILOM

月の内部構造を通して起源と進化を理解する上で、コアの主成分が鉄か岩石か、融けているか否かは、本質的な情報です。これらの情報は、数ミリ秒角程度の月の回転のわずかな変動に現れます。これを観測するためには、従来の地球からのレーザを用いた月面までの距離測定（月レーザ測距；LLR）によって得られる月の回転の情報（約10ミリ秒角）より1桁以上精度を高める必要があります。

月面から星の方向を望遠鏡で観測することによって、月の自転軸の方向が分かります。口径20cm、焦点距離2mの望遠鏡で星の位置を観測し、焦点面で10nm（CCDの1ピクセルの約1/1000）以下の精度で星像中心位置を読み取ると、1ミリ秒角が達成できます。これをLLRと組み合わせることによって、月までの距離の変化と月の回転の両方の影響が分離され、それぞれの精度が向上します。

口径20cmの望遠鏡で観測できる星の等級は $m_V=14.3$ 以下となり、 $1^\circ \times 1^\circ$ の視野内に約440個あります。観測限界等級は口径、積分時間などによるので、同じ限界等級を保ちながら口径をさらに小さくできる可能性があり、小型化を検討中です。月面に小型望遠鏡を設置することに

より、月回転に関する未解決の重要な問題を解決することができるとともに、銀河系の構造を明らかにする画期的な高精度の位置天文観測にも道を開くことができます。

(ILOMグループ)



図 月面望遠鏡の想像図

## 小型衛星によるLTPおよび高速衝突発光現象観測の提案

本提案は、小型衛星を用いてLTP（Lunar Transient Phenomena）や高速衝突発光現象観測といった月ミッションの実現を検討するものです。

近年、搭載機器の小型化や高効率化により、小型の衛星でも新規性の高い観測ミッションが実現されています。現在のところ、その活動範囲は近地球に限られていますが、固体モータを搭載した150kg級衛星であれば相乗り打上げ方式による月軌道ミッションも可能である、との検討がなされています。

本提案で焦点を当てているLTP現象とは、月面が“もや”がかかったように光る現象です。理由としては、月地殻内部より噴出するガスによるもの、あるいは太陽風によって帯電したレゴリス※が舞い上がることによるなど、いくつかの仮説が示されています。現象の記録は古く、16世紀から500件以上の報告がなされていますが、これまで科学観測はほとんど行われてきませんでした。これは、現象の発生頻度が非常に低く、ミッションとして取り上げるにはリスクが高かったためです。

一方、高速衝突発光現象は、1999年11月にしし座流星体の月面衝突に伴うものが、2004年8月にはペルセウス座流星体によるものが初めて観測されました。それと同時

に、地上実験により、秒速数kmの物体が衝突すると光とマイクロ波を出すことが知られていましたが、そのエネルギー分配則や衝突破壊メカニズムについて詳しい理解は得られていません。月面流星衝突現象では、地上で作り出せない衝突速度が期待できるので、破壊の物理や流星体に関する新しい知見が得られると考えられます。

LTPや月面高速衝突発光現象といった“低頻度な現象”は、ミッションとして高リスクゆえに積極的な観測は行われてきませんでした。しかし、一般的に小型衛星はコストのリスクを低く抑えられることから、このような観測に適しているといえます。小型衛星は大型衛星では対象としないようなリスクの高い観測ミッションが実現できるほか、活動範囲を月軌道まで拡大させることによる利用の拡大など、小型衛星で月軌道ミッションを実現する意義は非常に大きいと考えています。

(斎藤靖之[東大院]，高原卓也[総研大])

※ レゴリス：  
惑星表層を覆う砂のこと。

## 小型衛星ERGによるジオスペース探査

ジオスペースとは、地球を表す「ジオ」と宇宙を表す「スペース」を合わせた言葉で、人類の活動と密接に関係した宇宙空間のことです。私たちが宇宙に飛び出すときに、必ず通らなければならないジオスペース。ここには、太陽や地球の大气から飛び出してきたプラズマ(電子やイオン)が存在しています。プラズマは大气と衝突してオーロラを光らせることで有名ですが、もっとエネルギーが高くなると、人工衛星故障の原因や、宇宙飛行士の健康に有害な影響を及ぼす可能性を持つものとして、近年心配されています。

このジオスペースの中で高エネルギーのプラズマがどのようにして発生しているか、その謎を解くのがERG(Energization and Radiation in Geospace)の目的です(図)。ERGは世界で初めて本格的な機器群を使って、冷たいプラズマから熱いプラズマまで広いエネルギー範囲にわたるプラズマと、磁場、電場、波動を同時に計測することにより、さまざまな角度からジオスペースを調べます。ERG計画の詳細に関しては、<http://www2.nict.go.jp/dk/c231/im/index.html>をご覧ください。

(小野高幸[東北大]ほか, ERG検討チーム)

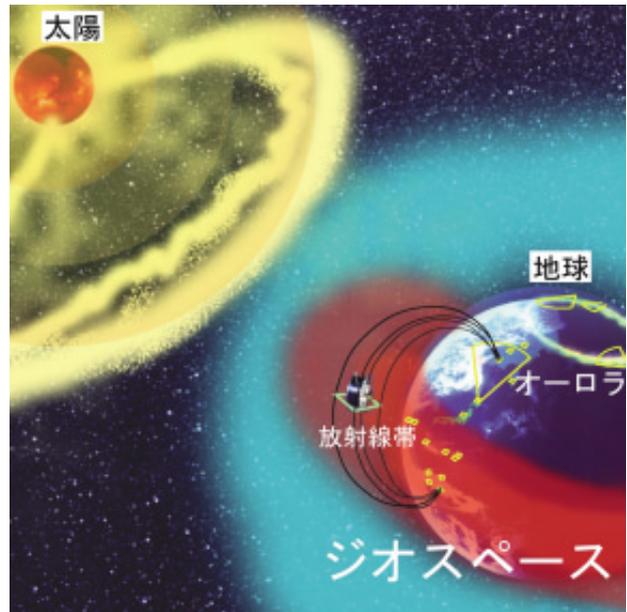


図 太陽面爆発に伴うジオスペースの変動

## 大気化学・雷観測小型静止衛星GOAL

高度10km以下の対流圏は、我々が生活し、気象現象や大気汚染などを通じて、身をもって体験している空間です。静止気象衛星のように10km程度の解像力で対流圏を常時観測することで、これまで不可能であった各種の科学研究や利用が可能となります。大気化学・雷観測小型静止衛星(GOAL)は、対流圏の広域大気汚染と雷科学という2つの非常に重要なテーマについて、静止衛星からの連続的な観測を、世界で(あるいはアジアで)初めて試みようという提案です。

対流圏で注目されている現象に、過去100年にわたる北半球の地表面オゾン(O<sub>3</sub>)の継続した増加があります。これは光化学スモッグのような現象が北半球の広い地域で常に発生しているためと考えられています。20年後には地表面O<sub>3</sub>が100ppbを超えて、北半球全域で穀物収率が30-40%減少すると予測されています。国際的な防止策を今後検討しなければなりません、このような広域の現

象を把握するためには、大気汚染監視ステーションが不足しているアジア域を静止衛星から常時観測することが効果的です。そのために、すでに周回衛星で実現済みの紫外可視分光計などを組み合わせて、光化学大気汚染の解明に役立つ二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)そしてO<sub>3</sub>を、10kmの解像度で観測します。欧米で同じような衛星が提案されており、全世界を4機の静止衛星で観測すると、世界各地で毎日どのように光化学大気汚染が起きており、どのように全体として北半球の地表面O<sub>3</sub>を増加させているかについて、科学的理解が進歩するでしょう。

雷の衛星観測は1995年に初めて成功し、気象学の研究や、集中豪雨や竜巻など気象災害の回避、航空管制などへの利用が可能です。そのために必要な静止衛星からの常時観測を、GOAL衛星は世界で初めて試みます。

(鈴木睦[EORC/JAXA]ほか)

# 大学小型衛星Cute-1.7

東京工業大学では、理学系と工学系の研究室が共同で小型衛星開発に取り組んでいます。小型衛星は、大型衛星に比べて(1)開発サイクルが短い、(2)開発コストが低い、(3)打上げ機会の取得が容易である、という利点を持っています。つまり、宇宙で未経験の最新の技術を実証するには絶好のプロジェクトである、といえるわけです。

2003年6月に打ち上げられたCute-1のミッションの成功を踏まえて、今度は衛星の頭脳に民生の携帯端末を使用するとともに、さまざまなミッションへの共通のプラットフォームを提供する衛星核構想を実現するものとして、Cute-1.7(図)を開発中です。

ミッション部として、理学系がここ数年精力的に研究開発してきた宇宙用アバランシェフォトダイオード(APD)を搭載し、宇宙で初めてその動作実証をしようというのが、Cute-1.7プロジェクトの大きな目的です。APDは内部に増幅領域を持つフォトダイオードで、次世代の光検出器として大いに注目されています。その動作実証のために、我々は地球上の荷電粒子のモニタを行う予定です。順調に行けば、2005年冬に打上げの予定です。

(古徳純一, 倉本祐輔, 片岡淳, 河合誠之, 谷津陽一, 五十川知子, 齊藤孝男[東工大・理]および松永研究室[東工大・工])

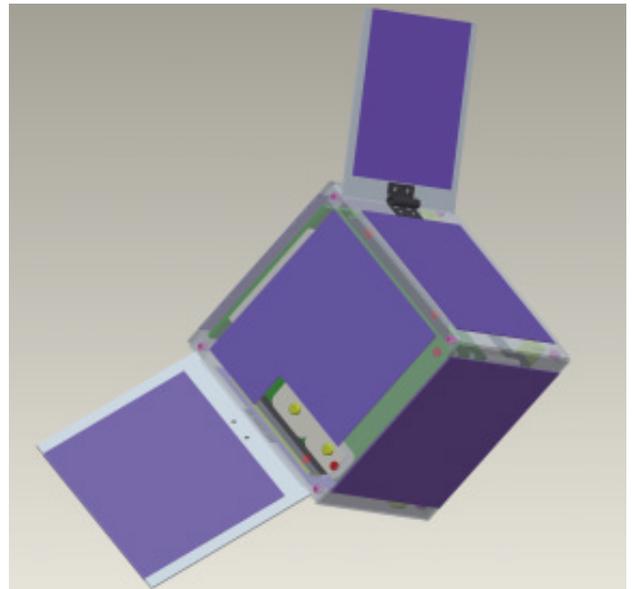


図 CUTE-1.7の想像図

## 国際宇宙ステーションで 高エネルギー宇宙の謎に迫るCALET

国際宇宙ステーションは、人類の宇宙に対する理解や宇宙での活動を画期的に発展させることを目的としています。我々はその一環として、これまでの宇宙観測ではまだ行われたことのない高エネルギー宇宙線、ガンマ線の観測により、新しい宇宙像を発見することを計画しています。宇宙線やガンマ線は、宇宙のどこかで高いエネルギーに加速され地球に降り注ぐ粒子で、それらの起源を解明することは、宇宙を理解する上で重要な課題です。

高エネルギーの宇宙線やガンマ線の源として候補に挙げられている超新星残骸、パルサー、宇宙初期の銀河などは、これまでの電波やX線の観測により、星や宇宙の進化において重要な役割を果たしていることが分かりつつあります。宇宙線の起源としては、このほかにまだ発見されていない暗黒物質が有力な候補とされており、その探索も重要な課題です。

しかし、このような観測には非常に精度の高い大型の観測装置が必要であり、国際宇宙ステーションの利用が不可欠です。我々が計画しているCALET(図)と呼ばれる観測装置は、世界でも最高の性能を持ち、日本、米国、イタリア、中国の20の研究機関(56名の研究者)の参加により、2012年ごろの打上げを目標に計画を進めています。

(鳥居祥二[神奈川大]ほか, CALETチーム)

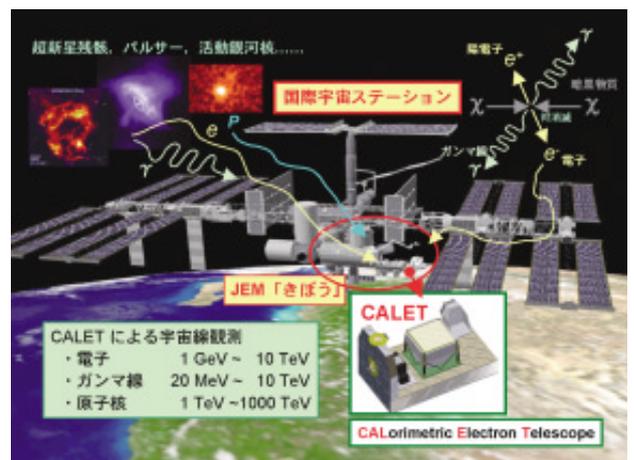


図 国際宇宙ステーションにおけるCALETの宇宙線観測

# 極限エネルギー宇宙を 超広角望遠鏡で探るEUSO計画

EUSO (Extreme Universe Space Observatory) 計画は、発生起源が謎とされている超高エネルギー宇宙線(10<sup>20</sup>電子ボルト※1)が作る空気シャワーを衛星軌道上から観測する宇宙科学ミッションです。2010年ごろ、超広角望遠鏡EUSOを高度約400kmの軌道上の国際宇宙ステーションに装着し、半径約250kmの領域の地球大気を一度に観測します(図1)。EUSOは口径約2.5mで約60度の視野を持ち、瞬間的な観測可能面積※2は、現在建設中のほかの実験の200倍以上にもなります。

宇宙から到来する極限的なエネルギーを持つ宇宙線は、地球の大気の原子核と衝突して、主に電子・陽電子から成る巨大な空気シャワーを生成します。EUSOはこのとき励起された窒素原子から放射される蛍光紫外線を数マイクロ秒間隔で撮像し、空気シャワーの発達を3次的に再構築します(図2)。これによりその到来方向を0.2度から数度の角度分解能で決定し、その発生起源の謎に迫ります。

EUSO計画は、欧州宇宙機関(ESA)を中心に、日本・米国・欧州が協力して推進しており、日本は焦点面検出器を、米国は光学系を、欧州は回路や電気系統および打上げの責任を負う予定です。

EUSO計画の詳細については、<http://euso.riken.jp/>をご覧ください。(梶野文義[甲南大]ほか, EUSO Collaboration)

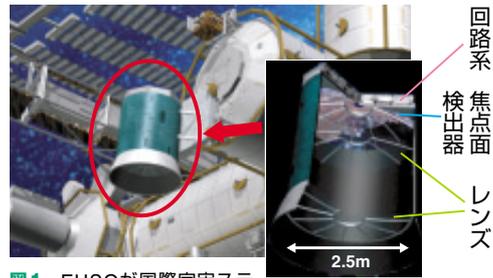


図1 EUSOが国際宇宙ステーションのコロンバスモジュールに取り付けられた様子(概念図)とEUSOの断面図

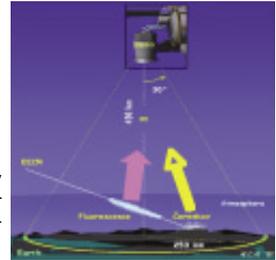


図2 EUSOが空気シャワーに沿って発生する微弱な光を観測している様子

※1 10<sup>20</sup>電子ボルト: ピッチャーの投げた硬式ボールが持つエネルギーに相当する。10<sup>20</sup>電子ボルト宇宙線とは、陽子などの極小粒子が加速されて、たった1粒でこのように高いエネルギーを持つようになったものこと。

※2 観測可能面積: 10<sup>20</sup>電子ボルトのエネルギーを持つ宇宙線の到達頻度は1km<sup>2</sup>、1世紀当たり1個と非常に低いため、観測例を増やすために大きな観測面積が必要である。そこで、宇宙から大気蛍光法により空気シャワーを観測する方法が考案された。

## HOP搭載・超広視野カメラ

宇宙、銀河とその大規模構造、星、そして惑星系。これらの形成と進化を余すところなく調べ上げるには、宇宙の広い領域を観測する必要があります。銀河の形成と進化を知るには、宇宙の大規模構造を一望に収めることのできる大きな視野が必要であり、ダークエネルギー※1の解明のためには遠方の超新星を効率よく発見できる広視野が必須です。また、弱い重力レンズ効果を利用してのダークマター※2の観測や、トランジット法による地球型惑星の探査でも、広視野観測の重要性は広く認識されています。

これを実現するのが、米国で検討中のハッブル宇宙望遠鏡の後継機Hubble Origins Probe(HOP)に搭載される超広視野カメラ(Very Wide Field Imager; VWFI)です(図1, 図2)。このカメラはハッブル望遠鏡と同じ0.1秒角の高解像力で、焦点面に59個のCCDを敷き詰めることにより、宇宙望遠鏡始ま

って以来の超広視野(ハッブルの約18倍に相当する198平方分角の広視野で、月の約3分の1の大きさをカバー)で観測を行います。

超広視野カメラは、日本の独自技術により開発されます。視野の中心以外で画質を悪

くする収差を補正し回折限界に近い結像性能を実現するプリズム補正光学系、赤方偏移※3した銀河の観測に最適な赤波長でハッブルの約6倍高い感度を実現する完全空乏型CCD、「すばる」望遠鏡で実績のある超広視野モザイクCCDカメラの技術です。超広視野カメラにより、これまでにない「広視野・高解像度・高感度」観測を実現し、現在ハッブル望遠鏡で得られている最も深いHubble Ultra Deep Field観測(人類の見た最も遠い宇宙)を超えるフロンティアで、前人未踏の広域観測を遂行することができます。HOP超広視野カメラが天文学に画期的なブレイクスルーをもたらすことは、間違いありません。

(常田佐久[国立天文台], HOP検討グループ)

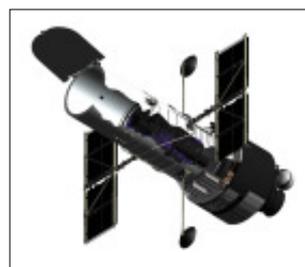


図1 HOP衛星外観

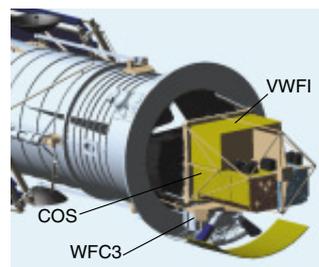


図2 HOP衛星の焦点面検出器部

※1 ダークエネルギー: 斥力となる負の重力源で、宇宙のエネルギー密度の70%を占める。

※2 ダークマター: 銀河や銀河間物質など通常の物質でない質量で、宇宙の全質量の90%を占める。

※3 赤方偏移: ドップラー効果により光のスペクトルが赤い方へずれること。宇宙が膨張していることは、遠い銀河が赤方偏移していることから発見された。

# インドの月探査衛星による非熱的中性粒子の観測計画

2007-08年に打上げが予定されているインド初の月探査衛星Chandrayaan-1は、高度100kmの月周回軌道に投入され、2年間にわたって月表面に存在する元素や鉱物の分布を調査し、さらには詳細な地形画像を取得します(図)。

月を取り巻く大気は非常に希薄です。そのため、太陽風や磁気圏中に存在する高エネルギー粒子は、大気に衝突することなく月表面にまで直接降り込みます。その結果としてたたき出される中性粒子は、月表面の元素組成を反映したのものとなっています。この中性粒子を観測して月表面の元素組成を得ることが、私たちがChandrayaan-1衛星に載せようとしている中性粒子観測器(CENA)の目的です。

このような、中性粒子を直接観測することによって月表面を構成する元素を明らかにしようとする試みは、世界でも初めてのものです。例えば、月の極地方のクレータ底には、常時太陽光の当たらない領域が存在します。そこには氷が存在するかもしれません。しかし、太陽光が月面に当たっていなければ元素組成を同定できない観測器もあります。これに対し、太陽光の当たらないクレータ底であっても中性粒子はたたき出されると考えられます。中性粒子観測器はほかの観測器とともに、相互に補い合いながら、月全球にわたる元素組成分布を得ていくことになります。

なお、これまで月表面からたたき出された中性粒子の観測が行われなかった理由は、観測そのものが技術的に難しかったためです。私たちはそれを可能にする観測器を考案しています。

(浅村和史, 向井利典 [ISAS/JAXA] ほか, CENA開発グループ [ISAS/JAXA, スウェーデン宇宙研, ベルン大])

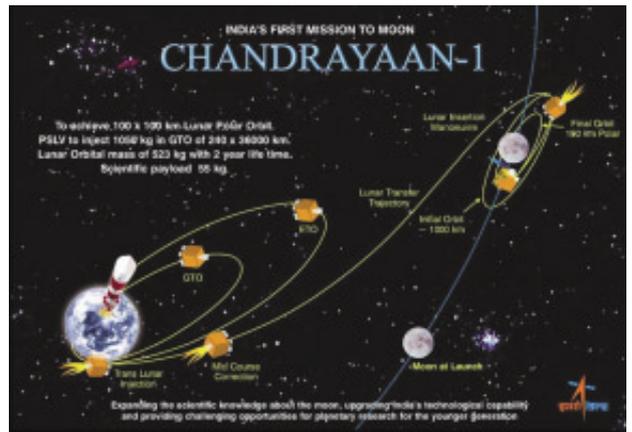


図 Chandrayaan-1衛星計画  
(<http://www.isro.org/chandrayaan-1/announcement.htm>)

# 広視野ガンマ線カメラによるMeV領域ガンマ線天体探査

近年、X線や高エネルギーガンマ線\*天文学が飛躍的に進歩し、可視光では分からない宇宙の高エネルギー現象が明らかになりました。しかし、MeVガンマ線ではこれまでに数十天体しか発見されず、天文学としては未開拓分野で、新しいカメラの完成が待ち望まれています。

私たちは、図1aに示すような、ガス検出器を固体検出器で取り囲む構造の新原理のカメラの開発を進めています。天体から到来するガンマ線はガス検出器中の電子を散乱、その電子の飛跡は図1bに示すように詳細にとらえられます。これは図1cに示す我々の独自の原理で製作したμ-PICという装置で初めて可能となりました。この新原理によって低雑音の精細なガンマ線画像を得ることが可能となり、その感度はこれまでのカメラの10倍以上となります。

我々は実際に、図2に示すような実機の1/5のサイズの試作カメラを製作、動作を実証しました。図2右上は、この試作カメラで撮像された2つのMeVガンマ線源(0.662MeV)のイメージです。雑音除去に成功し、2つのガンマ線源がクリアに分離されているのが見て分かります。現在、次のステップとして実機の3/5の大きさのガンマ線カメラを製作、気球による天体観測を計画しています。その後、実機ガンマ線カメラを国際宇宙ステーションに搭載して、数百の天体

をMeVガンマ線で観測、ブラックホールの正体に迫るなど、新しい宇宙像を切り開くことを目指しています。

(谷森 達, 窪 秀利, 身内賢太郎 [京大・理])

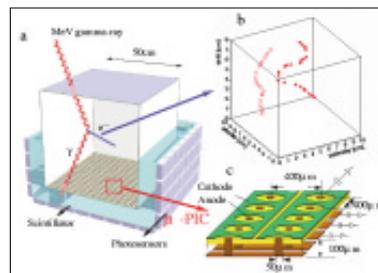


図1  
a: ガンマ線カメラの概念図  
b: 電子の3次元飛跡  
c: μ-PICの構造

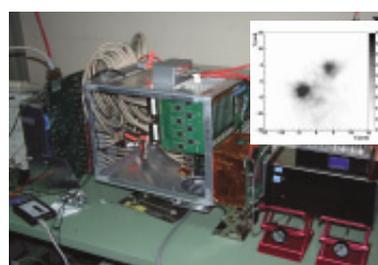


図2 10cmμTPCおよびアンガーカーメラから成るガンマ線カメラと、測定されたガンマ線源イメージ

\* ガンマ線: エネルギーの高い光子の総称。可視光の光子エネルギーは1電子ボルト(eV)程度。これに対してX線はその1000倍、MeVガンマ線はその100万倍のエネルギーを持つ光子。

## 超高角度分解能X線望遠鏡X-mas計画

望遠鏡の角度分解能には、光の波長と望遠鏡の口径で決まる原理的な限界があります。口径が大きければ大きいほど、波長が短ければ短いほど、分解能が高くなります。X線は波長が短いので、小さな口径の望遠鏡でも大変高い角度分解能が期待できます。しかし、現実には原理的な限界に近づくためには、望遠鏡の形状をX線の波長より小さい精度で作りに上げる必要があります。

私たちは、比較的簡単に高精度を達成するために、可変形状鏡と波面センサを用いて望遠鏡のゆがみを測定しつつ、そのゆがみを動的に補正する方法に挑戦しています。この方法により、人工衛星に搭載できるくらいの大きさで、原理的な限界の角度分解能を持つX線望遠鏡の開発を進めています。X線でミリ秒角の分解能を持つ望遠鏡を開発するという意味で、X-ray milli-arc-sec Project (X-mas 計画)と呼んでいます。今は実験室で試作望遠鏡を組み上げています(図)。主鏡や副鏡は、X線を反射する多層膜を使用しています。また、副鏡は可変形状鏡です。波面センサも駆動しており、可視光を使った動的な補正もできました。X線による性能評価まで、あともう少しというところです。

(北本俊二[立教大・理]ほか)

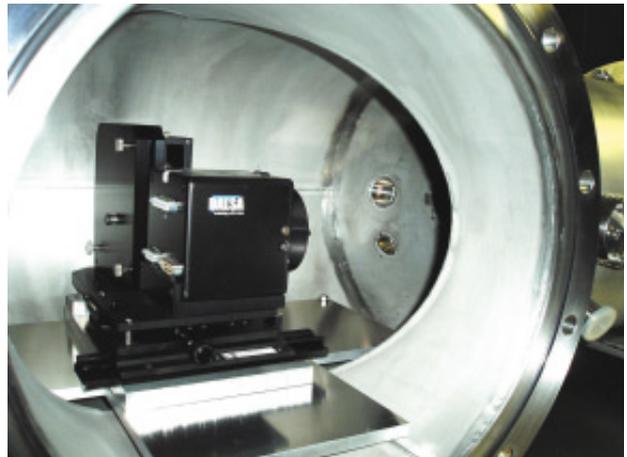


図 望遠鏡の鏡筒(真空容器)に収めた主鏡(奥)と波面センサ(手前)

## MAPMTを使用した気球搭載用硬X線偏光度検出器による、かに星雲の偏光度観測

天体の中にはX線を放出しているものもたくさんあり、そのような高エネルギー天体の観測は、現在活発に行われています。現在の観測では、天体のX線写真を撮ったり、X線の到来する時間を測ったり、エネルギーを測定したりして天体の性質を調べています。しかし、X線の偏光というものは測定が難しく、今までほとんど測られてきませんでした(X線も電波の仲間では一種の波。偏光とは波の振動方向だと思ってください)。もし偏光の観測が精度よくできるようになると、ブラックホールや強い磁場を持った天体の性質が、非常によく分かるようになります。

そこで我々は、X線領域で偏光を精度よく測定できる検出器の開発を、気球実験を通して行ってきました(図)。2006年度には、本格的な検出器を気球に載せて、かに星雲という天体が出す硬X線(エネルギーの高いX線)の偏光を精度よく測定する予定です。この実験が成功すれば、世界で初めての観測になります。また2007年度からは、かに星雲以外の興味深い高エネルギー天体の偏光観測を順次行っていきたいと思えます。

(郡司修一, 門叶冬樹, 櫻井敬久[山形大学], 気球グループほか)



図 気球実験によるX線偏光観測

# 宇宙太陽発電衛星用大型展開パネルのモデル試作

宇宙太陽発電衛星（SPS）システムは、衛星軌道上に大規模な太陽光発電システムを建設し、発電したエネルギーをマイクロ波で地上に送る、将来のエネルギーシステムです。SPSを実用化するための大きな課題は、衛星軌道上から受電サイトへ正確にエネルギーを送る技術を確立することです。

ここ数年、大電力無線送電技術実証のための衛星計画が検討されています。図にその一例を示します。一辺が16～17mのパネルの一面は太陽電池を敷き詰めた発電面、もう一方の面はアンテナ素子を並べた送電面となります。多数のアンテナ素子から構成されるフェーズドアレーアンテナを用いるため、アンテナは厚みを持つパネル形状となります。

私たちは、このような大型パネル状アンテナの展開機構に関して、形状記憶合金を用いたスマート展開アクチュエータの開発を行っています。スマート展開アクチュエータには以下のような利点があります。(1) 機構が単純でパネルに組み込みやすい、(2) 断続通電による展開順序制御、展開速度制御が可能、(3) ヒステリシスループを用いることで構造減衰に優れている、(4) アンテナ面の熱変形補償のための形状制御が可能。現在、モデル

試作を通して機能実証を行っています。

(宇宙太陽発電衛星検討グループ)

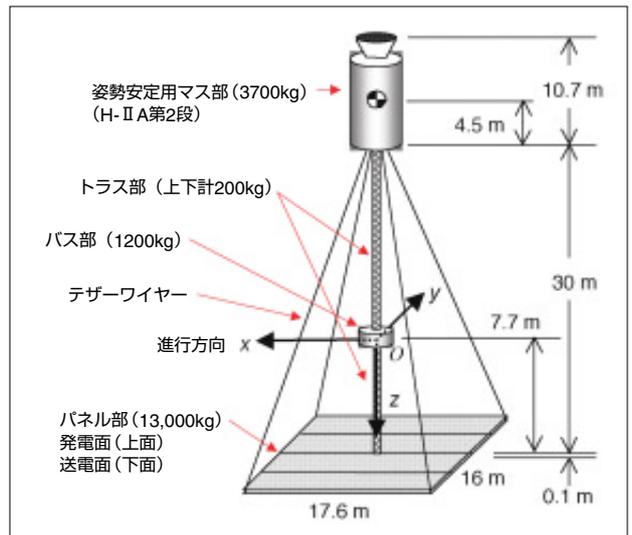


図 実証実験型SPSの概観

# 空気吸込み式エンジンFTBシステムの提案

20年後の宇宙はもっと身近になっているはず……。宇宙への旅行手段をイメージすると、飛行機のように運航されているロケット旅客機が浮かんできませんか？

私たちはその夢を実現するため、ロケットエンジンとジェットエンジンの機能を組み合わせた革新的なロケット複合サイクルエンジン（RBCCエンジン）が必要であると考えています。RBCCエンジンは、宇宙ではロケットになりますが、大気圏内では飛行機のジェットエンジンのように空気を吸い込んで燃焼に使うため、積んでいく酸素を減らして荷物を増やすことができます。性能の観点から、環境に優しい液体酸素と液体水素を推進剤とすることも重要な特徴です。

大気圏内では、普通のジェットエンジンと違って常に加速し続けなければならないため、その開発には音速の6倍（マッハ6）を超える超高速飛行実験が不可欠です。そこで私たちは、RBCCエンジンを開発するための実験装置として、試作エンジンを載せた機体をマッハ6程度まで連続的に加速できる飛行実験機（FTB）を開発することにしました。図が2段式のFTB機体案です。RBCCエンジンの試作品は、第2段の水平尾翼に取り付けられて性能を試されます。FTBの加速に使うメインエンジンは、毒性がなく

取り扱いやすい亜酸化窒素（ $N_2O$ 、笑気ガス）とエタノールを推進剤とする新しい液体ロケットです。FTB開発の第一段階は第2段のみの飛行実験で、2年後の初フライトを目指します。

(徳留真一郎, 羽生宏人, 川口淳一郎 [ISAS/JAXA], 大塚浩仁 [IHIエアロスペース], 山本高行 [東大院])

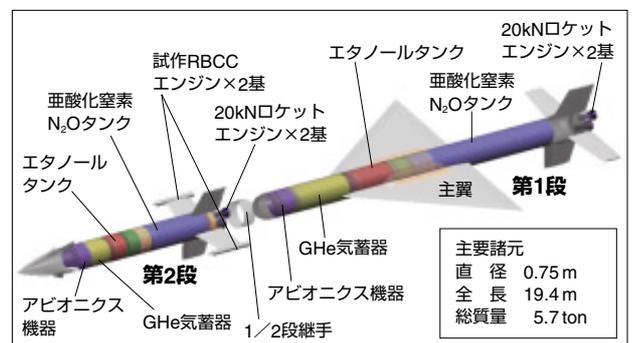


図 FTB機体案

## 軌道決定精度向上への取り組み

人工衛星や探査機（あわせて宇宙機と呼ぶ）と通信したり、計画通りに飛行していることを確かめたり、取得したデータを解析したりするためには、宇宙機の過去・現在・未来の位置を知る必要があります。この情報を軌道と呼び、ある時刻における位置と速度が分かればすべて計算できます。軌道決定とは、各種のデータをもとに、宇宙機のある時刻における位置と速度を求めることです。従来は、地上局と宇宙機との電波の往復伝搬時間（距離が分かる）と、地上局から送信され宇宙機で折り返されて再び地上局で受信された電波のドップラーシフト量（速度が分かる）のデータだけを使っていました。この方法では、上空1000kmを飛ぶ人工衛星なら数十mの誤差で位置が分かれます。

近年はさらに高精度が要求されるため、JAXAでは従来の方法に加えGPS、SLR、VLBIといった新しい計測方法や、天体の重力場推定に取り組んでいます。

GPS計測は、高度2万kmを飛ぶGPS衛星から

の電波を受信して位置を決め、SLRは地上局から宇宙機の鏡にレーザー光を当てて反射光が戻ってくる時間を測ります。VLBIは下の項目「相対VLBIを使った軌道決定」をご参照ください。

宇宙機の運動予測には宇宙機に働く力、すなわち重力場が分かっている必要があります。飛び飛びに得られたデータから連続的に宇宙機の位置を求めるには、重力場も正確に推定する必要があります。天体の重力は一樣ではなく、強弱があります。実際の重力場は細かく見ると非常に複雑ですが、複雑なまま扱うことは困難なので、目的に応じて近似した重力場を使います。現在、JAXAは月へのSELENE計画を進めていますが、月が常に同じ面を地球に向けているため、月の裏側の重力場が不明確です。そこで、リレー衛星経由で月の裏側を観測して高精度の月重力場推定をしようとしています。

（統合追跡ネットワーク技術部/OSFO/JAXA）

## 相対VLBIを使った軌道決定

従来の地上局からの電波による計測は、ともに視線方向データのため、深宇宙探査機のように地球から遠く離れた宇宙機の軌道は、視線と直角方向の位置が決まりにくくなっています。これを改善する計測方法がVLBI（Very Long Baseline Interferometry；超長基線干渉計）です。

VLBIとは、遠く離れた2つ以上の地上局で、天体からの電波を受信し、電波の地上局間での到達時間差から電波の到来方向を求めるシステムで、電波天文で従来使われてきた技術です。天体の代わりに探査機からの電波を受信することで、このVLBI技術を軌道決定に応用しています。さらに一歩進め、探査機とその近傍の電波天体を交互に観測し、地球上の探査機の位置を電波天体に対してより小さな誤差で求める方法が、相対VLBIです。探査機の位置は、視線方向に垂直方向に精度よく決まります。従って、従来のデータにこのVLBIデータを加えることにより、軌道決定精度が格段に向上します。

JAXAでは、臼田宇宙空間観測所64mアンテナと内之浦宇宙空間観測所34mアンテナの2つの地上局をVLBI局として整備しました。

（加藤隆二，吉川 真，市川 勉，望月奈々子，村田泰宏 [ISAS/JAXA]）

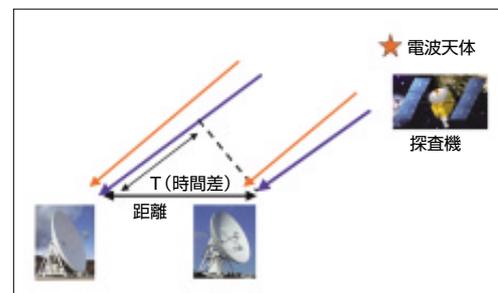


図 相対VLBIの原理

# 世界初の磁気セイルを実現したい

地球磁気圏を逃れて惑星空間に出ると、高速のプラズマ流である太陽風が吹き荒れています。この太陽風を宇宙機の作る人工的な磁場で受け止めることができれば、太陽風の運動エネルギーをもとに宇宙機の推進力を得ることができます。こうしたシステムは、磁場を帆(セイル)として太陽風を受け止める様子から「磁気セイル」と呼ばれていますが、未完の宇宙推進システムです。

磁気セイルによって宇宙機に必要な推進力を得るためには、非常に大きく強い磁場が必要ですが、宇宙機に搭載可能な超伝導磁石のサイズと性能には限界があります。このため、図2のように電磁石の作る磁場(帆)をプラズマ噴射によって大きく広げて推進力を得る「磁気プラズマセイル(MPS)」がWinglee博士によ

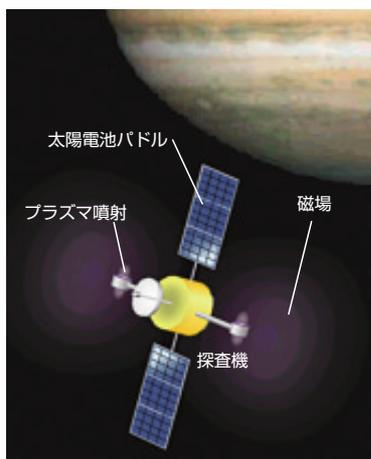


図1 磁気プラズマセイル探査機のイメージ

は、非常に大きく強い磁場が必要ですが、宇宙機に搭載可能な超伝導磁石のサイズと性能には限界があります。このため、図2のように電磁石の作る磁場(帆)をプラズマ噴射によって大きく広げて推進力を得る「磁気プラズマセイル(MPS)」がWinglee博士によ

って考案されました。

JAXAでは国内の研究者と協力しながら、理論解析と原理検証実験を進めています。帆を膨らませるためのエネルギーと比較して太陽風に押されるエネルギーがはるかに大きい場合、MPSのエネルギー効率は非常に高くなり、単位電力当たりの推進力は従来のイオンエンジンより1桁も大きくなるでしょう。MPSが実現すれば、木星や土星などの外惑星到着に必要な時間が大幅に短縮されるだけでなく、太陽系外へのミッションが夢から現実のものとなります。

(山川 宏, 磁気プラズマセイル研究会 [ISAS/JAXA])

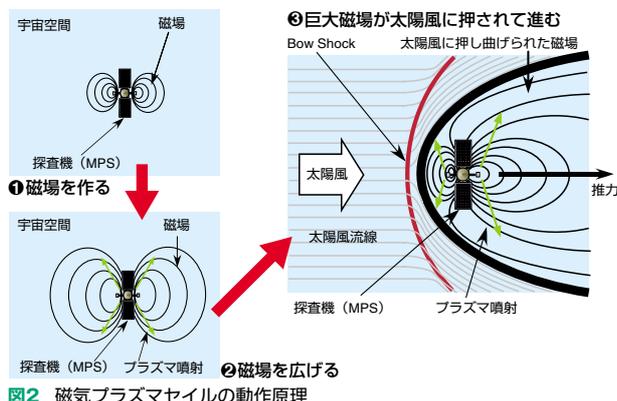


図2 磁気プラズマセイルの動作原理

# 人工衛星の姿勢を制御する高性能機器の開発

科学観測(特に天文観測など)を行う際には、人工衛星に搭載した望遠鏡などの視野方向を精密に目標方向に合わせる必要があります。そのためには、人工衛星が向いている方向(姿勢)を精度よく計測するセンサが必要です。高精度姿勢センサとしては、CCDカメラを使って星を撮影し、その写っている方向から人工衛星の姿勢を知る恒星センサが使われます。しかし精度を上げるためには、一般的には重くて消費電力が大きいものになってしまい、小型の科学衛星に載せることが難しくなります。JAXAでは、重量3kg、電力10Wで0.001度程度の精度を出す恒星センサを開発しています(図1)。

恒星センサは、星を撮影するための露光時間がある程度必要なので、1秒間に数回程度しかデータを出力することができません。人工衛星の姿勢を安定させるには、もっと高速に姿勢の変化を検出することができるジャイロが必要になります。現在、高精度なジャイロには機械式のもの(回転するコマのようなもの)が使われていますが、可動部の信頼性やその発生する微小振動が観測データに悪影響を及ぼしたりすることが問題となっています。これに対して、光ファイバージャイロな



図1 高精度恒星センサの光学部

どの非機械式ジャイロが中精度の用途には使われていますが、精度を上げるためにはさまざまな技術革新が必要です。JAXAでは、検出部の光ファイバーを長くする、出力の大きなレーザー光源を使用する、雑音を打ち消す回路を追加するなどして、高精度な光ファイバージャイロを開発しています(図2)。

衛星の姿勢を動かすためには、リアクションホイールといわれる回転する円盤を使います。円盤の回転数を上げたり下げたりすることで、衛星を回転させます。通常ホイールは、玉軸受で支えられて回転するため、機械式ジャイロと同様、信頼性や発生振動の問題があります。これを解決するため、回転円盤を電磁石の力で浮かしながら非接触で回転させ、回転軸を制御して振動が出ないようにする磁気軸受方式のホイールを開発しています(図3)。

(システム誘導グループ/ISTA/JAXA, 姿勢班/ISAS/JAXA)

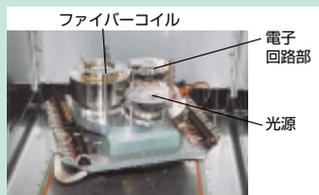


図2 高精度光ファイバージャイロの実験モデル



図3 磁気軸受方式のホイール

# 膜面展開構造物の 展開ダイナミクスと形状安定性

ソーラーセイルは、大きな帆にたくさんの太陽光を受けて宇宙航行します。太陽電池アレイは、面積を大きくすることにより発電量を増やすことができます。これらは大きいまではロケットに載せて打ち上げることができないので、小さく折り畳んでロケットに載せ、宇宙で大きく広げることになります。

ソーラーセイルの帆や太陽電池アレイは、大きな面積を必要とするのですが、厚みはあまり必要としません。従って、薄く軽量化することが可能になり、主に膜面で構成される構造物で作ることができます。しかしながら、1辺の長さが数十mから100mもある膜面をうまく作り、これをうまく折り畳んで収納する技術が必要となります。また、これを真空無重量の宇宙空間で安定して展開・運用する技術開発が必要です。

ISASでは、膜面を畳み込んだ状態から遠心力を利用して展

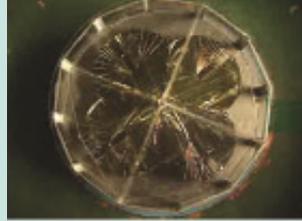
開し、そして安定化させる膜面展開構造物の研究に取り組んでいます。展開途中の膜面の振る舞いや展開後の安定性を確かめるために、回転テーブル式の展開実験装置を作って、展開ダイナミクスを計測しています。その計測データを用いて数値シミュレーションできるように、解析方法の研究もしています。膜面には折り癖やしわがしやすいので解析が大変難しく、宇宙で使う実際の大きさのものは地上では実験できません。このため、解析方法の研究も大変重要です。図は、何種類もの折り畳み方を考え、その展開実験をしたときの様子です。これらの成果は、2004年にS-310ロケットによって行われた宇宙実験で開花しましたが、今後はもっと大きく開花するように検討しているところです。

(衛星構造・機構研究班/ISAS/JAXA)

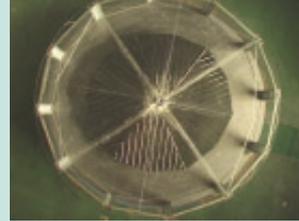
扇子型ソーラーセイル



クローバー型



回転二重折型



擬似対数らせん型

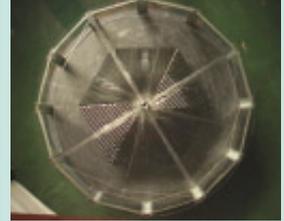


図 膜面の折り畳み方

## βチタンボルト

世に「御輿みこしに乗る人、担ぐ人、そのまた草鞋わらじを作る人」なる言葉がありますが、科学衛星(御輿)に乗って観測をする天文学者、衛星を動かすシステム工学屋、衛星を作る構造屋とくると、我々材料班は草鞋のわらをたたいているようなもの、とでもいえましょうか。ただし、草鞋の緒が切れたときの事故は、大変なことになります。

さて、チタン合金は軽量高強度材料として、宇宙・航空用に広く用いられるようになってきましたが、鋼やアルミニウムとは異なって六方晶構造という水晶に似た原子配列をとっているため、思いもよらぬ現象が起きることがあります。宇宙研科学衛星の姿勢・軌道制御用燃料タンクは従来からチタン合金(Ti-6Al-4V合金)で作ってきていますが、小惑星探査機「はやぶさ」においてより高い圧力まで使用したところ、ずるずるとひずみが増加するクリープ現象が発見されました。金属のクリープは通常高温でのみ出現するものですが、図1のように、六方晶構造を持つCP-Ti(純チタン)やTi-6Al-4V合金では室温クリープ現象を示すことが分かりました。

Ti-6Al-4V合金は、タンクばかりでなくボルトとしても使用されるようになってきています。ボルトを締め後のクリープは、そのままボルトの緩みに直結します。そこで現在、室温クリープの心配がないことが判明しているβチタン合金(Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn合金、鋼と同様の立方晶構造をとる)ボルトを開

発中です。試作したボルトは早速、INDEX衛星の強度要求の厳しいところに使用します。

また、図2に示すようにチタンは摩擦係数(ここではトルク係数で示してある)が大きく不安定であることも問題です。新開発のβチタンボルトにはコーティングを施し、安定して使用できるようにします。

(佐藤英一[材料班/ISAS/JAXA])

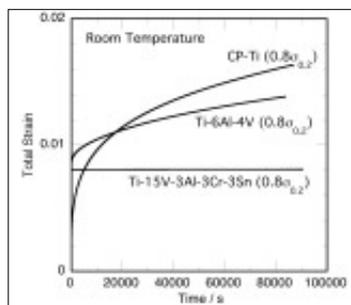


図1 3種のチタン/チタン合金の室温クリープ曲線

それぞれ0.2耐力の80%の荷重が負荷されており、負荷からほぼ1日後にCP-TiおよびTi-6Al-4Vでは $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 、 $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ というひずみ速度を示すのに対し、Ti-15V-3Al-3Cr-3Snはまったくひずみ速度を示さない。

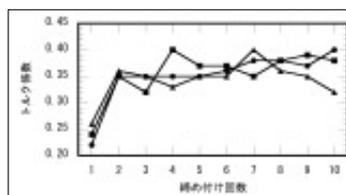


図2 βチタンボルトの締め付け回数とトルク係数の関係(ステンレス座金+潤滑[コーティングなし])

鋼ボルトでは0.15~0.20程度のトルク係数が、無コーティングのチタンボルトでは0.2~0.4という大きな値となっている。

## 形状記憶ポリマの研究開発

ロケットによる打上げ能力に限界がある中で、宇宙ステーション、人工衛星などの宇宙構造物は、その機能の多様化に伴います大型化する傾向にあります。宇宙構造物の大型化を実現し、さらにロケットへの搭載性を改善する手段として、展開構造技術が注目されています。

形状記憶ポリマは、ガラス転移温度 ( $T_g$ ) を境に弾性率が大きく変化します。そのため、図に示すように、材料の温度をコントロールすることにより、形状変化、形状固定、さらに形状を原形へ回復させることができます。形状記憶ポリマを利用すれば、小型・軽量かつ単純で高信頼性の展開構造が実現できると考えられます。

JAXAでは、宇宙用展開構造への適用を目的として、形状記憶ポリマの研究開発を実施しています。これまでに、ガラス転移温度の向上(約 $100^{\circ}\text{C}$ )に成功し、軌道上においても安定した形状変化を得ることが可能となりました。また、宇宙環境を模擬した電子線、紫外線および原子状酸素照射試験後においても、機械的特性や形状記憶特性に大きな変化がなく、宇宙環境への耐性が高いことを確認しました。今後

は簡易モデルを製作し、それを利用した動作確認試験や、収納限界測定などを行います。そして、これら試験結果が良好であれば、人工衛星に搭載し、宇宙実証試験を実施する予定です。

(島村宏之, 石澤淳一郎 [マテリアル・機構技術グループ/ISTA/JAXA])

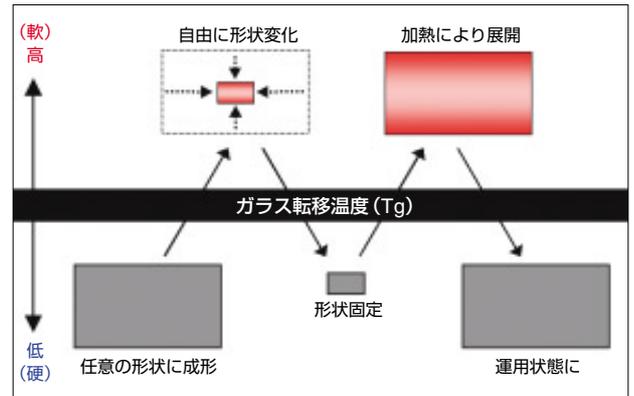


図 形状記憶ポリマの概念図

## 耐宇宙環境性に優れた宇宙用熱制御材料の研究開発

多くの人工衛星が金色に見えるのは、多層断熱材(フィルムを積層した断熱材)の最外層に、アルミニウムを蒸着した黄色～褐色のポリイミドフィルムを使用しているためです。この最外層のフィルムは、過酷な宇宙環境に直接曝露されるため、高い耐宇宙環境性が要求されます。

紫外線、放射線、原子状酸素(その他、熱サイクル、真空など)は、材料、特に高分子材料を劣化させる要因になります。ポリイミドは宇宙環境に強く、高い耐熱性を持つ優れた宇宙用材料ですが、原子状酸素に対する耐性が低いため、その耐性向上を目的とした研究開発を行っています。

原子状酸素とは、酸素分子が紫外線によって分解されたものであり、高い反応性を持っています。宇宙ステーションやスペースシャトル、地球を周回する観測衛星などは、地球の大気成分がまだ多く残っている低い軌道(高度数百km)を飛行するため、紫外線で分解された原子状酸素に衝突します。宇宙機の速度が秒速約8kmのため、原子状酸素との衝突もこの速さとなります。この衝突エネルギーと原子状酸素の持つ反応性が、材料に激しい侵食を与える原因です。

原子状酸素は衝突する材料を侵食するため、材料表面を守ればよいことになります。そこでJAXAでは、原子状酸素に強い酸化物系セラミックス膜をポリイミドなどに付与した

材料の開発を行っています。ステンレス鋼やアルミニウム合金の不動態被膜と同じ発想です。ところが、これらの膜は硬くもろいため、人工衛星の組立て時や打上げ時に、細かな割れを生じる問題があります。筑波宇宙センターにある真空複合環境試験装置を利用した研究の結果、原子状酸素保護膜に細かな割れがあると、割れより広い範囲で原子状酸素による侵食が発生することが分かりました。そこで現在は、変形に対して割れにくい密着性のよい膜や、地上では軟らかく宇宙環境で原子状酸素と反応することによって酸化膜を作るコーティングの研究を行っています。密着性を高めるために使用する材料やコーティングについては、紫外線や放射線による耐性が当然必要となるため、地上環境試験装置や宇宙ステーション外壁を使用した幅広い評価試験を実施しています。

これらの研究成果によって開発される熱制御材料は、要求される特性(熱光学特性、機械的特性、電気伝導性など)をより長期間維持できるようになり、人工衛星などの宇宙機の長寿命化、高機能化を支えます。

(石澤淳一郎, 宮崎英治, 島村宏之  
[マテリアル・機構技術グループ/ISTA/JAXA])

# 先進型熱制御デバイス ループヒートパイプ

人工衛星などの宇宙機は、高機能な観測／制御機器が数多く搭載されています。そのため、各機器からの発熱によって、宇宙機の温度はどんどん上昇してしまいます。しかし、宇宙には空気がないため、ファンの送風による温度制御の方法は使えません。そのため宇宙機では、外部にある放熱面まで熱を運び出す仕組みが採用されます。そこで熱の運び屋として登場するのが、「ヒートパイプ(Heat Pipe, 以下HP)」と呼ばれる熱制御デバイスです。今やノートパソコンなどでは当たり前に使われるようになったHPですが、実は航空宇宙の分野で発展してきました。そして、どんな最先端の科学衛星も今やHPなしではうまく機能しません、と言ってしまうかもしれませんが、逆に、高性能のHPを開発すれば、“観測装置の性能を最大限に引き出す”ことができるといえます。

我々は、そんな次世代のHPとして、HPの概念を拡張した「ループヒートパイプ(Loop Heat Pipe, 以下LHP)」と呼ばれる先進型熱制御デバイスの研究を行っています(図)。

さまざまな利点を持つことから、米国ではこのLHPが主流になりつつあります。例えば、ハッブル宇宙望遠鏡、地球科学衛星Aura、そして宇宙科学衛星SwiftにもLHPが搭載されています。一方、日本では、LHPはまだ技術実証の段階(USERS/CPDR, ETS-VIII/FLHP)でしかありません。しかし、国際宇宙ステーション「きぼう」曝露部搭載予定の日本の実

験装置である全天X線監視装置(MAXI, 2008年予定)には、海外製ではありますがLHPが日本の宇宙機では初めて使用されることになっており、非常に注目されています。

我々は、このLHPのさらなる機能性向上を狙って、高信頼性化、軽量化を目指しています。

(永井大樹[東北大], 上野史郎, 小川博之[ISAS/JAXA])

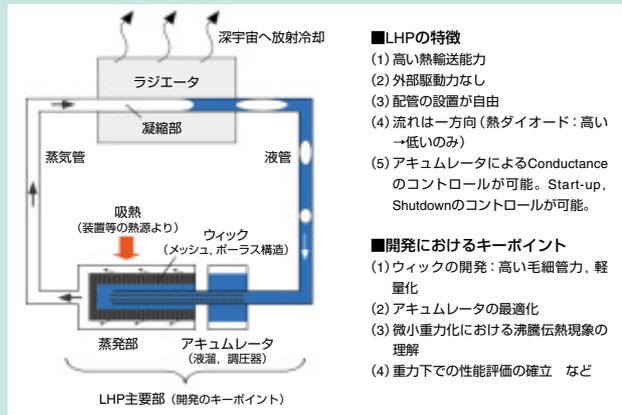


図 ループヒートパイプの概略図と特徴

# 宇宙機の耐・帯電放電技術への取り組み

人工衛星には電離層に存在する荷電粒子であるイオンや電子が流入し、帯電を起こします。一般的な衛星の場合、その帯電電圧はたかだか数十ボルトですが、太陽活動が盛んになると地球低高度軌道でも高エネルギー粒子群が出現し、数千ボルトに達することもあります。衛星同士がドッキングする場合、互いに電位差があると接触の瞬間に放電を伴います。衛星の表面や内部に電氣的に孤立した個所があれば、それぞれ独立に帯電して、ついにはアーク放電に至ります。高電圧太陽電池パネルでは、表面に露出した正負の電極から電離層に存在する荷電粒子を介して電流経路が作られ、電力漏えいやイオン抗力の増大をもたらします。衛星の大型化や大電力化は、より高い電圧を使用する傾向にあり、さらに進んでイオンエンジンのように積極的に荷電粒子を噴射する技術もすでに実用段階に入っており、宇宙空間の荷電粒子との相互作用が問題になっています(図)。

具体的事例として、2003年末の史上最大太陽フレアの時期に発生した「みどりII」衛星の軌道事故は、帯電放電が引き金となったと分析されています。このような宇宙事故を未然に防止するため、衛星帯電解析ツールMUSCAT

(Multiutility Spacecraft Charging Analysis Tool)の開発に着手しました。これは静止軌道、地球低高度軌道、極軌道宇宙環境において衛星の局部帯電を高い頻度と精度で解析し、憂慮される個所や環境を見だし、衛星設計に迅速に反映することを目的としています。

(國中均[ISAS/JAXA], 五家建夫[ISTA/JAXA])

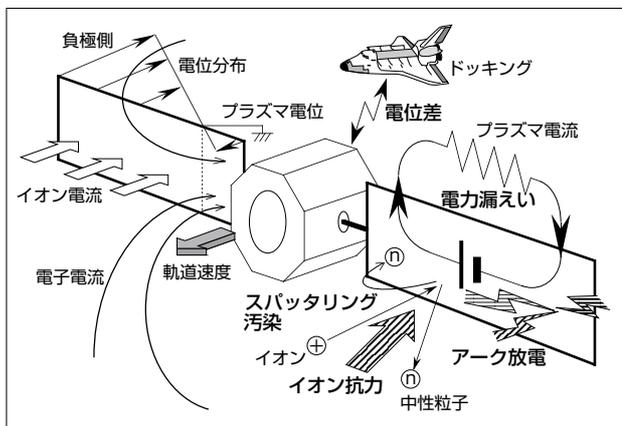


図 電離層に存在する荷電粒子との干渉

# 宇宙技術が生んだ 高信頼民生用半導体メモリの開発

宇宙用半導体メモリにおいては、宇宙放射線によるソフトエラー（放射線によるビット反転エラー）が深刻な問題であることが知られていました。一方、微細化の進む民生用半導体メモリにおいても、近年、部品内部の不純物材料から発生する放射線問題に加えて、地上に降り注ぐ中性子線の問題が顕在化しています。そのため航空機だけでなくハイエンドサーバーなどIT基盤技術におけるソフトエラーの問題が強く危惧されています。

このたび宇宙研は、三菱重工業（株）および沖電気工業（株）と共同で、独自の耐放射線強化シミュレーション技術と最先端の民生SOI（Silicon On Insulator）製造技術を用いて、高信頼民生用半導体メモリを開発しました（図）。また開発したメモリに対して、フランス原子力エネルギー研究機関の研究者と共同で、米国ロスアラモス研究所において中性子照射試験をしました。その結果、宇宙から降り注ぐ中性子線によるソフトエラー確率が、今までに発表されている民生用半導体メモリのものに比べて2桁近く小さいことを確認しました。これは、宇宙科学の研究で生まれた先端技術が、高信頼性が要求される民生産業機器用半導体メモリの深刻なソフトエラー問題を一気に解決したことを意味するものです。

（廣瀬和之、齋藤宏文、福田盛介 [ISAS/JAXA]）

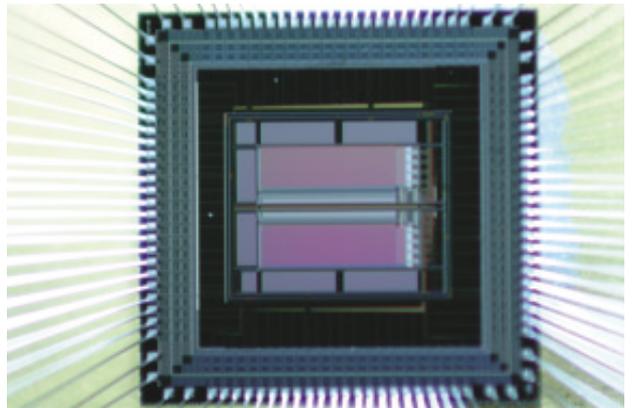


図 高信頼民生用半導体メモリ

## 衛星に載せるソフトウェアを楽に作る

衛星に載せるソフトウェアは、ほかの分野より比較的単純で、データの入力と出力処理部分の割合が大きいのが特徴です。その理由としては、使える計算機的能力が小さいこと、十分な動作確認を地上で行いたいこと、高度な処理は地上に割り振る傾向にあること、などが挙げられます。

衛星に載せるソフトウェアは、その作成方法も原始的なものでした。受け渡すデータの項目を仕様書や設計書に列挙し、これに沿ってプログラムを手で書いていきます。手作業ではミスが混入するので、動作確認を入念に行い、ミスを取り除いていきます。衛星を構成する機器ごとに確認をすることで、かなり正しいプログラムになります。それにもかかわらず、機器を組み合わせ衛星に仕上げる段階になってミスが発覚します。機器を組み合わせた後に間違いを探す作業は、衛星の開発期間を長引かせる要因の一つです。

我々はこの現状を変えるため、宇宙のソフトウェア開発の流れを変える取り組みをしています。我々が考えている

方法では、データの入力と出力処理部分をコンピュータに読み込ませやすく、設計者自身が理解しやすい書き方で記述します。これがデータの入出力に関して設計者が手作業で行うことのすべてです。この記述に従えば、いろいろなデータの入出力を一つのソフトウェアで確実に行うことができます。その結果、個々の装置のプログラム作成の手作業で発生するミスを撲滅し、また作業量を減らすことができます。同様なことは、地上のソフトウェアの世界ではしばしば行われています。

我々の方法の特徴は、計算機的能力などの制約に合わせた、きめ細かな調節が可能なこと。現在我々は、この記述に従ったデータの入出力を実現する汎用なソフトウェアを製作しています。これが出来上がると、衛星に載せる機器ごとのソフトウェア設計者の単純作業が減り、プログラムのより高度な処理部分の作成に集中できるようになります。

（松崎恵一 [ISAS/JAXA]）

## 次の世代の地上局に向けて

世の中の通信技術の進歩には目覚ましいものがあります。身近な通信技術の目的は、いかに情報を効率よく正確に伝送するかということです。小型で省エネ、そしてデザインによさも、最近では重要な話題です。私たちが取り組む宇宙通信技術でも効率のよい伝送、省エネは大切ですが、それが特殊であるのは、どれほど遠方まで通信可能な領域を広げ得るかということも興味ある話題だからです。そのための技術を今、開発しています。しかも安価に。目立たない技術でも、そこに工夫があります。

私たちが取り組んできたのは、新しい地上局にふさわしい地上系システムの開発です。金星や水星といった探査機には、新しい通信機器が採用されることが決まりました（『ISASニュース』2003年12月号No. 273参照）。さらに通信能力を高めるために、今度は地上の通信装置というわけです。私たちの深宇宙地上局である臼田宇宙空間観測所の64m径の大型アンテナは、竣工から20年を経過してその寿命が心配されています。

図は、実験中の地上系装置のひな型です。見栄えはきれいではありません。でも、この骨組みだけに見える無骨な装置で試験を重ねて、晴れて将来の地上系を支える技術に昇華します。木星までの遠距離において、宇宙研の小型衛星

で探査を行うためには、非常に微弱な信号から規則的な成分を同期、再生し、引き続き復調結果の誤りを取り除く精緻な作業が必要になります。この装置は実験装置らしく、新しい技術が後から後から盛り込めるように工夫されています。現在は、再生方式型の深宇宙測距方式、誤り訂正符号として深宇宙用のターボ符号（携帯電話でもおなじみですね）が準備されています。研究所の学生の力が手伝って、お披露目は、もうすぐそこです。

（戸田知朗 [通信班/ISAS/JAXA]）



図 実験中の地上系装置

## 衛星異常監視・診断システムISACS-DOC

現在、科学衛星は高度な観測要求を満足させるために、機能の複雑化および高度化が進んでいます。そのため衛星の正確かつ安全な運用を実現するために、衛星運用のための異常監視・診断システムが必要とされています。ISAS/JAXAでは1992年より、人工知能技術を用いた衛星の異常監視と状態診断を行う地上システムISACS-DOC (Intelligent SAtellite Control Software-DOctor)の研究・開発を行ってきました。これまで磁気圏観測衛星GEOTAIL、火星探査機「のぞみ」および小惑星探査機「はやぶさ」用システムの開発・運用を経て現在に至っています。

当初ISACS-DOCは、エキスパートシステムを用いた故障診断システムとして開発されました。これは異常が発生したときに異常発生の原因を診断し、その結果、可能性のある複数の故障原因を示すものでした。しかしながら実際の運用では、可能性のある複数の故障原因の提示では逆に運用者の混乱を招くことが分かり、故障診断ではなく、信頼度の高い異常察知と関連する情報の提示が有効であることが分

かりました。運用時には「何が異常であるか」確実な情報を示すことが重要であり、そのためにシステムの性格を「異常診断」から「異常監視」へと変更しました。

次期ISACS-DOCは、ASTRO-F向けに開発を行っています。ASTRO-Fは低高度地球周回衛星であり、これまでISACS-DOCを開発してきた深宇宙機とはさまざまな点で異なります。最も大きな違いは高速なデータ処理能力が必要という点であり、そのため処理能力の高性能化や監視項目の厳選化と優先順位の設定などが必要と考えています。同時に本システムのキーポイントである知識収集に関しては、これまでの経験を活用し、従来専門家や経験者の手作業で集めてきた知識をテンプレート化することで、ある程度機械的に収集することを考えています。次期システムでは地球周回衛星への適用を予定しており、より良いシステムを目指して研究・開発を行っていきます。

（高木亮治，橋本正之，本田秀之，長木明成 [ISAS/JAXA]，  
野村和哉 [富士通]，水谷光恵 [FASOL]）

## 先端情報技術研究開発計画

近年、情報技術を活用したものづくりが非常に進んできています。2次元の図面に代わり直感的にとらえることができる3次元のCAD (Computer Aided Design)を用いた設計や製造、あたかも自分が仮想空間の中にいるかのような技術を用いた設計の確認といったことが行われるようになってきています。

先端情報技術研究開発計画は、このような最新の情報技術を宇宙開発に取り入れることで、これまでよりも早くしかも確実に衛星やロケットを開発するとともに、逆に宇宙開発を通じて情報技術をさらに発展させることを目指しています。

例えば、衛星は何人も技術者が何度も設計情報をやりとりしながら初期の設計が行われます。このため時間がかかるばかりでなく、情報の伝達ミスが起こることがあります。設計に必要なソフトウェアを一つの情報システムに備え、この情報システムを用いて設計することで、その課題を解決することができます。これが衛星設計支援システムです(図)。また、この設計支援システムには設計履歴を記録する仕組みがあり、優れた設計者がたどった軌跡を追うことで設計者の教育、訓練に活用することもできます。

現在、先端情報技術研究開発計画には大小12の研究プロジェクトがあります。これらの研究は、これまでの衛星開発、

さらには宇宙開発のやり方を革新してくれるものと期待しています。

(館 和夫 [先端情報技術ラボラトリ/ISTA/JAXA])

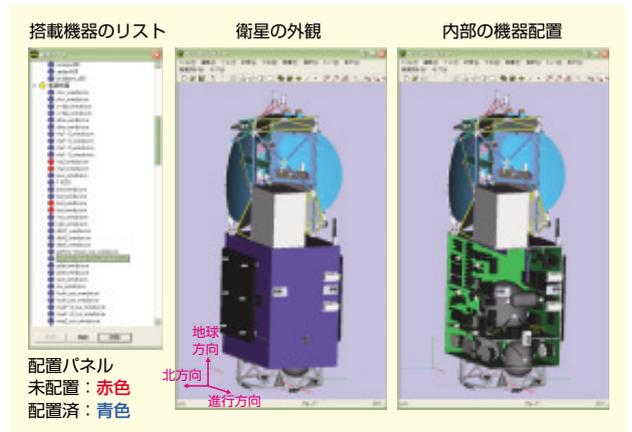


図 衛星設計支援システムを用いて搭載機器の配置を行った例

## 回折限界可視光望遠鏡技術

SOLAR-B衛星搭載の可視光望遠鏡は、空間分解能0.2秒角(もし地上を見ると、50cmのものまで分解できる解像度)という非常に高い分解能を持ち、これまでの軌道望遠鏡を約1桁上回っています(図1、図2)。太陽観測のための高分解能望遠鏡は、1970年代からNASAを中心に検討されてきましたが、SOLAR-Bで望遠鏡を日本が、焦点面観測装置をNASAが分担することで、世界で初めて実現できました。

太陽を観測する場合、観測する可視光が大きな熱を持っているため、不要な熱を宇宙に排出するなどの工夫が凝らされていますが、それ以外にも、この望遠鏡には今後の日本の宇宙科学に必須の回折限界(光の波動的性質を考慮して得られる最大の分解能)望遠鏡技術が結集されています。凹凸が6ナノメートルしかない口径50cm軽量(14kg)主鏡、打上げ環境に耐えかつ主鏡をゆがめることのない主鏡支持機構、打上げの振動や軌道での温度変動に対して主鏡と副鏡を数ミクロンの精度で保持する低膨張(0.1ppm)複合材料構造、衛星の揺れによるぶれを取り除く可動ミラーによる画像の安定化(実験室で0.002秒角の安定度を実現)などがあります。

このほかにも宇宙での光学性能を保証するため、地上での試験にさまざまな工夫が凝らされています。望遠鏡は重力の影響を受けてゆがむため、そのままでは結像性能の確認ができません。

このため、望遠鏡が正立したときと全体を反転したときの2枚の波面誤差マップの和をとります。重力の方向が逆になると望遠鏡の変形が全部逆方向になることを利用して、軌道上では望遠鏡による波面の乱れが光の波長の30分の1程度しかないことが確認されました。さらに、望遠鏡と基準の平面鏡を真空槽に入れ、地上と温度分布が極端に異なる軌道熱真空環境で光学性能および焦点位置の確認を行いました。衛星レベルでの振動試験や熱真空試験の後でも望遠鏡の光学性能を確認できる光学ポートを持つため、自信を持って打ち上げることができます。

望遠鏡は、平成16年夏には目標性能の達成が確認されました。SOLAR-B可視光望遠鏡により、太陽の電磁流体现象の解明が大幅に進むと世界から期待されています。

(常田佐久 [SOLAR-B可視光望遠鏡チーム/国立天文台])



図2 完成した可視光望遠鏡

図1 SOLAR-B光学架台上の完成した可視光望遠鏡

# 木星電波探査機搭載用超軽量デジタル受信機

木星からは、さまざまな周波数の電波が放射されています。木星電波を観測することによって、木星電波の発生メカニズムなどが解明されることが期待されます。それはまた、木星の磁気圏、電離圏の構造の理解につながります。

将来、木星探査ミッションが計画された場合などに備えて、木星から発せられる電波を木星磁気圏内で観測でき、かつ重量・電力の制限が厳しい探査機に搭載可能な軽量かつ省電力のデジタル素子を用いた受信機を現在開発中です。

我々がターゲットとしている電波の周波数帯は、地上では電離圏で反射されるため観測できず、地球周回軌道上でも惑星空間の擾乱の影響を受け正確な観測ができないため、木星の近くまで行く必要があります。

我々が開発している装置の中核は、図に示したような機器の一部を成すダウンコンバーターと呼ばれるもので、電波受信機には必須の受信信号の周波数変換を行うユニットです。

我々は携帯電話などで使われている超軽量デジタル素子

を応用し、現在計画されている月面での宇宙電波観測にも応用が可能な装置の開発を行っています。この受信機は、複数チャンネルの特性を容易にそろえることができるという特徴を利用して、地上での太陽電波などの偏波観測にも利用が考えられています。

(越田友則, 小野高幸, 飯島雅英, 熊本篤志, 三澤浩昭, 土屋史紀 [東北大・理])

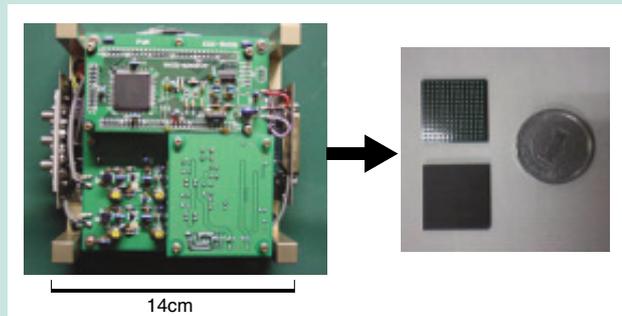


図1 アナログ掃引受信機(1ch)とデジタル掃引受信機(4ch)のコアとなるデジタルダウンコンバーターチップ

# 紫外光観測器の感度アップ

惑星大気や電離圏・磁気圏を人工衛星から紫外光で観測すると、主要成分の水素・ヘリウム・酸素の原子やイオンの分布が撮影できます。これを時系列に並べ動画にすると、各原子・イオンの運動の研究につながります。これまでに「あけぼの」衛星による地球のオーロラやハッブル宇宙望遠鏡による惑星画像などたくさんの写真が撮られ、惑星科学の研究が進んでいます。さらに発光量が微弱でこれまで観測できなかった対象を撮影したり、より詳細に大気の運動を調べたりするためには、観測器の感度アップが必要となります。

光の検出は、光子を電子に変換し、電気信号として処理することで行います。光子を電子に変換する割合(量子効率)は、光子が最初に当たる物質によって決まります。通常検出器に使われる材料の量子効率は、紫外光では数%にすぎません。そこで、量子効率の高い物質を検出器前に置き、電気信号として処理できる光子の割合を高める方法が考えられています。

本研究では、ヨウ化セシウム(CsI)と臭化カリウム(KBr)という物質について、紫外光での量子効率増加率を調べました。結果は、波長100nm以下においてKBrが6~8倍増加し、115nm以上ではCsIが10~50倍も増加することが分かりました。さらに、量子効率増加率は、製作から衛星の打上

げ、宇宙での観測までの間に経年変化をします。この変化についても調べ、CsIが50日後に3割減少、KBrが100日後に4割減少し、その後は変化しないことが分かりました。

(山崎 敦 [東北大], 三宅 互 [情報通信研究機構])

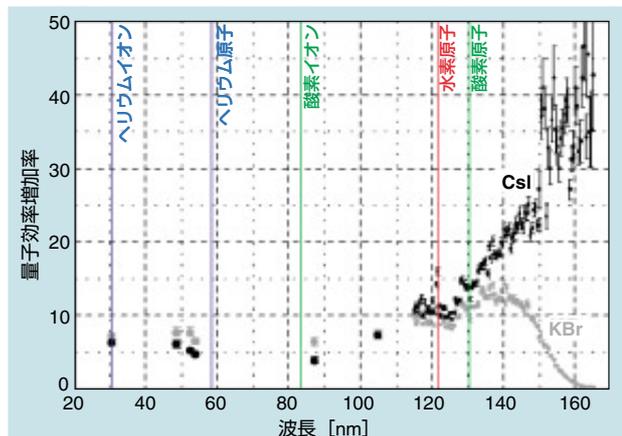


図2 量子効率の増加率の波長依存性  
黒丸がヨウ化セシウム(CsI)、灰丸が臭化カリウム(KBr)を表し、主要な原子・イオンの発光波長も示している。

## 超軽量SiCミラーの高効率加工

宇宙望遠鏡などのミラーは、詳細な画像を得るために大きな口径を必要としますが、ロケットの打上げ能力による重量制限から、大幅に軽量化したミラーを製作する必要があり、一般的に図1のような裏面にリブ構造を持つ形状が採用されます。そのため、表面・リブ部分が数mmと薄くても十分な強度を保つよう、ミラーの素材にはダイヤモンドに次いで硬い物質の炭化ケイ素(SiC)を用います。また表面を鏡面に仕上げる際に、SiCがとても硬いため、通常の加工方法では長い時間と労力が必要なので、難加工材料でも効率的に鏡面加工可能なELID研削※により加工を行っています(図2)。しかしELID研削でも、リブ構造ミラーを研削する際には、加工面の裏側にリブがない部分では砥石が加工面を押して、砥石の通過後には盛り上がってしまうスプリングバックが生じるという問題があり、鏡面の形状精度が損なわれます。

そこで、加工時の変形を予測するシミュレーションを行い、最も効率よく加工できる加工条件を求めました。実際にナノ精度超精密加工機を使用して研削加工を行ったところ、通常では700~800nmの加工変形が生じますが、シミュレーションによる最適な加工条件では変形量が70nm弱で得られ、変形量が1/10となるとも効率のよい加工を実現しました。

これからはシミュレーションと加工技術、さらには計測技術

など、すべてを統一したデータで取り扱う高効率ミラー製造システムを開発する予定です。

(理化学研究所VCADものづくり応用チーム)



図1 SiCミラーの裏面



図2 ELID研削加工後のSiCミラーの鏡面

※ ELID研削法：理化学研究所大森素形材工学研究室が開発した研削加工技術。http://www.elid.jp/

## テラヘルツ光による天体観測技術

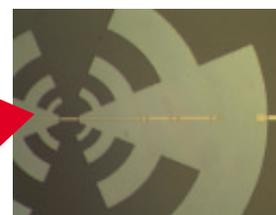
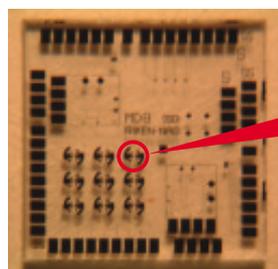
最近、「テラヘルツ光」あるいは「T-ray」という言葉を耳にすることがあります。X線に代わって不透明な物体の中を調べる手段に使うことができる電磁波のことで、赤外線と電波の境界領域を指します。遠赤外線あるいはサブミリ波とも呼ばれます。遠くの宇宙を観測するために適した波長領域と考えられており、地上観測装置としてはアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)が、宇宙空間からはASTRO-Fによる遠赤外線観測が予定されています。

国立天文台の天文機器開発実験センターでは、テラヘルツ光による天体観測性能を飛躍的に向上させるため、検出技術と光学技術の開発を推進しています。その中心となるのが、超伝導トンネル接合を用いた高感度検出器アレイと、この検出器を用いた超広帯域干渉計技術です。ニオブ超伝導体を用いたトンネル接合素子を絶対温度1K以下の極低温に冷却することで、感度の高いテラヘルツ光検出器が実現されました(図)。同時に、極低温で動作するCCDのような読み出し回路を開発中で、テラヘルツ光のカメラを実現できる可能性がだんだん見えてきました。

このカメラを使って天体のさらに細かい構造を調べるため、干渉技術の開発も進めています。電磁波の波の性質と光子の性質を使い分けることで、数百GHz以上の周波数帯

域で高感度の干渉計が実現できる見通しが得られています。宇宙空間の環境を活かした高感度広視野検出器と超広帯域の干渉計を組み合わせることで、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡で得られるようなダイナミックな画像が、テラヘルツ光で得られるものと期待されます。宇宙で最初に形成されたプラズマ、重元素、宇宙ダストをテラヘルツ光で見通してみたいと夢見ています。

(松尾 宏 [国立天文台])



検出素子の拡大図

図 超伝導トンネル接合を用いたテラヘルツ光検出器

# JAXA長期ビジョンと宇宙科学

現在、JAXAでは、日本の新しい宇宙機関としての「長期ビジョン・中長期戦略」を策定する作業が進められています。宇宙科学は、このJAXA長期ビジョンの中で、当然ながら重要な部分を占めるべきと考え、長期ビジョン策定作業には宇宙科学研究本部から何人かのメンバーが加わり、重要な貢献をしてきています。また、その作業の内容は、折に触れ宇宙科学を支える研究者コミュニティに伝えられ、その声を作業に反映する努力も試みられてきています。

今回のJAXA長期ビジョン策定の根幹には、「これまでの宇宙開発が、『国として、ロケット技術・衛星技術を確立する』との目標のもとで進められ、一定の予算が保障されてきたのに対し、今や日本の宇宙開発は一応のレベルに達し、民間に引き渡す部分は引き渡し、今後、国としては何を推進していくべきかを整理し、明確にしていく必要がある」との認識があります。宇宙科学も事情は変わらず、これまで固体ロケット開発・衛星技術開発の旗のもとで、一定の保障された予算の恩恵を被ってきましたが、今後は、「JAXAとして進めるべき宇宙開発の新しい目標」のもとで、

その重要な一部を担っていく方向性を見せていかなければなりません。

今、JAXAに求められるものは、科学技術立国の表看板の一つとして、国際的に確固たる存在感を示し、人類の将来を開く先進的宇宙技術を開発していくことと思われます。そのためには、世界第一級の「科学」を進展させ、世界最先端の「技術」を飛躍させていかなければなりません。そしてそれらの進展・飛躍には、発想の自由さ・奇抜さが重要であり、宇宙にはそれを引き出す広さ・深さがあります。

「長期ビジョン・中長期戦略」には、具体的な目標が示され、着実な段階を踏んでいくことが示されなければならないでしょう。しかし同時に、自発的で多様な方向の研究開発が進められる包容力と、一定規模の挑戦的試みを許していける柔軟性とを、併せ持たなければなりません。宇宙科学は、全人类的・普遍的な成果を挙げていくだけでなく、自発的で挑戦的な試みの機会を提供し、創造的なJAXAを作っていく看板としても、大いに貢献していただけるものと信じます。

(井上 一 [研究総主幹/ISAS/JAXA])

## 編集後記

私は『ISASニュース』編集委員兼宇宙科学シンポジウム世話人であったので、今回の特集号の編集担当を必然的に引き受けることとなりました。しかし、ページ数は通常の3倍以上、著者数も非常に多く、原稿依頼、文体の統一、校正結果のまとめなど、膨大な作業にぼうぜんとなりました。シンポジウム世話人各位、編集委員各位、そしてフォトンクリエイトさんの多大なる協力を得て、なんとか発刊できました。

特集号は誌面の制限もあり、また編集スケジュールが非常にタイトであったため、シンポジウムでの発表のうち将来計画(まだ公式にプロジェクトがスタートしていないもの)と

宇宙科学を支えるテクノロジーに関するものだけに限り、さらに『ISASニュース』の読者層に興味を持ってもらえる内容に絞りました。シンポジウムの詳細については、後日刊行される後刷集をご参照ください。

表紙のイラストは、将来計画の衛星想像図を太陽系の背景の上に配置してみました。地球と月の写真は、「はやぶさ」探査機が2004年5月に撮影したものです。火星と木星はNASA提供のものですが、数年後にはすべて日本の探査機の撮影した写真に置き換えたいですね。

(橋本樹明)

## 所属機関の略称

JAXA：宇宙航空研究開発機構

ISTA：総合技術研究本部

EORC：地球観測利用推進センター

ISAS：宇宙科学研究本部

OSFO：宇宙基幹システム本部

総研大：総合研究大学院大学

ISASニュース 2005.3 No. 288 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: newscedit@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。

**R100**  
古紙配合率100%再生紙を使用しています

● 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