

特集 日本の宇宙科学の近未来



新年のごあいさつ

鶴田浩一郎 宇宙科学研究本部長

明けましておめでとうございます。

私たち日本の宇宙にかかわる者は、昨年後半の3カ月間にすさまじい激震を経験いたしました。10月1日に宇宙3機関を統合した宇宙航空研究開発機構（JAXA）が発足し、H-IIAロケット6号機の失敗、地球観測技術衛星「みどり」の機能停止、そして火星探査機「のぞみ」の火星周回軌道投入断念をこの短い期間に経験することになりました。日本の宇宙はどうなっているのだと国民の皆さまからおしかりを受け、かつご心配いただくことになりました。2004年の新年は、このような背景を背負っての幕開けであります。この事実を踏まえた上で、宇宙科学研究本部（ISAS）の2004年を考えてみました。

まず第一に、昨年に引き続き3件の不具合について原因究明の努力を続ける必要があります。特に宇宙科学研究本部は、「のぞみ」の火星軌道投入を断念するに至った経緯を調

べ、直接の原因となった不具合の発生がなぜ避けられなかったのか、十分な検討を行う必要があると思っています。

第二は、現在進行中の衛星ミッションについて再点検を行う必要があると考えています。点検の方法、内容については宇宙工学委員会の委員長に検討をお願いしてありますが、打上げを控えた衛星について十分「手が打てる」時期に再点検を行い、必要なら「手を打つ」ことをしたいと思います。最初の対象は、打上げ予定が最も早いLUNAR-Aの衛星本体、搭載ペネトレータ、打上げロケットとし、次いでしかるべき時期にASTRO-EIIの再点検を行いたいと思います。

第三はJAXAの組織整備です。JAXAの骨組みは3カ月前の発足時にすでに出来上がっていますが、まだ動くときギシギシきしみ音が出る状態です。本来ならこの数カ月の間に調整が進んでいて、もっとスムーズな動きができるようになっていたはずでした。しかし、連続した不具合のため調

整作業が遅れて現在に至っています。特に宇宙科学研究本部は、大学共同利用機関としての機能の維持、学術としての宇宙科学研究の推進といった他の本部とは異なった目的を掲げているために、JAXA全体の仕組みと微妙な違いが生じる可能性があります。さらに、急激に組織の規模が大きくなったために起こっている混乱や不都合など、組織の「初期不良」を退治してJAXAを機能的な組織に上げていくのも今年の課題であろうと考えています。

第四は、宇宙科学のロードマップに関する問題です。本特集号では宇宙からの天文観測、太陽系科学、宇宙環境科学、これらを可能とする宇宙工学のそれぞれの立場から近未来の方向性について話題が出されています。

私はかつて、宇宙理学委員会でESAの「コーナーストーン」ミッションに似た考えを提案して大ブーイングを受けたことがあります。そのとき、私の頭にあったことは、科学衛星に必要な技術がどんどん高度化して、衛星本体（バス）の開発期間と特定の機器の開発期間との間に不整合が

起き始めているということでした。これを解消するには、時期を特定しないミッションを仮定して、難しい技術だけを別途開発すべきだという提案をしました。これに対する反対の理由は、衛星計画は毎年一つずつ宇宙理学委員会なり宇宙工学委員会で決めるべきで、難しい技術の部分だけをあらかじめ採用するのは大きな不公平を招くというものでした。この考えはM-3SIIロケットの時代、すなわち1990年を中心にしたわが国の宇宙科学の黄金時代の一般的な考えだったのです。

現在、宇宙科学は1990年代とは異なった考えを採ろうとしています。科学者の集団が毎年一つの衛星計画を決めていく代わりに、長期的な視点に立ったロードマップを作り、その筋書きに沿って計画を進めようというものです。一見、合理的に思えますが、どこかに落とし穴はないでしょうか。このことも含め、今の日本で宇宙科学を本気で進めるにはどうすれば良いのだという議論をお願いしたいと考えています。

特集にあたって

的川泰宣

ISASニュース編集委員長

本特集では、「日本の宇宙科学の近未来」と題して、宇宙科学研究本部で現在開発中のミッションの紹介とともに、その先を担うミッションとして検討されている計画のビジョンをまとめました。

閉塞状況に陥って久しい日本の国で、現代に生きている私たちの責務は非常に重いものがあります。20世紀の半ばに、体制の帰趨をかけた米ソの闘いの平和的な戦場に宇宙が選ばれたのは、理由のあることでした。宇宙こそは、人々の想像力をかきたて、夢と冒険のターゲットとして、国家の名誉を代表する誇りある舞台だったのです。日本において、糸川英夫先生を核とする先輩たちが始めた宇宙への挑戦も、未来を見越した雄大な識見に基づいたものであった数々の証拠があります。

日本でも世界でも、宇宙への人類の進出は、無数の人々の一生が踏み台になり、多くの悲痛な経験を乗り越えることによって今日が築かれたものです。顧みれば、日本初の衛星「おおすみ」を打ち上げる際の度重なる辛い思い出、日本初のX線天文衛星「はくちょう」の産みの苦しみ、初の通産省・ドイツとの協力ミッションEXPRESS^{エクスプレス}の苦杯——すべて私たちにとっては、懸命な努力をして乗り越えてみれば「進歩のための一里塚」だったといえます。

今、新生JAXAの未来を論ずるにあたって、宇宙科学を担当するわが本部は、過去の経験、特に直近で蹉跌した日本初の惑星探査機「のぞみ」の成果と教訓を、新たなチャレンジをする中で全面的に、謙虚に生かし切らなければなりません。私たちの描いている近未来を率直に語り合う場として、本特集を企画しました。

理学と工学のスクラムで

本特集号で取り上げる将来計画は、いずれも研究者のボトムアップの提案に基づいたものです。つまり、ピアレビューという厳しい評価・批判を戦って、本当に優れた計画であることを示すのが条件です。4～5ページの「開発中のミッション」は、この試練を通ったものです。「検討中のミッション」は、これからこの評価を受ける、いわば将来ミッションの候補という位置付けです。

宇宙研における工学研究の顕著な特徴の第一は、最先端へのチャレンジが挙げられます。科学の分野では、常に「世界一」または「世界初」が求められます。どんな学術論文でも、すでに外国で発表された内容の二番せんじはまったく評価されませんし、そもそも二番せんじでは、論文として採択すらされないのはご存知のとおりです。科学的発見は、世界「初」が、そして「初のみ」が意味を持ちます。世界で2番目の発見は、世界で1000番目の発見と変わるところがありません。

これに関しては、いかなる言い訳も許されません。「予算が不足したから、2番目の発見で我慢する」というわけにはいきません。例えば、予算不足で日本のある科学衛星プロジェクトが1年延びたとしましょう。その間に外国が類似のミッションを成功させたら、日本のミッションはキャンセルするしかありません。

このように科学は大変厳しい土俵の上で、常に諸外国と競争しているといえましょう。NASAの十数分の一の宇宙科学予算であっても、わが国はテーマの重点化を図って、少なくとも参加した宇宙科学の分野では、世界水準を抜く成果を挙げることに全力を注ぎ、その結果、日本の宇宙科学が世界でも極めて高い評価を得てきたのは、このような背景があったからです。

第二の特徴は、理・工一体の研究体制が挙げられましょう。宇宙研の工学は、大学の組織に準拠しながら、一方で理学といういわば「お客さん」を同じ組織内に持っています。これは一見ささいなことのように見えて、実は極めて特異な状況です。工学の研究者が、研究のための研究にふける余裕はなく、常に世界最先端を求める理学の、そのまた最先端にあることが求められます。つまりシーズ志向の研究ではなく、ニーズ志向——それも上に述べたように大変厳しいニーズを志向した研究が絶えず行われています。

ここでいうニーズは、科学衛星プロジェクトに必要な技術のことです。科学衛星プロジェクトを縦糸とすると、それを支える工学の研究分野はいわば横糸と見ることができるでしょう。例えば、小惑星サンプルリターンミッションという縦糸を実現するために、軌道、姿勢、電気推進、通信、構造、材料、空力、情報処理、電源、人工知能、航法、誘導等々、数多くの横糸の各分野がそれぞれ最先端の技術を開発して支援する必要があります。そしてこの横糸は、他の縦糸となる科学ミッション（例えば、水星探査ミッション、金星探査ミッションなど）を共通的に支えていくことになります。

以上、多少抽象的な記述になってしまったので、例えば次のような仮想的な会話をお聞きいただきましょう。仮想の会話とはいえ、この種のやりとりは、宇宙研の理学と工学の間に、日常的になされています。

理学者：ぜひ、金星の表面に着陸機を降ろして直接環境を計測してみたいのだけど。

工学者：ウーン、それは厳しいな。何しろ金星表面は500℃近い高温、気圧

は地球の90倍だからね。当面、手に入る技術だけでは手に負えないよね。

理：それは、百も承知さ。だからこそ、まだ外国でも満足な表面探査が成功していないわけでしょう。

工：それに金星は厚さが何kmもある硫酸の雲に覆われているんじゃないかな。物騒だよな。

理：とにかく、できるのか、できないのか、はっきりさせてくれよ。

工：まあそう結論を急ぐなよ。一定の予算と、開発期間をくれれば、今までわれわれが基礎研究をしていた高温エレクトロニクス技術と材料開発、金星バルーンの研究開発を加速して、何とかなるかもしれないな。

理：それなら、いくら予算があれば、いつ打上げが可能かね？ どうもアメリカの×××大学とヨーロッパの〇〇〇研究所がその方面で計画を企てているようなんだ。のんびりしてはいられない。ここ7、8年以内にわれわれが先行しないと手遅れになるかもしれない。実は今、われわれのグループの研究者は焦りまくっているんだ。

工：そんなに急に攻め立てるなよ。ひとまず、工学の研究者を集めて研究会を立ち上げてみるから、それに理学の研究者も参加して、理・工の情報交換会から始めたらどうだろう。

理：それはいいアイデアだ。大学の理学・工学の研究者も招いて小ワークショップにしようか？

この仮想問答は多少マンガチックにしていますが、先端的研究の切迫感、理学・工学一体の研究体制、外国との競争の実態などの片鱗をお分かりいただければ幸いです。さて、前置きが長くなりました。以下に、宇宙研で進行中の理学・工学研究の例をいくつかご紹介しましょう。

ミッション計画

開発中のミッション

宇宙理学

極限状態の
物理を探る

天文観測

宇宙の構造と
成り立ちを探る

X線天文衛星
ASTRO-EII →p8



太陽観測衛星SOLAR-B
→p9



赤外線天文衛星
ASTRO-F →p9

太陽系の
環境を知る

太陽系探査

太陽系形成の
歴史を探る



月探査衛星LUNAR-A
→p8



月周回衛星SELENE
→p8

金星探査計画PLANET-C
→p16



宇宙工学

小型衛星INDEX
→p9



検討中のミッション（順不同）

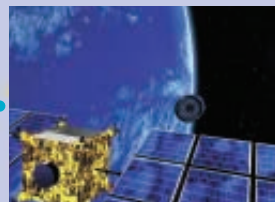
次期X線天文衛星NeXT
→p11



次期電波天文衛星VSOP-2
→p12



将来X線天文衛星XEUS
→p11



次期赤外線天文衛星
SPICA →p13

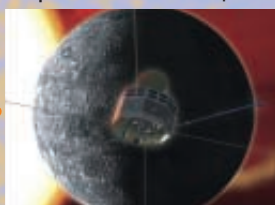


赤外線位置天文衛星
JASMINE →p14

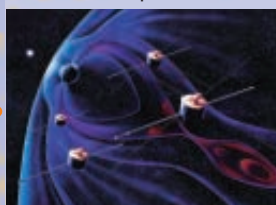


太陽系外地球型惑星
探査計画JTPF →p15

水星探査計画
BepiColombo →p17



次期磁気圏観測計画
SCOPE →p18



次期月探査計画
→p19



固体惑星探査計画
→p20



始原天体探査計画
→p21

月着陸探査技術
実証計画 →p23



ソーラー電力セイル
実証計画 →p24



次期輸送システム
→p25



高速再突入技術
→p26



これまでの成果

1970年、日本初の人工衛星「おおすみ」の打上げに成功して以来、「宇宙研」はL-4S、M-4S、M-3C、M-3S、M-3SII、M-Vと固体ロケットの能力を次々と高め、24の衛星・探査機を軌道に投入してきました（デルタIIによるGEOTAIL、H-IIによるSFUを含めると26になる）。この間、100kgにも満たなかった科学衛星は2トン近いものに大型化し、また探査機を遠く火星軌道にまで送り込むことができるようになりました。そして、衛星の精密姿勢制御、軌道上での大型構造物展開、惑星探査機搭載機器の軽量化・精密化等々、多くの宇宙工学技術が開発されてきました。

このようなロケット技術、衛星・探査機技術の開発に支えられ、また国内の大学・研究機関の研究者の献身的な貢献や広範な国際協力による世界の研究者の支援により、スペースにおける天文観測、その場観測による太陽系科学が大きく発展してきました。

スペースに出て行う天文観測の大きな利点は、何と言っても、大気の吸収・散乱のため観測できなかった波長域の電磁波が観測できるようになることです。そのようなスペースからの天文観測で先陣を切ったのは、X線天文学の分野です。1979年に打ち上げられた「はくちょう」を皮切りに、1983年「てんま」、1987年「ぎんが」、1993年「あすか」と、次々とX線天文衛星が打ち上げられ、宇宙像が次々と塗り替えられてきました。特に、ブラックホールのすぐ近くにまで迫る極限状態の物理の探求や、銀河団を包む1000万度から1億度もの超高温ガスとその後ろに潜む暗黒物質の研究は、人類の知の最前線を切り開いてきたといえます。そして、残念ながら打上げに失敗してしまったASTRO-E衛星の再挑戦機ASTRO-EIIが、あと1年ほどで打上げを迎えます。

「はくちょう」に2年遅れで打ち上げられたのが、わが国初の太陽X線観測衛星「ひのとり」です。小田稔・元宇宙科学研究所長の発案による「すだれコリメータ」を用い、太陽表面のフレア現象の解明に多くの先駆的な仕事を成し遂げました。そして「ひのとり」の業績を継いだ衛星が、1991年打上げの「ようこう」です。「ようこう」には、世界初のX線CCDを用いたX線望遠鏡が搭載され、激動のコロナの世界を明らかにしました。そして、X線と可視光の同時観測によりさらに太陽フレア現象の根源に迫るSOLAR-B衛星が、2006年に打ち上げられます。

X線観測によって開かれたスペースに出て行う天文観測は、続いて赤外線に広げられました。1995年に打ち上げられた宇宙実験・観測フリーフ

ライヤー(SFU)に搭載された小型赤外線望遠鏡(IRTIS)は、星・星間物質・星間塵などからの広い波長域の赤外線を広範囲にわたって観測しました。そして、それらの蓄積の上に立って、これまでの感度を数十倍上回る赤外線全天サーベイを主目的としたASTRO-F衛星も、開発が進められています。

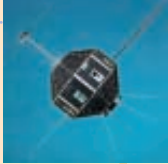
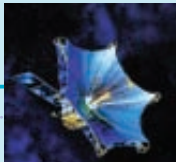
スペースに出て行う天文観測のもう一つの利点として、地上での観測の限界精度を大きく改善できる点があります。その利点を追求し、X線・赤外線に続いた天文衛星が、1997年に打ち上げられた電波天文衛星「はるか」でした。「はるか」においては、軌道上で8mもの口径を持った電波アンテナが展開され、地上の電波望遠鏡と組み合わせた超長基線干渉計(VLBI)観測が行われ、大質量ブラックホールが活動の中心と考えられている活動的銀河核の精密な撮像に成功してきました。そしてその成功は、次期電波天文衛星VSOP-2計画に引き継がれようとしています。

スペース天文学と並んで宇宙科学観測の^{もうへき}双壁を成すものが太陽系探査です。「その場」へ直接観測装置を送り込むことにより、惑星の構造・進化や、太陽系諸現象の解明を行います。その先陣を切ったのは、1978年に打ち上げられた「きょこう」「じぎけん」などによる地球磁気圏の諸現象を探る研究です。これらの研究は、1990年代に入って「あけぼの」(1989年打上げ)、GEOTAIL(1992年打上げ)により、大きな発展を遂げました。「あけぼの」とGEOTAILは、10年以上にわたって観測を継続中で、その蓄積された知見には大変大きなものがあります。その結果、磁気圏尾部における粒子加速の原理的理解にもう一步と迫っており、その「もう一步」を大きく踏み出すため、SCOPE衛星が計画されています。

地球磁気圏研究で始められた「その場観測」は、1985年の国際的なハレー彗星探査に加わった「さきがけ」「すいせい」により、惑星間空間に広がりました。そして、「ひてん」(1990年打上げ)により月周回衛星が試験され、月の内部構造や組成を調べるLUNAR-AやSELENEが打上げを待っています。月・惑星探査はさらに広げられ、1998年には火星探査機「のぞみ」が打ち上げられ、小惑星サンプルリターン計画「はやぶさ」(2003年打上げ)が小惑星「ITOKAWA」に向かって飛行中です。そして、太陽系探査はさらに金星探査計画PLANET-C、水星探査計画BepiColomboへと広がられます。さらに、将来に向けての惑星間航行技術を目指したソーラー電力セイル実証計画や、月・惑星表面での移動観測車の開発を目指した月着陸探査技術実証計画が予定されています。

これまでのミッション

★印は2003年12月現在運用中

年	天文観測		太陽系探査		宇宙工学
	極限状態の物理を探る	宇宙の構造と成り立ちを探る	太陽系の環境を知る	太陽系形成の歴史を探る	
1970			 しんせい 磁気圏観測 1971.9.28		 おおすみ 工学試験 1970.2.11
1975			 でんぱ 磁気圏観測 1972.8.19		 たんせい 工学試験 1971.2.16
1980	 はくちょう X線観測 1979.2.21		 たいよう 地球周辺科学 1975.2.24		 たんせい2 工学試験 1974.2.16
1985	 ひのとり 太陽観測 1981.2.21		 きょっこう 磁気圏観測 1978.2.4		 たんせい3 工学試験 1977.2.19
1985	 てんま X線観測 1983.2.20		 じきけん 磁気圏観測 1978.9.16		
1985	 ぎんが X線観測 1987.2.5		 おおぞら 地球周辺科学 1984.2.14		 たんせい4 工学試験 1980.2.17
1990	 あすか X線観測 1993.2.20	 ようこう★ 太陽観測 1991.8.30	 あけぼの★ 磁気圏観測 1989.2.22	 すいせい 彗星探査 1985.8.19	 さきがけ 工学試験/彗星探査 1985.1.8
1995	 SFU 天文観測・理工学実験 1995.3.18		 GEOTAIL★ 磁気圏観測 1992.7.24		 ひてん 工学実験 1990.1.24
2000	 はるか★ 工学実験/電波観測 1997.2.12		 のぞみ 火星探査 1998.7.4		 はやぶさ★ 工学実験/小惑星探査 2003.5.9

進行中のミッション

X線天文衛星 ASTRO-EII

ASTRO-EIIは、わが国5番目のX線天文衛星です。ブラックホール周辺や銀河団など、温度にして数億度にも達するような高温・高エネルギーの天体からは、強いX線が放射されます。しかし、X線は地球の大気により吸収されてしまい、地上では観測できません。X線天文衛星は、宇宙の高エネルギー現象の謎に迫ります。

ASTRO-EIIは、わが国のX線天文衛星の中で最も大きく、世界最高の波長分解能での分光観測と、軟X線から硬X線に至る広い波長範囲での高感度X線分光によって、21世紀の天文学を切り開きます。これらの観測性能は、X線望遠鏡(XRT)、その焦点面に置かれた2種類の検出器——X線マイクロカロリメータを用いたX線分光検出器(XRS)とX線CCDカメラ(XIS)——、さらに硬X線検出器(HXD)によって実現されます。

ASTRO-EIIは、日本を中心に、アメリカなどの協力を得て開発され、世界中の科学者に開かれた宇宙天文台となります。



月探査衛星 LUNAR-A

LUNAR-Aは、わが国で初めての本格的な月探査衛星です。月の表面の2カ所に「ペネトレータ」と呼ばれる観測装置を設置し、月の地震や熱流量を観測して、月の内部構造を探ることを目的としています。

LUNAR-A探査機はM-Vロケットで打ち上げられ、地球と月、太陽の重力を利用して月到着までに必要な燃料を極力節約して、約半年後に月を周回する軌

道に入ります。周回軌道上の衛星(母船)から、2機のペネトレータを順次、月の表側と裏側に1機ずつ投下します。ペネトレータは月面に秒速約300mで衝突し、月表層の砂の中に1~3mの深さまで潜り込みます。その後、ペネトレータ内部に搭載されている月震計、熱流量計による観測を開始します。ペネトレータに搭載されたこれらの観測器からのデータは、約15日ごとにペネトレータ上空に飛来する母船を経由して、地球に送られてきます。

月周回衛星 SELENE

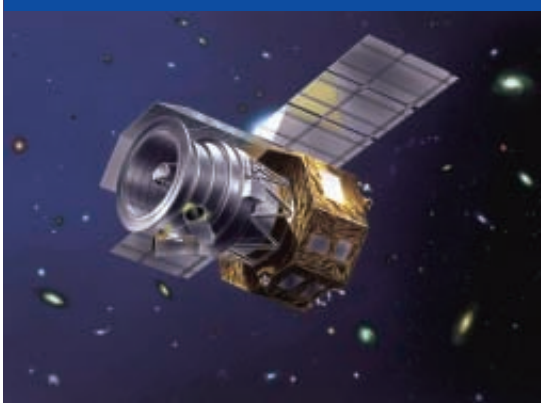
セレーネ (SElenological and ENgineering Explorer) は、H-IIAロケットを用いる大型の月探査ミッションとして、開発が進められています。この計画の主な目的は、月の起源と進化の解明のためのデータを取得することと、将来のより本格的な月探査に必要な技術開発を行うこ



とです。SELENEは、高度約10kmの極・円軌道を周回する「主衛星」と、より高い楕円軌道を周回する2機の「副衛星」から構成されます。これらの衛星には計14項目の科学観測器が搭載され、月面の組成や重力場の測定、プラズマなどの月周辺の環境、さらには月軌道から地球の磁気圏の観測を行います。SELENEはアポロ計画以降、最大規模の月探査ミッションです。



赤外線天文衛星 ASTRO-F



ASTRO-Fは、天体からの赤外線を観測する衛星です。赤外線にはいろいろな種類があり、その一部は地上まで届きますが、多くは大気に邪魔されるため、大気圏の外に出て観測する必要があります。例えば、生まれたての、まだ濃い塵に隠されている銀河を感度よく見て、銀河誕生の歴史を探るには、赤外線天文衛星が欠かせないのです。

ASTRO-Fは口径70cmの天体望遠鏡を搭載しています。ただし普通の望遠鏡と違い、望遠鏡自身の赤外線が観測の邪魔をしないよう、液体ヘリウムで -270°C という極低温まで冷却されます。ASTRO-Fは地球の北極と南極の上を通り、地上の昼と夜の境目に沿って飛行します。そして、望遠鏡をいつも地球と反対方向に向けて空をスキャンし、赤外線を出している銀河や星のカatalog、いわば“全天の地図”を作ります。

太陽観測衛星 SOLAR-B



SOLAR-Bは「ひのとり」「ようこう」衛星に続く、わが国3番目の太陽観測衛星です。SOLAR-Bは口径50cmの大型可視光望遠鏡(SOT)と、X線望遠鏡(XRT)、紫外線望遠鏡(EIS)を搭載し、太陽表面(光球面)とコロナを同時に観測することで、太陽コロナが示すさまざまな活動現象の解明を目指します。

SOTの超高空間分解能(0.2秒角)の観測を実現するために軌道上での太陽光による熱入力の変化を抑える目的と、長期間の連続した太陽観測が行えると

いう利点から、SOLAR-Bは太陽同期極軌道を採用しています。地球の昼と夜の境目を飛ぶこの軌道をとることで、SOLAR-Bは1年のうち8カ月間、途切れることなく太陽を詳細に観測できます。



小型衛星INDEX

小型衛星インデックスINDEX (INnovative-technology Demonstration EXperiment)は、小規模高頻度の理工学ミッション、次世代衛星技術の軌道上実証、若手技術者・科学者の育成を目的とした小型・低価格衛星です。INDEX 1号機は、高度700kmの太陽同期極軌道で、オーロラ観測、統合化計算機システム、小型GPS受信機、光ファイバージャイロなどの理工学ミッションを目的としています。2004年の打上げを目指して開発の進められている陸域観測技術衛星エイロスALOSのわきにビジーバック衛星として載せるように開発され、2004年春よりフライト実機の総合試験に入ります。衛星開発は、宇宙研の若手職員、多数の大学からの学生、ベンチャー企業が中心となり、宇宙機器メーカーの協力を得ながら進められています。INDEXは低コストの小型衛星ながら、低軌道からのオーロラ撮像と荷電粒子同時観測によるオーロラ構造の解明という科学的意義のあるミッションを持ち、この目的に対して工学的な新規技術を適用した科学衛星です。その意味で、他の小型衛星とは一線を画しています。

若手職員と学生によるINDEX衛星の実機噛み合わせ試験



宇宙物理学の目指すもの

これまで宇宙研が推進してきた観測的科学的研究は、大きく、スペースに出て観測を行う「天文観測」と、その場に観測装置を持ち込んで行う「太陽系探査」とに分けることができます。

天文観測の原点は、「まだ見たことのないものを見る」ことです。宇宙は想像を超えた出来事の宝庫であり、まだ見ることでできていなかった新しい波長帯の観測が行われたり、それまでの感度を大きく上回る観測が行われると、必ず思いもよらなかった新しい宇宙の姿が見えてきます。

そのような天文観測の中で、地上で観測ができる電磁波は、可視光(+近赤外)と電波に限られ、赤外線・紫外線・X線・ガンマ線といった波長域での観測は大気の外に出る必要があります。また、地上の大型望遠鏡が主力である電波や可視光分野でも、スペースに観測装置を持ち出すことで地上での観測の限界精度を大きく改善できる点も多々あり、スペースに観測装置を持ち出す計画が増えてきています。

天文観測の大きな柱としては、まず「宇宙の構造と成り立ちを探る」ことが挙げられます。今日見られるような銀河・銀河団といった宇宙の構成物の起源は、ビッグバンと呼ばれる宇宙誕生の大爆発直後のわずかな密度ゆらぎにさかのぼると考えられています。しかし、観測が進めば進むほど、その構造形成で主役を演じているのは、暗黒物質や暗黒エネルギーと呼ばれる未知の物質やエネルギーであり、われわれの見ることでできている宇宙の物質は、ほんの一部にすぎないことが分かってきています。そのような宇宙の基本的な構造形成の中から、いかにして銀河が生まれ、惑星系が生まれ、地球型惑星が生まれ、生命が生まれてきているのか。解き明かしていくべき謎は尽きません。

もう一つの柱は、「極限状態の物理を探る」ことです。宇宙には、地上の実験室ではとうてい実現できない、地上とは何けたも異なった物理状態での種々の現象を見ることができます。そして、それらの現象を注意深く観測することにより、宇宙の基本法則を深く理解することができ、未知の物理法則の存在を発見する可能性もあります。この種の観測の対象としては、何と言っても、重力が極限まで強められたものといえるブラックホールが挙げられます。X線や電波によるこれまでの観測により、ブラックホールの境界のすぐ近くで起こっているらしい種々の興味深い現象が見つけられてきていますが、現象の解明にはさらなる観測が必要なものばかりです。

太陽系探査の原点は、「行ったことのないところへ行く」ことです。太陽系を構成する、月・惑星・惑星間空間へ観測装置を送り込み、直接物質を調べ、環境を計測することは、いわば自然観察そのものといえましょう。「行ったことのないところ」とは、必ずしも人類未踏の惑星を意味するものではありません。対象はどこであっても、新しい精度の観測が行われれば、必ず新しい問題に遭遇します。その意味からは、太陽系探査の場合は特に、惑星間空間航行技術や自律的観測技術、極限環境での探査技術等々、工学的な開発があって初めて可能となる観測項目が多くあります。宇宙物理学者と宇宙工学者が一体となった、地道で長期的な技術開発がますます重要となります。

太陽系探査の大きな柱の一つは、「太陽系形成の歴史を探る」ことでしょう。太陽系形成の基本的筋書きは、原始太陽系星雲ガスの中に塵ができ、塵から微惑星ができ、微惑星の衝突合体によって惑星ができたというものです。しかしこれだけでは、なぜ太陽に近い領域に地球のような岩石質の惑星のみがあり、太陽から遠いところに木星のような大型のガス惑星があり、さらに火星と木星の間に多数の小惑星があり、太陽系の外縁部には冥王星やカイパーベルト天体と呼ばれるような小さな天体があるのかを、十分説明できるわけではありません。将来の太陽系探査は、このように、原始太陽系星雲から現在の太陽系がどのように進化してきたかについての物的証拠を探すことに向けられるでしょう。

将来の太陽系探査のもう一つの大きな柱は、「太陽系の環境を知る」ことです。ここでは、太陽系の中で「地球」の置かれた環境の普遍性・特殊性を知ることが大きな目標となります。そして、それは「地球だけに生命が発生し、進化したのはどのような理由によるのだろうか」という問いに答えることにつながるでしょう。そのような研究の対象としては、まず太陽系に充満するプラズマが宇宙の諸現象をどのように支配しているかを明らかにすることがあります。そして次に、惑星の大気が、惑星の磁場によって太陽から吹き出すプラズマ流(太陽風)からいかに守られているか、さらには、地球・金星・火星などの大気の組成や大局的な運動を体系的に把握していくことが、重要な課題となるでしょう。

極限状態の物理を探る

高エネルギー天文学の将来計画

人類はこれまで、宇宙空間に出ることにより、地上では開けることのできない、新しい「宇宙を見る窓」を広げてきた。その中で、X線に代表される高エネルギー天文学は、ダイナミックな高エネルギー現象・極限状態の物理現象が、宇宙に満ちていることを明らかにしてきた。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解放している。また、数千万度にもなる高温ガスが、銀河の中のみならず、銀河の集団、銀河団の数百万光年にわたる広大な空間に、広く存在していることが分かったのである。

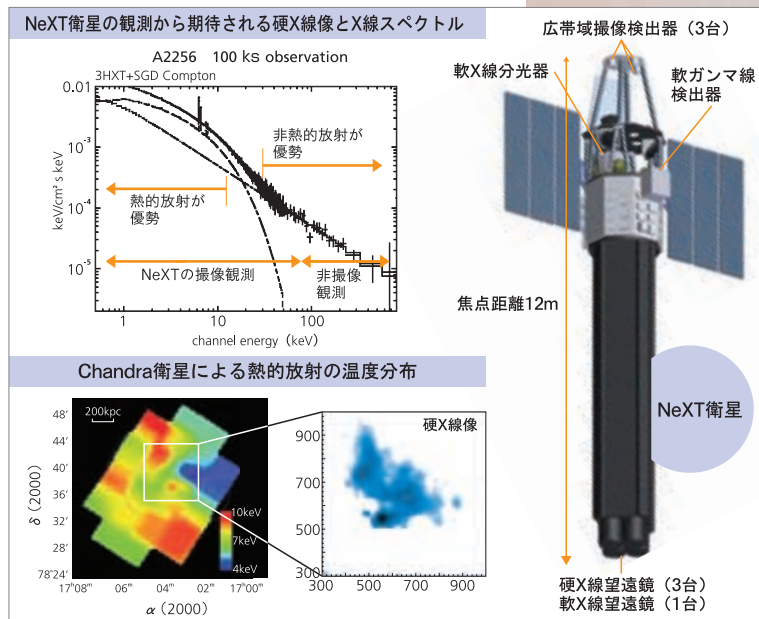
これらの探査にもかかわらず、宇宙には未知の物質やエネルギー形態がいまだに存在し、かつそれらが、宇宙の進化を語る上で無視できない量であることが示唆されている。これらを明らかにし、今ある多様な宇宙がどのように作られてきたのかを知ることが、今後の高エネルギー天文学の重要な使命の一つである。このために、われわれは新しい観測装置・観測手法を開発してきており、国際的な協力と競争の中で研究をリードしていきたいと考えている。

現在、われわれが提案しているNeXT (Non-thermal energy eXploration Telescope) 計画は、多層膜スーパーミラーとハイブリッド型X線撮像検出器という、日本で育った新しい技術によって、10keVから80keVという硬X線の帯域で、これまでと比較してけた違いに優れた感度と精度を実現する。宇宙最大の重力エネルギー解放である銀河団形成において、重力と平衡に達した物質は、数千万度の高温ガスとなって軟X線で明るく輝く。しかしその際に、熱平衡から逆に離れ、重力エネルギーを何けたも超えるような巨大なエネルギーを獲得する粒子が実は数多く存在することが、最近の電波や硬X線の観測から示唆されるようになってきた。このような高エネルギー粒子の生成現象は、例えばわれわれの銀河系内でも、超新星残骸の周辺など、さまざまなところで起きていると考えられ、その総エネルギーもまた、宇宙において無視し得ない割合を占めると予想される。10-80keVの硬X線は、このような非熱的な粒子からの放射に対して、最も感度が高い

ため、これまで観測が困難であった非熱的な現象への扉を開く。NeXTによって、われわれは宇宙の巨大加速器の加速機構と、熱平衡から離れる物質とそれが担う自由エネルギーの総量、そしてそれらが宇宙の進化に果たす役割を明らかにする。この成果を踏まえて、2010年代中後期には、欧州を中心とする研究者との協力によりXEUS (X-ray Evolving Universe Spectroscopy) 計画を実現し、宇宙で最初の巨大ブラックホール形成や宇宙初期の銀河団形成を観測し、高エネルギー宇宙の形成史を、その初期から明らかにしたい。

これらの大型計画と並行して、目的を絞ったタイムリーな計画を短い時間を実現する新しい手段として、小型計画も議論されている。例えば、DIOS (Diffuse Ionized Oxygen Surveyor) プロジェクトでは、NeXTでも使用予定の新しいテクノロジーで、広視野かつ高エネルギー分解能のX線観測を行う。現在の宇宙論によれば、原子など宇宙の普通の物質(バリオン)の大半は、実はまだ観測にかかっていないと予想される。DIOSは宇宙に広く分布するであろう「未知のバリオン」からの、赤方偏移した高電離の酸素輝線を分離し、その存在を世界で初めて実証することを狙っている。

NeXT衛星は硬X線望遠鏡と広帯域撮像検出器のペアを3台搭載し、10keVから80keVの硬X線領域で、衛星としては世界で初めて撮像分光観測を行う。あわせて高エネルギー分解能の軟X線分光撮像システムと、高感度で非撮像型の軟ガンマ線検出器を搭載する。銀河団の非熱的な現象の解明は、NeXTの重要な目標の一つである。



次期電波天文衛星VSOP-2

スペースVLBI。これは、宇宙の電波望遠鏡と地球上の電波望遠鏡とを結んで、地球よりも大きな電波望遠鏡を合成して観測することです。日本は世界に先駆け、1997年に宇宙の電波望遠鏡として「はるか」を打ち上げました。「はるか」はそろそろ7歳。人間だったらもう小学校入学の年になりました。国立天文台やNASA/JPLや世界の電波天文コミュニティとよく協力して、連日の観測を続け、

多大な成果を挙げてきました。このプロジェクトは世界でVSOP計画として、電波天文学の歴史を作りました。

このような複雑な観測システムを作ってきたのは、大変不思議で興味深い天体現象があったからです。電波天文学が始まり、電波銀河、

クエーサーなどが見つかりましたが、その膨大なエネルギーは簡単には説明できませんでした。電波望遠鏡が進化するに従って、銀河の中心から突き抜ける激しいジェット現象、そして、そのまさに銀河の中心でのジェット発生領域が見えてきました。電波望遠鏡の高い解像度への進化は、この現象への肉迫とともにあったといっていいいでしょう。ジェット現象は今、銀河の中心の大質量ブラックホールへ落ち込むエネルギーの一部がこのような現象に転換されて見えているのだと理解されています。これには、電波、光、X線、ガンマ線領域の観測が動員されています。また、ほとんどの銀河の中心には超巨大ブラックホールがあるらしいことも分かってきました。ジェット現象は、銀河の生成と関係する全天文学の大事な問題になっています。

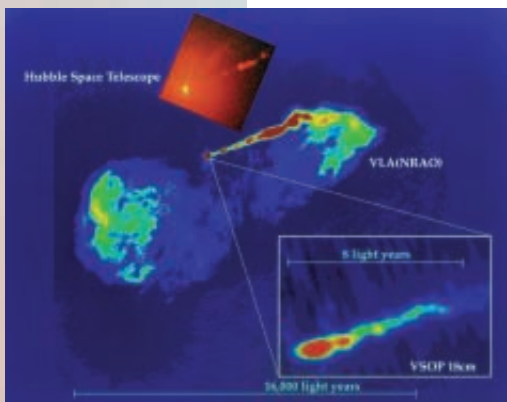
スペースVLBIは、他のどんな観測装置も及ばない解像度での撮像を可能とします。「はるか」

か」とVSOP計画の成功の経験を受けて、私たちは科学的成果を追求した次期スペースVLBI計画を提案しています。この計画は、とりあえずVSOP-2と呼んでいます。VSOP-2衛星は口径9mの展開アンテナを積み、ミリ波（波長7mm）までを観測領域に入れています。これは、ブラックホール周辺のプラズマを通して観測ができ、高い観測分解能を与えてくれます。

VSOP-2の最高分解能は、前人未到の10万分の3秒角です。例えば、M87という、中心ですごいエネルギーをジェットとして発生している天体があります。M87の中心にあるブラックホールの重さは太陽のほぼ32億倍、ブラックホールの大きさ（シュワルツシルト半径の2倍）は太陽系に匹敵するものです。VSOP-2の分解能は、このブラックホールを見込む角の4倍です。私たちは、ブラックホール周辺で、重力エネルギーが電磁波に変換されて出てくるさまを、本当にイメージとして見る事ができるのです。ここでは一般相対性理論を使った磁気流体力学が大事な役割を果たし、観測と理論は、私たちをエキゾチックでわくわくする世界に引き入れます。

VSOP-2では、現在のVSOP計画よりも10倍以上の高感度化を狙っています。これにより、銀河核の現象だけでなく、銀河内マイクロクエーサー、原始星のフレアをはじめ、多岐にわたる高エネルギー現象にも私たちをいざなうことになるでしょう。

VSOP計画が描き出した銀河からのジェット



軌道上のVSOP-2衛星

宇宙の構造と成り立ちを探る

次期赤外線天文衛星SPICA

「太陽系の起源」という身近なスケールの課題から「宇宙の進化」という大きなスケールの課題に至るまで、天文学の重要な課題の解明にとって、スペース(宇宙空間)からの赤外線天体観測は欠かすことのできない貴重な観測手段です。

そのために、私たちはASTRO-F衛星の開発に取り組んでいます。ASTRO-Fには、口径70cmという大型の冷却望遠鏡が搭載されます。また、近赤外線から遠赤外線に至るまでの各種の観測装置が搭載されます。ASTRO-Fの目的の一つは、遠赤外線領域において全天にわたるサーベイ観測を行うことです。これにより数百万個の赤外線天体が発見されると期待されています。

サーベイ観測に続くべきものは、個別の天体の詳細観測です。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。詳細観測に必要なのは、大口径の望遠鏡です。大口径の望遠鏡は、多くの赤外線を集めて暗い天体まで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。

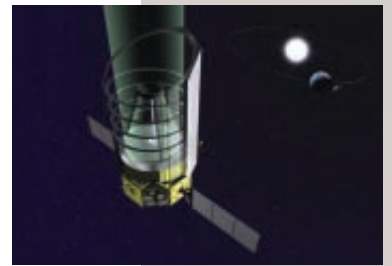
宇宙からの高感度の赤外線天体観測を可能にする

ために重要な要素の一つは、望遠鏡を冷却することです。そこでSPICAでは、望遠鏡を絶対温度で4.5Kという極低温にまで冷却します。

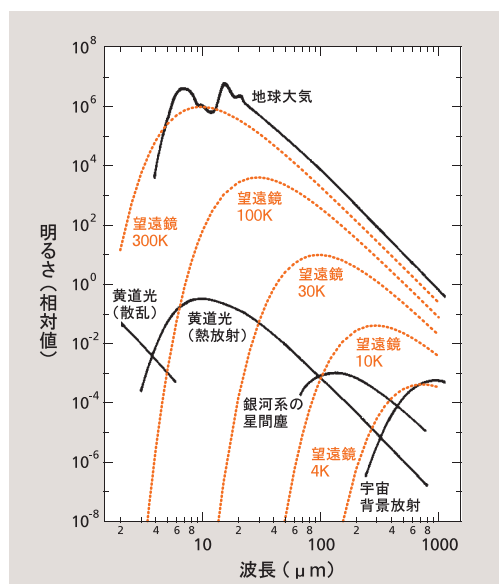
SPICAの技術的な最大の特徴は、その冷却系にあります。まずSPICAの軌道として、L2点(正確にはその点の周りを巡るハロー軌道)を有力候補としています。熱的な観点から、赤外線天文衛星の大敵は、地球と太陽です。L2点では、この2つの熱源がほぼ同じ方向に並ぶため、これらの熱源からの熱遮蔽が非常に容易になります。これにより、宇宙への放射冷却を有効に働かせて、望遠鏡を冷却することができます。さらに、低温を目指すために、機械式冷凍機の搭載を予定しています。従来の赤外線天文衛星では望遠鏡の冷却のために大量の液体ヘリウムを搭載していたのですが、SPICAでは液体ヘリウムを用いない画期的な冷却システムを採用することにより、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。

従来の冷却赤外線望遠鏡の口径がすべて1m以下であったことを考えると、SPICAの3.5m冷却望遠鏡は、大きなジャンプです。この能力を生かして、SPICAは天文学の重要課題の解明に挑みます。例えば、SPICAの観測により、太陽系外の惑星の姿が直接とらえられると期待されています。また、私たちの宇宙の中で、どのようにして銀河が生まれてきたかという謎に迫る観測もできると期待されています。

SPICA計画を近い将来に実現させるべく、私たちは現在、多くの技術開発に取り組んでいます。

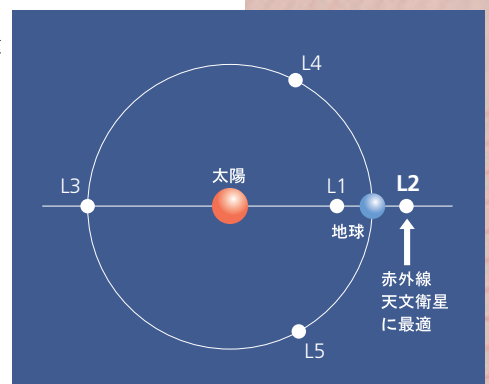


SPICA。絶対温度で4.5Kという極低温まで冷却された3.5mの大望遠鏡を搭載する。



太陽—地球が作る5つのラグランジュ点。赤外線天文衛星にはL2が最適の軌道。

赤外線で見えた空の明るさ。地球大気の赤外線放射と、地球外からやってくる赤外線放射(黄道光、銀河系の星間塵、宇宙背景放射)、さらに望遠鏡からの熱放射を温度の関数として示す。望遠鏡からの熱放射を自然背景放射よりも小さくしないと、高感度の観測は不可能である。その実現のためには、望遠鏡を極低温にまで冷却する必要がある。

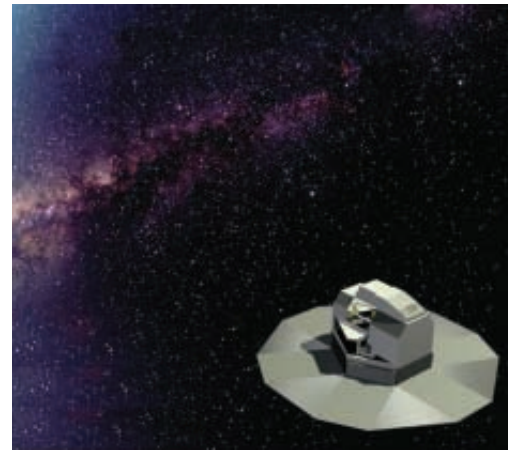


赤外線位置天文衛星JASMINE

夜空にきらめく天の川は、その雄大さと美しさに、古来より人々を魅了してきました。現在では天の川は、約2000億個もの星が集まった「天の川銀河」の一部であることが分かっています。天の川銀河の中で星が数多く集まっている部分、つまり「円盤（ディスク）」と銀河中央にあって膨らみのある「バルジ」を見ているのです。われわれの太陽系は、天の川銀河のディスクの中に存在しています。

しかし意外にも、天の川の本当の姿はまだ分かっていません。それは、太陽系近傍の星についてしか、星までの距離や星の運動が分かっていないからです。もし、天の川銀河内の遠くの星についてもその距離や運動が分かれば、天の川銀河の厳密な構造や特徴が解明できます。また、距離や運動には、天の川銀河や一般の銀河の形成史を物語る情報も含まれています。さらに、さまざまなタイプの星の本当の明るさや、星が出しているエネルギーが正確に分かります。この情報は、星の形成や進化、変光星や惑星系などの天体の研究にとっても重要です。この情報を使って遠くの銀河までの距離を推測することもできるようになります。以上のように、天の川銀河内の星の距離や運動を知ることが、天文学にとっては貴重な基本情報となるのです。

星までの距離を正確に測定する方法は、三角測量です。地球が太陽の周りを公転し位置を変えることにより、星の天球上での位置が

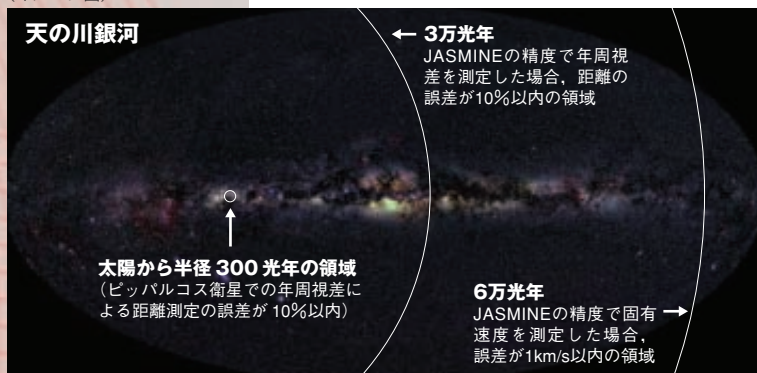


JASMINE

わずかにずれます。そのずれ（年周視差）を測るのです。年周視差が小さいほど、星は遠くにあります。しかし年周視差の測定は、地上では大気のゆらぎがあるため、精度には限界があります。そこで、1989年にESAがヒッパルコスという位置天文観測衛星を打ち上げ、スペースでの観測がスタートしました。地上より飛躍的に精度が上がり、画期的な成果を挙げました。しかし、そのヒッパルコスでさえ測定精度は1ミリ秒角であり、太陽系から300光年以内の星についてしか、年周視差によって正確に距離を測定できていないのです。天の川銀河の中心まで約2万5000光年もあるので、天の川銀河の全容解明には程遠いのです。

そこで、JASMINE（Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration）と呼ばれる赤外線位置天文観測衛星を計画し、ヒッパルコスより100倍の精度向上、つまり10万分の1秒角（地球から見た月面上の1円玉の直径程度に相当）の精度での天の川の星々の位置測定を目指しています。さらにJASMINEでは、天の川面上にある遠くの星々を高精度で多く観測できるように、天の川面上に多く存在する塵による光の吸収を受けにくい近赤外線波長域での観測を行います。JASMINEによって、天の川の謎がまさに解明されるでしょう。

JASMINEの位置測定精度
（イメージ図）



太陽系外地球型惑星探査計画JTPF

この広い宇宙で、われわれは唯一無二の存在なのだろうか？ それとも、生命が育まれているような第二の地球が存在するのだろうか？ これは天文学者の興味のみならず、人類・社会が宇宙・生命に對峙して抱く根源的な問いであろう。太陽系外地球型惑星探査計画JTPF (Japanese Terrestrial Planet Finder) は、この問いに答えるべく、第二の地球を直接に撮像し、そこに生命の有無を探ることを主たるサイエンスドライバーとし、かつ、一般の天文学にも広く応用できることを目指す野心的な探査計画である。

この探査計画に要求される技術的課題は大きい。地球型惑星を直接に検出するためには、主星の反射光あるいは惑星自身の熱放射として暗い惑星を検出するだけの「高感度」、主星のすぐ近くにある惑星を見分けるための「高解像度」、さらに、暗い惑星が明るい主星のハローに埋もれてしまわない「高コントラスト」の三者が同時に実現されなければならない。これは、従来のスペースミッションでは実現されていない新しい性能を追求するものである。

このような探査計画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可視光から近赤外波長における大口径スペース望遠鏡を検討している。コロナグラフは、高コントラストでクリーンな星像を持つ観測を実現するための特別な光学系であり、最近さまざまなアイデアが提案されている。この波長では高感度検出器が利用可能で、波長が短い比較的小口径でも高い解像度が得られる。また、この波長域には地球大気の特徴付ける水や酸素のバンドも存在するために、分光によりその存在を見積もることができる。H-IIAロケットのフェアリングで許される最大口径の鏡として3.5mの可視光単一望遠鏡を用い、鏡面による波面乱れを補正する補償光学(スペースAO)を利用し、かつ、特殊なコロナグラフを利用することにより、惑星が存在すると考えられるクリティカル

な空間周波数領域では約10けた程度の超高コントラスト観測が可能になり、太陽近傍の数十個の惑星を探査できる。広視野装置を搭載すれば、初期宇宙天体などの研究にも役立つ。

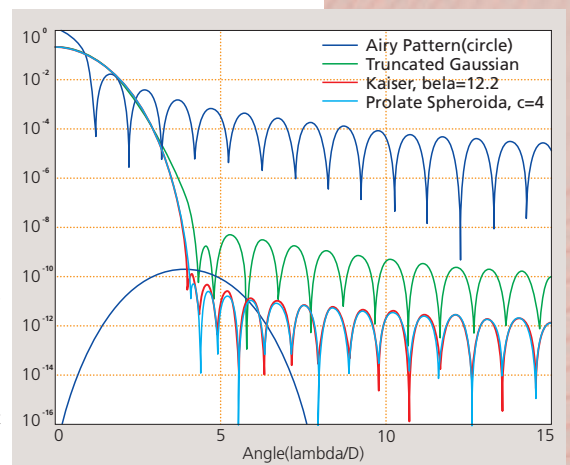
太陽系外地球型惑星検出は人類の共通の興味であり、国際的にも同様の検討が進んでいる。中でもNASAのTPF計画、ESAのDarwin計画はすでに過去数年間にわたって検討が行われてきた。系外惑星探査のような、主目的が明確に定義されたミッションの場合、競合するミッションを並立させるよりも国際協力の可能性も議論すべきである。このような国際協力のためにも、ワーキンググループは重要な活動母体としての役割を果たすだろう。

地球型惑星探査計画は、従来の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、しかも、これまでのプロジェクトの枠を越えた、かなり長期の組織的な準備が必要な分野である。さらに、地上観測・理論研究も含めた検討が準備段階から必要であるため、今後も宇宙研の探査計画という枠を越えて、国立天文台をはじめとする国内諸機関・大学と密接な共同のもとに進めたいと考えている。

高コントラストを実現するためのいくつかの光学系。例えば、回転楕円体開口は円形開口よりも5~6けた高いコントラストを持つPoint Spread Functionを得ることができる。



コロナグラフを応用したJTPFの可視光望遠鏡案。口径約3.5mの軸外し単一主鏡をH-IIAロケットのフェアリングに収めたもの。



太陽系の環境を知る

金星探査計画PLANET-C

——金星を知り、地球を知る

古来より「明けの明星」あるいは「宵の明星」と呼ばれてきた金星の輝きに、目を留めたことのない人はいないだろう。この輝きは、金星全体を覆う濃硫酸の雲が太陽光を反射しているためである。地球から可視光で見えるのはこの明るい雲頂だけであるが、その下の大気圏深部や地表面、また地磁気がないために太陽風と直接せめぎ合う超高層大気は、さまざまな不思議に満ちた一大フロンティアである。

金星は太陽系の中で唯一、地球に匹敵する大きさを持つ地球型惑星であり、金星と地球はしばしば「双子」とも称される。しかしこれまでの探査によれば、金星の環境は地球とは大きく違っている。約90気圧という濃密な大気はほとんどが二酸化炭素であり、その温室効果のために地表では460度という灼熱地獄が生じている。スケールの大きな火山地形が存在し、地表は比較的新しい溶岩におおわれているが、地球のようなプレートテクトニクス(大陸移動)が起

きている形跡はない。海は存在しないが、誕生初期には地球同様に大量の水が存在したと考える根拠がある。金星と地球はなぜ異なる運命をたどったのか。また、金星の気候を支配する物理は地球とどのように違うのか。そこに、地球の誕生と行く末を読み解く手掛かりが秘められている。

PLANET-C金星周回機(Venus Climate Orbiter)は、惑星規模の大気循環

の謎を解明することを目指す。金星の自転は周期243地球日と大変遅いが、雲頂高度の大気は、わずか4地球日で金星を一周する。この高速風は「超回転」と呼ばれ、その生成機構は惑星気象学の最大の謎である。PLANET-Cは、雲の下の大気や地表面まで透



金星気球の想像図

視できる新しい赤外線観測手法や雷センサーなどを用いて、金星大気深部の運動を世界で初めて立体的に描き出す。その結果からは、金星の気象は地球とどのように違うのか、地球で生じない超回転が金星ではなぜ生じるのか、などが明らかになるだろう。その到達点は、地球気候変動の理解の鍵ともなる、惑星気象学の統一理論である。PLANET-Cはまた、赤外線観測によって、世界で初めて地球以外の惑星で活火山を発見することも目指す。

さらに将来、金星の雲の下に気球を浮遊させる構想もある。この気球は、あらかじめ細長い耐熱フィルム内に入れておいた水を、金星到着後に大気の熱で蒸発させて膨らませるものである。金星大気の主成分は重たい二酸化炭素であるため、水蒸気でも十分な浮力を得ることができる。1カ月以上にわたって風に流されながら、大気の運動や地表面、大気組成などを観測するとともに、新たな観測プラットフォームとして期待されている惑星気球の技術を実証することを目指す。



PLANET-C

水星探査計画BepiColombo

古代から知られる水星は、いまだに「未知の惑星」です。

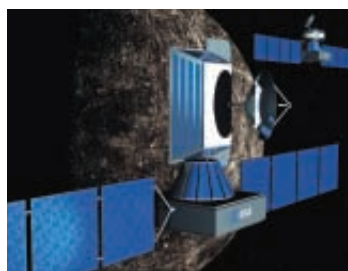
この灼熱の惑星に近づけたのは、30年近く前の米国マリナー10号(1974-75)だけです。わずか3回の遭遇で息絶えましたが、水星に「磁場」があることを発見し、大きな驚きを呼びました。地球磁場は、熱く溶けた中心核の流動で作られるとされます。金星、火星、月には、磁場はありません。なぜ、小さく冷えやすい水星(月より若干大きい程度)にはあるのでしょうか？

マリナー10号は、惑星磁場と太陽風の衝突でできる「磁気圏」も発見しました。磁気圏は、太陽放射線を遮るとともにオーロラなど美しい自然現象の源ですが、水星は地球より2けた磁場が弱く、ごく薄いナトリウムの大気しかないなど基本条件が異なります。磁気圏は安定に存在できるのか、どのようにエネルギーが蓄積・解放されるのか、などに定説はありません。

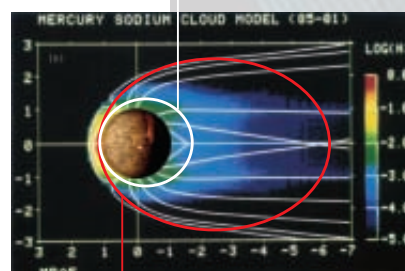
磁場や磁気圏の様子がよく分かっている惑星は地球だけです。水星は、初めて地球と比較ができる惑星なのです。「惑星磁場はどうして存在するのか?」「惑星磁気圏は共通なのか違うのか?」という古くて新しい問題の解決に、大きな役割を果たすことを期待しています。

磁場を生み出す水星の本体はどうなっているのでしょうか？水星は、大きさの割に非常に重く、半径の4分の3が鉄の中心核で占められた特異な惑星であることが分かっています。マリナー10号が写真を撮った場所は半分以下と限られており、地質・組成の観測がないため、水星本体の歴史や進化の過程は分かっていません。水星の特異な姿の原因は、原始太陽系星雲の最も内側で最後に固まったとされる、この天体の「初期」にさかのぼると考えられます。水星は、太陽系の形成を探るための最重要探査対象の一つなのです。

水星探査計画BepiColombo^{*}は、ESAとの初の大型共同ミッションです。日米欧はそれぞれの水星探査計画を練っていたのですが、日・欧は共同の道を選択しました。この計画では、水



水星表面探査機(MPO)。ESA担当。
写真提供: ESA



MMO軌道
周期9.3時間
高度400km×12,000km

MPO軌道
周期2.3時間
高度400km×1500km

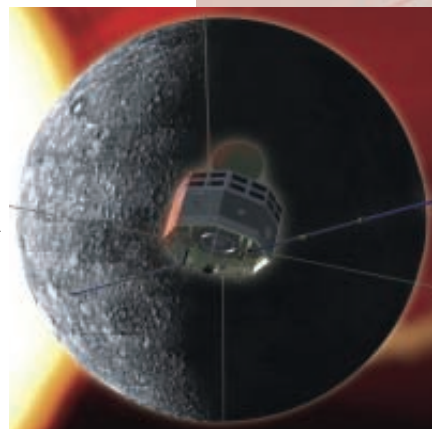
水星の本体・ナトリウム大気・磁気圏(モデル図)と両探査機の予定軌道

星の磁場・磁気圏・内部・表層を2機の周回探査機で徹底的に観測します。日本が担当する「水星磁気圏探査機(MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter)」は、得意分野である磁場・磁気圏の科学に重点を置きます。ESAが担当する「水星表面探査機(MPO: Mercury Polar Orbiter)」は、内部構造・表層の科学に重点を置きます。両者はESAの推進モジュールと一体で打ち上げられ、水星到着後に分離して活動します。両探査機の観測装置・観測計画は、日欧共同で検討しています。

本格的な協力がスタートして今年で3年目です。ESA側で検討されてきた「水星着陸機(MSE: Mercury Surface Element)」が2003年11月にESAの予算事情と技術的困難から断念されるなど紆余曲折を経つつも、2004年度に予定される両探査機の観測装置決定に向けた設計・検討を共同で進めつつあります。初の本格的な日欧協力を成功させて大成果を挙げるべく、日夜奮闘中です。「のぞみ」が残した大きな財産で「のぞみ」が残した大きな借りを返したいものです。

^{*}マリナー10号の探査軌道を示唆したイタリアのBepi Colombo博士(1920-84)にちなむ。

水星探査計画BepiColombo
ホームページ
<http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/index-j.html>



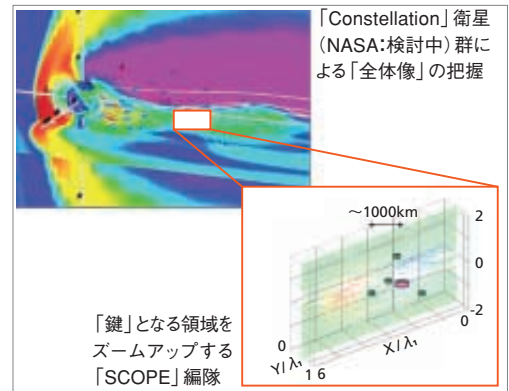
水星磁気圏探査機(MMO)。
ISAS/JAXA担当。
写真提供: 京都大学宇宙電波科学センター

次期磁気圏観測計画SCOPE

——宇宙と地球を結ぶプラズマの世界を探る

一つ一つの星の周りから、何百万光年に広がる銀河団のスケールまで、宇宙は高温のプラズマで満ちています。地球の大気の底の住民から見ると、このようなプラズマの世界のうちで最も近くに位置するのが、地球を取り巻く磁気圏です。磁気圏プラズマは、高温・無衝突であるために、地上のガスとはまったく異なる物理学によって支配されます。プラズマの大きな特徴は、無衝突にもかかわらず粒子が集団的な協調運動をし、個々の粒子の運動スケールから天体規模のスケールまで、その振る舞いが階層的な構造を持ち、しかも下の階層（衛星周辺に局所的に起こること）と上の階層（磁気圏全体に起こること）が強くカップルしていることです。これは、地上の実験室の有限な空間では、なかなか再現できないプロセスです。このような階層構造が、地球の磁気圏のオーロラ電子加速や、プラズマシートでの電子・イオンの加熱、また太陽風が磁気圏にぶつかるときにできる衝撃波や境界渦構造などに、決定的な影響を与えていることが、磁気圏尾部観測衛星GEOTAILの活躍により分かってきました。

われわれは、この特徴的な階層構造・時空構造を解明するために、SCOPE (Scale COupling in Plasma universE) という編隊飛行衛星ミッションを推し進めています。1機の親機衛星と4機



NASA衛星群との共同観測

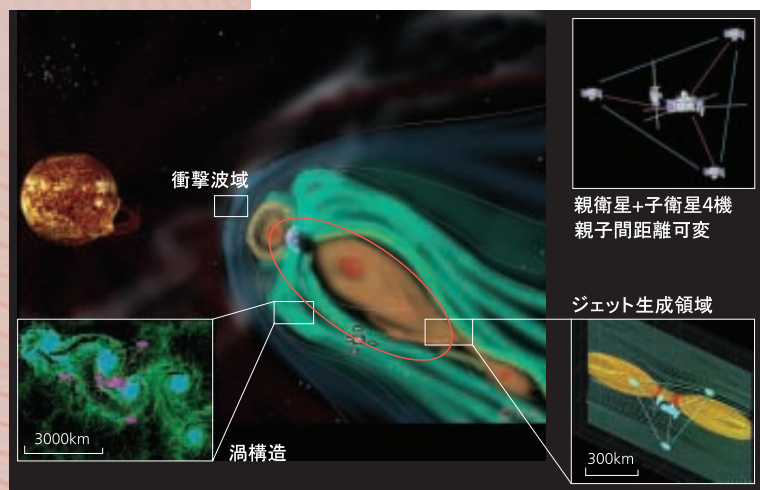
の子機衛星から成る衛星群を、長楕円で地球をめぐる軌道に打ち上げて、階層構造を解明する計画です。実現すれば、日本で初めての編隊飛行ミッションになる予定です（衛星相互の距離は1kmから数千kmの間で可変にします）。

一回のロケット打上げで5機の衛星を一度に上げる試みなので、個々の衛星の重量を軽減すること、衛星間通信法の開発、編隊を保つための軌道制御など、多くの難関が控えていますが、われわれはいろいろなアイデアを出して、これらの難関を突破していくつもりです。

SCOPEミッションのもう一つの目玉は、今までの1000倍という高い時間分解能のプラズマ観測を行うことにより、プラズマ、特にその電子成分のミクロな空間時間構造を解明しようという試みです。GEOTAILによって発見された、電子静電孤立波や、磁気中性点近傍の電子の特異な振る舞いは、これらのミクロな現象が磁気圏プラズマ全体の挙動に大きく影響を及ぼしている可能性をわれわれに突き付けました。その真否を判断するには、高い時間分解能によって、電子のミクロな挙動を浮かび上がらせることが必要なのです。

地球と宇宙にあまねく存在する高温度プラズマの基礎物理の解明を通じて、SCOPEミッションは地球磁気圏の理解だけでなく、宇宙にあまねく存在するプラズマそのものの理解につながるものと確信しています。

SCOPE。地球を取り巻くプラズマの構造と変動を編隊飛行で探る。



太陽系形成の歴史を探る

次期月探査計画

——地球型惑星の起源と進化を明らかにする——

月は、アポロ計画やその前後の表面撮影を主とした大規模な探査により、極めて身近な天体となったが、月そのものの起源と進化を探求するのに必要なデータはまだ十分ではない。月は地球の衛星ではあるが、その大きさから地球型「惑星」の特徴を持ち、初期に火成活動を停止したために天体成立初期の証拠をとどめていると考えられている。1990年代に入り米国のクレメンタイン衛星、ルナー・プロスペクター衛星が科学衛星として月探査を実施し、グローバルに月全体を観測することによって新しい知見がもたらされた。わが国では二つの月探査計画が実施直前のフェーズに入っている。LUNAR-A計画では、月深部の大まかな構造が明らかにされるであろう。またSELENE計画では、これまでにない空間分解能と精度で、月表面付近の物質構成と構造が明らかになる。

次の月探査科学は、特徴的な地質構造体での岩石のその場観察と、詳細な深部構造の探査により、月内部の物質構成と構造を明らかにする段階に進む。未踏査の典型的な地質構造には、①直径100km程度のクレータ、②典型的な高地、③太陽系最大のクレータである南極エイトケン盆地の三つがある。

直径100km程度のクレータは、中央にピークを持っている。これは、天体衝突でクレータが形成されるときに衝撃波のリバウンドででき、その結果として地殻深部物質が露出していると考えられる。したがってこのピークの調査により、地殻深部物質を深く掘削することなく調べられる。またピークの路頭を地質学的に調べることににより、そもそものピークの形成過程が明らかになる。さらに、月進化過程終期に存在したとされるマグマオーシャンの実態がつかめる可能性もある。

アポロ計画では、地球に近い月の表側の、玄武岩が広がる「海」といわれる地域と、その近傍の平坦な地域に着陸した。アポロ着陸地点でもクレータ形成時に飛散した高地の岩石破片が回収され、高地岩石が同定されたともいわれているが、実際に高地に降りて岩石の産状、層序など地質学的調査をする必要がある。

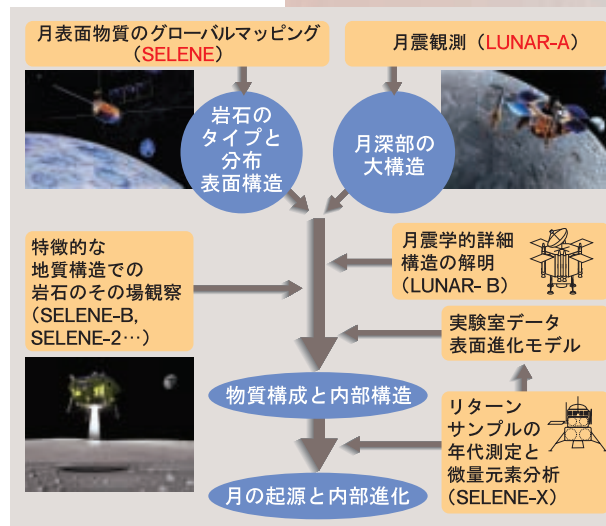
南極エイトケン盆地は規模が大きいことだけでな

く、深部物質が露頭していることが、クレメンタイン衛星により分光学的に明らかにされている。これも地質調査を必要とする地域である。また、この盆地からサンプルを回収して、年代測定を含む物質科学的調査をしようとする動きが米国にある。この盆地は、月裏側の南極付近に広がる直径2000kmのものである。そこからサンプルを持ち帰るとなると、サンプル回収地点の選択が難しく、また地球から不可視地域での探査作業になることから、計画が大規模にならざるを得ない。数年前にESAも目指したが、計画が採択されなかった経緯がある。

月深部の構造探査は、LUNAR-A計画を踏まえた精密化の探査として考えられる。このためには、月に打ち込むペネトレータの数を7台程度に増やし、かつ月の自由振動を観測するための長周期地震計の設置が必要である。アポロ計画では、地震計の設置が着陸機で行われた。長周期地震計の設置には軟着陸機による運搬、月面設置がよいであろう。また、月の章動から月内部の構造を調べる手段も有力であり、例えば星の動きを月面上の光学望遠鏡で観察することで、月面そのものの動きを測定する手法が提案されている。次期月探査計画検討ワーキンググループでは、このほか、月面での電波観測なども提案されている。

以上述べたように、いずれの計画もピンポイントで障害物を避けて着陸できる技術、移動探査技術の確立を要求している。月面での今後の科学探査のための必要性に加え、他天体、例えば火星、金星、水星の探査での必要性も大きいため、技術修得と実証を目的として「月着陸探査実証計画」を、月惑星表面探査技術を開発するグループとともに検討している。

月着陸探査実験計画



固体惑星探査計画

「固体惑星」とここで称しているものは、硬い表面を持つ太陽系の天体のすべてです。例えば、地球や月をはじめとする岩石質の惑星・衛星や、木星や土星の衛星のように氷を主体とするものなどが挙げられます。これらの天体の表面の様子は、これまでの探査により一通り分かってきましたが、固体惑星の全体の理解という点では、まだまだ多くの謎が残されています。特に地球以外の惑星では、表面の下に隠されている惑星内部の様子については、まったくと言ってよいほど分かっていません。

地球についてのわれわれの知識から類推すると、惑星表面に見られる地形、火山噴火や地震活動など、ほとんどすべての地学現象には、惑星の内部で起きている運動が深くかかわっています。したがって惑星の内部についての知識なしでは、惑星の全貌を理解できないでしょう。また、惑星全体がどのような元素からできているかを知るためにも、惑星内部の知識が必要です。なぜならば、リモートセンシングで得られる表面の組成は、実は惑星全体の組成とは大きく異なることが多いからです。

惑星の内部を地震学的に探査できれば、内部を構成している物質の組成についての推定

が可能になります。惑星が全体としてどのような組成であるかは、その惑星がどのようにして形成されたかを明らかにするための鍵となる情報であり、惑星の内部構造探査は惑星の進化と起源に迫るためにも必須な探査といえるでしょう。

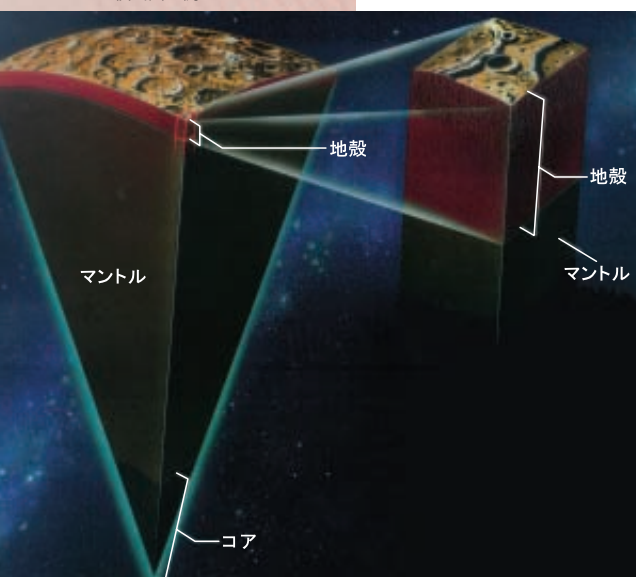
このような理由で、われわれは将

来の固体惑星探査の中心を惑星内部の探査に置くべきだと考えています。これを実現するさまざまな方法の中で最も直接的な方法は、地震学的手法です。これは地震波が惑星の内部まで伝搬するのを利用し、波の伝搬の様子を惑星表面の離れた場所で観測することによって、内部構造を明らかにするものです。しかしながら、惑星表面に地震計を1台設置するだけでは十分ではありません。惑星内部を探査するためには、地震計のネットワークを惑星表面に展開する必要があります。数ある方法の中で、現在LUNAR-A計画で開発されているペネトレータ技術は、惑星にネットワークを展開する最も効率的な手段を与えてくれるものと考えられます。ペネトレータの技術は月以外の惑星にも適用できるため、将来の広範な惑星内部構造の探査計画で大きな役割を果たすことが期待されます。

現在わが国では、LUNAR-A計画の後さらに詳細な月内部構造を探るために、多数のペネトレータを利用した探査計画が検討されています。この計画では、ペネトレータによる多くの短周期月震計に加えて、着陸船を利用した広帯域月震計による月面ネットワークが構想されています。これによって、月の地殻の厚さやマントルの構造が具体的に明らかになることでしょう。さらに将来には、火星の表面に地震計ネットワークを展開し、火星の内部を探る探査計画も考えられています。このような構想はフランス、米国でも検討されていますので、わが国でもこれらの国と協力して、国際的な探査計画として進める方法も視野に置くべきものと思われる。

いずれにしても、21世紀の固体惑星探査の分野では、惑星内部構造が重要な鍵になり、そのための探査技術の発展が重要になってきます。地球科学で日本が地震学を創始し、発展をリードしてきたように、太陽系科学の上でも、わが国が惑星地震学を通じて世界をリードできるようにしたいものと思っています。

固体惑星の内部構造
模式図の例

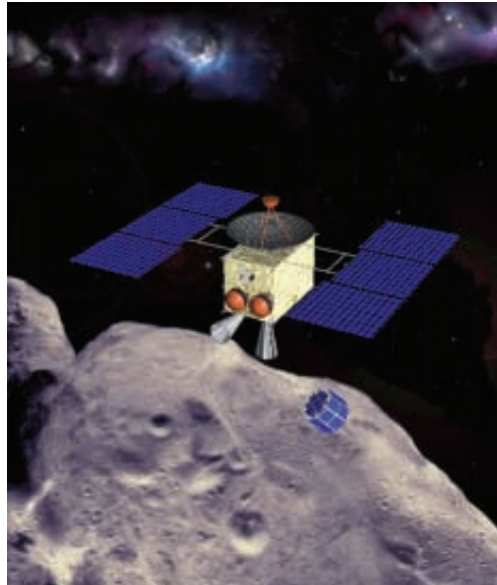


始原天体探査計画

「始原天体」と呼ばれるものには小惑星、彗星のほか、カイパーベルト天体などがあり、その存在領域は太陽系の辺縁部にまで及んでいる。しかも発見されている小天体の数はおびただしいものである。小天体の数の多さに対応するのは、当然、地上望遠鏡の役目である。しかし、小天体の物質・構造の理解なくしては小天体・惑星系の形成過程を知ることにはできず、それには直接探査しかない。しかし、数ある小天体の一つ、二つに探査機を送ろうとするのは、それこそ大海の浜辺で貝を拾うようなものと思われるかもしれない。このような中で、探査をどのように行うかという戦略は極めて重要である。

小惑星については、幸いにして現在では、地上観測からの表面の反射スペクトルデータに基づいて約1ダースのグループに分類されている。したがって、これらのグループの中でも、とりわけ主要なグループS、C、M、P、Dといったタイプがどのような小惑星であり、物質であるかを明らかにすれば、小惑星全体の大局的な描像が得られると考えている。また、太陽系の年齢、元素組成、物質進化の推定には隕石が主役となってきたが、果たしてこれは正しかったのか。この観点からも、小惑星のいろいろなサンプルが、どのタイプの隕石にどれくらい対応しているのか、していないのかを明らかにするべきである。

このような目標を設定し、いくつかのミッションを検討中である。私たちは、すでにSタイプ小惑星に「はやぶさ」を向かわせた。次のミッションではこれ以外の主要なタイプ、とりわけCタイプ天体を含むミッションを行いたい。この種の天体は、そのスペクトルが隕石のそれと類似していることから、最も始原性の高いグループではないかと考えられている。「はやぶさ」で実証される諸技術と経験を最大限に生かすことによって開発期間と費用を削減し、できるだけ早い時期にこのようなミッションを実現させ、惑星系開びやく時の名残を残す始



2組の試料採取装置とリエントリーカプセルを備える小惑星サンプルリターン機。マイクロローバを小惑星に向けて投下中。
MEF/Honda & Honda (IA)より

原的サンプルを手にしたと考えている。

現在検討されているものでは、例えば複数個の小惑星のサンプルリターン、あるいはCタイプ小惑星サンプルリターン、プラス他のタイプの小惑星フライバイなどがある。もちろん日本だけでなく多くのタイプへのミッションを完結させるのではなく、海外と探査対象を分担し合って探査を進めていくことが必要である。また、「はやぶさ」で参加し始めた隕石分析研究者がより広く、深く参加し、探査による研究が惑星科学界の重要な柱として根付いていくことも期待したい。

小天体の探査による研究はまだ端緒に就いたばかりであり、これの解明には一貫した戦略に従って着実な探査を継続的に進めていくことが必要であるし、その方向に沿った先行技術開発が必要である。一般的に言って、日心距離の大きい天体ほど始原的性格が強いと考えられている。したがって、ポスト「はやぶさ」に次ぐさらに先のミッションでは、このような天体を目指すことになることは間違いない。このようなことを視野に入れて、軽量大面積ソーラーパドルなどをはじめとする外領域探査仕様の技術を今から培っていく必要がある。

宇宙工学の目指すもの

1954年、東京大学生産技術研究所に組織されたAVSA (AVionics and Supersonic Aerodynamics) 研究班が「太平洋を20分で横断するロケット輸送機」を目標とする研究開発計画を発表、生産技術研究所の研究費60万円が高速衝撃風洞の建設とロケットテレメータ装置の研究に用いられ、また糸川英夫を研究代表者として交付された文部省科学研究補助金40万円を基にペンシルロケットの開発が始まりました。したがって今年2004年、日本の宇宙工学は発祥50周年の節目を迎えたことになります。

その後宇宙工学は、わが国の国際地球観測年 (IGY, 1957-58) への参加を機に、理学というお客さんを得ることによって理工の密接な関係の下に発展してきました。1981年に東京大学から分離、文部省直轄の宇宙科学研究所となった以降も、大学共同利用機関の一つとして研究者コミュニティから生まれるテーマに基づく宇宙科学研究を行う、という体制を維持してきました。そして2003年の3機関統合に際しても、宇宙研は関係各方面の理解と努力により大学共同利用機関システムとしての機能を堅持することができました。これは、理学のみならず工学にとっても極めて大きな意味を持っており、JAXAの中期計画においても宇宙研は宇宙飛翔体を用いた天文、太陽系科学および工学にかかわるプロジェクト開発研究に加え、自由な発想に基づく宇宙理工学研究を遂行することになっています。

それは基本的には、これまでとはほぼ同じ体制で進む形を意味しますが、M-Vロケット開発を卒業したことにより、工学ではその環境が若干変わることになります。もちろん、今後とも科学衛星打上げ主要手段としてのM-Vロケットを宇宙基幹システム本部と協力して維持していくことが重要な業務であることに違いはありませんが、われわれ工学者は新生宇宙研を「大学という環境で生まれる発想を一大学ではできない規模で実施する」現場として、宇宙工学のさらなる発展を目指しています。具体的には、宇宙工学委員会の活性化、戦略的基礎開発実験研究の強化および深宇宙探査センターの設立を3つの柱として、その体制を構築しつつあります。

宇宙工学委員会は、大学共同利用機関システムとしての宇宙研が工学研究を進める上での重要事項を審議する委員会で、そのメンバーの半数は外部の研究者で構成されます。ただし、これまではやや外部メンバーが少ない状況だったので、全国を7ブロックに分け、各ブロックの拠点大学の代表を委員に委嘱、宇宙工学委員会を全国の工学研究者の発想や意見を集約するとともに宇宙研における工学研究の評価・指針を与える場として一層の活性化を図ることとしました。

次に、戦略的基礎開発実験研究を強化するため、世界初あるいは世界一となり得る宇宙工学技術の実験・実証を目指した開発研究を宇宙工学委員会による審査・承認を経て推進することになっています。例えば、惑星間空間を太陽からの輻射圧を受けて帆船のように航行するソーラーセイル、宇宙機が自分自身の周りに作る磁場と太陽からのプラズマとの相互作用を推進力に利用する磁気セイル、月・惑星へのピンポイント着陸技術、次期輸送システムの基礎実験研究、高速再突入技術、高比推力イオンエンジン、新しい形のハイブリッドロケットエンジン、惑星探査用軽量高効率トランスポンダ、耐放射線性抜群のSOI技術等々を挙げることができます。それらの多くは、宇宙実証一番乗りを目指して日欧米がしのぎを削っている状況です。

そしてこれらの研究を遂行する場としての深宇宙探査センターを立ち上げました。このセンターは戦略的基礎開発実験研究をはじめ、世界最先端を行く理工学研究を数年単位で仕上げることを目的としたセンターで、その間各研究系からこのセンターに所属を移した研究者が重点テーマの開発研究に専念することができるような体制を目指しています。

月着陸探査技術実証計画

将来の太陽系探査、特に月や火星など周回軌道からの遠隔観測が進んだ天体については、次の段階は着陸して表面（および内部）を詳しく探査することになります。例えば月の場合、アポロ計画などによって月の岩石のサンプルが地球に持ち帰られ、多くのことが分かりましたが、その着陸点は月の赤道周辺の「海」と呼ばれる平坦な地域に限られました。最近の月周回探査機による詳細な観測の結果、アポロ計画のサンプル収集地点はある特徴的な地域にすぎず、月全体についてより多くのことを知るためには、ほかの地域の岩石・地質を調査する必要があることが分かっています。

そのような探査を実現するためには、目的とする地点へ高い精度で、しかも岩などの障害物をよけながら安全に着陸する必要があります。また、着陸した後は、周辺の広い範囲を移動しながら探査したり、研究者が調べたい岩石を選別したり、あるいは岩石の表面を削って変性していない内部の本来の物質を観測する必要があります。これを無人探査機に行わせるためには多くの新しい技術が必要になるため、われわれはさまざまな研究・開発を続けており、それらの技術を実証する機会として、例えば月に500kg程度の探査機を軟着陸させ、30kg程度の小型移動ロボットで表面を探査する計画を検討しています。

この計画では、巨大クレータの「中央丘」と呼ばれる場所の近くにピンポイントで着陸します。中央丘は、クレータができるときに地下物質が噴出して形成されたもので、地層を観測したり、その周辺に転がる岩石を分析することにより、月の内部の状態を知ることができます。それは月がどのようにしてでき、現在の状態まで進化してきたのかを知る重要な手掛かりとなります。

ピンポイントの着陸誘導を行うためには、これまでの地上からの電波計測と慣性航法装置を用いる方式では精度が足りません。そこでわれわれは、搭載カメラで撮影した月表面画像と月の地図とを見比べながら探査機を高精度に誘導する方法を研究しています。また、高度や対表面速度を測るために、レーザ高度計と電波高度速度計を開発しています。障害物をよけるためには、できるだけ高い高度から確実に障害物を検出する必要があります（高い高度から回避を始める

ほど、消費燃料が少なくて済む）。そのためのアルゴリズムの研究とともに、探査機上で高速に演算するための画像処理LSIの開発なども推進しています。

転倒せず安全に着陸するためには、着陸脚の開発も必要です。月面の砂（レゴリス）の特性や、真空環境、地球重力の6分の1の環境を考慮しながら脚の設計をするとともに、岩の上に片脚を乗り上げた場合、斜面を滑った場合など、想定されるいろいろな場合についての計算機シミュレーションや実験を行っています。

平坦ではない月面を移動するため、5個の車輪を持つ走破性の高い小型のロボット（ローバ）を開発しています。地上からの人間の指示によって目標とする岩などに向かって動きますが、通信回線に制限があるために完全な遠隔操縦は難しく、ローバには障害物をよけながら目標点までの最適ルートを計算して進むインテリジェンス機能があります。また岩石を拾ったり削ったりするのも、人間が大まかに指示をすればローバが自律的に作業をする技術を研究しています。搭載できる重量が限られるため、小型・低消費電力の研磨装置や科学観測機器も開発しています。

理想的な地質調査を行うためにはサンプルを地球に持ち帰って分析することが必要ですが、今回の計画ではテレサイエンス技術を駆使し、科学者の地上からの遠隔操作により必要な分析を行います。これらの技術は、将来のサンプルリターンの前準備ともいえます。

この計画は月の地質探査を目的としていますが、ここで開発された技術は、火星などほかの天体や地質探査以外の用途にも応用できるものです。



月に降下する探査機



月を探索するローバ

ソーラー電力セイルによる工学実証機構想

宇宙研の宇宙工学委員会は、2001年度にソーラーセイル・ワーキンググループを発足させ、以来3年間にわたって大型膜構造物であるソーラーセイルによる将来の宇宙機、とりわけ惑星探査機に関する実証方法の検討を行ってきました。

ソーラーセイルとは、太陽光を反射することで推進力を得て航行する宇宙船を指していて、通常は光子（フォトン）を反射するセイルを意味します。この考え方の歴史は非常に古く、数十年にわたって、この方式の

大型の宇宙船を惑星間で行き来させる方法が考えられてきました。にもかかわらず、それが実現できなかったのは、非常に軽量で宇宙環境に耐性のある膜材の製造ができなかったことや、セイルの展張方法ないし操舵の方法で現実

的な答えが見いだせなかったためです。しかし、この数年の間に、ポリイミド薄膜の連続製造が可能になり、また応用先を惑星探査専用に絞り、スピンによって展張させる型のセイル宇宙船の考え方が登場してきたことから、宇宙船として製作することに技術的な妥当性が見いだされるようになり、このワーキンググループが立ち上げられたわけです。

ワーキンググループでも、当初はこの光子セイルを基本案として検討を開始し、2001年度にはこの光子セイルによる実証計画を立案しました。しかし、将来の探査機の推進方式をあらためて展望してみると、今後の原子炉を用いるような大電力の宇宙船の時代への適切な接続を考えた場合、純光子推進による宇宙航行は、将来は極めて小型の宇宙船に限定的に残る形態にすぎないとの結論に至りました。一方で、工学試験衛星「はやぶさ」のようなイオンエンジン駆動の惑星探査機を考えた場合、太陽電池を動力源としたときには、必要とする推力を得るだけの電力を必ずしも充足できるとは限らないという事情もあり、高比推力

イオンエンジンと光子推進を併用するハイブリッドのセイルが適切で、実証探査機案とするのが妥当であるとの結論に至ったわけです。

ソーラーセイル・ワーキンググループの描く探査機の概要は、

図1に示すようにコア部分にイオンエンジンを搭載したステータ部を持ち、周囲に直径50m規模のセイルをスピン展張させる回転ドラムを配した構成になっています。実証探査機は、セイル面の一部に薄膜の太陽電池を採用し、その電力を使って従来よりはるかに優れた「燃費」の新しいイオンエンジンを駆動して推進する、新型の宇宙船です。ワーキンググループでは、この探査機をわが国初の「外惑星探査」の実証に用い、日本の宇宙科学研究に新しい時代をもたらすことを目標にしています。

このために、最大の特徴である大型の膜構造物を展開・展張する技術を確認することを目的に、地上試験を2002年度、2003年度と積み重ねてきています。有力な展開機構の概念の一例を図2に掲げますが、すでにいくつかの展開機構の検討が進んでいて、2003年度夏には三陸大気球観測所にて直径4mのセイルを無重量、希薄大気中で展開させる実験にも成功しました(図3)。2004年度には、S-310ロケット34号機によって、高度200km近い高空で無重量環境の下、2種類のセイルを展開させる実験を行う計画です。



図2：S-310ロケット34号機による実験概念図

図1：ソーラー電力セイル探査機側面図

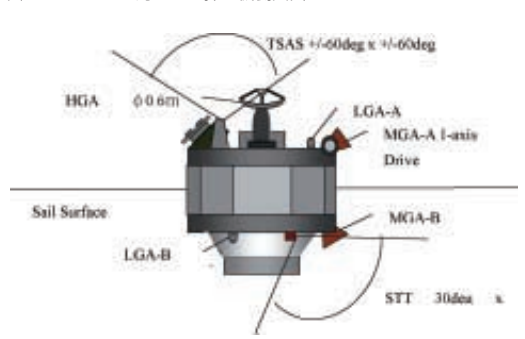


図3：大気球による展開実験



次期輸送システム

宇宙研における輸送系の研究は今、曲がり角に
来ています。新機関全体としては、統合による民営
化や衛星打上げ体制の組み換えなどのあおりで、現
在の輸送システムからの発展や将来に向けての投資
をどうするかなど、多くの課題の解決が統合後に先
送りになっています。M-Vロケットも打上げ主体とし
ての役割を終え、宇宙基幹システム本部に協力する
形での関与は続くでしょうが、これまでのように工学
全体を挙げての取り組みから次の目標をどうするか
が問われています。

新しいロケットの研究や開発を実機の飛行を伴
って行う仕事は、衛星ミッションのようにスポットで、
一発の方法では立ち行かないのは事実です。これ
まで宇宙研で培われてきた推進系からシステムまで
の基礎研究の結果を、実機の飛行を行う機能まで
を維持して輸送システムの「新しい展開」につなげ
ることが今われわれに与えられた課題と知るべきで
しょう。飛ばすハードウェアに触れてやる仕事や、
飛行実験の運用から得られた結果の解析まで、統
合後もわれわれが先人から引き継いだ経験や体制
を継続することが、輸送系研究集団のプロモーション
にぜひとも必要です。さもなければ、大学との差
別化や新機関内他本部の研究開発を標榜する集団
との区別がなくなって存在意義が崩れます。

「新しい展開」の中身ですが、大きな流れで言うと、
輸送システムの将来は「使い捨てから再使用へ」と
いうのは誰も文句を言いません。ただし、いつどの
規模で、について合意や社会的要請が成熟してい
ないことも事実で、工学研究のみが目的では大きな
投資は得られないのは当然です。本当の「再使用」
の世界が回転するのは、人間をどんどん往復させる
とか、けた違いに大量の物資を輸送するとかの需要
が必要で、そうでなければ経済的にはペイしないの
です。このような世界に到達するのに20年という人
もいるし、100年でも無理という人もいます。いつ
実現するかを見てから遅いとか早いとか言うのは評
論家のやることで、われわれの仕事ではありません。
再使用のメリットの認知が得られて、質的に異なる
次の需要が成熟するような仕事こそ今、必要なこと
でしょう。

今われわれは「実験機」と称しておもちゃのような
ロケットを何回も飛ばして、繰り返しロケットを飛ば
すとはどんなことかをカラダで勉強する仕事をやって
います。もっとやれと言う人もいますが、ただ危ない
ことをやっているだけと言う人もいます。まあ意見が
分かれるのは新しいことをやっている証拠と思って、
これが発展して今の観測ロケットの規模で、打ったら
目の前に帰ってくるロケットを弾道飛行させて、サイ
エンスやマイクロGの人たちがこれまでの使い捨て
ロケットとは質的に異なる使い方をしてくれば、利
用も広がって再使用のメリットの認知が広がるので
はないかと考えて活動しています。ロケットという意
味では同じですが、「再使用」という新しいシステムを
世の中の役に立つように「更地に道を引く」の類の
仕事だと思います。環境はずいぶん違いますが、あ
る意味でわれわれの先生のまた先生たちが日本で
初めてロケットを始めたときと状況は似ていると思
います。

新しい仕事をするには、出来上がった世界を維持
するのとは異なるエネルギーや元気の出し方が要り
ます。今のロケットや衛星のように決まった仕事をた
だ決まったやり方でこなすのではなく、中途半端なコス
トダウンの圧力に翻弄^{はんろう}されるのでもなく、トラブルシ
ュートに優秀な研究者が忙殺されるのでもなく、世
の中を前に進めるために新しいアイデアの出し方や、
もの作りのやり方に自由度の大きい状態で仕事をす
る土俵が今、必要ではないでしょうか。エンジンや構
造や材料やら空力やらシ
ステムやら、経験豊富な
専門家もそろっています。
若い人たちが元気を出す
状態も作れるでしょう。
21世紀になってからまだ3
年しかたたないのに明る
い未来の話はどこに行っ
てしまったのかと思うこ
のごろですが、工学の求心
力になり得ることも含め、
今の宇宙研にふさわしい
仕事ではないでしょうか。

みんなであってたかってやっています

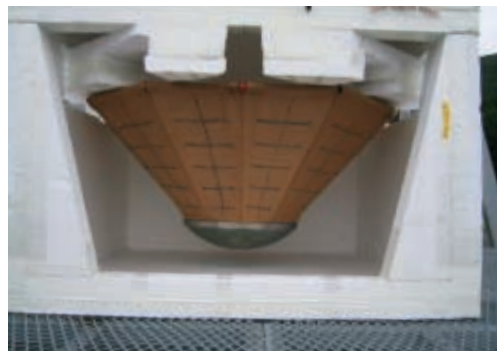
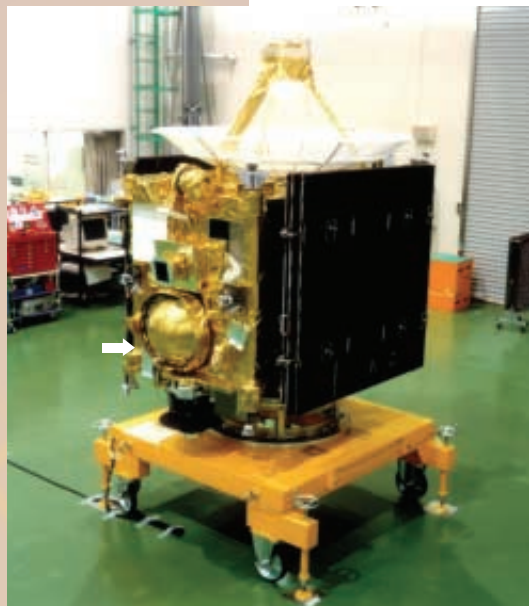


高速再突入技術

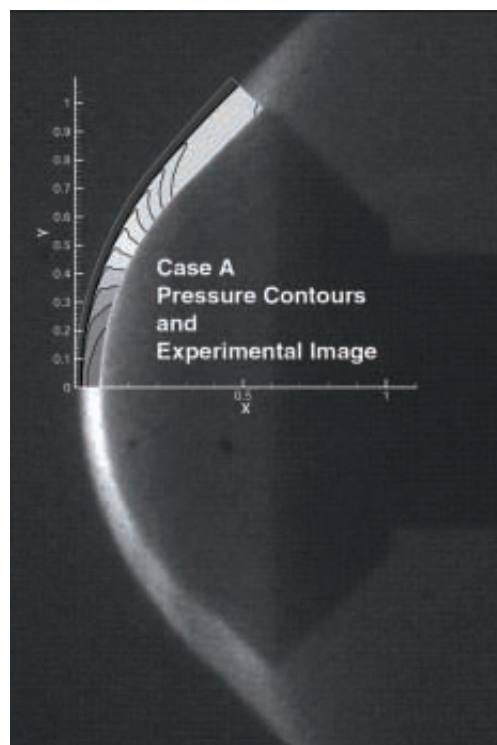
将来の惑星探査においては惑星からのサンプルリターンや大気を有する惑星の探査のため、大気に突入しサバイバルできる機体の開発が急務であるとの認識のもと、本格的な大気突入技術の習得を目指して研究・開発が始められたのは、1992年に開始されたEXPRESS計画であった。打上げこそうまくいかなかったものの、研究開発過程において多大な^{エクスプレス}lessons learnedがあったし、偶然にも回収された機体の解析からも得るところが大きいものであった。

高速再突入技術の中身は、狭義には飛行中に生じる高温大気からの熱入力を予測することや、それらから機体を保護する耐熱構造であるが、広くはそれらを最適化する軌道設計、さらにはミッション機器の搭載性を一体としたシステム設計技術から成るものであり、カバーする範囲は広い。例えば、機体形状についても、柔軟構造により抵抗係数を意図的に大きくし、減速効率を高めることにより耐熱構造に対する要求を緩和して、ミッション重量比を稼ぐ機体の開発など、多様な研究開発の要素がある。

「はやぶさ」に搭載されたカプセル機体（矢印）



気球実験でゴンドラにつられた柔軟構造体



実験結果と計算結果

EXPRESS後は、サンプルリターンを目指したMUSES-C計画（現「はやぶさ」）が立ち上がり、それに向けて新たな研究開発が行われ、現在完了している。冒頭にも述べたように応用範囲は広く、金星探査の検討の際には、金星気球を内蔵し降下途中で放出する突入機を検討したのははじめ、次期工

学ミッションの候補として、木星探査における突入プローブの検討が現在進行中である。さらに、地球へのサンプルリターンもますます盛んに計画されるものと考えている。例えば、月探査においても、現在計画されている「その場」観測の次はサンプルリターンの計画が控えており、再突入機の研究開発はますます盛んになるものと考えている。

2003年5月9日13時29分、MUSES-Cを乗せたM-Vロケット5号機は、梅雨直前の青空にごう音とともに消えていきました。ゴールドストーン局のテレメータ受信によりほぼ正確に軌道投入がなされたことが判明し、「はやぶさ」という新しい名前が付きしました。

この探査機には4台のイオンエンジンが搭載され、これから始まる地球—小惑星「ITOKAWA」間往復10億kmの旅の原動力となります。5月末から1日1台ずつ、プラズマ点火およびイオン加速を慎重に行いました。通信波のドップラーシフトから、イオンエンジンによる「はやぶさ」の加速のありさまをリアルタイムにとらえることができたのは、望外の喜びでした。地球の裏側に回ってしまうと日本からは監視できなくなりますから、その間も一人黙々と加速がなされるように運転パラメータのチューニングやコンピュータのソフト書き換えを行い、7月から巡航運転が始まりました。イオンエンジンはほとんど毎日運転され、1日当たり約4m/sの増速が行われています。これは、多くの関係者のご尽力とサブシステム間の協調運転の成果であることは言うまでもありません。

12月初めには、作動積算時間が7000時間・ユニットを突破し、「はやぶさ」は2004年6月ごろに地球と再会合するための軌道をほぼ確保しました。原点に地球、X軸上マイナス方向に太陽を固定した座標における「はやぶさ」の軌道を図に示します。打上げ当初は地球には達しない軌道であったものが、イオンエンジンを作動させるに従い軌道が徐々に変わり、原点に戻る曲線に移行するさまが分かります。

ここであらためてイオンエンジンを紹介します。推進剤キセノンを電離して電荷を帯びたイオン粒子を1kV以上の電位差で加速した後、下流で電子と混ぜて中性プラズマとして高速噴射を得て、その反作用を推進力とします。推進剤の利用効率が高く、深宇宙航行には必須の技術です。このイオンや電子を作る方式にはいくつかの種類があり、「はやぶさ」では電気推進工学部門で研究開発したマイクロ波放電式イオンエンジン「 $\mu 10$ 」が応用されています。最大の特徴は、プラズマ発生に放電電極を用いず、劣化の心配がないため長寿命・高信頼が期待できることです。

2003年中に達成した8000時間・ユニットの宇宙作動実績は、電気推進エンジニアにとって大変満足のいく値です。各国が宇宙実用を進めるイオンエンジンの宇宙作動実績の最新値を示します。NASAが開発するリングカスプ電子衝撃型イオンエンジンは3機種合計で77台打ち上げられていて、運転時間合計は8万5000時間です。さすが宇宙技術先進国といえます。乱暴な計算をすると1台当たり1000時間余りとなります。一方ESA

では、ドイツで開発された高周波放電型イオンエンジンが3台で合計7700時間です。これらの数値と比べると、「はやぶさ」 $\mu 10$ が技術立証の水準を満たしたことが理解できます。また、米欧日三者様のイオンエンジンが成果を収めていることに、宇宙工学者として感慨を覚えます。このイオンエンジンの多様性は、技術の健全な進歩といえるでしょう。同時に、他に追従するだけでないオリジナリティの重要性を物語っているともいえます。

ある講演会で「なぜ、マイクロ波放電のイオンエンジンが今まで現れなかったのか？」という質問を受け、答えに窮したことがありました。宇宙技術先進国に見習うという呪縛が強すぎて、自由な発想や創意が抑制されていたの

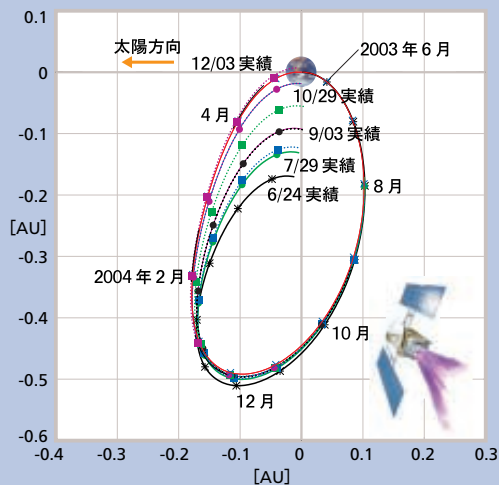
かもしれません。技術格差がありすぎて、とても追いつくことは不可能とあきらめていたのかもしれません。日本初の深宇宙探査機「さきがけ」「すいせい」を打ち上げたのはM-3SIIロケットです。このロケットの深宇宙投入重量は100kg程度で、とても電気推進を積む規模ではありませんでした。しばらくするとM-Vロケット開発のプロジェクトが始まりました。打上げ能力が3倍に上がると聞き、これにジャストフィットする電気推進を作ろうと考えたのがすべての始まりです。ただ単に“怖いもの知らず”だったのかもしれませんが。そう、本当に怖いもの知らずだったのです。そのときから今日に至るまで、何度も悪夢を見ましたから。でも借り物や模倣でない、われわれの技術だからこそ、その都度問題を克服できたのだと思います。

技術の洗練には、何度かの繰り返しが必要です。あそこやここや、気に掛かるところを改良すれば、必ずやもっと完ぺきなシステムが出来上がるはず。口径を大きくして大推力にするのもいいでしょう。1kVとはいわず10kVでプラズマ噴射する高比推力エンジンも面白そうです。

だからもう一度、飛翔の機会をください。太平洋の向こう岸では、原子力発電と高比推力電気推進による木星探査が始まると聞きます。日本には日本のやり方があるはずです。日本オリジナル技術による深宇宙探査に期待します。そのミッションにきっと貢献できるはず。です。

さて「はやぶさ」に話を戻します。この1年でためた速度ベクトルを、2004年6月ごろに地球重力を使って小惑星の方向にねじ曲げます。さらにその後もイオンエンジンを噴射して、2005年に「ITOKAWA」にランデブーすることになります。

IES ΔV 有無による軌道の差異（地心太陽方向固定座標系）
（2003年5月～2004年5月）



まとめにかえて

2003年10月にJAXAが発足してから3カ月余りが慌ただしく過ぎてみると、まるで1年以上たったような錯覚に襲われるのは、年をとった私の世代だけなのだろうか？

人間は、生まれたばかりのときが最も生命の危険にさらされるという。この時期を上手に乗り切れば、人間として生きていくために大切なものが養われると。誕生間もないJAXAが直面しているのは、まさしくそのような危機であると認識している。

その危機の様相は、日本という国のかじ取りの人々はもちろん、総合科学技術会議、学術会議などの諸組織と枠組み、今回の行政改革を核とするJAXAの誕生環境という大波に翻弄され続ける船のように見える。嵐にもあそばされる船ならば、乗組員の団結こそ最優先して考えられるべき課題である。嵐を嘆くだけでは始まらない。何よりも、内発的に危機克服の声が高くなることが、現在のJAXAの至上命題ではなだろうか。

工学も理学も含めて、宇宙科学という領域は、基盤技術に数々の課題を抱える日本の宇宙開発を救う鍵を握っている。それは相模原キャンパスだけの問題ではない。筑

波にも調布にも、科学を発展させる大元である、世界の動向をにらみながら自由な発想で未来を展望し、独創的なチャレンジをしていく風土が存在しなければならない。

JAXAの方針は、筋の通った一つのを掲げるべきであるが、それは近視眼的で狭量なものではなく、これから出来るさまざまな状況に柔軟に対応できる重層的で数枚腰のものでありたい。他方で、内部の議論は多発的で口角泡を飛ばすものであってほしい。

その際に、宇宙科学という学問については、IT、環境、バイオ、ナノテクと並列的に肩を並べて覇を競うような性格ではなく、これらの領域のすべて(もちろん他の多くの分野も)を基礎にして組み立てていくという立体的な位置付けも大切なのだと思う。これは、私たち自身が、ターゲットだけで学問を分類する考え方から一歩脱け出て成長しなければならないということである。

2004年の初の特集は、相模原キャンパスを中心に全国の宇宙科学の仲間たちがこれまで自由に描いてきた近未来のビジョンを集めた。この特集を読む人たちが、自身の関係する計画を眺めるだけでなく、他の人々の心に去来している宇宙理学と宇宙工学のイメージをじっくりと味わって、これから建設する私たちの将来への激しい議論の共通の土俵としたい。その上で、JAXA改革へ烽火(ほうか)が高く上げられるといいな、と考えている。

私たちの胸に、半世紀前に日本に宇宙の風をもたらした糸川英夫先生率いる少数の若い研究者たちの志が明々と燃え盛ることを願いながら、まとめとしたい。

(ISASニュース編集委員長 的川泰宣)

編集後記

統合直後の新年特集号ということで、「宇宙科学の近未来」を企画したものの、なかなか大変で、日ごろの勉強不足を痛感しました。的川先生をはじめ、広報や編集のスタッフ、先生方には、多大なご心配とご迷惑をおかけしました。この場をお借りして、お詫びと感謝の気持ちを述べさせていただきます。また、この特集号には、将来計画の各ワーキンググループの皆さまの、多大なお力添えがあったことも、ここに申し添えておきます。

宇宙科学の大きな意味での将来ビジョンは、日本に限らず世界的にも、非常に難しい問題です。基礎科学で一番大切なことは、今まで

全く知られていなかった知見を得ることであり、「成果を“完全”に予言できる基礎科学」は、矛盾を含んだ考え方です。一方で、ミッションを語るには、具体的な成果の予測が求められるのも確かです。われわれは、これらをよく考えた上で、目指すビジョンと成果をうまく、そして分かりやすく伝える、今まで以上の努力を必要としているのだと思います。

今回の編集作業で、自分のその力の不足を痛感させられました。日本で、そして世界(例えばNASAやESA)でビジョンを語る立場にいる方々は、本当によく考えており、勉強しています。それでも困難に直面するわけで

す。私は研究者であり、日ごろの研究を進め、目の前のプロジェクトを成功させることが本務です。しかし、だからこそ、大きな意味でのビジョンを常によく考え、よく勉強しながら、研究を進めていきたいと思います。周りにも同様によく考えている方々が多いですし、以前よりも増えてきたように思えます。

昨年はJAXAにとって大変な年でした。今年は、良い年になることを祈っています。祈ると同時に、やるべきことをしっかりとやらなくては。

(高エネルギー天文学研究系 中澤知洋)

ISASニュース No.274 2004.1 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。

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