

我が国における最近10年間の科学衛星の評価について（報告）
（概要）

第1章 はじめに

宇宙科学研究所では、全国の大学の研究者をはじめとする関連分野の研究者の意向を反映して研究目的が設定され、その研究目的を実現すべく、研究所内の宇宙工学系の研究者による科学衛星の打ち上げ用ロケットの開発と宇宙理学系研究者及び宇宙工学系研究者による科学衛星の開発が連携して行われる体制が採られている。これにより、原則として毎年一機の割合で科学衛星が打ち上げられ、これまでに24機の科学衛星の打ち上げに成功している。その結果、日本の宇宙科学は、ハレー彗星探査、X線天文観測、地球周辺科学、太陽観測等の分野で世界をリードする数多くの研究成果を上げ、地球近傍を飛翔する科学衛星を用いたプロジェクトは比較的短期間で急速な成長を遂げた。

近年、宇宙開発などの大型研究プロジェクトが進展する中で、科学技術基本計画（平成8年7月閣議決定）を受けて策定された「国の研究開発全般に共通する評価の在り方についての大綱的指針」（平成9年8月内閣総理大臣決定）では、「例えばメガサイエンスといわれるような、多額の財政支出を伴う特に大規模かつ重要なプロジェクトについては、評価の客観性・公正さをより高めるため、研究開発を実施する主体から独立したかたちで、外部専門家及びその他の外部有識者によって構成された組織による評価を実施することが必要である。」とされ、また、「学術研究における評価の在り方について」（平成9年12月学術審議会建議）においては、「特定の大学共同利用機関が中心となって、巨額の研究資金と多くの研究者集団により実施される大型研究プロジェクトについては、他の学術研究分野に与える影響も大きいことから、その研究計画については、事前・中間・事後の各段階において、透明性・客観性の高い厳正な評価が実施される必要がある。」との指摘がされている。

本報告は、このような状況を踏まえ、今後の宇宙科学研究の進め方について審議を進めるに当たり、我が国における宇宙科学研究の中心的な機関である宇宙科学研究所が行ってきた最近10年間の科学衛星で、当初設定した観測等の活動を終了しつつある1989年打ち上げの「あけぼの」以降の以下の分野の科学衛星と科学衛星を支える基盤的な工学技術について、原則として事後評価という観点から、専ら各科学衛星の目的がどの程度達成されたかに着目した評価について取りまとめたものである。

- 地球周辺科学分野の科学衛星（「あけぼの」、「Geotail(ジオテイル)」）
- 太陽物理分野の科学衛星（「ようこう」）
- X線天文分野の科学衛星（「あすか」）
- 赤外線分野の科学衛星（「SFU搭載IRTS」）
- 電波天文分野の科学衛星（「はるか」）
- 宇宙利用分野の科学衛星（「SFU」）
- 工学実験衛星（「ひてん」、「はるか」）
- 科学衛星を支える工学技術

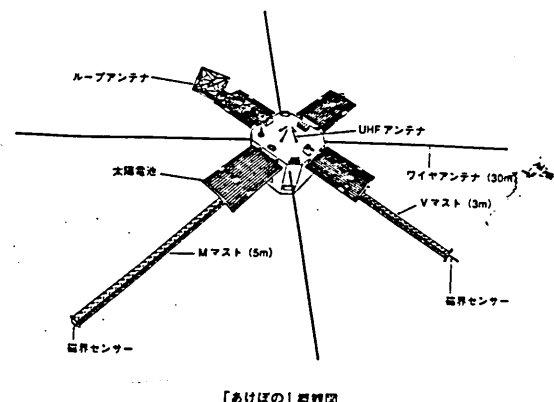
第2章 地球周辺科学分野の科学衛星（「あけぼの」、「Geotail(ジータイル)」）

(1) 概要

○ 科学衛星の概要

「あけぼの」衛星（第12号科学衛星 EXOS-D）

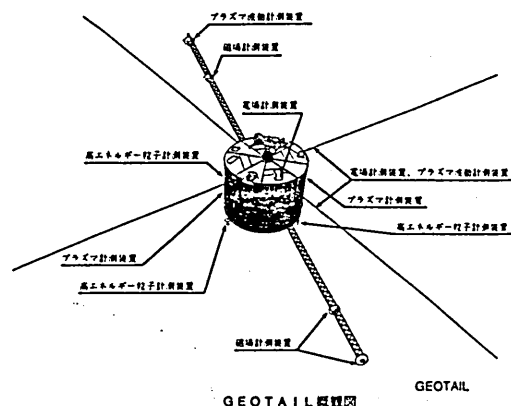
打ち上げ	1989（平成元）年 2月22日
射 場	宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所
ロケット	M-3SII-4号機
衛星重量	295.4 kg
運 用	1989（平成元）.2-現在



「あけぼの」概観図

「Geotail」衛星（磁気圏尾部観測衛星）

打ち上げ	1992（平成4）年 7月24日
射 場	ケネディー宇宙センター（米）
ロケット	Delta II
衛星重量	1,009 kg
運 用	1992（平成4）.7-現在



○ 科学衛星の目的

地球周辺の宇宙空間（磁気圏、電離圏）の構造とそこで展開される物理過程及び太陽から惑星間空間を経て地球周辺の宇宙空間の各領域に供給されるエネルギーと運動量の流れの理解

(2) 評価

○ 学術的な成果

- ① 物理現象の「現場」へ科学衛星を投入し、直接観測を実施
- ② 国際共同研究のISTP計画（国際太陽地球系科学研究計画）の中心として、プラズマ分布関数、電場、磁場、波動等の複数の観測項目を組み合わせた観測を行い、超高層大気の大規模な構造と微視的物理過程の関連の総合的な理解に寄与
- ③ 太陽風・地球磁気圏・放射線帯・極域等を相互に結ぶエネルギーや運動量輸送に関する研究を行い、磁気圏現象のエネルギー、運動量輸送の時間展開の理解に寄与
- ④ 計算機シミュレーションとの連携により、太陽地球系空間の大規模・微視的物理過程の理解に寄与

○ 技術的な成果

- ① 従来に比べて約10倍の放射能環境に耐えうる衛星の開発
- ② 伸展マスト、糸巻型長尺アンテナの2種類の伸展構造物の開発
- ③ 表面導電処理技術の導入
- ④ EMC（電磁的適合性）対策の着手

○ 総合評価と今後の課題

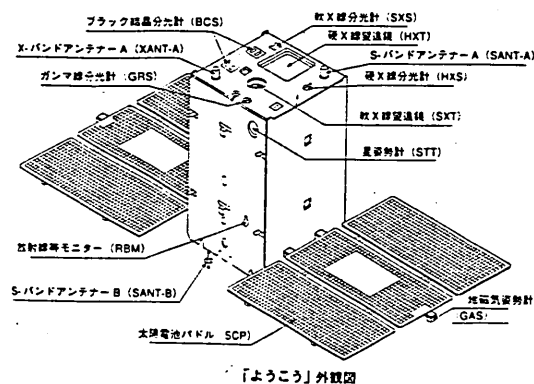
「あけぼの」、「Geotail」衛星は、当初の目的をほぼ達成するとともに、我が国の科学衛星のデータの質を大幅に引き上げ、国際的にも高い評価

今後の課題としては、両衛星のデータの活用と計算機シミュレーションの更なる連携を進め、プラズマの運動論的效果やプラズマ不安定性、粒子加速、波動粒子相互作用などが、

第3章 太陽物理分野の科学衛星（「ようこう」）

○ 科学衛星の概要

運 用 1991 (平成 3) .8—現在



太陽フレアの物理過程及び太陽コロナ諸現象の解明

○ 学術的な成果

- ① 太陽コロナで繰り上げられる磁気流体力学現象の解明に寄与
- ② 太陽活動周期（11年）にわたる太陽コロナのグローバルな形状の変遷とその原因である太陽磁気の再生産過程の解明に寄与
- ③ 地球の上層大気、磁気圏への影響の大きい惑星間空間擾乱現象の発生機構の解明に寄与

- ① コンピュータによる望遠鏡制御技術の開発
- ② X線CCD焦点面検出器の搭載
- ③ 最新の画像処理技術の開発・導入
- ④ データ・アーカイブの整備

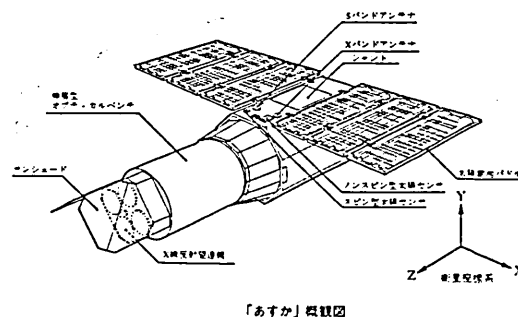
「ようこう」衛星は、1990年の太陽観測極大期に打ち上げられた世界で唯一の太陽フレア観測衛星として、当初の目的をほぼ達成するとともに、太陽物理学分野における国際的共同研究の中核に位置し、国際的にも高い評価

今後の課題としては、データ解析システム、データ・アーカイブなどデータの活用において体制の強化が必要

第4章 X線天文分野の科学衛星（「あすか」）

○ 科学衛星の概要

運 用 1993 (平成 5) . 2-現在



○ 科学衛星の目的

宇宙の化学進化の解明、ブラックホールの検証、宇宙における粒子加速現場の特定、暗黒物質の分布と総量の推定、X線天体の進化と深宇宙の探査、宇宙X線背景放射の正体解明

(2) 評価

○ 学術的な成果

- ① 超新星の残骸、個々の銀河、銀河団など、宇宙の様々な階層の天体から重元素のイオンの出すX線の輝線を検出し、宇宙の化学進化の解明に寄与
- ② ブラックホール周辺の高温ガスの解析からブラックホールの存在を示唆
- ③ 西暦1006年に出現した超新星の残骸から、粒子が超高エネルギーにまで加速されている証拠を発見し、宇宙における粒子加速現場の特定に寄与
- ④ 銀河団を包む高温プラズマの分布を詳しく観測し、プラズマを拘束するのに必要な重力質量を算出することにより、暗黒物質の分布と総量の推定に寄与
- ⑤ 銀河団や活動銀河核を距離の関数として観測し、X線天体の進化と深宇宙の探査に寄与
- ⑥ 広い天空領域をバイアスの無いサーベイを行い、宇宙X線背景放射の正体解明に寄与

○ 技術的な成果

- ① 三軸安定機能による衛星の精密姿勢制御の実現
- ② 最新鋭の宇宙X線観測装置(X線反射望遠鏡、X線CCDカメラ、撮像型蛍光比例計数管)の開発

○ 総合評価と今後の課題

「あすか」衛星は、当初の目的を達成し、関連する自然科学の研究分野に対しても、様々な波及効果を及ぼしつつある。

第5章 赤外線天文分野の科学衛星(「SFU搭載IRTS(7-7)」)

(1) 概要

○ 科学衛星の概要

宇宙利用分野の科学衛星(「SFU」)(打ち上げ1995年3月)の一環として打ち上げられ、観測運用に成功した日本で初めての赤外線天文観測専用の宇宙望遠鏡(世界で3番目)

○ 科学衛星の目的

日本で初めての赤外線天文観測専用の宇宙望遠鏡の開発及び星間物質の物理状態と星の生成過程の解明

(2) 評価

○ 学術的な成果

- ① 黄道光(太陽光の惑星間塵による散乱光)及び惑星間塵の近赤外・中間赤外域における熱放射スペクトルを初めて観測し、惑星間塵の組成の解明に寄与
- ② 波長 $1.4\mu\text{m}$ ~ $11.7\mu\text{m}$ までのスペクトル観測による低温度星のカタログを作成
- ③ 星間物質による謎の赤外放射(UIR)を観測し、その起源の解明に寄与

○ 技術的な成果

- ① 打ち上げ時の振動・衝撃に耐え、しかも断熱性能の良い冷却部支持方法を開発
- ② 無重力下では位置が定まらない液体から、蒸発ガスだけを分離して廃棄する方法を開発

○ 総合評価と今後の課題

「IRTS」については、当初の目的を十分に達成

今後の課題としては、赤外線域、サブミリ波帯の電波での観測は地上でも行われていることから、地上の赤外線望遠鏡、サブミリ波帯干渉計との相補的、相互協力的観測計画の策定が肝要

第6章 電波天文分野の科学衛星（「はるか」）

(1) 概要

○ 科学衛星の概要

「はるか」衛星（第16号科学衛星 MUSES-B）

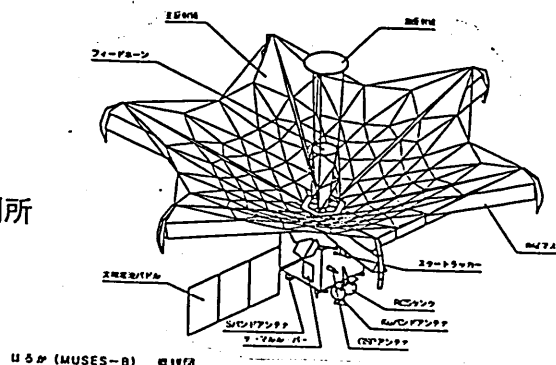
打ち上げ 1997 (平成 9) 年 2月12日

射 場 宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所

ロケット M-V-1 号機

衛星重量 800 kg

運 用 1997 (平成 9) . 2 - 現在



○ 科学衛星の目的

世界で初めてのスペースVLBI（超長基線干渉計）観測の実現及び活動銀河核（AGN）の超高分解能イメージ観測

(2) 評価

○ 学術的な成果

- ① 8 m単独電波望遠鏡としての性能確認観測の成功
- ② 周波数1.6GHzと 5GHz 帯についてはVLBIイメージ観測の成功
- ③ 角度分解能 1 万分の 3 秒という高解像度観測の実現（ハッブル望遠鏡の解像度の約 300倍に相当）

○ 技術的な成果

- ① 大型アンテナの展開技術の開発
- ② 電波波長域での高感度受信機の衛星搭載
- ③ 衛星の高精度 3 軸姿勢制御の開発
- ④ 超広帯域データ伝送技術の開発
- ⑤ 原子時計に匹敵する高安定な位相の衛星・地上伝送技術の開発
- ⑥ 高精度な衛星軌道の決定

○ 総合評価と今後の課題

「はるか」衛星の観測は、まだ始まったばかりであり、本格的な科学的成果はこれからであるが、当初の目的は十分に達成

第7章 宇宙利用分野の科学衛星（「SFU」）

(1) 概要

○ 科学衛星の概要

「SFU」衛星

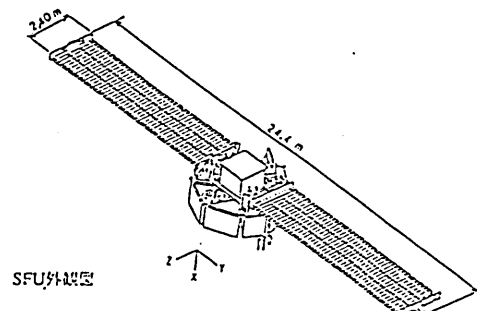
打ち上げ 1995 (平成 7) 年 3月18日

射 場 宇宙開発事業団種子島宇宙センター

ロケット H-II-3号機

衛星重量 3,850 kg

回 収 1996 (平成 8) 年 1月20日 (米国 NASA スペースシャトル STS-72)



○ 科学衛星の目的

宇宙科学研究所、科学技術庁、通商産業省の関連機関との共同開発、運用による極微小重力、超真空など宇宙空間特有の特性を利用した各種工学、理学実験の実施及び宇宙で処理された物質の詳細な分析、衛星の再利用を目指し、米国スペースシャトルでの衛星の回収

(2) 評価

○ 学術的な成果

- ① 宇宙生物実験として、長期間宇宙空間を飛行するフリーフライヤーに世界で初めて比較的大型の水棲動物を搭載して微小重力の細胞過程への影響に関する研究を実施
- ② 高倍率顕微鏡干渉計による重力ノイズの少ないフリーフライヤーを利用した結晶成長実験を実施
- ③ パドルの2次元展開技術の確立
- ④ MPDアークジェット (Magnetoplasma dynamic arcjet) をスラスタとして搭載し、軌道上で推進性能を確認
- ⑤ プラズマ計測装置による環境モニタの技術確認を実施
- ⑥ 赤外線望遠鏡による天文観測の実施 (第5章 参照)

○ 技術的な成果

- ① H-IIロケット (打ち上げ) とスペースシャトル (回収) とのインターフェースの確認
- ② 回収型実験モジュール構成衛星の技術の確認
- ③ スペースシャトルによる回収によって、有人ミッションとの適合性の確認

○ 総合評価と今後の課題

「SFU」衛星については、国際的ミッションとして衛星の機能と2種の打ち上げ回収システムのインターフェースの立証及び多省庁との共同開発、運用による軌道上での理工学実験・観測の実施など、当初の目的はほぼ達成され、今後の類似プロジェクトに対し、参照されるべき実例を残した。

今後の課題としては、「SFU」衛星の再フライトを含め、この種の高コスト実験の実現の可否については、宇宙ステーション等後続プロジェクトとの関連を考慮したコスト評価に基づき判断することが重要

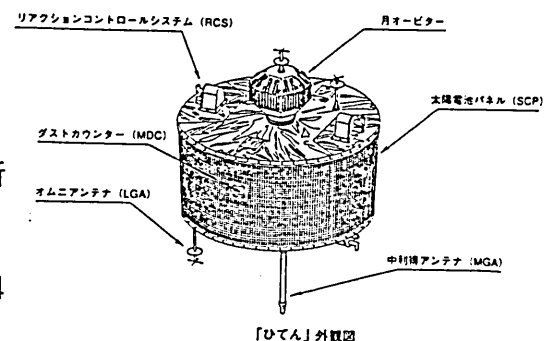
第8章 工学実験衛星 (「ひてん」、「はるか」)

(1) 概要

○ 科学衛星の概要

「ひてん」衛星 (第13号科学衛星 MUSES-A)

打ち上げ	1990 (平成 2) 年 1月24日
射 場	宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所
ロ ケ ッ ト	M-3SII-5号機
衛 星 重 量	196 kg
運 用	1990 (平成 2) .1-1993 (平成 5) .4



○ 科学衛星の目的

「ひてん」衛星

エネルギー利得や宇宙大旅行を可能にするスイングバイ技術及びエネルギー消費無しに軌道変換を行うエアロブレーキング技術の確立

「はるか」衛星

大型展開アンテナ、フェーズトランスファー、単一ディッシュの電波望遠鏡の実現及び電波観測に必要な通信技術の確立

(2) 評価

○ 学術的・技術的な成果

「ひてん」衛星

- ① 2重月スイングバイ軌道の達成
- ② エアロブレーキング技術の実証
- ③ 光学航法技術の実証

「はるか」衛星

- ① 大型展開アンテナを衛星上に実現
- ② フェーズトランスファー（位相基準信号の伝送）に成功
- ③ 単体の電波望遠鏡として機能した電波干渉計の形成に成功

○ 総合評価と今後の課題

「ひてん」衛星は、当初の目的を十分に達成、また、「はるか」衛星については、最終的な評価は時期尚早であるが、主要な目的は達成

今後の課題としては、宇宙科学研究所は米国、欧州に比較すれば小規模な研究者と経費で工学ミッションを達成したが、今後のプロジェクトにおける高度な工学技術の開発に当たり、開発体制の整備が必要

第9章 科学技術を支える工学技術

○ 総合評価と今後の課題

- ① 姿勢制御、太陽電池、バッテリー、通信機器、衛星推進系、搭載データ処理系、衛星構造、展開・進展機構、EMC対策、アウトガス対策の優れた技術に支えられ、科学衛星のプロジェクトは成果を上げてきた。
- ② にもかかわらず現在、科学衛星の高機能化、複雑化による技術難度の飛躍的増加、またミッション毎の類似性が乏しく、多様性が広がってきているため、新しい開発体制の確立を期待

第10章 まとめ

○ 科学衛星の成果

- ① 毎年一機の割合で衛星のプロジェクトが実現されてきたことは、それぞれの研究分野の長期的視野に立ったプロジェクトの立案を容易にし、人材育成と技術の段階的な高度化に大きく寄与した。
- ② 科学衛星の開発、特に運用・データ解析への大学院学生を中心とした若手研究者の多数の参加は、教育的観点、次の世代を担う人材の養成という観点、フレッシュな視点からの研究の展開という点から評価される。
- ③ 宇宙科学研究所では、科学衛星のプロジェクトの実現に向けて、理學研究者と工学研究者の共同作業を行ってきたが、研究所の内外を問わず理・工の協力は更に発展していく傾向にある。
- ④ 我が国の科学衛星のプロジェクトは、観測データの共有、搭載機器の共同開発、国際的なネットワークによる観測の実現に至るまで国際協力の視点でも十分な成果を上げている。

○ 将来へ向けての課題

- ① 我が国の科学衛星のプロジェクトは、毎年一機の割合で中規模の衛星を実現することによって健全な発達を遂げたが、今後、衛星の大型化、高度化が進んだ場合、年一機体制を崩す可能性がある。米国では近年、日本におけるプロジェクトの実施体制も参考にして faster and cheaper の方針で衛星を実現する傾向にあり、我が国の年一機体制という良好な実施体制を踏まえつつ、なお、我が国の研究面での国際競争力の低下をもたらさない体制の在り方について検討が必要である。
- ② 我が国の科学衛星のプロジェクトが幅広い分野で成功を収めていくためには、新しい分野の研究者が参加して技術を向上していける体制の構築が必要である。

- ③ 科学衛星の状態監視等の衛星運用、天文衛星からの膨大なデータの一次処理、データベースの整備、国内外の研究者からの問い合わせに対する対応等は、本来研究支援者によって行われることが適切であるが、現行の体制では、これらの作業に携わる若手研究者の負担が過度に大きくなっていることから、研究者が本来の研究活動に専念することができるよう研究支援体制の整備を図ることが必要である。
- ④ 国際協力による観測データの国外研究者への公開は、研究者の幅が広がり新しい考えも持ち込まれ研究が活性化して国内の研究者も利益を受けることから、今後、これらのデータの発信を積極的に行うとともに、国内の研究者の利用が一層促進されるよう研究環境の整備を進めることが必要である。

○ 総合評価

我が国の科学衛星のプロジェクトは、宇宙科学研究所を中心に全国の関連分野の研究者が企画段階から主体的に参加することによって実現され、国際的な観点から見れば比較的少ない予算・人員で十分な成果を上げてきたといえる。これらの成果は我が国のみならず人類共通の資産であり、人類の知的フロンティアの拡大に資するものであって、他の手段では獲得できないものである。

以上の観点から、今回の評価の対象とした「あけぼの」、「Geotail」衛星による地球周辺科学分野の研究、「ようこう」衛星による太陽物理分野の研究、「あすか」衛星によるX線天文分野の研究、SFU搭載の「IRTS」による赤外線天文分野の研究、打ち上げ間もない「はるか」衛星による電波天文分野の研究、「SFU」衛星による宇宙利用分野の研究、工学実験衛星「ひてん」による軌道制御技術、「はるか」衛星による大型アンテナ展開等の技術開発等で得られた成果は、投入された経費、人材を勘案して妥当なものであったと考えられる。

なお、今後の我が国における宇宙科学研究の在り方については、行財政改革の進展及びこれに伴う宇宙開発関連施策についての様々な議論の動向を踏まえながら、今後、改めて検討する。

我が国における最近10年間の科学衛星の評価について
(報告)

平成10年1月16日

学術審議会特定研究領域推進分科会

宇宙科学部会

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 地球周辺科学分野の科学衛星(「あけぼの」、「Geotail」)	3
(1) 概要	3
① 科学衛星の目的	3
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	3
(2) 評価	4
① 学術的な観点	4
② 技術的な観点	6
③ 人材養成における観点	6
④ 国際的な観点	7
⑤ 総合評価と今後の課題	7
第3章 太陽物理分野の科学衛星(「ようこう」)	9
(1) 概要	9
① 科学衛星の目的	9
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	10
(2) 評価	11
① 学術的な観点	11
② 技術的な観点	13
③ 人材養成における観点	14
④ 国際的な観点	14
⑤ 総合評価と今後の課題	14
第4章 X線天文分野の科学衛星(「あすか」)	15
(1) 概要	15
① 科学衛星の目的	15
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	16
(2) 評価	18
① 学術的な観点	18
② 技術的な観点	20
③ 人材養成における観点	21
④ 国際的な観点	22
⑤ 総合評価と今後の課題	23
第5章 赤外線天文分野の科学衛星(「SFU搭載IRTS」)	23
(1) 概要	23
① 科学衛星の目的	23
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	24
(2) 評価	24

① 学術的な観点	24
② 技術的な観点	25
③ 人材養成における観点	26
④ 国際的な観点	26
⑤ 総合評価と今後の課題	26
第6章 電波天文分野の科学衛星（「はるか」）	27
(1) 概要	27
① 科学衛星の目的	27
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	27
(2) 評価	28
① 学術的な観点	28
② 技術的な観点	28
③ 人材養成における観点	28
④ 国際的な観点	28
⑤ 総合評価と今後の課題	29
第7章 宇宙利用分野の科学衛星（「SFU」）	29
(1) 概要	29
① 科学衛星の目的	29
② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	30
(2) 評価	31
① 学術的な観点	31
② 技術的な観点	33
③ 人材養成における観点	34
④ 国際的な観点	35
⑤ 総合評価と今後の課題	35
第8章 工学実験衛星（「ひてん」、「はるか」）	36
(1) 概要	36
① 工学実験衛星の目的	36
② 工学実験衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費	37
(2) 評価	37
① 学術的・技術的な観点	37
② 人材養成における観点	38
③ 国際的な観点	39
④ 総合評価と今後の課題	39
第9章 科学衛星を支える工学技術	41
(1) 概要	41
(2) 評価	48
① 周辺分野・産業界への影響	48
② 総合評価と今後の課題	49

第10章	まとめ	49
------	-----	----

附属資料1	科学衛星の概要	52
-------	---------	----

附属資料2	学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会 (第15期) 委員名簿	57
-------	---------------------------------------	----

附属資料3	学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会 (第15期) 科学衛星プロジェクトレビュー・ワーキンググループ委員名簿	58
-------	---	----

第1章 はじめに

第4期の学術審議会は、1975年10月に「宇宙科学研究の推進について」の答申において「今後さらに宇宙科学研究の推進を図るためには、計画立案段階から成果の取得に至るまで、宇宙理学及び宇宙工学を中心とする関係研究者の密接な協力のもとに、一貫したシステムとしての体制の確立が必要」とする旨提言し、これを受けて、1981年5月に、我が国の宇宙科学分野の今後の発展を図り、この分野における国際的研究拠点を形成するため、東京大学宇宙航空研究所(1964年4月創設)の廃止・転換により、新たに宇宙科学研究所が大学共同利用機関として創設された。

宇宙科学研究所では、全国の大学の研究者をはじめとする関連分野の研究者の意向を反映して研究目的が設定され、その研究目的を実現すべく、研究所内の宇宙工学系の研究者による科学衛星打ち上げ用ロケットの開発と宇宙理学系研究者及び宇宙工学系研究者による科学衛星の開発が連携して行われる体制が採られている。これにより、原則として毎年一機の割合で科学衛星が打ち上げられ、日本の宇宙科学が国際舞台に公式にメンバーとして登場する最初の機会となったハレー彗星探査衛星(1985年)など、これまでに24機の科学衛星の打ち上げに成功している。その結果、日本の宇宙科学は、ハレー彗星探査、X線天文観測、地球周辺科学、太陽観測等の分野で世界をリードする数多くの研究成果を上げ、地球近傍を飛翔する科学衛星を用いたプロジェクトは比較的短期間で急速な成長を遂げた。

また、宇宙科学研究所は、ロケットの打ち上げ能力上の制約から、惑星や月の直接探査を対象とするプロジェクトを長らく実施することができなかったが、1997年に初号機の打ち上げに成功したM-V型ロケットの開発により、火星、月、小惑星等の探査が現実のものとなりつつある。

そもそも、我が国の宇宙開発は、総理府に置かれる宇宙開発委員会が定める基本方針のもとに、実利用の分野については科学技術庁の宇宙開発事業団が、科学研究の分野については文部省の宇宙科学研究所が、主として実施してきている。

宇宙科学研究の分野においては、1955年に東京大学生産技術研究所が我が国初のペンシルロケットを開発し、その後、国際地球観測年(IGY)(1957年—1958年)の電離層の観測を経て、1970年には宇宙科学研究所の前進である東京大学宇宙航空研究所が我が国初の人工衛星「おおすみ」の打ち上げに成功している。「おおすみ」の重量はわずか24kgであり、初の月面有人活動を行った米国のアポロ11号が前年の1969年、同じく米国の火星探査機が翌1971年の打ち上げであったことを考えると、我が国の宇宙開発は当時の宇宙先進国であった米国、ソ連に大きく遅れた出発であったと言える。

宇宙開発などの大型研究プロジェクトが進展する中で、科学技術基本計画(平成8年7月閣議決定)を受けて策定された「国の研究開発全般に共通する評価の在り方についての大綱的指針」(平成9年8月内閣総理大臣決定)では、「例えばメガサイエンスといわれるような、多額の財政支出を伴う特に大規模かつ重要なプロジェクトについては、評価の客観性・公正さをより高めるため、研究開発を実施する主体から独立したかたちで、外部専門家及びその他の外部有識者によって構成された組織による評価を実施することが必要である。」とされ、また、「学術研究における評価の在り方について」(平成9年12月学術審議会建議)においては、「特定の大学共同利用機関が中心となって、巨額の研究資金と多くの研究者集団により実施される大型研究プロジェクトについては、他の学術研究分野に与える影響も大きいことから、その研究計画については、事前・中間・事後の各段階において、透明性・客観性の高い厳正な評価が実施される必要がある。」との指摘がされている。

宇宙科学研究所を中心に進められてきた科学衛星のプロジェクトは順調に進展し、現在では、国際的にも一定の評価を受けているが、宇宙科学研究は多額の予算と長期にわたる多数の人材の投入を必要とする大型プロジェクトである。

このような状況を踏まえ、本部会では、今後の宇宙科学研究の進め方について審議を進めるに当たり、我が国における宇宙科学研究の中心的な機関である宇宙科学研究所が行ってきた主要な科学衛星について評価を行うこととした。

評価の対象は、打ち上げ後現在もなお観測等の活動を行っている科学衛星で原則として、当初設定した観測等の活動を終了しつつある1989年打ち上げの「あけぼの」以降の以下の分野の科学衛星と科学衛星を支える基盤的な工学技術に設定した。

- 地球周辺科学分野の科学衛星(「あけぼの」、「Geotail」)
- 太陽物理分野の科学衛星(「ようこう」)
- X線天文分野の科学衛星(「あすか」)
- 赤外線分野の科学衛星(SFU 搭載「IRTS」)
- 電波天文分野の科学衛星(「はるか」)
- 宇宙利用分野の科学衛星(「SFU」)
- 工学実験衛星(「ひてん」、「はるか」)
- 科学衛星を支える工学技術

その上で、本部会に宇宙科学研究の各分野の専門家からなるワーキンググループを設置し、これまで6回にわたって開催し、各科学衛星のプロジェクトの推進に中心的な役割を果たした宇宙科学研究所の研究者及び各衛星に関わった所外の研究者(外国人を含む)計14人からヒアリングを行った上で、原則として事後評価という観点から、専ら各科学衛星の目的がどの程度達成されたかに着目した評価を行った。

第2章 地球周辺科学分野の科学衛星(「あけぼの」、「Geotail(ジオテイル)」)

(1) 概要

① 科学衛星の目的

地球周辺科学分野の大きな研究目的は、

地球周辺の宇宙空間(磁気圏、電離圏)の構造とそこで展開される物理過程の理解、
太陽から惑星間空間を経て地球周辺の宇宙空間の各領域に供給されるエネルギー
と運動量の流れの理解、

を進めることである。

これらの大きな目的を達成するための具体的な目的は、

- (1) 探査機を物理現象の「現場」に投入して直接観測を行う
- (2) プラズマ分布関数、電場、磁場、波動等の複数の観測項目を組み合わせた観測を行う
ことによって、超高層大気の巨視的構造と微視的物理過程の関連を総合的に理解する
- (3) 様々な領域に探査機を投入し、太陽風・地球磁気圏・放射線帯・極域等を相互に結ぶ
エネルギーや運動量の輸送に関する総合的データを取得し、その仕組みを定量的に
理解する
- (4) 集積されたデータの解析・理論的考察によって得られた磁気圏全体の巨視的な構造と
プラズマ過程のモデリング(磁気リコネクションや無衝突衝撃波等)を行い、計算機シミュレーション等によって巨視的な構造の時間発展を理解する
- (5) 同時に観測される物理諸量と微視的プラズマ過程の理論・シミュレーションを組み合わせ、
太陽地球系空間における粒子加速・加熱、波動励起等の微視的プラズマ過程を
理解し、巨視的プラズマ過程との関連を明らかにする
等である。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

[観測体制]

「あけぼの」衛星

宇宙科学研究所(相模原)・・・コマンド計画立案、サイエンス・データ処理
宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所・・・コマンド送信、観測データ受信
海外受信局(南極、プリンスアルバート、エスレンジ)・・・観測データ受信
各大学・研究機関のPI・・・サイエンス・データ処理

「Geotail」衛星

宇宙科学研究所(相模原)・・・コマンド計画立案、サイエンス・データ処理
宇宙科学研究所臼田宇宙空間観測所・・・コマンド送信、観測データ受信
NASA・深宇宙ネットワーク(DSN)・・・観測データ受信
NASA・ゴダード宇宙飛行センター(GSFC)・・・キーパラメーター・データ処理
各大学・研究機関の主任研究員(PI)・・・サイエンス・データ処理

[参加人員]

機関名	「あけぼの」衛星		「Geotail」衛星	
	スタッフ	院生+PD	スタッフ	院生+PD
宇宙科学研究所	6	10	8	5
青山学院大学	1	0	0	0
東北大学	5	14	0	0
通信総合研究所	5	1	2	0
名古屋大学	2	2	3	4
富山県立大学	2	0	2	4
京都大学	2	5	8	19
国立極地研究所	4	0	0	0
東海大学	1	5	1	4
東京大学	1	1	1	7
立教大学	1	0	2	2
東京工業大学	0	1	2	0
金沢大学	2	4	2	4
東北工業大学	1	1	0	0
愛媛大学	0	0	2	6
茨城大学	0	0	0	2
早稲田大学	0	0	1	3
電気通信大学	0	0	1	0
信州大学	0	0	1	2
合計	33	44	36	62

「あけぼの」衛星 77人(スタッフ 34人、大学院学生+PD 44人)

「Geotail」衛星 98人(スタッフ 36人、大学院学生+PD 62人)

[必要経費]

「あけぼの」衛星 衛星 52.3 億円、ロケット 41.1 億円

「Geotail」衛星 衛星 90.6 億円、打ち上げロケットは米国の負担

(2) 評価

① 学術的な観点

1960年頃から始まった人工衛星を利用した磁気圏観測は、磁気圏物理学や宇宙空間プラズマ物理学の研究発展に中心的役割を果たしてきた。これまでに、太陽風から磁気圏へのエネルギー流入過程、磁気圏から極域上層大気にかけてのプラズマの変遷過程が明らかにされてきた。しかし、従来の磁気圏物理学の研究では巨視的な磁気圏全体像と微視的な物理過程との関連の理解が不十分であり、それぞれの物理過程に内在している素過程の発生条件、エネルギー変換率、高エネルギー粒子のスペクトル等を説明することが出来ていなかった。しかし、プラズマ分布関数の測定等において測定技術の進歩した「あけぼの」、「Geotail」衛星の観測は、プラズマの微視的物理過程の理解への道を開いた。これらの衛星が予定通り打ち上げに成功し、研究対象現場に投入するという目的の一つ(1)は達成されたと評価できる。

これらの観測結果は計算機シミュレーション研究とあいまって、巨視的構造と微視的物理過程の関連についての物理的議論を可能にした。ISTP計画(国際太陽地球系科学研究

計画)による複数衛星の同時観測結果を基に、微視的理解に基づいた惑星・地球磁気圏の全体像の再構築が進んでいる。「Geotail」衛星は初めて磁気圏の尾部に長期間滞在し、広範囲にわたる尾部プラズマ中の粒子、電場、磁場、波動の詳細なデータを世界で初めて示し、磁化された惑星と太陽風プラズマ流との相互作用に関する総合的知見をもたらした。この分野の学術的理論体系化に大きな貢献をした点は高く評価できる。これによって目的の(2)と(3)は達成されている。

また、磁気圏周辺空間の重要な物理過程と考えられている磁気リコネクションや無衝突衝撃波の観測に「Geotail」衛星は次々と世界で最初の観測事実を発見しており、サブストームのような磁気圏現象の巨視的構造の時間発展の理解を得るという目的(4)は「あけぼの」衛星による極域でのモニターとあいまって達成されつつあると評価できる。ただ、軌道上の制約があるため完全な理解に至るほどの豊富な衛星同士の同時観測が困難なことも事実であろう。

目的(5)は物理諸量の同時観測、計算機シミュレーションとの併用などにより太陽地球系空間プラズマ中の微視的過程を理解し、巨視的プラズマ過程との関連を明らかにすることである。前者に関してはプラズマ物理学の一部としてスペースプラズマ物理学が位置づけられるが、「Geotail」衛星はプラズマ物理学上知られているBGKモードが静電孤立波という形として磁気圏プラズマ中にかなり一般的に存在することを世界で初めて発見し、計算機シミュレーションによってその特性を明らかにした。このことはその後打ち上げられた「POLAR」衛星など、諸外国の衛星観測に影響を与えるなど、諸外国でも高く評価されている。巨視的プラズマ過程と微視的プラズマ過程との関連については現在研究が進行中であるが、現段階では評価できない。

「あけぼの」衛星の目的は、極域電離層での構造、オーロラ粒子の加速過程を理解することにあり、主な成果は、

1. 極域から散逸する重イオンの組成と構造
2. オーロラ粒子と磁気圏との対応
3. プラズマ圏の熱構造

を明らかにしたことであり、さらに、

4. 低周波波動による磁気圏リモートセンシング技術の確立

したことである。

また、「Geotail」衛星の目的は、太陽風から尾部へのエネルギーと粒子の流入メカニズム尾部での粒子加速・加熱プロセス、「あけぼの」衛星高度で観測される現象と磁気圏尾部現象との関連であり、主な成果は、

1. 磁気リコネクション・パラダイムの観測的確立
2. 磁気圏尾部における爆発的エネルギー解放過程とサブストーム現象との関連
3. 無衝突プラズマ境界層での輸送過程
4. プラズマ波動と磁気圏構造との対応

を明らかにしたことなどである。

「ようこう」衛星がとらえた太陽コロナのダイナミックな様相から、太陽コロナ中で磁気リコネクション過程が重要な役割を果たしていることが分かってきた。地球磁気圏で観測される磁気リコネクションも基本的物理過程は同じと考えられるが、太陽コロナと地球磁気圏では境界条件、プラズマ・パラメータ等が全く異なるために観測される磁気リコネクションの様相はかなり異なっている。両者の観測結果を比較・検討することによって磁気リコネクションを総合的に理解しようという試みが始められており、磁気リコネクションをキーワードとした学際領域の発展に「Geotail」衛星による観測が貢献している。

「Geotail」衛星は太陽地球間空間で無衝突プラズマ中の衝撃波を観測している。この

データを用いた無衝突衝撃波によるプラズマの衝撃波加速・加熱過程の研究は、宇宙に普遍的に存在する衝撃波での高エネルギー粒子形成過程を理解する上で本質的かつ重要な知見をもたらしている。こうした太陽地球間空間での衝撃波の理解は高エネルギー天体物理学等の周辺分野の研究に大きな影響を与えている。更に、宇宙空間を容器壁や強い非一様性等に制限されない理想的な無衝突プラズマの天然の実験室ととらえたとき、地球周辺観測衛星はプローブとして機能し、プラズマ物理学、とくに非線形波動-粒子相互作用や、磁気リコネクション、粒子加速等に関する重要なデータを与え、プラズマ理論の進展にも大きな貢献をした。

静電孤立波(BGKモード)の研究はそれまでよく分かっていなかった極域の電子の非線型挙動の解釈や「POLAR」、「WIND」衛星などによるその後の研究に影響を与えたほか、いわゆる地上の実験室プラズマ研究者に宇宙プラズマへの関心を引きつける役割を果たした。

また、「あけぼの」及び「Geotail」の両衛星の観測結果から大量の酸素イオン等の重イオンが極域上層大気から宇宙空間へ流出していることが発見された。この現象によって流出する重イオンの総量は惑星大気の進化過程にとって決して無視できる量ではないことが明らかになった。この結果は、従来の惑星大気の進化過程モデルにはこのような極域上層大気における電磁気的効果は取り入れられていないことから、惑星大気の進化過程の研究に大きな貢献をしつつある。惑星大気の電磁気的損失過程を惑星大気の進化過程のモデルに組み込む試みはまだ始まったばかりであるが、「PLANET-B」衛星の火星上層大気・電磁環境の観測に対しても、このような大気の電磁気的損失過程を研究することによって、火星大気の進化過程の理解に大きく貢献をすることが期待されている。

[発表論文数]

発表年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	合計
論文数	8	16	7	20	60	25	62	111	309

② 技術的な観点

「あけぼの」、「Geotail」衛星の開発を通じて新たに次のような技術が開発された。

1) 衛星の耐放射能設計

従来に比べて約10倍の放射能環境に耐え得る衛星の開発。

このような本格的な放射能対策は「あけぼの」衛星から始められた。

2) アンテナ伸展機構

伸展マスト、糸巻型長尺アンテナの2種類の伸展構造物が開発され、「あけぼの」衛星に最初に搭載された。この技術は「Geotail」、「PLANET-B」衛星へ継承されている。

3) 表面導電処理

観測上の要請、帯電事故防止の為に「あけぼの」衛星で始めて導入された。

「Geotail」、「PLANET-B」衛星でも同技術が継承されている。

4) EMC対策

観測上の要請等から、磁気シールド室等による干渉試験と対策が「あけぼの」衛星で着手され、「Geotail」衛星では世界トップレベルの静かな観測環境が実現された。「PLANET-B」衛星にも同じ対策が行われている。

③ 人材養成における観点

博士論文数	21
修士論文数	79
卒業論文数	55

両衛星には宇宙科学研究所を中心に多くの大学が参画した。上記の博士、修士、卒業論文の数に象徴されるように、多くの学生、大学院学生に宇宙科学への参加の機会を提供した。特に工学関係の研究室で理学的研究を行っている研究室の多いことも両衛星の特徴である。したがって、理学面のみならず、衛星関連の技術に触れる機会を与えたことは今後の我が国の宇宙開発従事者の人材養成という観点からも高く評価される。

④ 国際的な観点

太陽から太陽風を経て地球磁気圏内部に至るエネルギーと物質の流れを総合的に理解することを目的として、現在約10機の探査機が地球周辺の宇宙空間に配置され総合的観測が行われている。この計画は日米欧露によるISTP計画(国際太陽地球系科学研究計画)と呼ばれている。オーロラ関連現象を観測する「あけぼの」衛星はISTP計画に先だって打ち上げられた探査機で、地上の地磁気・オーロラ観測ネットワークとの連携観測によってISTP観測前夜の太陽地球系分野の観測に中心的役割を果たし、ISTP計画始動後も引き続きISTPの観測機と共に重要な観測を続けている。

一方、地球磁気圏尾部を観測する「Geotail」衛星はISTP計画の第1号機として打ち上げられ、世界に先駆けて数多くの重要な観測結果をもたらした。ISTP計画の諸衛星が出そろいつつある現在では、これらの衛星と連携して太陽地球系空間の総合的観測網を構成し、ISTP観測の中で引き続き中心的な位置を占めている。宇宙科学研究所の衛星は、他のISTP衛星計画が諸事情により打ち上げ計画変更等を余儀なくされた中で、予定どおり打ち上げられ多くの重要な結果を出すことによって各国にISTP計画の重要性を再認識させ、ISTP計画推進の牽引車として大きく貢献をした。ISTP計画が国際共同研究計画であること、また当時のMロケットでは「Geotail」衛星が打ち上げられなかったことにより、米国の搭載機器も衛星に採用し、打ち上げは米国の負担でデルタ2型ロケットで打ち上げるという大型の日米協力が「Geotail」衛星計画で採用され、成功したことは高く評価できる。これによってNASA方式を学ぶ貴重な経験が得られたことは特筆すべきであろう。

⑤ 総合評価と今後の課題

地球周辺科学分野の大きな目的は、地球周辺の宇宙空間(磁気圏、電離圏)の構造とそこでの物理過程を理解し、太陽から惑星間空間を経て地球周辺の宇宙空間の各領域に供給されるエネルギーと運動量の流れを理解し、太陽地球系物理学の学術体系化を図ることである。

これらの大きな目的を達成するための「あけぼの」、「Geotail」衛星の共通の目的は、

- (1) 物理現象の「現場」への科学衛星の投入と直接観測の遂行
- (2) 複数の観測項目の組み合わせによる地球周辺プラズマ空間の総合的観測
- (3) 太陽風・地球磁気圏・放射線帯・極域相互間のエネルギーや運動量輸送の研究
- (4) 計算機シミュレーションとの連携による太陽地球系空間の巨視的・微視的物理過程の理解

であった。

「あけぼの」衛星は、極域電離圏・磁気圏、「Geotail」衛星は、磁気圏尾部及び無衝突衝撃波領域などの磁気圏境界領域の対象領域を観測としていた。したがって、それぞれ衛星が目指した研究目的は上記の大目的に沿ってそれぞれ「極域プラズマ物理現象の解明」及び「磁気圏尾部・境界領域のプラズマ物理現象の解明」であった。

諸外国の科学衛星測定技術に追いつき、かなりの部分で追い越した測定器を有する「あけぼの」、「Geotail」衛星の観測は、我が国の科学衛星のデータの質を大幅に引き上げ、国際的にも高く評価されるレベルに達していると評価できる。

最初に評価できる点は諸外国のISTP衛星の打ち上げが遅れたり、打ち上げに失敗したことと比べ、関係者の多大な努力により、これらの衛星が予定通り打ち上げに成功したことである。これによって電場、磁場、粒子、波動などの複数の観測機を研究対象現場に投入し、複数の観測機による総合的観測の実施という目的(1)、(2)は達成されたと評価できる。

この結果、諸外国のISTP衛星群との同時観測を基に、地球周辺プラズマ空間の全体像の再構築が進んでいる。「Geotail」衛星は初めて磁気圏の尾部に長期間滞在し、広範囲にわたる尾部プラズマ中の電場、磁場、粒子、波動の詳細なデータを世界で初めて示し、磁化された惑星としての地球と太陽風プラズマ流との相互作用に関する総合的知見をもたらした。この分野の学術的理論体系化に大きな貢献をした。この点は高く評価できる。

「Geotail」衛星は磁気圏尾部軌道上で磁気リコネクションに関わるプラズモイドの観測、磁気圏尾部の巨視的構造、Slow Shockの観測、イオン・電子の詳細な速度分布、高時間分解能のプラズマ波動などの観測に成功し、所期の目的を達成している。また、「あけぼの」衛星も極域電離圏のオーロラ物理学の基礎となる物理諸量の観測、サブストーム時のプラズマ圏構造の時間変化の詳細像などの新しいデータの提供などを通じてオーロラ物理学の学術体系化の定量的基盤を与えた。磁気圏周辺空間の重要な物理過程と考えられている磁気リコネクションや無衝突衝撃波の観測に「Geotail」衛星は次々と世界で最初の観測事実を発見しており、サブストームのような磁気圏現象のエネルギー、運動量輸送の時間発展の理解を得るという目的(3)は、これらの磁気圏現象の最終出力として現れる極域現象の「あけぼの」衛星によるモニターとあいまって達成されつつあると評価できる。

目的(4)は物理諸量の同時観測、計算機シミュレーションとの共同歩調などにより太陽地球系空間プラズマ中の微視的過程を理解し、巨視的プラズマ過程との関連を明らかにすることである。スペースプラズマ物理学はプラズマ物理学の一部として位置づけられるが、「Geotail」衛星はプラズマ物理学上知られているBGKモードが静電孤立波という形として磁気圏プラズマ中にかなり一般的に存在することを世界で初めて発見し、計算機シミュレーションによってその特性を明らかにした。このことは、その後の「POLAR」衛星などの諸外国の衛星観測に影響を与えた。巨視的プラズマ過程としての磁気リコネクションの研究も「Geotail」衛星のデータに基づくMHDシミュレーションが我が国でも盛んに行われるようになり、国際的貢献の高い成果として評価できる。

今後の課題としては、さらに両衛星から続々と得られているデータの解析を進めると同時に、諸外国のISTP衛星とのデータ交換、研究交流を更に活性化する必要がある。軌道上の制約があるため、完全な理解に至るほどの豊富な衛星同士の同時観測は容易ではないが、今後「あけぼの」及び「Geotail」の両衛星間の共同観測を含め、ISTP衛星群の共同研究をさらに推進する必要がある。また、プラズマの運動論的効果やプラズマ不安定性、粒子加速、加熱、波動粒子相互作用などが、磁気圏構造、磁気圏境界層構造などの決定にどのように関与するかという巨視的プロセスと微視的プロセス相互関係についてはまだ研究は不十分である。今後、両衛星のデータの活用と計算機シミュレーションの更なる連携を進め、この問題を明らかにしていくことが今後の課題の一つである。

これらの努力を通じて、この両衛星で得られた技術的、科学的成果をどう将来の科学衛星計画、太陽地球系物理学に生かしていくかということは勿論、宇宙プラズマ環境中で動作する実用衛星の設計などにも活用することも重要な今後の課題であろう。

第3章 太陽物理分野の科学衛星(「ようこう」)

(1) 概要

① 科学衛星の目的

[科学衛星の位置づけ]

「ようこう」衛星は、「ひのと」(打ち上げ1981年2月)に続く、日本で2機目のX線太陽観測衛星であり、太陽フレアの物理過程及び太陽コロナの諸現象の解明を目的として、1991年8月30日にM-3SII-6号機により地球周回略円軌道に打ち上げられた。「ようこう」衛星は打ち上げから6年以上を経過した現在も順調に稼働中であり、11年周期で変動する太陽活動の変遷を明らかにしつつある。

[搭載観測装置と科学目的]

「ようこう」衛星にはミッション機器として

- 1) 硬X線望遠鏡 (HXT): フレアを硬X線で精密撮像観測する
- 2) 軟X線望遠鏡 (SXT): フレア及びコロナを軟X線で精密撮像観測する
- 3) 広帯域X線・ガンマ線分光器 (WBS): フレアが引き起こす熱的・非熱的放射を精密に分光観測する
- 4) X線ブラッグ分光器 (BCS): フレアに伴い生成される超高温プラズマを精密分光観測する

の4つの観測装置が搭載されており、それらを相補的に組み合わせることによって

- 1) 天体プラズマの実験室ともいえるべき太陽コロナで繰り広げられる磁気流体力学現象、とりわけ太陽フレアに代表される粒子加速及び超高温プラズマの生成を伴う突発的な磁気エネルギーの解放現象を解明する
- 2) 太陽活動周期(11年)にわたる太陽コロナのグローバルな形状の変遷とその原因である太陽磁場の再生産過程を解明する
- 3) 地球の上層大気、磁器圏への影響が大きい惑星間空間擾乱現象の発生機構を明らかにする

という3つの課題を達成することが本衛星の目的である。

[科学衛星の特徴]

「ようこう」衛星の硬X線望遠鏡と軟X線望遠鏡はいずれも、空間・時間分解能、カバーするエネルギー域などで、従来の同種撮像装置と比べ、画期的な性能を有している。補助装置として位置づけられた2つの分光器とともに、一つの観測対象をあい補いあって観測するように設計・製作されたものであり、太陽フレアを多面的かつ定量的に解析・研究することを可能とした。その結果、大きな科学成果を生み出している。

「ようこう」衛星では、軟X線望遠鏡が日・米の、またX線ブラッグ分光器が日・米・英の国際協力で作製された。国際協力は、製作時には共同設計・分担製作を大原則とし、また衛星運用にあたっては、日・米・英の各々の長所を生かした形での任務分担を取り入れつつ共同でこれを遂行することに努めている。観測データの解析面でも国際協力が進んでいる。取得後一定期間(現在は1年)を経過したデータは完全に公開され、チーム外の科学者にも「ようこう」衛星のデータは活用されており、その活用範囲は日・米・英の枠をはるかに越えたものになっている。

太陽活動の解明においては、様々な観測波長での同時観測が決定的に重要である。

「ようこう」衛星は上記のような画期的なX線観測を実現しつつ、国内外の地上及びスペースからの観測との連携を重視し、世界的な観測ネットワーク構築に大きな役割を果たした。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

[搭載観測装置とその製作]

「ようこう」衛星の4つの観測装置は、いずれも関連研究者の英知を結集して、最新鋭の観測装置として開発・製作されたものである。SXT(軟X線望遠鏡)とBCS(X線ブラッグ分光器)は、それぞれ、日・米、日・米・英の国際協力により共同製作された。観測装置の開発・製作を担当した機関は以下のとおり。

- 1) 硬X線望遠鏡 (HXT)
宇宙科学研究所、国立天文台、東京大学
- 2) 軟X線望遠鏡 (SXT)
東京大学、国立天文台、宇宙科学研究所
(米) ロッキードパロアルト研究所、NASAマーシャル宇宙飛行センター
- 3) 広帯域X線・ガンマ線分光器
宇宙科学研究所、立教大学、国立天文台
- 4) X線ブラッグ分光器 (BCS)
国立天文台、宇宙科学研究所、東京大学
(英) ロンドン大学マラード宇宙科学研究所、ラザフォードアップルトン研究所
(米) 米国標準局、ハルバート宇宙研究センター

[衛星運用の概略及び運用チーム]

「ようこう」衛星の運用は、宇宙科学研究所相模原衛星運用センターでの運用計画立案・コマンドプラン作成に2名(相模原当番)、同鹿児島宇宙空間観測所でのコマンド送信・観測データ取得に2名(鹿児島当番)、さらに特に複雑な運用が必要な軟X線望遠鏡の観測制御のために相模原に1名の軟X線望遠鏡観測責任者を置いて、1～2週間を単位として輪番制で運用・観測を維持している。

なお、「ようこう」衛星のデータの受信には鹿児島局の外、米国航空宇宙局(NASA)の深宇宙ネットワーク局が国際協力に参加している。

[表:「ようこう」衛星の運用、国際協力]

日 本		米 国		
SSOC	KSC	DSN	LPARL	GSFC

運用計画立案

コマンド計画立案

コマンド送信

観測データ受信 観測データ受信

データ一次処理

観測データ配付

公開データ編集 公開データ蓄積
公開データ配付

SSOC: 宇宙科学研究所相模原衛星運用センター

SSOC当番2名(日:米+英=2:1)と軟X線望遠鏡観測責任者1名(米)

KSC: 宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所

KSC当番2名(日)

DSN: NASA Deep Space Network 受信局
 LPARL: ロッキードパロアルト研究所
 GSFC: NASA Goddard Space Flight Center

初期段階における運用チームは、装置開発を担当した国立天文台、東京大学、立教大学及び比較的まとまった数の太陽研究者集団を抱える京都大学、名古屋大学の研究者によって主として構成されていた。現在(表参照)では散在する太陽研究者をも含めて、国内にいるほとんど全ての太陽研究者が「ようこう」衛星運用チームに参加しており、大学院学生等を含め、総数は100名近くになっている。なお、この数は国内分のみを数えたもので、この外に米・英のメンバー約20名が運用に携わっており、常時数名が宇宙科学研究所に滞在している。

〔表:「ようこう」衛星運用チーム(国内分)〕

機関名	スタッフ	PD	院生	機関名	スタッフ	PD	院生
宇宙科学研究所	2	1	1	千葉大学	2		2
国立天文台	32	6	4	富山大学	2	1	2
東京大学	2		6	明星大学	2		3
立教大学	2		1	東海大学			1
京都大学	2		5	大阪学院大学	1		
茨城大学	2		1	通信総合研究所	3	1	
名古屋大学	1		1	その他	3		

合計 スタッフ 56名 PD 9名 大学院学生 2 〔総計 92名〕

*1 この外に、米、英のメンバー約20名。うち、常時数名が宇宙科学研究所に滞在。

(2) 評価

① 学術的な観点

「ようこう」衛星は、太陽物理学とその近隣分野において、事前の予測を越えた大きな影響を及ぼしつつある。この影響は、太陽物理学と近接分野との融合の促進、観測研究と理論研究の間の協力体制の構築、日本からの情報発信による国際的共同研究の組織化などの国際協力の深化、新しいデータ解析・研究スタイルの登場など、様々な面が見つけられる。さらに、太陽が身近な天体であることともあいまって、「ようこう」衛星のとらえた激しく活動する太陽コロナの姿は「科学広報活動」においても、重要な役割を果たしている。

「ようこう」衛星は、(1) 高エネルギー域 (> 30 keV) での高空間・時間分解能撮像観測を世界で初めて実現した硬X線望遠鏡と、(2) CCDによる連続的な撮像観測をやはり世界で初めて実現した軟X線望遠鏡とを軸とし、これに2つの分光器を有機的に結びつけて、以下のような科学成果を産みだした。

〔太陽フレアの物理過程〕

- ・軟X線で明るく輝くフレアループの上空に硬X線源が存在することを発見し、これがフレアのエネルギー解放・粒子加速箇所に対応すること、エネルギー解放が磁気再結合によることを明らかにした。
- ・フレア時に現れる二つの強い硬X線源は軟X線フレアループの両端(磁気ループが光球面を貫く両極)に位置し、互いに精密に同期した変動を示すことを明らかにし、また硬X線放射が上述の粒子加速箇所から磁力線に沿って流れ込む電子ビームの制動放射であることを明らかにした。
- ・とくに長寿命の太陽フレアでは、巨大なカスプ(尖塔状の形状)を上部にかかえたループ構造を鮮明にとらえ、そこでの温度構造・密度構造などを観測的に求めて磁気再結合過程における定量的研究を可能とした。これはプラズマ物理学に磁気再結合理論の検証の場を提供するものである。
- ・フレアに伴う「プラズモイド」噴出現象を見だし、太陽フレアがダイナミックな磁気再結合クッション現象であることを示した。

〔その他のコロナの活動現象〕

- ・X線ジェット、マイクロフレアなど、磁気再結合の様々な形態を見いだした。
- ・また、太陽コロナの磁気ループ構造が常時ダイナミックに膨張、変形を繰り返していること、太陽コロナのかなりの部分を巻き込んだ大規模な磁気構造の再編成が磁気再結合により引き起こされることを見つけた。
- ・この大規模なコロナ構造の再編成が太陽・地球間空間を伝播し、地球環境に甚大な影響を与える惑星間空間擾乱となることを明らかにした。

「ようこう」衛星5周年の時点でまとめた文献リストによれば、上記「ようこう」衛星の成果は、査読者付き学術雑誌に掲載された論文300余編、シンポジウム集録に掲載された論文400余編に結実している。論文数は衛星打ち上げ以来、年をおって増加の傾向を示しており、この傾向は今も続いている。なお、学術雑誌掲載論文のうち、日本の研究機関所属研究者の発表が約25%、研究機関所属の研究者の発表が約40%で、残りの35%は内外研究者の共同研究による成果として発表されている。このことから、国際共同研究が大いに展開されたことが読み取れる。また、データ公開の結果として、日・米・英の「ようこう」衛星参加国以外の研究者による成果発表も激増している。

「ようこう」衛星は、今や太陽物理学の研究分野を越えて、太陽・地球間空間物理学、地球磁気圏物理学、天体プラズマ物理学、実験室プラズマ物理学など、広い分野の研究者の注目を集めている。さらに、太陽物理学とこれら近接分野との共同研究の促進剤となっており、その結果研究会レベルでの交流が発展しつつある。

太陽物理学分野でも、これまで鮮明にはとらえられることのなかったコロナの磁気構造のダイナミクスが観測にかかるようになったことに起因して、理論的研究と観測的研究の活発化が見られる。

「ようこう」衛星科学チームでは、これまで毎年国際会議を組織・開催して、成果の検証・確認、研究テーマの掘り起こし、近接分野との交流を図ってきた。これらの国際会議を通して、「ようこう」衛星のデータは多くの研究者に活用されている。

「ようこう」衛星を中心とした国際研究集会

1. SOLAR-A Science Meeting: 1990 Oct. 23 – 26, Tokyo, Japan
参加概数 100名(うち国内より 55名)
"Flare Physics in Solar Activity Maximum 22", edited by Y. Uchida, R. C. Canfield, T. Watanabe, and E. Hiei, Lecture Note in Physics 387, (Springer Verlag, 1991)
2. Symposium on Yokoh Scientific Results: 1993 Feb. 23 – 25, Sagamihara, Japan
参加概数 110名(うち国内より 60名)
"X-ray Solar Physics from Yokoh", edited by Y. Uchida, T. Watanabe, K. Shibata, and H. S. Hudson, (Universal Academy Press, Tokyo, 1994)
3. 太陽物理学甲府シンポジウム: 1993 Sep. 6 – 10, Kofu, Japan
参加概数 130名(うち国内より 75名)
"Proc. Kofu Symposium on New Look at the Sun ...", edited by S. Enome and T. Hirayama, (NRO Report No.360, Nobeyama Radio Observatory, 1994)
4. COSPAR Sumposium on Solar Flare, Coronal and Heliospheric Dynamics: 1994 July, Hunburg, Germany
参加概数 100名(うち日本より 10名)
5. IAU Colloquium No.153: 1995 May 22 – 26, Makuhari, Japan
参加概数 210名(うち国内より 100名)
"Magnetodynamic Phenomena in the Solar Atmosphere", edited by Y. Uchida, T. Kosugi, and H. S. Hudson, (Kluwer, 1996)
6. Yokoh Conference on Magnetic Reconnection: 1996 March 20 – 22, Bath, UK
参加概数 100名(うち日本より 15名)
"Observations of Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere", edited by B. Bentley and J. Mariska, (Kluwer, 1996)
7. Yokoh Fifth Anniversary Symposium on Plasma Astrophysics: 1996 Nov. 6 – 8, Tokyo, Japan
参加概数 120名(うち国内より 80名)
"Plasma Astrophysics: Yokoh and Beyond", edited by T. Watanabe, T. Kosugi, and A. C. Sterling, (Kluwer, 1997)

② 技術的な観点

[衛星の共通系]

「ようこう」衛星の高分解能撮像観測は、衛星の高精度姿勢制御技術なくしては不可能であった。また「ようこう」衛星は、コンピュータによる本格的な望遠鏡制御を取り入れた日本で初めての衛星であった。これらはいずれも「ようこう」衛星以後の科学衛星にも活用された技術であり、その突破口を切り開いたという点で「ようこう」衛星の果たした役割は大きい。

[観測装置]

「ようこう」衛星の硬X線望遠鏡は斬新なアイデアに基づく多素子「すだれ」コリメータによるフーリエ合成型撮像装置であり、フォトエッチングでの精密グリッド加工と高安定なX線シンチレータ製作とによって実現したものである。100 keV 近くのエネルギー域のX線では他に撮像手段がなく、撮像観測をこのエネルギー域にまで拡張した技術は高く評価される。

また、軟X線望遠鏡では焦点面検出器に衛星搭載のものとしては初めてX線CCDを使用し、その実用性を証明したことも大きな成果として数えられるものである。

[新しい研究手段の開拓・整備]

激しく変動する太陽コロナを研究対象とする当該分野においては、最新の画像処理技術の開発と導入が研究成果を生み出す上で極めて重要な役割を果たした。

[データ・アーカイブの整備]

受診されたデータは、解析に便利な「リフォーマット・データ」に編集され、速やかに日・米・英の「ようこう」衛星チームに配付されるとともに、NASAのデータセンターに送られ、1年が経過した時点で公開されている。

③ 人材養成における観点

「ようこう」衛星に関わる研究によって博士の学位を取得した者は、1997年10月現在で23名(うち国外9名)に達している。

また、国内での修士号の取得者は、1997年3月までに39名である。

なお、「ようこう」衛星の成果を盛り込んだ大学院学生向けの教科書が出版されたほか、初等・中等教育レベルの教科書・参考書に「ようこう」の画像が取り入れられている。また、「ようこう」衛星の成果の多くが科学館・博物館などで、展示用のビデオや画像として活用されている。

④ 国際的な観点

「ようこう」衛星は、1990年の太陽活動極大期に打ち上げられた世界で唯一の太陽フレア観測衛星である。「ようこう」衛星のプロジェクトには、1980年に「太陽極大期ミッション」で活躍した米・英のグループが参加している。

90年代に打ち上げられた太陽物理学分野の諸外国の衛星の概要は次の通りである。

・CORONAS衛星(ロシア;93年打ち上げ)

太陽コロナの軟X線撮像観測と硬X線～ガンマ線分光観測が目的。ガンマ線分光を除き、見るべき成果の発表がなされていない。

・SOHO衛星(米欧共同;95年打ち上げ)

太陽内部構造の研究と太陽大気の基本構造の解明を目的とする大型衛星であり、多数の観測装置を搭載している。衛星の規模は「ようこう」衛星より一桁大きい。太陽活動静穏期に打ち上げられた衛星であり、フレアのエネルギー解放領域を詳細に観測する機能を有していない。他方、コロナの低温部分の観測に秀でている。また、惑星間空間プラズマ擾乱との関係で注目されるコロナ質量放出現象を観測する白色光コロナグラフを備えている。このため、太陽大気中の活動現象の研究において、「ようこう」衛星と相補的な役割を果たすことが期待され、様々な共同研究が始まったところである。

・コンプトン・ガンマ線天文台「CGRO」衛星、その他

「CGRO」衛星は遠方の天体からの高エネルギー放射の観測を目的としているが、太陽フレア起源の放射の超高感度検出にも活躍している。「ようこう」衛星の硬X線望遠鏡からの画像データと併せて解析することで、太陽フレア粒子加速域に関して決定的な情報を得ることに成功している。また、「ULYSSES」、「WIND」などのISTP(太陽地球系)衛星は太陽系空間プラズマ擾乱についての情報を得るために「ようこう」衛星を必要としており、「SOHO」衛星や「ようこう」衛星と密接な関係にある衛星である。

⑤ 総合評価と今後の課題

「ようこう」衛星は、内外の関連研究者の英知を結集して最新鋭の観測装置の共同開発を行ったもので、1990年の太陽観測極大期に打ち上げられた世界で唯一の太陽フレア観

測衛星として、1)太陽コロナで繰り広げられる磁気流体力学現象の解明、2) 太陽コロナのグローバルな形状の変遷、3) 惑星間空間プラズマ擾乱現象の発生機構の解明、というその科学目的をほぼ達成しつつある。

すなわち、

- 1) 太陽フレアがダイナミックな磁気再結合過程であることを確立し、X線ジェットやマイクロフレアなどの形態を示す様々な磁気再結合の形態を明らかにして、太陽コロナで繰り広げられる磁気流体力学現象の全貌をとらえたこと
- 2) 地磁気環境に甚大な影響を与える惑星間空間プラズマ擾乱の発生源ともいべき「太陽コロナの大規模構造の再編成現象」をとらえ、地磁気擾乱の「予報」に成功したこと
- 3) さらに、打ち上げ直後の活動極大期の太陽から活動極小期の太陽まで、太陽コロナのグローバルな形状の変化を初めて連続的に観測することに成功し、太陽磁場の再生産過程の解明に対して貴重なデータを得ていること

などは、特筆すべき成果であり、太陽・地球間空間物理学、地球磁気圏物理学、天体プラズマ物理学、実験室プラズマ物理学などの近接分野と太陽物理学との共同研究を促進することにつながった。

また、「ようこう」衛星は、太陽物理学分野における国際的共同研究の中核に位置するプロジェクトになっている。地上からの光学観測、電波観測に基づく太陽の観測的研究を進めるに当たっては、公開された「ようこう」衛星のデータを参照することは必須のこととなっている。

従って、「ようこう」衛星は、観測装置の製作において共同設計と分担製作を有効に組み合わせ、衛星の運用、科学研究においては、一つのチームに溶け合って、最大限の科学成果を追求している点は高く評価できる。

「ようこう」衛星のプロジェクトは、宇宙科学研究所に太陽物理学分野の講座が存在しない状態で進められた。宇宙科学研究所のX線天文学の研究グループの一部と大学共同利用機関である国立天文台の太陽物理学研究者グループ、国内諸大学の太陽物理学分野の研究者が主体的に参加してプロジェクトを推進してきた。異なった組織の研究者のチームワークの成功した例として評価できる。しかし、宇宙科学研究所内に核となるグループが存在しなかったことに起因する困難も多かった。この点の改善も望まれる。

データの活用においては、これまで日本の弱点として指摘されてきたデータ解析システムの構築、データ・アーカイブなどを、米・英の力を借りることで顕著な前進をとげた。しかしながらこの成果は、日本側の力を伸ばす出発点となったことで評価できるものの、その大部分が国際協力の相手方の寄与によるものである。この方面で経験を積み力をつけた若手研究者が生まれてきつつあることは事実であるが、このことが直ちに今後を保障するものではないことに留意する必要がある。

第4章 X線天文分野の科学衛星(「あすか」)

(1) 概要

① 科学衛星の目的

[科学衛星の位置づけ]

「あすか」衛星は、「はくちょう」衛星(打ち上げ1979年2月)、「てんま」衛星(同1983年2月)、「ぎんが」衛星(同1987年2月)に続く、日本で4機目のX線天文学衛星であり、日本の科学衛星の中心的な系譜の一つに位置づけられる。「あすか」衛星は打ち上げから5年近くを

経て、ミッションの成熟期を迎えた現在も、順調に稼働中である。

[科学目的]

「あすか」衛星の特徴は、従来にない優れたエネルギー分解能で宇宙X線の分光観測ができること、そして世界で初めて 2 keV を上回る高いエネルギーのX線を撮像できることである。この2つの特徴を生かして、以下のような科学目的が掲げられている。

- 1) 宇宙の化学進化の解明: 酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素、イオウ、鉄などの元素は、ビッグバン宇宙の初期には存在せず、その後恒星内部の核融合で合成されたと考えられてきた。これらの元素はX線領域で特性輝線を放射するため、そこでこれら輝線を従来にないエネルギー分解能と感度で検出し、これらの重元素が宇宙の進化の過程で、いつどこで合成されたかを解明する。
- 2) ブラックホールの検証: ブラックホールの概念は、一般相対論の正当性を確かめる重要な鍵であり、また人類の自然認識にとっても多大な意義をもっている。「あすか」衛星の検出器は高いエネルギーにまで優れたX線検出感度を誇っており、ブラックホールの研究に最適である。そこで、ブラックホールが実在することを説得力のある形で実証する。
- 3) 宇宙における粒子加速現場の特定: ある集団のうち一部の粒子が極めて高いエネルギーにまで加速される粒子加速現象が、宇宙の様々な場所で起きていると考えられる。それにもかかわらず、加速の場所や仕組み、原理については、未知の部分が多い。「あすか」衛星の持つ撮像能力を生かして、粒子加速の現場を特定する。
- 4) 暗黒物質の分布と総量の推定: 宇宙には、電磁波を放射する「観測にかかる」物質のほか、その10倍にも及ぶ「暗黒物質」が存在することが1930年代から示唆されてきた。その正体の解明は、現代科学の第一級のテーマである。暗黒物質が多量にある場所は、高温のガスが集まってX線を放射する傾向が強い。そこで銀河や銀河団からのX線を観測することにより、暗黒物質がどのような環境にどれだけ存在するか、従来にない精度で推定する。
- 5) X線天体の進化と深宇宙の探査: 宇宙観測の進歩にもかかわらず、最初の銀河や星がいつどのように形成されたか、ほとんど検証できていない。そこで「あすか」衛星の優れた検出感度を利用して、銀河団や活動銀河核を距離の関数として観測し、それらの天体の進化の様子を探る。
- 6) 宇宙X線背景放射の正体の解明: 天空全体からほぼ一様な強度のX線が到来している。このX線は、宇宙X線背景放射と呼ばれるが、その正体は長らく謎だった。1980年代以降、「宇宙初期に生まれた遠方の活動銀河から放出されるX線の重ね合わせである」という説が有力視されている。「あすか」衛星はこの説の当否に挑む。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

[搭載観測装置とその製作機関]

「あすか」衛星には以下の3種類の観測機器が搭載されている。X線反射望遠鏡は宇宙X線の集光と結像を行う光学系で、4台の望遠鏡のうち2台がX線CCDカメラに、また残る2台が撮像型蛍光比例計数管に組み合わされる。X線CCDカメラと撮像型蛍光比例計数管はともにX線の分光と撮像を行う撮像型検出器であり、相補的な性能を持つ。これらは同じ天体を同時に観測するので、ユーザーは通常、X線CCDカメラと撮像型蛍光比例計数管のデータを合わせて利用する。

- 1) X線反射望遠鏡 (XRT= X-ray Telescope): NASAゴダード宇宙飛行センター・名古屋大学・宇宙科学研究所の協力で製作された。

- 2) X線CCDカメラ(SIS= Solid-State Imaging Spectrometer): マサチューセッツ工科大学・大阪大学・宇宙科学研究所・ペンシルバニア州立大学の国際協力事業である。
- 3) 撮像型蛍光比例計数管 (GIS= Gas Imaging Spectrometer): 東京大学と宇宙科学研究所担当。

[衛星運用における日米協力]

「あすか」衛星の運用に際しては、日・米研究者が以下のように分担協力している。

- 1) 衛星への遠隔指令は日本側が担当し、宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所から行われる。
- 2) 衛星データの受信は、鹿児島宇宙空間観測所と米国NASA の深宇宙ネットワーク(DSC) 局であるキャンベラ、ゴールドストーン、マドリッド、ワロップスで行われる。
- 3) 観測提案の公募は日・米が協力して行い、共同で観測計画を立てる。
- 4) 取得データの一次処理、観測提案者への配布、公開データの管理などは、NASA が中心になって担当し、日本側が協力する。

[「あすか」衛星運用チーム(1997年6月現在)]

「あすか」衛星の運用には、宇宙科学研究所所属の研究者が中心となってあたるが、以下のような広範な研究機関の研究者も随時参加している。

機関名	スタッフ	院生+PD	機関名	スタッフ	院生+PD
宇宙科学研究所	12	23*	東京都立大学	3	7
東京大学	4	16	神戸大学	1	2
名古屋大学	3	15	宮崎大学	2	
大阪大学	4	13	岩手大学	1	
京都大学	3	10	神奈川大学	1	
理化学研究所	4	7**	宮崎県立看護大学	1	
計	スタッフ 39 名、院生+PD 93名		総計	132 名	
	(* 東京大学、学習院大学			** 埼玉大学)	

[観測の経過と現状]

「あすか」衛星は、打ち上げ直後の衛星機器立ち上げ期(約1ヶ月)を経て、1993年4月から同年10月までは試験観測期間として運用され、プロジェクトに直接関わった日・米の科学者の合意に基づいて観測が実行された。1993年10月以降は公募観測の体勢に移行しており、宇宙科学研究所、米国NASA、ヨーロッパESAの3つの窓口のいずれかを通じて観測提案の公募と採択が行われる。現在は、第6期めの公募観測期間が始まった時点にある。

「あすか」衛星では、実質的に観測可能な時間からメンテナンス所要時間5%を除いたものを100%として定義しなおした上で、3つの窓口に対して公募観測時間を以下のように割り当てている。これは宇宙科学研究所、NASA、ESA の関連分野の研究者の合意に基づくものである。

日本	米国	日米共同	日欧共同
50%	15%	25%	10%

「あすか」衛星のデータは試験観測も公募観測も含めて、取得の後一定期間(1～1.5年)は観測提案者に占有され、その後はすべて公開データベースに組み込まれ

る。公開データは宇宙科学研究所の協力のもと、米国NASAゴダード宇宙飛行センターで管理されており、世界のすべての科学者は同センターにアクセスすることによって、これらのデータを無償で自由に研究に用いることができる。

1993年4月より、平均ほぼ1日1個の割合で延べ約1400個の天体(重複を含む)が「あすか」衛星により観測されてきた。対象は以下のように分類できる。

装置校正観測	34	星	183	激変星	49
X線連星	131	超新星残骸	196	銀河	121
活動銀河	329	銀河団	300	X線背景放射ほか	60

(2) 評価

① 学術的な観点

[主な学術的成果]

- 1) 宇宙の化学進化の解明: (i)「あすか」衛星は予想どおり、超新星の残骸、個々の銀河、銀河団など、宇宙の様々な階層の天体から重元素のイオンの出すX線の輝線を検出することに成功した。(ii) 超新星残骸の観測では、鉄が多いⅠ型超新星の残骸と、酸素やケイ素が多いⅡ型超新星の残骸とをはっきり識別することに成功し、超新星の理論を精度よく検証しつつある。(iii) 銀河や銀河団の観測では、恒星内部の核融合で作られた重元素が超新星爆発などでまず星間空間にばらまかれ、さらには広大な銀河間空間にも放出されてゆく様子が明らかにされつつある。特に大規模な銀河団ではⅡ型超新星の生成物が多く、小規模な銀河団ではⅠ型、Ⅱ型超新星の生成物が、ほぼ同じ割合で残っていることが明らかになってきた。
- 2) ブラックホールの検証: (i)「あすか」衛星は、最も有力なブラックホール候補として有名なはくちょう座 X-1 を観測し、そこに含まれるコンパクト天体の質量が、太陽質量の 14 ± 2 倍であることを実証した。(ii) 多くの活動銀河のスペクトル中に特異な輝線構造を発見し、それが巨大ブラックホールのごく近くで回転する物質から出ている可能性が高いことを示した。これらの画期的な成果により、ブラックホールの存在をほぼ疑う余地なく確認できた。(iii)「あすか」衛星は我々の銀河系の中心を包んで広がるX線放射のスペクトル中に、温度の低い物質が強いX線に照射されたときに出す鉄の特性X線を発見した。これは銀河系中心核が今から数百年前には強いX線源だった可能性を示しており、そこに巨大なブラックホールが存在することを示唆する。
- 3) 宇宙における粒子加速現場の特定: (i)「あすか」衛星は西暦1006年に出現した超新星の残骸で、粒子が超高エネルギーにまで加速されている証拠を発見した。これは宇宙線の加速の現場として最も有力な候補となっている。(ii) プレーザーと呼ばれる一群の活動銀河では、巨大な宇宙ジェットの原因で同様な粒子加速が起きていることが確認され、そこでの磁場が0.1~1 ガウスと求められた。(iii) 数個の電波銀河では、ジェットの先端にできる電波ローブから、宇宙マイクロ波背景放射が高速電子に逆コンプトン散乱されて生じるX線を世界で初めて検出し、磁場強度を決定できた。(iv) いくつかの単独のパルサーから、粒子加速に伴うX線が検出された。(v) さらに、濃いガスに取り囲まれているため今まで観測できなかったごく初期の原始星から、X線が検出された。これは星の誕生の際も、粒子の加速や加熱といった激しい現象が起きていることを示す。
- 4) 暗黒物質の分布と総量の推定: (i)「あすか」衛星は銀河団を包む高温プラズマの分布を詳しく観測し、プラズマを拘束するのに必要な重力質量を算出した結果、重力質量は「観測にかかる」物質の5~10倍もあることを確認しつつある。これを宇宙初期の元素生成の議論からくる「観測にかかる」物質の推定値と組み合わせると、宇宙の平均物質量は

宇宙の臨界密度の数分の一しかないことが示唆される。(ii) 暗黒物質の分布にも、銀河団スケールとより小さな銀河スケールのものがあり、階層構造を世界で初めて明らかにした。これは宇宙における構造形成を理解する大切な手がかりとなる。(iii) ある種の銀河団における暗黒物質の分布を測定した結果は、「冷たい暗黒物質」の仮説に基づく数値計算の結果と一致するように見える。

- 5) X線天体の進化と深宇宙の探査: (i) 銀河団を包む高温プラズマが宇宙マイクロ波放射を散乱するという効果を利用し、X線観測と電波観測を組み合わせ、遠方の銀河団の実距離を決める作業が進んでいる。これは、宇宙論的な距離にある天体を使ってハッブル定数(宇宙の大きさの基本量)を決める限られた方法の一つであり、その意義は大きい。(ii) 正体不明の重力レンズ源を観測したところ、光では天体がほとんど見えないのに、X線で明るいという特異な銀河団が発見された。これは宇宙初期にすでに銀河団が存在していたことを示す驚くべき成果である。(iii) 近傍の多くの銀河の中心に、微弱ながら硬いスペクトルをもつX線源が次々に発見されている。これらは銀河の中心にある巨大ブラックホールに、わずかながらガスが降着している現場と解釈でき、過去の活動銀河核が進化して通常銀河に姿を変えたという説が極めて現実的になってきた。
- 6) 宇宙X線背景放射の正体説明: 「あすか」衛星は広い天空領域の無バイアスのサーベイを行い、宇宙X線背景放射とよく似たスペクトルをもつ多数の微弱な天体を検出した。これは、X線背景放射が極めて遠方の天体の発するX線の重ね合せであるという見方に肯定的な答えを与えたことになる。

[学術的な波及効果]

「あすか」衛星は当初の目標を越えて、関連する自然科学の研究分野に多くの波及効果をもたらしつつある。こうした影響に対する評価が確定するまでには、多少の時間を要すると思われるが、現時点で以下のような例を指摘することができる。

- 1) 原子分子物理学: 「あすか」衛星が測定した超新星残骸、銀河団、楕円銀河などのXスペクトル中には、電離した鉄イオンの出す極めて強い L-輝線群が見られるが、その等価幅やエネルギーは、理論予測と相当のずれを示すことが発見された。これは原子分子の衝突過程に基づく計算にまだ不備があることを意味しており、原子分子物理学に新しい話題を提供している。
- 2) 磁気流体力学: 「あすか」衛星の結果を通じ、宇宙の多くの場所で、高温プラズマと宇宙磁場の相互作用が隠れた重要な役割を果たしていることが推測されるようになった。これは「あけぼの」、「Geotail」、「ようこう」の各衛星の観測結果との大切な接点となるとともに、プラズマ物理学や流体物理学にインパクトを与えつつある。
- 3) 宇宙線の加速: 宇宙線の起源や加速機構は、宇宙線物理学の根本問題でありながら、長年にわたり謎であった。しかるに「あすか」衛星の観測により、超新星残骸、ブレーザー、電波銀河のローブなどが宇宙線の加速の現場の有力な候補として浮かび上がってきた。これは宇宙線物理学に一挙に新しい展開をもたらす可能性を秘めている。

[発表論文数]

「あすか」衛星の成果は、天文学・宇宙物理学の分野を代表する審査付きの欧文学術誌として、日本天文学会の Publications of Astronomical Society of Japan (PASJ)、アメリカの Astrophysical Journal (ApJ)、イギリスの Monthly Notices of Royal Astronomical Society (MNRAS) などに発表されている。特筆に値すべきことは、PASJ 誌で1994年の No.3とNo.4、同じく1996年の No.2 と No.4、また ApJ レター誌で1994年の Vol.436(1994) No.1 において、「あすか」衛星の特集号が組まれたことである。これは「あすか」衛星の成果が世界的に大きな注目を集めていることの客観的な証拠であると言える。

「あすか」衛星の成果に基づいて発表された学術論文(会議収録は含めない)の数は、1997年秋の時点で300篇に達しており、「ぎんが」衛星のほぼ2倍の伸び率となっている。300篇の論文の内訳は、日本人が筆頭著者の論文、外国人が筆頭著者で日本人を共著者として含む論文、外国人のみの論文が、ちょうど 1/3ずつとなっている。比較として④で紹介するドイツのX線天文衛星「ROSAT」は、1990年の打ち上げ以来 1000篇に達する論文を生み出したと言われるが、「あすか」衛星の年間あたりの論文数はまだまだ増加の傾向にあるので、「ROSAT」衛星の論文数に迫ることも夢ではないだろう。

論文の発表に関して、問題点を一つ指摘しておきたい。それは日本の若手研究者がせっかく博士学位論文などで世界一線級の優れた研究業績を挙げながら、学術誌への論文投稿が遅れたため、公開データを利用した諸外国の研究者に先を越されてしまうという事態が少なからず発生していることである。これは、若手研究者が衛星の運用であまりにも忙殺されていること、英語で書くというバリエーションがあること、日本では論文の先陣争いをするという土壌が乏しいことなどの複合効果と見られる。日本の基礎研究が真に国際的になる上でこの問題は避けて通れないであろう。

[「あすか」衛星の観測結果を中心とした国際研究集会]

- 1) 1994年3月8-11日(東京都立大学) "New Horizon of X-Ray Astronomy - First Results from ASCA": 「あすか」衛星の初期成果発表を目的とした国際研究集会で、87篇の論文が収録された (eds. F. Makino & T. Ohashi; Universal Academy Press, 1994)。
- 2) 1995年5月29日-6月2日 (名古屋大学) "UV and X-ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas": 収録 (eds. K. Yamashita & T. Watanabe; Universal Academy Press, 1995) は「あすか」衛星の成果に基づく 44篇の論文を含む。
- 3) 1996年3月11-14日 (早稲田大学) "X-ray Imaging and Spectroscopy of Cosmic Hot Plasmas": 「あすか」衛星3周年を記念した国際研究集会で、137篇の論文が収録されている (eds. F. Makino & K. Mitsuda; Universal Academy Press, 1997)。
- 4) 1997年4月2-4日 (Dupont Plaza Hotel, Washington DC) "ASCA Cherry Blossom Workshop": 「あすか」衛星の成果を中心とした国際研究集会で、日本からも30名を越す参加者があり、51篇の口頭発表と70篇のポスター発表が行われた。収録なし。
- 5) 1997年8月26-30日 (京都国際会館) IAU Sympo.188: "Hot Universe": IAU (国際天文連合) 総会の一環として行われたもので、「あすか」衛星および諸外国のX線及びγ線観測衛星の数多くの成果が発表された。

② 技術的な観点

[衛星の共通系]

衛星の共通系の技術から見ると、「あすか」衛星は「ぎんが」、「ようこう」両衛星の蓄積に負うところが大きい。技術的にいくつかの大きな進展も見られる。例えば姿勢制御に関しては「あすか」衛星は、朝顔型に配置された4つの反動ホイール、3台のジャイロ、3台の磁気トルカ、2台の星姿勢系、そしてCPUを用いた姿勢制御系を組み合わせることで、「ようこう」衛星のもつ姿勢安定性に加えて、高速で大角度の姿勢制御を行う能力を実現しており、国際的に見て遜色のない三軸安定機能を達成できたと判断される。さらに「あすか」衛星は衛星全体が2重の円筒構造をしており、X線望遠鏡を保持する内筒部分は打ち上げの後軌道上で進展され、必要な焦点距離を確保するように設計され、これは技術的に大きなチャレンジであり、衛星の構造物進展技術を大きく高めたといえる。巨大な打ち上げロケットと桁違いのプロジェクト予算をもつ欧米諸国では、まず生まれることのない日本独自の発想であろう。

こうした「あすか」衛星の技術的成果は、「はるか」衛星、「ASTRO-E」、「ASTRO-F」、

「SOLAR-B」など、後続の天文観測衛星にとって大きなステップとなったと評価される。

[観測装置の技術的側面]

「あすか」衛星の成功の要因の一つは、日米協力により、最新鋭の宇宙X線観測装置を搭載できたことにある。これが可能だった背景には、日本では宇宙科学研究所を中心として科学者の主体的な協議により科学衛星計画を立案することができ、立案から打ち上げまでの期間が短く、しかも安定した長期展望が確保できるという独自の環境があったと判断される。

X線反射望遠鏡は、アメリカの P. Serlemitsos 博士や名古屋大学などの研究グループが開発した多重薄板配置という特殊な技術を用いて、エネルギーの高いX線まで大きな面積で集光できるように設計されたもので、「あすか」衛星の優れた性能の根幹となる装置であると同時に、今後の宇宙X線光学系技術の方向づけをする記念碑的な装置であると言っている。

「ようこう」衛星が世界で初めてX線CCDを宇宙観測に蓄積モードで用いたのに対し、「あすか」X線CCDカメラはX線CCDを宇宙観測に光子モードで利用した世界で初めての例である。液体ヘリウムなどの冷媒を用いず、放射冷却と電子冷却でCCDを -70°C まで冷却する技術を確立したことも大切な成果である。X線CCDカメラの成功によりCCDは当面、宇宙X線の標準的な検出器としての地歩を固めた。

撮像型蛍光比例計数管は、「てんま」衛星で用いられた装置をもとに改良を重ね、厚さ $10\mu\text{m}$ という極薄のベリリウム窓と、 -8 kV 級の超高電圧を用いるという技術的な困難を克服して開発されたもので、究極のガスX線検出器と呼ばれている。次第に国際協力の比重が高まる中で、諸外国の最先端装置に比肩する装置を国産で開発できたことは意義が大きい。

[軌道上での性能と動作]

打ち上げ以来、「あすか」衛星の共通計器や搭載装置はいずれも設計どおりの性能を発揮している。

軌道上で重大なトラブルは発生しておらず、順調に観測が続けられている。衛星の共通系では、5台のジャイロのうち2台がやや性能劣化を示しているが、これとても使用は可能であり、また残る3台はまったく順調なので、観測に支障はない。2次電池は当初やや過充電の心配があったが、運用方法で対処することでこの問題も回避できている。観測装置に関しては、X線CCDカメラが放射線被曝によって徐々に劣化しているが、当初の設計寿命は十分にクリアしている。撮像型蛍光比例計数管では放射線の影響で年に数回、搭載CPUの誤動作が発生しているものの、観測に大きな支障は及んでいない。

③ 人材養成における観点

「あすか」衛星クラスの大プロジェクトが順調に進行できるためには、支援職員の不足を補うため大学院学生が存在が不可欠である。すでに述べたように、「あすか」衛星のプロジェクトには定常的に全国のおよそ80名の大学院学生が参加しており、「あすか」衛星は天文学・宇宙物理学における教育や人材養成にも大きな役割を果たしている。これらの大学院学生は、自分の所属大学において、あるいは宇宙科学研究所などに委託される形（主に私立大学の場合）で、「あすか」衛星の装置製作に加わり、「あすか」衛星のデータを用いて研究を行いつつ、「あすか」衛星の運用を支援している。

これら大学院学生は修士課程では主に「あすか」に搭載された装置の地上開発実験（打ち上げ前）、軌道上での較正（打ち上げ後）、データ解析ソフトウェアの開発などをテーマにして修士論文を完成させる場合が多い。例えば東京大学理学系研究科（物理学専攻、天文学専攻）を例にとると、「あすか」撮像型蛍光比例計数管の開発実験をテーマに、6年間

に10件の修士学位が誕生している。

X線反射望遠鏡やX線CCDカメラでも、状況はほぼ同様である。

「あすか」衛星の観測結果は、すでに29件を数える博士の学位を生み出している。実際「あすか」衛星の主要な学術的成果の多くが博士論文として集大成されたものである。暦年でいうと、1994年が2件、1995年が4件、1996年が11件、1997年が12件であり、1998年も10件を越すと予想されている。29件の博士学位のうち2件は外国でのものである。

④ 国際的な観点

〔国際社会での位置づけ〕

しばしば諸外国より、「日本は他国の基礎科学研究の成果にただ乗りし、応用研究ばかり発展させている」という批判がなされる。こうした批判に対し、日本の「あすか」衛星による基礎研究が世界をリードし、しかもその貴重な観測データが全世界の基礎研究を広く潤しているという事実は、たいへん有効な反論となるであろう。

〔アメリカでの評価〕

(1)の②〔搭載観測装置とその製作機関〕で述べたように「あすか」衛星は、設計、製作、運用のいずれの段階でも、緊密な日米協力に基づいている。この協力は、決して単に日米の装置が同じ衛星に相乗りするという意味ではなく、日米研究者が相互の信頼関係に基づいて常に手のうちをすべて見せあい、プロジェクトの成果を最大にするよう互いに十分な意見の交換を行なう形で進められてきた。なかでも(1)の②〔観測過程の現状〕で述べた試験観測の進め方は、データの占有権を厳密に考えるアメリカ流のやり方とは対照的であり、「あすか」衛星に直接関係したアメリカ人科学者たちから「まったく新しい有意義な経験だった」と高く評価されている。

より広くアメリカ国内でこのプロジェクトがどのように評価されているかは、極めて重要な指標となる。アメリカでは、自国が関係する衛星プロジェクトの科学的成果は、Senior Review Committee と呼ばれる権威ある委員会により評価されており、天文学・宇宙物理学関係の衛星のプロジェクトに対しては、隔年に評価が実施される。最近では1996年に評価が実施され、欧米共同の赤外線天文衛星「ISO」に次いで、「あすか」衛星は第2位の評価を獲得した。これはアメリカ国内での「あすか」衛星の評価を端的に物語るものであり、同じ宇宙X線の分野でも、アメリカが独自に開発した「Rossi-XTE」衛星(後述)より「あすか」衛星の方が高い評価を得たことは象徴的である。

〔競合しうる諸外国の衛星〕

「あすか」衛星と並行して運用中の他国の主な高エネルギー天文学衛星を、「あすか」衛星と比較して概観すると次の通りである。

- 1) ROSAT衛星(独:1990年打ち上げ):ドイツの光学技術の粋を集めた反射鏡を搭載することで「あすか」衛星より優れた像分解能力を持ち、X線宇宙物理学に一時代を画したが、観測エネルギー帯は2 keV以下に限られ、また分光能力も低い。打ち上げ後7年の年月を経て一部の観測装置は寿命を終えている。
- 2) Compton-GRO衛星(米:1990年打ち上げ):「あすか」衛星よりさらに高エネルギーのX線・ガンマ線の観測を目的とした衛星で、12トンの巨体を持つ。「あすか」衛星の観測情報と直接重なる部分はないが、関連は非常に深く、互いのデータをつき合わせる意義は大きい。これら2機の衛星に、地上からの観測も含めて、広帯域の同時観測がいくつかの天体に対して行われてきた。
- 3) Rossi-XTE衛星(米:1995年打ち上げ):「ぎんが」衛星の能力を高めたタイプのX線天文衛星で、比較的明るいX線源の精密な時間変動の観測を目的としている。しかし、そのかなりの部分は既に「ぎんが」衛星で観測がなされてしまっている。「あすか」衛星と競

合する部分は少ない。

- 4) Beppo-SAX衛星(伊:1996年打ち上げ):個々の観測装置は小粒だが、わりに多種類の観測装置を搭載して、それなりのレベルの多機能観測能力を持つ。多機能・小回りのよさを利用して、特徴のある成果を出しているが、先行する「あすか」衛星の成果に大きく迫るものではない。

⑤ 総合評価と今後の課題

「あすか」衛星は、我が国の科学衛星計画の柱の一つである宇宙X線観測を目的としたものである。一方で「あすか」衛星は近地球周回衛星であるため、軌道投入に関しては、新しい技術開発項目はさほど多くない。したがって「あすか」衛星の評価は第一義的にプロジェクトが当初に掲げた最先端の宇宙科学研究がどの程度まで達成できたかという観点から評価されるべきものである。

「あすか」衛星の持つ優れたエネルギー分解能で宇宙X線を分光観測すること、2 keV以上のエネルギー域で宇宙X線を撮像観測することという2つの大きな研究テーマは、どちらも順調に達成されつつある。その結果、多くの観測項目において、高い目標達成度が得られていると評価できる。また関連する研究分野に対しても、様々な波及効果を及ぼしつつある。

「あすか」衛星は、有機的な日米協力を通じて結実したものであること、またその観測データが世界の科学者に広く公開され有効利用されていることという2点において、重要な国際貢献を行いつつある。

こうした成果に対するコストの比率は、一見すると自然科学の諸分野の平均に比べて割高であることは否めないが、得られた結果が大きなインパクトを持ち、また、他の研究方法では得られないものが大部分であり、さらには広く全世界の研究を潤していることを考えるとき、十分に妥当なものと判断される。

「あすか」衛星は、諸外国の同様な衛星に比べ、1桁高いコストパフォーマンスを誇っていると考えられる。このような効率の良さは、科学者の主体性に基づいて継続的な科学衛星のプロジェクトが策定されるという宇宙科学研究所を中心とした現在の研究体制のメリットに負うところが大きい。

第5章 赤外線天文分野の科学衛星(SFU 搭載「IRTS(アーツ)」)

(1) 概要

① 科学衛星の目的

IRTS(=InfraRed Telescope in Space)は、後述の「第7章 宇宙利用分野の科学衛星(「SFU」)」の一環として、日本で打ち上げられ(1995年3月)、観測運用に成功した初めての赤外線天文学専用の宇宙望遠鏡である。世界的に見ても、1983年のIRAS、1989年のCOBEに続く、世界で3番目の成功例である。

IRTSは2つの目的を持っていた。一つは科学目的であり、赤外線域(波長 $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$)における全天を対象とする天体観測である。もう一つの目的は、これまで経験がなかった

宇宙空間での冷却技術や望遠鏡光学系の設計など赤外線域での観測衛星を製作するために必要な諸技術を確立することである。

赤外線域における天文観測は、地上でも実施されているが、大気による吸収が著しい中間赤外・遠赤外波長帯では、宇宙空間に出て観測することが重要である。IRTSによる赤外線天文学の具体的な科学目的は、

- 1) 星間物質の物理状態の解明
- 2) 星生成過程の解明

である。IRTSによる観測計画は赤外線による全天サーベイ観測であり、その点で先発のIRASと似通っている。しかし、IRTSにあつては、

- 1) IRASではカバーしていない波長域に重点を置いたこと
- 2) IRASよりも分光機能を充実させていること
- 3) COBEと同様、絶対測光を行えること

を特色として持っている。

なお、打ち上げ方式の点で見ると、IRTSはこれまでの科学衛星とはやや異なり、文部省、通商産業省、科学技術庁共同の多目的衛星であるSFU (Space Flyer Unit)に、11種の宇宙理工学実験装置の一つとして搭載された。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

[開発体制]

全体設計及び冷却系	: 宇宙科学研究所、名古屋大学
望遠鏡システム	: 東京大学、宇宙科学研究所
近赤外線分光器	: 名古屋大学、宇宙科学研究所
中間赤外線分光器	: 東京大学、NASA/Ames Research Center
遠赤外線分光器	: 宇宙科学研究所、通信総合研究所
遠赤外線測光器	: Univ. California Berkeley、名古屋大学

[参加人員]

参加機関	7機関(宇宙科学研究所、東京大学、名古屋大学、NASA/Ames、NASA/IPAC、UC Berkeley、北京天文台)
人 員	29人(常勤職員11、PD・大学院生18)うち外国人6人

[必要経費]

約11億円(IRTS関連のみ)

(2) 評価

① 学術的な観点

[主な学術的成果]

現在の天文学の主要2大テーマは「宇宙の形成」と「太陽系外の惑星の探索」である。赤外線域での天文学観測はこのどちらにおいても主要な役割を果たすため、その学問上の重要性は非常に高い。その観測を効率的に実施するためには、宇宙空間に望遠鏡を展開することが一つの有力な方法であるが、赤外線観測衛星の開発自体には、後述の低温冷却設備の宇宙空間での稼働をはじめ技術開発上の大きな難点がある。この困難のために、世界的に見てもこの種の衛星の開発は最近始まったばかりである。日本がこの難しい課題に取り組み、約1ヶ月の短期ではあるが実際の観測に成功したことは、単に以下に詳

述する本衛星の科学成果だけでなく、今後に続くであろう同種の赤外線衛星天文学という新しい学問分野を開拓したという点で、大きな学術上の意義があると認められる。

一方、具体的な科学成果としては、IRTSにより計64の波長帯で観測領域の赤外線強度分布が得られている。これらの強度地図分布の活用はまだ始まったばかりであるが、これまでのところ、もたらされた成果のうち主なものは以下の通りである。

1) 惑星間塵の組成の解明

黄道光(太陽光の惑星間塵による散乱光)及び惑星間塵の近赤外・中間赤外域における熱放射スペクトルが初めて得られた。これにより、地球近傍の惑星間塵の組成は炭素や鉄でなく、ケイ素が大半であることが示された。これは、太陽系(特に地球型惑星)の形成理論に大きな影響を及ぼすものである。

2) 低温度星のカatalog作成

波長 $1.4\mu\text{m}$ から $11.7\mu\text{m}$ までのスペクトル観測による低温度星のカatalogを作成した。カatalogに含まれる星の総数は数万個(ただし中間赤外線のスペクトルまで与えられている星は約1000個)である。このデータを用いた研究は今後も続くと思われるが、初期の主要な成果として、水蒸気の放出がほとんど全ての質量放出星にみられたことが上げられる。この結果は水の生成と質量放出メカニズムに深い関係があることを示す興味深い研究である。

3) 星間物質による謎の赤外放射(UIR)の観測

先行するIRASで、通常考えられている星間塵モデルでは説明できない赤外線(UIR = Unidentified IR emission)が観測され、現在も謎のままである。IRTSによるこの波長域の観測から、UIRが銀河面に沿って広く分布していることが明らかになった。これはUIR放射の起源の解明に向けた重要な一歩である。

なお観測期間が短期であった理由は、主には他のSFU搭載機器の観測・実験計画との兼ね合いであったが、IRTSだけについて言えば、望遠鏡本体の寿命などとは関係なく、望遠鏡の冷却に必要な冷媒(液体ヘリウム)の消耗のためであり、専用の望遠鏡衛星などの場合のように、冷凍機の導入と十分な量の冷媒が確保されれば、観測期間は大幅に延長できる。この意味で、次に続く「ASTRO-F」がもたらすであろう科学的成果に大きく期待したい。

また、特筆すべきことでは、太陽系内の物質に関する宇宙空間からの観測手段の確立という意味で、地球・惑星科学に大きな影響をもたらした点がある。現在のところは、惑星間塵の観測にとどまっているが、惑星・衛星などからの赤外線放射は惑星科学の進展に対し大きな影響を及ぼすことが確実である。この意味で宇宙空間における赤外線域の観測技術の確立は天文学以外の分野にも大きな波及効果を及ぼしつつあると言える。

[発表論文数]

1997年9月現在、27編(うち、機器開発関連12編)

② 技術的な観点

宇宙空間における液体ヘリウム冷却技術に進展があった。特に

1. 打ち上げ時の振動・衝撃に耐え、しかも断熱性能の良い冷却部支持方法
 2. 無重量下では位置が定まらない液体から、蒸発ガスだけを分離して排気する方法
- が新たに開発された。

これらの技術は今後、計画されている赤外線観測専用衛星の開発に大きく資するであろう

う。

③ 人材養成における観点

○ プロジェクトに参加した学生の数

18名(うち、日本人PD7名、外国人PD4名)

○ プロジェクトによる論文数

博士論文数 2

④ 国際的な観点

4つの観測装置のうち、中間赤外線分光器と遠赤外線測光器は日米協力で開発が行われた。関連するデータ解析も同様である。また、1996年11月には100人規模の国際研究集会を開催しており、米国・中国の外国人研究者が全体の約20%を占めるなど、十分な国際協力体制を採っている。

⑤ 総合評価と今後の課題

IRTSの目的は、

1.日本で初めて赤外線天文観測専用の宇宙望遠鏡を開発する

2.星間物質の状態と原始星の生成時に伴う物理現象の赤外線天文観測を行う

の2つであった。前者については冷却容器・パイプ等は打ち上げ時の衝撃に耐え、望遠鏡全体を液体ヘリウム温度に冷却し続けることに成功した。特に、予定期間の約1ヶ月の間、設定条件を超える液体ヘリウム等の漏れ、蒸発、蒸発ガスの目詰まりなどの問題もなく順調に作動した。一方、科学面にあつては、太陽系内の塵の熱放射スペクトルの観測に成功し、これらの塵がケイ素起源であることを観測的に実証したほか、様々な波長の赤外線観測に基づいて数万個の低温度星のカatalogを完成するなど、観測が短期間であつたにもかかわらず十分な天文学的成果を上げている。

以上のことから、IRTSについては、当初の2大目的は十分達成されたと言える。一方、天文学衛星計画としては投入した人員は比較的少ない。それにもかかわらず、赤外線観測技術の確立と上記の科学的成果の達成は、国際的な標準より高いコスト・パフォーマンスを生み出していると言える。

IRTSの成功に基づき、宇宙科学研究所が打ち上げる次々期天文学衛星計画「ASTRO-F」として、IRTSの5倍の重量を持つ大型赤外線望遠鏡(通称IRIS)の開発が現在進められている。同衛星の開発に向けて、今回の開発計画の結果が十分に反映されるよう望みたい。特に専用の天文衛星となると科学的目標の設定が重要である。考えられる科学目的としてはIRTSで行ったテーマ以外にも

1. 非常に遠方にある原始銀河の調査

2. 銀河の化学進化の研究

等の様々な興味深い天文学的課題の解明が挙げられるが、中でも特筆すべきテーマとして

3. 系外惑星系等の探査
がある。

一方、赤外線域での観測は地上でも行われている。また、近接するサブミリ波帯の電波でも同様の観測が行える。この点に鑑み、観測計画の立案には、地上における赤外線望遠鏡、あるいはサブミリ波帯の電波干渉計との相補的あるいは相互協力的観測計画の策定が肝要である。

第6章 電波天文分野の科学衛星(「はるか」)

「はるか」衛星は、1997年2月に打ち上げられた電波天文観測のための科学衛星である。打ち上げ後1年に満たない現時点で、本衛星を利用した天文学的成果について触れるのは時期尚早であるが、プロジェクトの科学的重要性に鑑み、この時点であえて評価を行うものである。

なお、ここでは「はるか」衛星のプロジェクトの理学的側面について評価を行うが、同プロジェクトは、本来、工学実験衛星「MUSES-B」として位置づけられており、技術的観点から見た様々な開発要素については、「第8章 工学実験衛星(「ひてん」、「はるか」)」に譲る。

(1) 概要

① 科学衛星の目的

「はるか」衛星は、世界で初めてのスペースVLBI(=Very Long Baseline Interferometer、超長基線干渉計)観測専用の科学衛星である。スペースVLBI観測の実験は、1986年7月にNASAの通信中継衛星であるTDRSSを利用して日本・オーストラリアの地上電波望遠鏡との間で初めて行われた。この実験の成功をもとに、米国、ロシア、日本でスペースVLBI専用衛星の開発計画が進められてきたが、現在のところ日本だけが打ち上げ・観測成功にこぎつけた。

「はるか」衛星の理学的目的は、電波域(周波数1.6GHz、5GHz、22GHz)における天体のVLBI観測である。電波域における天文観測のうち、分解能を追求する干渉計型の観測は、国立天文台の野辺山電波干渉計など地上で大規模に進められてきているが、分解能が基線長に比例して向上するため、より高い分解能を実現するためには地球サイズを超えた基線長が必要となってくる。これを実現するには、地球から遠く離れた軌道を回る宇宙望遠鏡と地上の電波望遠鏡群を組み合わせたVLBI観測が必要となる。本衛星はそのような目的のために開発された世界で初めての専用衛星である。

「はるか」衛星の直接の科学目的は、非常に高いエネルギーを持続的に放出している謎の天体である活動銀河核(AGN = Active Galactic Nuclei)の超高分解能イメージ観測である。AGNは非常にコンパクトな天体であって、地上の大陸間VLBIでもほとんど点状にしか見えない。その詳細な構造を知り、背後にある物理現象を理解するには、スペースVLBIによって始めて実現されうる高い角度分解能が必要である。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

[観測体制(理学関係)]

宇宙科学研究所…衛星の運用、観測計画立案、データ取得
国立天文台…相關解析

他に国外の機関(NASA/ジェット推進研究所、米国国立天文台、カナダドミニオン研究所、オーストラリアATNF等)が干渉計ネットワークに参加している。

[参加人員]

参加機関数	7機関(宇宙科学研究所、国立天文台、茨城大学、鹿児島大学、都立航空工業高専、法政大学、通信総合研究所)
人員	25人(常勤職員11、PD・大学院学生14)うち外国人5人

[必要経費]

科学衛星 101億円、ロケット 68億円
干渉縞生成のための相関器などの経費 10億円

(2) 評価

① 学術的な観点

世界初のスペースVLBI専用衛星を実現し、人類の新しい観測手段を手にした意義は非常に大きい。「はるか」衛星は打ち上げ後まだ日も浅いため、その科学的成果の詳細な評価は今後の運用結果を待つほかないが、新しい観測手法の確立という点では、日本が世界に先駆けて成功したミッションの一つである。「はるか」衛星を使った観測はまだ始まったばかりであるが、既に得られている成果としては

- 1) 8m単独電波望遠鏡としての性能確認観測
- 2) 「はるか」衛星と地上電波望遠鏡との間のクエーサーPKS1519-273の干渉縞検出
- 3) 「はるか」衛星と地上望遠鏡群とのVLBI観測による上記クエーサーなど電波天体のイメージ試験観測

にそれぞれ成功している。これらの観測で到達された角度分解能は、周波数5GHz帯で1万分の3秒であり、これはハッブル望遠鏡の解像度の約300倍に相当する。

現在、22GHz帯について打ち上げ後のシステムテストを行いつつ、他の波長帯について順次試験観測から科学観測へと移行している時期であり、成果としての学術論文はまだない。

② 技術的な観点

詳しくは「第8章 工学実験衛星(「ひてん」、「はるか」)」、「第9章 科学衛星を支える工学技術」にゆずるが、「はるか」衛星で開発された主な技術項目は、

1. 大型アンテナの展開技術
2. 電波波長域での高感度受信機の衛星搭載化
3. 衛星の高精度3軸姿勢制御
4. 超広帯域データ伝送技術
5. 原子時計に匹敵する高安定な位相の衛星・地上間伝送技術
6. 高精度な衛星軌道決定

など難しい開発要素であった。これらはいずれもスペースVLBI観測に必要な新技術であり、世界で初めて開発された要素も多い。開発した新技術の副次効果などを通じて、材料科学、通信工学、宇宙航行学などの工学分野に大きな波及効果をもたらしつつある。詳細については第9章を参照されたい。

③ 人材養成における観点

- プロジェクトに参加した学生の数
14名(うち、PD7名)

本プロジェクトでは、本格的な観測が始まりつつあり、今後観測スケジュールの進展につれて、本衛星を利用する天文関係の学生は増えるものと思われる。

④ 国際的な観点

「はるか」衛星によるVLBI観測は、世界中の電波望遠鏡群と有機的に結合し運用されることによって初めて成り立つため、その運用には宇宙科学研究所のこれまでの衛星計画

では経験したことのない国際的な協力体制が必要とされる。運用協力にあたる研究機関としては、米国(NASA/JPL)、カナダ(CSA = Canadian Space Agency)のスペースVLBIグループのほか、日本国内を初めVLBA、EVN、ATNF、APTなど世界中の主要な電波望遠鏡群がすべて参加している。衛星の運用に関しては、科学的方針をVISC(= VSOP International Science Council)とよばれる国際的な運営評議会で決定し、実際の運用については宇宙科学研究所、国立天文台を核とする運用チームが、上記の世界中に広がる電波望遠鏡群やVLBI研究グループと密接な連絡を取りながら進めている。

このように、本衛星計画では従来にないほど複雑な国際運用を遂行してきている。この成功例が今後計画されるであろう複雑な国際衛星計画の立案・実行に大きく資することは間違いない。

⑤ 総合評価と今後の課題

「はるか」衛星の観測はまだ始まったばかりであるので、本格的な科学的成果はこれからであるが

- 1) 世界で初めてスペースVLBI観測専用宇宙望遠鏡の開発・打ち上げ成功
 - 2) 1.6GHzと5GHz帯についてはVLBIイメージ観測の成功
 - 3) 角度分解能1万分の3秒という高精度観測の実現
- という成果からみて、本プロジェクトの当初の目的は十分に達成したといえる。

一方、経費に関していえば、衛星本体だけでなく電波干渉縞を生成するための相関器(一種の超高速専用計算機)がかなりの比重を占める、これは衛星追尾用アンテナと同様に、スペースVLBIだけでなく通常の地上VLBI観測に対しても活用できるため、全体としてみたときのコスト・パフォーマンスはかなり高いと言える。

理学的側面に限って言えば、これだけの規模の天文学衛星計画としてはそれに携わった人員は極めて少ない。もちろん、観測が本格化すれば大学院学生や他の電波天文学研究者など関連分野の研究者が広範に参加することが見込まれ、科学的成果は着実に上がっていくだろう。今後、22GHz帯の試験観測を終え、本格的な科学観測を遂行することにより、実りある天文学的成果をもたらすことが大いに期待される。

第7章 宇宙利用分野の科学衛星(「SFU」)

(1) 概要

① 科学衛星の目的

宇宙利用は、極微小重力、超真空など宇宙空間特有の特性を利用して科学、技術の発展を図り、究極的には社会的寄与をもたらすことを目標とする。宇宙利用分野のプロジェクトでは宇宙で処理をした物質、試料をさらに詳細に分析する必要がある場合が多く、そのため衛星を回収することが必要となる。「SFU」衛星はそのような衛星として我が国で初めて計画されたものである。

また、「SFU」科学衛星の特徴は、次に要約できる。

- 1.H-IIロケットで打ち上げ、軌道上で所定の実験を行った後、スペースシャトルで回収する。

- 2.本衛星を各種工学、理学実験を含めた宇宙利用実験の実験装置を搭載する再利用可能なフリーフライング宇宙実験室と位置づける。
- 3.宇宙科学研究所、科学技術庁、通商産業省の関連機関と共同の開発、運用を行うとともに、NASAとも密接な関係を持つ。

「SFU」衛星の実験目的は微小重力実験6項目、工学実験2項目、理学観測1項目、並びに環境計測2項目からなる。このうち宇宙科学研究所が担当するのは微小重力下での生物実験(いもりの発生)と凝固結晶成長実験、工学実験の展開収納型2次元展開ソーラーアレイと電気推進実験、理学実験の赤外天文観測、並びに環境計測のプラズマ・マイクロG計測である。また、衛星自体の開発は宇宙科学研究所が新エネルギー・産業技術総合開発機構、無人宇宙実験システム研究開発機構と協調して行い、打ち上げ機とのインターフェースを宇宙開発事業団、NASAと調整して行った。

「SFU」衛星は1987年より8年間にわたって開発が行われ、1995年3月にH-IIロケット3号機により打ち上げられた。高度500 kmで運用を行なった後、1996年1月にスペースシャトル STS-72により軌道上で回収され米国に着陸、その後日本に輸送された。

② 科学衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

○ 開発の分担

宇宙科学研究所…システム取りまとめ、バス・ミッション機器の開発(衛星の開発、微小重力実験2項目、工学実験2項目、理学実験1項目、環境計測1項目)、運用等

通商産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構、無人宇宙実験システム研究開発機構…ミッション機器の開発等(衛星の開発、微小重力実験3項目)

科学技術庁、宇宙開発事業団…打ち上げロケットの開発、SFU打ち上げ、ミッション機器の開発(微小重力実験1項目、環境計測1項目)

○ 開発体制

SFUプログラムオフィスが3省庁とその関連機関の参加により組織された。さらに、国際的な調整機能を実現し、かつ、効率的な開発運用を行なうために、以下の3レベルの体制が組織された。

レベル1: SFU開発連絡会議、SFUプログラムオフィス、NASA/Head Quarter

レベル2: SFU実施・事務ワーキンググループ、SFUミッション1・システム連絡会議、NASA/JPL/JSC/KSC

レベル3: 衛星、実験、運用の各実務グループ

なお、スペースシャトルのサービスに関する業務を遂行するにあたり、外務省、大蔵省の協力を得た。

○ 参加人員

参加機関 約 22機関(宇宙科学研究所、宇宙開発事業団、新エネルギー産業技術総合開発機構、無人宇宙実験システム研究開発機構、NASA(JSC, KSC, JPL, Ames, HQ), 筑波大学、名古屋大学、京都大学、神戸大学、横浜市立大学、東海大学、愛媛大学、お茶の水大学、電気通信大学、都立大学、都立科技大学、東京大学、通信総合研究所、MIT、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学、チリ大学等)

人 員 約 300人

○ 必要経費

総経費 630億円(シャトルによる回収関係分 50億円を含む)
内、宇宙科学研究所分 150億円

(2) 評価

① 学術的な観点

1) 宇宙生物実験

生命の基本単位である細胞への直接的重力効果を調べる際に、両生類の卵はその質量や内部の密度差が大きいことから格好の対象として着目されている宇宙環境で、イモリの発生実験を行う意義はここにある。本実験のもう一つの意義は、各種の実験装置が混載され、宇宙飛行士による実験装置操作が極端に制限されると予想されている国際宇宙ステーションにおいて、宇宙実験を有効に実施するための手法を確立することにある。

この実験では、冬眠状態で飼育したアカハライモリ(雌イモリ2個体)に徐放性ホルモン剤を投与して、冬眠状態を維持した状態で軌道上に打ち上げた。軌道上で、水槽の温度を上げた結果、冬眠からさめ、産卵が誘発されたことが画像から確認された。産卵時期の確定は困難であるが、ホルモン処理1月後の軌道上での昇温によって誘発されたことは確かである。軌道上での試料の固定操作は不完全であったものの、スペースシャトルによる回収までは試料は凍結状態で維持され、回収試料の解析を行うことができた。卵・胚と判定されたものの数は21で、神経板の形成が認められる胚や尾芽胚に達したと見られる胚もあった。これら試料の精密な観察により発生は正常に進行したものと考えられる。

以上のことより、微小重力下であってもイモリの発生形態的变化は正常に進行すると結論することができる。しかしながら、卵割の様子や原腸形成時での細胞運動など、詳細に解明すべき問題は残されている。

「SFU」衛星における生物実験は、長期間宇宙空間を飛行するフリーフライヤーに世界で初めて比較的大型の水棲動物を搭載して微小重力の細胞過程への影響に関する研究を行ったもので、本実験の生物工学的な意義は大きく、発生生物学的な成果についても意義ある成果が得られている。

宇宙空間でのみ実施可能な天文学や理工学実験に比べて、地上での研究によって多くの知見を得ることができる生物発生実験を、高いコストを必要とする「SFU」衛星を利用して行う必要性について、他分野の研究者の理解を得る努力を十分に行う必要がある。このことについては凝固、結晶成長実験においても同様であり、将来行われるであろう国際宇宙ステーションにおける実験すべてについてあてはまる問題点である。

2) 凝固・結晶成長実験

国際宇宙ステーションにおける微小重力環境を利用した物質・材料社会分野の主要な研究テーマとして、融体からの結晶成長実験が参加各国において計画されている。しかし、結晶成長実験においては宇宙飛行士の活動等に起因するステーション内の重力ノイズが懸念されている。宇宙ステーションに比べて本質的に重力ノイズが小さいフリーフライヤーを利用して結晶成長実験を行い、重力ノイズによる影響についての知見を得ることを目的に、本研究は実施された。

本研究の有力な実験手段は高倍率顕微干涉計であり、ロケット打ち上げ時の振動や加速度による精度劣化(光路のずれ等)がなく、かつ軽量の干渉計の開発が不可欠である。本実験は、結晶の融液成長における固液界面の形態形成機構並びに形態安定性に関して、モデル試料を用いた可視化実験を行い、対流による擾乱のない状態での精密

な観察を行うことを具体的な目的として実施された。本実験のために光路を共通にする偏光分割式共通光路型顕微干涉計の開発が行われた。本干涉計はロケットや衛星に搭載する装置に共通に求められる「軽くて丈夫なこと」に加えて、レーザーダイオードや発光ダイオードを光源とするため、低消費電力化をも実現した画期的な装置である。

試料は軌道上で加熱・融解後10時間保持することを目標に実験が行われた。地上実験では比較的短時間の内に固液界面が平坦となり液相中の溶質濃度分布は均一になるが、微小重力下では溶質の移動が拡散のみに支配されるため融解後約10時間保持が必要である。複数の加熱実験が行われたが、加熱中または高温保持中に試料温度が急速に低下し、予定の温度プロファイルが得られなかった。飛行後の解析によって、実験中の急激な温度低下は実験制御系の情報処理に関する異常に起因することが判明した。この異常は本実験装置制御系と SFU コア制御系との間に、生物実験装置制御系を介在させることによって発生したものであり、入念な地上でのインターフェイス試験によっても発見できなかったことは誠に残念なことである。長年の研究者の努力にもかかわらず、このことによって本結晶成長実験の意義は半減したと言わざるを得ない。

溶融試料凝固開始前の固液界面近傍の画像を、地上における画質確認試験によって得られた画像と比較すると、宇宙実験の画像は信号の圧縮処理が加えられているため、地上のものより解像度が劣るが、固液界面及び干涉縞は明瞭であり、この種の研究に必要な高いレベルの光学システムが開発されたものと評価できる。本研究のために開発された顕微鏡干涉計が、打ち上げによる光軸のずれがなく飛行中に使えた意義は大きい。

3) 展開ソーラーアレイ

衛星システムに大電力を供給する必要性が高まっているが、そのためには大面積太陽電池パドルを展開することが必要となる。一般に展開はパドルを折りたたんでおき、それを何らかの機構を用いて展開するが、今まではすべて一方向にだけ展開する方式しかなかった。本実験の目的は、2本の伸展マストを採用してパドルを2次元的に展開する方式を確立することである。

2次元展開パドルの課題は、パドルの折り畳み方式である。宇宙科学研究所ではいわゆる「三浦折り」のパターンでこれを解決した。これは円筒の軸圧縮座屈のトポロジーを応用して2次元面を2方向に折りたたみ、打ち上げ時の寸法を極めて小さくするものであり、宇宙構造物として初めて試みられた。実験では正常に展開し、その後収納されたことがテレビモニターにより確認された。

この成果は

- 1) 2次元展開、収納が軌道上で初めて確認され、極めて大面積の太陽電池を構築する技術の見通しを得た。
- 2) 大変柔軟な構造物の軌道上での挙動が明らかになり、地上試験における重力の影響に関する数多くの知見を得た。

以上の斬新な展開技術、並びにその地上試験の方法に対する知見は、現在急速に大型化が要求される各種宇宙システムに対応する方途を示したものであり、今後の宇宙技術への寄与は極めて大きかったと評価される。一方、このアレイを用いて計画された高電圧発生実験一部コネクタの不具合により実施できなかったが、事後解析で原因と解決策を指摘できたことも含め、このような斬新な技術を完成に導く寄与をしたことで全体的として大きな成功を収めたと言える。

4) 電気推進実験

本実験は MPD アークジェットをスラスターとして搭載し、軌道上で推進性能を確認することを目的とした。これは推進剤であるヒドラジンをアーク放電によりプラズマ化し、ローレ

ンツ力により加速噴射するもので、パルス状の推進力を発生する。その特徴は大きな比推力を得ることができることにある。実験では 43395 回のパルスを発生させ、そのうちミスファイアは 0.3% であった。比推力は 1100 秒であり、地上試験での推進力値を軌道上で確認することができた。これにより、所期の実験目的を達成した。

この実験により MPD アークジェットは初めて宇宙ミッションに適用可能な実証を得たことになり、惑星間ミッションや一部実用衛星など推進剤量に制約があり、かつ大きな速度増分を必要とするミッションに適用する途を開いた。電気推進の可能性については早くからいわれているが、実際に衛星や探査機に使用された例は少ない。これは寿命、性能に関するデーターの蓄積が少ないこと、なかなか宇宙でこれを実証した例が極めて少ないことが原因であった。本実験に先立って、たんせい 4 号 (1980 年)、NASA と協力した SEPAC 計画 (1983 年) で宇宙実験が行なわれている。しかし、これらの実験では数百回のパルスを発生させたにとどまっており、数百万回の動作が必要な実際のミッションの実証としては不十分であった。今回のフライト前地上試験では 300 万回の確認を行い、軌道上で 4 万回以上の動作を行い、この範囲で地上試験で予想された性能が実現されたことを確認した意義は大きい。

電気推進でもう一つの懸念材料は、搭載機器や衛星システムに与える電磁干渉であった。運用時にはスラスターに最も近いテレメトリアンテナにはパルスに同期するノイズが乗っていること、ほかのアンテナには影響がほとんど見られなかったことが確認されている。これによって電磁干渉の問題は定量的な評価ができるようになり、かつ実用に供しても問題を避けることができることが示された意義は大きい。

5) プラズマ計測装置・環境モニタ

各種宇宙利用実験を行なう上で、実際の衛星の環境をモニタすることは重要である。その目的で本装置が搭載され、ガス、プラズマ、電磁場、マイクロ G 環境が測定された。ガス環境は太陽方向と真空度の関係が測定され、打ち上げ後 1 ヶ月間は衛星からのアウトガスの影響が見られることを確認した。プラズマ、電磁場の測定では宇宙、並びに衛星で誘起された値が精密に測定できた。マイクロ G 環境は微小重力実験では特に重要な項目であり、その結果、スペースシャトルの環境に比べ約 2 桁の良好な環境であることが確認されている。

この実験により、「SFU」衛星のほかの搭載実験の実験環境条件について定量値を与えることができたことに加え、今後増加するであろう類似実験に際しての環境モニタの技術を確認した意義を持っていると評価できる。

6) 宇宙赤外望遠鏡 (第 5 章 赤外線天文分野の科学衛星 (「SFU 搭載搭 IRTS」) 参照)

② 技術的な観点

1) 2 種の機体とのインタフェース

打ち上げを H-II ロケット、回収をスペースシャトルで行なうことから双方の宇宙輸送システムとのインタフェースをとることが必要条件であった。これは我が国では初めてのことであっただけでなく、国際的には結果的に 2 種類の機体に積載されたものはあっても計画としてなされた例はない。

今回の実験では、「SFU」衛星と回収にあたるスペースシャトルとの機械的インターフェイスの試験を打ち上げ前に行うことができず、本物のハードウェアで始めてメイティングしたのは軌道上で回収した時点であった。同一の機体で打ち上げ回収をする場合には、打ち上げ前の組み立て段階で十分インタフェースが確認できるのとは比べれば格段の難しさである。このような困難さを克服したことは極めて大きく評価できる。

2) 回収型モジュール構成衛星の技術

本衛星は複数の省庁からなる多数のユーザーの実験を収納し、かつ回収後再打ち上げを本来のミッションとしている。このような観点の衛星は日本ではほかに例がなく、外国を含めてもまれである。「SFU」衛星では着脱可能な8個の台形箱を取り付ける形式のモジュラー構成とし、開発段階では衛星本体と各ユーザー機器は平行して独自に開発を行い、インテグレーションの段階では最小の作業量で打ち上げ時の形態に完成できるような配慮が為された。また、次の打ち上げに対してはユーザー機器だけを交換し、本体では熱制御材などの特定の部分の改修だけで再利用できるようにした。H-IIロケットによる打ち上げの過程では衛星に加わった機械的環境条件をモニターして設計荷重に対して十分小さなストレスであったことを確認し、一方、回収後にはクリティカルな部分の残留強度や宇宙環境による材料劣化の測定を行うなど、再利用を意図した衛星の評価を詳細に行っている。

以上の考えに基づく衛星構成法、評価法は、例えば宇宙ステーションの利用、あるいは多目的再利用のプロジェクトでは不可欠な考え方であり、その技術への先駆けとなったと評価できる。

3) 有人ミッションとの適合性の技術

スペースシャトルによる回収によって、「SFU」衛星は我が国では例のない有人ミッションとの適応を考慮する必要があった。有人ミッションでは安全性が特に強調され、予想される重大な危険に対して、2重、3重の安全策を行うことになっている。これに対応して、「SFU」衛星では飛行安全に関し28件、地上安全に関し8件のハザードレポートを作成し、NASA安全審査パネル承認を得ている。4次にわたる安全審査は8年にもおよび、その間に蓄積された安全に関するノウハウは膨大なものである。

一方、軌道上では10件の主要不具合が報告されている。このうち、7件がシャトルとのインタフェースに影響を与えるもので、如何に有人ミッションがほかのミッションに比べて厳しいものであるかがわかる。最も重大な不具合は太陽電池パドルの収納ができなくなったことである。対応としてはパドルを切り離すことであった。これに関しては技術的な問題を指摘することもできるが、むしろこの不具合は前もってあり得るモードとして考慮されており、その際の対応策として火工品によるパドルの切り離し、投棄の方策が講ぜられており、しかもその対応策が予定通り機能した点を指摘したい。このように安全を重視するプログラムにあってコンテンジェンシープランが幾度も正常に動作したことは注目すべきことであり、個々の技術を超えてプロジェクト遂行能力が成熟したことと見るができる。

③ 人材養成における観点

「SFU」衛星のプロジェクトは理工学実験に加え、宇宙利用のインフラストラクチャーを確立する意味を持っていた。この点、多くのミッションチーム並びに関係機関に責任を持つために、経費、スケジュールを含めたプロジェクト実行は限られた少数のエキスパートが当たっている。ここでは一部の実験や観測を除き学生を含めた実行体制は望むべくもなく、直接の意味の人材養成とは一線を画している。しかしながら、工学実験はいずれも過去長期間にわたり大学院などの教育現場で研究された結晶を宇宙において実証したものであり、その教育的意味合いは大きい。

以下にプロジェクトに直接関係した外部発表の統計を示す。

● 定期刊行物	11
● 国際シンポジウム	17
● 国内講演会	42
● 宇宙研報告	5 (うち2件はプロジェクトの総合報告)

④ 国際的な観点

「SFU」衛星は国内では複数省庁が関与するプロジェクトであった以上に、回収をスペースシャトルに委ねることで国際的な新しい問題と経験をもたらした。米国にとってもほかの国から打ち上げられた物体を宇宙で回収し、米国領土内に着陸させることは初めての経験であった。そのため、輸出入関係の法令に関しても新しい解釈を求められたと聞けし、国際共同プロジェクトに新しい判例を提供することとなった。国内的には直接関与した省庁を含め、外務省、大蔵省の政府機関が協力して実行されたことは言うまでもない。技術面以外にもこのような多くの新しい課題を抱えたプロジェクトにおいて、「SFU」衛星プロジェクトチームが中心となって多数の問題と取り組み、それを解決していったことは特筆されるべきである。

2次元展開ソーラーアレイは従来の展開構造の常識を破るものであり、しかも、発想は我が国の伝統的折り紙の思想から出たものであって、国際的には特異な成果である。2次元、3次元の展開方式として、例えばインフレータブル構造などが知られているが、具体的に宇宙実証されたものとしては1年後にSTS-77(1996年)でNASAが実験した14mアンテナが知られているだけであり、この点からも「SFU」衛星の技術的先進性を示している。

⑤ 総合評価と今後の課題

「SFU」衛星の第一の目的は、SFUの機能と2種の打ち上げ回収システムのインタフェースを立証することにあり、これは完全に達成された。同時にこのような国際的ミッションのひな形として多くの教訓と事例を残した。さらに、第2の目的である多省庁の共同開発も達成され、ここでも今後参照されるべき事例を残している。一方、軌道上での理工学実験・観測については11項目が実施され、そのうちの1項目の半分(高電圧発生実験)が未達成であったほかは全て所定の成果を得た。さらに、衛星、搭載実験装置が回収後に観察、検査を行なうことができたことは重要な意味を持ち、これからの宇宙ステーションなどを用いる宇宙利用活動に大きなインパクトを与えるとともに、再利用型宇宙機の引き続き利用にも道を開いたものである。

「SFU」衛星は初めての多目的、かつ再利用を目指したプロジェクトであった。現在のところ、再飛行は計画されていないが、このような思想に基づく計画は今後の宇宙利用にとって利用価値が高いシステムであると言える。したがって、最大の課題はいかに「SFU」衛星の経験を継承するかにある。これに関しては現在までに多数の報告書が発行されており、今後の計画に参照されるであろうことは確実である。しかしながら、国外を含めた複数機関を取りまとめつつプロジェクトの推進にあたった際のノウハウ的な経験、知識については、文献として残すことになじまない部分もある。これらは「SFU」衛星のプロジェクトのマネジメントにあたった人たちが、将来のプロジェクトの中で次の世代に継承するよう努める以外にないであろう。

全体の計画立案に関し、当初目指した再利用の道が明確になっていくことについて課題が残されている。評価の中で述べたごとく、技術的には再利用を行うための設計、測定、検査などは相当実行されている。しかし、実際に再利用する計画が樹立されていないことは、技術以外の経済的、社会的観点に当初見過ごされていたことがあると考えられる。特にシステムコストについては十分な分析がなされていなかったことを指摘したい。宇宙利用分

野では多くの競合する手段の選定が可能となっている。そのような中で新たなプロジェクトを考えると、システムのライフサイクルコストをできるだけ正確に見積もり、最も有効な手段を選定することは当然である。技術的に大きな成果をあげた「SFU」衛星を例にとつてこのような観点から眺めることは今後の類似プロジェクトに対する大きな寄与となると考える。本評価の中では残念ながらこの点の調査はできなかった。近い時点で上記コスト面を含めたプロジェクト評価がなされることを希望する。

「SFU」衛星の初期のイメージは宇宙ステーションの周りをフリーフライングし、宇宙ステーションと常時通信しながら実験を行なうものであった。このような形態の場合は「SFU」衛星単体のフライトに比べ、実験のモニターと実行の自在性が容易に得られ、宇宙ステーションの補給機能を利用した高度で短いターンアラウンドの実験が可能となること、あるいは、宇宙ステーションと「SFU」衛星とその間の空間を利用した壮大な実験室としての性格を利用できることなど多くの高付加価値を生じる。また、宇宙ステーションにとつても高品質の微小重力を「SFU」衛星によって実現する利点も生じる。

このような後続プロジェクトをにらみ、「SFU」衛星の再フライトを含めて上記コスト評価を行い、実現の可否を判断することが重要である。

第8章 工学実験衛星(「ひてん」、「はるか」)

1) 工学実験衛星について

工学実験衛星は、長期的観点から様々な工学技術の確立を目指し、将来的にはより優れた理学目的を達成することを目的にしている。無論、幾つかの理学計測機器も搭載し、理学衛星としての側面も平行して有するのであるが、主要目的は工学ミッションの達成に有ると考えてよいだろう。宇宙科学研究所におけるこのような衛星計画の進め方、即ち工学の裏付け無しには如何なる科学プロジェクトも有り得ないとする考え方が、ここでは評価の一対象となる。

2) 評価の方針

「はるか」衛星は、1997年2月に打ち上げ後、未だ9か月しか経っていないが、工学的に十分評価できると思われるので、ここに含めることにする。工学実験衛星プロジェクトは、「MUSES-A」(ひてん)、「MUSES-B」(はるか)、「MUSES-C」とシリーズになっているので、以下の評価はこれまでに既に打ち上げられた「ひてん」衛星と「はるか」衛星をまとめて行うことにする。

(1) 概要

① 工学実験衛星の目的

第13号科学衛星「ひてん」の主目的は、将来の惑星探査に必要な惑星間航行について

- 1) エネルギー利得や宇宙大旅行を可能にするスイングバイ技術の達成
- 2) エネルギー消費無しに軌道変換を行うエアロアシストとしてのエアロブレーキング
- 3) これらを行うのに必要な軌道の精密標定を確立することであった。

「ひてん」衛星はM-3SII型ロケット5号機により1990年1月に打ち上げられ、所定ミッション期間は1年であったが、搭載燃料の余裕と機器の正常作動により、3年3か月という大幅な延長運用がなされた後に、軌道計画に基づいて月面落下し、寿命を終了した。

第16号科学衛星「はるか」の主目的の工学的側面は、スペースVLBIに必要な工学諸技術の確立であった。即ち、衛星上の電波望遠鏡と地上の電波望遠鏡を干渉計として動作させることを目指し、世界に類の無い大型展開アンテナ、フェーズトランスファー、単一ディッシュの電波望遠鏡の実現等の電波観測に必要な通信技術を確立することを目的とした。

② 工学実験衛星に関わる観測体制、参加人員及び必要経費

〔参加人員〕

「ひてん」衛星

参加機関 9機関(宇宙科学研究所、筑波大学、東京大学、金沢工大、京都大学、独協医大、NTT、ミュンヘン工科大学(ドイツ)、NASA/ジェット推進研究所)

参加人員 約50名

「はるか」衛星

参加機関 9機関(宇宙科学研究所、国立天文台、鹿児島大学、茨城大学、都立航空工業高専、NASA/ジェット推進研究所、米国国立電波天文台(NRAO)、カナダドミニオン天文台、オーストラリアATNF他)

参加人員 約90名

〔必要経費〕

「ひてん」衛星	衛星	40億円、ロケット	43億円
「はるか」衛星	衛星	109億円、ロケット	68億円

(2) 評価

① 学術的・技術的な観点

〔新たに開発した技術〕

- 1) 「ひてん」衛星の主ミッションは、将来における惑星探査に欠くことのできない、スイングバイを含む軌道操作技術の確立であり、実際に達成された軌道精度は、位置について $1\sigma = 2.2\text{km}$ 、近月点通過時刻 ≤ 1 秒であった。この値を達成するために必要な推力制御には、速度について 10mm/sec 以下の精度を必要とした。
- 2) 2重月スイングバイ軌道の達成: これにより将来における多重スイングバイが可能になり、1992年打上げの「Geotail」衛星の科学観測を成功させた。
- 3) エアロブレーキング技術の実証: 世界で初の実験として、燃料を使わずに惑星大気を利用した速度変更技術が確立されたといえる。
- 4) 光学航法技術(ONS)の実証: Navigation Cameraを用いて、対象惑星と星の可視光から、精密な探査機位置を得ることにより、軌道決定精度を向上させるための予備実験に成功した。この技術はフライバイ、ランデブー、サンプルリターン等の将来計画に、必須要素として組み入れられている。
- 5) 「はるか」衛星大型展開アンテナを衛星上を実現: 構成、寸法共に衛星搭載としては世界に類の無い、有効口径8mのアンテナで、打ち上げ時には小容積に畳まれており、主反射鏡及び副反射鏡の両方が、打ち上げ2週間後順調に展開され、展開機構の妥当は実証された。鏡面精度に関しては、現在の処目的1.6、5、22GHz中で、5GHz迄の動作に成功している。

- 6) フェーズトランスファ(位相基準信号の伝送)に成功: 周回衛星に対する世界最初の実験となり、位相安定度は目標を達成していた。
- 7) 単体の電波望遠鏡として機能した電波干渉計の形成: 1997年5月に、衛星上の電波望遠鏡と地上の電波望遠鏡が、干渉計として動作することが実証され、工学実験衛星としての主要目標が達成された。

[周辺/将来工学分野への影響]

- 1) 「ひてん」、「はるか」衛星によって達成された精密軌道変換技術と高精度通信技術により、現在進められている「LUNAR-A」、「PLANET-B」のプロジェクトが可能になり、第20号科学衛星として2002年打上げ予定の、工学実験衛星「MUSES-C」のプロジェクトにつながっているといえる。
- 2) 高精度スイングバイに必要な推力と持続時間の制御には、センサーやアクチュエータを含む高信頼性制御システムが不可欠で、これらの工学分野にインパクトを与えたであろうと思われる。
- 3) さらにスイングバイは、実際の飛行でしか試験できない技術であり、理論解析及び計算機シミュレーションの重要性を新たに認識した点で、従来の航空宇宙工学だけでなく、様々な工学分野に意義深かったと思われる。
- 4) 無重力における大型アンテナ展開は、地上とは全く異なる様相を持つことが実証され、宇宙における大型構造物に対する考え方が変化し、宇宙における大型望遠鏡の建設、惑星探査における通信、宇宙基地建設に対し、技術的困難を取り除き、開発を容易にしている。

② 人材養成における観点

計画の主目的の1つは、精密軌道評定とその制御にあった。少なくとも、我が国においてはそれまで、2機の惑星間プローブを除いて、超遠距離に投げられた探査機はなく、この「ひてん」衛星は、我が国初の月到達機であったわけで、軌道伝播ツールも、月のlibrationはもとより、正確な重力場を表現した軌道生成すらできていない状態にあった。加えて、2機の惑星間プローブは、弾道軌道にすぎず、スイングバイを用いた軌道制御技術に関しては、軌道計画もおぼつかない状況にあった。「ひてん」衛星計画を実施することで、特に、多重月スイングバイ軌道の実現という難問を克服したことにより、この分野の人材も多数育成されて、月を利用して飛行計画を策定する技術力として世界的なレベルまで到達できたといつてよい。この成果が、「Geotail」衛星の成功に直結している。

「はるか」衛星計画においては、VLBI観測を実証するという観点から、相関処理を行うために必須の探査機の時刻同期技術や、やはり相関処理を迅速に進めるために必要な高精度の軌道決定などの観点で、新たな分野が形成されたといえることができる。またこの観測は、膨大な量のデータの伝送を前提にして計画されたことから、全く新しい Ku bandでの超高速のデータ伝送を実証してみせるなど、付随して開拓された分野もまた数多いといえる。

通常の科学衛星計画における工学技術は、いわゆるoff-the-shelfの技術にとどまるために、すでに開発された分野で、すでに養成済みの人材が活躍するのに対し、工学実験衛星は、未開拓の分野の形成を促進し、そこに全く新たな技術集団を育成するという大きな意義を担っているといえることができる。

[工学研究における移転現象]

その他にも、日本の国公立大学の航空宇宙工学科/機械工学科における学生/大学院学生/教員が、実際の研究テーマとして、宇宙科学研究所の实在プロジェクトに刺激

されて、本プロジェクトに近い研究テーマを独立自発的に選び、微力ながらその成果により宇宙科学研究所のプロジェクトのサポーターとしての役割を果たしたことは、産業界への技術移転と相似な現象で、日本におけるこの分野研究のピラミッド底辺を拡大しているの、工学研究における移転現象と見るのが適切と考えられ、ここにどうしても触れておきたい。

③ 国際的な観点

[国際的な観点からの評価]

「ひてん」衛星が取り入れた新技術中では理論上可能であるとされていた2重月スイングバイを世界で初めて実証し、かつ自在に駆使した点であろう。この技術はその後の日米共同ミッション「Geotail」衛星をはじめNASAの「Wind」衛星等に応用されており、「ひてん」衛星が成功した意義は大きい。また、エアロブレーキングは惑星大気を利用して探査機を減速する初の実験で米国NASAがほぼ同じ時期に開発を進めた技術である。

「はるか」衛星が世界最初のスペースVLBIを実現したこと。世界の多数の電波天文台が「はるか」衛星のスペースVLBI実験に参加していること。世界の電波天文学者の長年の夢であったスペースVLBIを初めて実現したことで国際的な観点から極めて高く評価できるものである。

[諸外国の似た衛星／探査機との比較]

NASAの「MAGELLAN」金星探査機及び「Mars Global Surveyor」探査機が用いたエアロブレーキングは、「ひてん」衛星実験後に行われており、「ひてん」衛星の着眼点は、国際的に見ても適切であったといえる。

1980年代に欧州と米国が共同で検討したスペースVLBI衛星は実現しなかった。ロシアのスペースVLBI衛星「Radio Astron」は開発が遅れており、実現の見通しは立っていない。

[技術的な国際協力]

「ひてん」衛星に搭載された宇宙塵計測用機器ダストカウンターは、ミュンヘン工科大学が提供し、総合試験、運用も行った。塵の寸法、速度、方向性の計測が成功裏になされ、国際協力的一端となった。

④ 総合評価と今後の課題

「ひてん」、「はるか」衛星が目的にした課題は全面的に達成され、「ひてん」衛星の軌道での作動期間は所定の1年をはるかに上回る3年3か月であったことから、「ひてん」衛星の目的達成度は100%以上であったと言える。この成果は後続の「LUNAR-A」、「PLANET-B」に応用されており、それこそが「ひてん」衛星の目的であったので、厳しくいえば、これらのプロジェクトが成功した時に初めて、「ひてん」衛星の目的達成度が100%であったといえるだろう。「はるか」衛星については、先ず電波望遠鏡としての大型アンテナが無事に展開し、展開機構の妥当性が実証され、合わせて通信系の成功により、スペースVLBIの為の電波干渉計が形成されたことが、1997年5月に検証され、主要目的は達成されたと考えてよいが、最終的な評価は時期的に早過ぎる。及第点であることは間違い無いだろう。

「ひてん」、「はるか」衛星の開発は、宇宙科学研究所における工学研究者の大多数が携わった大事業であったといえる。時代の節目において、近未来の科学ミッション遂行に必要な重要技術達成のため、宇宙科学研究所における可能な資源が全て投入されたと言える。

それでも米国、欧州に比較すれば小規模の、100人程度の工学部門研究者と経費内で、成功裏に打ち上げ、工学ミッションを達成したのは、評価に値する成果であったと考えて良い。宇宙科学研究所がいとたやすく、スケジュール通りに達成している技術が、実は日本において初体験であり、更に世界をリードする場合も有るくらいなのだが、これは先見性と挑戦的精神に基いて着実に進められているからで、並々ならぬ技術力に支えられているものと思われる。

長期的視野に立って、理学ミッションを成功させるために、理学の目からはじれったく感じられる工学主目的の実験衛星を打ち上げる考え方は、宇宙科学研究所独特の優れた方法と思われる。今やこのやり方は、欧州の科学衛星のプロジェクトにも取り入れられている。

工学実験衛星にできるだけ理学ミッションを搭載させたいという要求が理学者側から発生するのは当然のことである。工学的に成功するかどうか懸かっているため、理学ミッションとしてはリスクが大きいのだが、与えられた境界条件に合致する理学ミッションは見つかる筈で、工学と理学の共存は理想的である。この意味で2002年の工学実験衛星「MUSES-C」は、実に興味深い。科学目的として小惑星からのサンプルリターンが共存し、工学目的中には軌道変換、主推進機としての電気推進、軟着陸、サンプリングロボティクス無重力下の作業、離陸、地球再突入、安全回収という、幾つもの挑戦的な工学技術の開発が必要である。

「ひてん」、「はるか」2機の工学実験衛星においては、その中に含まれる新技術は大局的に見てそれぞれ

1) 軌道変換技術及び

2) スペースVLBI 用の電波望遠鏡に関する通信技術、

とまとめることができる。工学的にミッションは成功であったといえるが、これらプロジェクトに直接関連する技術及び関連しない技術、これ迄に培って来た幾多の技術の積み重ねに裏打ちされている。宇宙科学研究所の中心的工学研究者によっても、このことは度々指摘されている。宇宙科学研究所という小所帯で、携わる研究者間のコミュニケーションが円滑に機能し、新技術中の困難な挑戦的要素が、専門家による優れたアイデアの下に克服され、プロジェクト全体を成功させてきた。この点、或る程度十分な準備期間の下に、難しいが単一目的に近いプロジェクトを成功させるノウハウについては、宇宙科学研究所は十分その能力を証明したといえる。今後の問題点としては、小所帯でありながら、大プロジェクトを支える技術を、かなり短い期限内に開発するという責任を、現在の様な個人の超人的な働きのみで果たすことが、可能で無くなり、また適切でなくなることが懸念される。

第9章 科学衛星を支える工学技術

(1) 概要

第8章において工学実験衛星の評価を行ったが、将来の科学衛星に備えるために工学実験衛星を打ち上げ、野心的な新技術を開発するという面を見るだけでは不十分で、宇宙科学研究所がこれまで累々と蓄積してきた技術が、最先端の科学衛星打ち上げという側面と、どのように関わって来たかを概観しておきたいと思う。従って第9章では、宇宙科学研究所の科学衛星を支える主要な工学技術につき、特に過去10年間の衛星を中心にして調査し、評価する。

図1に示すように、宇宙科学研究所の今までの科学衛星は、近地球軌道を回るものが主力で、次第に重量を増加させてきている。これはロケットのペイロード能力の増加に対応するものではあるが、実際は衛星技術も丁度この傾向に沿って少しずつ改良を積み重ね、着実に高度化を図ってきた。科学衛星のプロジェクト毎に、少しずつ科学観測の要求条件が高度化・高精度化し、マイナーチェンジを積み重ねるうちに、いつの間にか世界でも一流の科学衛星技術を達成してきたという面を指摘できる。これは宇宙科学研究所という特徴的な機構にだけ存在する理学と工学間の2人3脚的協力が成功した典型的な例であると評価できる。

1) 姿勢制御

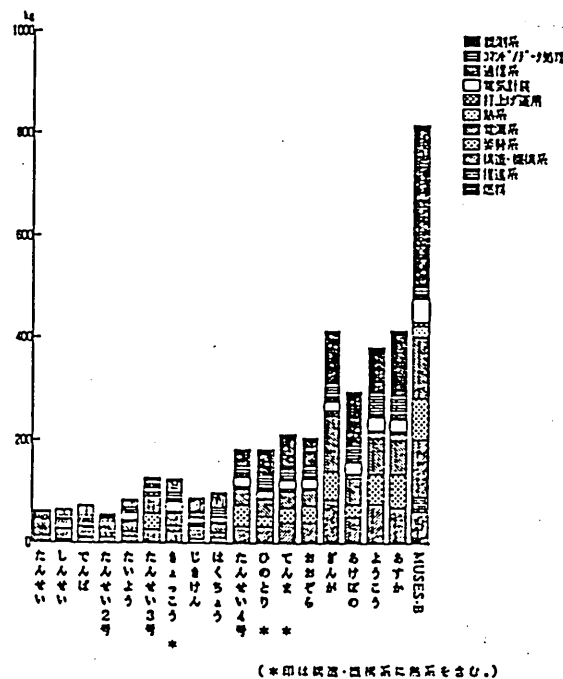


図1. 地球周回衛星の各サブシステム重量

大別すると、天文衛星系は3軸安定方式、太陽地球物理系はスピン安定方式を用いている。3軸安定衛星は搭載望遠鏡を所定の方角に指向させることが主目的で、表1に示されるように次第に精度を高めている。これは民間技術における高精度のセンサ、アクチュエータ及び制御論理やソフトウェア技術等の進歩に支えられて可能となったものである。

表1. 最近の ISAS の3軸姿勢安定衛星

衛星	ミッション	方式	精度	センサ	アクチュエータ
ぎんが '87.2	X線天文	バイアスモーメンタム	精度: $0.1^{\circ} \times 0.5$ マヌーバ速度: $1^{\circ} / \text{sec} (Z)$ $5^{\circ} / \text{hour} (X, Y)$	恒星センサ×2 (精度 30°) 精太陽センサ スピン型太陽センサ 地磁気センサ IRU (4-FRIG)	モーメンタムホイール (40Nms)×1 磁気トルカ×3
ようこう '91.8	太陽観測	バイアスモーメンタム	精度: 0.1° (絶対) 安定度: 1 arcsec/sec , 5 arcsec-min , 0.01-hour	精太陽センサ ($3^{\circ} / 1000$) 2次元太陽センサ 恒星センサ(精度 0.2°) 地磁気センサ IRU (4-FRIG)	モーメンタムホイール (30Nms)×2 磁気トルカ×3 CMG×2
あすか '92.2	X線天文	バイアスモーメンタム	精度: 1 arcmin (絶対) 安定度: $0.2 \text{ arcmin}/32 \text{ sec}$, マヌーバ速度: $0.2^{\circ} / \text{sec}$	恒星センサ×2 (精度 7°) 2次元太陽センサ スピン型太陽センサ 地磁気センサ IRU (5-FRIG)	リアクションホイール(6Nms) ×4 磁気トルカ×3
はるか '97.2	宇宙 VLBI	ゼロモーメンタム	精度: 0.01° (絶対)	恒星センサ×2 (精度 7°) マヌーバ速度: $0.04^{\circ} / \text{s}$ 粗太陽センサ×6 地磁気センサ IRU (4-FRIG+1-FOG)	リアクションホイール(6Nms) ×4 磁気トルカ×3 RCS

一方、スピン衛星の場合には、姿勢精度要求こそ 0.1° 程度と緩やかであるが、長いワイヤアンテナ(「Geotail」衛星では $50\text{m} \times 4$ 本)、マスト、ブームなど伸展・展開物を有する衛星では、振動の抑制が課題となった。

2) 太陽電池

宇宙科学研究所の科学衛星は、一貫してシリコン太陽電池を用い、次第に光・電力の変換効率を改良してきた。図2の実線(左側のスケール)に示されるように、「ひてん」衛星時代の13%台から、最近の17%台まで改良を進めている。この間、耐放射線特性向上のためのシリコン基板の厚さの減少、表面欠陥の制御、カバーガラスの改良、表面の受光部の逆ピラミッド型凹凸の導入、基板裏面のアルミニウム反射膜の採用など多くの技術を導入してきた。

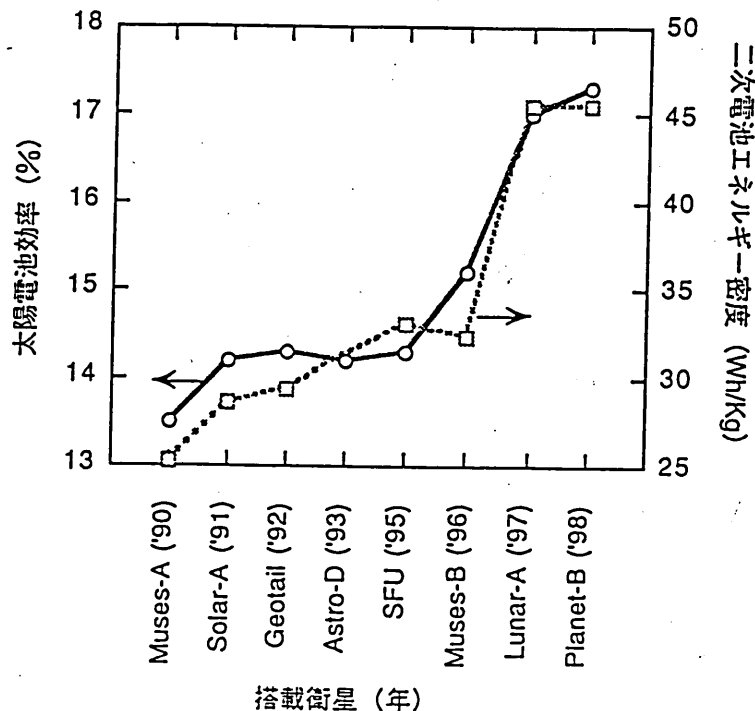


図2. 宇宙用太陽電池と二次バッテリーの高性能化

3) バッテリー

これ迄 NiCd バッテリーを一貫して用いてきたが、その中で容量の増大(2→12→19→28 AH)、エネルギー密度の向上(25→33 Wh/kg)を図ってきた。今後の「PLANET-B」、「LUNAR-A」では、水素吸蔵合金を用いた Ni-MH バッテリーを導入し、一段とエネルギー密度を向上させた。図2の点線(右側のスケール)は、バッテリーのエネルギー密度増加の歴史を、Wh/kg を単位として示したものである。

4) 通信機器

図3に示されるように、テレメトリのビットレートの歴史は、右上り傾向を示している。これを支えてきたのは、周波数帯の上昇(VHF→UHF→Sバンド→Xバンド)、送信電力の増大、地上アンテナや低雑音受信機の性能向上、搭載機器の小型化と高性能化、変調方式の改良などの技術進歩による。

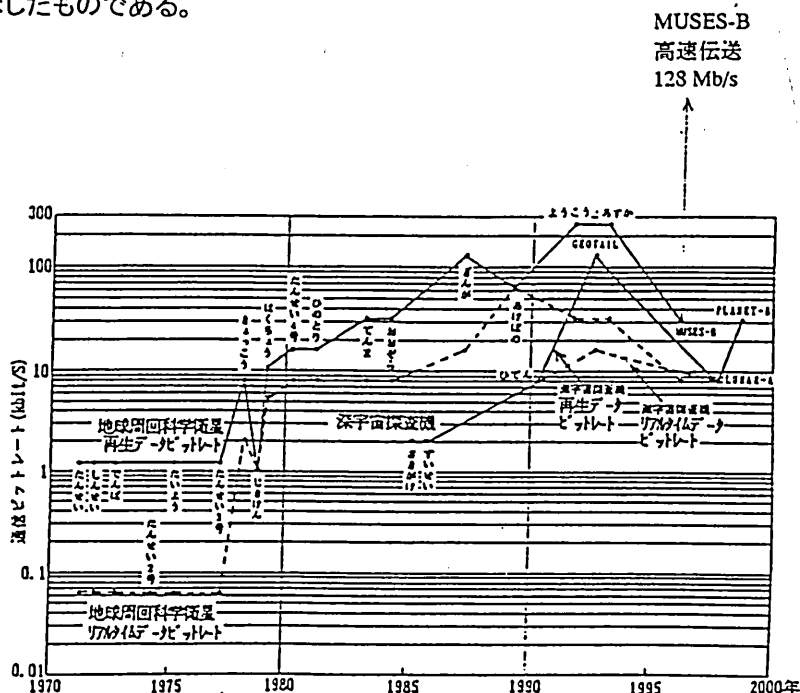


図3. テレメトリ通信ビットレートの推移

5) 衛星推進系

宇宙科学研究所のロケットの姿勢制御用に長い歴史を持つ、過酸化水素(H_2O_2)及びヒドラジン(N_2O_4)を用いたスラスターの技術蓄積に基づき、衛星としては「さきがけ」衛星において初めて衛星推進系(RCS:Reaction Control System)を開発した。「さきがけ」衛星の RCS は軌道上で 11 年半経過後も健在であった。その後「ひてん」、「Geotail」衛星では、23N および 3N スラスタを開発し、2重月スイングバイを実現した。

「SFU」、「はるか」衛星でも、同様のスラスタが軌道、姿勢制御に活躍し、「LUNAR-A」、「PLANET-B」では、更に2液(ヒドラジン+ N_2O_4)式の 500N スラスタを開発している。

6) 搭載データ処理系

搭載データ処理系は衛星の頭脳に当り、耐環境性(振動、衝撃、真空、熱、放射線等)に関する対策が中心的な技術課題であった。特に放射線に関しては、トータルドーズ損傷、シングルイベントアップセット/ラッチアップへの対策が重要で、民生用としては一世代前の CPU を用いた保守的な技術を採用し、過去の衛星では、高い信頼性を確保してきた。

フォルト・トレラント方式の宇宙用高信頼性・高速プロセッサの開発が現在進められている。図4にプロセッサ高速化の傾向を示す。データレコーダは、非可視期間中の大量のテレメトリデータを、衛星内に一時的に蓄積する目的で搭載される。図5に示されるように、搭載データの容量を増加させつつ、単位重量当りの記憶容量を増加させてきている。

「おおぞら」衛星(1984年)以前はテープレコーダが用いられてきたが、「あすか」衛星(1992年)からは磁気バブル素子を世界に先がけて実用化し、「はるか」衛星(1997年)以降は半導体メモリが主流となっている。

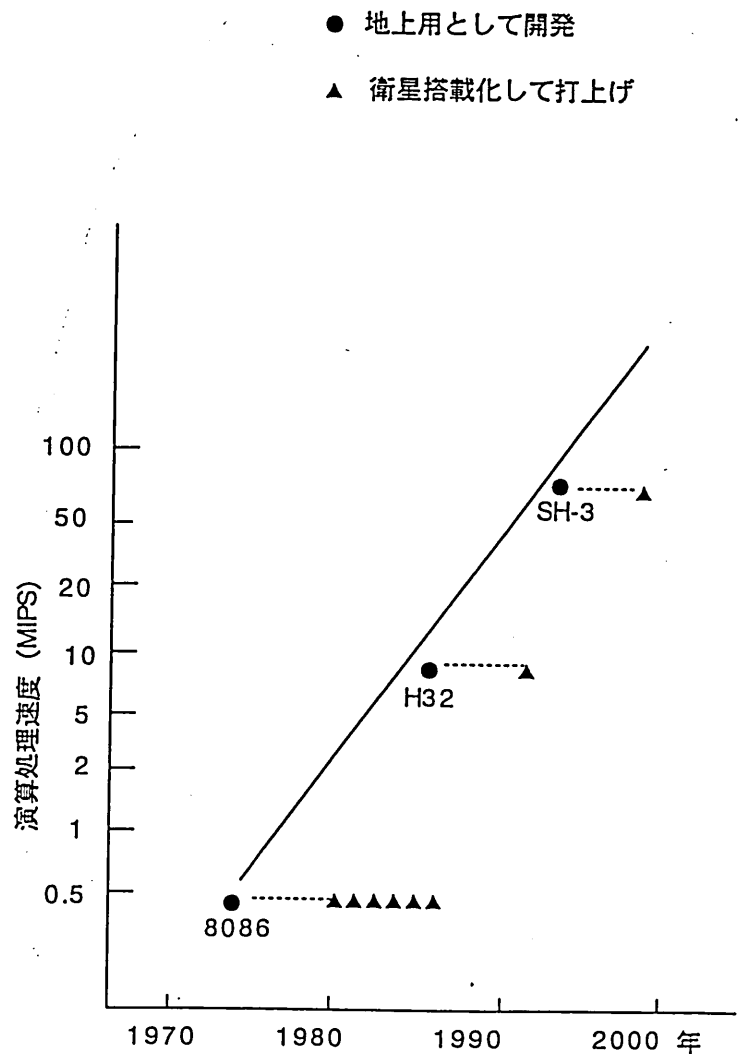


図4. CPUプロセッサの宇宙搭載化

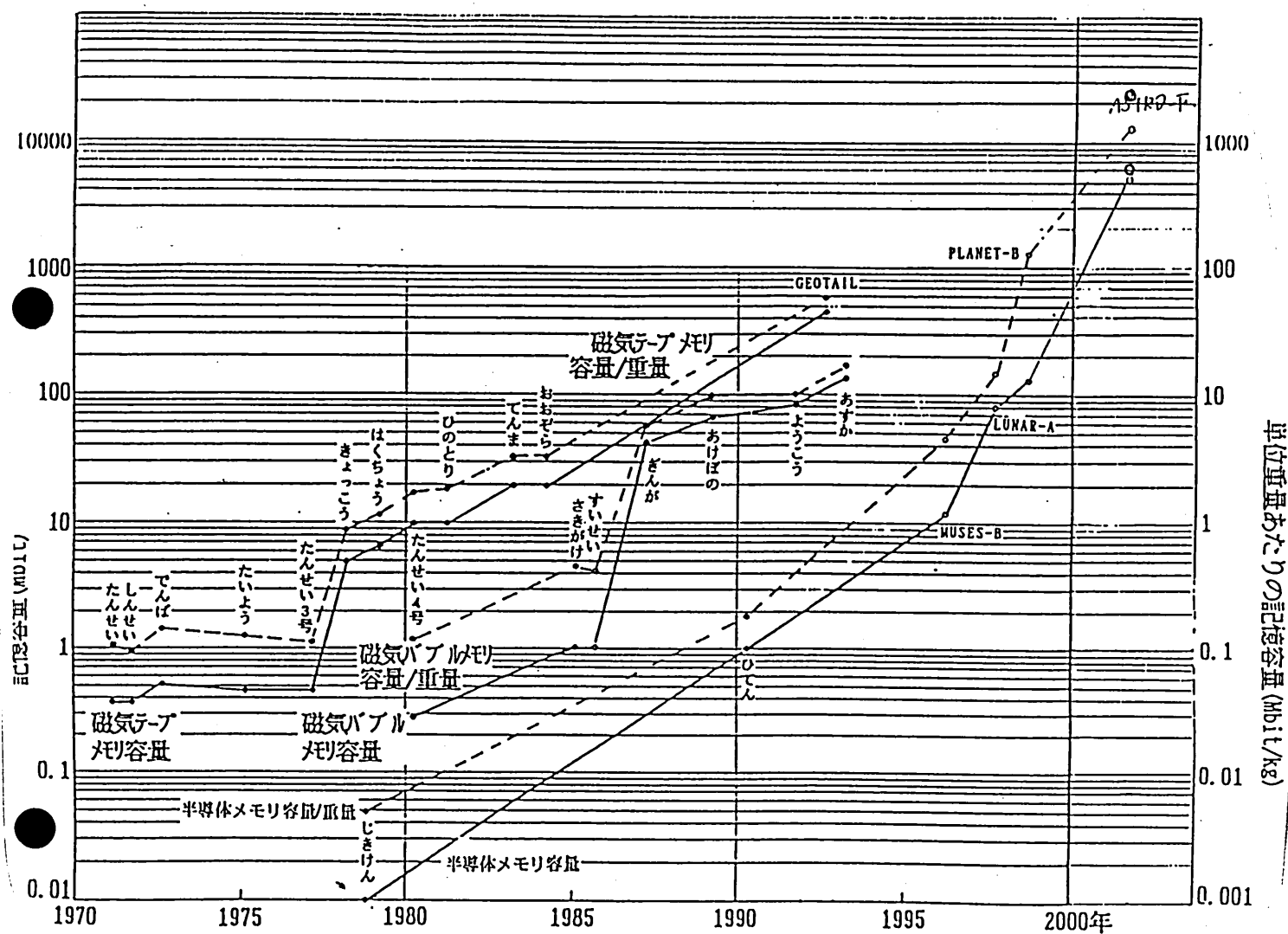


図5. データレコーダの記憶容量と単位重量当りの記憶容量

7) 衛星構造

衛星の多様化、形状の複雑化に対応しつつ、軽量化が常に大きな課題である。図6は太陽電池パドル構造の単位面積当りの重量の推移を示す。軽量化に大きく寄与する炭素繊維強化複合材料(CFRP)の発展は日進月歩であり、高強度、高弾性、飛躍的な素材性能向上が実現されつつある。加えて製造技術ノウハウの蓄積、構造解析精度の向上などにより、衛星構造の軽量化が進められた。「PLANET-B」ハイゲンアンテナのリフレクタには、日本で新たに開発された3軸織り CFRP 構造(図7)を採用している。日本古来の竹細工様の織り方を採用し、従来の複合材織物の欠点であった異方性を、1層(1PLY)で疑似等方性にするのができ、軽量化、高剛性化、高形状安定化を達成している。このアンテナのリフレクタ重量は、3軸織りの採用により「さきがけ」、「すいせい」衛星のアンテナの1/4にまで低減されている。

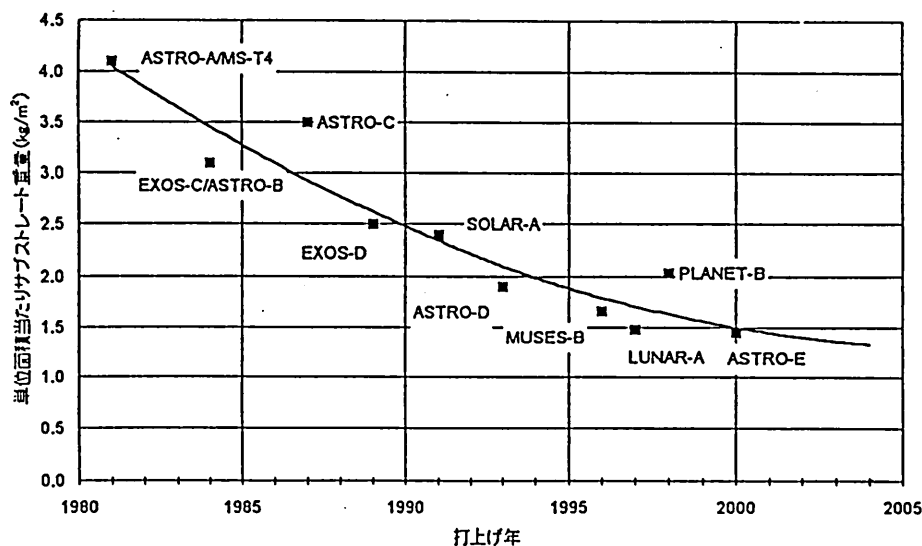


図6. 太陽電池に用いるパネル構造の重量推移

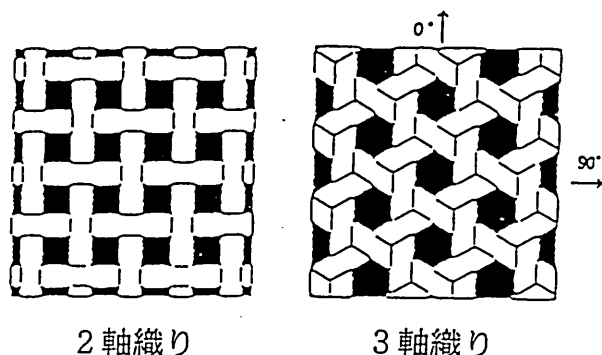
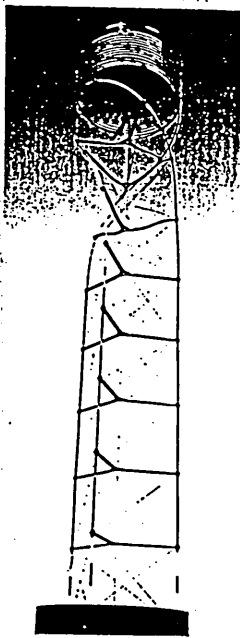


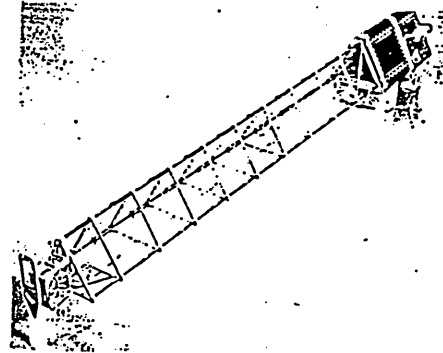
図7. CFRP 繊維の織り方

8) 展開・伸展機構

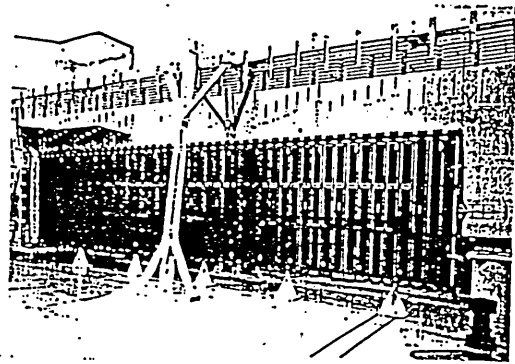
「あけぼの」、「Geotail」、「PLANET-B」衛星では、繊維強化樹脂製線材をコイル状に収納し、軌道上で伸展するコイラブルマストが開発された(図8-a)。伸展後の更に高い剛性要求に対応するため、関節型の高剛性マストを開発し(図8-b)、「SFU」衛星の2次元展開構造物(図8-c,d)に用いた。関節型の高剛性マストは、「はるか」衛星の大型展開アンテナの展開機構・支持構造物にも使用され、6本のマスト全てが無事伸展したことにより、有効径8mという大型電波望遠鏡を軌道上に構築することができた。



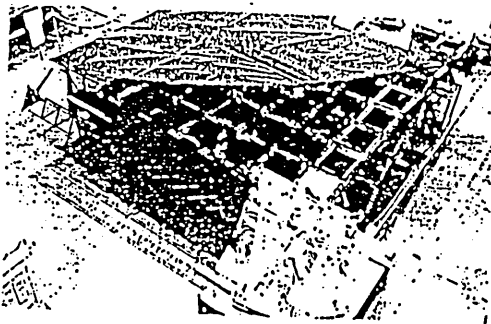
a. コイラブルマスト



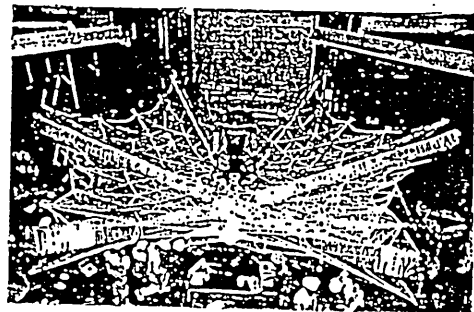
b 高剛性マスト



c「SFU」搭載のフレキシブル



d.「SFU」搭載の2次元展開構造物



e.「はるか」搭載の大型展開アンテナ

図8. 伸展・展開機構の例

長さ数 10 m のワイヤアンテナをリールから繰り出す伸展機構は、「あけぼの」、「Geotail」衛星に搭載され、無事伸展した。「PLANET-B」にも同様の伸展機構を用いたワイヤアンテナが搭載される。

9) EMC 対策

太陽・地球物理の科学衛星では、プラズマ、電場、磁場、波動などの観測を目的に高感度のセンサを搭載するため、EMC(Electro-Magnetic Compatibility; 電磁的適合性)に対する厳しい要求条件をもつ。対策として、次の様な手段が開発されてきた。

- (1) 長いマストを軌道上で伸展し、その先端にセンサを設置して衛星本体の雑音を避ける
- (2) 電磁放射を避けるため、計装配線に特別の工夫をする
- (3) 太陽電池の出力電流ループを最小にする実装法を採用する
- (4) 静磁場を小さく抑えるため、機器の使用材料の選択、磁化の防止、磁気ダイポールをキャンセルする実装法などに特別な配慮をする
- (5) 軌道上での衛星表面電荷の不均一分布を避けるため、導電性コーティング等により絶縁体部分を減らす

宇宙科学研究所の過去の科学衛星では、これらのノウハウを蓄積し、電磁的に極めてクリーンな衛星を開発する技術を確立した。

10) アウトガス対策

科学衛星に搭載する観測機器が高性能化するとともに、観測のための各種センサー表面等に付着する汚染物質の抑制が重要となってきた。このため次のような対策がとられてきた。

- (1) 可能な限り汚染物質を発生しない材料で衛星を製作する。このため、NASA が発行している各種材料の放出ガス特性データや独自に測定したデータを使って、材料選択を行っている。
- (2) 汚染に敏感な観測機器に対しては、地上で組立て、試験の際に可能な限り常時純窒素ガスを流し続ける等の対策を行ってきた。
- (3) 打ち上げ前に衛星の全ての部分を長時間真空中で加熱し、このような汚染物質を事前に可能な限り取り除く作業を、1991 年打ち上げの「ようこう」衛星以来実施している。この真空ベーキング作業を効率よく効果的に実施するために、衛星打ち上げ前の最終総合試験を真空下で行うための、宇宙環境試験装置(スペースチェンバー)の改良を順次行ってきた。

(2) 評価

① 周辺分野・産業界への影響

太陽電池の発電効率を上げるために宇宙科学研究所で開発した半導体表面の微小欠陥の検出法は、一般的な太陽電池の性能向上に貢献したばかりではなく、広く半導体の製作に応用されている。

軌道上で大きな構造物を伸展、展開するために宇宙科学研究所の開発した技術は、その後の宇宙開発に貢献している。また、折り畳む手法が地上の民生品の強度向上に応用され、例えば、缶入りジュースの強度を増すことによる缶の薄肉化を通じて資源の節減に寄与している。

宇宙科学研究所の科学衛星は、特にEMC(電磁適合性)の要求条件が厳しく、そのため開発したノウハウは、科学衛星やロケット搭載機器のみならず、広く地上機器の不要雑音発生抑圧に利用されている。

宇宙空間で衛星から放出される微小な気体はアウトガスと呼ばれ、他の機器に影響するため、厳しい抑圧が要求される。そのため、使用材料、加工方法、処理、機器設計などに特殊なノウハウを必要とする。宇宙科学研究所は、この分野では多くの経験をもとに技術の蓄積を行ってきており、他の宇宙機器、地上機器に応用されている。

② 総合評価と今後の課題

第9章では、科学衛星を支える主要技術について、過去10年程度の衛星を中心に調査と個別評価を行った。これらの優れた技術に支えられて、これまでの科学衛星のプロジェクトは成果を上げてきたといえる。にもかかわらず現在、科学衛星技術は次のように曲り角に来ていると思われる。

(1)高機能化:科学衛星が急速に高機能化、複雑化してきて、技術の難度がジャンプしている。この傾向には次の点が寄与している。

- (a) M-V ロケットの開発により、ペイロード能力が増したこと、その結果一層高度な天文ミッション、月・惑星ミッションが計画されるようになった。
- (b) 科学観測も、世界の科学をリードする一流の成果を得るために更に高度な技術が必要とする段階になった。

(2)多様化:科学衛星の多様性が拡大してきている。従来「おおすみ」衛星以来少しずつ大きさを機能を向上させ、いつの間にか現在の科学衛星に発展してきた。しかしながら今や、「MUSES-B」の大型アンテナ、「PLANET-B」の火星周回、「LUNAR-A」のペネトレータ、「ASTRO-E」の大型望遠鏡、「MUSES-C」のサンプルリターン、「ASTRO-F」の冷却技術などの例を挙げるまでもなく、ミッション毎の類似性に乏しく、多様性が広がっている。

これらの状況の変化を受けて

(3)新しい開発体制の確立へ:平成7年4月には次世代探査機研究センターが設立され、研究所内外の英知を結集し、新しい探査機技術開発に着手できる体制への芽ができた。

ことは評価できる。新しい開発体制の確立を期待したい。

第10章 まとめ

(1) 科学衛星のプロジェクトの実施体制

我が国の科学衛星のプロジェクトは、大学共同利用機関である文部省宇宙科学研究所を中心に、全国の大学等(国立天文台、国立極地研究所等の大学共同利用機関、通信総合研究所等を含む)の研究者の主体的な参加によって、次のような過程を経て立案され実現されてきた。

① プロジェクトは、研究者の有志が宇宙科学研究所の理学委員会あるいは工学委員会に

検討のためのワーキンググループ設置を提案することによって始まる。ワーキンググループ設置が認められると、プロジェクトの科学目的、技術的実現可能性、経費等についてより深い検討が開始される。ワーキンググループには、宇宙科学研究所の工学研究者も参加するのが通常である。

- ② ワーキンググループの検討を経て、実現可能な案として再度理学委員会あるいは工学委員会に提案されると評価委員会が作られる。評価委員会では、提案されたプロジェクト案について、科学目的の妥当性、技術的実現可能性、必要経費等プロジェクトの意義と実現可能性について評価が行われる。なお、理学委員会、工学委員会、評価委員会のいずれも、半数は宇宙科学研究所以外の研究者から構成されている。
- ③ 評価委員会の評価を受けて、理学委員会あるいは工学委員会は、新しいプロジェクトの提案として宇宙科学研究所に予算化の提案をする。宇宙科学研究所は、運営協議員会議の決定を経て、宇宙開発委員会への提案、文部省への予算化申請等プロジェクト実現への作業に入る。
- ④ プロジェクトの予算化が認められれば、ワーキンググループは、プロジェクト実施の実体として、宇宙科学研究所の機構と協力してプロジェクト実現に必要な開発に当たる。
- ⑤ 科学衛星打ち上げに至るまで、通常プロトモデルの開発に2年、フライトモデルの開発に3年、飛翔前試験に1年を要する。科学衛星打ち上げ後、同研究所外の研究者を多数含む研究者チームによって衛星の運用計画、データ処理計画が実行される。この段階で多数の大学院学生を含む若手研究者が中心的に活躍することになる。

「SFU」衛星のプロジェクトは、複数の省庁間の共同計画であったために、以上の流れとはやや異なった形で進められたが、他の科学衛星計画は概ね上記の経過を経て実現されている。このなかで、特記すべきこととして、

- ① 毎年一機の割合で衛星のプロジェクトが実現されてきたことにより、それぞれの研究分野が、長期的視野にたつて衛星のプロジェクトを立案することが容易となった。これが人材育成と技術の段階的な高度化に大きく寄与したと考えられる。この点は諸外国からも高く評価されている。
- ② 科学衛星の開発、特に運用・データ解析に大学院学生を中心とした若手研究者が多数参加することによって、結果的に若手研究者が最新の科学衛星のプロジェクトに主体的に加わる機会を得ている。このことは、若い研究者に直接宇宙から送られる生のデータに接する興奮を与えるもので、教育的観点、次の世代を担う人材の養成という観点、フレッシュな視点からの研究の展開という点からも評価すべきことである。
- ③ 宇宙科学研究所では、伝統的に科学衛星のプロジェクトの実現に向けて、理学研究者と工学研究者の共同作業が行われてきたが、研究所の内外を問わず理・工の協力は更に発展していく傾向にある。
- ④ 科学衛星のプロジェクトは巨大プロジェクトであり、国際社会から独立した存在ではありえない。立案から成果の共有まで含めて、国際的視野にたつて遂行されるべきであると考えられる。「あけぼの」衛星当初から見られる観測データの共有、搭載機器の共同開発に始まり、「はるか」プロジェクトに見られるような国際的なネットワークによる観測の実現に至るまで、国際協力の視点でも十分な成果を上げていると評価できる。

(2) 将来へ向けての課題

今回評価の対象としてあげた「あけぼの」衛星から「はるか」衛星までについては、科学的成果、実施体制、費用の面で指摘すべき大きな問題点はないと考えられる。しかし、すでに始まっている太陽系の惑星探査や立案がすでに進められている高度な天文観測衛星を実現していく上で、いくつかの課題について検討を要することも事実である。

- ① 我が国の科学衛星のプロジェクトは、毎年一機の割合で中規模の衛星を実現することによって、健全な発達を遂げて現在に至ったと考えられる。しかし、衛星の大型化、高度化

に伴うコスト増、必要とする衛星技術の飛躍的な高度化は、年一機体制を崩す可能性のあることも事実である。米国では近年、日本におけるプロジェクトの実施体制も参考にし、faster and cheaperの方針で衛星を実現する傾向にあるが、我が国における現行の年一機体制という良好な実施体制を踏まえつつ、なお、我が国の研究面での国際競争力の低下をもたらさない体制の在り方について検討が必要である。

- ② 科学衛星のプロジェクトが重要な位置を占める研究分野は急速に拡大しつつある。一方で、衛星のプロジェクトに必要とされる技術は高度で経験を必要とするものになっている。そのために新しい研究分野が衛星のプロジェクトを始める上での障壁はますます高くなる傾向にある。我が国の科学衛星のプロジェクトが幅広い分野で成功を収めていくためには、新しい研究分野の参加は不可欠である。新しい分野の研究者が研究開発を実施して技術を向上していける体制の構築が必要であろう。
- ③ 科学衛星の状態監視等の衛星運用、高度な天文衛星からの膨大なデータの一次処理、データベースの整備、国内外の研究者からの問い合わせに対する対応等は本来研究支援者によって行われることが適切であるが、現行の体制では、これらの作業に携わる若手研究者の負担が過度に大きくなっていることから、研究者が本来の研究活動に専念することができるよう研究支援体制の整備を図ることが必要である。
- ④ 国際協力の重要な要素の一つに観測データの国外研究者への公開がある。データの公開によって、研究者の幅が広がり新しい考えも持ち込まれ研究が活性化して国内の研究者も利益を受けることから、今後、これらのデータの発信をより積極的に行うとともに、国内の研究者の利用が一層促進されるよう研究環境の整備を進めることが必要である。

(3) 総合評価

科学衛星のプロジェクトは、衛星の製作、打ち上げ、運用、データ解析という長期にわたる一連の作業を含み、延べ数100人に及ぶ理学・工学の研究者、技術者の参与によって実現される。また、打ち上げ施設、運用解析設備等のインフラストラクチャーを必要とするため、いわゆる巨大科学として位置づけられている。しかしながら、我が国の科学衛星のプロジェクトは宇宙科学研究所を中心に全国の関連分野の研究者が企画段階から主体的に参加することによって実現され、国際的な観点から見れば比較的少ない予算・人員で十分な成果を上げてきたといえる。これらの成果は我が国のみならず人類共通の資産であり、人類の知的フロンティアの拡大に資するものであって、他の手段では獲得できないものである。

以上の観点から、今回評価の対象とした「あけぼの」、「Geotail」衛星による地球周辺科学分野の研究、「ようこう」衛星による太陽物理分野の研究、「あすか」衛星によるX線天文分野の研究、SFU搭載の「IRTS」による赤外線天文分野の研究、打ち上げ間もない「はるか」衛星による電波天文分野の研究、「SFU」衛星による宇宙利用分野の研究、工学実験衛星「ひてん」による軌道制御技術、「はるか」衛星による大型アンテナ展開等の技術開発等で得られた成果は、投入された経費、人材を勘案して妥当なものであったと考えられる。

なお、今後の我が国における宇宙科学研究の在り方については、行財政改革の進展及びこれに伴う宇宙開発関連施策についての様々な議論の動向を踏まえながら、今後、改めて検討する必要がある。

科学衛星の概要

1. 「あけぼの」衛星(第12号科学衛星 EXOS-D)

打ち上げ年月日： 1989年2月22日

射 場： 宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所

打ち上げロケット： M-3SII ロケット4号機

形 状： 右図参照

衛星重量： 295.4 kg

軌 道： 遠地点 10500km

近地点 275km

軌道傾斜角： 75度

姿 勢： 太陽指向

(磁気トルカーによる制御)

通 信： Sバンド64kbps (PCM)

UHF(アナログ)

追跡・受信： スウェーデン (ESRANGE)、カナダ

(プリンスアルバート)、

南極(昭和基地)、鹿児島

発生電力： 250W

観測装置： MGF(磁場計測器：東北大学)

EFD(電場計測器：宇宙科学研究所)

TED(電子温度計測器：宇宙科学研究所)

VLF(低周波電波計測器：京都大学)

PWS(高周波電波計測器及び電波サウンダー：東北大学)

SMS(超熱的イオン計測器：カナダNRCC及び通信総合研究所)

LEP(プラズマ計測器：宇宙科学研究所)

ATV(オーロラ撮像装置：東京大学)

RDM(放射線モニター：宇宙科学研究所)

国際協力： カナダNRCC (搭載計器の提供とテレメーター受信)

開発年次： PM 1984年、1985年

FM 1986年、1987年

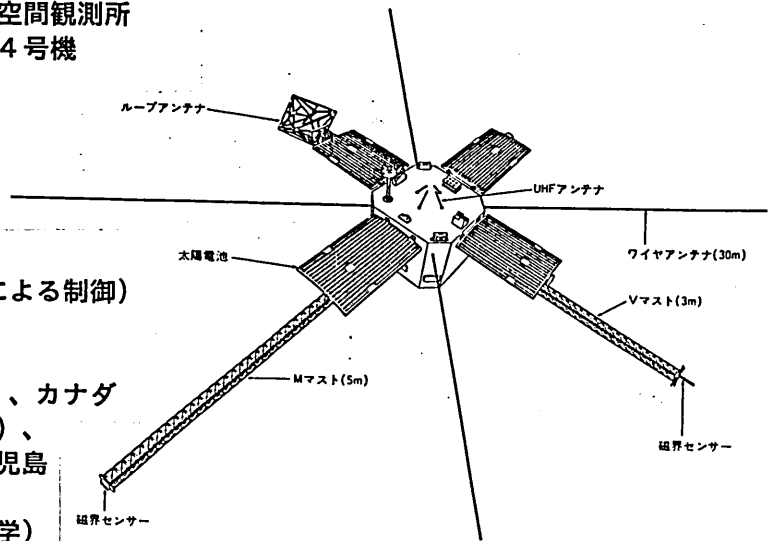
試 験： 1988年

運 用：1989.2-現在

データベース等：当初、大型センター計算機の大容量記憶媒体を利用
オンラインアクセスを試みる。漸次ワークステーションに移行中。

開発経費： 衛星 52.3 億円、ロケット 41.1 億円

第12号科学衛星「あけぼの」(EXOS-D)外観図



2. 「Geotail」衛星（磁気圏尾部観測衛星）

打ち上げ年月日： 1992年7月24日

打ち上げロケット： Deltail ロケット

射 場： ケネディ宇宙センター（米）

形 状： 右図参照

衛星重量： 1009 kg

（内軌道制御用燃料360 kg）

軌 道： 遠地点 210 Re

2重月スイングバイ軌道、図参照）

姿 勢： スピン安定

（スピン軸は黄道面に略垂直）

通 信： Xバンド64kbps（PCM）

Sバンド16 kbps

追跡・受信： 臼田64m及びDSN局

発生電力： 320 W

観測装置： EFD（電場計測器、日本、米国、ESA）

MGF（磁場計測器、日本、米国）

LEP（プラズマ計測器、日本）

CPI（プラズマ計測器、米国）

HEP（高エネルギー粒子計測器、日本、ドイツ）

EPIC（高エネルギー粒子計測器、米国）

PWI（波動計測器、日本、米国）

国際協力： 米国（観測機器の一部、打ち上げ、DSN支援）、

ISTP計画の一部として広範囲の国際協力

開発年次： 概念設計 1985年度

PM 1986, 1987, 1988年度

FM 1989, 1990, 1991年度

運 用： 1992.7ー現在

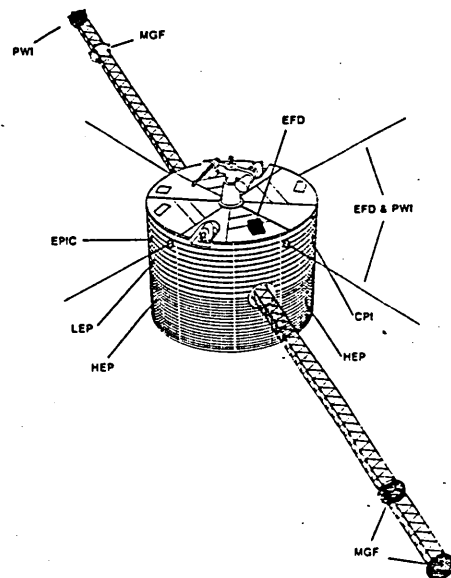
データベース等： KP（キーパラメーター）作成はNASA、未校正だが大まかな様子は分るデータで

論文発表は出来ないが見ることは自由。

SDB（サイエンスデータベース）研究用の簡易データベース。

共同研究の基本生データ、主として観測チームが使用。

開発経費： 90.6 億円、ロケットは米国の負担



GEOTAIL衛星の観測機器。
MGFは磁場計測装置、EFDは電場計測装置、
LEPとCPIはプラズマ計測装置、HEPと
EPICは高エネルギー粒子計測装置、また
PWIはプラズマ波動計測装置である。

3. 「ひてん」衛星（第13号科学衛星、MUSES-A）

打ち上げ年月日： 1990年1月24日

射 場： 宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所

打ち上げロケット： M-3S II ロケット5号機

形 状： 右図参照

衛星重量： 196kg

軌 道： 月2重スイングバイ軌道

発生電力： 110W

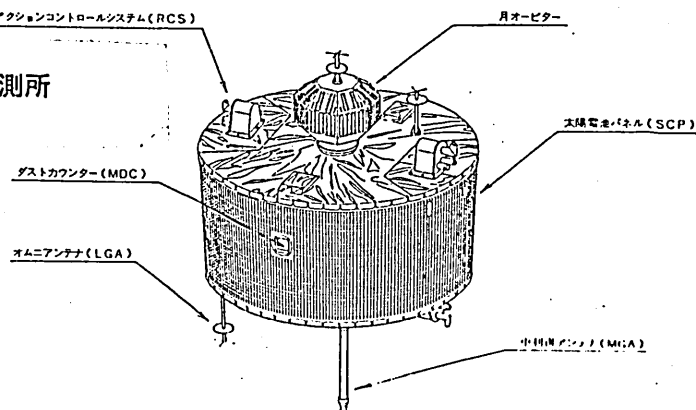
観測装置： ガスト計測器（ドイツ）

開発年次： PM 1985, 1986年

FM 1987, 1988年

運用期間： 1990.1-1993.4

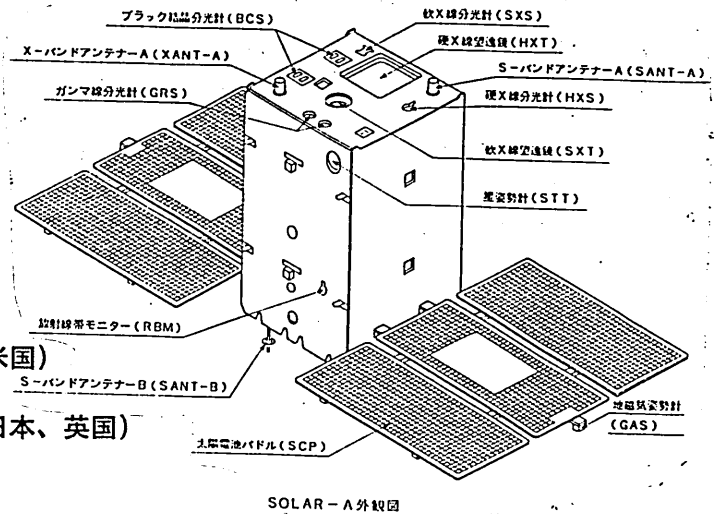
開発経費： 衛星 40.3億円、ロケット 43.3億円



第13号科学衛星「ひてん」(MUSES-A)外形図

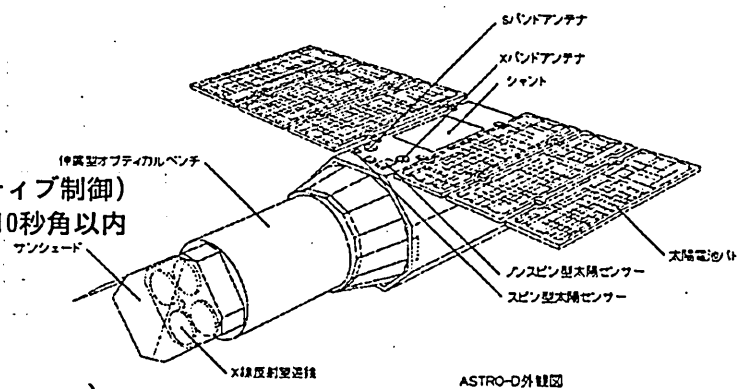
4. 「ようこう」衛星 (第 14 号科学衛星、SOLAR-A)

打ち上げ年月日： 1991 年 8 月 30 日
 打ち上げロケット： M-3S II ロケット 6 号機
 形状：右図参照
 軌道： 近地点 518km
 遠地点 793km
 軌道傾斜角： 31.3 度
 軌道周期： 97.9 分
 衛星重量： 380kg
 発生電力： 560 w
 観測装置： 軟X線望遠鏡 (SXT: 日本、米国)
 硬X線望遠鏡 (HXT:)
 ブラック結晶分光器 (BCS: 日本、英国)
 広帯域分光器 (WBS)
 姿勢安定度： 1 秒角/秒
 国際協力： 米国、英国
 データベース等：現在宇宙科学研究所のDARTSシステムに登録一般に開放されている。
 開発年次： 概念設計 1986年
 PM 1987、1988年
 FM 1988、1989、1990年
 運用： 1992.7-現在
 開発経費： 61.3億円、ロケット 44.0億円



5. 「あすか」衛星 (第 15 号科学衛星、ASTRO-D)

打ち上げ年月日： 1993年2月20日
 打ち上げロケット： M-3SIIロケット 7 号機
 形状：右図参照
 衛星重量： 420kg
 軌道： 遠地点 615km
 近地点 525km
 軌道傾斜角： 31度
 姿勢：太陽指向 (磁気トルカーによるアクティブ制御)
 天体補足制度1分角以内、姿勢安定度10秒角以内
 通信： Xバンド 262kbps (PCM)
 Sバンド 32kbps (PCM)
 追跡・受信： 鹿児島
 発生電力： 490W
 観測装置： X線反射望遠鏡 (XRT= X-ray Telescope) :
 NASAゴダード宇宙飛行センター・名古屋大学・宇宙科学研究所
 X線CCDカメラ (SIS= Solid-State Imaging Spectrometer):
 マサチューセッツ工科大学・大阪大学・宇宙科学研究所・
 ペンシルバニア州立大学
 撮像型蛍光比例計数管 (GIS= Gas Imaging Spectrometer):
 東京大学・宇宙科学研究所
 国際協力： 米国
 開発年次： PM 1988. 4 - 1990. 3
 FM 1990. 4 - 1992. 3
 試験： 1992. 4 - 1992. 12



運用： 1993.2-現在

データベース等：取得データの一次処理、観測提案者への配布、公開データの管理などは、NASA が中心になって担当し、日本側が協力する。現在宇宙科学研究所のDARTSシステムに登録一般に開放されている。

経費： 衛星 70.2億円、ロケット 44.5億円

6. 「はるか」衛星 (第16号科学衛星、MUSES-B)

打ち上げ年月日： 1997年2月12日

打ち上げロケット： M-Vロケット1号機

形状：右図参照

衛星重量： 800kg

軌道： 遠地点 21,400km

近地点 560km

軌道傾斜角： 31度

搭載観測機： ANT(8m大型展開アンテナ、宇宙科学研究所、国立天文台)

22LNA/22DC(22GHz受信機器、宇宙科学研究所、国立天文台)

5LNA/5DC(5GHz受信器、宇宙科学研究所)

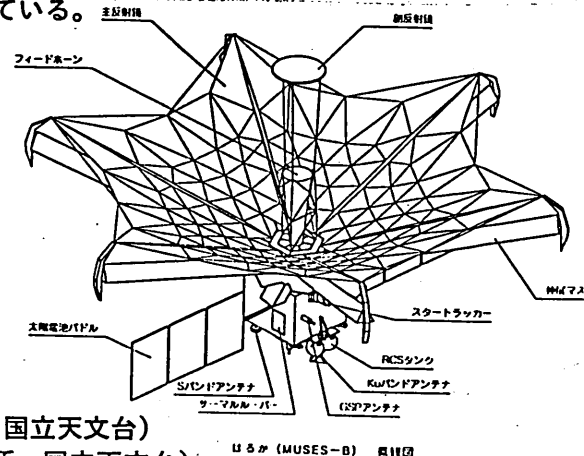
1.6LNA/1.6DC(1.6GHz受信機器、宇宙科学研究所)

開発年次： PM 1989、1990、1991年

FM 1992、1993、1994年

運用期間： 1997.2-現在

開発経費： 衛星 74.5億円、ロケット 44.5億円



7. 「SFU」衛星

打ち上げ年月日 1995年3月18日

打ち上げロケット： H-II ロケット3号機

回収： 1996年1月20日、STS-72、Endeavor

形状寸法： 本体 直径4.46m、高さ2.8m

パドル 長さ24.4m、幅2.4m(右図参照)

質量： 打ち上げ時 3850kg

回収時 3500kg

軌道： 高度 打ち上げ時 350km

運用時 486km

回収時 472km

軌道傾斜角： 28.5度

姿勢軌道制御： 3軸制御、太陽指向

リアクションホイール： 3、磁気トルカー、3Nスラスター： 12

23Nスラスター： 8(軌道制御用)

通信： Sバンド通信系 1,16,128kbps(地上局及びシャトルとの間)

電力： 2.8kw、実験用 850w

ミッション機器： IRTS(宇宙赤外線望遠鏡、宇宙科学研究所)

EPEX(電気推進実験、宇宙科学研究所)

SPDP(プラズマ計測装置、宇宙科学研究所)

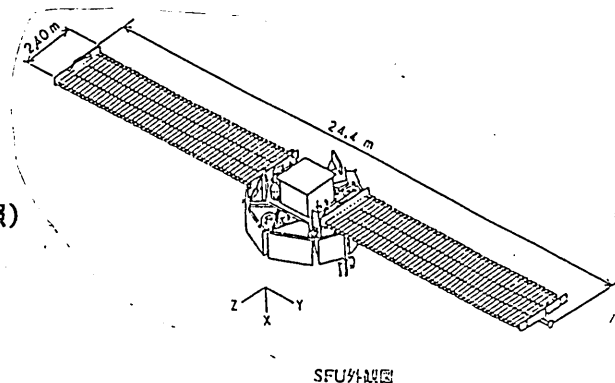
BIO(宇宙生物実験、宇宙科学研究所)

MEX(凝固、結晶成長実験、宇宙科学研究所)

2D/HV(2次元展開/高電圧ソーラーアレイ、宇宙科学研究所)

EFFU(SFU搭載実験機器部、宇宙開発事業団)

GDEF(気相成長基礎実験装置、宇宙開発事業団)



SFU外観図

GHF(複合加熱炉、新エネルギー・産業技術総合開発機構/無人宇宙実験システム開発機構)

MHF(焦点加熱炉、新エネルギー・産業技術総合開発機構/無人宇宙実験システム開発機構)

IHF(単純炉、新エネルギー・産業技術総合開発機構/無人宇宙実験システム開発機構)

開発年次： PM 1987、1988、1989、1990年

FM 1991、1992、1993、1994年

運用期間： 1995.3-1996.1

開発経費： 総経費 630 億円

内、宇宙科学研究所分、150 億円 (シャトルによる回収関係分 50 億円を含む)

附属資料2

学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会（第15期）委員名簿

委 員	河 合 隼 雄	国際日本文化研究センター所長
	鳥 井 弘 之	日本経済新聞社論説委員
	増 本 健	財団法人電気磁気材料研究所長
	山 本 明 夫	早稲田大学教授（大学院理工学研究科）
	（部会長） 吉 川 弘 之	日本学術会議会長
専門委員	海 部 宣 男	国立天文台教授
	小 杉 健 郎	国立天文台教授
	小 平 桂 一	国立天文台長
	佐 藤 勝 彦	東京大学教授（大学院理学系研究科）
	澤 岡 昭	東京工業大学応用セラミックス研究所長
	末 松 安 晴	高知工科大学長
	中 澤 清	東京工業大学教授（理学部）
	西 田 篤 弘	宇宙科学研究所長
	藤 原 俊 隆	名古屋大学教授（工学部）
	牧 島 一 夫	東京大学教授（大学院理学系研究科）
	松 尾 弘 毅	宇宙科学研究所教授
	松 本 紘	京都大学教授（超高層電波研究センター）
	八 坂 哲 雄	九州大学教授（工学部）

（職名は、平成10年1月16日現在）

附属資料3

学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会（第15期）
科学衛星プロジェクトレビュー・ワーキンググループ委員名簿

委 員	小 杉 健 郎	国立天文台教授
(座長)	佐 藤 勝 彦	東京大学教授（大学院理学系研究科）
	澤 岡 昭	東京工業大学応用セラミックス研究所長
	中 澤 清	東京工業大学教授（理学部）
	藤 原 俊 隆	名古屋大学教授（工学部）
	牧 島 一 夫	東京大学教授（大学院理学系研究科）
	松 本 紘	京都大学教授（超高層電波研究センター）
	八 坂 哲 雄	九州大学教授（工学部）
事 務 局	鶴 田 浩一郎	文部省科学官・宇宙科学研究所教授
	福 島 登志夫	文部省学術調査官・国立天文台助教授

（職名は、平成10年1月16日現在）