

宇宙ニュース
宇宙科学研究所
 1997. 1 No. 190

特集 — SFUとその成果 —

回収されたSFUとシャトルの日の出（NASA提供）

新年のご挨拶

所 長 西 田 篤 弘

あけましておめでとうございます。

新春の朝日に輝くKSCの整備塔では、M-Vの1号機が発射を待っています。森先生が所長をしておられた頃からの夢であったMロケットの大型化がようやく現実のものになる時が迫りました。M-Vの開発にはさまざまな新しいアイデアが盛り込まれ、関係者の創意と工夫が生かされています。技術的な課題も担当者の懸命の努力で克服されてきました。百点満点の打上げを期して、慎重に目を配りながら確実に作業をすすめていただきたいと思います。

M-V-1で打ち上げられるMUSES-Bは、大型で精密な展開構造などの技術開発を主な目的とする工学衛星です。2.5 mのノーズフェアリングに収納されたアンテナが宇宙空間で展開され、直径約8 mのパラボラを作ります。主鏡面はモリブデン線によるメッシュで、メッキされて金色に輝いています。ケーブルによる支持構造は蜘蛛の巣のようで、アイデアの面白さもさることながら製作はたいへん苦勞の多いものでした。ユニークな設計思想と、これを現実のものとした工学グ

ループと技術陣に敬意を表します。

M-Vロケットの登場によって、太陽系への本格的な探査機や、従来よりも何倍も重い天文衛星を打ち上げることができるようになりました。MUSES-Bのパラボラは宇宙を探索する電波望遠鏡です。地上にある電波望遠鏡と同時観測を行い、干渉計を形成することによって、「東京からシドニーの米粒を見分ける」ほどの分解能で活動銀河核などの構造を精密に観測し、その謎にせまります。アメリカなど世界中の電波天文台では準備を整えてMUSES-Bの打上げを待ちかまえています。干渉計のデータ処理では、国立天文台と密接に協力しながら解析をすすめて行くことになっています。

私は昨年11月に招かれてパリで開催された「ヨーロッパの科学衛星：成果と展望」というシンポジウムに出席しましたが、将来計画についての講演のほとんどすべてが宇宙科学研究所の科学衛星の成果を踏まえ、それに基づいて次の計画を議論したのが印象的でした。今年も全国の宇宙理学者や工学者と力を合わせて、宇宙科学の最先端を切り開いて行きましょう。

日本中が注目する中、SFUが無事帰ってきてから、早くも一年が経ちました。主として、中心となって開発をすすめてきた宇宙研の目で顛末を特集しました。ISASニュースらしい切り口で平易にとお願いしましたが、いかがでしょう。

SFU プロジェクトを終えて



栗 木 恭 一

SFUプロジェクトは文部省宇宙科学研究所（ISAS）、科学技術庁（STA）／宇宙開発事業団（NASDA）、通商産業省（MITI）の共同プロジェクトとして、1987年より発足した。通商産業省の実務は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）／無人宇宙実験システム研究開発機構（USEF）が実施した。システムとりまとめ、追跡管制及び軌道運用、NASAとの諸調整はISASが、H-IIロケット打上げ及び搭載作業はNASDAが、そして実験にかかわる電力、データ処理等のサブシステムはNEDO／USEFが、それぞれ主体となって担当し、他の二者がこれに協力するという体制で実施された。実験装置は、リソース（重量、運用時間など）を均等に分けることを前提に、三者が独自に開発した。

●プロジェクトのはじまり

SFUの公称は「宇宙実験・観測フリーフライヤー」で1986年に宇宙開発委員会が決めたものである。どうしてこんな長い名になったかは知らない。一方Space Flyer Unit（SFU）という英語名は1982年頃、当時SEPAC（巻末参照）主査の任にあたられていた大林教授がNASAマーシャル宇宙飛行センターの科学者らと一緒につけた名前である。名付けられたフリーフライヤーは8角形で、これが原形となった。長友教授は「SFとはどうも嬉しくない」と絵空言に終るのを気にしておられたが、筆者はライト兄弟「Flyer」の宇宙版として、航空機のように再利用を目指す名前が気に入っている。

1983年に宇宙研に「小型宇宙プラットフォーム（SFU）ワーキンググループ」が設置され設計が始まった。初期の設計全重量は3トン（H-II打上げ時は3,850kg）で、「3トンでも小型なの？」とよく聞かれた。当時は、米国スペースインダストリー社、フランスCNES／マトラ社のSOLARISなど5～10トン級のプラットフォーム構想がひしめいていたので、多少気がひけて「小型」を付けた

ような気がする。また、初期構想ではスペースシャトルで打ち上げて放出した後、約1週間シャトル周辺で実験を行い、同じシャトルで回収して地上に戻る方式であった。その後1986年に、打上げにはH-IIを使用することが決まり、さらに、89年には気象衛星ひまわり5号との二重打上げが決まった。そのためSFUは投入高度約300kmから運用高度約500kmに自力で達することになった。この軌道上昇とスペースシャトルとのランデブ（下降）のため、軌道変換用推進系（OCT）が装備され、650kgのヒドラジンが搭載された。

●概念設計

SFUの主構体は図1のように8角形のトラスで、8つの区域に8個の台形箱がはめられている。その2個はバスユニット（BSU）、6個はペイロードユニット（PLU）と呼ばれ、後者が実験者に貸し出される。実験者は自分流に、この箱に実験装置を搭載し、試験を済ませ、システムとインターフェイスを整合させれば完了となる。「PLUのアクセスパネル（宇宙側面）が次々に開いて実験が行われれば、これはタンクタンクローだ」と長友教授の発言。旧い世代にしか通用しないとは思ったものの、SFUマスコットとして図2のようなパッチになった。BSU、PLUの最後のUこそSFUのUnitを表し、モジュール設計を果たしたことになる。これでやっと名前の話に落ちがついた。8角形についてはもう一つ説明

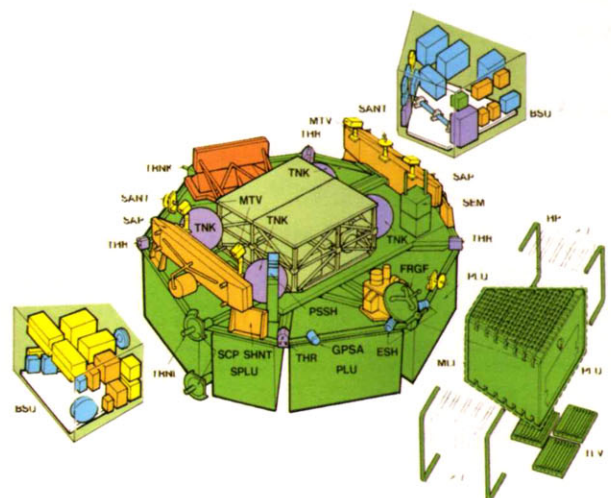


図1. SFUシステム概観



図2. SFUミッションエンブレム

が要る。スペースシャトルのカーゴベイ(荷物室)は茶筒型をしており、その利用料金はペイロード(搭載荷物)の軸方向専有率(荷物室の長さ方向に占める割合)又は搭載重量専有率のどちらか大きいほうに比例する。SFUの厚さ方向はカーゴベイ軸と一致しており、NASAエンジニアから「パンケーキのように設計するのがコツ」と教わっていた。そして八角形のパンケーキが出来上がった。プロジェクト管理としてはいつもこの厚さが気になり、アンテナが飛び出したと聞いてはとんでいき、「10センチ1.5億円だぞ」と絶えず「平身低頭」を強要してまわった。SFUシステムの性能実績を表1にまとめた。

太陽電池パドル(SAP)に関しては初期には屏風型アレイも候補であったが、側面に付けるとアクセスパネルを塞ぐ、図1の上面に乗せると厚みを増やす、などの

表1. SFUの性能実績概要

軌道：高度	打上げ分離時	330km
	実験運用開始時	486km
回収時	472km	
傾斜角	28.5度	
形状寸法：本体	4.46m(直径)×2.80m(高さ)	
太陽電池パドル	24.4m(展開時)×2.40m(幅)	
重量：打上げ時	3850kg	
回収時	3500kg	
電力：発生電力	3.0kW	
実験用	850W	
姿勢制御：太陽指向，三軸姿勢制御		
通信：Sバンド		
対地上	1kbps, 16kbps, 128kbps	
対シャトル	1kbps	
レコーダー容量	4Mビット+80Mビット	
微小重力環境：地上の10,000分の1以下		

理由から選ばれなかった。薄膜型アレイにすれば、厚さをとらぬばかりか、20kg/kW(駆動部を除く)という軽量化の最先端に行くという魅力があった。開発初期に提唱したプラットフォーム開発心得に、「コアシステム(バス系)にハイテクは用いない。ハイテクは実験として」という一条があった。言い訳はともかく抗し難いものがあり、SAPはSFUコアシステムで唯一の新規開発の項目となった。一翼の長さは約10m、幅2.4m、全出力は3.0kWで、実験用として850Wが供給された。

●NASA安全要求

推進系燃料には姿勢制御用(RCS)、軌道変換用(OCT)ともにヒドラジンを用いた。ヒドラジンに対して極度に警戒するNASA安全パネル(裏表紙参照)とは、開発全期間に及ぶデスマッチを演じた。以前にシャトルでの回収を経験していたESA(ヨーロッパ宇宙機関)のフリーフライヤEURECA(European Retrieval Carrier)のグループから、審査の厳しさを事前に聞いてはいたが、聞きしに勝るものがあつた。長友教授提唱の設計基本要条件の一つの「無人のフリーフライヤ、SFUシステムは有人システムである(シャトル回収の故に)」を思い知らされた。安全パネルが怖れるのは、凍結時に体積が減り解凍時に増えるヒドラジンの凍結・解凍に伴う配管破裂である。SFUでは楕円断面の配管を用いて解凍時の膨張を吸収する設計を第一次安全審査で示し、NASAもこの新機軸を歓迎した。ところが、製作にかかった後で安全パネルの不安が募り、日本にまで足を運んで討議を重ねた挙句、シャトルからヒーター電力を貰って保温をすることとなった。見返りとして、ヒーター系が不調となった場合はシャトルの姿勢により保温することで落着した。ヒドラジン系の設計を終え、一部製作にかかった時点でのコンポーネント追加や型式変更はこの他にもあり、後の射場での不具合の遠因となり苦汁をなめさせられた。大局的に観ると、H-II打上げに合わせたスケジュールはシャトルのそれと一年近くの時差があり(NASAは財政事情から一般にスケジュールを圧縮する方向)、SFUはあらゆる面で板挟みとなった。

表1のように通信系にはSバンドを用い、データ処理系は16ビットのマイクロプロセッサ及びデータレコーダから成る。テレメトリデータは実時間データ、再生データとして地上局あるいはシャトル・オービタに送られる。コマンドは実時間、絶対時間、あるいはタイマー等の形式で送られる。NASA安全要求に従い、シャトルに危害を及ぼす可能性のあるコマンドには図3のように3重の禁止(3直列スイッチ)を施した。これに加

え、設計が進んだ後に信号の暗号化が要求された。NASAの暗号器、解読器をブラックボックスとして搭載せよという。理由をきくと、見えざる敵からの怪電波対策だとのこと。性能試験の便を考えると暗号器や解読器をSFUに搭載するような変更はその時点では受け入れがたかった。従って対案として、危険コマンドの系統の電源にタイマースイッチを挿入することを提案した。そしてシャトルの飛行士がタイマースイッチのオン、リセットを管理すれば、シャトル側もSFU側も同時に要求を満たすことができる。NASA安全パネルはこれを名案と評価し、他のペイロードにも宣伝してくれた。

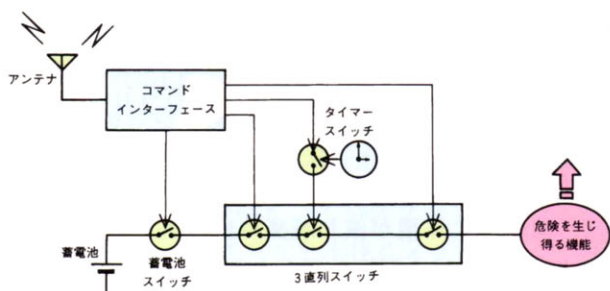


図3. NASA安全性対応の例
(タイマーによる RFコマンド受信阻止)

地上局ネットワークを図4に示す。鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) / 相模原運用センター (SOC) を主局とし、NASDAの沖縄追跡管制局 (OTDS) / 中央追跡管制所 (TACC) のバックアップ、打上げと回収時並びに宇宙赤外線望遠鏡 (IRTS) 運用時にはNASAの深宇宙探査ネットワーク (DSN) とチリ大学サンチャゴ局の支援を得た。シャトルがSFUに接近する近接運用時には、SFU運用管制権をNASAに渡し、すべてのコマンドはシャトルから発行されるという了解のもとにSOCの初期設計が進められた。ところがかなりあとの段階で、SOCでのコマンド発行機能を追加することになった。そのお陰で、相模原発行のコマンドがシャトル経由で実行される様子が、NASAが配信する映像で放送され、サガミハラの名が一躍日本、アメリカ中に知れ渡った。

●開発から打上げまで

SFUの開発では、地上試験モデル (EM) と飛行試験モデル (PFM) を作成した。EMはペイロードユニットや冗長系のあるものなどは単数のみ製作し、構造熱

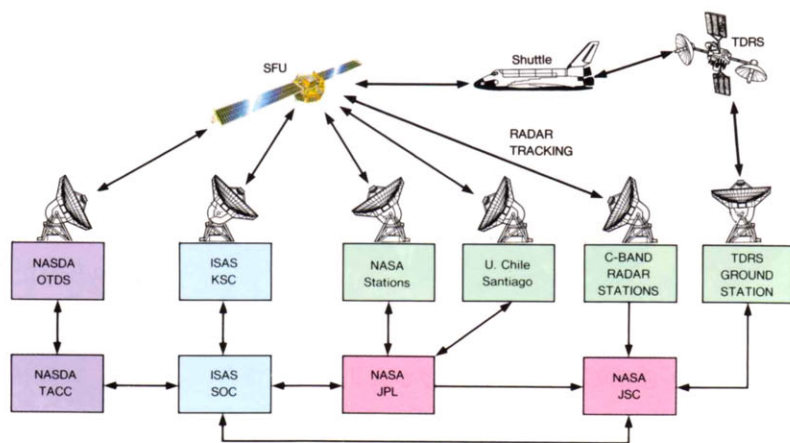


図4. SFU運用管制地上局網

モデル (STM) として、或はインターフェイス立証用として試験に供せられた。図5はロックウェル社ダウニーに於て、1990年に行われた、シャトル・シミュレータとSFU・EM (主構体) との構造適合性試験の様子である。ヒドラジン保温のため、オービタから電力供給を受ける遠隔操作電気アンピリカル (ROEU) の噛合せ試験もここで行われた。シャトルとの通信、アビオニクス (航法機器) 適合性やDSNとの通信適合性試

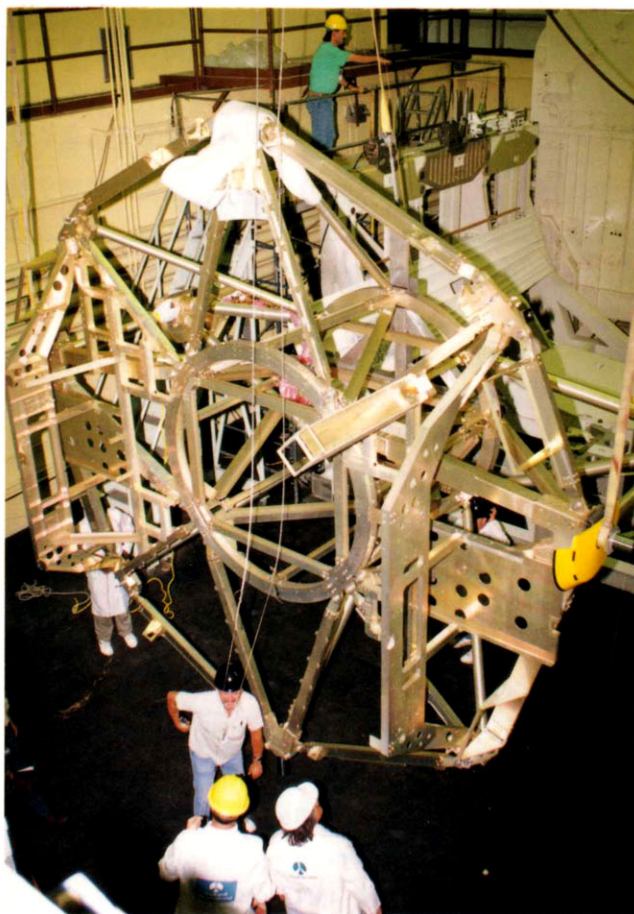


図5. SFU主構体 (EM) とシャトル・シミュレータとの構造適合性試験

験もEMを用いて行われた。EM構体のみは斜めにして輸送できたが、PFM及びコンテナの輸送は路上輸送の許可を得るのに困難を極めた。ゆうに幅5mを越え、トレーラーに乗せると2車線を占拠してしまう。であるから、夜間輸送は勿論のこと、駐車排除など、許可を出す側にも厄介ものと映ったことであろう。ともあれ、関係各位のご努力により、岐阜／名古屋港、鎌倉／江ノ島港、霞が浦／筑波宇宙センター、種子島々内、米国内、横浜港／鎌倉などの陸送と、海上輸送の組合せで輸送を果すことができた。図6は霞ヶ浦を吃水の浅い船に積み換えられて進むSFU／PFMを納めたコンテナの姿であるが、牧歌的な風景の裏には大変なご苦労が秘められている。1994年に筑波宇宙センタから搬出し種子島に向かう折りは丁度夏の終りで台風のシーズンであった。雨が少なく霞が浦が浅くて進めない、台風が



図6. コンテナに納まり、曳き船により霞ヶ浦を進むSFUフライトモデル (USEF提供)

来ると一気に利根川が増水し危なくて銚子港に着けないなど、心配の連続であったが、何とか9月に種子島にたどり着くことができた。

種子島搬入後の電気性能試験は坦々と進んだが、年末から1995年の年始にかけて推進系不具合が相次ぎ、現場も後方支援も緊張に明け暮れ、筆舌に尽くし難い苦労を味わった。いずれ改めて筆をとるとして、ここでは触れずにおこう。我が国初の回収型衛星SFUの打上げは、ひまわり5号(GMS-5)との初のH-II二重打上げ、初の3月打上げと、初ものづくしとなった。平成7年3月18日17時01分、図7の如くH-II 3号機はSFUとGMS-5を乗せ、曇天について飛び立ち、またたく間に雲の中に消えた。打上げ管制センタ内は両衛星の軌道投入まではしんと静まりかえっていたが、正しく軌道に(SFUは高度330kmに)投入されたと報ぜられるや歓声で湧いた。記者発表を終えて、打上げ慰労会に出席した折り、太

陽捕捉、太陽電池パドルの展開ともに成功の報を聞き安堵した。

帰京後1日置いて、3月20日には地下鉄サリン事件が発生。H-II/SFU/GMS-5関連のニュースは報道から消えた。5日後にはSFUは運用高度486kmに達し、3月29日



図7. H-II試験3号機によるSFU打上げ (NASDA提供)

までにはコアシステム、実験システムの点検を終え、全て正常と確認された。図8はSFUに搭載された小型テレビカメラ(TV)による展開完了後の太陽電池パドルの姿である。簡易テレビではあったが、意外に解像度は高く、手前の太陽電池セルの見分けもつく。TVは展開モニタ接点スイッチの冗長程度に考えていたが、百聞は一見にしかずの感を深めた。

●実験開始

3月29日からは赤外線望遠鏡(IRTS)観測、イモリの生物実験(BIO)が始まった。プロジェクト主査としては、実施機関3者の実験について、機会均等を励行したつもりだが、消耗の激しい液体ヘリウムを使うIRTSと、お産が待てないイモリを相手にするBIOの事情を

EIWG (Experiment Investigators Working Group) で理解して貰い、先行が許された。IRTSの望遠鏡開口部には地上で真空を保持するための蓋が取付けられている。この蓋は軌道上で火工品により切り離して放出する。蓋が放出できないと観測が果せないし、そればかりか、放出できずにシャトルの荷物室に収納した場合、

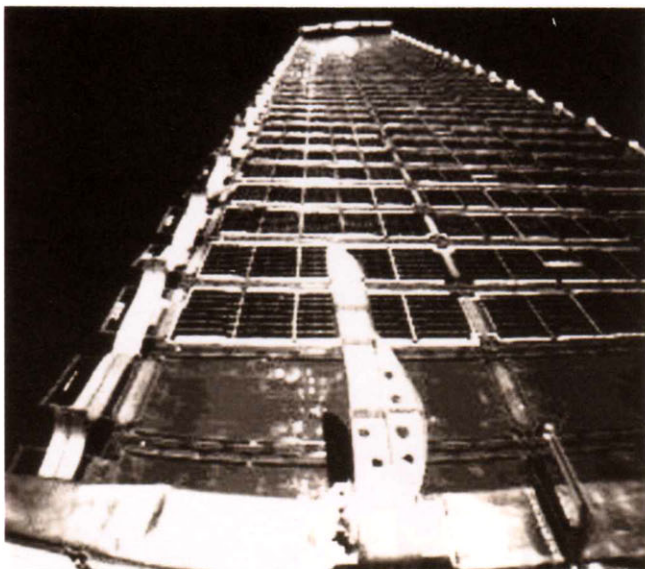


図8. SFU搭載テレビカメラで撮影した太陽電池パドルの展開

シャトルや乗組員に危険をおよぼす可能性があるので、蓋が放出できなければNASAは回収を認めない。十分な試験を行っていたものの、やはり一連托生の思いであった。IRTSは首尾よく蓋を放出し、陽よけ（サンシェード）を展開して、日に夜をつくデータ取得が始まった。日米の科学者は宝の山でつかみ取りをしている様子に見えた。4月中旬過ぎに、液体ヘリウムがまだ残っているからと、他機関実験者に一週間の延長を頼んだ時は、うれしくもプロジェクト主査たる面目はどこかに忘れてしまっていた。BIOもテレビ画像（図9）で産卵1個を確認。打上げが延びた時にはBIO実験担当者からイモリはもうあと何日でお産ですと迫られていただけにほっとした。卵以外に画面で、ここが母親の足、腹ですと説明を受けても、部外者の筆者には判らない。4月下旬からは他の実験も始められ、8月末まで順調に進んだ。コアシステム共々、正常ですとの報告に馴れると、通常の衛星ならこれで終るのにというたるんだ気分になりかかった。

●回収準備

8月に入ると、NASA ミッション管制センター（MCC、ヒューストンのジョンソン宇宙センター内）と連携した回収運用訓練JIS（Joint Integrated

Simulation）が実験の間をぬって始まった。飛行士がシャトルで発行する一部のコマンドを除いて、ほとんどのコマンドが相模原運用管制センター（SOC）から発行されるので、相模原の任務は重大である。ヒューストンと相模原間の会話は日用語でなく、航空管制用語あるいは軍隊用語と類似である。YesはAffirmative,

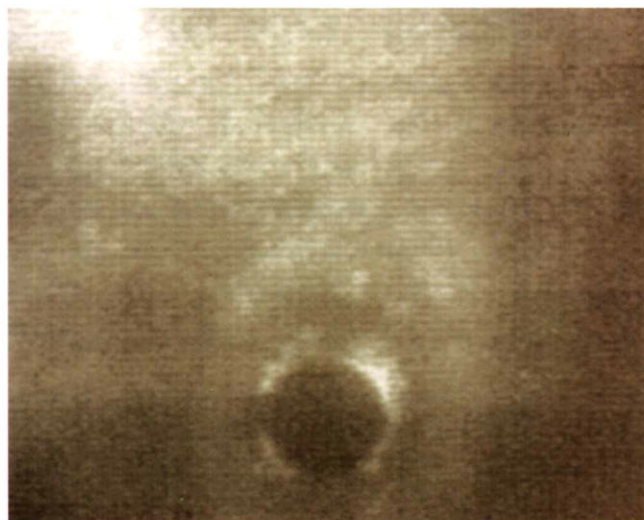


図9. 軌道上で産卵されたイモリの卵

NoはNegativeとなるといった具合。言葉の障害を乗り越えられるかと心配していたが、相模原チームは運用を終える頃にはNASAのベテランと対等にやり合うまでになり、心配は取り越し苦労であった。ヒューストンスタッフは相模原の成果をたたえ、今回限りで相模原チームが解散するのは惜しいと最大級の賛辞を表わし、SFUフライトディレクタを勤めた山田助教授は表彰を受けた。

実験が終わった後、シャトルによる回収が一カ月以上延びたので、1995年11月初めまで太陽電池アレイのような柔軟構造をもつ宇宙機の動特性取得等を行い、11月からは回収にかかわる機能点検を行った。点検の一つに待機している冗長系の機能確認があった。冗長系を確認したいとNASAに伝え、拒みはしなかったが、「我々だったらやらない」と薄笑いしながら云う。あからさまに云わないが、「何かあったときに灯を入れるのが冗長系。仮に不調と知れたらどうするつもりか」と云いたいのだろう。日本側の考えは、「その場に至って慌てるのではなく、予め策を練っておく」にあるのだが、まさしく文化の差を見る思いがした。彼ら（NASA）もそのことは承知しており、話は、ロシアはこうだ、イタリアはああだと文化論に花が咲いて終った。とにかく日本流は実行され、冗長機能は正常と確認された。

●回収

1995年の暮、回収準備完了と思われていたSFUに不具合が発生。12月26日、姿勢制御用推進系のスラスト12基のうち2基が不調となり、明けて1996年元旦に解析結果を携えてヒューストンに飛ぶ。1月2日から安全パネルと討議を始め、翌日にシャトルの支援を若干増やせばSFUは回収可能な状態にあると判断され、1月4日の飛行準備完了審査会でSTS-72（裏表紙参照）、エンデバー号の打上げがGOとなる。前年同様に慌ただしい年末年始であったが、とにかくシャトル打上げにこぎつけた。ヒューストンにはペイロード代表として、宇宙研から筆者の他に小野田教授がカスタム支援室（CSR）に詰め、NASDA、USEFの代表と共に二交替の体制で回収運用にのぞんだ。勿論、実務部隊は二宮教授指揮のもと相模原のSOCにあって、CSRスタッフは事があった時のNASAのMCCスタッフとの協議相手である。エンデバー号は1996年1月11日18時41分（日本標準時、以下同じ）に打ち上げられ、予定の軌道に達した。SFUとシャトルのランデブー方式として、初期にはコントロールボックス（会合点設定）ランデブーを検討していたが、1991年頃からシャトルが直接SFU軌道に達するグラウンドアップ（直接）ランデブーを採用することとなった（但し、シャトルのエンジン不調の場合には、SFUが軌道変換するハイブリッド（複合）ランデブーを行うことが前提となっていた）。1月13日に回収作業の行われた4周回の様子を図10に示す。図中の時刻は打上げ時刻から起算したミッション経過時間（MET、日/時：分）である。14時50分には、相模原（SOC）からシャトルを経由してSFUと通信するPI（Payload Interleaver）リンクが確立し、15時44分にはシャトル軌道制御の最終接近開始（TI、Terminal Initiation）が行われた。次の周回で太陽電池パドル（SAP）を折り畳んで収納しようとしたが、収納後の固定（ラッチ）の確認ができず、予備系、主系、合計3回の部分展開・再収納を試みたものの状況に変化なし。CSRからヘッドホンを通して聞くSOCの室内は騒然としていて、CSRとの連絡係も席から離れている様子。太陽電池パドルの切り離しを決断する前に、既にSOCでは地球指向に姿勢を変えて切り離しに備えていたが、これは回収にとっても都合のよい姿勢であり好判断であった。第3回で再収納が果せなかった後は、MCC/SOCでとび交う声は一段と高くなり、決断の近いことを感じた。気がつくとMCCに居る筈のパウエル氏（NASA運用トレーナー）が筆者の傍らに立って汗をたらし、息をはずませながらももう待てないという。あと2周回を経ると宇宙飛行士

達は睡眠準備に入る。あと10分とのメッセージをペイロード運用主任のバイサート氏から受けてSOCと合意の上、太陽電池パドル切り離しを同氏に伝えた。「ラッチがかからない場合は切り離し」という緊急時のプランはNASAと合意して訓練もできていたのだが、やはりその段になるとNASAスタッフももう一度試みようというSFUスタッフと心が一つになっていた。SFUの設計基本要件には「SFUは故障しても、身体が半分に

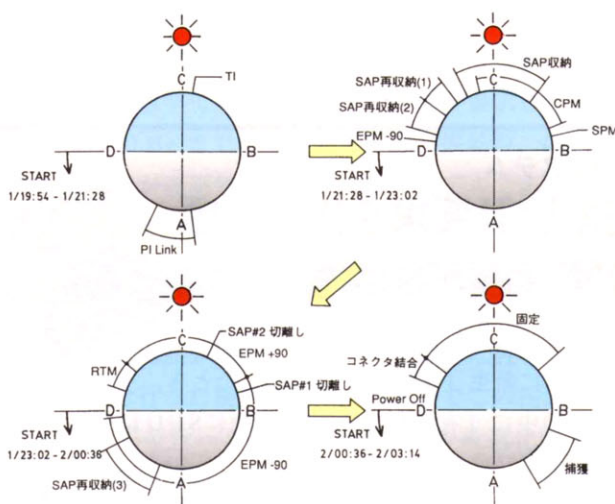


図10. スペースシャトルによるSFU回収運用
時刻はミッション経過時刻（MET、日/時：分）

なっても必ず帰還する事が最優先の要求である」とあるが、これを実行することとなった。切り離しは極めて順調に進み、その後若田宇宙飛行士の操作するロボットアーム（RMS）により、図11の如くSFUはカーゴベイへと納まった。NASA安全パネルの長、バタグリー氏は、「切り棄てられるSAPを見るのは技術者として忍びなかった。だが、切り離し機構が切れっぱし一つ残さずに見事に働いたことは誇ってよい成果だ」とねぎらってくれた。

●着陸

シャトル着陸までに、宇宙服の寒冷時試験が行われた際、SFUヒドラジン系の温度が下がり、一騒ぎあった。これはSFUの不具合ではなく、前述の楕円配管の件で合意されたシャトル姿勢による保温のインターフェイスが曖昧になっていたこと、SFUの熱モデル提出後に宇宙服ミッションが決定されたことなどに起因したものである。とにかく宇宙服ミッションも無事達成され、エンデバー号は1月20日16時42分、ケネディ宇宙センターに着陸した。

1月20日午前10時頃（ヒューストン時間）には宇宙飛

行士一行がJSC近くのエリントン飛行場に戻ると聞き、CSR一同、ジョーダン氏（SFUパイロード主任）、パイサート氏、オースチン氏（STS-72フライト主任）らと一緒に飛行場に向かう。丁度この日、ヒューストンで女性議員の葬儀があり、これに列席したクリントン大統領は宇宙飛行士達と飛行場で会見した。冷たい雨の降る中だったが華やかな歓迎会となった。若田宇宙飛行士と抱き合って帰還を祝った筆者の顔は雨とも涙ともつかず、ぐしゃぐしゃに濡れた。

（くりき・きょういち）

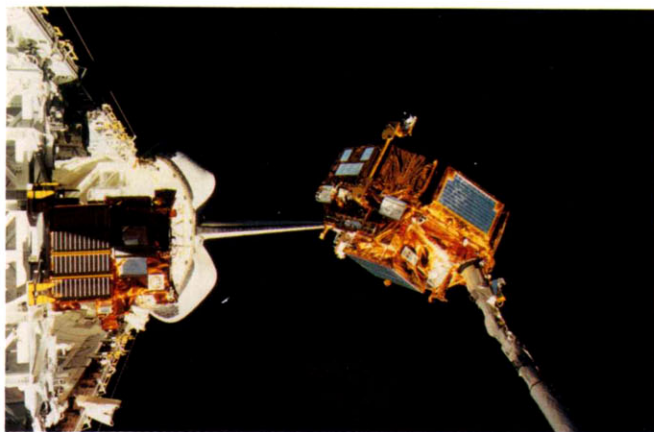


図11. シャトルに回収される SFU（NASA提供）

SFUシステム

基本設計要求を出した頃



1981年に新生「宇宙研」が発足したとき、その研究開発課題の中に「有翼飛翔体」と、後にSFUに発展する「小型宇宙プラットフォーム」が入っていた。前者は自前のシャトルを開発しようというものであり、後者はアメリカのスペースシャトルを乗客として利用する立場であったから、これら2つの課題はロケットエンジニアの私にとっては同じ将来の目標の表と裏であった。表はもちろん有翼飛翔体であったが、結局、裏の方が実現したのは、その方がまだ安心という判断があったからであろう。

スペースシャトルと私との関わり合いはポストアポロ時代からである。まず、先生方に無理を言って何とかマーシャル宇宙飛行センターに駐在し、スペースラブ1号の「粒子加速器を用いた宇宙プラズマ実験」、通称SEPACのエンジニアリングという裏方を勤めさせていただいた。当時はスペースシャトルはまだメインエンジンの始動がうまく行かず、スペースラブはマネジメント体制を立て直してようやく設計が進み始めた頃であった。われわれの機器の搭載条件が決まっていなかった部分があったが、それがかえってスペースシャトルやスペースラブ開発との一体感を生み出して爽快な気分であった。

「小型宇宙プラットフォーム」の発想の源は、SEPACの高エネルギー実験をスペースシャトルの飛行安全のために軌道上で分離して実行する点にあった。したがって、シャトルで運んで一週間の実験後に回収して貰い、経費も科学衛星一つ位のつもりでいたが、宇宙開発委員会に提案された小型宇宙プラットフォームは通産省と科学技術庁も参加する質量ともより大型のSFUフリーフラ

イヤー計画として実現した。この間、シャトルの方はチャレンジャー事故の余波もあってますます国有化が進み、実に客扱いの悪い乗り物になっていた。シャトルに危険をおよぼす可能性がある宇宙実験はシャトルから離れて行うという最初の発想をSFUの基本設計要求とし、一難を避けたつもりであったが、逆にスタート後は多難の連続であった。

SFUの設計を進めてみて徹底的に分かったことは、スペースシャトルを計画し、設計した人達の輸送機関としてのエンジニアリングな配慮のなさであった。詳しいことをさておくと、SFU計画の困難の多くはこの点に根本的な原因があったと思う。それゆえに、これから派生した困難を克服してミッションを成功させたSFUチームに一層深い敬意を表するものである。そして、私は、宇宙開発を本気で考えるなら乗客の立場を考えたロケット機を作らねばならないことをこの計画から学んだのであった。

（長友信人）

設計基本要素

1. スペースシャトルの搭乗員が回収する無人実験・観測フリーフライヤ（SFU）は、有人宇宙システムである。
2. SFUの安全性は、NASAや打上げ関係者がそれぞれのルールによって決めることである。
3. SFUは故障しても、身が半分になっても必ず帰還する事が最優先の要求である。
4. SFUは、宇宙に不慣れの不特定多数のユーザーに対応するために、手堅さと発展性をあわせて持たせるようにする。
5. SFUミッション計画は、飛行中でも柔軟性と即応性を発揮できるようにし、予想外の事態においても成果が挙げられるように考慮する。
6. SFUの点検整備は、運用作業のひとつとして計画を立て、設計する。
7. SFUは、世界で初めて2カ国の宇宙輸送システムを使うという意味で国際性が要求される。

SFUシステム 構造系



SFUが再使用型衛星であることに加え、スペースシャトルで回収されること及び多目的衛星である事から、SFUの構造及び構造設計は我が国の他の衛星に比べて特色あるものとなっている。以下に構造に関する2, 3の話題について述べる。

●SFU構造形状

SFUは再使用型多目的衛星であるので、各種の実験機器を効率よく搭載・整備・試験出来るよう、モジュール方式としてある。SFUは8個の箱を持ち、この箱に搭載される実験機器の組み込み、各種試験は箱単位で行い、完了した後にトラス状のSFU主構体にいわばワンタッチで取り付ける方式としてある。主構体の弾性変形などによりこれらの箱に過大な荷重が入らないよう、これらの箱の主構体への取り付けは全て静定となるよう取り点を3箇所のみとし、付け金具にも工夫が施されている。SFU中心部を上下に貫通する円筒状空間の下端のリングはH-IIによる打上げ時のロケットとのインターフェイスであり、5本のトラニオンはスペースシャトルとの力学的なインターフェイスである。

●設計荷重

荷重見積もりは構造設計上最も重要な項目の一つである。スペースシャトルの場合、積み荷に作用する荷重は、スペースシャトルとSFU等の積み荷の数学モデルを結合し、これに定められた外力を作用させるシミュレーション（柔結合解析）を計算機内で行うことにより求める。最終荷重評価はシャトル打上げが迫った時期にNASAが行う。構造数学モデルは、構造設計の結果から作成できるものであるが、構造設計の元となる荷重を求めるには逆に構造数学モデルが必要となる。従って、通常、先ず荷重を予測して構造設計を行い、これに基づき作成・検証した数学モデルを用いて荷重を求めて予測値以下であることを確認する手順が取られる。この作業の繰り返しが理想的だが現実には許されない。開発初期にNASA提供のシャトルの数学モデルの荷物室の各所に、SFUの暫定的数学モデル計4台を載せ、暫定的な外力を用いてSFU側で柔結合解析を行ったところ、NASA側から提供されている初期設計荷重を遥かに上回るケースも見つかった。構造設計はこの4台のSFUの柔結合解析結果の最大荷重の1.4倍（主構体については1.2倍）の荷重を前提に行うこととした。SFUのH-IIによる打上げ後に

NASAが行った最終荷重評価の結果は、主構造の一部で設計荷重を僅かに越えるものであり、部分的な確認試験を追加するのみで事なきを得たが、逆に言えば絶妙の設計荷重設定であったと言えよう。

●モーダルサーベイ試験

シャトルに搭載されたSFUは有人システムの一部を構成することとなるので、SFU構造にも高い安全性が要求され、荷重評価にも高い信頼性が求められる。既に述べたように、シャトルの積み荷に作用する荷重は数学モデルを用いた柔結合解析により求めるので、荷重を正しく求めるためには正しい数学モデルを用いる必要がある。そのため、数学モデルの徹底した検証が要求される。具体的には50 Hz までの全振動モードの振動数、振動モード、減衰率が実測値と一致する数学モデルであることを示すことである。SFUの場合、50Hzまでに40以上の振動モードがあり、これを高い精度で測定するにはかなりの工夫と時間を要した。試験は主構体に静定に接続された箱構造の自由度を拘束して行い、拘束した数学モデルと比較検証を行った後に数学モデルの上でこの拘束を外すなどの工夫を行ったほか、加振レベル最適化等も行った。このような精密なモーダルサーベイ試験は一筋縄では対処できないことは明白だったので、1990年から1993年に、構造試験モデル等を用いて計4カ月以上をかけて3回に及ぶ予備試験を実施し、試験実施上の問題点の洗い出しなどを事前に行った。その結果、実機（PFM）に付いて1993年4月から7月まで試験を実施し、531点の加速度計と2台の加振器を用いて50Hz以下の42個のモードを抽出するに至った。

（小野田淳次郎）

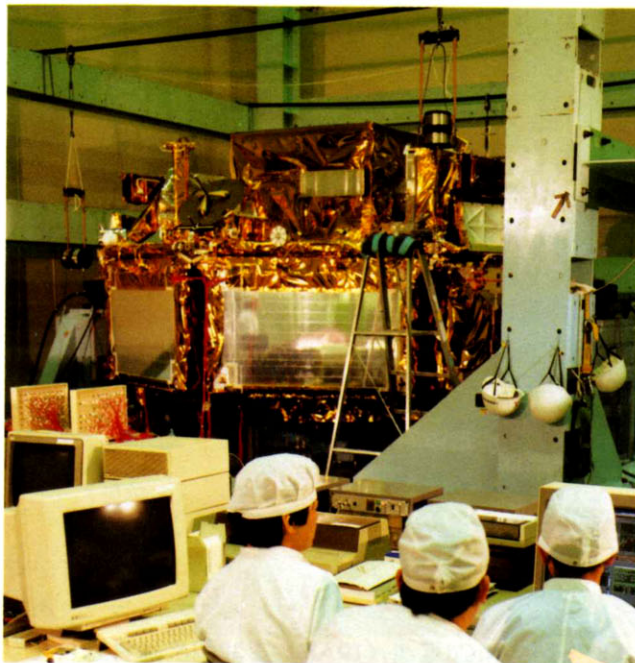


図12. PFMモーダルサーベイ試験の様子 (USEF提供)



●部品選定

部品の選定は衛星の値段や信頼性を決定する重要な項目である。SFUで使用する部品の決定に際しても色々な議論や紆余曲折があったが、回収を第一目的とするSFUの信頼性に係る部品の選定であるので、標準化や一括購入を実施して価格を押さえる努力が行われた。宇宙用電子部品の規格としてはNASDA規格、米軍規格のクラスB、同じくクラスSなどがあるが、高規格の部品はきわめて高価になる。そこでSFUでは米軍規格クラスBアップグレード（クラスB部品のなかから選別したもの）を採用した。これは当時最先端の部品選定で、米国の衛星が同様の部品を選定した幸運にも恵まれ確保できる事となった。部品の検査は添付データ成績表だけに止まらず、多少でも気になる部品はわざわざ故障解析の専門会社で検査するなど、選定に関係した方々の誠意にあふれたものであった。

●フレキシブル太陽電池パドル（SAP）

筆者はフレキシブルな太陽電池パドルが先行研究によってかなりの段階まで進められていたものを偶然見る機会に恵まれた。その成果を栗木・名取両教授にも話して、日本最初のフレキシブル太陽電池パドルとしてSFUに採用されることになった。これは、2.7kW以上の発生電力、搭載機器に1.4kWを供給するものである。組み上げまでの振動・衝撃試験を始め、展開・収納試験等幾多の実績や欧州宇宙電源国際会議での議論も反映されたもので、それだけに軌道上での完全展開のモニタテレビの映像は感激の一語に尽きるものであった。このフレキシブルパドル技術はNASDAの通信放送技術衛星（COMETS）へと発展した。

パドルを構成する太陽電池は2cm×4cmで、原子状酸素対策が施され、実装容易なセル型ダイオードも新開発されて、SFUの2面のパドルに合計2.8万枚が実装された。

●電源系サブシステム（バッテリー）

SFUの日陰時の電力をまかなうバッテリーは、4台を並列にして構成されている。バッテリー一台あたりは密閉式NiCd電池（19AH）を32個直列構成したもので、日照時に太陽電池パドルで発生した電力を

バッテリーに蓄え、日陰時、太陽電池パドルが電力を供給できない時も安定した電力が供給できるよう工夫されている。

日本初の経験は、SFU回収時、SAPが収納され発生電力がなくなった軌道上最後の時、バッテリーからの放電電力だけでSFUを運用するという重要任務であった。NiCd電池電源は生き物で履歴や温度・電流・電圧で充放電サイクル寿命が決まるため、打上げ前の寿命試験を始め、軌道上の電圧／温度特性曲線に細心の注意を払うとともに、地上でも軌道上運用模擬試験を実施して回収に万全を期した。

SFUの電池の選定は最も注意を払った点の1つである。最初以下の諸点を熟慮して、科学衛星で実績のあるNiCd電池とした。欧州での事例も勘案、重要部品を含め自国技術によることが打上げ希望時期を他国に左右されない点で必須と考えた。即ち①科学衛星開発の当初より「根拠のはっきりした部品を使用しかつ故障の場合の原因究明を徹底させる」という方針の基に弾力的、実質的に対応した実績をもっている。②システムから部品までブラックボックスを許さない態度で、問題発生時は原因究明に関し、すみやかに中立が工程内まで立ち入って専門家の衆知を集めて対応ができる。③先端的開発研究のため契約時または設計初期段階では予想できない状況変化で要求の変更が出現、しかも早急の試験や対応が必要となる場合が過去の経験上必ずある。

一般に安全審査や軌道運用上からの要求変更は製品完成のずっと後で突然に起こることが多く、開発が長期を要するものだけに柔軟な対応の難しさを又痛感させられた。改めて関係者の熱意と忍耐に敬意を表したい。

（後川昭雄，宇宙研名誉教授，現東京工科大学教授）

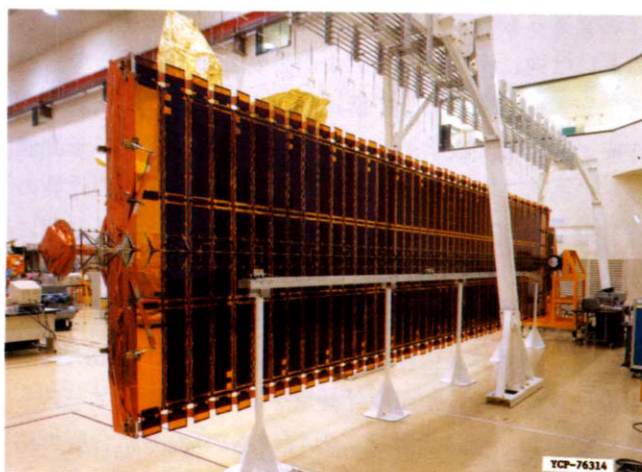


図13. 太陽電池パドル（SAP）の地上展開試験（USEF提供）

SFUシステム 推進系



SFUは基本要件に見られるように最初に「SFU」があつて次に「複数の実験・観測ミッション」がある。SFUは再使用の容易さを重視した「宇宙に長期滞在可能な再使用型宇宙輸送システム」である。このため推進系の設計方針も「ユニット化された取扱い易さ」が特徴になっている。SFUには姿勢制御用推進システム（RCS）と軌道変更用推進システム（OCT）がある。これらはそれぞれ独立したヒドラジン・モノプロペラント・システムである。ヒドラジン・システムは「致命的な危険要因」としてのNASA安全対応が要求される。NASA安全審査のガイドラインとなる適用文書は推進系関連だけでも約30種類もあり、推進系がNASA安全対応のために作成した文書は90種類以上になった。SFU推進系はいかなる二重故障や二重誤操作が起こっても致命的な危険要因となつてはならない。このためのタンクからスラストまでの推薬供給配管系に三重の機械的に独立な遮断装置（弁）を設け、そのうちの最低2つがモニタ可能でなければならない。また弁作動に対しては三重の電氣的インヒビットが必要である。SFU推進系はこのようなシャトル・ペイロードの安全基準を全て満たしている。一方、SFUには「シャトルとの電氣的インタフェースを無くする」と言う設計方針があつた。シャトル回収後にヒータで保温しないと、カーゴベイ内でヒドラジンが部分的に凍結して（凝固点は約2度C）、地上へ帰還した後で解凍する。このヒドラジン凍結・解凍サイクルは密度変化を伴うため配管系を壊す危険性があると考えられている。このためヒドラジンの凍結・解凍を許容する楕円配管

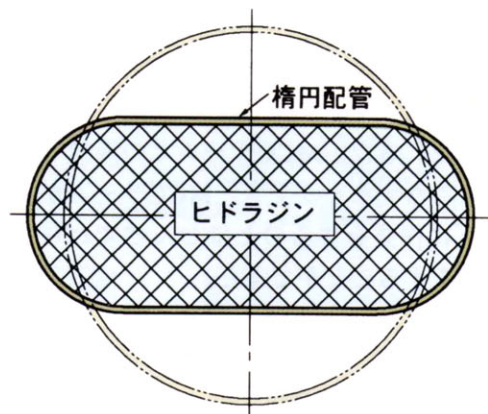


図14. 楕円配管

（図14）を考案してNASA安全審査に臨んだ。交渉の結果、一連の凍結・解凍モデル実験と実際の温度環境を模擬した熱解析を行って安全性を検証すること、更に、ROEU（遠隔操作電気アンビリカル、図15）を経由したヒドラジン系ヒータ・システムを並行して開発することになった。この結果、一号機ではROEU経由でシャトル電源を利用するヒータ保温方式を採用し、同時にフェールセーフ設計の立場から楕円配管方式はそのまま使用することになった。シャトルへのSFU回収に際して最も重視されることは、タンク内のヒドラジンを絶対に漏洩させないこと、及びスラストの不意な噴射が起らないことである。このため回収に先だつて段階的な安全化とその確認を行った。推進系ではRCSおよびOCTのリークチェック、推薬弁と遮断弁および電氣的インヒビットのアンサー確認を行った。回収後のROEU経由での電氣的インタフェースは推進系の温度制御関係のみである。このため回収運用では推進班を中心に24時間体勢の温度モニターを行った。回収2日目にはしきい値である10度C以下に温度が低下して冗長系のヒータもオンにした。その後、10度Cから60度Cの温度範囲を外れた場合にはクルーがシャトルの姿勢を変えて対応することになり、無事帰還することができた。回収運用に参加した後で、シャトルとの電氣的インタフェースを無くするための凍結・解凍許容設計の着想が非常に魅力的なものに思えた。次号機ではこの凍結・解凍許容設計に更に磨きをかけて、ROEU系が故障した場合の「切札」になればよい。

（橋本保成、都木恭一郎）

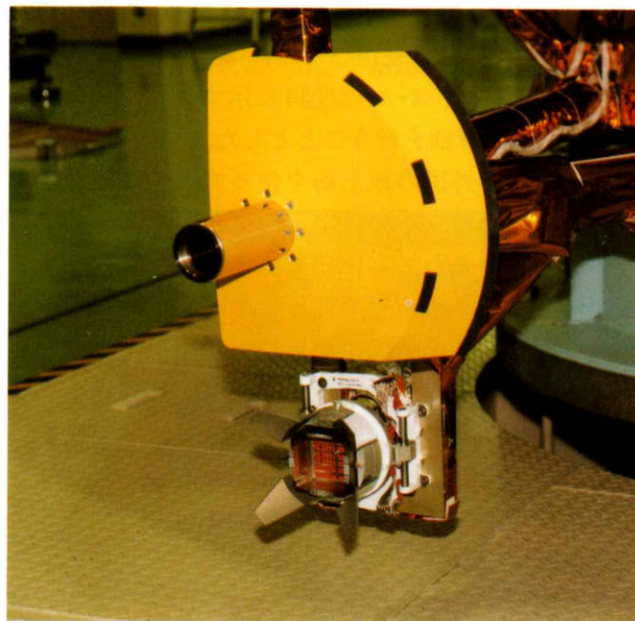


図15. 遠隔操作電気アンビリカル（ROEU）



SFUの運用管制に関する作業は1988年に始まった。SFUの運用管制において最も重要かつ複雑な部分がスペースシャトルによるSFUの回収である。まずは、この回収時の運用管制の方法についてNASAジョンソン宇宙センター担当者と協議を行うことから作業を開始した。

回収時に行われる運用には、SFUとスペースシャトルが軌道を制御しながら互いに近づき合う「ランデブー」と、互いに近づいてからSFUをスペースシャトルの荷物室に収納するまでの「近接運用」の二つの部分に分かれる。さまざまな条件の変化により大きな計画変更がなされたことも何度かあるが、数年にわたるNASA担当者との協議の中で回収時の運用管制計画が固まっていった。この協議の結果に基づいてスペースシャトル搭乗員がスペースシャトルに持ち込む手順書（若田飛行士が飛行中ににらんでいたあのお厚い書類）や相模原運用センター(SOC)で我々が使用する手順書が作られた。

このような運用管制計画の作成と平行して運用管制に地上で使用するシステムの開発も行われた。このシステムの最も大きな任務は、前述のランデブーを地上からの運用管制によって成功させることであつた。このためには、日本国内の地上局だけではSFUと交信する時間が十分に確保できず、外国の地上局もSFUとの交信に使用しなければならないことが判明した。そこで、4ページ図4に示すような地上局を使用して運用管制を行うこととした。

ところが、外国の地上局を使って人工衛星とリアルタイムに交信するのは宇宙研にとっては初めての経験である。また、宇宙研の従来の運用管制システムは、宇宙研の地上局を使うことが大前提となつて開発されており、外国の地上局を使用して衛星とリアルタイムに交信するには大改造が必要になる。そこで、SFUにはSFU専用の運用管制システムを新たに開発することになった。

このシステムでは、計算機のOSをUNIXで統一し、計算機間はLAN(イーサネット)で接続した。このシステムの開発を始めた当時は、UNIXやLANは日本の衛星の運用管制では使われた実績がなく、一部のメーカーはこれらの導入に激しく反対した。しかし、結

局、UNIXやLANを使うことによって、従来は別々に開発されていたソフトウェアを統一的に開発することが可能になり、この試みは大成功であつた。また、統一されたのはOSばかりでなく、3機関5社にまたがった関係者の心意気も統一された。

さて、手順書が完成し、運用管制システムも完成したところで、次なる仕事は運用管制の訓練・リハーサルである。この訓練・リハーサルにおける最大の課題は、スペースシャトルの運用管制を行うヒューストン・ミッション管制センター(MCC)の管制チームとSOCの管制チームの連携体制の確立である。近接運用中は、スペースシャトルの管制はMCCが行うが、SFUの管制はそれと同時にSOCが行うからである。例えば、SOCがSFUにコマンドを送ることによってSFUの向きを回収に適した方向に変え、それを受けて若田飛行士がMCCの指示に従ってロボットアームを操作するというようなことが行われる。

この両チーム間の交信手段は、ループと呼ばれる指令電話回線である。MCCとSOCとの間には数本のループが敷かれ、それぞれ各種の交信に使われたが、両チーム間の決定事項は、MCCのペイロード運用主任とSOCのフライトディレクターとが両チームを代表して話し合つて決めるということにし、指揮系統の体系化を図つた。この訓練・リハーサルの様子については、「訓練・リハーサル」に詳しい。

訓練・リハーサルが終われば、次は本番である。本番中の出来事は「SFUプロジェクトを終えて」に詳しいが、SOCの管制チームも運用管制システムも十分に実力を発揮し、SFUの回収作業を無事終えることができた。ランデブーについては、スペースシャトルが一方的にSFUに近づくグランドアップ方式になったために、SFU側の作業は不要になった。しかし、元々はランデブーに備えて用意した外国の地上局も、ランデブーには使わなかったものの、それ以外の複雑な運用を行うときにはSFUとの交信時間を確保するのに大いに役にたち、国際協力の重要性を実感することができた。また、MCCチームとの連携プレーもほぼ完璧にこなすことができ、MCCチームがすぐ隣でいっしょに作業をするのとほとんど変わらない雰囲気で作業することができた。

我々は、二つの宇宙機を別々の国で別々のチームによって運用管制するという体験をしたが、この貴重な体験を今後の国際協力にも大いに活かしたいと思う。

(山田隆弘)



図16はSFUの開発体制を示すもので、計画が正式スタートした1987年度末から1988年度初にかけて作られている。枠外の追記事項を除き、基本文書「SFU計画管理の手引き」の中にあり、その後変更はなかった。軌道運用に係わる部分は一つ下のレベルまで書き加えたが、これも「SFU運用管制計画管理の手引き」の中にある。つまり、SFUの開発は当初から系統的に計画され実行されたということになる。個人的には、「SFUプログラム」の箱が点線になっているのが妙に気に入って（?!）、実に味わい深いと思いつつ時々眺めることを忘れなかった。足掛け10年に亘り「システム連絡会議」は殆ど必ず毎週月曜日午前に開かれ、プログラム管理、中でも調整作業の中心場を提供した。栗木教授が準備される当日の議題リストと、システム取り纏め支援マネージャが会議中に作成する議事録——殆どの場合、それぞれA-4版1～2枚からなる——だけでも6 cm厚のバインダー3冊をフルに占拠している。

だからと言って、諸々のインターフェイス調整の道程が平坦であったという訳ではない。実験・観測機器は、実験研究者ワーキンググループEIWGの主査が調整役となって3ないし4実施機関がそれぞれの担当分の開発を行った。そのほかのレベルCの箱については各担当主査が取り纏め役となったが、各実施機関が分割して受け持った（費用を分担した）。

このような結果、あるいはシャトルインターフェイスの変更・スケジュールの改訂・不具合の発生・その他不

予期事項の生起などに伴って、“各種”調整は企業の方々を含む多数の関係者にとり、“非常にやり甲斐のある”仕事になったことは確かである。もっとも、レベルB以下の調整では「篝火が焚かれ怒号とうなり声が飛び交う」（長友教授の表現）ようなことには至らなかったことも確かだが・・・。

スペースシャトルとのインターフェイス調整作業は飛行安全、ペイロード運用、地上安全、地上運用に関連して行われ、前二項をジョンソン宇宙センタ(JSC)が、後二項をケネディ宇宙センタ(図16にはNKSCと表示)が担当した。追跡網にかかわる調整作業は、(別途直接の業務契約となったチリ大学サンチャゴ局の運用調整を含め)ジェット推進研究所(JPL)が担当した。調整の場である各種ワーキンググループ会議の頻度はSFU打上げが近づくにつれて密となり(94年だけで私はヒューストンに9回足を運んでいる)、SFU打上げ後も、シャトル搭乗クルーを含め日米膝をつき合わせての(肘を張りあっていたのではない)夜遅くに至るハードワークになることもあった。ただし、緊張した会議やハードワークにも、多数参加の気楽なアメリカ式パーティーが毎回必ず伴ったし(図17)、週末の個人的交流や余暇を満喫した方々も少なくない。何十ページにも及ぶファクス(後期にはE-メールも)が太平洋を越えて往復し、日米両国内の数地点間を同時に結んだ電話会議が頻繁に開かれた。時差は前者に好都合に作用したが、後者にはいずれかの側の妥協を強要した。1989年初めに開設されたUSEFヒューストン駐在員事務所の果たす役割は貴重であった。

国内・国外を問わず、斯くして育まれた相互の信頼関係とSFUへの情熱が、技術力に支えられたチームワークを生み出し、複雑長期の計画を結局は見事に成功に導いたと言えよう。(二宮敬虔)

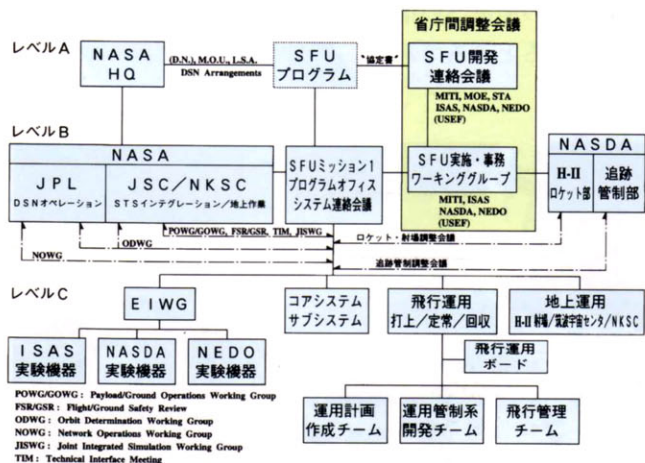
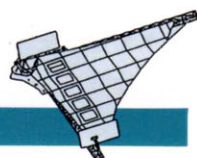


図16. SFUの開発体制



図17. 安全審査完了のあとで

薄膜構造の力学



SFUには本体の太陽電池アレイと実験用の2次元展開アレイの2種類の薄膜構造を搭載した。それらは張力が加わってはじめて安定した機能を発揮する。張力が作用しないと、それらの形状は初期の変形状態に依存し、またわずかな力が加わっただけで大きく変化する。また張力が作用していても、宇宙で使用する張力のレベルは小さいので、温度環境など外界の変化の影響を受けやすい。今回のSFUではそんな薄膜構造の基本的な力学的性質を実感することとなった。

本体の太陽電池アレイは長さ約10m、幅 2.4m の膜面（6ページ図8参照）で、アコーディオン式に畳み込まれた状態から展開して、SFUに十分な電力を供給した。このアレイは昼夜の温度差の影響で振動現象を起こした（図18）。その後の解析で、この振動は膜面そのものの熱収縮によるというよりは膜面の張力を一定にするためのメカニズムに依存することが分かってきた。SFUの微小重力環境に影響するレベルではなかったものの、膜面を主体にした構造が軌道上環境の影響を受けやすいことの具体的な一例となった。

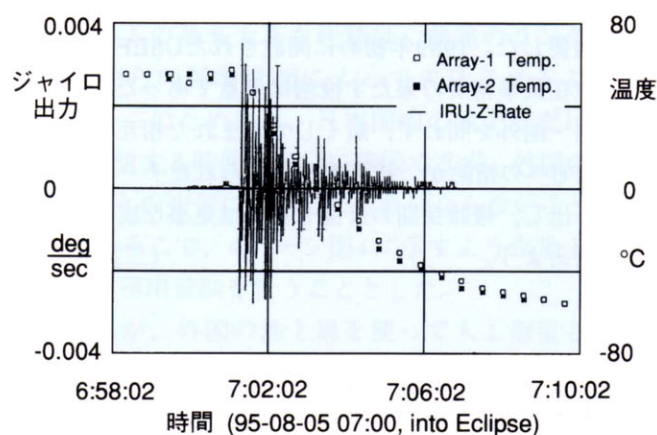


図18. 本体ジャイロが検出した振動

SFU回収時に、このアレイは収納の最終段階でラッチさせることができず、宇宙空間に分離投棄せざるを得なかった。SFUの影の影響を避けるためにアレイの付け根部分には太陽電池セルを貼らない膜面だけのブランクパネルが二枚装着されている。このパネルが収納時に逆折れを起こして、完全に畳み込むことができなかったと推測される。太陽電池セルを貼ったパネルはほぼ板と見なせるような挙動をして収納できたが、ブランクパネルに

は事前の地上試験ではチェックできなかった挙動があらわれた。膜面を板に変えるような補強や、折る方向を強制的にきめるメカニズムを使えば、そのような逆折れは防止できるが、張力が作用しない微妙な釣り合い状態にある膜面の挙動の解明は今後の大きな研究課題である。

2次元展開アレイは、ひとつの方向に畳んだ膜面をさらにそれと直角方向に畳んだダブル・アコーディオン折りの膜面構造が宇宙空間でどのような展開収納挙動をするかを調べる構造実験である。図19に軌道上で展開したアレイの映像を示す。メインマストとサブマストを連携させて伸展し、それらの先端で三角形の膜面を引っ張って安定させる。膜面は50cm四方程度のポリイミドのフィルムを複合材の薄い板でふちどりの要素をつなぎ合わせてできている。収納させるためにある程度板的な性質も持たせたのである。それらの要素が全体的に同期して展開することを予想したのであるが、実際は先端から順々に展開されていった。

2次元展開アレイの一部には高電圧太陽電池セルを装着して、セル間の直並列切替によってプラズマ環境との干渉を含めた高電圧発電実験を計画していたのであるが、信号ラインの分離コネクタが外れて実施できなかった。赤外線望遠鏡観測時に開いていたサンシールドからの太陽熱の反射が予想以上で、コネクタにつながるケーブルが伸びたのが原因である。高電圧発電実験は将来の太陽発電に関わる基礎的な実験で、機器のチェックアウトのみに終わったのは大変残念であった。再度の挑戦を期待したい。

薄膜構造やケーブル構造などは軽量で収納性がよいので、メッシュアンテナやインフレータブル（膨張式）構造、テザーなどのこれからの宇宙構造物にどんどん用いられていく。それらの微小重力下でのふるまいの解明は未だ十分ではなく、今後も、軌道上での構造モデル実験や計画中の衛星への構造応答計測用センサーの搭載などが望まれるところである。

（名取通弘，國中 均，樋口 健）

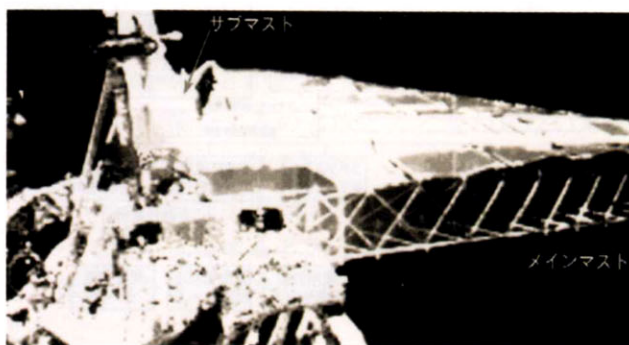
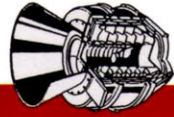


図19. 展開された2D/HV実験の膜面



無重量環境を利用するものが多いSFU搭載実験装置の中で、IRTS (Infrared Telescope in Space; 宇宙赤外線望遠鏡) は異色の実験で、赤外線をさえぎる地球大気から逃げ出し、自由に宇宙を見るのが目的であった。また宇宙からの微かな赤外線を捉えられるよう、超流動ヘリウムを使って摂氏マイナス271度まで冷やした特殊な望遠鏡でもある。IRTSは姿勢制御や飛行運用の大変難しい実験であったが、1995年3月30日から4月24日に超流動ヘリウムを使い切るまでの26日間にわたる天体観測を大勢の方の努力に支えられて成功裏に終わることができた。

IRTSの狙いは広い天域の赤外線サーベイである。観測期間中に、約2700平方度の天域（全天の約7%）を完全にサーベイすることができた。まだまだデータ解析作業は続いているが、これまでに得られた成果の一部を紹介しよう。

読者の混乱を恐れず思いつくままに挙げると、

- ・ 太陽系内惑星間塵（固体微粒子）の赤外線スペクトルの精密測定による組成の推定
- ・ 銀河系星間塵（固体微粒子）の遠赤外測光による温度の決定とそれがほぼ等温（絶対温度15度）であることの発見
- ・ 銀河系星間塵（固体微粒子）のサブミリ波測光による超低温星間塵（絶対温度5度）の存在の示唆
- ・ 銀河系星間ガスの紫外線放射場による加熱率の決定
- ・ 約5万個にのぼる恒星の赤外線スペクトルの測定と統計による恒星進化の研究のための基本カタログ作成（進行中）

・ 近赤外線宇宙背景放射の上限値の決定による銀河進化モデルへの制限（進行中）

となる。

なかでも我々も予想しなかった重要な成果の一つは、PAHの赤外線スペクトルが天の川に沿ってどこでも見られたことである。「PAH」というのはPolycyclic Aromatic Hydrocarbonの略で、多環式芳香族炭化水素と訳される。というといかめしいがベンゼン環、いわゆる「亀の甲」構造が何十個かくつついた形の分子のことで、最近火星からの隕石中に見つかって生命の痕跡とさわがれた物質もこの仲間である。IRTSが観測したものが生命起源とは思われないが（星間空間にはバクテリアが浮かんでいるという説もあるにはあったが）、この種の有機物が銀河系の星間空間に広くしかも大量に存在していることをIRTSが初めて発見したのである。

図に示したのは、IRTSで見た天の川の一部である。IRTSは分光器を搭載しているので、星のスペクトル（なだらか）とPAHのスペクトル（バンド構造を持つ）とに分離することができる。左側の図は星のスペクトルだけの赤外線強度の分布を表し、右側はPAHのスペクトルだけを取り出して描いたものである。天の川は星が特に密集しているところであり、左の図からはそのことが読みとれると思う。一方、PAHの放射も天の川に沿って広がってはいるが、左側の星の分布と比べるとまったく違っている。実はPAHの分布は比較的大きい塵が出す赤外線の分布とそっくりである。PAHという有機分子が、塵と同じように水素の雲の中に混じりあって漂っていることがIRTSの観測によって初めてわかったのである。PAHは星間空間で重要な役割を果たしていることが予想されていて、今後の展開が楽しみである。

（村上 浩）

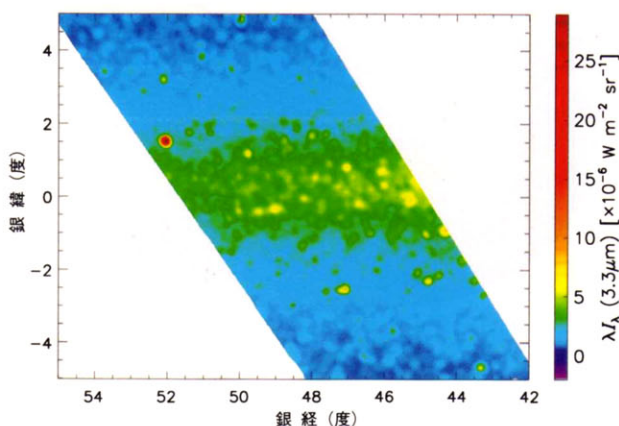


図20. 恒星が放射する赤外線の強度分布

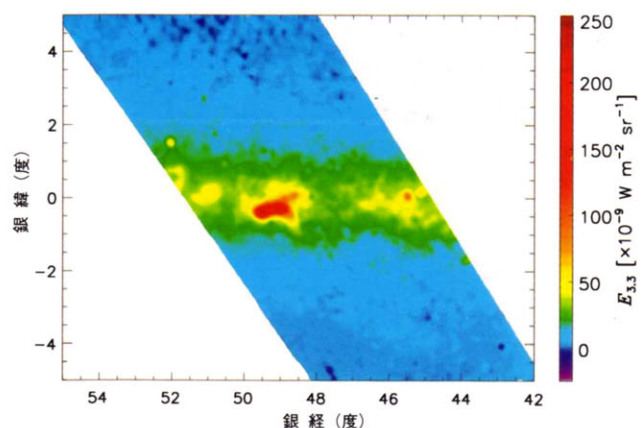


図21. PAHが放射する赤外線の強度分布

イモリのお守り



湧き水が流れる田の脇の水路の落ち葉の下や泥の中から、アカハライモリを採集して実験室に運んだのは1994年11月、ちょうどイモリも冬眠を始めた時期であった。遮光した保冷庫の中でイモリを冬眠状態で維持し、試料約100匹を種子島に運び込んだのは1995年1月19日。客室持ち込みの手荷物として、運び役2人に警護されての空の旅。到着後早速、広いクリーンルームに設置した保冷庫におさまる。

SFUでのイモリ実験は、重力が生命現象にどのような影響を与えているのかを調べることを目的とする。両生類の卵は産まれた直後には直径が1-2 mmという一つの大きな細胞であり、また暗色の動物極が重力によりそろって上方に向く。ところで、雌イモリは婚姻行動によって精子塊を総排泄孔の内側に取り込む。春になって日照時間が長くなり、水温が上昇すると、蓄えていた精子を使い卵を受精し産卵する。このような宇宙実験にはうってつけのイモリの性質を利用し、野外で採集してからずっと冬眠状態のまま維持し、雌イモリのみ宇宙におくる。実験開始時に水温を上げて産卵を誘発し、卵の受精直後から宇宙環境に曝して、その発生の様子を調べるとするのがSFUでのイモリ実験である。

種子島に運んだイモリの中から、9匹の搭載候補を選んでホルモン処理し、そのうち2匹を打上げの約一月前、2月21日にSFUの実験装置に積み込んだ。この2匹の雌イモリは、自前の生命維持装置により、日本の地から宇宙に送られる初の生物である。打上げ待機状態でのイモリ水槽の冬眠状態への維持は、ことのほか難しかった。ペイロードボックスの外から風を送り込み、ペルチェ素子（小さな冷蔵庫）の排熱部を冷却し、水槽を冬眠温度に維持する。実験装置への電力供給が途絶えると、水槽温度はみるみる上昇してイモリが冬眠から醒め、宇宙にたどり着く前に産気づいてしまう。これにも増して、水の循環が停止すると水槽内の溶存酸素濃度は低下し、イモリの生命すら危険にさらされる。こんなことから、イモリ搭載以降、実験装置へ継続して給電し、給電断がやむを得ない場合も30分以下とした。たとえ停止時間が30分以内であっても、イモリにとっては、その影響は不可逆的に累積していく。長年にわたって確立されてきた射場作業にとっては、さぞかし異質なペイロー

ドだが、関係者の理解に支えられ、着々と打上げに向けた作業が進行した。

イモリのSFUへの搭載以降、イモリ実験チームは2シフトで24時間、打上げまで連続の監視体制に入る。SFUはロケットの頭部に結合されるまで、いくつかの部屋を移動し、また移動台車で射場内の道路を輸送され射座点検塔の上部に吊り上げられた。AC電源に接続できない局面では電池式の給電装置につなぎ替えた。こんなことから、重要なSFUの射場作業では、イモリ実験要員はことごとくイモリに相伴してフェアリングの裾に貼り付くという余禄を得た。打上げ最終形態となり、ブロックハウスからの給電・監視に移行したところで一安心。少々だるい監視作業も、雷雲の種子島襲来となると俄然色めき立ち、電源を電池式に切り替え、刻々と変化する襲雷モニター画面に一喜一憂した。

3月18日、打上げ7分前、最後の地上コマンド送信、地上給電停止、みごとな打上げ、ロケットからのSFU分離、直ちに給電開始。種子島より相模原にとってかえし、SFUが軌道上実験フェーズに入るのももどかしくイモリ水槽を昇温。卵の画像を宇宙で取得し、4月6日に実験を終了、シャトルとのランデブー直前まで試料の保存状態をモニターした。地上への帰還、そして21個のイモリの胚と判定される試料を回収。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。図22は薄切した回収試料の一つで、後期桑実胚から初期胞胚期にある。外胚葉部の細胞層の形成や、予定内胚葉・中胚葉部の細胞像から、発生初期から宇宙環境に曝露しても発生の形態的变化は正常に進行したとみられる。このように、重力がなくとも胚軸が定まることは、発生に関する従来の説に大きな変更を迫っている。（山下雅道）

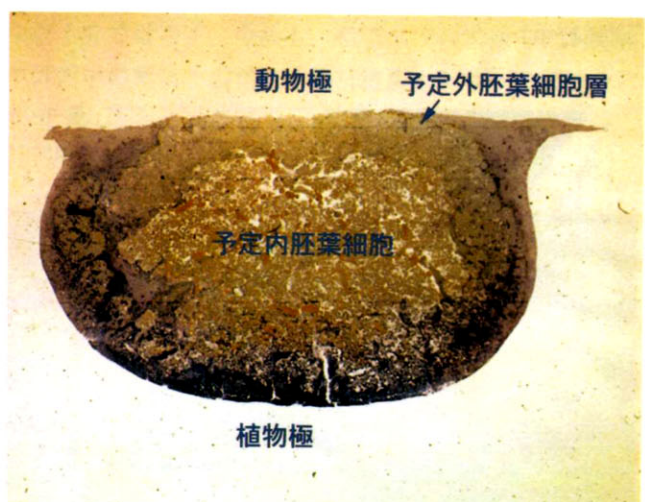
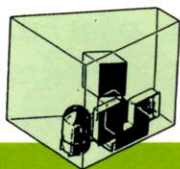


図22. 回収した胚の薄切切片像

MEX装置作り



「材料実験」を直訳したMEX (Materials Experiment) のグリーンプック (実験計画書) には、図23のような装置の概念図を載せていた。可視化実験を手がけておられる方にはすぐお分かりのように、これはレーザーホログラフィーである。MEXでは当初三つの実験 (水溶液からの結晶成長、電析、樹枝状晶凝固の可視化) を計画していたため、懐の大きい干渉計としてレーザーホログラフィーを考えたが、これはあまり評判が良くなかった。成長した結晶を細かく観察するには、解像度が不足しており、加えてシャトルで既に計画されていたことが不評の理由であった。それではと、ケスタープリズムを使った図24のようなマッハツェンダー型の干渉計を考えた (1987年9月にニューオリンズで開かれた宇宙ステーションに関する国際会議ではこの図で説明した) が、これは特許の関係と、打上げ振動に耐えない、という強い抵抗によりあっさり頓挫した。ようやく出てきたのが共通光路型干渉計である。原理は、光源から出た光を偏光分割により試料光と参照光に分け、同一の光路で干渉させるというものであり、光路が共通となることによる、装置の小型軽量化に加えて振動にも強いという特徴を持ったユニークな光学装置である。しかしながらこの干渉計は元々レンズ干渉計とし考案されたもので、顕微干渉計としての実績は世界的にも皆無であった。そこでやむなく試作品を作った。試作品はノイズが多く干渉縞のコントラストも低い等の問題はあったが、顕微干渉計としての目処は立った。開発の見通しは得られたが外観はいかにも顕微鏡、であり、搭載するには、未だ道のりが長いという感じであった。実際、PFM (図25) にいたる迄、レンズ、プリズムなど光学部品はもとより、M8の取り付けボルトの破損も経験することとなった。ともかくできあがったものは約9kgと極めて軽く、片手でぶらぶら運んで机の上にドンとおいても光軸が狂わない傑作であった。後に宇宙開発事業団の小型ロケットに搭載された顕微干渉計は、本装置と同じ原理にもとづくものであり、SFU/MEXが先導となった実験装置である。なおシリアルナンバーが3か4のものは、北海道の落下塔で元気に活躍している。

本番の実験では本体システムにつながる通信ラインが、予定とは異なる動作をしたため、ダウンリンク像の

画質は地上実験よりも数段劣るものとなってしまった。しかしながら無重力下における融解・凝固の挙動は垣間見えた、と痩せ我慢をしながら、次なる機会で捲土重来を期すことを考えている。 (栗林一彦)

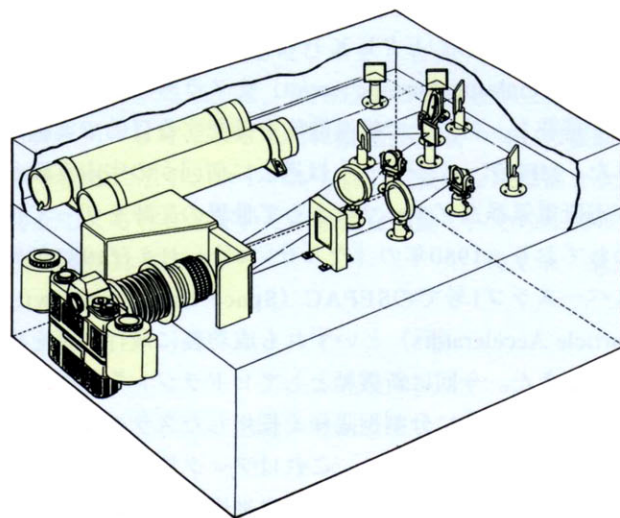


図23. 計画初期の実験装置の概念図

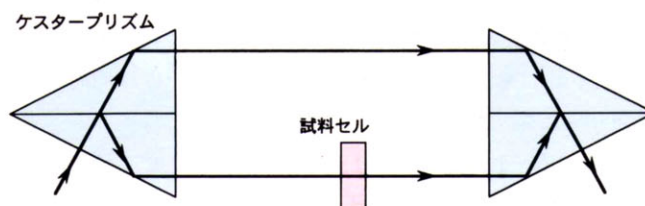


図24. マッハツェンダー型の干渉計の光路図

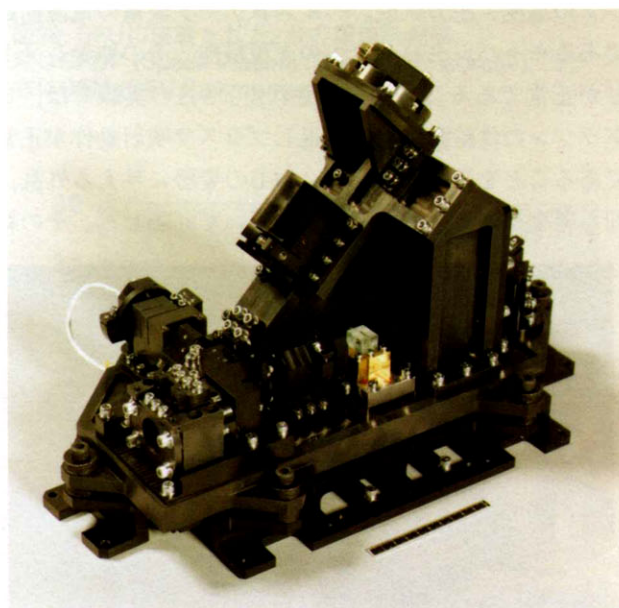
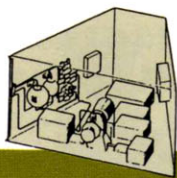


図25. SFUに搭載された顕微干渉計



電気推進実験（EPEX）はMPD アークジェット（Magnetoplasmadynamic Arcjet）をスラストシステムとして搭載し、軌道上で推進機能を確認する目的で実施された。MPDアークジェットは過去に何回かの宇宙実験が宇宙研電気推進グループによって世界の先陣を切って行われており、1980年の「たんせい4号」および1983年のスペースラブ1号でのSEPAC（Space Experiment with Particle Accelerators）といずれも成功裏に飛行実績を獲得してきた。今回は新機軸としてヒドラジンを推進剤に用いることの他に分割型陽極を採用したスラストヘッドと電源構成が試験された。これはアーク放電を周方向に一樣に分布させる技術であり、推進性能と耐久性を改善した、従来からすれば画期的なMPDアークジェットである（図26）。原理的には1つの陰極と8つの陽極との間で約6 kAのアーク放電によって推進剤をプラズマ状態にすると同時に、その磁場によって生ずるローレンツ力でプラズマを加速噴射する。軌道上ではSFUから日照時で最大430Wの電力供給を受け、約150マイクロ秒のパルス状放電を0.5～1.8 Hzで繰り返す。推進剤はガス発生器によってガスに分解して一旦、貯気槽に保持され、パルス状のアーク放電に同期した形で高速電磁弁を開閉することにより、アーク放電部へと供給される。

打上げ後の平成7年3月の実験では推進剤であるヒドラジンの温度・圧力状態、パルス状アーク放電の電源回路であるキャパシタバンクへの充電機能、その他テレメトリが正常であることが確認された。5月の実験では、ヒドラジンの供給動作、繰り返しプラズマ噴射動作が正常であることを確認する一方、SFUの姿勢に与える外乱、即ち発生推力をSFUのNGC系を用いて評価した。その結

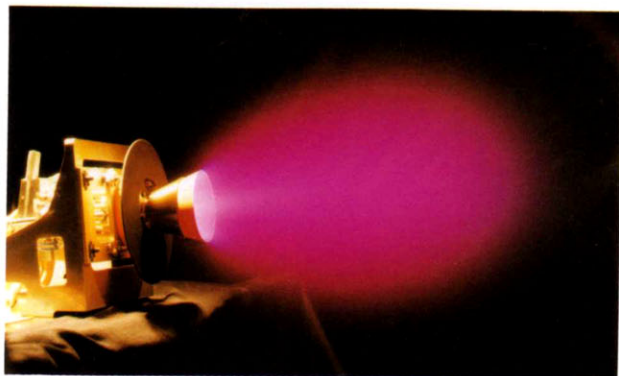


図26. 地上噴射試験の様子

果、発生推力は地上試験で得られていた値と一致することが確認された。また、貯気槽の圧力ブローダウンにより算定される推進剤消費率からアーク放電時の理論比推力を求めたところ約 1,100 秒相当となり、これも地上試験の結果と一致した。また当初の計画では期待していなかったが、噴射プラズマ直近に位置するアンテナの電波干渉試験をしたところ、テレメトリ同期に影響することが判明しプラズマの存在が確認された。6月～7月の実験では与えられた実験時間を活用し、繰り返しプラズマ噴射を実施した。結果として 43,395 回の作動回数に至った。そのうち、ミスファイアの割合は0.3%未満と良好な成績であった。7月～8月の実験では残留ヒドラジンの宇宙空間への投棄に成功、推進供給系の真空乾燥を実施し、スペースシャトルによるSFUの安全回収に備えた。

回収後の地上での点検ではEPEXは電氣的に全て正常、異常放電の痕跡もなく、推進供給系のヒドラジン濃度は完全にゼロであることが確認された。SFUの重量制限もあってEPEXでは1 kW対応でフルスペックの電源を搭載することはできなかったが、スラストヘッドは1 kW対応のものであり、電源系のコンポーネントも地上での耐久試験で用いたものと同一設計のものがシステムとして構成された。

これらによってプラズマエンジンの一種として研究されてきたMPDアークジェットもスラストシステムとして機能的に成立することが確認された訳で、将来の1 kW級あるいはそれを超えるハイパワーの電気推進システムが世界で要求される時代になった際の足掛りができたと言える。また、同種のプラズマエンジンである直流アークジェットに対しても、MPDアークジェットが宇宙で4万回を上回る再起動に成功したことは、信頼性の点から見ても好影響を及ぼすものと考えられる。

（都木恭一郎、清水幸夫）

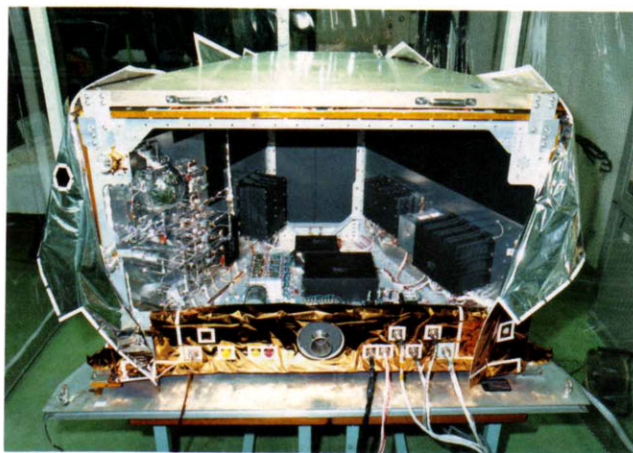
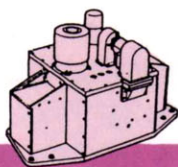


図27. SFUに搭載されたEPEX

SFU実験

SEPACからSFUへ



SFUは宇宙実験のためのプラットフォームとして開発された。私が宇宙実験と付き合いはじめたのは、今は亡き大林辰蔵先生が始められた、スペースシャトルによる「粒子ビームを用いた宇宙科学実験 (SEPAC)」への参加以来であるから、もう、ふた昔以上も前のことになる。ちょうど20年前の今頃は、河島先生の代理で初めて渡米し、ジョンソンスペースセンターの超大型真空槽で、栗木先生とともにSEPAC機器の試験を行っていた。SFU計画が一段落してほっとしたこの頃、そのころのことがつい先日のように思い出される。SEPAC実験は、初めての本格的な日米共同の宇宙科学実験として、1983年スペースシャトル9号機で実施された。実験後、しばらくの間、オービターから放射された電子やプラズマビームによって励起された様々な現象の解析に没頭したが、スペースシャトルのような大型でスラスターや水などの放出の活発な飛翔体の周辺には、自然の宇宙環境と大きく異なった飛翔体特有の宇宙環境が形成されることを実感として知った。このような環境の研究は、一種の天体現象として面白いだけでなく、人類が本格的に宇宙活動をする場合にも重要ではなかろうかと思っていた矢先、長友、栗木先生からSFU計画への参加の誘いを受けた。

SFU計画では、宇宙環境計測装置の開発を担当することになり、SEPACでの経験を基にして、空間を掃引できる可動プローブを組み込んだ大がかりで野心的(?)な環境計測器を考えた。実際には、色々な制約のため当初考えたものより小ぶりになったが、それでも、SEPAC時代からの参加者の協力も得て、高エネルギー粒子以外の殆ど全ての主要な宇宙環境計測センサー(プラズマ、ガス分析、電磁波動、磁場、分光、マイクロG)を組み込んだ計測システムを開発することができた。空間掃引できないかわりに、センサーをできるだけ複数持ち、異なる場所に配置することにした。特にプラズマ、電位、電磁波動のセンサーについては、SFUの太陽指向面側に3カ所、逆の面に1個配置し、多点観測が可能ないように工夫した。SFUで開発した2台の環境計測器(SPDPとEMS)を図28に示す。スペースシャトルをはじめ宇宙実験を目的とした飛翔体では、必ず宇宙環境モニターが搭載されるが、今回SFUで開発した宇宙環境の計測システムは、質・量ともにこれまでで最も充実したものであっ

たと自負している。

さて、肝心のデータであるが、アウトガスに支配されたガス環境の様子、太陽電池の起電力に振られたSFUの大きな電位変動、スラスター噴射に伴う発光、ラムとウエイクで同時観測された10MHzまでの電磁波動など興味深いデータの多くが、まだひっそりと光ディスクの中に眠っている。ここでは、10Hz以上の周波数帯に存在したGジッターと呼ばれる未だに励起源が謎のSFUの振動現象を図29に示す。ホイールも含め機械的な可動部を全て停止しても存在していた不思議な振動で、その原因の解明が待たれる。

(佐々木 進)

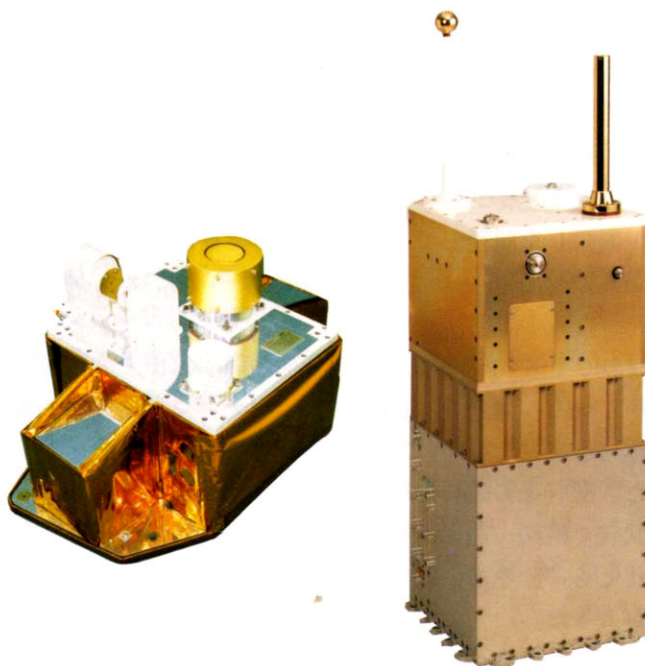


図28. SFUに搭載された2台の環境計測器。
左はSPDP (Space Plasma Diagnostic Package),
右はSEM (SFU Environment Monitor)。

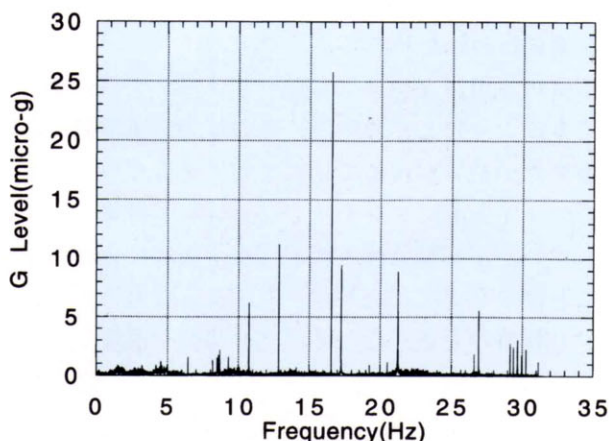
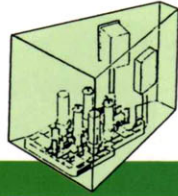


図29. マイクロGセンサーで計測されたSFUの振動



1996年6月、待ちに待った宇宙実験試料の電気炉からの取り出しが行われた。SFUが1月13日にエンデバーに回収されてから一日も早く実験試料を見たかったのである。回収後、SFUを日本へ輸送する準備のため、ケネディスペースセンター近くのアストロテック社で作業が行われたときにSFUを目の前にしながらも電気炉、実験試料がどうなっているのか見るすべもなくいらいらしていたのを覚えている。そんな待ちこがれた期待の気持ちと本当に試料がちゃんと結晶成長されているか不安の交錯する中で実験者と共にその瞬間を待った。

カートリッジから試料アンプルを取り出し、実験者が緊張した眼差しで実験試料を嘗めるように上から下から観察している。その顔が綻びの顔に変わった。やったあ！！

SFUでは3つの電気炉（複合加熱炉：GHF、焦点加熱炉：MHF、単熱炉：IHF）により8テーマの化合物半導体結晶成長を行い、24個の実験試料の結晶成長を行った。回収後の試料の取り出し観察の結果、24個全ての試料で溶融、凝固が行われたことが確認され安堵するとともに、さあ、我々の宇宙実験はこれからだぞと力が入った。

●真夜中の会話

1995年4月30日からSFUでの電気炉実験が開始され、8月30日に無事運用が終了した。電気炉との会話（実験運用）は、なぜか真夜中が殆どであった。1日の会話を終え帰途につくときには朝日が目に痛かった。実験運用は色々有ったが実験も電気炉も大きなトラブルもなく順調に行われた。

電気炉運用においては実験パラメータを軌道上で変更できるようにしておいた、その結果、実験側の心の安静を保つ意味も含めて絶大な効果をもたらしてくれた。フライト前にコンテインジェンシー対策を沢山準備していたが（緊急停止のような全面的に止めるようなことばかりであったが）、このようなものより、もう少し軽微の変更、たとえば実験時間や温度を僅かに変えるなどが実際の運用では重要な緊急対応であった。

●帰ってきた子供たち

宇宙へ行ってきた子供たちは逞しい顔に成長して

帰ってきた。現在、宇宙実験試料の評価解析の真っ最中である。今まで明らかとなった実験成果については次の通りである。

- ◆3種の電気炉は全て正常に動作し運用計画通り実験が行われた。
- ◆宇宙で化合物半導体結晶成長を行い、8テーマ全てで単結晶を得ることができた。
- ◆熱対流のない拡散による結晶成長が行われたことを成長結晶の観察などから実証できた。
- ◆CdTeの非接触結晶成長を世界で初めて行い、球状の結晶を得た。
- ◆InGaP、AlGaAsの3元混晶は世界で初めて宇宙で結晶成長を行い、単結晶を得た。
- ◆InGaAsは今回宇宙で初めて単結晶を得た（ふわっと'92で初めて成長実験は行われた）。
- ◆多くの結晶で膜厚の均一化、組成の均一化が図れた。これらは地上の比較試料より遥かに向上していることを確認した。

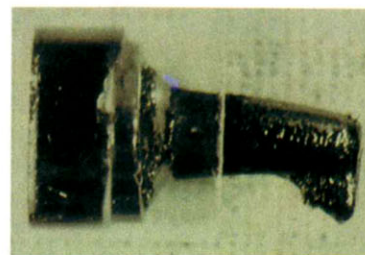
●そして、これから

微小重力下では熱対流が無くなり、拡散依存の移動が行われると宇宙実験関係者は当然のごとく言い放つ。わが国でも微小重力を利用して良いものを創製しようと考えている人は多い。だが、実際に自分の手で微小重力下で物を作り、どのような物がどうできたのかという研究をできる人はごく限られた数である。我々はこの稀有の経験を意義のあるものにしたい。

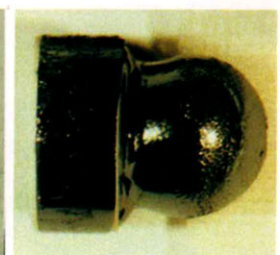
現在、さらに詳細な評価解析（欠陥評価、電気的特性評価等）を進めており、取得したデータに基づき宇宙での結晶成長メカニズムの解析も進め、これらの知見を地上技術に反映したいと考えている。

今回のSFUによる化合物半導体結晶成長実験は多くの関係者にサポートされ実施された。関係した方々へ感謝を申し上げます。

（酒井 宏、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構）

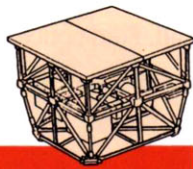


〔地上成長結晶〕
重力の影響により溶融部が垂れ落ちている。



〔宇宙成長結晶〕
容器と非接触で球状の結晶が成長している。

図30. CdTeの非接触結晶成長



宇宙開発事業団の実験機器は、「SFU搭載実験機器部（EFFU）」という名前が、正式名称である。しかし、これが間違いの元であった。「名は体を表す。」と言うが、上記名称をみても、いったい何の事やらさっぱり分からない。略語である「EFFU」だって、どうひねっても「SFU搭載実験機器部」にはならない。大体、SFUに積まれている他機関の装置だって、「観測機器」以外はすべて「実験機器」なんだし、……。だけど、箱の中には色々詰まっていて、どれかで代表するわけにはいかないし、……。

そこで、悩んだ挙げ句、表記名称になったものであり、「曝露部部分モデル部」と、「気相成長基礎実験装置」とから構成されている。

●曝露部部分モデル部

これは国際宇宙ステーションの日本実験モジュール（JEM）の、曝露部の部分モデルとなっている。

実験の内容を紹介すると、（1）流体ループによる熱制御、（2）装置交換機構、（3）微小重力計測、（4）要素材料曝露実験の4実験から構成されていて、装置類の正常動作が確認された。

いずれも、JEM曝露部の設計・解析手法の妥当性を確認する実験であり、流体ループ熱制御は大容量熱移送を目的としており、自動車のエンジンにおける水冷方式の採用と同様の発想を行っている。

装置交換機構は、軌道上での実験ユニットの交換を想定した、機械的結合メカニズム及び電気的接続コネクタ、流体ループ用液体コネクタの分離・結合の機能確認／寿命評価を行うものである。今になって思えば、作動状況の画像を取得すれば、もっと実験に華を添えられたと考える。

微小重力計測は、流体ループでの擾乱が、後述のダイヤモンド生成に悪影響を及ぼさないことを確認するもので、構体の減衰特性の評価結果を見て、安心する事が出来た。

要素材料曝露実験は、耐環境性が有る材料を選択しているので、劣化特性が予測と異なると困るところだったが、良好な結果が得られた。特筆すべきものとして、熱制御材で用いられる、テフロン含浸ガラス繊維クロスの原子状酸素による浸食があった。表層のテフロンが、約半年間の宇宙環境でほぼ消滅して、ガラス繊維が露出し

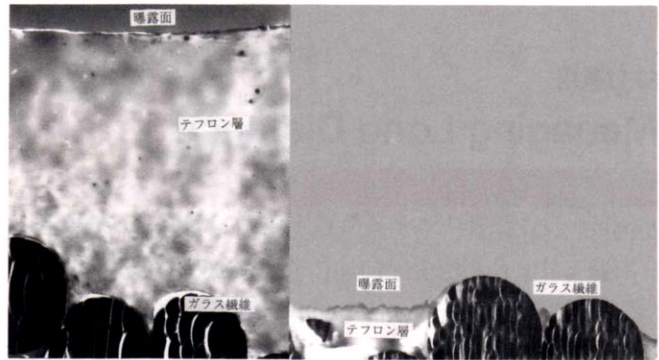


図31. ベータクロスの断面写真

ていた。図31に打上げ前（左）と回収後（右）との試料の断面の比較を示す。露出したガラス繊維は、放射線等により着色するので、太陽光吸収率が増加する。従って、熱設計においては、初期値と寿命末期の両方で、条件を満たす事を確認する必要がある。

●気相成長基礎実験装置

これはメタンと水素からダイヤモンドを造ろうという、ちょっとした錬金術の実験である。具体的には、下記の実験を実施した。

- （1）パラメータを振った時の、微小重力下でのプラズマ発光の状態観察
- （2）希薄流体での直流プラズマ法によるダイヤモンドの薄膜生成実験

プラズマ発光の状態観察では、パラメータを振った実験を観察用電極がボロボロになるまで繰り返し、安定したプラズマ発光の観察を行った。観察結果は、電子スチルカメラに記録したが、これについては、画像伝送も行うべきだったと考えている。

ダイヤモンド生成においては、生成用電極に図32に示す様に薄膜の成長が認められた。もし、宝飾用ダイヤモンドがザクザクと出来た日には、社会的に、ものすごい混乱が起きたことであろし、のんびりと、この記事を書いては居られなかった事であろう。

（武井 満、宇宙開発事業団）

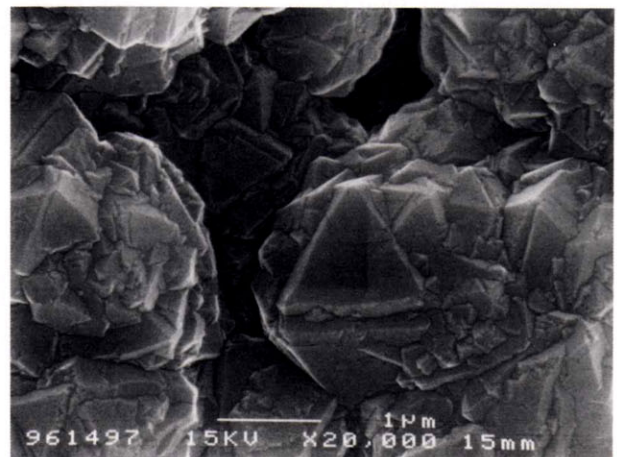


図32. 宇宙で生成されたダイヤモンド



He calls me “Jodan-san” (Mr. Joke). I call him “Kyo”, at least, that’s what I call him “today”. Although we had few face-to-face meetings, I was always in communication with Professor Kuriki by phone and fax. My file of fax correspondences fills two file cabinet drawers. But the more interesting communications always occurred over the phone.

The 10-hour time zone change between Houston and Sagamihara required Prof. Kuriki to call me at my home to talk to me during his working hours. Sometimes he would call me at the beginning of his work day to talk with me before I went to bed. Then, later the same day in Sagamihara, Prof. Ninomiya would call me just after I had awakened. Then, Mr. Furuhashi of USEF might call what Professors Kuriki and Ninomiya had talked to me about. That only happened a few times, where all three would talk to me within about a 14-hour period. I wondered if they thought I had trouble understanding their English.

On one occasion, I did have trouble understanding what Prof. Kuriki was trying to call me. In fact, I never understood what our conversation was about. I had been asleep perhaps 1 hour, just long enough to enter into the “Alpha-state” of sleep. The phone rang, but I never heard it, so my wife, Lisa, answered the phone. It was Kyo wanting to talk some business. Lisa tried to hand the phone to me, telling me “Kyo is on the phone.” What she said and what I heard were different. I heard “There is an insurance salesman calling.” I told her we did not need any insurance, and I did not want to talk to him. She had to shake me to wake me into consciousness.

Kyo talked to me for about 30 min. I have no idea what he said. I’m sure that it was important, but I was too embarrassed the next day to send him a fax asking what he had said. Maybe I promised with him something I do not know. I hoped that he would send me a follow-on fax, or perhaps Mr. Furuhashi would contact me, but I never received any more correspondence on the mystery

call. I did notice, however, that his telephone calls started coming earlier in the evening.

One of the keys to our success in the SFU retrieval mission was the good communications between us. I was honored that Professors Kuriki and Ninomiya, and many others in the SFU program felt comfortable in contacting me personally anytime they need to. For a some time, my life was filled with the purpose of the SFU mission. It will be difficult for me to find a more rewarding duty for my future. Perhaps SFU-2?

Sen-ro wa tsu zu ku..yo....

(William T. Jordan, Payload Manager, NASA JSC)

編集部註：「線路は続くよどこまでも～♪」はテキサス州立大学応援歌「The Eyes of Texas」でもあり、SFUの国際歌としてしばしば歌われた。



図33. エンデバー号の打上げ (NASA提供)



図34. SFUミッション成功を祝うビル・ジョーダン氏と栗木教授、JSCカスタマーサポート室にて。



ある日のこと、宇宙研の廊下でばったり出会った二宮教授に申し渡された。

「少しSFUの仕事を手伝うように！」

「はあ～」

何でもトレーニングとやらを担当するようにとのこと。

SFUのことを全く知らない自分がトレーニング担当？

第一、宇宙研でのこれまでのロケット打上げや衛星関係の仕事で、ことさらトレーニングという言葉がでくるような大げさな訓練を行った覚えがない。

その後しばらくして、NASA ヒューストンにあるジョンソンスペースセンタにSFUのエキスパートの方々と同行することになった。会議の席上、二宮先生がトレーニング担当として私を紹介した。直ぐにNASA側の訓練担当責任者が後ろの方から愛嬌よく手を挙げて挨拶を送ってくれた迄は良かったが、別の訓練担当者から「おまえの方は訓練チームとして行動するのか、それともおまえ一人で作るのか？」との質問が出された。その時は、頼りなさそうな私を見て出た当然の質問であると解釈した。しかし、その後NASA側の訓練チームは100人以上の制御、通信、電源、操作、操縦、——等各分野の専門家で構成され、充実した訓練設備を使って、連日訓練に専念していることを知り、先の質問の意味が判ってきた。これはえらいことを引き受けてしまったと後悔しても遅かった。SFU関連の分厚い書類と戦って、少しでも他の人たちに、追いつく努力をするしかなかった。

SFUチームの訓練は日本側だけで行う国内訓練から始まった。最初のうちは、衛星と地上局がコンタクト出来る10分程度の時間内に、必要なコマンドを送りきれず途方に暮れた。しかし、作業手順書の見直しと繰り返し訓練の結果、なんとか時間内に、完了できるようになった。

次のステップでは外国局が参加した。予定されている時間に、相手局の準備が出来ていなかったり、通信回線が必要な時間に確立しなかったりして、始めのうちは惨憺たる状況であった。そのうち、旨いく時もあるというレベルに達した。ここで学んだ大きな収穫は、このようなオペレーションでは外国局を100%当てにするのは現実的ではないということである。この体験は、実際のSFUの運用に入ってから大いに役立った。外国局を使っ

た運用が旨いくかない場合でも、誰一人慌てることなく、「まあ、こんなもんだろう」の一言で落ちついて対応策を練ることが出来た。

訓練のハイライトはスペースシャトルによるSFUの回収である。回収はスペースシャトルの管制を行うNASA ジョンソンスペースセンタが全体の指揮をとり、何本もの司令電話回線を同時に使って、厳しい制約時間内で、英語で行われるために非常に複雑なものとなった。全てが順調に行くとした場合の標準運用訓練から始まり、熟練度が上がるにつれて、様々な異常事態が想定された。最後の頃にはこれ以上壊しようがないほどの異常事態が訓練問題に挿入された。またスペースシャトルの全搭乗員、ジョンソンスペースセンター管制室、スペースシャトルやSFUと電波で結ぶための国内、国外局、そして相模原SFU管制室等が全て参加する大規模な総合訓練も実施された。訓練終了後は「もうだめ！」と言わんばかりの疲れきった面々もしばしば見受けられた。

訓練チームは「いじめ」を楽しんでいたわけではない。訓練を受ける人達ほどSFUに精通してないグループが訓練問題を作成するためには大変な努力を要した。NASA, NASDA, ISAS, 訓練担当メーカからなる訓練チームのメンバーが何度も何度も電話会議、電子メール、ファックス、そして時には直接顔をつき合わせて問題の作成を行った。実際の訓練ではトラブルへの判断は訓練側の予想と異なることもあり、臨機応変に対応する必要があるため、舞台裏もてんてこまいの状態となった。

実際の運用では訓練問題に非常に近い事態が起こり、まさに「山が当たってしまった」と言うのが実感である。
(橋本正之)



図35. 大忙しの訓練チーム



SFUは日本初の回収型衛星というだけでなく、三つの省庁（文部省・科学技術庁・通商産業省）共同でプロジェクトを推進する初めての試みでもあった。

三省庁共同でプロジェクトを進めるに当たり、「SFUの開発等のために実施する作業に係るインタフェース調整上の技術的な問題等について検討・調整を行う」ことを目的とした、「SFU実施ワーキンググループ」が、昭和62年5月末栗木教授を主査として関連実施機関、即ち宇宙科学研究所・宇宙開発事業団・通産省宇宙産業課（無人宇宙実験システム研究開発機構）で結成された（新エネルギー・産業技術総合開発機構は後にメンバーとし登録された）。

昭和62年は基本設計フェーズであり、NASAのスペースシャトルで回収されるSFUの設計はどのようにあるべきか等のコンセプト作りの話題が中心であった。また、共同購入による費用削減を計ると共にコアシステム機器／ミッション機器の信頼性確保のため、部品／材料専門委員会が開催されたのもこの時期であった。シャトル搭載のための安全審査フェーズ0も昭和62年冬に開催された。NASAとの間の調整は「SFUシステムの国内・国外調整」等で詳述されると思われるので、ここでは割愛するが、シャトルによるSFU回収概算費用算出、回収契約文書の検討に手を付け始めたのもこの時期であった。実験・観測機器の検討はこれまで担当各機関で独自に進められていたが、これらを取りまとめる実験総括ワーキンググループ（EIWG）が設置されたのは昭和63年夏のことであった。

平成元年はSFU構造・熱モデル（STM）及びエンジニアリングモデル（EM）の製作と安全審査フェーズIの対応を中心に展開した。連日連夜サブシステム間のインタフェース調整、NASA安全性要求を満足するための設計変更検討等で明け暮れた。そして平成2年1月から10月まで筑波宇宙センターを借用し行われたシステムSTM試験、10月から翌年3月まで三菱電機鎌倉製作所でシステムEM試験が実施された。

これら一連の作業を通じ重量が大幅に超過することが判明したため、プロトフライトモデル（PFM）製作に当りサブシステム毎に削減重量を割当ててことにした。しかしコアシステム機器のみでは吸収できず、当初搭載ミッション機器重量とし予定していた1トンを900kgに変

更せざるを得なくなった。

SFUコンテナの製作を行ったのもこの時期である。コンテナの直径は5mにもなり、輸送に当り道路を管轄する建設省と交通安全を管轄する警察庁の特別許可が必要であることが判明し、幾度となく許可取得のための陳情に出かけた。

平成3年度は最終設計審査会（CDR）とそれに続く安全審査フェーズIIを中心に展開したが、同時に実施三機関のSFU打上げ／回収に係る基本協定の協議と、NASAとのInterim Agreement（中間契約）の協議が並行して進行し、それぞれ平成4年1月31日、2月14日に締結された。NASAとの調整はこの後も延々と続き、本契約は平成6年2月7日になってしまった。この間の経緯は「打上げ業務契約書」を参照戴きたい。

平成4年初夏に至りH-IIロケット打上げ1年延期が確定になった。平成6年1-2月期打上げを目指し、軌道上運用準備、PFM組立総合試験準備を大騒ぎして進めていた我々にとり、1年延期の報は一瞬安堵の感を与えたものの、延期に伴う保管・NASAとの調整等、省庁をも含む問題となり更に忙しい夏になってしまった。平成4年9月1日から平成5年11月にかけて筑波宇宙センターを借用し実施されたPFMのシステム試験は、推進系の加圧に当り高圧ガス取締法上の取扱問題の調整はあったが、NASAとの間で懸案となったモールドサーベイ試験も無事終了することができた。

安全審査フェーズIIIは、NASAと本契約が締結できた直後の平成6年3月から開催された。最終安全審査でもあり、審査ボードメンバーと火花を飛ばす激論を繰り広げる一瞬もあったが、最後は審査委員長からSFUの安全性はよく考えられていると褒められ一同安堵の胸を撫で下ろしたものである。

（松岡 忍、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構）



図36. JSC構外にあるリージェントパーク会議場

Dear SFU friends,



I am honored to be included in the ISAS News. Working with SFU personnel has been the most rewarding aspect of my years at NASA/Johnson Space Center. I would like to share with you some of my fondest memories of the SFU mission.

I was just selected to work the SFU mission when Jeff Larson, the SFU project engineer at JSC Payload Operations, was temporally reassigned to another area at JSC. I was excited to work on such a critical mission with so many challenges. At the same time I was selected to work SFU, Bill Jordan also was selected to replace Dave DeAtkine, who had been promoted, as Payload Integration Manager. I did not know how much fun Bill and I would share together on this project!!

I remember meeting all of the ISAS team members and enjoying the time spent with them during the POWG meetings.... I remember how impressed I was with the technical skills of the ISAS, MELCO, etc. team members, even though they had never before had a primary payload on a Shuttle mission.... I remember singing "The Eyes of Texas" and toasting Texas Independence Day during several POWGs.... I remember wild parties at Bill's house, playing Pachinko and eating too much.... I remember the SFU CDR #2, my first trip to Japan, and how impressed I was with the SFU design.... (I try not to remember the SFU safety reviews!).... I remember how sad I was during the year that we could not work on SFU projects due to diplomatic problems.... I remember the SFU hardware inspection tour, traveling with Brian Duffy, Koichi Wakata, Wendy Johnson and the other JSC and KSC (Kennedy Space Center) folks with whom I would have not become friends except for the SFU project.... I remember how much my mother enjoyed visiting with Professor Kuriki during the social events.... I also cherish the friendships I made with Professor Ninomiya, Professor Yamada, Professor Sasaki, and all of the other ISAS team members, the MELCO and McDonnell Douglas folks, Bryan Austin (an excellent flight director), the Flight Activities team, the training folks, Harold Battaglia and his safety team,

the STS-72 crew members, and most important, all of the wonderful SFU team in Japan that I had the privilege to work with. They are dedicated, professional group!

But one of the most memorable moments of the actual flight to me was also the most challenging. The SFU payload was in clear view of the crew, the SAPs were retracting nominally, and all was going well. I mentioned to Bryan Austin that I could not believe everything was going smoothly. And then the SAPs didn't latch. That set into motion one of the shining moments in NASA's- and I'm sure ISAS'- history. The team of Japanese and American personnel that had worked so well together prior to flight now worked together for a common goal during the flight: the safe retrieval of SFU. The SFU team performed its troubleshooting as planned, in a thorough and methodical method. The 72 crew did their job in an exemplary fashion, too. It was easy to coordinate the efforts of the ground and the crew, working with Bryan in the MCC, Brian onboard the Shuttle, Professor Yamada in the SOC, and Professor Kuriki in the CSR, because everyone was poised and prepared. At one point during this tense time, I stopped a moment to ponder what was going on. I felt a rush of adrenaline, knowing that I was part of something truly special, that I will probably never again experience. It was a tough time, but it was the brief, shining moment that epitomized the SFU project: teamwork. I was so proud of everyone, proud to be a part of history in such a positive way!

(Susan Beisert, Lead Payload Officer, NASA JSC)



図37. 栄誉あるシャトル-72号機ブラック掲額を行う
Susan Beisert主任, NASA JSC MCCにて



筑波という名前が示すとおり、筑波研究学園都市の南側の1区画に所在している。そして、SFUの実験ペイロードの3分の1を構成している、宇宙開発事業団が開発した「SFU搭載実験機器部（EFFU）」の、開発プロジェクトの本拠地であると共に、SFUの回収操作を行った若田宇宙飛行士の、宇宙開発事業団での「本籍地」でもある（実際は宇宙飛行士訓練のために、米国に滞在している期間の方が遥かに長い）。開発以外の業務としては、研究、追跡管制、宇宙機の試験が挙げられ、SFUに関連した研究では、材料曝露実験の一部を担当した。

追跡管制はSFU計画以前から、宇宙科学研究所と宇宙開発事業団との間で協力関係があり、人工衛星の軌道決定等を支援している。SFUにおいても、内之浦にある鹿児島宇宙空間観測所の運用を、宇宙開発事業団の沖縄追跡管制所が支援したが、沖縄からのデータは筑波宇宙センターを経由して、宇宙科学研究所内の相模原SFU運用センターまで伝送された。データ中継といえば、SFUの回収状況を刻一刻伝えたNASAセレクトTVの画像も、筑波宇宙センターを経由して、関係機関等へ配信された。

宇宙機の試験という観点では、筑波はSFUにとって「第二の故郷」と言える。SFUはスペースシャトルのカーゴベイに内接する必要から、日本の衛星では最大の直径であった。そこで、他の設備では出来ない各種のシステム試験を実施するために、筑波宇宙センターへ運ばれた。主な試験として、H-IIロケットと、スペースシャトルの双方の宇宙機の、環境条件に適応していることを証明する、モールドサーベイを含む振動試験や、写真に示す音響試験、そして、宇宙空間の過酷な環境を模擬する熱真空試験等が実施された。

さて、筑波といえば、「ガマの脂」で名高い筑波山が思い浮かばれ、「陸の孤島」と言うイメージが強いため、輸送には船便が用いられたと聞くと、驚く人が多いと思われる。実は、前述のようにSFUの直径が大きいので、陸送が困難であり、利根川と、霞ヶ浦を利用した水運が用いられたのである。本件に関しては、霞ヶ浦の洪水期には雨乞いをした（？）と言う、宇宙科学研究所や無人宇宙実験システム研究開発機構を始めとする、関係者の苦労話が聞けるはずである。

ところで、SFU実験機器部（EFFU）の、開発担当者

は元から筑波宇宙センターに居た訳では無い。SFU計画が始まった時は、浜松町の本社地区で業務を行っていたが、SFU計画が折り返し点を過ぎた平成5年4月に、筑波宇宙センターに引越した。

宇宙科学研究所の所在地である相模原市は、狸が出没すると言うので有名だが、筑波宇宙センターも構内を雉が闊歩すると言うように、「田舎度」では決して他にひけを取らない。

かくして、会議の場を提供していただいている、無人宇宙実験システム研究開発機構まで2時間、宇宙科学研究所まで4時間と、移動だけで十分に「仕事」をしてしまう、と言う事になった。

いきおい、会議等への参加も必要最低限とならざるを得なくなった。従って、緊急を要する内容には、電話とファクシミリだけで対応するというように、関係各方面には、色々と迷惑を掛ける事となった。

そのような状況においても、SFU計画が有終の美を飾れたのは、やはり、人の和によるものではないかと思われる。

母体の異なる機関が、それぞれの役割分担を責任を持って実行する事はもちろんだが、他機関は相手機関が役割分担を果たすことを信じなければ、共同プロジェクトは成立しない。

国内のみならず、米国との共同作業もあったSFUプロジェクトは、見事にそれを示したと思われる。

と、言うわけで、なかなか本題に入れなかった（入らなかった？）が、筑波宇宙センターから関係者の皆様への感謝をこめて、結びの言葉としたい。

（武井 満、宇宙開発事業団）

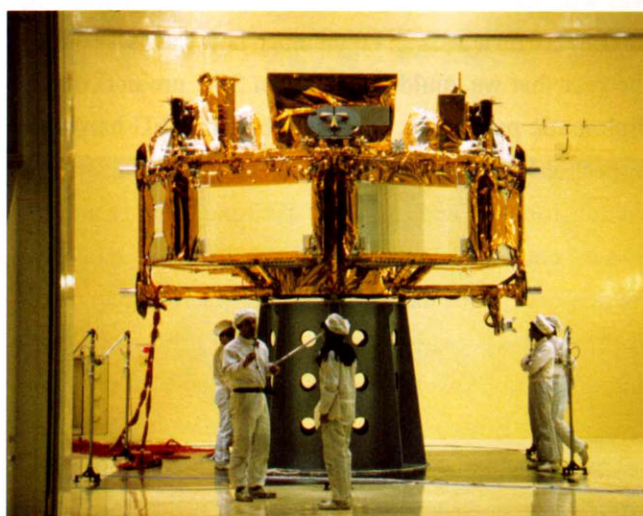


図38. 筑波宇宙センターにおける音響試験



SFUをNASAのスペースシャトルで回収するための諸条件を定めた「打上げ業務契約書（LSA: Launch Service Agreement）」は、1994年2月7日の深夜、文部省内の一室で電話とFAXによるNASAとの最終確認のうへ、文部省・宇宙研関係者が立会う中、当時の秋葉所長により署名された。LSAの締結という劇的な瞬間はあっけなく終わってしまったが、LSAの締結に至るまでの過程は、山また山（しかもヒマラヤ級）の連続で何度も遭難死しかかった……。

SFUをシャトルで回収するには、事前にNASAとの間にLSA及びその他いくつかの合意書を締結する必要がある。しかもその交渉過程で回収に係る準備作業を遅滞なく進めていく必要上、LSAを締結するまでの暫定的なものとしての「暫定契約書(IA: Interim Agreement)」を結ぶおまけまでであった。宇宙研がSFU側関係機関を代表してNASAと交渉を本格的に開始し、LSAの締結に至るまでに4年以上の歳月が費やされた。

このように交渉が難航した理由は、NASA側から提案されたLSA案中に悪名高き「Liability条項」が含まれていたことにあった。それ故SFU側は、国際共同研究における損害賠償請求権の放棄を定めた「研究交流促進法」及び「同施行令」に従い、SFU計画に参加している民間企業等の関係者のために、SFUとNASA双方が特定すると共に彼等も相互に放棄し、かつ双方が個別に指定していることについて大蔵省と事前協議しなければならなくなった。しかしNASA案では、SFUに関係する全ての包括的な放棄を規定しているばかりでなく、シャトルに同乗するSFU以外の計画の関係者など第三者に対する相互放棄をも要求していた。従ってその調整に忙殺され、LSAの締結期日を超過せざるを得なくなった。そこでSFU回収に係る準備作業を進めるための臨時的措置としてIAを結ぶこととなり、難交渉の末ようやく1992年2月に締結にこぎ着けた。

SFU関係者はただちにLSA等の締結に向けてNASAとの交渉を続けると同時に、国内の関係当局との協議を再開した。当初LSA案のLiability条項がIAのそれと同一であったので国内協議は実質的に終了してい

るとの希望的観測が流れていたが、このLSAの協議においてはIAの際とは較べようもない厳しい態度で検討が加えられ国内法令に照らして少しでも疑義が生じると矢継ぎ早に指摘される等、それが甘い幻想であったことを思い知らされた。特に第三者への相互放棄については研究交流促進法では全く想定し得ないものであったため、現行法体制の下では如何ともし難く国内協議は早々と暗礁に乗り上げてしまった。これを打開するため文部省・宇宙研の関係者がNASAに対して何度も日本側の事情を説明しLSA案の修正を求めたが、NASAはチャレンジャー事故を盾に頑として修正に応じなかったため、遂に1993年3月末をもってIAの有効期限が過ぎてしまい、NASA側作業が全面的に停止するという緊急事態を招き、SFU側はまさに四面楚歌の状況に追い込まれた。これを打開すべくSFU側関係機関の一丸となった働きかけが功を奏し研究交流促進法施行令の一部改正が認められたため、ようやく国内での協議を整えることができた。その直後に行われたNASAとの協議でも一部修正のうへ基本的な合意に達することとなり、関係者一同ほっと胸をなでおろした。

しかし現実はその甘くない。外務省から現行の日米科学技術協力協定（1989年改正）に「宇宙」の分野が含まれていないことから、「交換公文（EN: Exchange of Note）」を政府間で結ぶ必要があることを指摘され、外務省にENの締結を願うこととなった。当初さほど問題ないと予想されていたこの協議が意外に難航し、米 국무省との交渉が何度も決裂するなど思うように進展せず、とうとう年を越す事態となってしまった。明けて1994年はSFUの打上げ1年前にあたっていた。関係者の必死の努力によってようやく日米両国政府の協議が整い、1994年2月4日にENが米 국무省において締結された。それから3日後のSFUの打上げを左右するSFU/NASA技術者会議が予定されていた現地時間7日の未明、LSAなどのFAXによる締結を見たわけである。この締結があと数時間遅れればSFUの打上げ、回収はなかったかもしれない。

一連の作業を終えて外に出た時は午前0時を過ぎていた。凍てつく寒風の下に身をおきながら振り向いた私の眼に、そびえ立つ文部省の窓からもれている灯りが何故か妙に暖かく映ったことを今でも鮮明に覚えている。

（田中理子、元研究協力課専門員、

現東京工業大学国際交流課長）

SFU運用

種子島からケネディへ



H-IIロケット試験3号機に搭載されたSFUは平成7年3月18日17時01分（日本時間）に、宇宙開発事業団の種子島宇宙センター吉信射点より打ち上げられ、発射後約13分16秒に成功裏に分離された。共に打ち上げられたGMS-5（ひまわり5号）も発射後約27分47秒に無事に分離された。

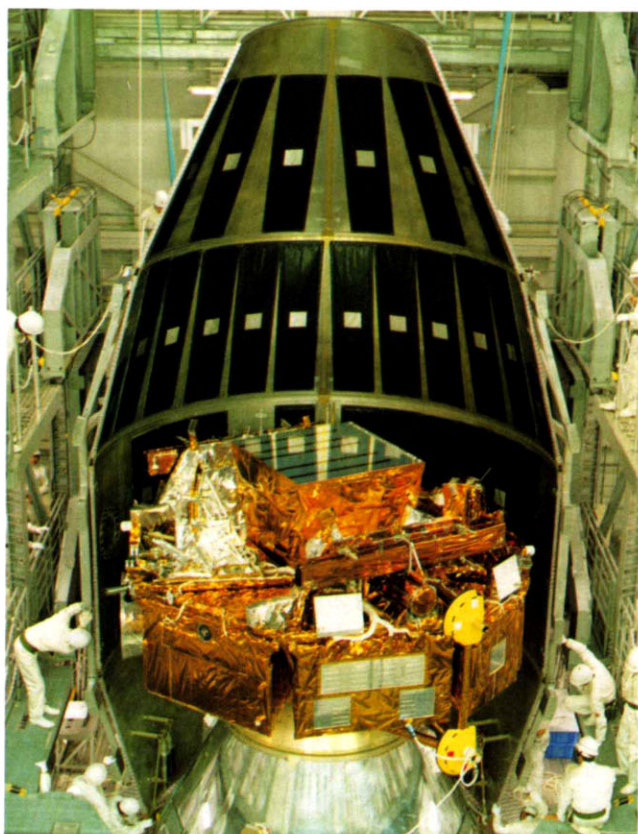


図39. H-IIロケットのノーズフェアリングに収められたSFU（NASA提供）

この打上げはもともとの計画では2月1日に予定されていたが、射場でのSFU側の度重なる不具合、特に推進系の不具合が頻発し、約1.5カ月にわたって延期されたものである。推進系の責任者と射場作業の現場責任者を担当した私としては、打上げ途中でSFUが爆発事故など起こさないことを願わずにはおれなかった。結局SFUは栗木教授を初めとする担当各位の並々ならぬ勇気と決断をもって打上げ日を迎えることができたが、とりわけ印象的だったのは「漁業交渉」にあたられた小山教授と、打上げ時の上杉教授の「念力」であった。種子島での射場作業を今振り返ると、あれこれ至らなかった点が思い起

こされはするが、曲がりなりにも打上げまでにこぎ着けることができたのは、秋葉前所長や木下前管理部長の号令のもとに多くの方々の惜しみない尽力があったからこそと痛感する。田中前国際協力係専門員の「やっとここまでできましたね」という言葉には関係各位の、人には言えぬ苦労が偲ばれた。長かった搭載システムの最終試験、推進剤や火工品の装填を終えた出発直前のSFUは金色のMLIと銀色のシルバーテフロンに輝き、文字どおりピカピカの一年生であった（図39）。

1996年1月20日2時42分（米国東部標準時間）、SFUを回収したスペースシャトル・エンデバー号がケネディースペースセンターに着陸した（図40）。エンデバーはシャトル整備棟で荷物室のドアを開き、10カ月に及ぶ宇宙の冒険を終えたSFUを披露してくれた。一見して打ち上げ前と全く変わっていないようにも思えたが、シャトル縦形整備棟に移動してから近づいて見ると、切り離された太陽電池パドルの跡も生々しく、金色や銀色であったはずの表面はすっかり曇り、強烈な太陽光による日焼け跡が厳しかった旅程を物語る。デブリの衝突痕も一つ二つ……、いやよく見ればとても数え切れない。その後NASAから引き渡されたSFUは、米国民間施設であるアストロテック社において火工品、推進剤、一部の実験サンプルの降載、デブリ等観察の後処置を行い、同年3月28日に横浜港へ無事に到着した。この間の作業は米国側の惜しみない協力と日本側の各担当および参加メーカーの献身的な努力により、極めて順調に進捗した。これら一連の作業についても、現場責任者を担当させていただいたので、米国企業も含め関係各位に深く感謝したい。米国の関連へは高水主計課専門員らと同年8月にお礼の挨拶に行き、お世話になった方々への栗木教授からの感謝状を手渡すことができた。（都木恭一郎）



図40. エンデバーの着陸（NASA提供）



回収を2週間後に控え、身に絡み付くような圧迫感を払いのけたい心境に駆られる。クリスマスや年末の喧騒がむしろ疎ましい。そういえば、SFUに関してここ数年安穏とした年始を迎えたことがない。今日は当番ではないので机に積まれた書類の山を切り崩しにかかる。内線電話。「運用当番の中川です。SFUの状態が大変に悪いので……」。運用室(SOC)に駆け付ける。軌道変更を行った後、まる4日間コマンド運用を休止して本日再度スラスト噴射の予定であった。姿勢制御コンピュータAにより太陽指向3軸安定化されているはずのSFUが、というわけか冗長系Bによって太陽を捕捉するべく回転していることが第1可視の追跡により判明した。今までに遭遇したことのない異常な状態である。また、データレコーダがオフされていたので電源を投入し、予定していた運用は中止してデータ収集に専念し第1可視を終了した。

関連各社の技術支援メンバーに招集の連絡がなされた。さらにコマンド運用休止期間中の衛星の状態を表すデータが沖縄局にダウンリンクされていたはずであるので、この蓄積データのSOCへの転送作業が実施されていた。この状態の最も安直な解釈は、第1可視開始直前に姿勢制御コンピュータになんらかの不調をきたし、自動的に安全機能が働き冗長系コンピュータが太陽捕捉を実施中というものであった。仮にこれが正解だとすると太陽捕捉は30分程度で完了するので、第2可視では太陽指向モードで入感するはずである。

第2可視が始まった。衛星状態のモニタ画面は赤い警告表示のオンパレード。状況は前回と変わらず、電源オンにしたレコーダも再度オフとなっている。事態は最悪であることが認識された。オフラインで動ける私は所内のマネージメント関係者に連絡をとり始める。鹿児島局による5回の追跡の後、第6可視を沖縄局にて運用するための手配にかかる。さらに追跡運用を継続するために山田助教授にキャンベラ局、ゴールドストーン局、ワロップス局の確保をNASAに申請してもらう。どうやら今夜は徹夜の運用になるようだ。追跡運用支援の各社に緊急で業務依頼を行う。今夜の宇宙研担当者も決めなくてはならない。

第3可視に至り、技術支援メンバーが集まり始める。

蓄積データ解析の結果、SFUの回転を止めるべき姿勢制御スラストは連続噴射に近い指令が送られているにもかかわらず機能していない。しかも天皇誕生日、日曜日、クリスマスとまる3日間この状態で回転をつづけていたことが判明する。Z軸周り制御スラストに故障が発生し姿勢が傾斜したため、コンピュータは自己異常と判定し冗長系コンピュータに切り替えて太陽捕捉を開始したものの、例の故障スラストが機能しないために回転がとめられない状態に陥っていたのであった。このように故障の原因が明らかになったので、その処置としてスラストの切り替えが計画される。しかし症状は小康状態であるので、さらに分析して慎重に対処することとなる。

技術支援メンバー全員が集合して第4可視を迎える。可視後のデータ解析の結果、電源担当者からバッテリーは空であることが告げられる。SFUが日陰になると電源電圧が極限まで落ち込むため、自動的にレコーダがオフされているのであった。日照中の僅かな充電量と日陰中の消費がギリギリのバランスで釣り合っている状態であり、姿勢制御コンピュータがいつ停止してもおかしくない。直ちに回転を停止させ太陽電池パネルに十分な太陽光を照射させねばならない。

第5可視にコマンド送信を行い、復旧を試みることとなる。第6可視は沖縄局におけるSFUの仰角が不十分、またそれにつづくキャンベラ局からの追跡は2時間ほど後、しかもSFUの日陰中となる。つまりこの第5可視は救命のための最後のチャンスかもしれない。コマンドラインの検証、管制装置への登録、コンパイル、と作業が進む。可視開始20分前、手元の時計を合わせる。各管制装置の確認OK。地上局との回線OK。入感1分前。入感予定時刻30秒経過ようやく入感、それまで静止していたモニタ画面にはSFUの回転を示す大きく蛇行したグラフが描き始められる。地上局アップリンク開始、周波数掃引、衛星受信器ロック・オン、モジュレーション・オン、コマンド送信開始。グラフの傾斜が急に緩慢になる。姿勢制御モニター担当が叫ぶ、「止まった！」。

深夜SOCを抜け出す。今日も長い1日だった。明日はまた何が起こるか分からない。SFUの機能は回復するのであろうか。これで正月休み返上で追跡業務になるだろう。SOCへ向かうSFUプロジェクトマネージャー栗木教授とすれちがい状況を詰問される。「とりあえず一命は取り留めました」と答えた。回収ミッションへのインパクトを憂慮してのことであろうか、溜息とも苦笑ともつかない「異音」を残して暗がりに消えていった。

(國中 均)



私がSFUを宇宙で回収するSTS-72ミッションに指名されたのは1994年12月12日であった。本格的な訓練に入ったのは翌年の3月6日からで、本ミッションでは打上げ上昇時に操縦席において船長とパイロットの補佐をする任務を担当することになっていたため、訓練中最も多くの時間を過ごしたのはシャトル・ミッション・シミュレータの中であった。また、ロボットアームの操縦訓練、相模原運用センター（SOC）とヒューストンのミッションコントロールセンタ（MCC）を繋いだ総合シミュレーション等もかなりの時間に上った。中でも一番思い出に残っているのは、打上げ直前の1月4日に行われたSFU回収総合シミュレーションで、SOCとMCCそしてクルーの呼吸はぴったりで、本番に向けてチーム全体がいい状態になっているというゆとりが感じられた。

打上げは地上側システムの不具合やスペースデブリとのニアミスを避けるため23分遅れたが、信望の厚いMCCフライトディレクターのジェフ・バントル氏の明解な状況説明もあり、フライトデッキの中ではクルー全員が落ち着いて打上げカウントダウンの再開を見守った。

軌道上で明るく輝くSFUを最初に肉眼で確認できたのはSFUの手前約90kmの距離であった。軌道修正噴射、SFUとシャトルとの通信リンクの設定、ロボットアームの回収姿勢への姿勢変更と順調に進み、SFUの真下約200mの距離で太陽電池パドル（SAP）の格納コマンドをシャトルから送信し、スムーズにパドルが閉じていく様子が確認された。シャトル操縦室の天井の窓からはSAPはほとんど格納されているように見えたが、収納が完了したことを示す信号が送られてこないままSAPのモータが停止した。その状況は訓練で何回も何回も行ってきたシナリオ通りであった。次に必要な手順はクルー全員が熟知していた。異常時の操作手順を開始する前に「これはシミュレーションではない」と一呼吸入れて手順を再確認してから、再度、冗長系によるSAPの格納を試みたが結果は同じであったのでSAPは放出せざるを得なかった。

回収に必要な姿勢制御を行うタイムリミットが迫っていた。まだよく覚えているがSFUの地球指向姿勢へ

の制御を開始できる点まで約5分になろうとしていた時に、MCCからのSFU姿勢制御操作の指令は一瞬の遅れもなくクルーに伝えられ、SOCとMCCのてきぱきとした対応の様子がはっきりと感じられた。

SFUへの最終接近、そして、ロボットアームによる捕獲も順調に行われ、私は慎重にSFUのカーゴベイへの格納を試みた。荷物室にはSFUを固定する金具が荷物室側壁の先端部に4カ所、船底に1カ所の計5カ所ある。固定準備完了表示がSFUの姿勢の調整を行ってもどうしても4つ同時に点灯しない。4つ同時につかないとラッチを閉じてはならないことになっていた。「もしかしたら、シャトルからSFUへ電力を供給するコネクタ（ROEU）もうまく結合できないのでは？」といった思いも脳裏を走った。実は今回のミッションの相乗り実験衛星であるNASAのOAST-FLYERの格納はそのラッチ機構のクリアランスが非常に小さいため、過去の経験から様々な対応法を検討済みであった。しかし、SFUについてはこのような状況は全く想定していなかった。SFUのバッテリーが残り1時間を切っていることもあり、MCCやSOCの皆さんがきつとヤキモキしているだろうと思いながらも、とにかく必要と思われるSFUの姿勢調整操作をするが一向に状況が変わらない。この時の、MCCからの部分的にラッチを閉じるようにとの指令は的確な判断であった。船底を含めた5つ全てのラッチが閉じ、ROEUの結合そしてSFUのヒータへの電力供給を確認する信号を見たときに初めてほっとした。

1月20日未明のKSCへの帰還後、その日の午後ヒューストンのエリントン空港に戻ってきた時には小雨の降る中多くの方々が出迎えてくれた。栗木先生も温かく帰還を祝う言葉をかけて下さったが、その時の先生のくしゃくしゃになった笑顔を見た時、「本当によかった」としみじみ思ったことを覚えている。

（若田光一、NASDA有人宇宙活動推進室）

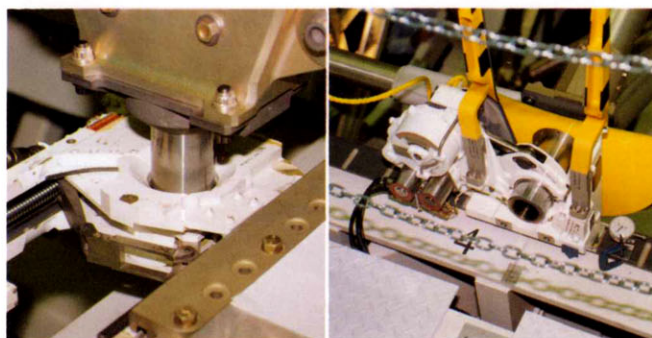


図41. シャトルのSFU固定金具。左：船底部、右：側壁部



SFUに関する事はなんでも引き受け、現場第一主義で仕事をしたつもりである。正式に「宇宙実験・観測フリーフライヤ」プロジェクトが始まったのは昭和62年4月であるが、「小型宇宙プラットフォーム」構想からは丸13年間かかわってきたわけである。「なんでも係」の第一歩は、当時の駒場キャンパス40号館熱真空試験室階段下にプロジェクトの部屋を確保する仕事から始まった。建設中の相模原キャンパスに要求すべく「SFU試験・整備棟」をイメージした建屋の図面を引いた。長さ100 mの大きさである。ヘリコプター輸送での搬出入を調査したが、機種、航空法など色々な制約で実現できないことが解った。

次はスポークスマン役である。宇宙研の他プロジェクトとの調整や進捗状況の説明をするため会議に出席する。そのデビューは駒場キャンパス45号館1階会議室のチーフ会議で、緊張しながらSFUの説明をしたことを覚えている。プロジェクトを代表して所外への説明役も買った。その説明のために必要なものがパンフレットであり、アニメーションであり、ビデオ映画であった。イメージ・キャラクタに昭和初期の漫画の主人公「タンク・タンクロー」を使えるようその著作権所有者である講談社殿や坂本直城氏にお会いして快く使用許可をいただいた。回収はNASAと協力作業になるので、SFUのロゴマークについてもNASAに負けないようにとの意気込みで作った。いま、そのロゴはケネディ宇宙センタのシャトル専用施設の壁に他のミッションロゴと共に貼られている。

その時その時の最新写真情報も非常に有効な説明材料であり、進捗状況の記録でもあるのでカメラマン役もやっている。今までに撮ったSFUに関する写真は優に一万枚を超えた。写真は着陸4日目のまだ湯気が上がっているぐらい直後にシャトル施設でシャトル荷物室のSFUを撮影したものである。

SFUは日本屈指の大型衛星である。打上げ時の重量3849kg、打上げ時の包らく直径は約4.6mである。でっかいことはいいことか？ 確かにそれだけの事はある。今までの衛星の常識をはるかに超え、組み立て作業などでは、もちろんクリーン衣に身を包んではいるが、衛星の上は何人もの人がどこどこか上がって作業をしている。設計思想の通り、もはや軌道設備である。

初期設計の積算重量は4.1トン、目標重量から100kg超過している。全体重量の割合からすると2.5%である。しかし重量軽減のための努力は果てしなく続き、打上げ重量は3.85トンになった。陰で泣いた人もいるという。この寸法の大きさに苦勞もした。何と言ってもちょっとやそっとでは動かない。江戸時代の関所通過のようにあちこち通行手形が必要だ。コンテナに収容すると直径5m、高さ3.6m、日本の道路事情に合うとは言い難い。大きさから言えば新幹線や橋脚部材の輸送などいくらかでも大きいものが有るには有るが、環境条件が全く違う。基本的には水路輸送、可能なかぎり陸送は避ける。輸送担当としては「秋刀魚とSFUの関係について」も書けるがまたの機会にする。

さらにSFUがユニークな点は、回収に伴い輸出、輸入の手続きが発生することであった。人工衛星は輸出貿易管理令が明記する安全保証貿易管理関連貨物の一つである。結果的に日本で初めてのケースになるため霞が関の関連省庁始めあちこちへお邪魔して説明を行い、多大の協力をいただき無事打上げ、再輸入することができた。シャトルに積み込む小さな旗を送ろうとして日米繊維摩擦の一端を見たりもした。

NASAの担当者やフライト・クルーの会議が開かれるときには総務係に变身した。テーブルを歓迎を表す手作りの小旗や花で飾り、コーヒー・ブレイクの準備もしたが「サンキュー」の一言で早起も酬われた。自己紹介の機会があれば「I am the secretary-general of the SFU project.」と大見栄を切った。

SFUの成功の陰には大勢の方達の努力が有ったことは今更言うまでもない。汗と涙と、時には血を流す努力を払った現場の方々に深く敬意を表する。まもなく一区切りをつけるプロジェクトである。(清水幸夫)

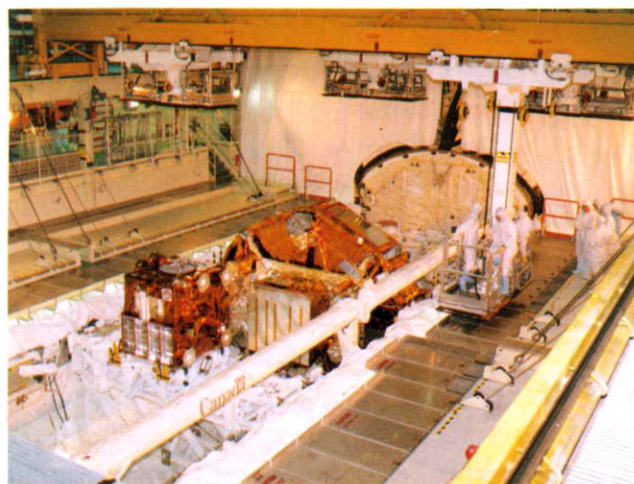
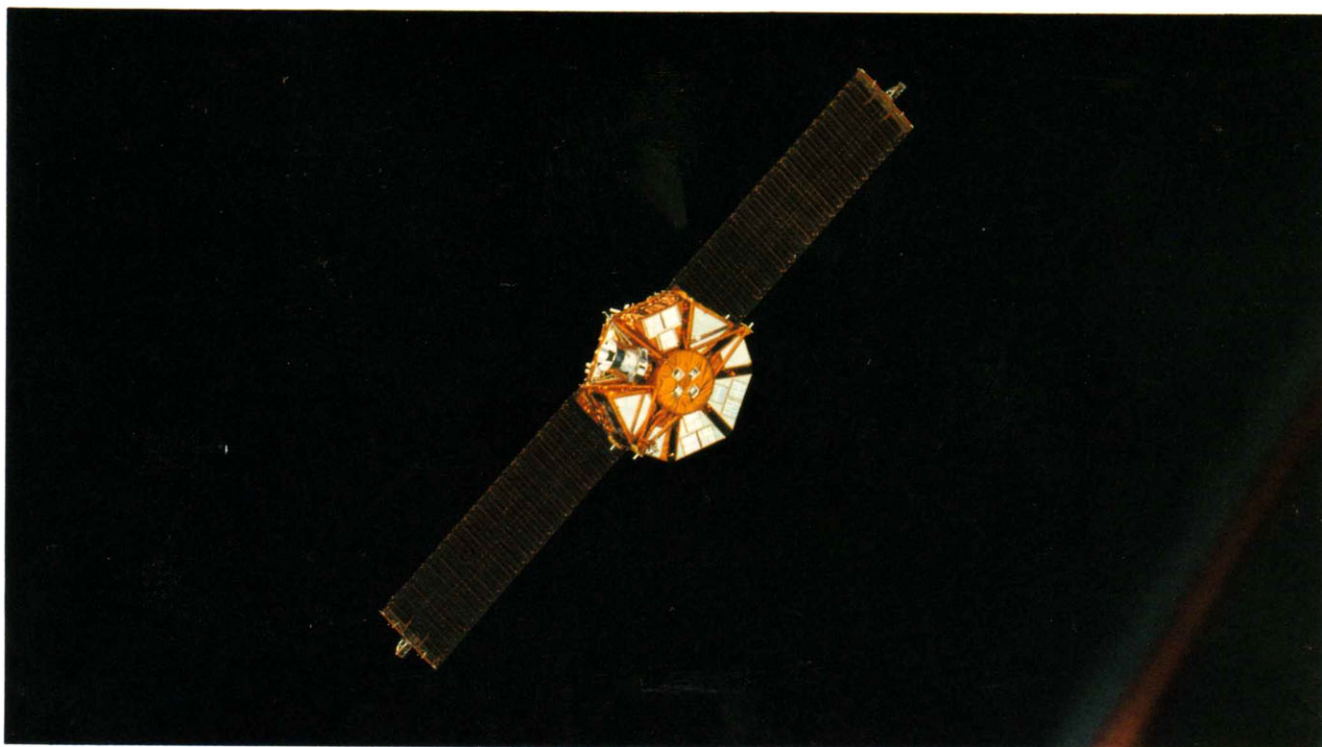


図42. シャトル荷物室内のSFU



シャトルから約130mの距離でランデブー飛行するSFU (NASA提供)

SFU 略語集 (文中に頻出するもののみ)

CDR(Critical Design Review)	最終設計審査
CSR(Customer Support Room)	利用者支援室 (NASA / JSC)
DSN(Deep Space Network)	深宇宙ネットワーク
EM(Engineering Model)	地上試験モデル
JSC(Johnson Space Center)	ジョンソン宇宙センター (NASA)
MCC(Mission Control Center)	ミッション管制センター (NASA / JSC)
PFM(Proto-Flight Model)	飛行試験モデル
POWG(Payload Operation Working Group)	ペイロード運用ワーキンググループ
SEPAC(Space Experiment with Particle Accelerators)	SEPAC 実験 (スペースラブ-1)
SFU(Space Flyer Unit)	宇宙実験・観測フリーフライヤー
SOC(Sagamihara Operation Center)	相模原運用センター (宇宙研)
STM(Structural and Thermal Test Model)	構造熱モデル
USEF(Unmanned Space Experiment Facility)	(財)無人宇宙実験システム研究開発機構
NASA 安全パネル	シャトルなどの安全を審査する NASA の審議会
STS-72	スペースシャトル 72 号機. エンデバー号が使われ SFU が回収された。
	STS は Space Transportation System (宇宙往還輸送システム) の略

(タンクタンクローは坂本牙城著 © 講談社, 意匠の使用は坂本直城氏に承諾いただきました。一編集部一)



今月号はSFUの特集でした。自分たちの実験を宇宙でやりたいという研究者が集まり, 「小型」宇宙プラットフォーム (SFU) というとっても大きな共同宇宙実験衛星を計画し, 国内外の研究機関ががっぷり組んだ共同プロジェクトとして, 多くの困難を乗り越えながらやりきったこと, そしてそれとともに数多くの貴重な研究・実験成果と心を打つ体験がプロジェクトにかかわった人たちにいつまでも残るだろうことを, 読みとっていただければと思います。なお本号の編集実務は清水幸夫さんとの共同作業でした。(芝井)

ISASニュース

No. 190 1997. 1

発行: 宇宙科学研究所(文部省) ☎229 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 0427-51-3911

The Institute of Space and Astronautical Science

◆本ニュースに関するお問い合わせは, 庶務課法規・出版係(内線2211)までお願いいたします。(無断転載不可)

*なお, 本ニュースは, インターネットでもご覧になれます (<http://www.isas.ac.jp>)。