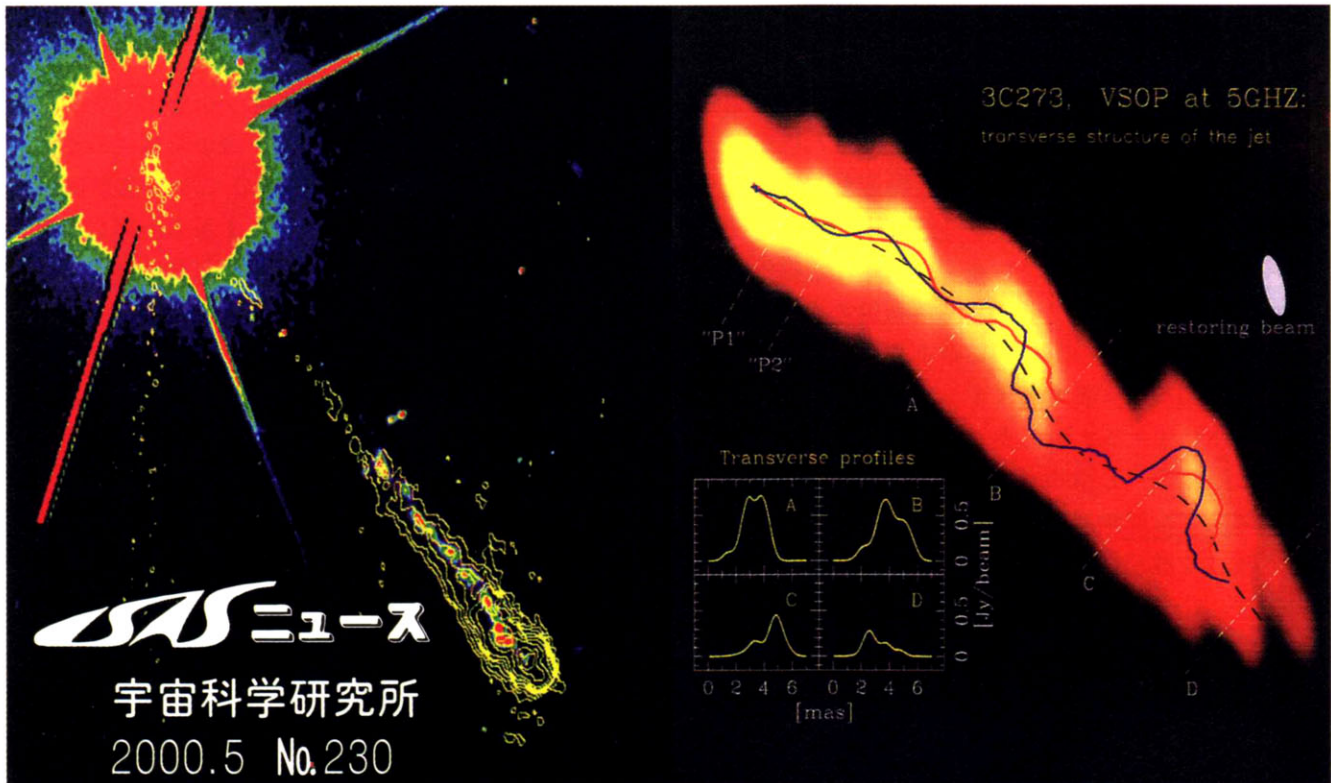




▲クェーサー3C273の光、電波の映像（左）と、1000倍にスケールアップした中心部のVSOP映像（右）
（本文、記事参照）

電気推進・イオンエンジン

宇宙科学研究所 國中 均

電気推進は「高比推力」を特徴とし、衛星に搭載して軌道維持や深宇宙探査の主推進にその能力を発揮します。比推力（単位：秒）とは推進剤の消費率当たりの推力を表わし、値が大きいほど重量効率の高いことを意味します。既に使用されている衛星搭載用の化学推進器では比推力300秒に対し、電気推進機の一つイオンエンジンは3,000秒と優に10倍の効率を示します。それでは比推力の差違がもたらす効果を見てみましょう。M-V ロケットを用いれば惑星間空間に500kgの探査機を打ち出すことができます。この探査機が100kgの推進剤を積んでいる場合、イオンエンジンなら6.7 km/sの軌道変換能力に相当します。さて同じだけのマヌーバ容量を化学推進器で発生するには3.3tの燃料が必要になります。だからH-II ロケットで打ち上げるに匹敵する全重量3.7tの探査機となります。M-Vの能力でもってH-IIと等価な（ある種類の）深宇宙ミッションも可能なのです。バラ色のことばかり書きましたからすこしエクスキューズします。推進機の推進剤を含まない乾燥重量はどうしても重くなりますので、

ある程度大規模の宇宙機でなくては重量メリットが現れません。また電力は必須ですから、軌道投入最中とか故障時のセーフホールドには使用できません。もう一つの特徴として「低推力」と謳われます。これは必ずしも自慢できる項目でなく、瞬時でなく長時間かけて軌道マヌーバを実行するため運用負荷が重くなります。ただし本質は電力に比例した推力が発生できるのであって、恒久的に宇宙で利用可能な電力に制限があるため結果として低推力なのです。

私の研究開発するイオンエンジンに話を進めましょう。作動原理を図1に示します。推進剤を放電によりイオン化後、静電加速グリッドを用いて引き出し、電子を混ぜ電気的中性なプラズマビームとして噴射します。イオン源と中和器に独立したプラズマ発生器を使用します。このプラズマ生成方式により複数のイオンエンジンが存在します。最も開発の進むカウフマン式やリングカスプ式は直流放電を利用しています。固体電極からの電子放出を消耗的な熱陰極に依存しかつイオン衝撃による電極損耗を伴うので作動寿命に上限が

あり、さらに大気暴露を嫌うため衛星インテグレーション地上作業を大変煩雑にします。宇宙研電気推進研究部門ではマイクロ波放電式イオンエンジンの研究開発を行っています。図2は開発中のエンジニアリング・モデルとプロトタイプ・モデルが同時運転している光景です。マイクロ波放電式イオン源／中和器はプラズマ中の電子の一部をマイクロ波の交流電界と磁場の相互作用により高エネルギー化して再利用するため熱陰極はもとより電極そのものの一切が不要となり、画期的な長寿命が期待できます。イオン生成性能は、イオン生成コスト C_i （＝イオン生成のための消費電力／引き出しイオン電流）と推進剤利用効率 η_i （＝引き出しイオン電流／推進剤消費率）を用いて表現します。どちらも電力や推進剤の消費を低く抑さえる要請からの指標です。 C_i は電圧の単位で、 η_i は供給推進剤の原子が1価電離すると仮定し等価電流換算値に対する比率で示します。 C_i は小さいほど、 η_i は100%に近いほど高性能と言えます。10cm級マイクロ波放電式イオン源では230V/90%を達成し、直流放電式に比肩するまで性能改善されています。

静電加速グリッドとは、直径数mmの穴を無数に開けた厚さ1mm以下の平板で、これを2ないし3枚を1mm以下の狭い間隔で保持して用います。上流よりスクリーン、アクセル、ディセルグリッドと称します。スクリーングリッドには+1kV程度、アクセルグリッドには-300V程度、ディセルグリッドには0Vという電位を配置し、イオンはスクリーン／アクセル間電位差によりイオン源から引き出され、最終的にはスクリーン／ディセル間電位差に相当するエネルギーのイオンビー

ムとして噴射されます。アクセルグリッドの作り出す負の電場領域は、スクリーン／アクセルグリッド間電界を大きくしイオン源からのイオン引き出しを容易にすると共に、ディセルグリッド下流から電子の逆流を阻止する機能を果たします。kVのイオン衝撃は金属と言えども容易に削ってしまいますから引き出し加速されるイオンが各グリッドに直接衝突しないように各穴の大きさおよび配置は綿密に設計されます。図3に数値解析例を掲げます。直径3mmのスクリーングリッド穴から整然と加速噴射されて行くイオン流が表されています。その途中至る所で、わずかに存在する中性ガスと電荷交換衝突が発生し、速度を失った低速イオンはその場の電界に引かれアクセルグリッドに衝突してしまいます。このメカニズムによるアクセルグリッド損耗に対処するためにイオンスパッタリングに強い材料としてガーボン・カーボン複合材の応用を目指しています。

1997年2月から1999年8月まで2年半かけて、宇宙飛翔に要求される積算作動時間18,000時間の耐久試験を実施しました。1年はたった8,760時間しかありませんから実に気の長い作業です。真空試験装置は直径2m、長さ5mのステンレス316製、4機のクライオポンプ、内面にチタン製冷却パネルを装備しています（図4）。この時間規模になりますともはや人間が監視したり操作するレベルを越えていますので、イオンエンジンはもとより真空試験装置もコンピュータによる24時間完全自動自立試験となります。とは言いましても、機械で自ら解決できない故障（例えば停電）の場合には、深夜／休日おかまいなく、何度コンピュータから携帯

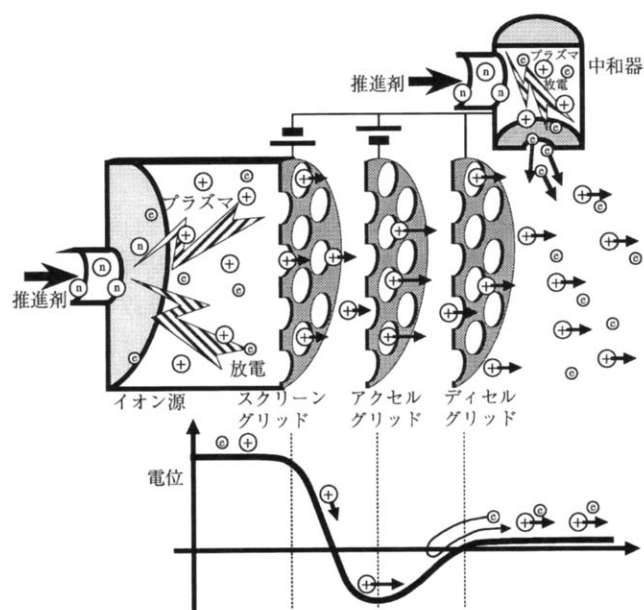


図1 イオンエンジンの作動原理

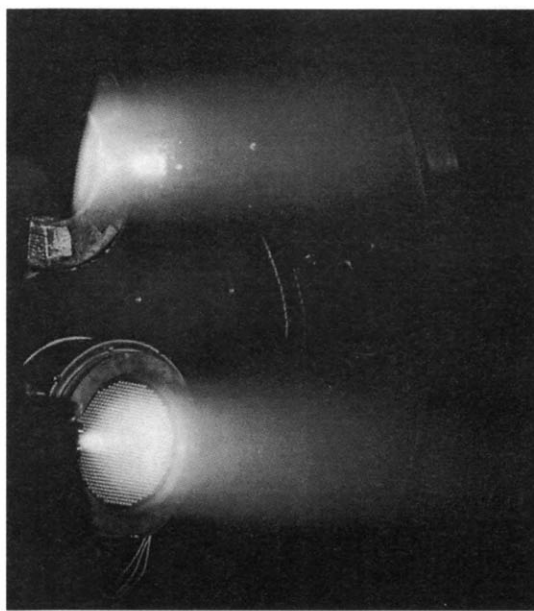


図2 マイクロ波放電式イオンエンジンの2台同時運転

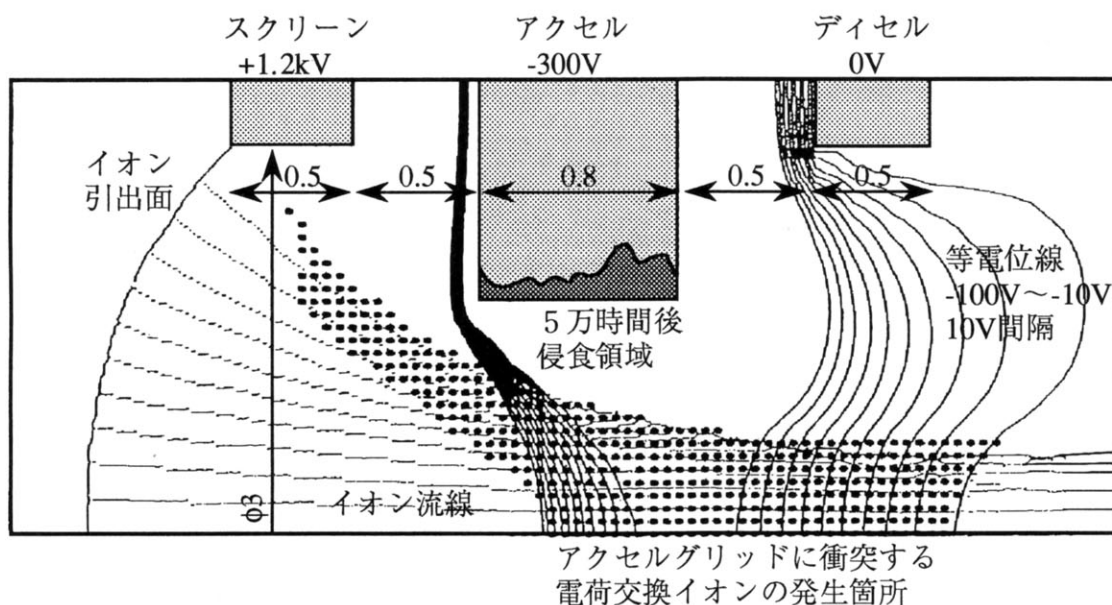


図3 イオン静電加速と派生イオンによるアクセルグリッド損耗の数値解析例

電話ごしに呼び出しを受けたか涙なくしては語れません。この試験により、マイクロ波放電式イオンエンジンが2万時間に迫る耐久性をその特性として備えているという自信を深めることができました。さてこれからは宇宙飛翔させる機器そのものが耐久性を備えているかという品質管理（クオリフィケーション）をいかに実施するかが新たに立ち向かうべき課題となっています。

さて斯様に宇宙飛翔に値する機器が完成できたとしても、これを衛星システムに適合させるためには電気推進エンジニアだけでは手に余る大仕事です。広い範囲の宇宙エンジニアの御協力を仰がずにはいられません。まず電気推進は電力が必須です（電源設計）。そして作動時には大きな発熱を伴いますし、待機時にはそこそこの暖かい環境でないと困ります（熱設計）。あまり頑丈にはできていないので揺れないところに乗せて下さい（構造設計）。電気推進は一般的に電磁ノイズを出します。特にマイクロ波放電式イオンエンジンはマイクロ波を使いますから通信を妨害するかもしれません（通信設計）。地球より遙か遠方の探査機が微小推力で航行すると、その位置を追跡するにはことのほか労力を要します（軌道決定）。探査機がkm/sにもおよぶ軌道変換能力を持つということは、打上げロケットとの仕事分担にいく通りもの組み合わせが派生します。つまりロケットの仕事分量を増やして地球脱出速度を大きくすれば、探査機重量は小さくなります。はたまた地球脱出速度を小さくすれば、探査機重量はその分多くなりますが、その後電気推進の負担が増えますから搭載する推進剤が重くなります。パイロード

重量最大となるオプティマムがどこにあるのかパラメトリックなミッション解析が必要です（軌道設計）。推進剤を探査機タンクに詰め込む作業はまさに高压ガス製造ですから法律に準拠した手続き手順を踏まなくてはなりません（地上設備）。云々。手のかかる装置ですが、これを宇宙に送り込めるのは宇宙研の総合力や機動性、新技術への探究精神があってこそです。衛星搭載推進系の高比推力化によって限られた宇宙機重量でもまだまだ高 Delta-V ミッションは可能はずです。「オリジナルな電気推進を飛ばしたい」それが実現できる唯一の組織と信じて（一時期、疑い、失望しましたが）学生時代より数え18年もしがみついています。

（くになか・ひとし）

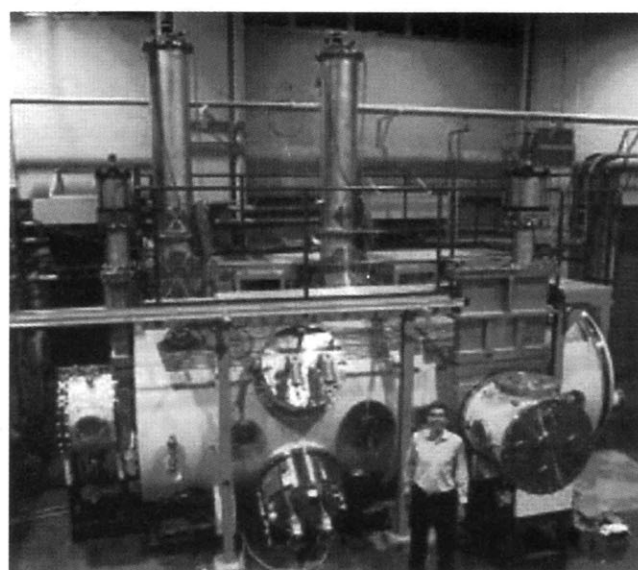


図4 耐久試験装置



★人事異動（教官）

発令年月日	氏 名	異 動 事 項	現（旧）職等
		（ 転 入 ）	
12. 4.16	かた ぎ ひろ かず 片 坐 宏 一	次世代探査機研究センター 助教授	東京大学大学院理学系研究科 附属天文学教育研究センター助手



★MUSES-C DHUインターフェイス試験

3月13日～31日の日程で、DHUインターフェイス試験がC棟クリーンルームおよびチェックアウトルームで行われました。

この試験は、従来の衛星のPM総合試験に相当します。DHU（データ処理装置）を中心にデータレコーダ、姿勢軌道制御装置、各観測機器などのPM（試作モデル）を電氣的に接続し、地上系の衛星管制装置、クイックルック装置を含めたコマンド・テレメトリの送受信機能の確認を行いました。

MUSES-Cのデータ処理系は新規の機能を多く採用しています。データレコーダは多くのパーティションに分割可能で、最優先に見たいデータの入った領域から再生することによって、深宇宙ミッションでの通信容量の制約に対処します。また可変長パケットを採用することによって通信容量の有効利用をはかり、リアルタイムのテレメトリとデータレコーダ再生データをXバンド1波に混在させてダウンリンクすることが可能です。

このような新規機能のためトラブルも発生しましたが、これらを現在製作中のフライトモデルに反映することができ、大変有意義な試験でした。（橋本樹明）

★MUSES-C用マイクロ波イオンエンジン／通信系の電磁干渉試験

小惑星サンプルリターン衛星（MUSES-C）の惑星間航行用エンジンとなるマイクロ波イオンエンジンと通信系の電磁干渉試験が3月9日から17日の間、飛翔体環境試験棟の電波無響室において行われた。この試験はイオンエンジンがプラズマ生成のために使用するマイクロ波が衛星の通信周波数（約7.16GHz）に対して通信の妨げとなるような干渉を起こさない事を確認するために実施された。試験の結果、通信系担当者から通信系の性能を損なうような通信周波数への漏洩は無いとの技術評価がなされた。合わせてこの試験ではM

IL-STD-462C規格で電磁適合性試験が行われ、14KHzから10GHzまでの電磁雑音の周波数特性が計測された。写真は電波吸収体で覆われた電波暗室内にガラス製真空容器を持ち込み、イオンエンジンを運転しながら通信系周波数帯の雑音レベルを測定している様子である。右側のガラス製真空容器の上部にイオンエンジンとマイクロ波電源部を置き、真空容器下側にクライオ真空ポンプが配置してある。真空容器の内部ではイオンエンジンからキセノン推進ガスが上から下へ高速で排出されている様子が判る。左側の装置はイオンエンジンの推進剤供給装置である。（清水幸夫）

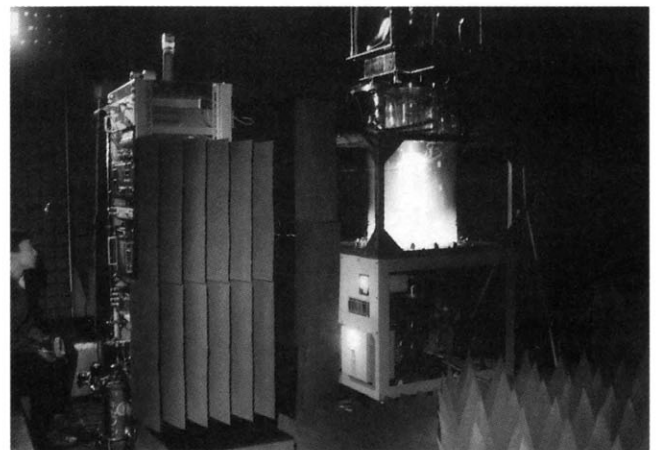


図1 MUSES-C用マイクロ波イオンエンジン／通信系の電磁干渉試験

★「はるか」が観た3C273とM81の中心核

電波天文衛星「はるか」は、世界の電波望遠鏡群、トラッキング網、3カ所の相関センターと結んで、VSOP観測を続けています。

2000年1月のVSOP国際シンポジウムの集録が出版されました。その中から、2つだけトピックを紹介しましょう。

3C273というクェーサーは星のように輝いてみえる、約3億光年かなたの天体ですが、ここから光のジェットが出ているのでも有名です。このジェットは電波望

遠鏡でもはっきりととらえられます。表紙の左図（縦軸スケール25秒角）のカラーはハッブル宇宙望遠鏡の映像で、等高線表示が電波（イギリスMERLIN電波望遠鏡）の明るさを示します。ジェットはシンクロトロン輻射で輝いているのですが、電波を出す電子のほうにエネルギーを失いかけた、言い換えれば古い時代の電子によって放射されており、このため電波ジェットは光ジェットよりぼんやりと広がっています。

さて、このジェットの根元、キューサーの中心を観たのが、VSOPの波長6cmの映像（表紙右図、縦軸スケール1000分の23秒角）です。左右の図のスケールは約1000倍の違いです。ジェットの方向は根元で緩やかに曲がり、最後に大きなスケールで方向が一致するように見えますね。この根元での電子は加速されたばかりで、根元でもシャープなジェットです。しかし、VSOPのここまでの解像度（1000分の3秒角）で観ると、ジェットは真っ直ぐではありません。うねうねとしています。Kelvin-Helmholtz不安定性によるものかなどと言っています。さらによくみると、山脈のようなジェットの峰は二筋に見えます。いままでVLBIでは、VLBIスケールのジェットの成分が光速の10倍ぐらいで飛び出しているように見えていました。今や、ジェットのパターンがこんなに詳しく見える時代に入りました。

2つ目のトピックです。今では、ほとんどの銀河の中心に巨大ブラックホールがあると思われる観測が増えています。わたしたちの銀河Sgr A（中心まで2万光年ほど）も、アンドロメダ銀河（220万光年）ももちろんです。約1000万光年遠方の（宇宙スケールではとても近い！）銀河M81の中心にも怪しげに輝く電波天体があります。VSOPは、この電波天体が銀河回転軸にそろった12000天文単位の長さのジェット様に見えることを波長6cmの観測で見出しました。この電波天体の強さはわたしたちの銀河中心Sgr Aの1万倍ほどの強さです。

それでは、わたしたちの銀河の中心もVSOPで観測して、銀河ブラックホール周辺に迫ったらいいいではないかということになります。わたしたちの銀河中心方向を銀河面をとうしてみると濃いプラズマの影響で、VSOPの波長18cm、6cmではぼんやりとしてしまいます。波長7mmより短い必要があります。VSOPの次の計画では、波長7mmまでも観測できるようにしようということでは、共通の希望とっていいでしょう。

（平林 久）

★臼田の低雑音増幅器、役目を終える

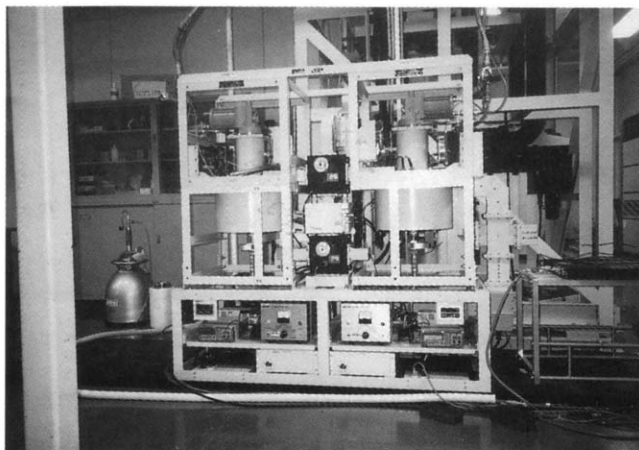
臼田の64mアンテナの機器室に入ったことのある方は、構内に、源がどことも分からず、ヒュールン、ヒュールンという音が鳴り続けていたことを覚えておられると思います。この音の源であったSバンドの低雑音増幅器（LNA）を、去る3月30日に停止させました。ガスヘリウム冷却の、極低温の低雑音増幅器で、1984年秋の臼田宇宙空間観測所開設以来、「さきがけ」からの電波の初受信に始まって、約15年にわたって働き続けてきたものです。

臼田の深宇宙探査局を建設するに当たって、低雑音増幅器の開発は、一つの大きな課題でした。当時のわが国の技術で実現が期待できるものとして、パラメトリック増幅器を採用することとし、雑音温度10K以下を目指しました。製作を担当されたNECマイクロ波衛星通信事業部の技術者の方々のたいへんな努力の結果、単体で雑音温度5K、2台冗長構成としたときに8K、という目標を上回る性能のものが実現しました。極低温で動作することから、保守や運用上の安定性もはじめは気懸かりでしたが、15年間、途切れることなく働き続けました。

私の手元の古い資料をめくってみましたところ、この低雑音増幅器の開発着手を決めた会議を、1982年の3月30日に開いていました。月日の偶然の一致！

丁度18年という歴史をもったことになりました。増幅器の本体部分にはまだ何の不安もないのですが、冷却機械系を維持していく上で負担が生じてきており、また、この装置として役目も果たし終えたことから、停止させたものです。始めに述べた音は、冷却機の間欠的な運動に同期しており、コンプレッサーまでの長い配管全体が鳴っているように聞こえました。シンボリックであった音がなくなり、アンテナ機器室には一抹の寂しさが漂っています。

（廣澤春任）



★ATREXエアインテーク制御実験について

1月31日～2月21日に、フランスONERAのS3超音速風洞において、ATREXエンジン用軸対称エアインテークの自動制御実験を行った。エアインテークは大気をエンジンに適切に取り込む装置であり、主流速度の変動に対応して形状を制御する必要がある。ONERA S3風洞は気流のマッハ数(M1.5～3.7)を短時間でスイープできる点が最大の特長であり、本実験にはおあつらえ向きな設備であった。幸運なことに、風洞をこの様に広い範囲でスイープさせて使用することは初めてのことらしく、現地スタッフも本実験に対して相当の興味と情熱を持って対応してくれた。手渡された詳細な計画書と事前に何度もチェックされたであろう風洞のデータがそのことを物語っている。数々の問題が生じながらも、予定よりも多くの実験を行い、最終的に目標を達成できたのは、全員の協力と強運のおかげ。それにしても、イタリアとの国境付近にあるスキー場に囲まれたこの巨大な試験場が1940年代に作られたのもさることながら、2000m級の山の上にある水瓶から高低差850mの水力を利用してペルトンタービンをまわし、88MWの大型風洞を直接運転するスケールの大きさには驚かされる。最後になりましたが、この実験へご支援くださった関係者の皆様に厚く感謝いたします。(佐藤哲也)



★第19回講演と映画の会

さる4月22日(土)、千駄ヶ谷駅前の津田ホールにおいて、講演と映画の会が催されました。これは、宇宙科学研究所の創立記念日である4月14日前後に毎年行っているもので、宇宙科学研究所のプロジェクトの中から、理学と工学のそれぞれからホットなトピックスを選んで、参加者に講演する催しです。併せて映画やビデオも上映します。

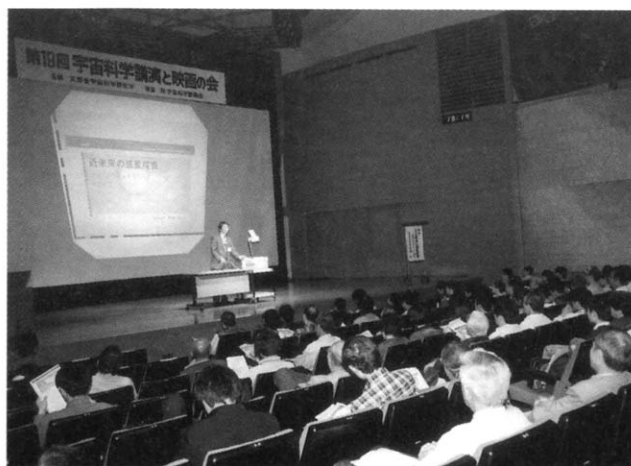
今年は、松尾弘毅所長の挨拶に始まって、小野田淳

次郎、水谷仁、井上一の三教授の講演が続き、その直後に所長と3教授に対する質疑応答をまとめて行ってから、ビデオ『のぞみ・・・日本初の火星探査』を上映しました。

まず小野田教授は、M-Vロケット開発の経緯と機体の概要を説明した後、さる2月10日のM-V-4号機によるASTRO-E衛星の打上げ失敗の原因について言及しました。件のノズルスロートの今後の対策についても、原因究明決着後に早急に着手すると表明されました。落ち着いた自信に満ちた話しぶりが、会場に信頼に満ちた雰囲気を作り出しました。次のM-Vロケットの打上げは2002年7月の小惑星探査機MUSES-Cになります。この打上げでM-Vの完全復帰と行きたいものです。

水谷教授からは、MUSES-C(小惑星サンプルリターン：2002年7月)、LUNAR-A(月ペネトレータ・ミッション：2002年度後半)、SELENE(宇宙開発事業団との共同による月ミッション：2004年度)と続くこれからの日本の惑星探査計画の紹介がなされました。いつもの論旨明快で分かりやすく噛み砕いた説明に大勢のうなづく顔々。次いで井上教授から、M-V-4で軌道に運ぶ予定だったASTRO-E衛星(5代目のX線天文衛星)が目的とした重要な観測についての紹介と、今後できるだけ早く再チャレンジしたい旨の意志表明、そしてASTRO-F(日本初の赤外線天文衛星：2003年度)、SOLAR-B(「ようこう」に継ぐ太陽物理学衛星：2004年度)などの天文衛星と長期的な観点からの宇宙科学の観測計画について深く新しい内容の解説がなされました。

約350名の参加者からは、活発な質問が出されました。(的川泰宣)



宇宙を 探る

第14回

硬X線・ガンマ線で切り拓く宇宙

高橋 忠 幸

宇宙の中でも高温でかつ激しい活動領域からは、X線を中心に多量のエネルギー放射が行われています。中性子星やブラックホールに極めて近い領域、あるいは超新星残骸、銀河や銀河団など、「激しく活動している」宇宙の本質を知るためにX線観測が欠かせません。X線望遠鏡を搭載した「あすか」衛星やドイツの「ROSAT」衛星などの活躍で、太陽系内部の彗星から宇宙の果てのクェーサーにいたるまで、ほぼすべての天体が多少なりともX線を放射していることがわかってきました。一方で、X線望遠鏡でカバーされるX線の何十倍ものエネルギーを持つ硬X線からガンマ線の領域の観測は、なかなか進んできませんでした。

ガンマ線はX線にくらべて透過力が強いので、これまでX線でも吸収されて見えていなかったような天体からの放射を検出することができます。また、X線で観測できる現象よりもずっと高温、高エネルギーの現象を探る手がかりは、ガンマ線領域にあると考えられています。たとえば、地上には、非常に高いエネルギーの宇宙線がふりそそいでいます。中には、1個の粒子あたり16ジュールという想像を絶するエネルギーに達するものもあります。宇宙には、こうした宇宙線を作り出す「巨大加速器」が存在し、その中で粒子が加速されて高いエネルギーを持つと考えられています。硬X線やガンマ線を精度よく観測することができれば、宇宙線の加速がどこで、どのように行われているかを探索し、その起源と加速の機構を探ることができるはずです。

X線からガンマ線とエネルギーが高くなるにつれ、天体からの光子の数はどんどん少なくなってくるのが普通です。また、ガンマ線は、鏡で集めることができません。さらに、ガンマ線は遮へいするのが難しいため、天体以外の方向からやってくるバックグラウンドの光子をうまく落としてやらないといけません。このような理由から、ガンマ線領域では、精度の高い観測が行われてきませんでした。

2月に打ち上げられ、残念ながら軌道に投入することができなかったASTRO-E衛星には、日本ではじめて、600キロ電子ボルトという高いエネルギーまで観測できる硬X線検

出器（HXD）が搭載されました。この検出器はガドリニウム・シリケート結晶を用いた新しい無機シンチレータ（GSO）とシリコンPIN検出器を組み合わせたものです。筒状に伸びた井戸型のBGOシンチレータによって周りからの雑音ガンマ線をアクティブに低減することができるのが大きな特徴です。この技術は、われわれが開発したもので、1988年からブラジルで行った大気球実験で活躍した検出器がもととなっています。HXDでは、原子番号が高く、ガンマ線を止める能力の高いシンチレータが使われました。図1にこの検出器の断面図、図2にその外観図をしめします。BGOは、ガラスのようにすぐにわれてしまうため、取り扱いが難しく、失敗を繰り返しながら打上げ時のショックに耐えるような工夫を施しました。

HXDは、設計通り非常に低いバックグラウンド特性を示し、数百キロ電子ボルトまでのガンマ線領域において、過去のいかなるミッションよりも一桁以上高い感度を実現しました。このHXDによって、日本は、独自の科学衛星による、初めてのガンマ線天文学に一步ふみだすことが期待されていました。また、同時に搭載されたX線望遠鏡と組み合わせることにより、極めて広いエネルギー範囲で、天体を観測することができ、ユニークな観測が期待されていました。早い時期に、ASTRO-E衛星に代わる衛星を打ち上げる事ができれば、と願っております。

（たかはし・ただゆき）

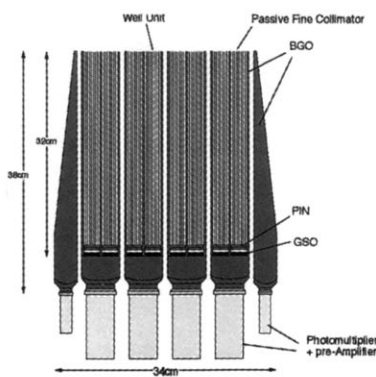


図1 HXDの断面図

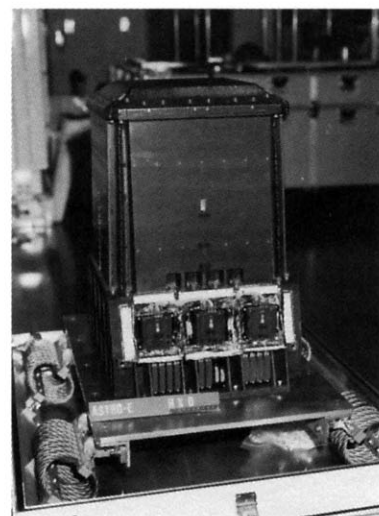


図2 HXDの外観図

太陽の国・スペインの太陽光加熱試験施設

山 田 哲 哉

太陽の国・スペインに、太陽光を集めて加熱試験ができる、それこそ太陽の国ならではのユニークな施設があるということで出かけてきました。地球再突入するカプセルを過酷な空力加熱から守るヒートシールドの研究開発はまず、地上でそのような高温の環境を模擬してあげて試験することから始まります。宇宙研のアーケ風洞はその種の模擬装置の一つなのですが、実験大の試験はできません。でも太陽光加熱試験設備なら、直径40cmのMUSES-Cカプセルは、そのまま加熱試験ができそうということでとても楽しみでした。(もちろん、加熱率は実際の飛行環境よりはずっと低いですが、それでも他の地上試験装置では達成できないことで、意義深いことです。)

この施設を持つPSA(アルメリア太陽プラットホーム)は一種の第3セクタみたいなもので、スペインの南、地中海に面したアルメリアという都市郊外にあります。空港で「ア」にアクセントして「アルメリア」行きのゲートを尋ねると、「リ」にアクセントをつけないと「アルメニア」に間違えられると教わりました。じゃあ「アルバニア」は?と思いましたが質問はやめにしました。なかなかなじみの薄いこの都市は、夏になると闘牛や海水浴で賑わうそうです。アクセスは大変で、私は前日までフランス・ボルドーのエアロスペース社にいたのですが、早朝に立って、パリ、バルセロナと飛行機を3機乗り継いでやっと夜7時にアルメリアに到着しました。3月下旬、気温10℃のフランスと比べるとアルメリアの気温17℃は確かに暖かく感じられましたが、それでも鹿児島並くらいと、太陽の国を期待していた割にはがっかりしました。ですが、さすがに翌日は20℃を越える汗ばむ陽気です。その日唯一の交通手段であるタクシーを飛ばして、荒涼とした砂漠を1時間走り、PSAに向かいました。

PSAに到着すると、マルティネス氏が懇切丁寧に施設の説明をしてくれました。彼によれば、以前ESAのHERMESプロジェクトで翼前縁の加熱試験をしたことがあるそうですが、宇宙飛行体の加熱試験自体はこの施設にとって全くのサイドジョブであって、本業は太陽光を使ってエネルギー、環境問題に対処して行きましょうというプロジェクトらしいです。スペインは農業国ですから、農地の国土に占める割合も多く、過剰農薬による土壌汚染の問題が深刻化しつつあるそうで、汚染分をその土地で分解しようと、農薬の水溶液を集光した太陽光焦点付近に流すことで、特に紫外光

成分で分解してしまおうとシステムを研究していました。また、電線の届かない僻地においても、太陽集光器+スターリングエンジンで地域の電力をまかなう研究もされていました。

目指す太陽光加熱試験(もできる)施設は高さ約50mの塔の前方の土地に一枚40m²の反射鏡300枚が扇状に並んでいます。この太陽光が1畳1畳に集められると単純計算でも通常の太陽輻射の1万2000倍です。効率を考慮しても数MW/m²の加熱率が得られます。確かに雄大な施設でした。そうこう驚いているうちに、300枚の反射鏡が一斉に『気をつけ!前へならえ』,同じ方向に向き始めると、あれよという間に空中のある一領域が眩く輝き始めました。まるで、「神光あれと言いたまひければ光ありき(聖書冒頭)」。何も無いところにポツカリと光だけがあるのですから、何とも言えぬ、神秘的で不思議な光景でした。

夕方、マルティネスさんは、「車にエアコンがなくて悪いね」と恥ずかしがりながらも、1時間の道のりをわざわざ僕らをホテルまで送ってくれました。「ここは、まるでロサンジェルス(の砂漠)のようだね」と言ったところ、それもそのはず、一時期ここで、「インディー・ジョーンズ」などハリウッド映画のロケが頻繁に行われていたそうです。「スペインは物価も安いし、スペイン人の日当も安くてエキストラにいいしね」と呟かれ少し悲しい気持ちになりましたが、いろいろな意味で欧米列強に比べると後進のスペインを太陽光を利用して、エネルギー・環境先進国にしようとする意思を彼は熱く語ってくれました。確かに宇宙飛行体の加熱試験だけではない壮大なスペインの太陽光施設でした。

(やまだ・てつや)





軌道計画の技

山川 宏, 川口淳一郎

惑星探査における軌道計画には、無数にある可能性から科学的工学的に最もふさわしい惑星探査ミッションを発見するという醍醐味がある。一般に、いかに多くの観測機器を持っていけるか、あるいは、全重量の半分以上を占めることもある必要な搭載燃料をいかに少なくするかという点で勝負する。素直な惑星移行軌道を考えると、地球を脱出して太陽を中心とする軌道上を慣性飛行し、目標惑星に到着したときにブレーキをかけて周回軌道に投入することになる。しかし、ロケットの投入能力に制限があるために十分な重量の探査機を持っていけないことがあり、月・惑星スウィングバイという手法をしばしば用いる。宇宙研では過去に「ひてん」、GEOTAIL、「のぞみ」で月スウィングバイについては実績がある。スウィングバイというのは、意図的に探査機を惑星の近くを通らせて、その惑星の重力によって探査機の速度の大きさおよび方向を変更する技術である。惑星から見ると接近前後の相対速度の大きさは変わらないが、相対速度の方向が変わるために太陽中心から見た速度は増減することになる。英語ではswing-byと書くが、その名前の通り「惑星が探査機を掴んで放り投げている」ようなものである。スウィングバイは、探査機の燃料を使わずに大きな軌道の修正を行うことができるという利点がある。以下に水星探査を例に話してゆく。

図1の軌道は、化学推進の使用を想定した水星オービタミッションで、打上げ後に金星（2回）と水星（2回）の多数回のスウィングバイを経て最終的に水星周回軌道に投入される。最初に金星スウィングバイを利用するのは、直接水星に向う場合は打上げ時のエネルギーが高すぎるためであり、まず、行きやすい金星に向かう。2回の金星スウィングバイにより遠日点距離は金星軌道付近、近日点距離は水星軌道付近まで低くできる（図2）。2回の金星スウィングバイ間の飛行時間をちょうど金星の1公転周期として空間上の同じ点で行うようにすることで、

その間の軌道面の設計の自由度を増やす工夫をしている。しかし、このままでは水星に到着したときの水星との相対速度は6km/sであり、水星周回円軌道に投入する場合、探査機総重量のうち10%程度のペイロードしか残らないことになる。そこで、飛行時間は長くなるものの、水星- ΔV -水星- ΔV ... というシーケンスをくり返す作戦を取る（ ΔV は速度修正）。この方法はジェット推進研究所のChen-Wan Yen氏が約20年前に確立した方法で、水星と水星の間の遠日点付近で行われる僅かな量の ΔV によって水星に再接近する位置を移動させ、水星との相対速度を大幅に低減していくものである。最初と2回目の水星接近の間の飛行時間は水星公転周期88日の3倍程度で、その間に探査機は太陽を2周する。その結果2回目の水星接近時の相対速度は6km/sから5km/sに減っている。2回目と3回目の水星接近の間の飛行時間は水星公転周期の4倍であり、その間に探査機は太陽を3周する。その結果、3回目の水星接近時の相対速度は3.5km/sまで低減されている。このように飛行時間は長くなるが、探査機総重量のうち30%程度のペイロードを持っていくことが可能となる。

これは、惑星探査の軌道計画のほんの一例であるが、様々な工夫があることを知って頂ければ幸いである。今後、惑星探査は水星ランダー、金星バルーン、火星ペネトレータ、小惑星・彗星サンプルリターンという方向に広がっていくと思われるが、軌道計画におけるチャレンジもさらに増えていくでしょう。

（やまかわ・ひろし、かわぐち・じゅんいちろう）

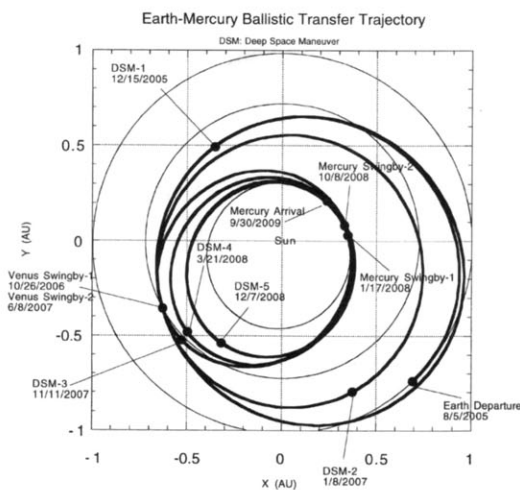


図1 地球-金星-金星-水星-水星-水星軌道

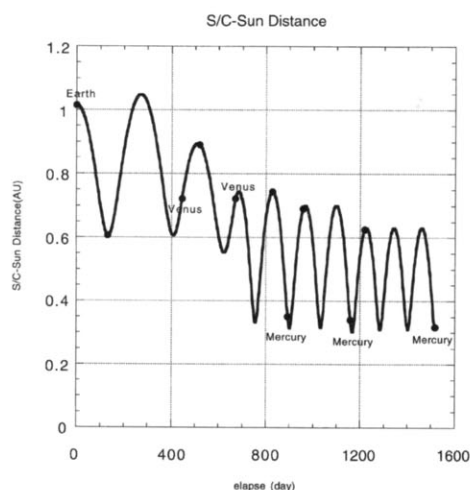


図2 太陽からの距離の時間履歴



奥の細道

中野 不二男

「荒海や 佐渡によこたふ 天の川」

私の郷里・新潟市から、海岸線沿いに南西へ60キロの出雲崎で、芭蕉が詠んだ句とされている。小学校のころから国語の時間にはいつもこの句を聞かされてきたので、記憶にこびりついてはなれない。少年時代の思い出と「荒海や」がワンセットになっているのだ。しかしちょっとまえまで、思い出すたびにどうしても首をひねってしまうことがあった。「佐渡によこたふ 天の川」の部分で、どうしても納得できなかったのだ。芭蕉が、「奥の細道」の旅に出たのは元禄二年、1689年の春である。このとき門人の曾良（そら）が同行している。曾良は驚くほどのメモ魔で、道中に綴った記録「旅日記」は有名だ。何月何日にどこに宿泊したかはもちろんのこと、日本の技術史にも登場している紙製の携帯日時計を持ち歩き、何時にどこを通過したかということまで記していた。その曾良の記録によると、芭蕉が出雲崎で「荒海や」を詠んだのは、7月4日となっている。もちろん旧暦であり、現代の暦ならばおおよそ8月上旬だろう。しかし私には、夏の天の川が「佐渡によこたふ」という印象がない。

新潟県の海岸で、夜でも佐渡の島影が見えるというのは、北緯37.5度の柏崎から38.5度の村上あたりまでである。その中間の北緯38度に位置する新潟市の砂浜で、私は何度となく夜の日本海をながめてきたが、天の川はいつも滝のように海に流れ込んでいた、という思い出しかなく、どうも釈然としなかったのだ。そこでいつだったか、星座早見盤でたしかめたことがある。早見盤の目盛りを8月上旬の午後8時にして、北天の星座を調べたのだ。日没の遅い夏場のことだから、天の川がはっきりと見えるのは、まあ8時あたりである。もちろん、出雲崎の経緯度も補正もした。しかしやっぱり天の川は、夜空から日本海に流れ込むようなかたちにはしかなかった。

午後4時とか5時あたりなら、たしかに早見盤では天の川は横たわるのだが、夏のこんな時間に星空などが出るはずもない。また6月上旬、つまり旧暦の5月上旬にまでさかのぼれば横になるが、これでは旅日記の記録とズレが生じる。曾良は記録にこだわっていたのだから、旧暦の7月4日という日付にまちがいはないはずだ。ならばどうして、芭蕉の描写と自然現象が食い違っているのだろうか。

こうした疑問をかかえながらも、歳月は過ぎていった。そしてあるとき、私はふと思い当たった。7月中旬から8月上旬の日本海は、いつものんびりと凪いでおり、佐渡の山々の稜線さえもくっきり見える。荒れるのは8月中旬以降で、私は子供のころから「盆をすぎたら海にゆくな」といわれたものだ。

したがって芭蕉の描写に反し、実は8月上旬の出雲崎から見た夜の日本海は荒れておらず、それゆえに佐渡の島影が鮮明だったはずである。そして本当は天の川も、滝のように流れていたのではないか。芭蕉はこの光景に、べつの土地で見た荒れる日本海と天の川の印象を、かさねて詠んでいたのだろう。そしてその土地とは、山形県内のどこかだったにちがいない。

「奥の細道」の旅は、陸奥の平泉を“最奥”として、そのあと出羽地方の海岸へ抜けて南下している。そして旧暦の五月に、五月雨の降る最上川の河口ちかくを通る。現代でいう6月で、この時期ならば日本海は荒れているし、天の川も夜空に横たわって見えるはずだ。

芭蕉は、旅を終えたのちに、推敲に推敲をかさねて「奥の細道」を書き直している。したがって旅の先ぎで詠んだのではなく、各地での印象と、曾良にとらせていたメモをもとに“編集”をしていたらしい。「荒海や 佐渡によこたふ 天の川」は、その編集作業の結果だったのではないだろうか。

(科学ジャーナリスト なかの・ふじお)

ISASニュース

No.230 2000.5

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所(文部省) ☎229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 042-759-8009

The Institute of Space and Astronautical Science

◆本ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話(庶務課法規・出版係)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>)。