


 ニュース

宇宙科学研究所

2002.6 No.255



▲クリーンルームで試験中のMUSES-C（手前）とASTRO-F（奥）。（撮影：杉山吉昭，本文5頁参照）

〈研究紹介〉

再使用型宇宙輸送システムとATREXエンジン

宇宙科学研究所 佐藤 哲也

はじめに

宇宙活動の大衆化や商業化に伴い、これまでの軍事的背景と国家の威信をかけた宇宙開発から、将来的には、ビジネスを睨んだ大量宇宙輸送時代へと転換していくことが予想される。その実現のためには、安全性、信頼性が高く、環境にも優しくかつ低コストである、輸送システムの完全再使用化が極めて有効であることは、世界的にも共通認識となっている。しかし、技術的および経済的なハードルの高さから、スペースシャトル以来、斬新な輸送システムは実現しておらず、当分は現行の使い切りロケットの信頼性向上と並行して、開発は進められて行くであろう。我が国においては、当面は図1に示すような水平離着陸方式の完全再使用型二段式スペースプレーン（TSTO）を目標とし、システム、材料、推進系等の基盤技術を構築している段階である。

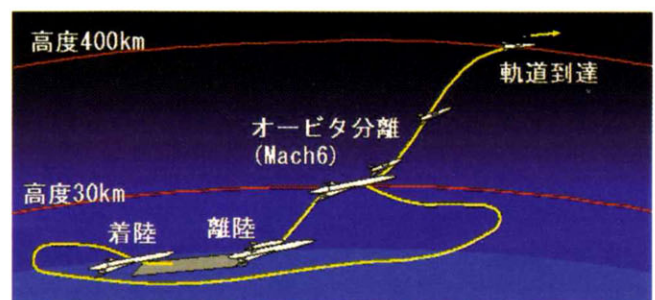


図1：二段式スペースプレーンの概念図

宇宙科学研究所では、1986年よりTSTOの初段推進システムへの適用を目的とした、エキスパンダサイクル・エア・ターボ・ラムジェットエンジン(ATREX)の基礎開発研究を進めており、私も1992年より研究グループに加わった。本文では、ATREXエンジンの紹介、開発研究の一例、最後に、飛行実証を含めた今後の展望(野望?)について記述する。

ATREXエンジンシステムの概要

ATREXエンジンは、航空用ジェットエンジンと同じブレイトンサイクルエンジンであるが、地上静止状態からマッハ数6までの飛行領域を単一のエンジンで作動できる点が特長である。エンジンのフロー図を図2に示す。離陸からマッハ数3程度まではファンによる圧縮を主とし、それ以上ではラム圧縮を主とするコンバインドサイクルである。

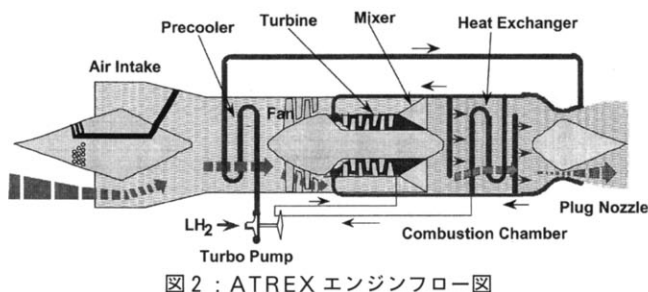


図2：ATREX エンジンフロー図

ジェットエンジンの作動領域をマッハ数3からマッハ数6に拡大した場合、最も大きな技術課題は主流全温への対応である。飛行マッハ数が6になると主流の全温は1,670Kに到達し、従来の金属材料を用いたファンはこれに耐えることができない。さらに、温度が上がると燃焼生成物の解離が激しくなり、燃料を加えても温度が殆ど上昇せず、推進エネルギーが取り出しにくくなる。そこで、ATREXエンジンでは、主流の空力加熱からファンを防護するシステムとして、ファンの前に燃料の液体水素を冷媒としたプリクーラと呼ばれる熱交換器を装着している。プリクーラによって、ジェットエンジンの飛行領域を拡大することができるだけでなく、さらに圧縮過程における中間冷却効果によって、低速飛行時においてもエンジン推力、比推力を向上することができる画期的なシステムである。プリクーラを搭載したエンジンは過去に実用化はされておらず、エンジンに搭載して性能が確認されたのもATREXエンジンが最初である。

また、本エンジンは巡航マッハ数を持たない加速機用エンジンであり、幅広く連続的に変化する外気条件に対応するために、エアインテーク、ノズルが、従来

のジェットエンジンと大きく異なる。すなわち、明確な設計点を持たないため、広範囲な動作環境に適応するための可変機構および制御システムが技術課題となる。連続的な熱的条件の変化は、構造部材の熱変形に大きく影響するため、コアエンジン部においても、従来とは違った熱流体と構造の設計手法が必要となる。更に、耐熱および重量軽減のためには、高温での比強度の高い複合材料の開発が不可欠である。

この様な観点から、これまでに、エンジンシステム地上燃焼試験、要素風洞試験、炭素/炭素複合材料のエンジン部材への適用研究等を実施し、基礎データを取得してきた。ここでは、全てを紹介することはできないので、一例として今年度行うシステム燃焼試験について述べる。

ATREXエンジンシステム燃焼試験

エキスパンダサイクルの実証、プリクーラ、ターボ機械等、エンジン要素の開発を目的として、ATREX-500と呼ばれるファン直径30cm、全長4.5m、推力500 kgf級のサブスケールエンジンを用いた燃焼試験が、今までに計56回、2840秒、実施された。燃焼試験の画像を図3に示す。近年では、エンジンの主要要素であるプリクーラの開発を主として進めており、今年度は、プリクーラの実用化に際して危惧されている、アイシング問題を解決するための試験を行う。



図3：ATREX エンジン地上燃焼試験

アイシングとは、主流空気中に含まれる水蒸気が、プリクーラの冷却管表面で厚く低密度な霜層として固着し、冷却性能、空力性能の低下を招く現象である。プリクーラにおける着霜は、冷却面温度が極低温(30K)から氷点までの幅広い領域で起こることが特徴であり、従来の冷凍機等を対象にした比較的高温な冷却面における着霜研究では、推し量ることができない。ここ数年、極低温冷却面における着霜に関する基

基礎研究を行い、凝縮性物質、特にメタノールをプリクーラの上流側から気流中に混入することによって、アイシングが軽減されることを明らかにした。図4にその原理を示す。図(a)は、水蒸気だけの着霜で、密度が低く、空隙が多い。一方、凝縮性物質を混入すると、凝縮または昇華した物質がその空隙を埋めるように着霜する(図(b))。更に、霜層表面温度が混入した物質の融点に達すれば、凝縮液として霜層の内部に浸透することにより、より高密度で薄い霜層へと変化する(図(c))。

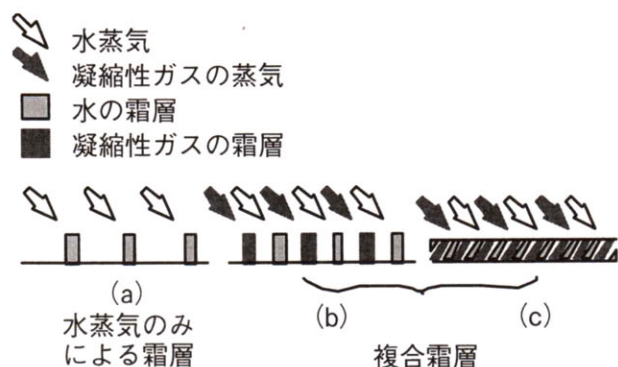


図4：凝縮性ガス混入効果の原理図

図5に基礎試験結果として、プリクーラチューブ表面における着霜画像を示す。図左は、着霜防止対策を施さない場合、図右はメタノールを噴射した場合である。この様に、霜層を高密度化(または、融解)することによって、プリクーラ伝熱性能および空力性能は向上する。また、凝縮性物質の中でメタノールが最大の着霜低減効果を上げる理由として、凝縮性物質の混入による融点降下が支配的であることがわかった。



図5：プリクーラチューブ表面の着霜の画像
(冷却面温度215K、左：水蒸気のみ、
右：メタノール混入)

今年度の秋に行うシステム燃焼試験では、この手法をATREX-500エンジンに適用し、実機モデルによって確認する。実機試験では要素試験と異なり、プリクーラ各部で主流の温度、湿度、水蒸気の状態およびチューブ冷却面の温度条件が分布を持っているため、着霜現象は複雑である。メタノール噴射弁の設計も重要な技術要素で、主流の流量、流速に応じたメタノールの均一な混合噴射が要求される。システム試験によって、定量的にメタノール噴射の効果を調査し、実機への適

用を検討する予定である。

今後の展望

ATREXエンジン開発の今後の展開としては、高空高速状態におけるエンジンデータの取得とシステムの実証であると考えられる。地上試験では行うことが困難であるエンジンの非定常熱流束データの取得、制御技術の確立に関しては、飛行試験によって実証する必要がある。また、飛行試験によって、機体設計、航法誘導、再使用オペレーション等の超音速飛行試験技術を修得する目的もある。これまで検討してきた実証試験プロファイル例を図6に示す。

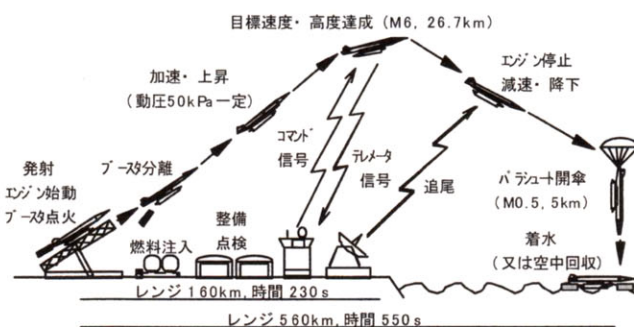


図6：ATREX エンジン飛行実証試験の例

以上長々と述べてきたが、ATREXエンジンは、将来輸送系において戦略的なキーテクノロジーのひとつであり、早期の開発が重要であると考えられる。とは言え、現段階では、再使用輸送系については、液体水素を燃料とする極超音速ターボジェットエンジンは、夢物語か遠い先の話であると考える人も少なくない。壮大な夢を描きつつ、着実に基盤技術を構築し、まずは、エンジンシステムがフィジブルであることを認知してもらい、ぜひとも飛行実証を実現したいと思っている。

開発研究を続けてきて感じることは、エンジンはシステムであり、多くの要素について、それぞれが抱えている先端の課題を追求しつつも、常にシステム全体という広い立場からのトレードオフを考えなければならない。すなわち、大きなテーマと細かいテーマが多分野にわたって混在しており、研究者としては、悩ましくもあるが、やりがいもあるところである。

今後は、さらに多分野にわたる研究が必要になるため、いろいろな方々に相談に伺うことになると思いますが、よろしくお願いいたします。

(さとう・てつや)



★ロケット・衛星関係の作業スケジュール（6月・7月）

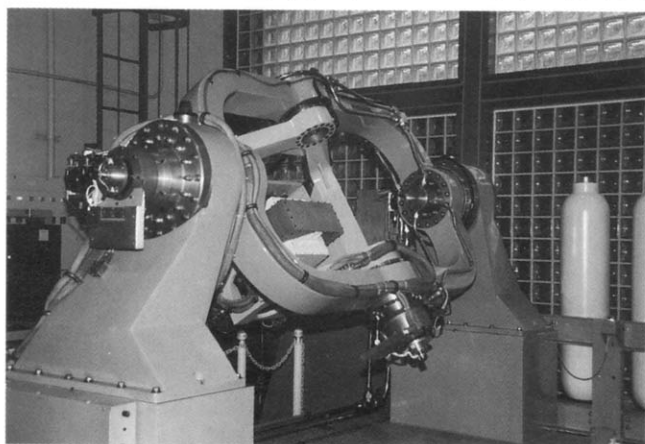
	6 月	7 月
相模原	M-V-5 嚙合せ試験 14 ← → 18	
	MUSES-C 総合試験 (10月まで)	
	ASTRO-F FM 一次嚙合せ試験 → 26	
	SOLAR-B MTM試験 → 12	
	S-310-31・32 嚙合せ試験 → 13	
内之浦		S-310-31・32フライトオペ 21 ← → 28



★M-V-5号機モーションテーブル試験

4月1日から5月17日まで、C棟の磁気シールド室にてM-V-5号機モーションテーブル試験が実施された。これは、本年11月打ち上げ予定のM-Vロケット5号機の姿勢制御系の健全性を確認するための試験である。試験の目的は、姿勢制御系の実機が実際の飛翔条件下でどのように振る舞うかをチェックすることである。モーションテーブルと呼ばれる揺動台の上にロケット姿勢制御用センサを載せ、その揺動をセンサで検知、ロケット姿勢制御計算を実施し、その結果をモーションテーブル制御計算機に入力する。モーションテーブル制御計算機には、M-Vロケットの特性が予め入力されており、制御指令とあわせて、ロケットの姿勢がどのように振る舞うかを計算し、それを再現するようにモーションテーブルを駆動する、という流れで試験は実施される。

モーションテーブル試験は、M-Vロケットの打ち上



げ毎に実施されているが、今回の試験では、特に2段目ノズルアクチュエータを組み合わせた試験も実施した。これは今号機より2段目TVCの設計が変更されたことに対応する。また、ロケット姿勢に応じてアンテナ切替が正常に行われるかの確認も行った。試験は順調に実施され、次号機打ち上げに向けての自信が深められたのは大きな収穫であった。

なお、本試験実施にあたり、実験スペースの関係から開梱室を借用するなど、多方面に影響を与えたが、所内の多くの方々のご理解ご協力のお陰で無事に実施できたことを感謝したい。

（澤井秀次郎）

★超薄膜型気球(BU60)が世界最高高度に到達

2002年5月23日6時35分、厚さ3.4ミクロンのポリエチレンフィルムで作られた容積6万立方メートルの超薄膜型気球(BU60)は、好天に恵まれた気象状態の中、静かに三陸大気球観測所より放球されました。気球は、気球に携わった全ての人々の願いを乗せて、毎分265mの速度でゆっくり上昇を続け、高度53.0kmに飛翔することに成功しました。この高度は、これまでの世界最高高度51.8kmより1.2kmも高い高度であり、世界最高高度を30年ぶりに更新するものでありました。高度53.0kmに到達した時は、広澤春任三陸大気球観測所長をはじめ、気球実験班が全員受信室に集まり、この偉業を心より祝う拍手が起きました。1997年より始めた超薄膜フィルムの開発、気球製作用接着機の開発、高い品質管理の基での気球製作、エアバッグ式超薄

膜型気球放球装置の開発、また日本独自に開発したセミダイナミック放球法等、全ての開発成果を結集した結果がこの日の成功をもたらしたものと確信しております。文末になりましたが、この気球に携わった全てのメーカーの皆様、気球実験班および地元の支援者に心より拍手を送ると共に深く感謝申し上げます。

(山上隆正)



★MUSES-C 総合試験近況

化学推進機関の艀装のために、一時相模原を離れていたMUSES-C探査機の構体は、4月下旬に再び搬入され、総合試験の後半がスタートしました。4月26日には後半に向けての全員打ち合わせが開催されました。惑星探査機ということで、打ち上げのチャンス（窓）は厳しく制約されているため、スケジュールには余裕はほとんどありません。直後のゴールデンウィークは、実はMUSES-Cグループにとっては、ほとんど休みなしでした。機器の調整とスケジュールの競合がしだいに際だってきたことも、打ち上げが近いことを語っています。

クリーンルームも増設されて、いまは新クリーンルーム部にはSOLAR-B、もともとのクリーンルームにはMUSES-CとASTRO-Fと、3つの衛星・探査機がならんでいます。一度に3機の衛星がならぶことも珍しい光景でしょう。朝9時から9時半にかけては、A棟からC棟への間をたくさんの人が行き交うのを見ることができます。今日はどの朝会なのかを尋ね合う日常的な会話も宇宙研ならではの風景です。多くの方がお互いの探査

機、衛星を支援しあってプロジェクトを進めているのです。このごろはロケット系の作業が加わりはじめて、入れ替わり立ち替わりいろんなメーカーさんの方を目にするようになりました。

年度が明けて、見学者や取材も多くなってきました。本当にそんな（とんでもない）ことができるんですか？という質問が今更ながら多いのには少々閉口ぎみですが、関心をもってもらうのは大歓迎です。

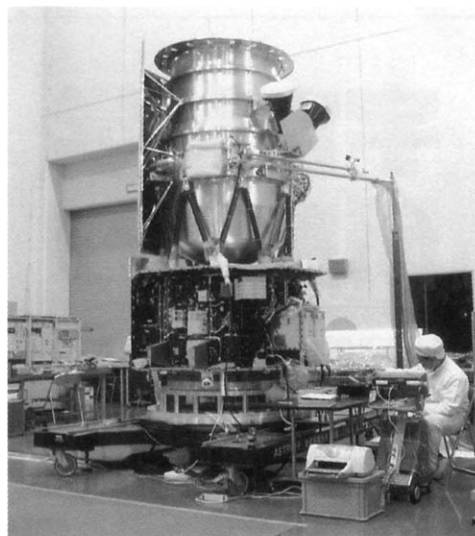
緊張感の中に大きな期待感が高まるこのごろです。

(川口淳一郎)

★ASTRO-F 一次噛み合わせ試験

赤外線天文衛星ASTRO-Fの第一次噛み合わせ試験は、4月末より電気試験に入りました。機器がコマンドに従って正しく動作するか、データは正しく地上に送られるかをチェックします。

ASTRO-Fの天体観測用望遠鏡は液体ヘリウムで -270°C 付近まで冷やされます。写真は、蒸発したヘリウムガスを排気する配管が取り付けられたASTRO-F衛星、それにデータチェック風景です。（村上 浩）



★M-V-5号機仮組立作業

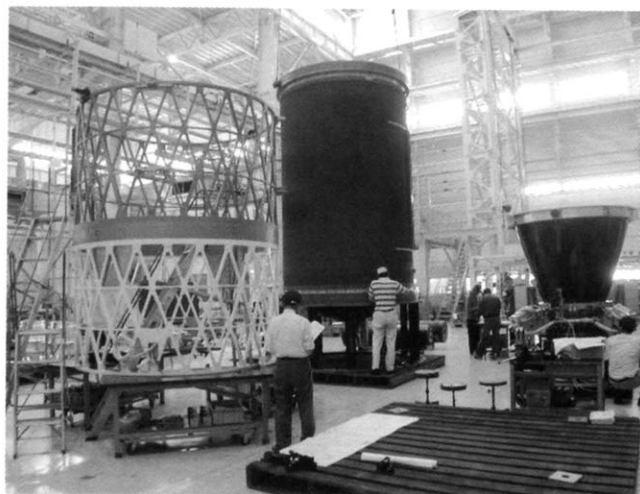
MUSES-C打上げに向けて、ロケット側の準備作業も着々と進んでいます。1月21日～2月22日までに頭胴部の、3月8日～20日と4月1日～5日にB1（1段目）の、5月15日～24日までにB2（2段目）の仮組立作業を終えました。仮組立作業は、機体を製造している（株）アイ・エイチ・アイ・エアロスペース富岡事業所に各メーカーで作られた搭載機器類を持寄り、所定の位置に機器を搭載し、機器間を計装（ケーブル）でつなぎます。これにより、機器は正常に搭載できるか、計装をどう配線するか（ルーティング）の確認をします。また各段間等、つなぎ目になる部分を結合してフィットチェックをします。

実際に物どうしを合せてみると、設計図面上では収まっているはずの物が干渉していたり、作業性が十分考慮されていない等、いろいろな事が分ります。位置の変更や追加工等の手直しをしなければならぬ部分が幾つか発生しましたが、問題点は出し切れたと考えています。これらの問題点は、搭載機器をONにして

動作確認を行う噛合せ試験迄には解決し、打上げに向けての準備作業は次の段階に入ります。

尚、写真はB2仮組立時のもので、右から第2段ノズル、第2段（M-25）モータケース、 $\frac{1}{2}$ 段接手（いずれも新規開発）です。

（竹前俊昭）



宇宙科学 研究所

入場
無料

宇宙との出会い
ENCOUNTER WITH SPACE
一般公開

ロケット・衛星模型展示／各研究プロジェクトの紹介
ミニミニ宇宙学校／映画上映
ミュゼスC「星の王子さまに会いに行きませんか」
ミリオンキャンペーンコーナー 他



平成14年7月27日(土)

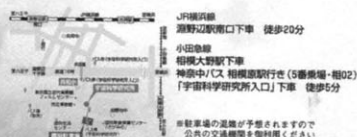
時間 10:00～16:30

宇宙科学研究所
相模原キャンパス

〒228-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1

TEL. 042-759-8008

HP: <http://www.isas.ac.jp>



●2 階：宇宙科学宇宙科学研究所 ●3 階：（財）宇宙科学振興会／協力：相模原市立南小学校

★平成14年度一般公開について

今年も毎年恒例の一般公開が下記のとおり開催されます。

お問い合わせは宇宙科学研究所企画・広報係
（電話 042-759-8008）までお願いします。

開催日：7月27日（土）10:00～16:30

公開・展示：ロケット・衛星模型展示
各研究プロジェクトの紹介
ミニミニ宇宙学校
映画上映

ミュゼスC星の王子さまに
会いに行きませんかミリオン
キャンペーンコーナー 他

ガリレオが自ら考案した望遠鏡で木星の衛星を発見して以来、望遠鏡は天体観測にはなくてはならない観測機器です。最近では「ハッブルスペースステレスコプ」や赤外線望遠鏡「すばる」が目覚ましい観測成果を上げています。これまで利用されてきたあらゆる望遠鏡は視野を地球の外へ向けていました。しかし逆に地球の外から地球を眺める珍しい望遠鏡が登場します。

2005年に日本で初めての本格的月探査衛星SELENE（セレーネ：ギリシャ神話の月の女神）が打ち上げられます。SELENEには月の表面組成、地形、磁場、重力場、プラズマ環境等、主に月の科学を研究するために、13の観測機器が搭載されます。その中の1つ超高層大気プラズマイメージャー(UPI)がここで紹介する望遠鏡です。この機器だけは月を巡る軌道上にありながら、月を見ずに常に地球の方向を向きます。UPIは2台の望遠鏡で構成されます。1台は極端紫外光を使って地球のプラズマ圏を撮像観測することを目的とするUPI-TEX、もう1台は可視光でオーロラや大気光のグローバルな分布を観測するUPI-TVISです。

TEXについては別の機会に譲り、ここでは可視望遠鏡であるTVISについてとり上げます。国立極地研究所ではオーロラ観測のために明るい光学系と高感度CCD撮像素子を備えた地上観測用カメラを開発してきました。現在それらのカメラは南極昭和基地、南極点基地や北極の観測拠点で活躍しています。TVISはそれらの開発で培われたノウハウをもとに生まれました。地上で使用される全天カメラの視野 180° に対して、TVISは月から見て地球がすっぽりと収まる視野 2.4° という違いはありますが、明るい光学系、狭帯

域フィルター、高感度CCD撮像素子を備えるという基本設計は同じです。なぜならば撮像対象はどちらも同じ、動きの速いオーロラや暗い大気光だからです。

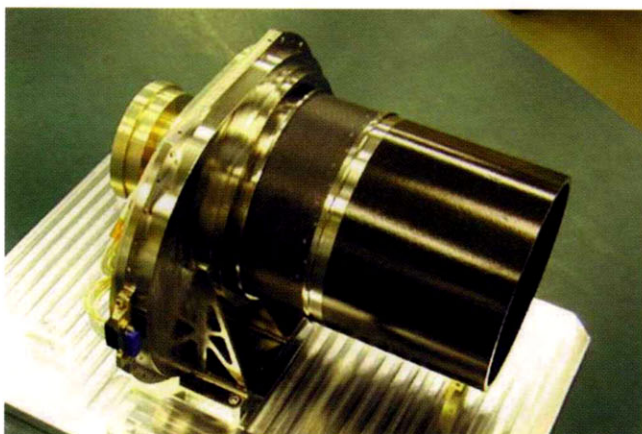
小型軽量で、420～800nmの広い波長範囲にわたってシャープな像を結び、明るくなくてはならないという厳しい条件のもとで設計されたTVIS光学系には、反射・屈折両方を組み合わせた光学系が採用されました。光学ガラス点数を少なく、しかも収差を良好に補正するために、主鏡・副鏡には裏面反射を利用しています。透過帯域幅約2nmの干渉フィルター4枚と近赤外領域を透過するバンドパスフィルター1枚の切り替えて、オーロラや大気光の輝線スペクトルの波長を選択できます。CCDは高感度でしかも機械式シャッターが不要なフレームトランスファー方式です。量子効率90%を越え、電子冷却により暗雑音を抑えています。空間分解能は地球表面での距離に換算しておよそ30kmとなります。

望遠鏡の鏡筒にはジュラルミン、チタン合金、インバー、CFRPが適材適所使用されて、熱環境変化が光学系へ悪影響を及ぼすことを抑え、打上げに耐える剛性を保ちつつ軽量化されています。またフィルターは温度変化によって透過特性が変化しないように、外周にヒーターが巻かれて温度安定化が図られています。

TVIS及びTEXは特殊な2軸ジンバルに搭載されます。第1軸は絶対空間に対する衛星本体の回転運動の軸と同じ方向を向き、同じ角速度で逆回転します。これによって望遠鏡は絶対空間に対して静止します。第2軸は月の地球周りの公転運動をキャンセルします。これで望遠鏡は常に地球を追い続けることができます。

地球を周回する低軌道衛星（高度300km）では一度に見渡せる範囲は地球半球面積のわずか4.5%ですが、380,000km隔たった月からは地球半球の約98%を一望できます。TVISはこのような衛星軌道の特徴を生かして南北両半球のオーロラ帯を同時に撮像することができます。これによって今まで困難だった南北地磁気共役点オーロラの詳しい直接比較が可能になります。また大気光観測からは超高層大気中を大規模擾乱がグローバルに伝播していく様子を一目瞭然に捉えることができます。UPIは世界初の月を周回するスペースステレスコプとして活躍が期待されています。

（たぐち・まこと）



UPI-TVIS フライトモデル

実に陽気なESTECの女性たち

高橋 慶治

5月6日（月）から10日まで、ESTECと開催地ポルト（ポルトガル）の地元大学共催の第6回ヨーロッパ宇宙電源会議（ESPC）に参加した。1989年マドリードでの第1回開催以来ヨーロッパ勢の意欲は相変わらずで、議論よし、飲食よし等多彩である。

会議には（Participants Listによると）米^メ加印伯等を含めて219名が参加し、今回初めて中国からの参加が1名あった。という訳で文字通り世界中の宇宙電源関係者が一堂に会した国際会議と言えよう。なお、日本からは田島先生と筆者、豊田工大の山口先生他5名が参加した。発表論文は太陽電池（SC）、バッテリー（BAT）、電源システム等に関するもので、その総数は104件であった。これらはplenary sessionを含めた24のsessionに別れて発表された。発表は二つの会場を使って同時に進められたが、見聞した若干のトピックスを取り上げてみたい。

先ず「MUSES-C」で開発搭載されたLiイオン電池関係では、イギリスのAEAとフランスのSAFTの2社が活発な開発販売活動を展開しており、^アアメリカ勢を一步リードしている感じである。前者は^{陽極}陰極に関するkey特許の使用をソニーに与え、公称容量1.5Ah、BATレベルでのspecific energy(SE)が100Ah/kg以上の‘Sony18650HC’を独占的に入手できる立場にある。この電池を搭載した既に打ち上げ済み又は今後打ち上げ予定の衛星・探査機ミッション数は24にも上るという（代表的なミッションには、LiイオンBATとして2000年11月に初の打ち上げとなったSTRV-1d、2003年6月打ち上げのMars Express、クラスターIIのようにNASAのnanosat（重量は10kg）編隊を形成するST5等がある）。この方式はセルの精密なロット受け入れ試験と全数スクリーニングによって、セルの特性を均一化し、バイパス回路等によるセルの故障防止を不要と

しているが、セル毎の過充電防止装置は必要だとしている。一方SAFTは公称40Ahの‘VES140’を開発しSEは126Wh/kgであるが、自己放電量が若干多いようだ（今回²⁶20Ahのセル開発の報告もあった）。しかし、これがBAT構成に必要な直列接続セル毎に異なると、セルの充電状態に差が生じBATの実効容量が低下することになる。このため、オンボードコンピュータを組み合わせたトランジスタと抵抗のみによる2種類の電圧差の解消法が提案されていた。

電源装置関係では、われわれも現在開発を手がけているので、ピークパワートラッカ（PPT）に関心があった。ESA加盟の15カ国では、恰も日本の衛星でのCI並みに開発が進んでいて、その精度は1%前後であった。デジタル方式では、パワー取得に多数決冗長を採用しているが、外乱の点でこれまで問題がないようだ。

SCでは、GRCのDr. ^{Bailey} Sheilaが、plenary sessionで次世代の候補として、例えば0.3AU以下のnear sun missionで高太陽強度、高温に適したSiC（700℃以上でも安定）を挙げていたのが注目される。

会期中、従来通り歓迎、ガラ、送別パーティが開かれ、ポルトガル発祥の地ギマランイスでの民族舞踊や独特の民謡ファド、ポルトのワインセラーでの（20度の）ポルトワイン攻めのディナーと地元の楽団演奏、フィナーレで参加者のほぼ全員を巻き込むダンスの数々が、ESPCでの緊張と疲労感を拭うにあまりあるものとなった。これには、ESTECの陽気なMrs. Sanchez始めMs. Hallman、Ms. Spaans等の方々の真摯な協力の賜物であろうと感謝申し上げたい。最期に、もともと大航海時代を偲ぶ観光は望むべくもなかったが、ポルトとリスボンのレストランでの魚料理の体験もなかなか捨てがたいものであった。（たかはし・けいじ）



Mrs. Sanchez-Michielsen



Ms. Hallmann（左）とMs. Spaans（右）



「微小重力科学あれこれ」第10回

シリコン結晶の基礎研究を宇宙で ーマランゴニ対流の解明ー

東京都立科学技術大学 航空宇宙システム工学科 日比谷 孟 俊

IT社会をハードの面から支えているのが、半導体チップ技術である。その素材であるシリコン単結晶ウエハの大口径化と高品質化が進行している。シリコン単結晶成長を支配しているのは、固液界面における熱と物質の輸送現象である。これには、浮力による対流、融液自由表面でのマランゴニ対流（表面張力対流）、坩堝や結晶の回転による強制流、さらに固液界面近傍でのドーパントの拡散が深く関わっているが、マランゴニ対流に関しては、未だよく理解されていない。マランゴニ対流の強度は、マランゴニ数と呼ばれる無次元数によって示される。この値が臨界値を超えると、流れに不安定性を生じ、振動流から乱流へと遷移してゆく。振動流になると固液界面で温度が振動し、拡散層厚さも振動することが予想される。結晶にはこれを反映して、成長縞と呼ばれる組成の不均一性が導入される。したがって、マランゴニ対流の不安定性を調べることは、マランゴニ対流が結晶成長に及ぼす影響を解明する上で、最も重要な切り口の一つである。

微小重力環境は、浮力の効果を排除し、マランゴニ対流だけを抽出して観測できる理想的な環境である。筆者らは、宇宙開発事業団が運用している実験用小型ロケットTR-I-A、およびジェット機の放物線飛行が作る微小重力環境、さらには地上において、シリコン融液柱におけるマランゴニ対流を研究してきた。

溶融シリコンのような低プラントル数の不安定性は、戻り流における不安定化として理解されている。これにより、液柱内部には非軸対称性を有する低温度場が生成し、これが液柱の周方向に $m=2$ で示す波数を有して振動する。ここで Γ は形状比であり、液柱の高さと半径との比である。液柱の周方向に配した複数本の微細熱電対やCCDカメラが検出した液柱表面温度振動の位相関係、2方向から観察した固液界面位置の振動、位相シフト干渉法による液柱表面の振動、エックス線により可視化されたトレーサ粒子の挙動（図1）、さらには、育成した結晶中に残された成長縞の観察から、液柱内部の非軸対称温度場の生成と振動を実験的に捉えることができた。シリコン融液と同一の密度を有するトレーサ粒子を準備することは極めて困難であることから、地上においてマランゴニ対流を可視化観測することは不可能に近い。その意味で、微小重力環境の利用は、シリコン融液におけるマランゴニ対流の研究において、極めて有効な手段である。

シリコン融液のマランゴニ対流に特徴的なことは、マランゴニ対流の強度が雰囲気酸素分圧に顕著な依存

性を示すことである。酸素分圧の増加に伴いマランゴニ対流の強度が減少してゆく様子が微小重力下ではじめて観測された。これは、マランゴニ対流の駆動力である表面張力の温度係数が、雰囲気酸素分圧に依存するためである。このことは、共同研究者である九州工大の向井教授によって、見事に解明された。溶融半導体において、表面張力および温度係数が雰囲気酸素分圧の関数として精密に測定された最初の例と言えよう。このことから、酸素供給源のないフローティング・ゾーン法と、石英坩堝を利用することからシリコン融液に酸素が溶け込んでいる引上法とでは、結晶成長時のマランゴニ対流の様子がかなり異なっていると予測できる。

フローティング・ゾーン法と引上法とでは、酸素に関する環境が異なるばかりでなく、融液の形状も異なっている。前者が液柱形状をとるのに対し、後者の融液表面は平面である。引上法融液の表面を模擬した薄い融液の表面におけるマランゴニ対流の観察結果によれば、坩堝の端から中央のダミー結晶に向かう強い流れとともにダミー結晶から放射状に伸びた黒いパターンが存在が見られた。これは、流れとほぼ直交して周方向に移動している。この結果は、低プラントル数流体におけるhydrothermal waveを実験的にはじめて観察した例ではないかと考えている。

平面型のマランゴニ対流についても、浮力対流を抑制できる微小重力環境を利用することにより、実態が明らかになることが期待できる。この結果、地上における引上法結晶成長の技術がさらに向上することが期待できる。（ひびや・たけとし）

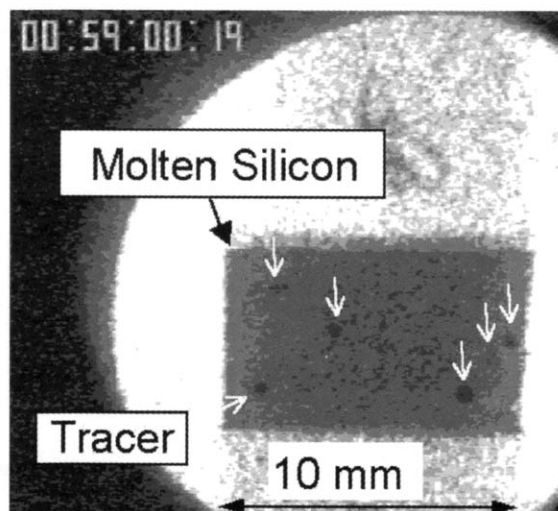


図1 エックス線により、世界ではじめて可視化観察された溶融シリコンのマランゴニ対流



天の浮橋とそれを渡る人

お茶の水女子大学学長 本田 和子

子どものころ、長い長い豆の蔓を伝って天に昇っていったジャックは、巨人（鬼）の家にたどり着いたとされるが、その家は、どこにあったのだろうか悩んだことがある。イギリスの昔話「ジャックと豆の木」の話である。天の上とは、雲の上のことだろうか？ 伸びに伸びた豆の蔓がその端を伸ばしていたのは、雲の上だったのだろうか、それとも、月の世界のように、天上にある別の世界のことなのだろうか。

分厚い雲の上が地面のように固くなっていて、そこに大きな家を建てるのが出来るのだろうか？ でも、空が晴れて雲が薄くなったときには、その家は落ちてくるのではないかと心配だった。それとも、その家は、雲を突き抜けたその上に存在する別世界にあって、そこは、この地上と同じように山あり川あり街もあって、ただ住んでいる人が違うだけの巨人の国ということなのだろうか？ 本を読み終えた私は、空をにらんで考えることしばしであった。

考えてみれば、昔話には、天に昇る話が少なくない。わが国の古人は、豆の木ならぬ「天の浮橋（あまのうきはし）」を昇り降りして天と地を行き来していたらしい。「天の浮橋」に関しては、江戸時代の学者たちはよほどそれが気になったらしく、該博な古典の知識を披瀝しつつ様々な解釈を試みている。

たとえば、新井白石は、「天（アマ）」を海の意として、「岸に到達するための舟を連ねた橋」、すなわち、「海につらなる戦艦」のようなものと説明している（新井白石『古史通』）。一方、本居宣長は、「神々の昇り下りする橋で、天にかかっているもの」とする（本居宣長『古事記伝』）。「神が天から降りてくるときに大空に浮かべて載るもので浮橋と言う」というのもある（平田篤胤『古史伝』）。

いずれにしても、離れた二つの場所を繋ぐ橋であることに相違はないが、その目的が、前者は海を渡るためとされ、後二つは天と地を繋ぐものとされているところに違いを見ることも出来よう。ただ、どちらの場合も、渡ろうと意図する特別な人、概して神々である

が、それらの人々のために、ある期間だけ懸けられる仮の渡しであることは確からしい。いつでもどこかに懸かっている、誰でもがそれを渡って別の世界にたどり着ける通路ではないらしい。いわば、特別の人がその特権を利用して、自分のために設けさせる特設通路ということになろうか。

だから、うっかりその特設通路を利用してしまったジャックは、危うく巨人（鬼）に食い殺されかけるといふ危険に遭遇することになったのであろう。外出から帰ってきた巨人が、かくれているジャックの体臭に気がつき、「人くさいぞ、人くさいぞ」と探し回る場面はいかにもスリリングで、子どもたちは手に汗を握り、ハラハラドキドキと結末を待つのだった。昔話の常として、大方はハッピーエンドになるであろうと想像がついていたにもかかわらず。

いま、天の上の世界に旅するためには、「天の浮橋」ならぬ「ロケット」という有力な通路が開発されている。それは、月に行くことは可能であると、既に証明して見せている。「月」は、その昔、「かぐや姫」が飛翔し去って、「再びみえることも叶わぬ」とばかり、残された爺と媼を嘆かせた遠い遠い憧れの地であったのだが、宇宙に向けて懸けられた現代版「天の浮橋」は、昔の人たちの叶わなかった願いの実現に手を貸そうとしているのである。ただし、それは、選ばれた特権者たちの特設通路であって、多くの普通人たちにとっては、依然、昔と変わらぬ憧れの地に導く夢の浮橋に他ならないけれど……。（ほんだ・ますこ）



（大詰めの）編集作業をしている6月初め、紙面では紹介し切れなかったが、宇宙研には3機の衛星（もう一つはSOLAR-B）と観測ロケット（S-310型）2機が試験を行っていて、活気に満ちあふれていた。しかし受け入れる設備側は大変で、装備も人も不足しているなど実感する。これから宇宙分野は新しい組織になろうとしているが、多くの野心的なミッションを遂行できるだけの人（とお金）を確保して欲しいと思う。（竹前）

ISASニュース

No.255 2002.6

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所（文部科学省） ☎229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 042-759-8008

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（庶務課企画・広報係）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>）。