



宇宙科学研究所
2000.12 No.237



▲雪の地面を照らしながら上昇するSS-520-2号機。スバルバードにて。撮影：Jan Ivar Tangen（ノルウェー極地研究所）

〈研究紹介〉

ミクロの機械の作り方や動かし方とその応用の研究

東京大学生産技術研究所

マイクロメカトロニクス国際研究センター 藤田 博之

1. マイクロメカトロニクス

昔、ギリシャのある小国が隣の強国から難題を吹きかけられました。「細長い巻き貝の天辺に穴をあけ、そこから下の口まで縄を通せ。それができなければ属国になれ」というものでした。貝はぐるぐると巻いていて、いくら縄を押し込もうとしてもできません。期日がせまり、王様や家臣が頭を抱えていると、一人の老婆がいい知恵を授けてくれました。蟻に馬の毛を縛りつけ、貝の口から追い込みます。天辺の穴に蜜を塗っておけば、蟻はそれに惹かれて螺旋形の通路を通り抜けます。後は縄を順に太くしていけばいいわけです。こうして小国は独立を保てたといえます。

さて、人工衛星や真空装置など非常にせまい場所でのものを取り扱ったり、胃カメラや血管に挿入されるカテーテルのように人体中で検査や治療を行う場合、この難題と同じ悩みがあります。例えば、胃カメラを飲んだことのある方は、「こんなかさばるコードを付けずに、薬のカプセルをちょっと大きくした程度のもので、検査ができるようにならないかなあ」と感じられたでしょう。

自分で歩き、簡単な動作を指令通りやるミクロの機械を作ることができれば、難題は一気に解決します。このような夢は、映画か小説の世界だけの話とされていたが、最近これを現実一步に近づけるような研究成果が活発に発表されるようになってきました。携帯電話やノートパソコンの小型軽量化をもたらしたシリコンチップに代表される半導体の微細加工を利用して、数十 μm という大きさの機械部品やモータ、アクチュエータ等を、シリコン基板の上に製作することが可能になったからです。

私たちの研究室では、このような夢の実現を目指してシリコンチップの微細加工（マイクロマシーニング）を用いて、ミクロの世界で微小な機械とエレクトロニクスを融合したシステムを作る研究（マイクロメカトロニクスの研究）を行っています。このミクロのシステムは日本ではマイクロマシン、外国でMEMS(micro electro-mechanical systems)と呼ばれています。

ミクロの機械を実現するために、私たちは次の3つの方向から研究を進めています。

①マイクロアクチュエータを中心とする要素デバイス

とその加工法の研究

②自分の行動を自分で決める賢いマイクロマシンの群れが、協力して一つの仕事をするための制御法の研究

③マイクロマシンのバイオやナノテクへの応用

これ以外の領域は「マイクロメカトロニクス国際研究センター」の教官や関連教官と一緒に研究しています。例えば、マイクロマシンの光技術への応用は年吉講師が、微小流体システムや化学分析システムへの応用は藤井輝夫助教授が、機械的マイクロマシーニングは増沢教授が、また原子レベルの超精密メカトロニクスを川勝助教授が担当するなど、全部で8研究室が参加しています。また、センターの支所をパリのエッフェル塔の近くに置いてあり、フランスを中心に、オランダ、スイス、ドイツとの研究交流を推進しています。今後は、アメリカやアジア諸国もこのマイクロマシン研究ネットワークに参加してもらう予定です。

2. 研究室の概要

生産技術研究所は六本木から駒場(旧東大宇宙航空研究所の跡地)に移転の最中ですが、どちらのキャンパスも先端的な科学技術の情報の創造と交換の場になっています。藤田研もその中で、国際交流を含めて活動しています。現在、職員2名、大学院生4名、外国人研究員(フランス国立科学研究センターより派遣)6名、企業からの共同研究員3名など約17名の構成です。研究室メンバーの半数近くがフランス人のため、研究打ち合わせ会も英語を公用語にしています。最初は大変ですが、グローバルスタンダードを目指して皆がんばっています。

設備としては、シリコンチップの製法を利用したミクロの機械の加工法(半導体マイクロマシーニング)に絞り、マスク設計から薄膜形成、フォトリソグラフィ、エッチングなどの微細加工、観察と評価まで一貫して行えるようになっていきます。

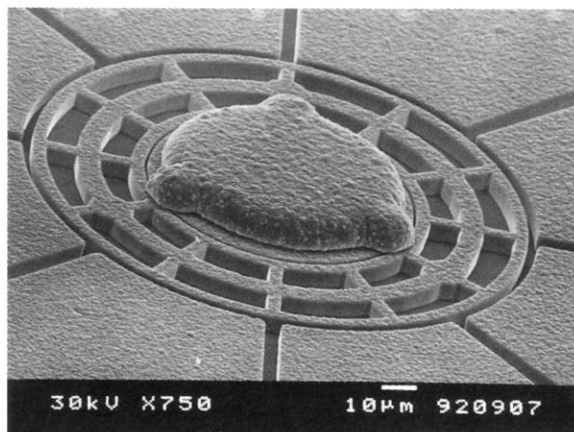


図1 マイクロ静電モータ (直径100 μm)

設備の使用を管理する時に一番気をつけているのは、マイクロマシンの製作において最大限の自由度と最短のプロセス時間を目指すことです。論文などの締め切りが迫って特急で仕事をすれば、マスク製作からマイクロマシンの完成まで1週間程度で行えます。このような体制は、考えついたことを直ちに実行して試し、更に改良してゆく上で、極めて大切です。

3. 研究テーマ

3. 1 マイクロマシンの作り方と動かし方

高性能のマイクロマシンを作るには、立体的なマイクロ構造と良く動くマイクロアクチュエータが不可欠です。立体的なマイクロ構造の作り方として、シリコン基板をプラズマで垂直にエッチングする方法と、シリコンの薄膜を高温で組成変形して立体的に組み上げる方法の二つを開発しました。この加工法を使い、マイクロアクチュエータとして、静電気や磁気の力、圧電効果、磁歪効果、形状記憶効果、熱膨張など様々の原理で動くものを実証しました。

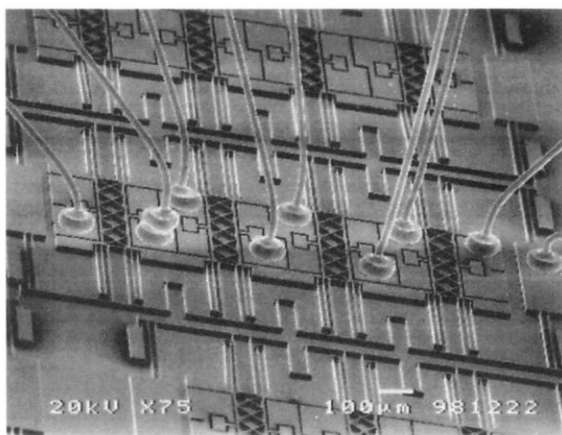
例えば図1は、筆者らが表面マイクロマシーニング法で作った、直径120 μm のマイクロ静電モータです。材質は、電気めっきしたニッケル膜(厚さ7 μm)です。円形に配置したステータ電極に電圧を周に加えると、ドーナツ状のロータが中心の固定軸の周りをすべらずに転がり回ります。俗にワブル(揺動)モータと呼ばれる形式で、中心軸との摩擦が少ないため良く回転します。50Vの駆動電圧で最高10,000回転/分を得ており、ロータの質量が小さいため停止→最高回転→停止のサイクルを1秒間に数回繰り返すことができました。

図2は、シリコン基板をプラズマで垂直にエッチングして作った、静電アクチュエータです。これは、デジタル電気入力に対応するアナログの機械変位を出力するDA変換器で、MEMDACと呼んでいます。4つの入力端子に0(0V)か1(150V)の4ビット信号をパラレルに入れると、380nm刻みで最大5.7 μm までの変位が得られます。アクチュエータの変位は印可電圧の揺らぎによらず、望みの値で安定しています。ビット数を増やせば、nmの制御も可能で、走査プローブ顕微鏡や磁気ディスクヘッドの位置決め機構、可変波長フィルター、光スキャナの角度制御など広い応用が期待されます。

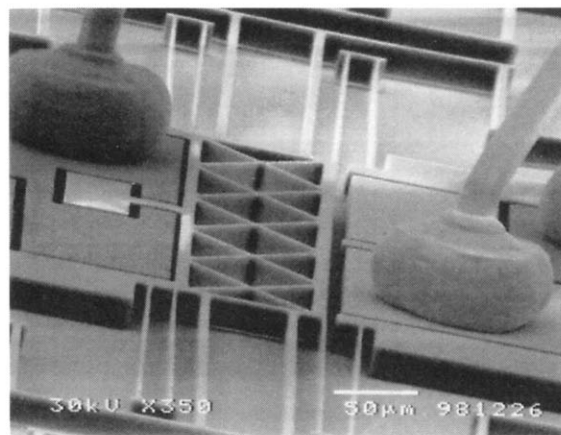
3. 2 群れで働くマイクロマシン

マイクロメカトロニクスの魅力は単に小さいことではなく、「センサや電子回路とアクチュエータを集積化した要素を多数同時に製作できる」点にあります。この特長を十全に生かすため、たくさんのマイクロマシンが協調して働くシステムを提案しています。

ちょうど多数のアリが一匹ずつ自律して動き、お互い



(a) 4ビットデバイスの全体図



(b) 1ビット分の拡大図

図2 静電アクチュエータを用いた機械式デジタルアナログ変換器

協力することで大きなエサを運ぶように、賢いマイクロシステムを多数配置し、お互いに連絡しあって助け合いながら一つの仕事を実行させようとするものです。新しいシステムの考え方として最近注目されている自律分散システムのマイクロ版です。

アレイ状に並べた多数のアクチュエータでシリコンチップを運搬しました。人工繊毛システムは、熱膨張によりバイメタルのようにたわむアクチュエータを、基板上に並べたものです。このアクチュエータは、振動するカンチレバーを二つ向き合わせて2自由度を実現したもので、図3に示すように交互に動くことで上に置いた板を支えたり一方に送ったりします。二つの動くタイミングを逆にすれば、逆方向にも動かします。実際には図4のように、長さ $500\mu\text{m}$ 、幅 $100\mu\text{m}$ 、厚さ $6\mu\text{m}$ のカンチレバーを交互に組み合わせ、 10mm 四方に512本並べてあります。このうえに $2.6\times 1.5\times 0.26\text{mm}$ の大きさで重さ 2.4mg のシリコン基板の一片を置き、それを運びました。搬送速度は、アクチュエータの動作周波数につれて速くなり、 20Hz の時 0.5mm/s

でした。また、センサ、アクチュエータ、制御回路を組み込んだモジュールを平面的に並べた、分散搬送システムを作っています。搬送システムの上に載せた物体を望みの位置に運び、その向きを合わせる作業や、物体の形状による分別作業をマイクロマシンチップとVLSIチップだけで実行させる研究を進めています。

3. 3 ナノテクとバイオへの応用

科学技術振興事業団の戦略的基礎研究「極限物理現象」の一環として、局所的で極めて強い電界中における原子や分子の振る舞いを可視化観測する研究をしています。具体的には、マイクロマシニング技術により微小な走査トンネル顕微鏡(STM)を作り、それを透過型電子顕微鏡中で作動させ、ティップ先端におけるトンネル現象、原子の移動、鎖状高分子の電気・機械的特性の評価などを行う予定です。図5は、2本のナノ探針がお箸のように向き合った構造です。針の太さは 100nm 、その先端の間隔は 300nm 。一つずつの針は独立に動かせるので、丁度お箸のようにDNA分子を自由に操作したり、カーボンナノチューブを調べたり、半導体量子構造の特性を明らかにしたり、いろいろの応用が考えられます。

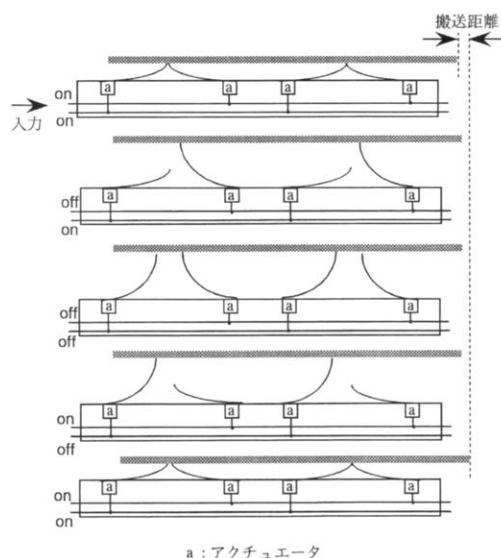


図3 人工繊毛システムの動作原理

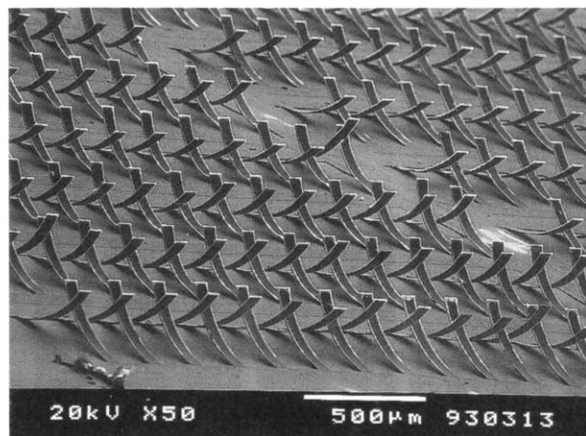


図4 人工繊毛システム

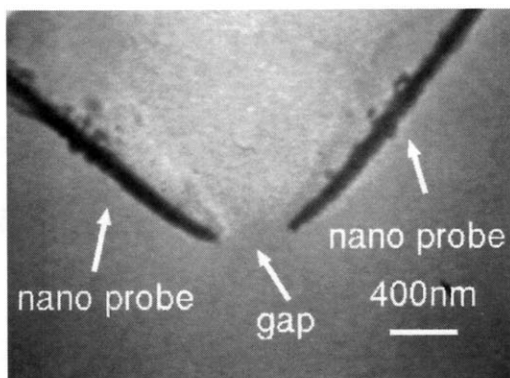


図5 ツインナノ探針。各々の探針は個別に駆動可能。

細胞の大きさやDNA分子の長さは、数ミクロンから数十ミクロンであり、マイクロ構造と同程度の大きさです。このためマイクロマシンはバイオ工学のツールに最適です。直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ $30\mu\text{m}$ の微細な中空針のアレイを作り、それを細胞の集合体に刺して、DNAを注入することに成功しました。また、特定のタンパクを認識する分子を固定した微細電極のアレイを作り、そこにターゲット細胞だけを選択的に吸着する研究もすすめています。(ふじた・ひろゆき)

<http://www.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/>

お知らせ



★宇宙学校のお知らせ

今年度も宇宙学校を下記のとおり開催します。

[A会場]

日時 平成13年1月27日(土)
場所 相模原市立産業会館
(相模原市中央3-12-1)
校長 小山 孝一郎 先生

[時間割]

第1時限 惑星と生命 (9:40~11:30)

- ・世界の月探査
- ・地球のいきもの・宇宙のいきもの
- ・映画 『私たちの太陽系』

第2時限 ロケットと未来の宇宙開発 (12:10~14:00)

- ・M-Vロケットと日本の宇宙科学の未来
- ・火星探査機「のぞみ」の異常監視と診断
- ・映画 『「のぞみ」と惑星探査』

第3時限 宇宙の謎に挑む (14:30~16:20)

- ・激しく活動する宇宙を探る
- ・太陽系の電気の世界
- ・映画 『ブラックホールをさぐる』

問合せ先：宇宙科学研究所庶務課企画・広報係

[B会場]

日時 平成13年2月4日(日)
場所 東京大学教養学部13号館1323教室
(目黒区駒場3-8-1)
校長 的川 泰宣 先生

田中 智 先生
黒谷 明美 先生

的川 泰宣 先生
橋本 正之 先生

高橋 忠幸 先生
松岡 彩子 先生

TEL : 042-759-8008

★シンポジウム

システム計画研究会

開催日：1月9日(火)

場所：宇宙科学研究所本館2階会議場

宇宙エネルギーシンポジウム

開催日：2月16日(金)

場所：宇宙科学研究所本館2階会議場

大気圏シンポジウム

開催日：3月15日(木)~16日(金)

場所：宇宙科学研究所本館2階会議場

宇宙輸送シンポジウム

開催日：2月1日(木)~2日(金)

場所：宇宙科学研究所本館2階会議場・1階入札室

衝撃波シンポジウム

開催日：3月8日(木)~10日(土)

場所：宇宙科学研究所本館2階会議場・会議室、
1階入札室

問合せ先：宇宙科学研究所研究協力課共同利用担当 TEL : 042-759-8019

★ロケット・衛星関係の作業スケジュール（1月・2月）

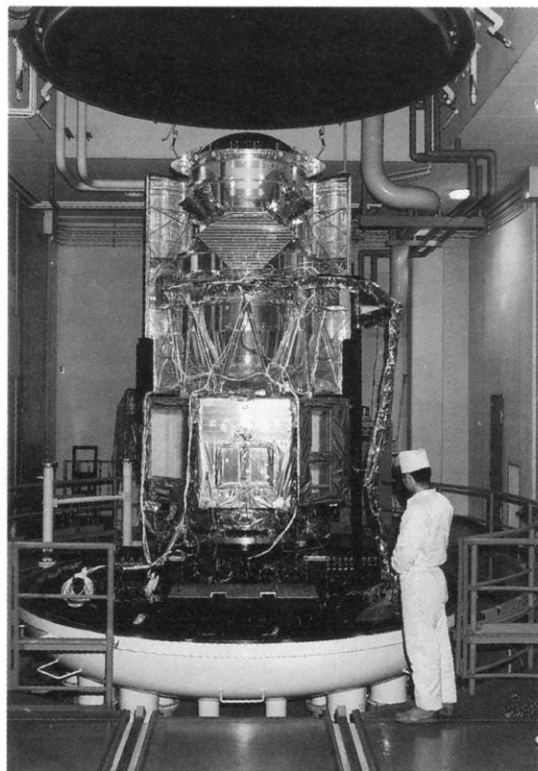
	1 月	2 月
相模原	INDEX:PM噛合せ試験(12/11~2月中旬), PM姿勢系試験(2月初旬~3月下旬), TTM 試験(2月中旬~下旬) (PM:Proto Model, 開発モデル) (TTM:Thermal Test Model, 熱真空試験モデル)	
鹿児島	M-V-5 1/2 段接手分離試験 ← 24 2 →	
能代		NAL-735 地上燃焼試験 (日程: 暫定案) ← 20 3/8まで →



★ASTRO-F TTM試験

今春行われた構造モデル(MTM)試験に引き続いて熱モデル(TTM)による熱真空試験が行われました。写真はスペースチャンバー内に鎮座し、蓋が閉められる直前の様子です。上部の円筒形の部分が液体ヘリウムクライオスタットで内部に口径70センチの望遠鏡と観測装置が納められています。トラス構造でクライオスタットと結合されている下部が通信、姿勢制御、電源等の共通機器が入っているバス部です。

ASTRO-Fでは液体ヘリウムの寿命をできるだけ長くするために様々な工夫がされています。その一つが



クライオスタット外壁を放射冷却によってできるだけ低温にすることです。しかし、実際に宇宙空間でクライオスタット各部の温度がどのようになるかは熱真空試験で確認してみないとわかりません。このため、クライオスタットに液体ヘリウムをいれ、スペースチャンバー外から真空ポンプでタンクを減圧し、液体ヘリウムを超流動状態にした上で熱真空試験を行いました。写真で本体の右側に見える配管が減圧ラインです。

また、クライオスタットが大きく、かつ複雑なため内部の温度分布が定常になるのにかなりの日数を要します。このため、通常の熱真空試験に比べて試験期間が長く、チャンバーの運転は11月8日から27日までの20日間にもなりました。

幸い試験は順調に進み、宇宙空間を模擬した試験が2種行われ、貴重なデータを得ることが出来ました。この結果はFM製作に反映されますが、これによりASTRO-Fがより信頼度の高いシステムになるものと思われます。(松本敏雄)

★宇宙学校たけお

さる11月11日(土)、佐賀県の武雄市において「宇宙学校」が催された。九州では初めての試みで、延べ300人の参加者だった。1時限目「宇宙の謎に挑む」(講師:高橋忠, 松岡), 2時限目「惑星と生命」(田中智, 黒谷), 3時限目「ロケットと未来の宇宙開発」(的川, 橋本正)というプログラムで、素朴でいい質問が連発された。好例を挙げれば、「光には重さがある?」「太陽風はどうして地球をよけるの?」「月は何色?」「宇宙から帰ったカエルは跳べるの?」「人工衛星に貼ってある金色の膜は何?」「スペースシャトルの中の空気はどうやって提供されているの?」など。「木星に火をつけたら爆発しますか?」という質問には、講師も度胆を抜かれた。(的川)



北緯79度は本当に79度で、あと1度で80度、あと11度で北極点です。学校で習ったことがその通りに起きます。北極星はほぼ真上にあり夏の大三角は地面を突き刺すように立ったままぐるーっと一周します。月は地平線のすぐ上を横に進んでこれも沈まず一周します。単に傾きが変わっただけと納得するも、なんだか別の世界に来た気分になります。真昼でも太陽は地平線の下10度にあって、天気の良い日で南の山の輪郭が少しだけ分かる程度に漸く光が届きます。実際は曇りや雪の日が多くて要するに一日中真暗です。

極域上空の太陽風と地球磁場の相互作用によって発生するとされる上層大気中のイオンの地球外への流出機構の解明を目指して、観測ロケットSS-520-2号機はノルウェー領スバルバード諸島スピッツベルゲン島ニールスンから1000kmの上空へ観測器を打ち上げます。このミッションは来年NASAが同種のロケット実験を計画していることもあり、是非とも今回の成功が望まれます。高度千キロを超えるのが実験主任との約束ですが、2段式とはいえ発射上下角を相当高くする必要がありますことと、現象の現れる南西の方向に打つためグリーンランドやアイスランド、ノルウェー本土を睨んで落下域の設定に気を遣うなどそれほど楽な打ち上げではありません。Mロケットのノズル材料の改良のための設計手法の検証の役目もあり通常の観測ロケットとは緊張の度合いはずいぶん違います。

スバルバード諸島はノルウェー本土から北へ約千キロ。この地域まで流れ込むメキシコ湾流のために12月の平均気温はマイナス12〜3度で緯度の割には暖かく、今回の打ち上げを行ったニールスンという町は昔は世界最北の炭坑だったのですが、現在では極域の生態調査や科学観測の基地として研究者が常駐できる小さなコミュニティとして維持運営されています。日本からも極地研の店があります。今回の実験期間中の町の人口は我々実験班を含めて40人から60人といったところでした。この時期週に2度の定期便が1回飛ぶと人口が何割も変わります。町のインフラは炭坑の時代から引き継がれたもので、ロッジからエネルギー供給、食事、飛行場の運用維持などKin Bay Kull Compani (Kullは石炭、今は単にKings Bay)

という運営会社が行っています。この会社は名前の通り昔は石炭採掘の会社だったそうで、ここのお姉さんたちは売店のレジから除雪やら散髪やら驚くことに航空管制まで一人で何役もこなします。

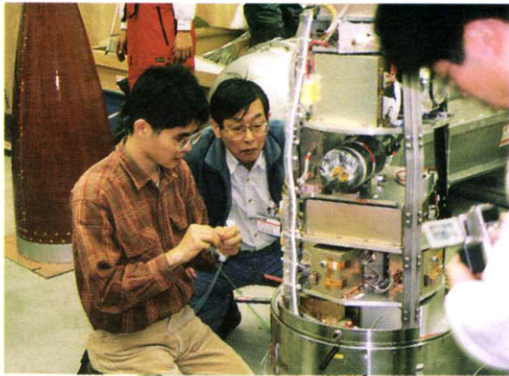
ニールスンは島の西岸Kongsfjordenという湾に面していて対岸には雪をかぶったとがった山が並び、山と山の間を氷河が海に流れ込む雄大な景色が眺められます。ただし太陽が昇ればの話で、今回のニールスン滞在の実験班の内3人は2年前の調査で明るいと時の様子を見ているので、暗い中をこっちの景色はこう、あちはこうすごいと説明しますが他の大半の実験班にはなにやら不満です。氷河の先端から海に落ちた氷が港にプカプカ浮かんでくる(水面の上でも家より大きい)のを見て青い氷に氷河の名残をみるのが精一杯でした。これはみんな



なで車で港へ行ってヘッドライトで照らして眺めます。あとはオーロラです。実験期間中に昼間も含めて赤やら緑やら何回も出ますが、実験班の中でもこれを見る態度の差が甚だしいことと知りました。外で見るのは寒いのです。

さて実験は11月13日から、発射地上設備や追跡を担当するノルウェー側アンドーヤロケットレンジの連中と輸送機材の点検、開梱から始め、輸送時の温度や環境の記録を点検してよしよし予定通り、とまずは安心。スエズ運河を通るときのロケットの温度環境についてのすったもんだやら、囁き合わせでのトラブルや武豊での出荷時のゴタゴタとか、いろんなことがあった割にはあっさりと作業開始。以後組み立て、動作チェック、ランチャ装着





などきわめて順調。準備の良さと調査の完璧さを誇るロケット班チーフ。こういう時はさりと流すものだとたしなめる実験主任。この後に始まる長い長い「待ち」のことなど想像もできず・・・予定通り11月25日の打ち上げ初日に臨む体制ができあがりました。

”We continue to HOLD.” ずっと続く実験主任の放送。毎朝5時からスケジュールに入り打ち上げ体制を作って6時過ぎから昼まで良い観測条件を待つ。実験主任とPIは地上観測とデータQLで町で待機。ロケット組は射点近くのブロックハウスに缶詰。以下、天気、風、打ち上げ条件ベストの日のアンドーヤの連中との会話（ロケットの都合で打てなかった日のことは忘れて）：「サイエンスの奴らはどこまで欲張りだ？いつも120%を狙う」「いや500%だ」「今までのアンドーヤでの待ちの記録は？」「NASAの奴らが23日待って打てなかった。この時もサイエンティストがGOを出さなかった。次に出直して来たら初日に上げて失敗だった」「そりゃかっこ悪いな」・・・

「おおいシモセ行くぞ」「今日は？」「1時間目体育、2時間目玉突き、晩飯、3時間目体育、サウナ、inch club、夜食」「はいはい」「今日はP1の若いのをいっちょもんでやろう」・・・打ち上げ待機中の毎日の昼食後の会話、



週に1回はKings Bayのエアロビクス教室もあります。「とほほ・・・おまえらは日本の誇りを背負って北極までロケットを飛ばしに来ておる。エアロビクスのお姉さんをのぞくとは何事か？なにー！一緒に踊っただと・・・情けない」

12月4日、地上、上空、風の条件何とかよし、ただし雪はやまない。現象の現れるのを待つうちいよいよ実験主任ゴーサインで発射。雪と氷の地面を照らしながらSS-520-2号機は降りしきる雪の中を雲の向こうに消えてゆきました（表紙写真）。ロケットの飛行正常。搭載機器、観測器動作もすべて正常。追跡受信も射点を含めロングイヤーベン、ノルウェー本土の3カ所とも正常。約20分後ほぼ予定通りの消感で実験終了。頂点高度は千キロを余裕で上回りあとは帰ってからPIの皆さんに良いデータを出してもらっただけ・・・と長い10日間の待ちの苦勞も吹き飛び実験終了。最後はうろうろしているトナカイ

やシロクマやキツネが間違っ
て食べて腹をこわさないように、射点の周りに飛び散ったケーブルやロケットの保温材やらの破片を積もった雪の中で回収掃除。ここは自然と動物が一番偉いところです。



暗闇生活25泊のキャンペーンはM-V-4号機で明けた多難な年の最後を締めくくることができました。何とか21世紀を迎えられます。実験班の皆さんお疲れさま。ほかに書くことはいっぱいありますが紙面がつかしました。また別の機会に。

計画会議に始まり足かけ3年、計画の延期やロケットの設計変更、改修などいろいろなことがありましたがご支援いただいた多くの皆さんのお陰で無事に乗り切ることができました。ノルウェー側の協力や実験に参加できなかった多くの関係の皆さんにもお礼申し上げます。来年はもっと良いことがありますように。

（稲谷 芳文）

★INDEX衛星のMTMモデル振動衝撃試験

11月21日から12月初旬にかけて宇宙研のINDEX衛星のMTMモデルの振動衝撃試験を、C棟で行っています。INDEX衛星は、他の科学衛星と違い、インハウスシステムをその目標のひとつにしており、大衛星メーカーさんの力を借りずに衛星パネルの組立、ダミー機器の取付を、樋口先生、奥泉助手を始め、宇宙研若手？が一喜一憂しながら、行っている所です。

INDEX衛星は、H-IIAのピギーバック衛星として2002年頃に打ち上げられる、50kg級で衛星コストが4億円程度の小型衛星です。小型といってもいろいろ工夫をこらした3軸姿勢安定衛星です。

現在の宇宙研の科学衛星では、計画開始から10年以上たってからでないとその成果が得られない長期化の弊害が問題になっています。また、そのコストも、打上コストを含めて150億円以上となります。この点を改め、新規開発した衛星技術をいち早く軌道上で実証し、かつ、タイムリーに科学的成果が得られる理学観測のチャンスを与えるために、INDEX衛星は提案されました。1号機には、オーロラの微細構造を極軌道から撮影するカメラ3台と粒子センサーが搭載されます。高速（60MHz）プロセッサによる衛星の統合的な制御、リチウム電池、高効率な反射板つき太陽パネル等の工学的技術の実証も行います。衛星システム的设计も可能な限り所内でおこない、搭載ソフトはすべて所内で開発しています。（齋藤宏文）



★M-25 SIM-3 大気燃焼試験

M-V型ロケット第2段M-24モータの改良型M-25モータの1/3.5縮尺のシミュレーションモータM-25SIM-3の燃焼試験が平成12年11月27日、成功裏に終了した。過去2回の縮尺型モータの燃焼試験で既に、90気圧弱での圧力下で供試モータが予想通りの推進性能を示すことを、そしてCFRPモータケースが十分に機能を果たすことを確認しており、今回は実機なみに110気圧を越える圧力で燃焼試験を行った。点火は午前10時30分、天候、風向きともに申し分のない条件下で行われ、

着火・燃焼ともに正常、計測・光学も良好なデータ、記録を取得できた。高圧燃焼に備え採用されたITE（Integral Throat Entrance）方式ノズルの3D-C/C製入口部や低目付CFRP製開口部ライナの焼損の度合いも非常に小さく、今年度末に予定されているM-25モータの燃焼試験の成功を予感させるのに十分であった。また、ノズルから排出されるアルミナ粒子の捕集にも成功したが、燃焼終了後、ある捕集用金属製トライが実験班員の気分を和ませる挙動をとったことを付記しておく。（堀 恵一）



★MUSES-C搭載予定のSSV開発中止

MUSES-C計画は米国NASAとの間で協力が進められているが、その一つとしてMUSES-Cへ搭載予定であったJPLの超小型ローバー（SSV:Small Separable Vehicle）の開発をNASAが断念することとなった。NASAの説明によれば、開発中止の理由は重量及び予算の大幅な増加のためであり、その背景には最近のNASA/JPLの火星ミッションの相次ぐ失敗があったとのことである。火星ミッション3回連続失敗の後、JPLで現在進行中の全ての計画についての見直しが行われた結果、現状のSSVは運用上のリスクが大きいと判定され、一方それをSSVに許された重量内で解決するには更なる予算増が必要なため、中止止む無しと決定されたものである。

SSVは手のひらサイズながら4つの車輪を持ち、MUSES-Cが小惑星に接近した際に探査機本体から切り離されて着地、小惑星表面を動き回って搭載の可視及び赤外カメラによる「その場」観測を行う予定であっただけにその開発中止は残念ではあるが、工学実験衛星としてのMUSES-C計画全体の成功という観点から、宇宙研としてもこの決定を受け入れることとした。

なお、MUSES-Cにおいては他にもサイエンス及びDSN（深宇宙通信網）による追跡支援等の協力関係があるため、現在これら協力の今後の進め方について協議を行っているところである。（上杉邦憲）

宇宙を 探る 第20回

シリコンマイクロストリップセンサー

深 沢 泰 司

10MeVよりエネルギーの高いガンマ線光子は、電子陽電子対生成を利用して検出する。発生した電子・陽電子対は、エネルギーが高くなると検出器中でカスケードシャワーを発生する。これらのカスケードシャワーや入射粒子の飛跡を高精度で測定することによって、ガンマ線の到来方向を決めたり荷電粒子起源のバックグラウンドを除去することができる。エネルギーが100GeVより大きくなると発生したシャワー粒子群がエネルギー測定用カロリメータ内で完全に吸収されにくくなり、また10MeV以下ではコンプトン散乱が主検出過程になってくる。このため、10MeV-100GeV領域がガンマ線の中でも観測感度が良く、1970年代からSAS-2やCOS-Bにより宇宙ガンマ線観測が行われてきた。そして、1990代はCompton衛星搭載EGRETにより、検出天体が270にもなった。まさに大きく発展しようとしているエネルギー領域である。

従来は、電子陽電子飛跡測定のために、ガスの中にワイヤーを張ったスパークチェンバーが用いられてきたが、ワイヤーの位置精度や数で性能が制限され、またガスを消耗するために測定時間が制限された。ところが、半導体の実装技術の進歩によりシリコンウエハー上にストリップ(縞)状のp電極を1 μ mの精度で実装できるようになり、シリコンストリップセンサー(SSD)として開発され、1990代に入ると加速器実験で広く使われるようになった。現在建設中の実験装置では1つのプロジェクトで数万枚のSSDが用いられている。そして、このSSDが米日伊仏共同の次期ガンマ線衛星GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope, 2005年打上げ予定)で初めて本格的に宇宙観測に利用されることとなった。SSDを用いることにより、飛跡の決定精度が向上してガンマ線源の位置精度が格段に向上する(GLASTでは0.5-20分角)。また、検出器の高さを低くして視野を大きくすることができ(GLASTは

全天の20%)、観測時間の効率化にもなる。これにより、GLASTはEGRETの50倍の感度で全天をくまなくサーベイする画期的なガンマ線衛星となる。

GLASTには、東京大学(現：広島大学)の釜江氏が加速器実験で世界のトップレベルのSSD設計技術を持つ広島大学の大杉氏と共同設計し、浜松ホトニクスとの協力を得て開発したSSDが採用されることが決まっており、それは6インチという大面積のFZ高抵抗ウエハーで製作に成功したものである。感度のある領域が87.5×87.5mm²で384本/1枚のストリップが含まれる(図1)。このSSDが全体で約1万枚も用いられる予定である。この大きさにもかかわらず、不感チャンネル比率が0.1%以下という高品質である。大面積化、高品質化のおかげで不感部分の大幅削減、および検出器の組み立ての大幅能率化になり、測定器全体の信頼度向上が期待される。1999年に実際に全体の16分の1の単位モジュール検出器が試験用に組み立てられ(図2)、ビーム試験に成功している。

GLAST衛星は、検出天体の数が1万を越えると予想され、X線領域でEinstein衛星が科学者に与えたと同様な興奮をガンマ線領域で与えると期待されている。そして、これまで主にパルサーやBLAZARに限られていたMeV/GeVガンマ線天体が、トランジェント天体、巨大分子雲、超新星残骸、近傍銀河、銀河団、ガンマ線バースト、超対称性粒子など多種多様に広がる。GLASTと競合する他の衛星計画も同時期には存在しないため、世界的にも注目されており、日本が積極的に参加しようとしている。

SSDは、MeV領域のマルチコンプトンカメラや硬X線領域の撮像検出器としても期待されており、我々のグループも含めて現在その開発が行われ始めている。
(広島大学 ふかざわ・やすし)

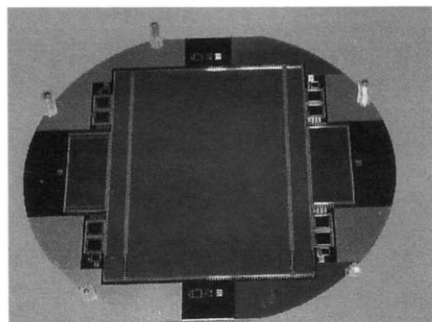


図1 シリコンストリップセンサー。
大きさは87.5×87.5mm²。

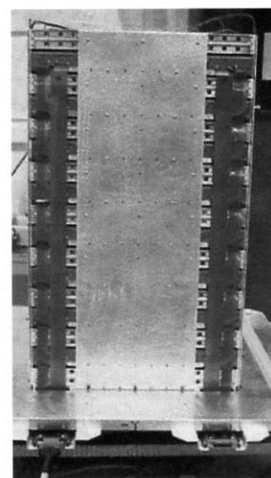
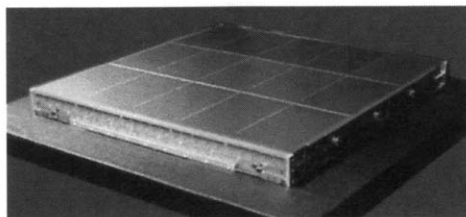


図2 ビームテストモデル。左のようにSSD15枚(本物は16枚の予定)が並んだユニットが、鉛の板とともに32層重ねられて右の1つのタワーになる。本物は16タワーで構成する。

タイ王国で象を撫でた

小林 康 徳

11月4日から10日間、タイ王国チェンマイ市のホテルで開催された第6回国際ヒートパイプシンポジウム(6IHPS)に参加し、帰途バンコク市のAIT(アジア工科大学)に立寄ってきた。6IHPSの会議は元々、日本で組織し開催されてきたが、諸々の理由で第5回目から東南アジア・環太平洋地域の国々に開催地が広げられた。2年後は韓国で第7回目が開かれる予定である。環境汚染やエネルギー問題に悩まされている事情はこの国や地域も同じで、「ヒートパイプ」という熱輸送デバイスに何らかの期待を寄せる気持ちはアジア地域にはまだ強い。いま世界中に出回っているほとんど全てのノートブック型パソコンにはヒートパイプが埋め込まれているが、その供給源は日本と台湾でほぼ独占している。このような事実もアジア諸国を刺激しているのかもしれない。会議は5日間、参加登録者は114名でその2/3は外国からの出席者であった。

タイ王国は初めてであったが、評判通り王様を心から愛し尊敬している国であった。総じて人々は穏やかでゆったりとした時間の流れの中で暮らしているという印象が強い。これは多分、私たちが滞在したチェンマイ市が首都バンコクから約600km北にある古都であったことにもよるだろう。海拔310mに位置し、平均気温はバンコクより数度は低いという。20世紀初頭にタイ王国に大同団結するまでは600年の歴史と独自の文化を持つラーナタイ王朝の首都であった。年輩諸氏にはユル・プリンナー主演の「王様と私」の映画・演劇でお馴染みのダンス大好き王様が活躍した舞台である。現在の人口は約60万人、タイで二番目に大きい都市だそうだが、国の総人口の1割を抱える国際都市バンコクの1/10に過ぎない。市の街中は「古都」からイメージする静寂や清新な雰囲気とは遠く、騒音と車の排気ガスで淡く霞んでいる。人々も街並みも地味な色彩を装うチェンマイ市内にはしかし、度外れて金ピカで華麗な寺院が新旧大小、合わせて300寺ほどあるという。中に鎮座する仏陀たちも眩いばかりの金色に輝いている。周囲の街並み風景と際立つコントラストである。象が神聖な動物として祭られ、様々な姿態の塑像や壁画が祭られているのも特徴的だ。上仏座仏教の正体を知りたくなった。

チェンマイ市を北西に向かえば直線距離100km強でビルマ、北東方向に200km程でラオスの国境にたどり

着くが、会議中の行事でその国境近くの象の飼育公園の一つを訪れた。そして、初めて神聖なる象の背中に乗った。乗ったと言っても2人掛けのスキーリフトに似た木柵の中に収まるわけだが、背上から眺めると象の背中は馬の背のように丸くも広くもないことに気がついた。もちろん馬よりずっと胴幅はあるが、背中あたりの勾配は結構急なのである。それに背骨列が10センチ位高く突き出ている歩行とともに大きく蛇行する。つられて木柵もゆらゆらりと左右に大きく揺れる。乗り心地は決して良くない。象の頭は才槌頭でてっぺんに人ひとりが座れるほどの広さがある。この特等席には象使いの少年が腰掛ける。10頭くらいが私たちを背に列を連ねて小一時間、川の浅瀬を渡り、森の中の獣道や小さな沢をただ黙念とノシリノシリ歩いてくれた。象たちは運命を達観しているに違いない。はしゃいでいたのは背上の人間様だけ。我々を目的地に下ろすと今日の稼ぎは終わったのだろう、三々五々象たちはご主人を頭に乘せて森の中に消えていった。山岳の少年も象もいたって無口ではにかみ屋であった。

タイ王国の旅で受けた最大のインパクトはやはり品物や労賃が圧倒的に安いことだろう。北部住人の質素な生活風習、土産物売りの子供達の必死な目、物の値段と人々の人格を混同し兼ねない危うさを覚える。まこと、私はタイで経済システムのからくりの一端を見た思いがする。これらの物品はおそらくバンコクに拠点を置くブローカー達を介して、何倍もの商品価格になって日本市場に流れ込むのだ。バンコクを中心に推定20万人もの有象無象の日本人がはびこる所以である。仏教徒の国、タイ王国はしかし、私たちにまだまだ大いなる郷愁と好奇心を抱かせる異郷である。チェンマイ市の城壁やアユタヤ遺跡の膨大な量の赤レンガ、曲々しきエメラルド寺院、バンコク郊外の巨大な食料品卸売場の雑踏と異臭、水上ラーメン屋の珍味、等など。それに、夜のバンコクはもう一つの異郷が現れる。蒸し暑さと人いきれ、片言の日本語、陳列棚の美女達、酒と踊り……。日本人は醜いか。私はタイの王様と人々と拝顔した諸々の仏陀に密かに合掌して帰路についた。機内は買い物袋で膨れ上がったツアー客で満席。座席の窮屈さに優しい気分はすぐに吹き飛び、成田の寒気で心底が震えた。異郷からの帰還である。

(こばやし・やすのり)



極限環境と探査機技術

齋藤 宏文

今回のお話は、惑星探査における極限的な環境とそれ乗り越えて惑星探査を行う場合に必要の探査機技術についてです。宇宙研では、惑星分野の理学研究者と工学関係者が将来の惑星探査について、その科学的な意義と技術的な問題の洗い出しを行っています。その中で議論されている解決すべき惑星の極限環境としては、以下の様なものがあります。

(1) 高温

水星探査周回衛星のように太陽からの直射光強度が地球の10倍 ($14\text{kW}/\text{m}^2$!) もある環境があります。これは直射日光を遮蔽すればある程度は、避けられます。宇宙研が欧州と計画している水星周回探査機Bepi-Colomboでは、基本的には $14\text{kW}/\text{m}^2$ の太陽直射光を探査機表面で反射・遮蔽して、熱制御します。また、水星ランダーや金星低高度気球計画のように温度として 400°C にもなる環境があります。これは、ガスや表面の温度が高温なので、本当の意味で高温環境です。

(2) 低温

太陽から離れた外惑星探査機では、太陽光が微弱なので低温が問題になります。また、月惑星のランダーが夜側で経験する温度は、 -100°C 以下になります。地中に潜れば熊が冬眠する様に、表面よりは暖かいです。ペネトレータが地中の潜り込む利点の一つは、ここにもあります。アメリカやロシアでは、いわゆる放射線同位元素 (アイソトープ) を探査機やランダーに搭載して熱源や電源に使用していました。しかし、昨今では、環境問題からこれも難しくなり、放射線同位元素を利用しない探査が、火星軌道までは一般化しつつあります。また、低温に最も弱い機器はバッテリーです。低温環境では、エネルギー源確保と低温に耐えられるバッテリーが鍵になります。

(3) 放射線

太陽フレア爆発による放射線は、太陽に近い水星等で問題になります。しかし、これは時々発生する現象であり、極限的といえるほどではありません。むしろ、木星のように磁場を持っている惑星では、磁場からみついている高エネルギー粒子による放射線が常時作用するので、ミッション期間中に 10MRad 以上というような大きな量になります。

(4) 衝撃や圧力

これには、宇宙研のLUNAR-Aが月表面に貫入させるペネトレータの貫入時の衝撃があります。固体惑星探査では重要な探査手法であるので、あえて極限環境として挙げます。月のペネトレータでは、 $300\text{m}/\text{sec}$

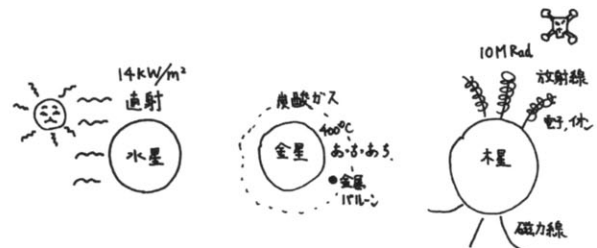
の速度で月表面に激突して、衝撃としては $10,000\text{G}$ が数ミリ秒も持続します。技術的な難しさは、高性能の理学センサーや電子回路等をポッティングして保護する技術にあります。また、金星バルーンでは高い気圧にたえられる金属バルーンも考えられています。

以上のような極限的な環境が惑星探査に見受けられます。構造材料の分野では、ここに挙げた高温や衝撃は、推進系や再突入機、その他の構造物が経験する環境よりも穏やかであるといえます。その意味で、むしろ、問題は電子デバイス等の機能素子により大きな困難さがあるといえます。

電子デバイスについて考えてみると、高温環境と放射線環境はある程度共通した研究課題であるといえます。高温環境下では、固体素子中の電子が低エネルギーの状態から高エネルギーの状態に熱的に励起されたり、漏れ電流を発生させます。一方、放射線が電子デバイスに照射されても、余分な電子・正孔が発生したり、もれ電流が生じます。ですから、耐高温性と耐放射線性は、共通した研究開発で対処できます。

その一例として、詳しい説明は省略しますが、SOI (Silicon on Insulator) デバイスがあります。宇宙研でも確認試験をしました。が、 300°C まで動作するSOIデバイスがあります。また、この素子は、 1Mrad という強い放射線でも、びくともしませんでした。現在、このSOIデバイスが放射線に強い事を利用して、周波数 100MHz 以上の宇宙用CPUを、数年以内に実用化しようとして計画しています。宇宙研のすべての科学衛星に、また、実用衛星にも使用されるような汎用の宇宙用CPUになる予定です。これは、惑星探査技術が宇宙全般に貢献できる、一つの好例です。

(さいとう・ひろぶみ)





憧 憬 (憧れ)

荒井智典

「さわでい、かっぶ(クラブ)！」タイでは挨拶は、「おはよう」も「こんにちは」も「さようなら」もこれ1つでOKです。発音が難しいと日本人の方はいいですが、1番大事なのは微笑みを添えるということらしいです。

いきなり宇宙とは無関係なお話で恐縮です。まあ、挨拶とISASということでお許しを！日本学術振興会バンコク研究連絡センターの荒井でございます。お久しぶりでございます。ご記憶の方もまだいらっしゃいますよね。平成6～8年度に宇宙研にお世話になっておりました。たった3年間でございましたが、私にとりましては非常にエキサイティングな日々でありました。仕事の内容もさることながら、おそらく少年時代の終わりとともに閉じ込めていた「宇宙」への狂おしいまでの憧憬(あこがれ)が宇宙研の先生方と接することで急に甦ってきたような錯覚に後押しされたものだったのではないかと今振り返って思っております。

ちょっと前になりますが、TVのパソコンのCMで西洋人の男の子がロケット(デパートの屋上なんかに設置されている子供用の乗り物で10円玉を入れると前後に揺れるだけのやつ)に乗り込むと本格的な打ち上げのアナウンスがあり、満天の星空にロケットが向きを定め、少年の期待が顔いっぱいに広がった瞬間にガコガコと前後に揺れて少年の失望した顔アップで終わるといった映像がありました(実際にはここで知的好奇心を満足させるといったPCの画面に続くのですが)。誰にでも似たような記憶があると思います。映像にはありませんが、おそらくロケットを降りて両手を広げ肩をすくめながら首を横にふり(欧米人が良くやる仕草)やれやれといった感じで現実に戻っていく少年が私で、「なにくそ！それなら自分で作ってやる。」と踏み出した少年が宇宙研の先生方ではなかったかと、このCMを見ながら思いました。誰もが一度は抱く「宇宙」への憧れを今も持ちつづけている、そんな先生方に軽い嫉妬を覚えたのを今懐かしく思い返しております。

こちらタイ王国におきましても、少年達の宇宙に対する憧れは決して日本の子供たちに引けを取るものではありません。子供用の玩具売り場では、宇宙関連(星間飛行ロケット等)の物は人気が高く、TV番組(子供向け)でも宇宙ネタのアニメやCG物は非常に多いです。いいえ、むしろこちらの子供たちの方が強いといっても良いでしょう。それは情報が日本の子供たちよりはるかに少なく、かつ現実(生活)が非常に厳しいという環境が未知なる

「宇宙」への憧れを増幅させるからではないでしょうか。未知なるがゆえに自分の空想が真実かもしれぬという想いが、なお一層少年達の血液を沸騰させるのだと。

2000年の宇宙研の一般公開には2万人を超す人々が訪れたと聞いております。私もほとんど終わりかけの頃、ちょっとだけお邪魔しました。(そのとき駐車場係の方々には大変ご迷惑をおかけしてしまい、誠に申し訳ございませんでした。このような場を借りてすみませんが、心からお詫び申し上げます。)多くの人にとって「宇宙」は、いまなお未知なる興味深い世界であり、「少年の憧れ」であり続けていることを物語っていると思います。宇宙研での3年間は、そうした人々の憧れに非常に近い場所(距離的なものでなく)で何らかの関与を仕事として行える高揚感(初めて異性を意識した頃、フォークダンスで相手の娘の順番を頭の中で繰り返し繰り返し呪文のように確認していたあの昂ぶりにも似た)でいっぱいでした。

現在宇宙研で働く全てのみなさまに、私は嫉妬します。どうか多くの人々の憧れの近くで働くことへの高揚感を楽しんでください。独立行政法人化や省庁再編による行政機関としての煩雑な種々の問題等、考えたら頭の痛くなるような混沌とした状況ではありますが、どのような形であれ人々の「宇宙」への憧れが無くならない限り、「宇宙研は永遠に不滅です！(長嶋風に)」と信じましょう。

私自身も再度宇宙研で働ける日を未だに夢見ております。しかし、「人事」とは願えば願うほど遠ざかってしまうものらしいです。(事実、異動希望先として「宇宙研」と記入した私は今タイにおります。タイも本人希望ですけど。)

最後に文中「少年」と限定した表現を連呼したのは、決して「少女」の除外を意図したものではありません。ただ荒井の矮小な脳みそのイメージで「少女の憧れ(=夢)」イコール「宇宙」の数式が何故かしっくりいかなかったもので、敢えて「少年」とさせていただきます。お気に触った女性の方には、ここでお詫びいたします。

(日本学術振興会バンコク研究連絡センター
あらい・ともり)



委員復帰後初の編集担当が20世紀最後の号となりました。21世紀第1号では理工学研究者が夢を語ります。ご期待下さい。(橋本樹)

ISASニュース

No.237 2000.12

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>)。