



▲体験学習「第1回・君が作る宇宙ミッション」(撮影：前山勝則)

〈研究紹介〉

系外地球型惑星の存在確率へ向けて

東京工業大学大学院理工学研究科 井田 茂

1. 地球の形成

地球は海を湛え、生命が居住している惑星である。このような生命居住可能な惑星は銀河系内にどれくらい存在しているのだろうか？ 地球は稀有な惑星なのか、それともありふれた惑星なのだろうか？ 天文観測探査によって地球のような生命居住可能惑星を捕らえることができる可能性はあるのだろうか？

そもそも地球がどのようにして、生命居住可能惑星となったのかを、振り返ってみよう。比較的多くの研究者に支持されているストーリーは以下のようなものである。

地球は45～46億年前に、微惑星と呼ばれる多数の小天体が衝突合体成長して誕生した。衝突に伴う発熱で、原始の地球はどろどろに溶けて、マグマの海に覆われていた。現在の地球は、鉄のコアのまわりに硅素化合物のマントルが取りまいている。この構造は、初期の熱い時代にできあがる。

初期の地球は、微惑星衝突の際に脱ガスした、二酸化炭素の濃密な大気を持っていた。その濃密な大気による強い温室効果と、衝突に伴う発熱によって、水は蒸発していたはずだ。地球誕生後、数億年たって、微惑星衝突が収まってくると、少しずつ温度が下がりはじめる。大気中の水蒸気が凝結して、猛烈な雨が降りそそぐ時代を経て、海が形成される。当時の海は、高圧で濃密な大気のもと、かなりの高温だったはずである。そのような高温の海では、生命のもとになる高分子化合物は分解されやすかったと思われる。高分子化合物の合成には、一時的にエネルギーが(熱水噴出口などで)与えられた後に、分解されない低温環境に戻る必要があると思われる。

その当時の主系列に入ったばかりの太陽は、現在の70%の明るさしかなく、この強い温室効果がなければ、微惑星衝突が収まると、地球の温度は下がりすぎて、海は凍結してしまったはずだ。

地球内部の熱を外に出そうとして、マントルが流動を始める。マントル対流である。地表は内部にくらべると低温なので、マントル対流が地表に湧きだした部分は「硬く」なって、プレートが作られる。プレートはどんどん拡大し、プレート・テクトニクスが開始する。プレートが地球内部に沈みこむところで、大陸がだんだんと作られていく。大気中の二酸化炭素は海洋によって分解され、大陸やマントルにとりこまれ、大気はどんどん希薄になり、窒素が主成分となっていく。

この、二酸化炭素の大幅な減少により、海は低温になり、生命の合成が進む。一方で、太陽は輝きを増していくので、海の凍結は避けられる。放射性元素の分析により、地球のコアは地球誕生後、数億年以内に形成されたと推測されている。コアの外層部分は液体状態にあり、地球の自転に伴う流体回転運動によって、地球磁場が形成された。この磁場は25~30億年前には現在と同じくらいの強さになっていたということが、地質学的証拠によって示唆されている。地球に磁場ができると、それによって宇宙線や太陽風は遮断され、浅海は生命にとって安全地帯となる。太陽光が届く浅海に上がった微生物は次第に太陽光を生命活動のエネルギー源に使うようになり、光合成を始める。光合成により、酸素が放出され、オゾン層が形成され、完全に安全地帯となった地表に生命は上がり、酸素呼吸生命が誕生する。

これが、地球の生命の誕生のあらすじである。このような生命居住可能惑星（ハビタブル・プラネット）はこの宇宙にどれだけの数が存在するのだろうか？

生命誕生の条件としては、惑星質量が大気を保持できる範囲にあること、中心星からの距離が適当で水が液体の状態にある温度範囲に入るもののほかにも、プレート・テクトニクスがおこる（陸上生命の誕生のためには磁場の発生も）条件も必要かもしれない。プレート・テクトニクスや磁場の条件も惑星の天体力学的条件で表すことができたなら、生命誕生の条件は惑星の質量や軌道半径といった、惑星形成理論が扱うことができる物理量で記述ができ、惑星形成理論が生命居住可能惑星の存在確率を記述できるようになるはずだ。

2. 系外惑星の発見

この5年ほどで急速にこの問いの答えへの道が開けてきた。きっかけは系外惑星（太陽とは別の恒星のまわりをまわる惑星）の発見である。1995年にはじめて発見されて以来、系外惑星は次々と発見され、2003年現在、発見された数は100個をこえた。これらは、惑

星が公転することによる中心星の微妙なふれを中心星のスペクトルのドップラー偏移により観測することによって検出された。間接的ではあるが、数々の検証をのりこえて、観測された中心星のスペクトルのドップラー偏移は惑星が公転するものであると証明された。

現在の観測技術では太陽近傍に限られた恒星（数千個）でしか観測できないので、100個というのは驚くべき多い数である。確率に直すと、太陽のような単一星で約5%で検出という確率になる。まだ確認はできていないが、惑星と疑わしきデータも含めると、観測対象の星のうち数十%もの星に惑星が存在している可能性がある。

また、100個をこえる系外惑星のデータがあると、どのような惑星系がどれくらいの確率であるのかというように、統計的な議論も可能になり、理論モデルとの比較検証ができるようになる。

惑星系は原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤から生まれたと考えられており、星形成領域（おうし座分子雲やオリオン座分子雲など）の電波観測により、そのような原始惑星系円盤は、生まれたばかりの星には普遍的に存在していることがわかっていて、円盤の質量分布もだいたいわかっている。つまり、惑星形成の初期条件についても、惑星形成の終状態の系外惑星も観測データが揃ってきているのである。これらをつなぐのは惑星形成理論である。

3. 惑星系形成理論の再構築

観測された系外惑星は、中心星から0.05AU（AUは太陽と地球の距離で天文単位と呼ばれる）という至近距離の軌道上を数日という短時間で公転する木星大の巨大ガス惑星（ホット・ジュピター）や、大きく楕円に歪んだ軌道を持つ巨大ガス惑星（エキセントリック・プラネット）など、多様な姿を示している。

現状では、惑星形成理論はこのような多様な系外惑星を統一的に説明できるほどの一般性を持つには至っていないが、惑星形成の初期状態と終状態の観測結果と比較しながらスクラップアンドビルドを重ねることによって、急速に惑星形成の統一的理論へと向かっていくことが期待される。つまり、原始惑星系円盤の質量（初期条件）が与えられると、理論によってその円盤のどの軌道半径にどのような惑星ができるのか（終状態）が与えられる。観測で明らかになっていく初期状態の分布と終状態の分布が理論とあっているのかを調べ、合わない分は理論にフィードバックをかけていくことによって、統一的理論ができていく。

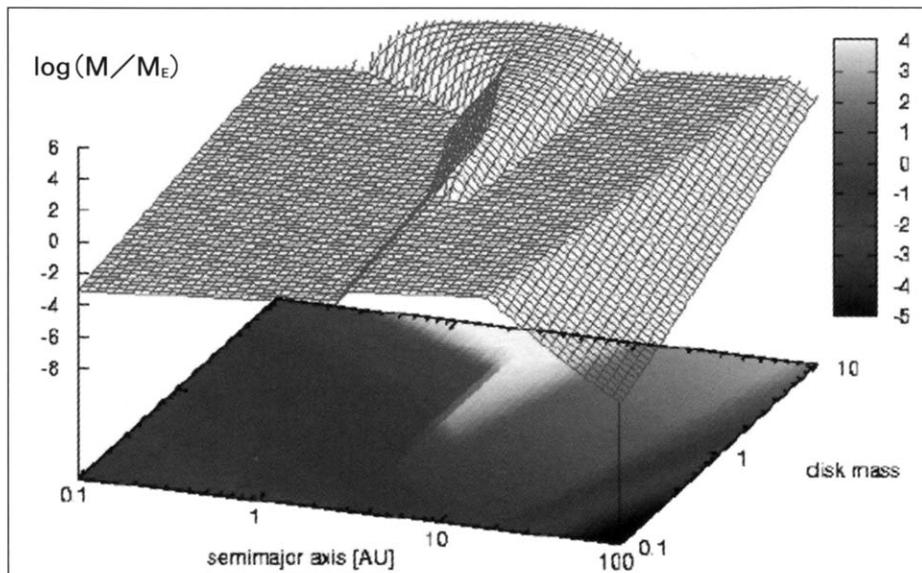


図1 N体シミュレーションによる、期待される惑星質量

現在の観測技術では、中心星を大きな速度でふらつかせることができる、木星のような巨大ガス惑星しか検出できていないので、理論と観測が比較できるのは、そのような巨大ガス惑星の軌道配置や質量の分布だ。しかし、それがかなりの精度で理論と観測で合うようになったならば、地球型惑星の存在の理論的予測もかなり信頼できるものとなる。

筆者のグループでは、旧来の太陽系形成理論（7年前まではわれわれは太陽系しか惑星系を知らなかったのだから、惑星形成理論としては太陽系形成の理論しかなかった）を一般化する努力を続けている。たとえば、微惑星の合体成長のN体シミュレーション（全粒子の重力相互作用を入れて軌道積分していくシミュレーション）を、太陽系には相当しないような極端に大きな初期質量や極端に小さな初期質量をもった原始惑星系円盤の条件のもとでも行ない、どのような惑星系が生成されるのかを調べている。

微惑星の合体成長の結果、（固体の）原始惑星が形成される。N体シミュレーションによって、どの軌道半径にどのような質量の原始惑星ができるのかがわかる。原始惑星の質量が地球質量の5~10倍を越えると円盤ガスが原始惑星にとりこまれはじめ、木星や土星のような巨大ガス惑星が形成される。円盤ガスの流入速度は惑星質量の関数としてほしい理論的にわかっている。一方、観測から、円盤は約1000万年で消えていくことがわかっている。円盤がなくなればガス流入は終る。

N体シミュレーション結果に以上のような惑星へのガス流入の効果も入れて、モデル化して、プロットし

た結果が図1である。x軸は中心星からの距離、y軸は円盤質量を表し、その質量の円盤の与えられた軌道半径で、どれくらいの質量の惑星ができるのかをz軸の高さおよびx-y面でのカラーコンターで表している。y軸は太陽系を作った円盤の推定値（太陽の質量の約100分の1）を1としてある。形成される惑星質量は地球質量（ M_E ）の何倍かを対数で表している。木星質量は地球の約318倍なので、この目盛では2.5となる。つまり、2~3の目盛を越える領域（カラーコンターで黄色っぽい部分）は

木星のような巨大ガス惑星が形成される領域を表している（実際はこの領域内のとびとびの場所に形成される）。

ある円盤における惑星質量の軌道半径依存性はある円盤質量（y軸の値）を固定して、x軸方向に横に見ていけばよい。たとえば、太陽系を作ったような質量の円盤(disk mass=1)では、数AU以内で比較的軽い地球型惑星、数AU以遠10AU以内で、木星や土星に対応するような巨大ガス惑星ができることがわかる。

一般に中心星から遠いほど、ひとつの固体惑星に集積する微惑星の空間領域が広がるので、大きな固体惑星ができやすい。また数AU以遠では、温度が低いいため氷が凝縮し、固体物質が増えるために、さらに大きな固体惑星ができる。固体惑星の質量が地球質量の5~10倍を越えると、ガス流入が始まって巨大ガス惑星が形成される。一方、中心星からあまりに遠いところでは、固体惑星の集積が遅く、固体惑星が大きくなったときには円盤ガスが消失してしまっているので、ガスをほとんど抱かない地球質量の10倍程度の氷惑星が作られる。これらは天王星や海王星に対応すると考えられる。

また、数AU以内では水星($0.05M_E$)や火星($0.1M_E$)くらいの惑星はできるが、地球や金星($0.8M_E$)はできていないことがわかる。つまり、数AU以内では火星質量程度の原始惑星同士の衝突が、原始惑星形成後にやがておこって、地球が形成されたと推定される（図1ではそのような原始惑星形成後の軌道進化は考慮されていない）。そのような激しい原始惑星同士の衝突の破片から、地球には月が形成されたと考えられる。

一方、太陽系を作った円盤より重い円盤では比較的内側領域から巨大ガス惑星がいくつも形成されることが予測されることがわかる。おそらく、このような惑星系が、ホット・ジュピターやエキセントリック・プラネットを抱く、太陽系型とは異なる惑星系になっていくのだろう。

観測的に、円盤質量の分布がわかっている（太陽系を作った円盤の1/10～10倍に分布）、ここの理論モデルを使うと、どういう惑星系がどれくらいの確率で存在しているかが、ある程度予想がつく。そのなかで巨大ガス惑星だけを取り出すと、観測による系外惑星の軌道や質量の確率分布と比較することができる。巨大ガス惑星について理論的予測が観測と合うようになるならば、地球型惑星についての理論的予測もある程度信頼できるものとなるだろう。

4. 生命居住可能惑星へ

このような研究によって、いろんな惑星系での地球型惑星の存在の理論的予測ができると、先に述べたような大気・海洋存在条件、生命生成環境条件をかませることにより、生命居住可能惑星がこの銀河系にどれくらいの確率で存在しているかを理論的に推定できるようになるはずだ。もしかしたら、陸上生命の生存に関わる気候安定性には、その地球型惑星の軌道離心率の大きさや自転軸の安定性（これには月の存在が大きく関わっている）の条件も関わるかもしれないが、これも惑星形成論が扱える範疇の問題である。

現在の観測技術では他の惑星系の巨大ガス惑星は検

出できても、地球型惑星の検出は難しい。したがって、上のように巨大ガス惑星の存在を通して理論的に推定するしかない。しかし、トランジットと呼ばれる恒星面惑星通過による恒星光度の周期的減少を測定する方法をつかって、衛星望遠鏡（数年内にフランスとアメリカが打ち上げ予定）で観測すれば、地球型惑星は検出されるのではないかと予想されている。恒星面惑星通過は惑星断面積できまり、ドップラー遷移は惑星質量で決まるので、小さな地球型惑星ではトランジットが有利だと考えられているからだ。また、影ではなく、地球型惑星の直接検出も、宇宙空間に巨大な電波望遠鏡を打ち上げれば、他の惑星系の地球型惑星の検出は原理的に可能である。直接検出では大気などの組成もわかり、オゾン層のようなバイオマーカーによって生命活動の有無もわかるのではないかと考えられている。現在、アメリカとヨーロッパでそのような衛星電波望遠鏡の打ち上げの本格的な検討が始まっている。日本でも同様の計画へ向けてのワーキンググループが始動している。

他の惑星系の生命居住可能惑星を見つけるなどということは、十年前には全くの絵空事だったが、事態は急転し、近い内に見つかるのではないかと予測がされている。惑星系形成理論もそれにひきずられ、大きく変貌しようとしている。その波及は地球惑星科学だけでなく、天文学、生命科学へと広がっていくであろう。

(いだ・しげる)

*本稿は東工大クロニクル2002年10月号掲載の記事に加筆修正したものである。

お知らせ



★ロケット・衛星関係の作業スケジュール（4月・5月）

	4 月	5 月
相模原	M-V-6 M-34 システム試験 初旬 (IA川越) 中旬	M-V-6 B-2 仮組立 B-1 仮組立 中旬 (IA富岡) 下旬 M-V-6 M-34 システム試験 初旬 (IA川越) 中旬
	ASTRO-F 総合試験	
	LUNAR-A 母船-ペネトレータ嚙合せ試験 中旬	
内之浦	MUSES-C 射場オペレーション 21	M-V-5 フライトオペレーション 11
三陸		第1次大気球実験 中旬

★人事異動

発令年月日	氏名	異動事項	現(旧)職等
		(事務取扱命)	
15. 4. 7	松本 敏雄	宇宙科学研究所長	宇宙圏研究系教授
		(辞職)	宇宙輸送研究系研究主幹
15. 4. 6	松尾 弘毅	宇宙開発委員会委員 (4月8日付け)	宇宙科学研究所長
		(採用)	
15. 4. 1	津田 雄一	システム研究系助手	
		(昇任)	
15. 4. 1	山上 隆正	システム研究系教授	システム研究系助教授
		(併任)	
15. 4. 1	的川 泰宣	対外協力・連携推進室長	対外協力・連携推進室教授
"	井上 一	宇宙圏研究系研究主幹	宇宙圏研究系教授
"	小野田 淳次郎	宇宙輸送研究系研究主幹	宇宙輸送研究系教授
"	中谷 一郎	衛星応用工学研究系研究主幹	宇宙探査工学研究系教授
"	的川 泰宣	鹿児島宇宙空間観測所長	対外協力・連携推進室教授
"	高野 雅弘	能代ロケット実験場長	宇宙推進研究系教授
"	井上 一	三陸大気球観測所長	宇宙圏研究系教授
"	小杉 健郎	臼田宇宙空間観測所長	共通基礎研究系教授
"	栗林 一彦	宇宙基地利用研究センター長	宇宙輸送研究系教授
"	中谷 一郎	次世代探査機研究センター長	宇宙探査工学研究系教授
		(転出)	
15. 4. 1	平木 講儒	九州工業大学工学部助教授	システム研究系助手
		(定年退職)	
15. 3. 31	矢島 信之	システム研究系教授	
"	廣澤 春任	衛星応用工学研究系教授	
"	小林 康徳	次世代探査機研究センター教授	
"	井上 浩三郎	宇宙探査工学研究系助手	
		(辞職)	
15. 3. 31	藤松 信義	宇宙輸送研究系助手	

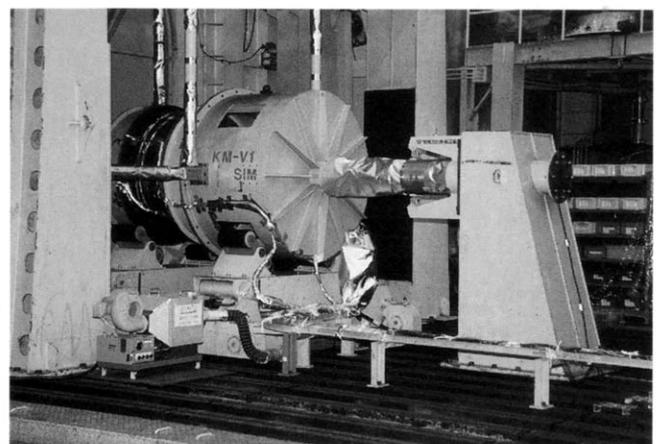


★KM-V1SIM大気燃焼試験

国内初の月探査機「LUNAR-A」(ルナA)を打ち上げるM-V型ロケットのキックモータ燃焼試験が平成15年3月11日、能代ロケット実験場において行われました。ルナAは平成16年度以降に打ち上げが予定されています。実験ではルナAを月遷移軌道に投入する動力となるキックモータKM-V1のノズルスロート部の耐熱性などを調べました。

2000年2月のM-V型ロケット4号機の打ち上げ失敗が1段モータのノズルスロート部の破損が主原因だったことを踏まえ、宇宙科学研究所では、スロート部の材質を従来のグラファイト材から熱構造強度の高い3次元織りカーボン・カーボン複合材に改良する研究が進

められてきました。今回の試験は同型ロケット2号機に関する最終試験となりました。



当日の気温は0度、曇り空に時々雪の舞うような天気でした。高校入試の時刻に配慮して午後4時30分に点火時刻を設定しました。寒い中を約50名の市民が見守ってくださる中カウントダウンが進みました。点火のアナウンスと共にモータはやや緩やかにごう音とオレンジ色のせん光を発して、もうもうと白煙を噴き上げながら、約1.3トンの推進薬を約90秒間燃焼させました。

試験は順調で、計測されたスロートの焼失率は予測と良く一致し、材料の熱構造安定性も良好であり、所期の目的を達成することができました。関係各機関ならびに能代市浅内をはじめ地元の方々のご支援に感謝いたします。(嶋田 徹)

★再使用ロケット実験機・第5次地上燃焼試験

2001年6月に第2回の離着陸実験をやってから早くも1年半以上が経ちました。この間は極低温燃料タンクの複合材化やこの複合材タンクのヘルスマニタを目指した光を用いたひずみ計測、さらには3機関連携・協力運営本部の仕事としてエンジンの高耐久性を目指した電鋳製造によるインジェクタなどの新しい要素の基礎研究を、宇宙研の外へと研究サークルを広げながら行ってきました。今回の実験ではこれらの成果を採り入れた形で次の飛行実験を行うべく、再び飛翔形態のシステムを組み上げてエンジン燃焼実験を行いました。機体は飛行範囲を拡大して繰り返し飛行の実験をする

ため上記の新しい研究成果に加えて軽量化や搭載機器の更新なども施されています。冬と春の天気の変わり目に翻弄されながら、まだ残る冷たい風やアラレの舞う中、年度末の後ろなしの実験でしたが合計6回の燃焼実験を計画通り行い、次の離着陸実験に向けたデータ取得と機能確認ができました。複合材タンクに水素を入れてエンジンに火をつけたのは勿論はじめてでしたが何とかしのげました。

「おーい、液体酸素行くぞ、志田君は?」「今電話してます」

タンクに液体水素を充填してから酸素を注文していた志田君、スタンド点の寒さをため息で本部にアピールしていた徳留君、工場で指令電話を切らずに作業して存在を知らせ続けた鈴木君、タンクの水素漏れと格



MUSES-C 月報-4

★MUSES-C総合試験終了

MUSES-Cの総合試験は、3月上旬に終わり、3月12日には探査機を相模原から鹿児島島の射場に向けて搬出し、無事3月15日に現地に到着しました。総合試験の終わりには、重量、慣性モーメントなど慣性諸量の測定が行われ、当初の積み上げ重量と整合していることが確認できました。

最終整備日に近づくと、だんだん世の中の報道でも漏れ聞こえることが多くなったようで、見学者が大勢いらっしやるようになりました。見学の第一印象は、だいたい「あ〜。」というものです。たぶん、アクロバットに近い数々の難題を切り抜けるので、きつともっとかなり大きいものだと想像しているのだと思われます。しばらくすると、印象はもう少し細部になり、「意外といろんなものが外についているんですね...」という感想に変わっていきます。とくに、外部の金色でおなじみの、MLI (Multi-Layer-Insulation) をみて気がつかれるらしく、「ところどころ、金属光沢を示す部分とか、黒っぽい部

分がありますが...」という質問が出てきます。とてもよい質問で、MUSES-Cで実証される、目立たないながらも、従来にない熱制御技術がそこにあります。大いに関心をもっていただきたいところでもあります。

3月末から4月はじめまで、鹿児島でキセノンガス60kg強の充填が行われました。高価なガスなのに、ポンベの色が窒素と同じなのが、なんとなくシャクにさわったのは了見がせまいのでしょうか。新型イオンエンジンは、大気へ自由に暴露できるため、作業はとても順調です。4月下旬からはロケット系の最終整備が予定されています。

宇宙観測の特徴は、虎穴の虎児を求める点にあります。何回も磨いているとだんだん虎児の顔が出てくる分野との大きな違いです。世界並かどうかを糺す減点法の質問がまだまだ多いのですが、挑戦を歓迎する加点法へと変わってきているようです。ぜひ追い風をうけて打ち上げたいと考えています。

(川口淳一郎)

★松尾弘毅所長が宇宙開発委員会へ

2000年1月以来宇宙科学研究所の所長として私たちが率いてくださった松尾弘毅所長が、さる4月6日付けで本研究所の所長を退任され、4月8日に宇宙開発委員に着任されました。1962年4月に当時六本木にあった東京大学生産技術研究所の糸川英夫先生の門をたたかれてから40年の長きにわたったロケットの現場から、感慨に浸るまもなく去られる慌しさでした。

松尾弘毅所長は、1939年2月18日に満州でお生まれになりました。大学院時代に、糸川先生の指示のもとで秋葉鏝二郎、長友信人両先生と書かれた『人工衛星計画試案』は、日本最初の人工衛星「おおすみ」を生み出す理論的先駆けをなした文献で、いかにお若いうちから日本のロケット開発の中核的役割を果たされていたかを物語るものです。軌道工学とそれをベースにした宇宙システム工学を専攻され、常にミュー・ロケットの開発とわが国の科学衛星計画のリーダーシップをとって頂きました。

もちろん1964年に宇宙航空研究所が創設されると駒場に移られ、1981年には宇宙科学研究所への移行と運命をともにされました。きらびやかなご経歴のどれをご紹介すればいいのか迷うほどですが、宇宙科学研究所や東京大学（併任）の教授という「本職」はともかくとして、着任された公職は数知れず、たとえば、旧文部省の科学官（1986－1994）、宇宙開発事業団の理事（1992－2000）、宇宙科学研究所副



所長（1996－2000）、国際宇宙航行連盟IAF副会長（1996－1998）、日本航空宇宙学会会長（1997－1998）、国際宇宙航行アカデミー IAA 評議員（1999－）、日本ロケット協会会長（2000－2002）、学術会議会員（2000－）、国際宇宙大学アドバイザー（2000－）、国際宇宙航行アカデミー IAA 副会長（2001－）と並べると、まぶしくなるほどです。

このような役職は、ご本人にとって無数の思い出の発信源でもありましょうが、私たちにとっては、松尾先生は常にミュー・ロケットのリーダーであり、ともにハレー彗星や火星・金星を夢見た懐かしくも偉大な先輩であり、宇宙科学研究所の野球チームのエース・ピッチャーであります。次号に先生ご自身の「さよなら」とどなたかの「送る言葉」を掲載させていただくこととなりますが、とりあえずご一報いたします。（的川泰宣）

闘した竹内君、終始デレデレしていた（アツアツの）餅原君、あらゆる事の世話にかり出されるエンジン班の皆さん、何でもすぐ作るスタンド班の皆さん、ご苦労様でした。これから6月末に再び飛ばすための準備にかかります。

（稲谷芳文）

★LUNAR-Aプロジェクト

LUNAR-Aプロジェクトは、2004年度以降の打上げを目指して、ペネトレータ搭載通信系の調整等を進めている。本年5月には、改修型月震計の耐衝撃性を確認するための貫入試験がアメリカで実施される。また、初秋には、通信系の総合試験が、能代実験場の特設ドームで実施される予定である。前回は、縮尺モデルを用いたアンテナの試験であったが、今回は、フライトモデル相当のペネトレータを使用して、全機テストが行われる。

このペネトレータは、通信系試験終了後、最終的な貫入試験（QT）に供され、その結果を見て、実際に

LUNAR-A宇宙機に搭載されるペネトレータのポッティングが行われることになっている。

母船の総合試験は、今秋からの再開を計画しており、久しぶりにプロジェクト全メンバーの顔が揃うことになる。スケジュールに関しては、余裕があるとはとても言えない状況ではあるが、プロジェクトメンバーの協力を得て、是非とも打上げまで持って行きたいと考えている。（中島 俊）

★ASTRO-F頭胴部噛み合わせ

宇宙赤外線望遠鏡「IRTS」に次いで赤外線観測を目的とした科学衛星「ASTRO-F」の、頭胴部噛み合わせがIHIエアロスペース富岡工場に於いて行われました。これは、ロケット「M-V型6号機」と衛星との機械的インターフェースについて、設計通りであるかを、実機を用いて確認するために行われたものです。具体的には、衛星と第3段モータとの結合部分の寸法や噛み合わせ、また、ノーズフェアリング内壁と衛星構体や搭載機器とのクリアランス、つまりスタートラッ



力、パドルヒンジ部、アンテナ等がロケット打ち上げ時にフェアリング内壁に接触しないか、さらには、フェアリング内に納められた衛星をアクセス窓を通して作業が可能か等について調べられました。作業は3月18日から4月1日まで行われ、予定通りの日程で、大きなトラブルもなく進められました。写真はノーズフェアリングを背にした「ASTRO-F」です。

(大西 晃)

★報道関係者との懇談会

さる2月28日に科学記者との懇談会、3月13日に論説委員・解説委員との懇談会が開かれました。前者には17社(23人)、後者には10社(20人)の出席を得、宇宙研からは所長、管理部長をはじめ主幹会議のメンバーを中心に参加しました。宇宙研からは、所長からの挨拶、3機関統合の現況報告(松本企画調整主幹)、科学衛星の現状(それぞれの川、中谷)、PLANET-C計画(中村正)についての報告がなされ、活発な質疑が行われました。来る10月1日に迫った宇宙3機関統合に関しては、統合後も宇宙科学の世界的に高い貢献をぜひ維持して欲しいとの嬉しいエールが送られました。科学衛星の現状については、やはり打上げを5月に控えたMUSES-C、特にサンプルの地球帰還の技術に関する質問が相次ぎました。また、この野心的な計画の成功か否かの評価をめぐる質問が出されましたが、宇宙研としては、MUSES-Cは工学実験用の探査機であり、その特徴である、・イオンエンジン・自律航行・小天体からのサンプル収集・惑星間空間からの地球帰還という4つの要素のどれか一つが達成されても、世界の惑星探査への大きな貢献であるという考え方が示されました。いずれにしても、MUSES-Cミッショ

ンへの期待が大いに表明され、身の引き締まる思いがしました。現在世界唯一の金星ミッションであるPLANET-Cについても、惑星気象学の嚆矢となることへの意義が理解していただけたと思います。(的川泰宣)

★体験学習「第1回・君が作る宇宙ミッション」

宇宙に関心を抱く高校生20名(男16,女4)を相模原キャンパスに集めて、「君が作る宇宙ミッション(通称“きみっしょん”)」が3月28日(金)~31日(月)に実施されました。本体験学習は、施設見学や実験体験といったお仕着せの結果に満足させるのではなく、研究者が普段行っている研究過程そのものを体験してもらえるように企画されました。すなわち、参加した高校生には“自ら考え・作る”といった作業に主体的に取り組んでもらい、その過程を通じて科学に対するアプローチといったものを学び取ってもらうことが本体験学習の目的です。各班4人の5つのグループに分かれた参加者は、まず研究テーマと研究目的を自ら設定し、その後は文献調査や計算・議論を重ねて自らのミッションを創り上げ、最終日に研究発表を行いました。わずか4日間ではありましたが、参加した高校生が目を見張る成長を遂げ、最終日の研究発表会で輝く姿を見ることで、我々スタッフ一同も大きな充実感を感じることができました。

今回は第1回ということもあり試行錯誤しながらの運営となりましたが、結果的には大きな成果をあげることができました。しかし、今回の運営に携わった30名弱のスタッフの三分の一は所外の大学生・大学院生であり、200人以上の教官・大学院生が在籍する所内からの協力者が少なかったことは残念でした。所内の教官スタッフの皆様方のさらなるご理解とご協力を頂ければ、体験学習の内容を発展させることも可能です。研究・開発機関であると同時に教育機関でもある宇宙科学研究所のプログラムとして、“自ら考え・作る”体験学習が今後も継続できるよう、発起人より皆様のご支援をお待ちしております。

最後に、準備段階から多大なるご協力を頂いた、小山孝一郎先生をはじめ、ご多忙な日程を割いて講義を行っていただきました橋本正之先生、矢野創先生、井上一先生、当日の受付から事務的な作業でバックしていただきました秘書の矢島さん、石川さん、会場のパソコン設営で協力して頂いたPLAINセンターの三浦昭先生、様々な支援・協力をしていただきました対外協力・連携推進室や管理部、観測部企画管理課、庶務課企画・広報係の皆様方に心よりお礼申し上げます。本体験学習は、財団法人・宇宙科学振興会、宇宙科学研究所・生活協同組合、株式会社啓林館からの援助を受けています。(阿部新助・はしもとじょーじ)



電波探査衛星「でんぱ」

井上 浩三郎

第1号科学衛星「しんせい」を打ち上げてからしばらくは、東大宇宙研にとって充実の年が続きました。1965年に提案され、地球の電離層から磁気圏にわたる領域の観測を目的とした第2号科学衛星REXS (Radio Exploration Satellite) は、1972年8月19日にM-4S-4号機によって打ち上げられ、「でんぱ」と命名されました。

軌道に乗った「でんぱ」は、最初の内之浦での受信で、衛星の第4段モータ部よりの切り離し、科学観測用アンテナの伸展、磁力計及び電子温度センサの伸展などを確認し、搭載されたすべての観測機器・装置が正常に作動し、太陽電池出力も予定どおりでした。すべてのデータが順調に取得されていた第26周日、異変が起きました。打上げ後3日目のことでした。少し詳しく当時の状況を説明しましょう。

8月22日9時4分(日本時間)、高压電源を投入する予定が組まれました。手順書に従って初めて電子フラックス測定装置の高压電源をオンするコマンドを送信しました。1秒もたたないうちに、突然テレメータの受信音が、ヒューという音とともに途絶えました。衛星から何もレスポンスがなくなり一瞬何が起こったか分かりませんでした。受信機の前ではオペレーターが手信号で×(バツ)信号を私に送っていました。ペンレコーダーに記録しているテレメータ信号はメチャクチャになっていました。

放電によって衛星の電源回路が異常をきたし、搭載機器の過電圧に弱いトランジスタなど半導体部品が損傷して正常に動作しなくなったと考えられます。その後136MHz送信機と400MHz送信機は回復しましたが、テレメータデータは正常に戻りませんでした。放電によって衛星のデータを符号化しているエンコーダが損傷を受けたものと思われます。

計画が始まって以来約7年、この衛星に全エネルギーをかけてきた担当者の研究者にとって何よりも増して手痛い打撃だったでしょう。コマンドを送信した小生にとっても衝撃的な経験でした。

この放電によってコマンド受信装置が誤動作することが判明しました。このため地上からのコマンドに対する衛星からのアンサーを調べ、現場でプリント基板に新しいコマンド符号をつくる変更で、コマンド受信装置は正しい受信解読がなされるようになったのですが、コマンド項目群選択のリレーが応答せず、観測装置の電源を投入できないことが判明したため、この作

業は断念せざるをえませんでした。野村先生を中心に1日3時間の睡眠で3日間は頑張ったのですが・・・。無念の撤退でした。

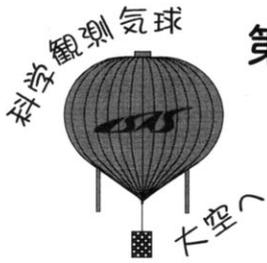
事故発生直後よりテレメータ・データの詳細な解析を行うとともに、衛星の飛ばし前各種環境試験結果の再検討、同種の機器を用いた数多くの故障再現実験を実施して事故状況の解明ならびにその原因の究明に努めてきました。

すなわち事故の原因と推定される高電圧回路の放電に関しては、事故に直接関係のある電子フラックス測定装置とその高压発生器のみならず、同じように高電圧を使用して打上げ時に一部不具合の生じた電磁波励起実験装置について、実際以上の悪条件における強制放電実験を行い、放電の発生箇所、その影響の波及状況を調べるとともに、これらの単体ならびにアンテナをもふくめた機器全体の総合放電実験を大気状態から高真空状態にわたって実施しました。

打上げ後第26周という短い時間で放電という思わぬ事故のため観測不能になりましたが、衛星主任の大林先生の報告によりますと、ほぼ70時間にわたる科学観測については、内之浦およびラス・パルマス局(フランス)において、可能なすべての軌道にわたるテレメータ受信が行われ、電離層および磁気圏のプラズマ密度、電子温度、VLF電磁波の強度スペクトル、LF電波エミッションおよび地球磁場分布などに関する興味ある情報を取得することができ、特に電離層内のF2層全域(250km以上)にわたる高度分布を観測し、亜熱帯域を中心とする電離層異常に関して貴重な資料が得られた、ということです。

(いのうえ・こうざぶろう)





第7回

インドの大気球実験事情

名古屋大学 大学院理学研究科 芝井 広

4年前からインド・タタ基礎科学研究所の研究者と共同で宇宙遠赤外線観測を行ってきたので、インドの大気球実験について紹介する。基地はインド亜大陸の南部、デカン高原のほぼ真中、インド第6の大都市ハイデラバードの近郊にあり、タタ基礎科学研究所によって1969年にほぼ現在に近い形に建設された。当時は世界的に見ても先進的な施設だったと思われる。その後インド宇宙機関（ISRO）のサポートを受けて送受信設備を更新したりしながら現在にいたっている。大型気球を年平均約4, 5機打ち上げている。

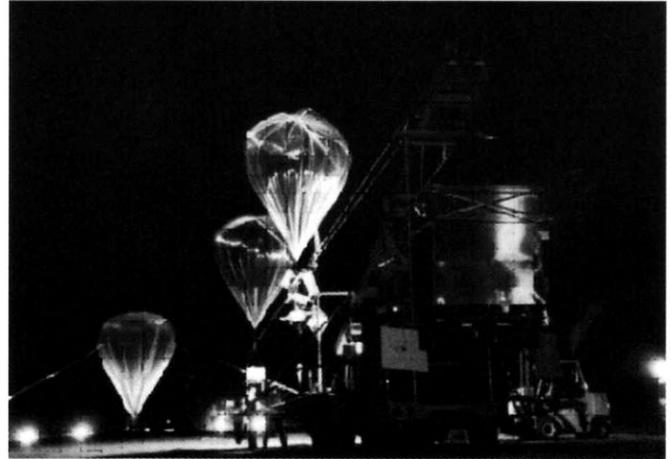
基地は海拔約500mの平坦な高原にあり、直径300m以上の打上専用フィールドを備えている。打上方式はこの広いフィールドを生かした「ダイナミック・ローンチ」で、専用のローンチャ（打上げ台車）がある。打上可能なペイロードの最大重量は約1000kgである。

この基地の一角に長さ150m以上の「気球製造工場」があり、現在ではすべての気球を自前で製造している。フィルムもインド製、ロードテープも自前で製造している。これで信頼性が低いかといえば、昨年まで数十回で一度もインド製気球のトラブルは無かったらしい。なおヘリウムではなく水素ガスを用いており、その安全管理には大変気を使っている。

昨年、送受信設備を更新した結果、テレメトリは2GHz帯を用いて2Mbpsまでデータ送信できるようになった。コマンドも近々130MHz帯から2GHz帯に変更するらしい。飛行可能範囲は東西にそれぞれ約400km（差し渡し800km）、南北の幅300kmの横長の飛行領域が設定されている。

たいへん羨ましいことのひとつが、それぞれのグループが専用のペイロード準備室を持っていることである。特に口径1mの望遠鏡を持つ赤外線グループは高さ5mのペイロードを天井から吊って姿勢制御試験をしたり、扉を大きく開けて夜空の模擬観測をしたりできる「ハイベイ」と呼ばれる準備室を備えている。硬・軟の両エックス線グループもそれぞれ専用の準備室を持っており、普段ペイロードは置きっぱなしで、フライト前にムンバイ（ボンベイ）からチームがやってきて準備するシステムである。

気球の打上には、上層風と地上気象の両方良い必要がある。上層風については日本などの中緯度帯とは違い、11, 12月と2, 3月が良い。しかもこの期間はイン



打上直前の赤外線望遠鏡（右手前）。左奥が気球本体。

ドでは冬にあたり、地上気象も安定している。晴れの日が毎日続き夜になると風が収まるのでほぼ毎晩打ち上げられそうな気象である。

このように（失礼ながら）意外にきちんとした体制、施設を備えているインドの気球観測事業だが、問題があるとすれば、60人ほどの現場職員一人一人に、世界と競争して切磋琢磨し向上する意識を如何にして持たせるかであろう。その意味でわれわれの訪問、長期滞在は現場職員の意識を高めるのに寄与しているに違いない。インドは経済的にも急速に発展しており、毎年町並みが大きく変わっているのに驚かされる。科学研究の面でも今後の飛躍が期待される。

「因縁」とは不思議なものである。私は今、名古屋大学で故早川幸男教授が使っていた居室を使っている。インドとの共同気球観測は30年ほど前にとっても盛んだったが、当時は早川幸男教授をはじめとする名大・宇宙研混成のX線天文学のグループが「カニ星雲」が月に隠される「掩蔽」を観測するために何度も訪れたそうで、インド研究者から当時の話を懐かしそうに聞かされる。早川先生は本当は禁煙だったカフェテリアや食堂でいつもパイプをくゆらせて宇宙物理学の議論（講義？）を日印の若手研究者と交わっていたそうで、その薫陶を受けた研究者がインドでは（日本でも）X線天文学のリーダーとなっている。我々がたいへん友好的に共同研究ができるのも優れた先人たちのお蔭である。

（しばい・ひろし）

キルナ市はスウェーデン北方の内陸部に位置する鉄山の街であり、その象徴のように市街のどこからでも見ることができそうなボタ山が街の南西に作られている。この地はオーロラオーバルと呼ばれる極域を取り巻くドーナツ状の領域に入る確率が高く、内陸であるために晴天率も良い。さらに北極と地磁気北極の位置が一致しないために生ずる通常の時刻と地磁気的な時刻の差が良い方向に作用し、地磁気的な真夜中が通常の真夜中より早く来る。夜更かしをしなくてもオーロラが見えやすくなるため、オーロラの地上観測にとっては好都合な場所である。スウェーデン宇宙科学研究所 (IRF)、そして「あけぼの」衛星関係者には馴染み深い海外受信局、エスレンジ局がここにある。

1年半ほど前、思いがけずキルナに行くことになった。Mars Express衛星搭載用観測機器としてIRFが手がけるASPERA-3という粒子観測機器パッケージの一部、NPI (高速中性粒子撮像器) を較正するためである。本来の較正実験担当者が急病に倒れ、入院してしまったため、代役としての訪問であった。もともとASPERA-3には関わっていなかった浅村のキルナ行きが決まったのは、IRFのASPERA-3実務責任者、Stasを個人的に知っていたこと、浅村が高速中性粒子観測器の開発に携わった経験を持っていたことなどによる。しかし、急に呼ばれての出発は不測の事態によることが明らかで、キルナでの仕事がいきなり較正実験に入るのではなく、機器の特質に習熟したスタッフなしに観測器や較正実験機器の特性把握から始まることを連想させた。

IRFに着いた翌々日、その日からIRFに来ることになっていたという学生を紹介された。Klasというその大学院生は実験経験を持たないが、ずっと今回の実験につきあうことがすでに決まっていた。彼とともに再度観測器の説明を受け、出すべき結果について話しあった後、実験を始めることにする。NPIは既に真空チェンバー内にセットされ、データ処理用の電子回路も接続されていた。Stas立会いのもと、MCP (マイクロチャンネルプレート; 高電圧をかけると粒子や光子一つ一つがある効率で検出できる) に高電圧を与えるとダークカウントが予測どおり現れ、イオンビームを照射すると、確かに予定されたMCP上の領域付近からカウントが出てくるように見える。この時点でかなり安心した。この分ではすぐにでも較正実験に入れそうだ。しかし、データを見ていると、どうもおかしい。予測

をはるかに超えたカウントが時々検出されている。原因はデータ処理回路部にあり、観測器側の問題ではないことが分かったが、土日を含んだため、改修は翌週に持ち越された。

イオンビームの問題もあった。較正実験に必要なビームは長時間にわたって一定した強度を保つビームだが、実際にビーム強度を測ってみると短時間に相当な変化をしている。全くビームが出なくなることもあり、部品交換を余儀なくされることもあった。その都度真空チェンバーをリークし (内部を大気圧に戻し)、必要なセットアップを行って再度真空に引くので、実験可能な真空度に至るまでの二日程度はただ待つことになる。その間、他の観測器や実験機器を見たりセミナーに参加したり、或いはオーロラを見上げたりと意義ある時間を過ごしていたが、すぐに二週間ほど経ってしまった。

少しずつ時間が気になりだした。設定された実験期間は四週間だが、その半分が過ぎ去った今、未だ結果らしい結果を得ていない。このままでは較正実験をあと二週間で終えるなど無理な相談ではないのか。朝8時半のバスと夕方7時の街行きの最終バスによってKlasのIRF滞在時間が決定されてしまうのは非効率ではないだろうか。寒ければ気温が零下30度にもなる中、IRFと市街地の間の8kmを歩くことは不可能である。幸い、IRFには研究所自体が所有する車があり、自由に使えることになった。車を使うことで、深夜に及ぶ実験もバスが動かない土日の実験も可能となった。

それでも滞在期間を三週間延長し、較正結果を得て帰国したのは大晦日直前だった。帰国直前の送別パーティではJapanese concentration campなどと形容され、スウェーデン人にとっては考えられないほど仕事詰めの一か月半だったようだが、Klasにとっては初めての実験経験であり、それほど違和感を感じなかったのかもしれない。IRFには研究所内に技術者がいて、電子回路をはじめ、金属加工など必要なものはほとんどなんでも作ってもらえる。朝頼んで午後に行けることもあった。待ち時間が減るため、この小回りの良さも仕事詰めの要因となり、実験の進捗を大きく後押しした。

一年ほど経った今年の2月、キルナに行く機会がありKlasに再会したが、もうAsamuraと実験していないから土日は来ない、と笑っていた。

(あさむら・かずし)



ほむら立つ

的川泰宣

母が必死で走っている。その背中が激しく揺れる。周りは火の海。頬が熱い熱い風に叩かれている……。その後繰り返し夢に見た情景が私の頭に刻まれたのは、昭和20年（1945年）7月1日のことだったらしい。この日、呉の町はアメリカ軍からの大空襲を受けて焼け野原になった。

空から目立たないようにと灯火管制をしていた当時の家庭では、「ウーウー」と空襲警報が鳴り響くと、それとばかりに防空頭巾をかぶり、一家打ちそろって防空壕へと駆け込む毎日であったらしい。

父はフィリピン戦線にいた。あの空襲の日、母と二人の兄と一緒に近くの防空壕に避難した。私を膝に抱っこしていた母が、隣で泣き叫ぶ女性に目をやった途端に凍りついた。あろうことか、おそらく私と近い年くらいの子どもがぐったりと首をうな垂れている。

「窒息死だ」と直感した母は立ち上がった。隣にうずくまる兄たちに「出るよ！」と叫んだが、二人は動かない。（外は爆弾の雨が……）の意識が足を凍ませているようだ。母は幼い私をおんぶして出口へと強引に進んだ。兄たちも、降り注ぐ爆弾よりも母を失くす方が怖かったと見えて、気がつくや、火の海の町へ一家4人で飛び出していた。

隣の防空壕までの500mくらいの距離をひた走ることの時の母の背中が、私の記憶の最も古いものである。

一夜明けて、すっかり焼けた呉の町を、小高い場所から眺めた私が、「焼けた、焼けた！」と踊りつづけるのを、一瞬のうちに希望を失った大人たちが、さびしい微笑を浮かべながら見守っていたという。前に入っていた防空壕は直撃弾をくらって11人が全滅だった。母の背中以外の記憶以外、すべて後で聞いた話である。

母は、毎日の空襲警報で不眠症に陥った私を、父の田舎へ疎開させた。広島と岡山の県境に近い比婆郡の東城である。老年期の山並みに抱かれた、母の懐のような村。誰一人知る人のいない環境で、おそらく最初はおずおずと、やがて幾分は伸びやかに、私はしばらく

くを過ごした。

母が東城に私を連れて行った日、帰ろうと見回すと私がいなかった。仕方なく歩き出した母が振り返ると、雨戸の隙間からじっと見送る私の視線があったという。母は泣き崩れながら長兄を抱き寄せつつ帰路についた。（もう母と連れ立って帰ってはいけないんだ）ということに霧囲気を感じ取っていたものらしい。寂しい3歳の直感であった。

どうも日本は負けるらしい……呉の町にもちらほらとそんな噂が流れ始めた日、母は一人で暮らす末っ子の顔を見て来ようと思立った。呉から呉線で広島に出て、芸備線に乗り換えるのだが、広島市内に住む友人を訪ねようかとの思いは、わが子が待ってるからという気持ちに負けた。

広島を発って1時間ぐらいたった時、広島に空に原子爆弾が炸裂した。その母の友達はその原爆ドームに象徴される爆心地からわずか1kmくらいの所に住み、一家7人全滅となった。

ちょうどその時刻、広島を背にして腰掛けていた母は、ピカッと何かが光ったのを記憶している。しばらくして乗務員が「先ほど広島に新型爆弾が落とされました。みなさん、できるだけ白い服を着てください」と叫びながら車内を移動していたという。

母は、この話を小学校時代の私にたびたび聞かせた。「あなたがいたから私は命を救われた」と。聞いている私は、いつもおかしいと思っていた。「ボクがいなければ、お母さんはその日広島に行ってはいないはずなんです……」しかし涙を流しながらの母の語りはいつも私を黙らせた。

そしてついにその母の「誤解」を解くことができないまま、私が大学3年の春、母は急逝した。「いま空襲が来れば、私がお母さんを背負って走ってあげるのに」との思いが、その後私の脳裏に浮かんで消えては消えている。

（まとがわ・やすのり）

ISASニュース

No.265 2003.4

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>）。