



特集：月／惑星探査計画

No. 118 1991.1
宇宙科学研究所

新年のご挨拶

宇宙科学研究所長 西 村 純

私たちの研究所が東京大学を離れて、独立の大 学共同利用機関「宇宙科学研究所」になってから、早くも十年の歳月が流れました。この間“てんま”をはじめ、“おおぞら”，そしてM-3S II型の開発と“さきがけ”“すいせい”的ハレー探査，“ぎんが”“あけぼの”“ひてん”と7機の衛星や探査機に成功をおさめ，“SEPAC”のような大型の国際共同研究も行われて、研究所が国際的にも大きく飛躍した記念すべき十年でありました。日本からの参加なくしては、国際学会の主題が成り立たないような例も幾つか耳にします。そして、これらの基礎と成果を築かれた数多くの諸先輩も何人かご退官になり、今更ながら時の経つのが早いのに驚かれます。

長年待ち望んでいたMロケットの大型化の開発は昨年から始まり、私たちの夢は大きく膨らんできました。M-V型の開発に伴って、新しく加わった月／惑星の分野の研究をどの様に展開していくべきか。宇宙科学研究所としての独自性をもった

発展をもたらすためには、21世紀の初頭に向けて長期的な構想のもとに、創造性豊かな開発と研究を計画的に一歩一歩積み上げて行く必要があります。今年はM-V型の開発に平行して、昨年来議論してきた長期のストラテジーを確立する大事な年にしたいと考えています。

8月には、数々の成果をあげた“ひのとり”的2号機ともいるべき“Solar-A”が内之浦から打ち上げられます。今、着々と準備が整えられ、この独創的な素晴らしい観測器が太陽爆発現象の謎を明らかにしてくれるものと世界中の期待が集まっています。

昨年は日本で初めての月に向かうミッション“ひてん”的成功に明け、衛星観測に、観測ロケットに、大気球に、そしてそれぞの基礎研究に幾つかの成果をあげた意義深い年がありました。

新しい年を迎える、今年も皆で力を合わせ、新しい構想を練って、研究所がまた大きく発展するよい年になることを期待してやみません。

新年特集号に寄せて

ISASニュース編集委員長 松尾 弘毅

1990年代は“ひてん”的成功で明けた。“ひてん”は順調に飛行を続け、間もなく淡々と月と第7回目の会合を行う。惑星間航行のための基盤は確立し、次の準備は成っている。

一方国外では、一昨年のマゼラン、ガリレオに続いて昨年はユリシーズが打ち上げられて、惑星探査はようやく80年代の停滞を脱し、また月／火星基地について本格的な議論が開始されようとしている。

好機である。この機会に本研究所における月／惑星

探査計画の特集をおくる。

M-3S II型を開発しつつハレー彗星を目指してプラネットA計画を進めた80年代前半と、M-V型を開発しつつ次を狙う90年代前半とは状況は酷似しているように思える。しかし、ルナーAをはじめよく吟味された多様な計画を前にすると、惑星間飛行に突破口を開くべくひたすらハレーを目指した10年前を思い、感慨一入である。



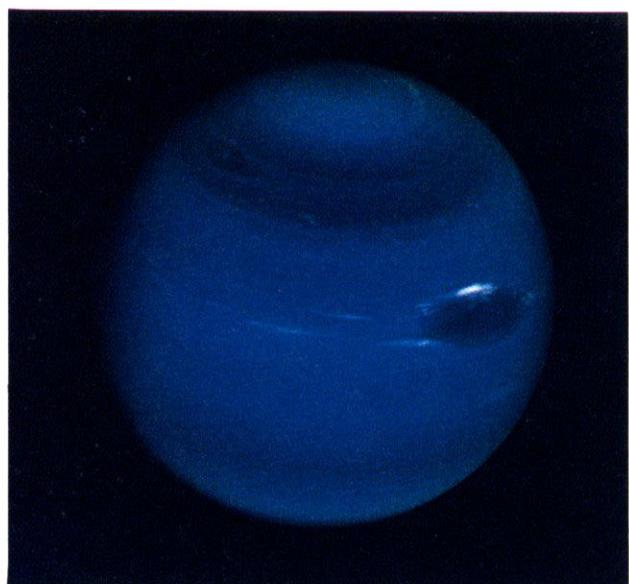
生命への肉迫

清水 幹夫

ポイジャーの海王星探査で太陽系惑星群の素顔は一通り見終わった。“The first, the best.”でこれからのが惑星探査はインパクトのあるものを重点的に狙わねばならない。観測すればするほど問題が出てくるのはいつものこと、対象はいくらでもあるといつても金がかかる計画なので、近隣サイエンス・コミュニティを説得する力が必要だ。

惑星大気に問題を絞ると、観測すればするほど判らなくなるのが、同位体異常現象である。炭素の質量数12、13原子の比が太陽地球の89から木星の160、彗星も違うという話に始まって、窒素の14、15となるとすぐ隣の月の石の値が地球と桁違い。進化や起源を論じるのによく使われる希ガスでも、地球・火星・金星のアルゴン36、40比の違いからキセノン諸同位体など、解釈は横行しても一向に決まらないし、彗星の値でも出てくると一層激論が討わされることになろう。測れればずばりインパクトというのは原始天体の有機物、特

に生命分子であろう。炭素質隕石で調べられているとはいっても、現実に、例えば彗星の破片からアミノ酸や核酸塩基が多量に検出されたとなれば迫力が違う。これに関連して白亜紀、第3紀境界での恐竜絶滅の原因論争も面白い。この頃の地層にイリジウムや煤が多量に含まれているので小惑星の衝突による天変地異説が流行したが、インドのデカン高原生成期と一致する火山からの噴出物にイリジウムが高濃度入っていることも判って決着がつかなくなった。唯一、この地層の前後にだけラセミ体のアミノ酸が多量に含まれていることが発見され、大彗星の衝突前に小惑星が幾つも降ったというこじつけもされている。火山説では説明がつかない。と言ってハレー彗星の質量分析結果の解析では、アミノ酸は無いとされている。生命分子が見つかったからといって生命の存在には遙かに遠いのだが、ロマンの好きな人は大勢いるから話題は尽きまい。



ポイジャー2号がとらえた海王星

太陽系の起源を求めて

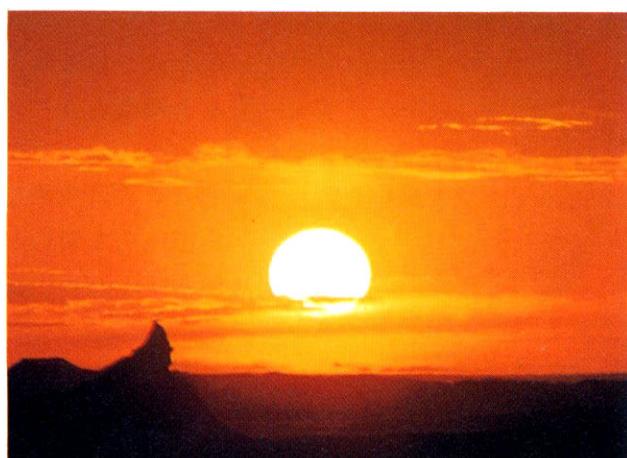
大家 寛

太陽系の起源を求める組織的な研究活動は、まず1980年から1984年まで、特定研究「太陽系の進化と惑星環境の研究」(代表者 大林辰蔵、幹事 長谷川博一、大家寛)として始まった。これは来るべき太陽系の研究の発展をめざし、それまで部分的であったり、あるいは特別な時点のみを見つめた局所的な太陽系形成のモデルにとどまつたりしていた太陽系の研究を、その基礎研究面からより一層推進しようという第一段の幕あけであった。続いて1986年～1990年にわたり、新しく重点領域研究「原始太陽系と惑星の起源」(代表者 大家寛、幹事 中沢清、水谷仁)が行われ、確かな実証的なデータに基づいた、太陽系と惑星の形成の科学を一步前進させてきた。

しかし太陽系の起源の問題は、地上に落下してくる隕石を除くと、研究に係わる新しい実証的なデータのことごとくが米、ソ両国民によって支援されたミッションに頼るのが現状である。

ここで、究めなくてはならない重要な多くの問題をもつこの分野に「我国も参加しなければならない」という主張はすでに1975年以来宇宙科学研究所のシンポジウム等でも繰返されてきたが、いまこの事の重要さを、誰も疑う人はいない。

いま我国もハレー彗星の探査を皮切りとして惑星探査へと出発することになった。そして基礎研究の進歩と並行し惑星探査の内容を充実したものにするため、永く要望されてきたM-V型ロケットの開発が始まり、いよいよ本格的な惑星探査の幕開けとなった。ここまで来る道のりをふりかえると、実は我々は過去15年間にわたりこの時を期して、将来の研究としての方向を提言して続けてき



た。たとえば1975年の月惑星シンポジウムでは、金星軌道探査体・火星軌道探査体・木星の探査計画が提起されている。どのような形にしろこの志はこれからもますます重要となると思われる。

人類に必須の科学

水谷 仁

これまで長い間人類にとって望遠鏡でかいま見るだけだった太陽系の諸天体を、手に取るように詳しく調べる事の出来る時代が到来している。かぐや姫の住むお月様にも、軍神マースの火星にも、愛と美の女神ビーナスの名をもつ金星にも、我々の作った探査機が送られる日も近い。

惑星探査機から送られて来る科学観測データはそれ自身が未知の世界の地図であり、道標であり、人々の想像力をかきたてる。しかし惑星探査機によるデータは科学者にとって何よりも、

1. 太陽系の惑星はどの様にして作られたのか、
2. 惑星はいかにして進化してきたか、
3. 現在の惑星環境は何によって支配されているか、

などを知るための、唯一の観測事実を与えてくれるものとして貴重である。

色々な惑星、衛星はどの様な物質で出来ており、どの様な構造をもっているだろうか。原始的な天体であると思われる彗星や小惑星はどの様な組成を持っているだろうか。太陽系の諸天体の材料物質は惑星が46億年前に原始太陽系星雲の中で誕生した時の状況を反映しているので、これらは太陽系の起源が書かれているロゼッタストーンと言うこともできる。この意味で惑星探査は、これまで空想と推理からのみ組み立てられていた太陽系誕生の様子を実証的に明らかにする上で、最も強力な手段を与えてくれる。

惑星探査機から送られてくる月・惑星の大気、表面地形、組成、地殻の構造などのデータはまた各々の惑星が46億年の歴史をいかに辿ってきたかも物語っている。進化の速度の異なる様々な惑星の素顔を知ることは、我々の地球の歴史を知る上でもかけがえのないものである。これはまた地球の環境の変遷・変動を支配している様々な要因を明らかにするためにも重要であり、将来の人類の生存にとっても必須の科学であろう。

「月探査」——歴史と現在の課題

我々人類にとって月ほど馴染みの深い天体はない。月をめぐる心はまた詩歌、絵画など日本の文化の様々な面に表れている。月の引力は潮の満ち干きを起こし、生物リズムの根元ともなっている。

月探査のうち最も歴史的事件は、1969年のアポロ計画による宇宙飛行士の月面着陸である。米ソの宇宙開発競争の産物である有人月面着陸は、それ以前のパイオニア、レンジャーをはじめとする数えきれないほど多数のミッションの失敗と成功の結果として達成された。1972年12月のアポロ17号まで計6回の有人月面着陸は、科学的に多くの成果をあげた。宇宙飛行士の持ち帰った月岩石は合計384kgにも達し、世界中の科学者がこの岩石の分析に取り組んだ。この分析の結果から月はそれ以前に信じられていたような始源的天体ではないことが分かった。月面に設置された地震計は微弱ながらも多数の月震を検知し、月が完全には死んだ天体ではないことを示した。

しかし国威を示すという、多分に政治的理由で始められたアポロ計画は、月の起源と進化を明らかにするという科学目的にとっては不十分だった。何よりもアポロ宇宙船の着陸した地点は月の表側（地球に面した側）のたった6ヵ所であり、月全体からすればほんの僅かな地域の岩石と地質が分かっただけである。遠隔探査による調査も、月の赤道を周回するアポロ宇宙司令船から、赤道周辺の限られた地域について行われただけであり、月の全体像を描き出すには全く不十分だった。

この意味でこれまでの数々の月ミッションはアポロ計画によるものも含めて、まだ惑星を探偵するといった程度のレベルであり、本格的な科学調

査をねらったものではなかった。これらは地球の時代に例えれば、コロンブスやマジェランが旧世界の人々に新しい世界を教えてくれた15世紀後半から16世紀にかけての大航海時代に相当するものであったと言えよう。

月の科学にとって、ビーグル号でダーウィンが行ったような調査研究の目的を持ったミッションがこれから必要になろう。表面の限られた地域の探査ではなく、月全面のグローバルな調査（例えば極周回衛星による遠隔探査）、表面だけでなく月の内部に関する探査（例えばペネトレータによる月内部構造探査）などが月の起源と進化を明らかにするためには不可欠である。将来の月ミッションはまずこの方向に視点が注がれるだろう。

月はまた地球に一番近い天体であるだけに、人類の宇宙活動領域を広げるための一里塚と見ることができる。月の科学から月の資源を利用する方向にも多くの人々の関心が向けられつつある。月には金銀や石油のような地下資源があるわけではないが、将来の核融合発電に有用なヘリウム3のような太陽風が運んできたガスが月面の土壤に吸着されて貯蔵されている。また月面の真空と低い電磁ノイズ環境も月に特有な資源と言えよう。これらの環境を利用して月の裏側に光学あるいは電波望遠鏡が設置されれば、天文学に革命的進歩をもたらすであろうと言われている。

このような資源を利用し、人間が月面上で活動する時代がいずれ来るに違いない。このような将来に備えるためにも月の科学調査、資源利用の基礎技術の修得にいま力を注がなければならない。

(水谷 仁)



1. はじめに

月を構成する物質はどのようなものであるか、月の材料物質はそもそもどのような特徴を持つ元素群であつただろうか。これが解らなければ月がどのようにして誕生したかを解明する事は出来ないと言ってよい。すなわち月の内部構造を明らかにすることは月の起源と進化を解明するための鍵である。

宇宙科学研究所が計画している月探査ミッション“LUNAR-A”はまさにこの鍵となるデータを得ようとして計画されているものである。



アポロ17号飛行士の月面活動

内部構造を知る最も直接的な方法は地震波（月震波）を使う方法である。地震波は月の内部の奥ふかくまで伝わり、内部の情報をもたらしてくれるからである。このためには月の表面に内部を伝わってきた地震波を検知するための地震計ネットワークを構築する必要がある。

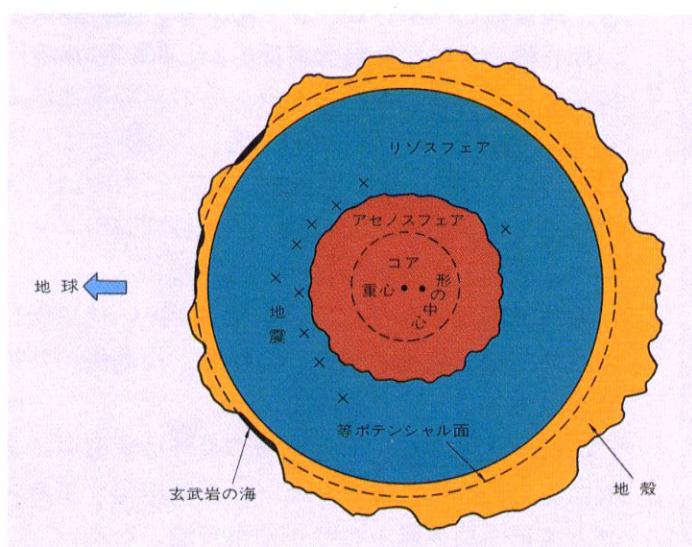
アポロ計画では宇宙飛行士が1台ずつ地震計を着陸点に設置し、表側の嵐の海を中心とする一辺約1000km程度の三角形をなす観測網を設けた。しかし宇宙飛行士の安全性を考えると、この方法で地震計観測点を極地方や月の裏側に設置するのは大変難しい。そこでペネトレータが登場する。

ペネトレータとは槍状のケースに入れられた観測機器のシステムである。これを宇宙飛行士に運んでもらわずに、月を周回する衛星から観測点にめがけて投げ下ろす。もちろんペネトレータは高速度で月面に衝突し、月の土壤の中にもぐり込む（penetrateする）。ペネトレータの名前はこの潜り込む装置であることに由来している。このよう

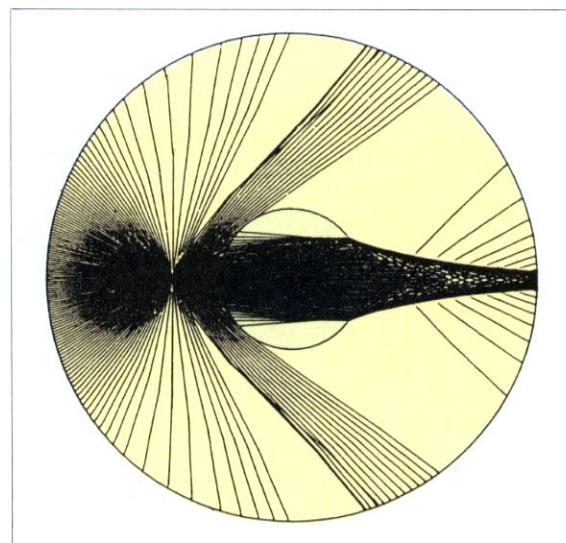
なペネトレータを使えば1回のミッションで複数の地点へ観測機器を送り込み、観測網を設置することが可能になる。LUNAR-A計画では3台のペネトレータを使う予定である。

ペネトレータ3台を搭載した衛星はまず月を周回する長楕円軌道に投入される。この楕円軌道の遠月点（月からもっとも遠い点）は月から約2万kmあるが、この遠月点に近い場所でペネトレータは衛星から切り離され月へ向かう。ペネトレータは約10時間、月の引力に引き寄せられて航行し月に接近する。高度約30kmで逆噴射モータを噴射、減速した後、ペネトレータを逆噴射モータから切り離し、月面に衝突させる。この時ペネトレータは秒速約300m、時速約1000kmで月面に衝突することになる。この勢いでペネトレータは月面の下1～3mの深さに潜り込む。月の地下は、熱伝導のきわめて悪い表層の土壤のために、月表面の大きな温度変化（昼間は+100度以上、夜間は-100度以下）にもかかわらず、一定の温度に保たれているので、観測機器の温度を制御するのに必要な温度調節装置がペネトレータでは不要になる。

このようにしてペネトレータは月の裏側、月の表側の赤道と高緯度地域の3点に設置される。ペネトレータに搭載された高感度地震計は月の内部で起きている月震を観測する。月震が各観測点にどのように伝わるかを調べれば、月内部がどのような構造をしているかが分かる。とくに月の中心に地球にあるような金属鉄からできた中心核があるかどうか、あるとするとどのくらいの大きさであるかがはっきりするであろう。半径400kmくらいの中心核が月にあれば、月の深発地震源で発生し



月の内部の構造を示す模式図



月内部における地震波の伝わり方

た地震波はこの中心核により屈折され、中心核が地震波にたいしてレンズの役割を果す(前頁下図)。普通のガラスのレンズによって光が焦点に集まるように、中心核のレンズも地震の波を月の裏側の一点に集中させ、この地域に大きな振動をもたらすことが観測されるだろう。このような観測を1年間続けることによって月の内部の様子が明らかにされて行き、月の起源の謎の解明に大きな前進がもたらされるはずである。

(水谷 仁)

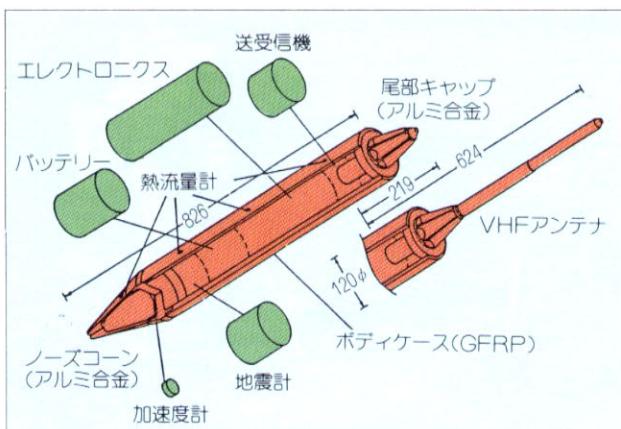
2. ペネトレータの設計と開発・試験

LUNAR-Aのペネトレータは、次頁上図のような形をしている。長さ82.6cm、最大直径12cmで重さ13kg。小さな体の中に、三方向の波を検出する地震計、熱流量計、加速度計、VHFアンテナ、送受信機、バッテリー、エレクトロニクス等を持っている(右上図)。

地震計と熱流量計が集めたデータは、内部のメモリーに蓄えておき、母船を経由してSバンドで地球へ送られる。ペネトレータの電源は最近開発されたばかりの高性能のスーパーリチウム電池である。ペネトレータのミッション寿命(1年)はこのバッテリーのためである。

月面に貫入した直後、ペネトレータの尾部に内蔵されていたVHFアンテナが、揮発性液体の蒸気圧によってピンと延ばされ、観測と通信が開始されることになる。

地震計の仕事はすでに述べたが、熱流量計の方は、月のグローバルな熱的状態を理解し、内部にウランやトリウムなどの放射能成分がどれくらい含まれているかを推定するためのキー・データを提供する。



月ペネトレータの構成

ペネトレータの貫入特性と技術的可能性を研究するため、いくつかのスケール・モデル(直径10ミリからフルスケールの120ミリまで)を使い月を模した砂の中に貫入する実験を、現在までに7回にわたって行ってきた。模擬砂は、力学的特性と粒子サイズ分布を月の土壤に似たものとした。

実験の結果、

- ・軽いGFRPのボディに科学機器を入れたペネトレータは月面模擬砂に300m/秒で射込まれ、設計とポッティングさえ注意すれば10,000Gくらいまでのショックに耐えられることが分かった。その際直径1mくらいのクレータを作り、約2mの深さまで貫入した。
 - ・鉛直から計った突入角が64度～65度よりも大きくなると、貫入しないで跳ね返ってしまった。
 - ・突入時の迎角が20度くらいあっても、無事に土壤に貫入した。
- なお引き続き実験を行う予定になっている。

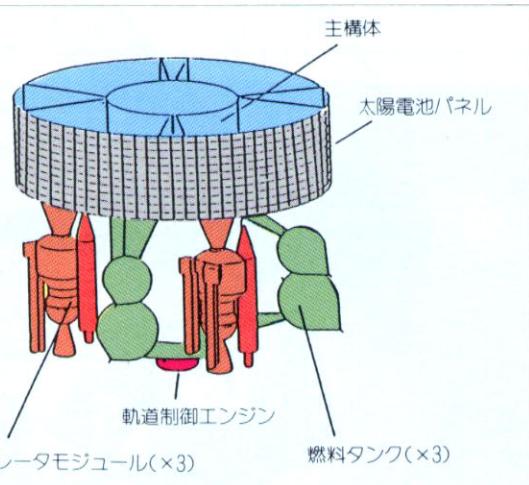
3. 探査機とペネトレータ・モジュールの概要

探査機の母船は、最大直径2.2m、高さ2mの円柱状をしており、ボディマウントの太陽電池により約150ワットの電力を供給する。スピニにより姿勢の安定を保つ。重さは約550kgで、この中には3つのペネトレータ(計200kg)と軌道制御用エンジン(二液式)の燃料約160kgを含む。

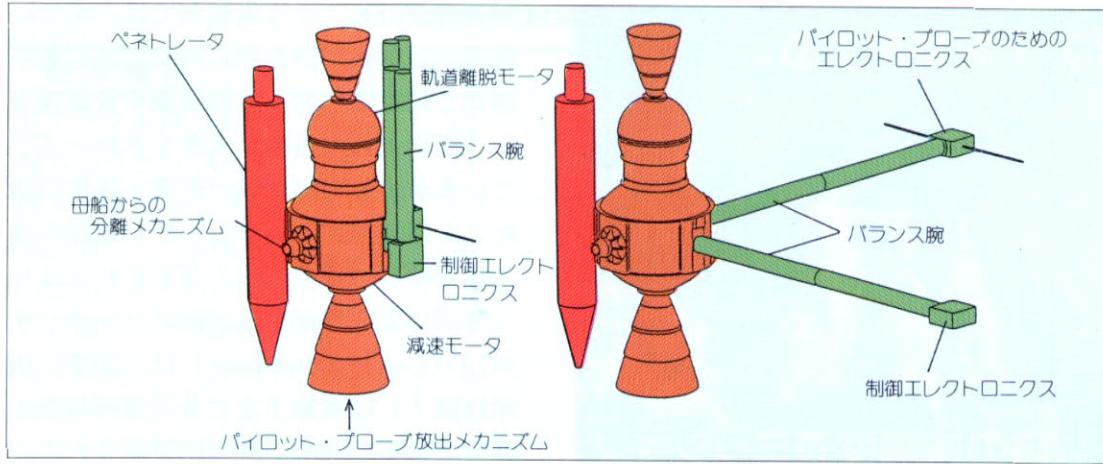
姿勢制御はヒドラジンのRCSを用い、軌道保持のために電気推進を装備している。探査機の外観を左図に示す。

巡航フェーズでは、探査機の姿勢は黄道面に垂直に保たれ、これによりカノープスを狙う星センサとスピニ型太陽センサが使用可能となる。

それぞれのペネトレータ・モジュールは、中央



LUNAR-A探査機の概観



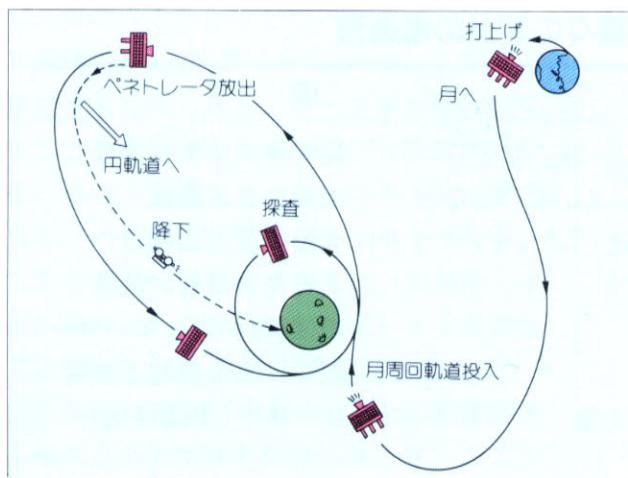
ペネトレータ・モジュールの構成

に2基の球形固体燃料モータを装着している。うち1基は軌道離脱のため、他の1基は月面衝突寸前の減速に用いられ、いずれも燃焼終了後に分離投棄される。ペネトレータ・モジュール自体は姿勢制御装置を持たず、落下中は2rpsのスピンドで安定をとる(表紙カット)。

レトロ・モータのノズル・スカート部には特殊なパイロット・プローブ(電波発信体)が収納されている。これは衝突の数時間前にペネトレータから放出されて月面に衝突するので、その電波が途絶えたタイミングを捉えて、減速モータに点火する。また各ペネトレータ・モジュールには2本のブームがペネトレータと反対側に付けられている。これは静的・動的にバランスをとり、またスピンド安定にとって大切な慣性モーメント比を改善するのに役立ち、母船から切り離される直前に腕を広げる。図にペネトレータ・モジュールの構成を示す。

4. 飛翔のシナリオ

M-V型ロケット2号機に搭載されたLUNAR-A



月ペネトレータ・ミッションのシナリオ

衛星は、ペネトレータ3基を抱えて、まず地球を周回する長楕円軌道(遠地点高度約400,000km)に投入され、月に向う。月の影に入って電力の問題が起きないよう、月到着の日取りを固定することが望ましく、そのため月に出会う前に地球を4.5周して時間を調整し、ここで二液式エンジンによって月周回の極軌道(遠月点が約20,000kmの楕円)に投入される。

遠月点に近い位置でペネトレータは母船から分離され、スピンドしながら月面に向って落下を開始する。落下には10~12時間かかるが、高度30km辺りで逆噴射モータに点火し、月面衝突の速度を300m/秒(時速約1000km)以内に抑える。突入時の迎角は鉛直から40度程度にする予定である。5000G以上の加速度で激突したペネトレータは、月面の下1~3mの深さに潜り込む。熱伝導が極めて悪い表層の土壌のために、月表面の大きな温度変化(昼間は+100°C以上、夜間は-100°C以下)にもかかわらず一定の温度に保たれており、観測機器の温度制御はペネトレータでは不要である。

ペネトレータ・モジュールを分離した母船は、再び二液式エンジンを使って軌道変更に移り、最終的には高度100km程度の円軌道とする。なお母船には、カメラを含む何らかのリモートセンシングの機器が搭載される予定である。低高度円軌道に入った母船の軌道保持には電気推進を使う。

こうして月に頭を突っ込んだペネトレータは、お尻から母船にそのデータを送り、母船は臼田の大型アンテナへそれを中継する。月の内部を覗き見る画期的なミッションは、膨らむ内外の期待を浴びながら着実に準備されつつある。

(的川泰宣)



10年前われわれが日本による独自の月探査を計画しようと目論んだ当時から、日本が得意の分野であるロボティクスを十分活用した観測器を作つて、地上の実験室と比肩できる程のデータを出せる自動（遠隔操作型）分析装置を実現したいという意識がいつも基本にあった。月ペネトレータと月極周回遠隔探査の計画は、このような観点も加わって推進されてきた。残念ながら宇宙研のみで二つの衛星をほぼ同時に実行する計画は実現する状況にはないが、月面基地をはじめとする21世紀へ向けての月／惑星探査では、月のリモートセンシングミッションは不可避のものである。そこで、今まで宇宙研で検討されてきた月極周回遠隔探査衛星の概要をもとに、これから月探査に必要な遠隔観測器とその意義について概観してみよう。

遠隔観測の主流は何といってもガンマ線・X線から電波にいたる広い波長範囲の電磁波である。電磁波は遠くから対象物が何であるかを知る最も有効な物理量であるが、何がわかるかは波長によってさまざまだ。またそれぞれの波長に対応して検出器も大きく異ってくる（下表）。

月探査における遠隔観測では、すでに月面の地殻側から試料が持ち帰られたこともあって、より詳細な地質学・岩石学的情報や資源探査の基礎という側面からの興味が大きくクローズアップされているが、月では地殻の形成・進化の過程の証拠がよく保存されていることから地球の進化の研究と深く結びついていることも忘れてはならない。

米国による月面基地計画のプレカーサーとしてのLO (Lunar Observer) は、90年代後半（1996年以降？）に実施予定で月の遠隔探査として最も有力である。LOは、92年に予定されている火星周回遠隔探査衛星を基本として月面観測用に変更された衛星で、宇宙研の月極周回遠隔探査計画とほぼ同様な性能の観測機器が搭載される予定である。宇宙研で計画していた遠隔探査衛星は、月ペネトレータとの密接な結びつきを目指して月深部の構造と初期地殻の進化にかかる全月表層物質と構造の探査を主眼としていた。そしてこれら月科学の基本問題、とくに平均化学組成や初期地殻物質の進化過程などについての問題を解決するのが目的であった（次頁上表）。

一方、LOでは、上記のような基本問題の解決ばかりでなく、月全面の詳細なマッピングに加えて月面基地建設や資源利用のための基礎調査もその目標にしている。そのため、より広い波長範囲の観測（熱赤外やマイクロ波検出器）や紫外線観測器、電場計測などが加わっている。なかでも地形探査や位置制御のための可視域の画像取得システム（LOIS:Lunar Observer Imaging System、重量36kg、電力60W、データ量300kbps）が中心的観測器として加わっている。これによって、月全体の形や位置制御のためのデジタル・データベースを得ようとしている。またLOISでは、局所

固体惑星探査に寄与する種々の波長の電磁波

電磁波	探査項目	備考
ガンマ線	元素組成 (H, U, Th, K, Fe, Mg, など)	放射性同位体の壊変
X線	元素組成 (Fe, Mg, Si, Ca, Al, K, Na など)	太陽による励起
紫外線	ガス分子組成、他の微量成分 (Ti ³⁺ , Cr ³⁺ など)	太陽による励起
可視・近赤外線	岩石・鉱物種の区別・分布	太陽光の反射／吸収
可視・近赤外線	地形・高度・測距	画像(カメラ), レーザー
赤外・遠赤外線	熱放射、温度、鉱物種	太陽による励起と放射
マイクロ波	通信、微細地形、粒度、熱流量	レーダー(多波長化)
長・短波	通信	

月の遠隔探査衛星の観測器

観測機器	重量kg	電力W	瞬間転送レートbps
反射スペクトル VIRM	22	19	22K
X線スペクトル XRS	15	16	0.8K
γ線スペクトル GRS	10	10	3K
高度計測 ALT	10	10	80
重力計測 GRAV	2	5	TBD
磁力計測 MAG	9.2	2	390
微粒子計測 DUST	3	1	10
冷却器	6	80	—
合計	77.2	143	~26K

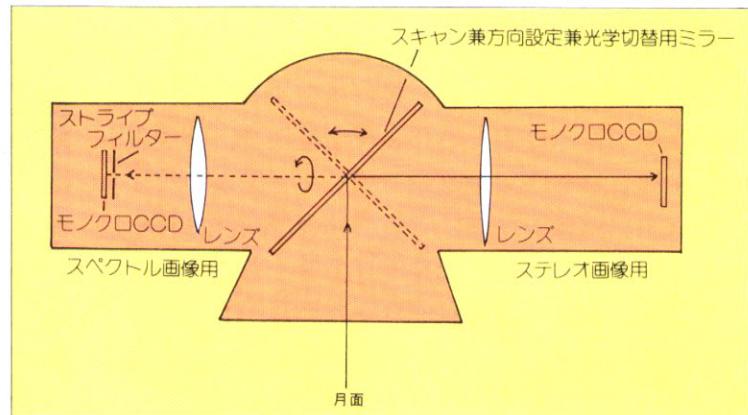
的には0.9m／画素の空間分解能で10ヵ所（各々10×10km），月全面では15m／画素の地形データが得られる予定である。したがって、月ペネトレータ計画とLO計画がうまく整合し協力してデータの取得や解析を行えるように、十分な情報交換がなされねばならない。しかし、LO計画は日本初の月探査であるペネトレータ計画と同時に実施される可能性が少なくなった。たとえ整合的に行われても、月面の撮像といった必要最小限の遠隔観測は自前で実施する必要があるのではなかろうか。

ここでは、長橋円軌道の月極周回衛星となるペネトレータの母船に、LOのLOISのデータを補完する程度には科学的意義のあるステレオカメラ（／反射スペクトル装置）を搭載する可能性について述べてみよう。この母船はペネトレータと地球との間のデータ通信の仲介を主目的としているが、光学航法のための軽量な光学撮像装置を搭載しようと検討がなされている。地質学的観点からみると高分解のステレオ画像が得られれば、LOのデータが手に入るようになった後にも十分価値あるデータとなるはずである。SIM (Stereo Image Mapper) と名付けたこの装置は、モノクロ画像で5m／画素（高度100km）の空間分解能をもたらせられる。データ量が膨大になることを不問にすれば、この分解能で月全面の撮像も可能であるし、ペネトレータの着地点の判別も可能性がありそうである。しかも重量は概算で3～5kg（記録部、宇宙仕様のための重量増を無視）と大変軽量である。さらに、大きな重量増加なしに0.3～1.0μmの範囲の反射スペクトル画像装置も組み込んだ概略を右図に示した。ここでは、母船がスピニット衛星と考えて、スピニット軸

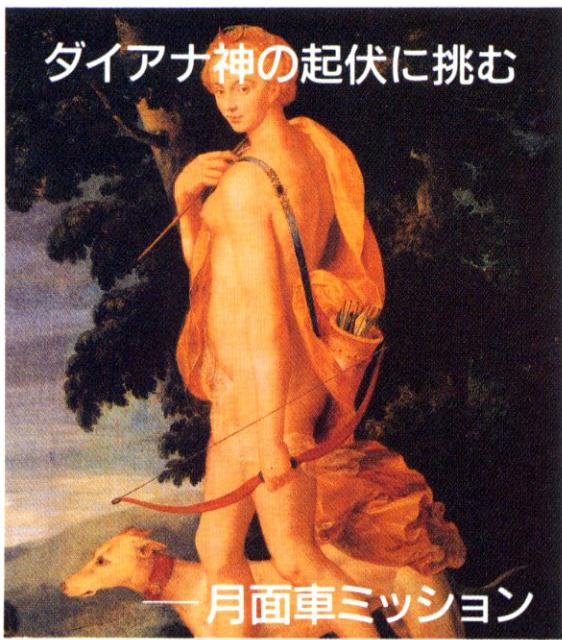
を紙面に垂直、衛星の進行方向と月面方向の面内をカメラの光軸が回転すると考えている。ストライプフィルタを用いて、64チャネル程度の分散ができれば、玄武岩質溶岩中のTi³⁺やCr³⁺の違いによる分類まで可能となるはずである。

話をもとにもどそう。月のリモートセンシングにおいては、LOが実現したあとの段階では何がなされるべきであろうか。長期的な月探査計画としては、月面移動観測車による試料の直接分析や月面基地、資源探査などが予想されている。移動観測車に搭載して最も興味のあるのは質量分析器であろう。試料をもち帰らなくてもK-ArやRb-Srの同位体比が測定できれば理想的である。しかし、その前になされるべき遠隔観測は、高度計と孫衛星重力計による月の海や陸での地殻構造（重力異常）探査ではないだろうか。この目的では、月ペネトレータによる3台程の地震計では全く不十分である。相当数の群列地震計によってのみ重力異常探査をしのぐことができるだろう。しかし、このような探査は21世紀のいつ頃実現に向かうのであろうか。むしろ月面基地計画の実施後である確率が高いだろう。

(藤井直之)



月周回衛星用ステレオカメラ/反射スペクトル装置の概略



月・惑星探査を行うための最も基本的な技術の一つに、軟着陸と月・惑星表面の移動技術がある。早い時期にこの基本技術を確立することを目標に、M-V型ロケットを用いた工学ミッションとして月面車が提案され研究が進められている。以下にそのケーススタディの例を紹介しよう。

1. ミッションプロファイル

M-V型ロケットにより月移行軌道に600kg強の探査機が打上げられる。移行軌道は遠地点高度50万kmの長楕円で、地球を4.5周、約70日後に月と会合する。この間、3軸姿勢制御により太陽電池パドルを太陽方向に向け、電力を確保する。大きな特徴は、月面車そのものが探査機を兼ねることで、これにより構体、センサ、電源、計算機等の共用化が可能で、軽量化を図ることができる。

2液式の主推進系を用いて半径 $1.2R_M$ (R_M は月半径=1738km)の円軌道を経て、高度50kmの月周回軌道に入る。周回軌道上では、CCDカメラを用いて、着陸予定地点を中心に詳細な月面の写真を撮影する。視野 20° のカメラを用いて、分解能35mの写真を得て着陸目標点の最終選定を行う。

50km軌道は不安定なため長居は無用で、3周程度で着陸に移る。主推進系でブレーキをかけながら、次第に機軸を月面に垂直に向けて着陸に移る。センサは、ジャイロと加速度計よりなる慣性航法装置(INS)および電波高度計を用いる。また着陸直前に障害物を見出した時には、ホバリングをして着地点を微調整する必要があり、このためカメラの画像データを用いる。最終の軟着陸は、高度

5mで推力を止め、自由落下により約4m/sの速度で行う。この自由落下は、センサの誤差および制御系の遅れ等を吸収するために必要である。

米国のアポロ計画やソビエトのルノホート計画等が重点的に探査を行ったのが、赤道近辺であったことから、我々の月面車による探査は、70°程度の高緯度地方を狙う。月面でのミッション期間は2週間とし、着陸点を夜明けに選ぶことにより、ミッション期間全体を通して日照の条件を満足することができる。それに続く2週間の夜を生き延びるために低温に耐える装備を必要とし、余分な重量を食うためこの条件が重要となる。月面車の重量は着陸した時点で208kg、飛行時に用いた推進系を除いたペイロード部分は128kgとなる。

月面車は時速1kmの速度で移動し、月面のカラーモード画像をリアルタイムで地上に送る。また簡易アームで土壌を採取して分析を行う。

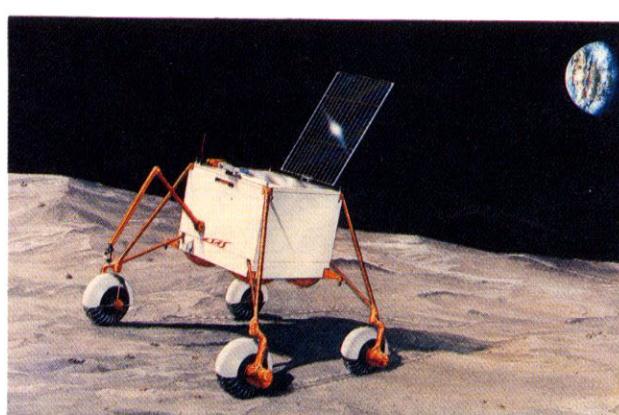
電力は、太陽電池パドルを1軸回りに回転して太陽を追いかけることにより得る。走行時には、一部不足する電力をバッテリから得るため、3時間走行したら2時間停止してバッテリの充電を行うと共に、方位の確認や科学観測を行う。操縦は地球からのリモートコントロールによる。地上の運転者は、CCDカメラにより得られる動画像を見ながら、ジョイスティックで運転を行う。但し往復2.6秒の時間遅れがあるため注意を要する。

またレーザレーダーを用いた自律走行の実験も行う。障害物を判別し緊急に自動停止するのも、レーザレーダー情報をコンピュータ処理して行う。

科学観測は、次のような項目を実施する。

(1)映像による地質調査：地形・岩石片の分布、クレータ地形等を観測し、岩石片のクローズアップ写真によるサイズ、形状の観察等を行う。

(2)簡易な土壌サンプル用のアームを用い月面車



月面車想像図

の前方1.2mの資料を採取し、これを車内に取り込む。その後蛍光X線スペクトロメータおよび α 線後方散乱スペクトロメータにより成分を分析する。アームを伸ばしてサンプリングを行うのは、月面車近くは月面車自身から出る微量物質により汚染される心配があるためである。

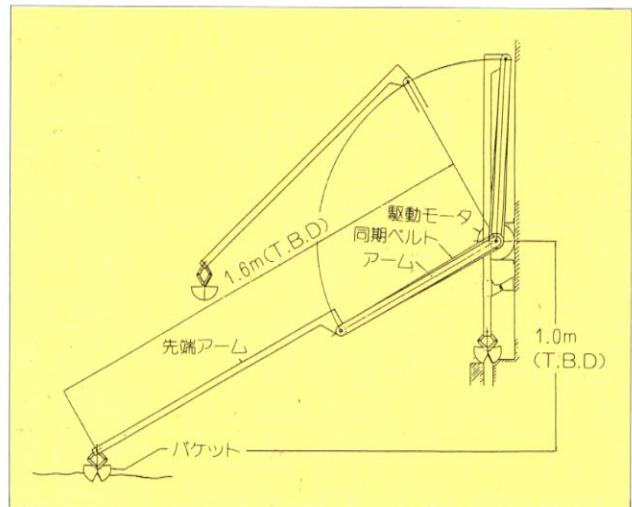
以上述べた観測は、月面車が14日間の寿命期間中、10km四方程度を移動する間に何回も実施する。

2. 新しい技術への挑戦

この月面車には新しい技術の開発が必要となるが、いずれも月・惑星にミッションを展開するに必要な技術である。そのいくつかを紹介しよう。

(1)AI技術：電波の伝ばんに時間のかかる惑星に地球からコマンドを送るのでは間に合わない場合、現場でAI（人工知能）により判断を下す必要がある。月面車ミッションでは、軟着陸のとき、画像データを処理して瞬時に障害物を判断して適切な場所に移動したり、月面車の走行中、3次元の地図をカメラ情報から作成してルート選定をしたり

(2)画像データ圧縮技術：月面車に高利得のパラボラアンテナを搭載し、常に地球方向を追尾させると重量的に不利となる。通信系にはSバンド中・低利得アンテナを用い、白田局との間に64kbpsの回線を実現する。カラー動画像、約40Mbpsをこの回線に載せるには、特殊な符号化方式周波数上



サンプル収集機構の概略

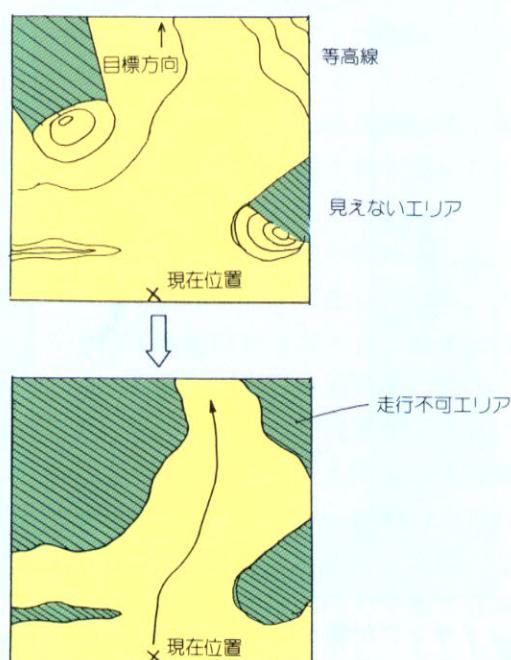
および時間上の冗長性を除く必要がある。現在、地上のテレビ電話を対象に開発が進められている画像データの圧縮を更に発展させ、小型・軽量の宇宙用の画像データ処理装置を開発する。

(3)搭載機器小型軽量化技術：月・惑星ミッションでは、搭載機器の軽量化が極めて重要な共通技術となる。既に検討が進められている実装設計のほか、回路設計、部品の開発、構造設計等、新しい技術の導入が必要となる。月面車ミッションでは、これらの開発、評価も一つの技術要素となる。

(4)月面車走行系：次のような基本性能を満すことを前提とした。①最大登はん傾斜角は 20° とした。これにより、月面の約80%の地域がカバーできる。4輪独立駆動とし、駆動装置1個の不具合に対して対応可能な冗長性を備える。②最大 40° の傾斜地でも転倒しないように車輪を展開して、M-Vのノーズフェアリングからくる制約を越えた車輪間隔2mを確保する構造とする。③走行方式には、車輪、キャタピラ、歩行脚その他様々な案があるが、軽量化、消費電力、信頼性等の観点から平凡ではあるが4つの車輪を採用する。約4m/sで着陸するときの衝撃吸収も、車輪とサスペンションで行う。高さ20cmの障害物を乗り越えることを想定し、直径60cmの軽量ワイヤメッシュ構造の車輪とする。

【打上げ条件】月面上での14日間が日照であること、その間、地球の方を向いていること及び月周回軌道が全日照であること等が主な打上げの制約条件である。打上げのウインドウは、毎年、夏期・冬期とも2週間程度は確保できる。

(中谷一郎)



- ① 地図を走行可能／不可エリアに2値化する。
- ② 走行可能エリアの中央を通るように走行経路を生成する。

ルート生成のアルゴリズム



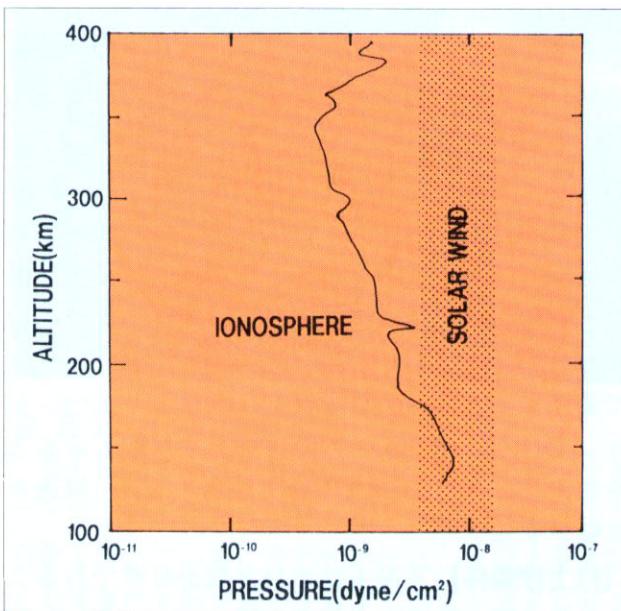
火星は古くから人々に親しまれてきたお隣の惑星である。タコに似た火星人が想像されたり、運河の張り巡らされた都市が想像された夢の時代は過去のものとなつたが、想像上の火星人が呼吸していたであろう大気、特にその上層部についてはまだ想像の域を出ない謎の部分が多い。いままで、火星の表面、とくに生命の探索に重点を置いて探査が進められてきたこともその一因であろう。上層部の大気の直接観測としては十数年前のヴァイキング1、2号による二例の観測があるだけの時代が長く続いている。最近になってソ連のフォボス1、2号が探査を試みたが、軌道が850kmと高かった事、短命に終わった事もあって充分の探査

を行うことは出来なかつた。近く、1992年に米国がマース・オブザーバー(MO)を、1994年にはソ連がMars94を火星に送る計画を持っている。近い将来には、火星についての知識も今よりは格段に増えるものと考えられる。しかし、MOは上層大気の観測を主目的としておらず、また、Mars94も軌道の制約があつて、これから述べる問題の解決に十分の情報源とはなりそうにない。「出番」ありと云うわけである。

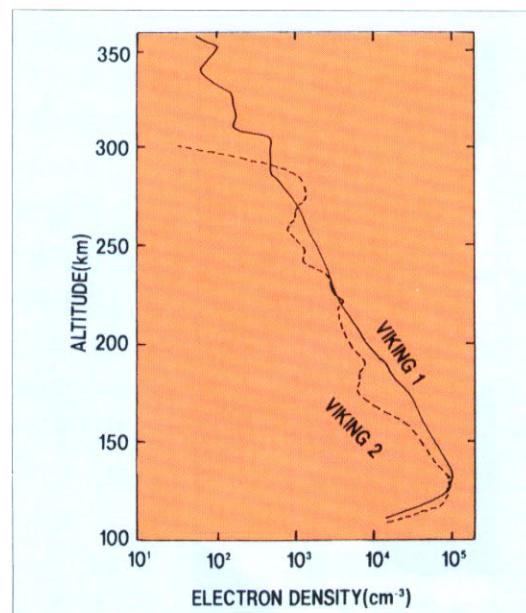
1. 火星の環境と謎

火星の大気は金星同様、主に炭酸ガスから出来ておひ、窒素と酸素からなる地球の大気とは大きな違いがある。火星の大気の量は大変少なく地球の約百分の一、地表近くでも地球で云えば丁度ジャンボ旅客機が飛んでいる成層圏あたりの気圧である。ついでながら、金星の大気は大変濃密で、地球の百倍、金星表面の気圧は千メートルの海底の圧力に相当する。金星と火星の地表面近くの気圧には一万倍もの違いがあることになる。この大きな違いにも関わらず大気の上層部についてみるとこの二つの惑星には共通点が多い。

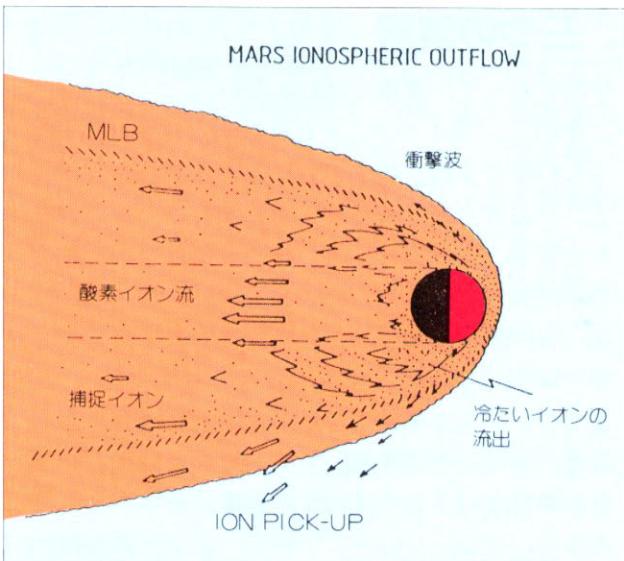
共通点の一つ、太陽系の惑星の中でこの二つの惑星だけが固有の磁場を殆ど持っていない。磁場のあり無しが大気の変遷にどの様な影響を与えるかということを云々するのはまだ時期尚早である



火星電離層の圧力と太陽風動圧の比較。
ヴァイキングによる観測結果と太陽風の観測を併せて書き直したもの。横軸は圧力、縦軸は火星表面からの高度である。太陽風圧力が最低の場合でも圧力平衡となる高度は160kmあたりである。



ヴァイキングが測った火星電離層の電子密度。
横軸は密度、縦軸は高度、ヴァイキング1号の測定は実線、2号は点線で示してある。1号の場合は350km以上まで、2号の場合は300kmあたりまで比較的スムーズにのびている。



ルンディン氏が描いた火星周辺の想像図
ソ連のフォボス2号による観測をもとにしている。

が、少なくとも上層部の大気には大きな影響が出てくるはずである。

太陽からは太陽風の名で知られている高速のプラズマの風が吹き出している。太陽系の中のどの惑星もこの太陽風に吹き晒されているわけであるが、惑星が磁場を持っているかどうかで太陽風の受け止め方は大きく異なる。地球のように強い固有磁場があると太陽風は磁場の壁に遮られて大気の層まで到達することはない。地球の場合十万キロメートルの彼方で太陽風の侵入が食い止められている。ところが、金星や火星の場合には大気の上層部が直接太陽風と接することになる。金星を周回したパイオニア・ヴィーナス・オービター(PVO)の大きな成果の一つは太陽風と金星上層大気との相互作用の研究という道を切り開いたことにある。

火星や金星の上層大気は太陽の紫外線によって電離され、いわゆる電離層を形成している。太陽風のプラズマと電離層のプラズマとは簡単には混ざり合うことが出来ないので、太陽風の動圧と電離層の圧力が釣り合うところで境界が出来ることが考えられる。その境界を境に太陽風は太陽風で勝手に後方へ流れ、電離層は少し押しつぶされた恰好で独立な領域を維持するだろう。実際、金星ではしばしば太陽風と電離層の圧力平衡で説明のつく構造が観測されている。しかし、もしも電離層の圧力の方が太陽風の動圧よりずっと小さかったらどうなるのであろうか。実際、ヴァイキングで測った火星の電離層の圧力と太陽風の動圧を比

較してみると、前頁左図に示すように太陽風の動圧の方が電離層の圧力より圧倒的に高いことがわかる。太陽風が火星の電離層をずっと低い高度まで押しさげているのであろうか。ヴァイキングによる観測はたった二例で、測定点も真昼側ではないので決定的な観測データとはいひ難いが前頁に示したデータからはそのような兆候が見受けられない。いったい何が太陽風の動圧を支えているのであろうか。

この問題の一つの解決案として、実は火星にも弱いながら固有の磁場があるのでないかという考えがある。地球の千分の一程度の磁場があれば上に述べた圧力バランスの問題は解決する。地球の場合は殆ど大気の無いところで地球の磁場と太陽風がせめぎあいをやっている。金星の場合には大気が直接太陽風とせめぎあいをしている。これに対し、もし、火星に磁場があれば、磁場と大気の協力で太陽風に対処するという新しいせめぎあいの形を見ることになる。1992年に地球を飛び立つ予定のMO(マースオブザーバー)が火星の磁場に対しては回答をもたらすことが期待されている。Yesの回答の場合には新しい相互作用、Noの回答の場合にはさきに述べた矛盾と、いずれにしろ、火星の上層大気と太陽風の相互作用には大きな問題点が残されることになる。

火星の夜側には太陽風の磁場からなる尾が形成されているものと考えられていた。ソ連のフォボス2号は短い寿命の内に何度か火星の尾の部分を観測することが出来た。その結果、それまで誰も想像すらしていなかった現象を見いだした。それは火星の大気起源と考えられる酸素イオンがビーム状になって大量に飛び去っているというものである。何故ビーム状に酸素イオンが加速されて逃げ出すのかということも大きな問題であるが、逃げだしている酸素の量そのものも馬鹿にならないことが解った。大ざっぱな算定で毎秒1kg弱、現在火星の大気中の炭酸ガスに含まれる全ての酸素が1億年程度で失われてしまう程である。酸素イオンの散逸の機構の解明とこれが火星大気の変遷にどう影響しているかが今後の問題として提起されたことになる。フォボス2号にプラズマ計測器を搭載して酸素イオンビームの発見をしたスウェーデンのルンディン氏は火星の周辺の想像図として上図を示している。

ソーラーセイル、三つの誤解

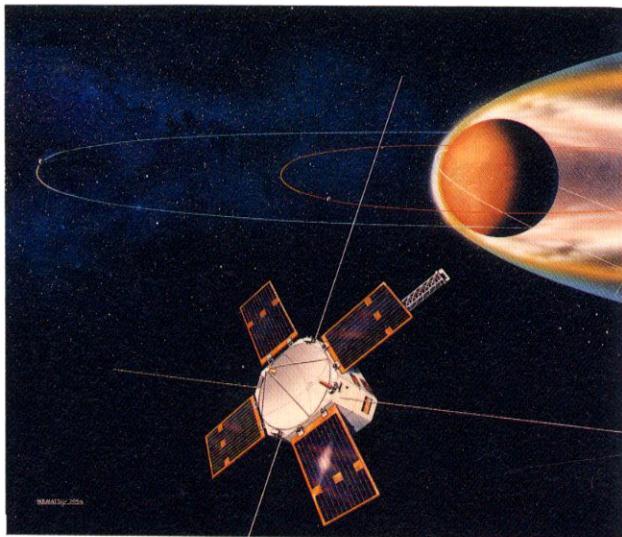
その一。「ソーラーセイルは、太陽風を帆にうけて走る」この張本人が、SFの大作家アーサー・シークラークだからなお始末が悪い。彼の名著であり、現在のソーラーセイル熱烈信奉者のほとんどがその洗礼をうけた“THE WIND FROM THE SUN”は、翻訳でも「太陽からの嵐」だ。正しくは、ソーラーセイルは太陽光の圧力を鏡の帆にうけて走り、太陽風の影響はそれより3～4桁位小さい。察するに“THE PHOTONIC PRESSURE FROM THE SUN”では、文学にはならないからだろう。

その二。「ソーラーセイルで宇宙をのんびりと散歩するなんて良いですね」この言葉の陰には、大航海時代の帆船のイメージが見えかくれする。つまり、のろい、古典的、蒸気船に負ける、置物などなど。とんでもない、ソーラーセイルの速度は、さきがけ・すいせいクラスになり、さらに加速できる。燃料はふんだんに太陽からタダで補給されるから、惑星空間をあっちこっち気の向くままに渡り歩ける自由さでは、ボイジャーの比ではない。またさらに進歩すると、惑星空間に停止したり、直進することもできる。これは超モダンな宇宙船

なのであって、置物にはむかない。

その三。「月レース、それは壮大なロマン、すばらしい夢ですね」相手の目にはかすかな微笑が見え、いんぎんにそしてまったく無礼に、その夢をたたえる。本当にもーっ。今や夢ではない、現実のミッションなのだ。わがSOLAR SAIL UNION OF JAPAN (SSUJ) は、フランスのU3P、アメリカのWSFと、太陽光推進の技術の実現のため、月までのレースを準備している。レースのルールの策定、ロケットの手配、レース艇の設計などなど、夢が夢でないことを証明する作業に夢中の日々である。

(三浦公亮)



2. ミッションの構成

現在検討中の火星探査計画はこれまで述べてきた火星上層大気と太陽風の相互作用の研究に主な目標を置いている。そのためには、火星上層大気と太陽風のせめぎあいが起きていると考えられる昼間側の電離層での直接観測と、酸素イオンビームの流出に代表される夜側の尾の部分での観測を行う必要がある。考えられている軌道は長楕円軌道で近火点を空力条件が許す限り低くとり遠火点を火星半径の10倍程度にしたものである。この軌

道により太陽風と直接相互作用をしている昼間側の電離層の構造と夜側に引き延ばされた尾の部分の観測が効果的に行えるはずである。

次の問題はM-Vロケットの打ち上げ能力の範囲で観測装置をこの軌道に持って行くことが出来るであろうかということであろう。火星の軌道では太陽光の強度が弱く大きな太陽電池パドルが必要とするだろう。また、通信用のアンテナも大きなものが必要である。まともに設計すると、とても観測装置を搭載する余裕が出てきそうにない。工学の関係者による検討の結果、すばらしい解決策が見つかった。ポイントは火星からみた地球と太陽の離角が45°以内であるということを積極的に利用したところにある。通信用の大型アンテナを地球に向け太陽電池パドルを太陽に向けるという制御を止めてしまい、双方を共に地球に向けてしまおうというわけである。太陽電池の発生電力は最悪30%程損をするもののアンテナの駆動装置を省くことでミッションとして成立する搭載能力を確保している。探査機の概念図を左に示してある。金星でPVOが果たした先駆的な役割を火星で果たすのが今回の火星探査計画の狙いである。

(鶴田浩一郎)



1. 大気に覆われた金星探査のためには

金星は濃い大気を持っていて高度40km付近から二酸化炭素や硫酸の厚い雲に覆われているため、金星の地表は外から可視光領域で観測する事はできない。過去に14個のランダーが金星に投入されているが、観測時間は数十分にすぎない。現在、アメリカのマゼランがマイクロ波合成開口レーダによるリモートセンシング地表観測を行っているが、今後ますます地表や低高度大気のその場直接観測が必要となってくる。

このように金星探査では、大気と関わる工学技術を駆使していく必要があり、新しい工学技術の開発によってはじめて未知の金星表面への探査が可能になってくる。このような理由から金星エアロキャプチャ／バルーン計画は、工学技術の開発・実証に大きな比重がかけられた次期工学衛星計画の一つとして1997年打上げを狙って提案されている。そのミッションの目的は、惑星大気を利用した工学技術の開発と、これによる金星探査である。具体的には、バルーン観測、エアロキャプチャー、プラズマ観測の3つの要素から成っている。

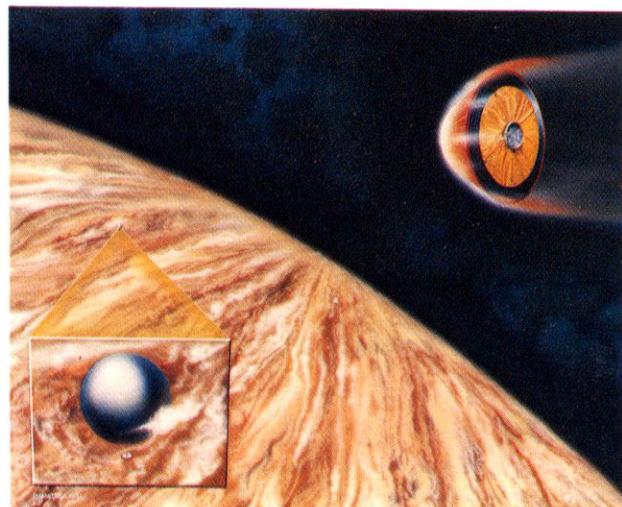
- 1) バルーン：金星大気突入後、気球を低高度(約20km)に浮遊させて金星大気の運動や微量成分の測定を行う。
- 2) エアロキャプチャ：金星大気による空気力学的な減速を利用して、惑星間の双曲線軌道から金星周回の橿円軌道に投入するエアロキャプチャ実験を行う。推進系を省略できることによってペイロード比の改善を図る。
- 3) プラズマ観測：エアロキャプチャによって金星周回軌道に投入されたオービタを用いて、金星周辺の電離層プラズマの観測を行う。

2. ミッションシナリオ

探査機は、エアロキャプチャによって金星周回軌道に投入されプラズマ計測をするオービタと、金星大気に突入して気球ミッションを行うバルーンプローブの二つから構成されている。どちらも、金星大気圏に突入する際の過酷な空力加熱によって三千度にも熱せられるため、かぶとのような円錐状の熱防御層に覆われている。

1997年秋、M-V型で地球から打上げられる探査機は、惑星間空間を下図のように熱防御層をかさのよう差し上げた状態で飛行する。これは太陽電池と地球との通信アンテナを露出させるために必要である。熱防御層のために機械式デスパンアンテナが使えないでの、三軸姿勢安定方式をとる。約5ヵ月間の飛行の後、1998年3月に探査機は金星に接近する。金星到着約10日前にバルーンプローブはオービタから分離され、その後飛行を続けて、10日後に金星大気に突入して、高度20kmに気球を浮遊させる。一方、オービタは軌道修正の後、やはり10日後に金星の高度150km付近の大気に熱防御層をかぶった状態で突入する。そして適切な空気制動力を受けて減速された結果、金星の周回軌道に投入される。熱防御層のかさを切り離して身軽になったオービタは、近金点付近を中心にして、金星の電離層プラズマの観測に専念する。

このミッションでは、空力加熱の算出と熱防御層技術が重要になる。炭酸ガスを主成分とする金星大気中の高マッハ数の空力加熱の算出には、計算機シミュレーションやアーク風洞での実験が必要であるし、アポロ計画で使用された燃えながら炭化層を形成して熱の流入を防ぐアブレータ材



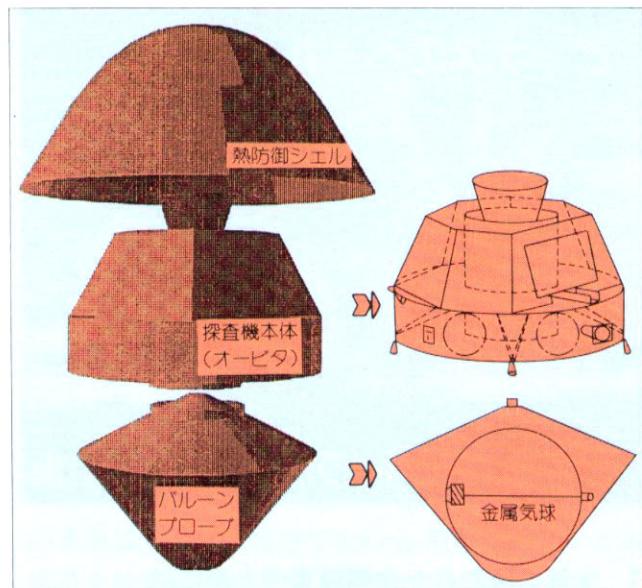
を用いた熱防御層の軽量化も重要課題である。

周回軌道に投入されたオービタによる電離層観測では、地球とは対象的な磁気を持たない惑星の電離層の解明がテーマである。磁気圏がないため、金星表面から放出されてできている大気層に太陽風が直接吹き込んでいる。この構造を、粒子観測、磁場観測によって解明していく予定である。本特集にもある理学ミッションとしての火星探査計画と対をなしているものである。

3. 300度の金星大気

下図に示すように金星大気は高度50kmでは常温常圧で、既に1985年にソ連のベガが赤道域に気球を浮かべて、金星の大気循環の様子が超長基線干渉計測(VLBI)で観測されている。そこで、高度50kmの未だ未知の極域で気球観測をするという案もある。しかし更に興味深いのは、大気循環の最も盛んな地表近くの高度20kmの全く未知の領域の探査である。この高度20kmの大気は、温度摂氏300度、気圧20気圧という灼熱地獄である。

高度20kmのバルーンは、直徑80cm程度のチタン薄肉球に常温で10気圧ほどのヘリウムガスをつめ



金星探査機の構成

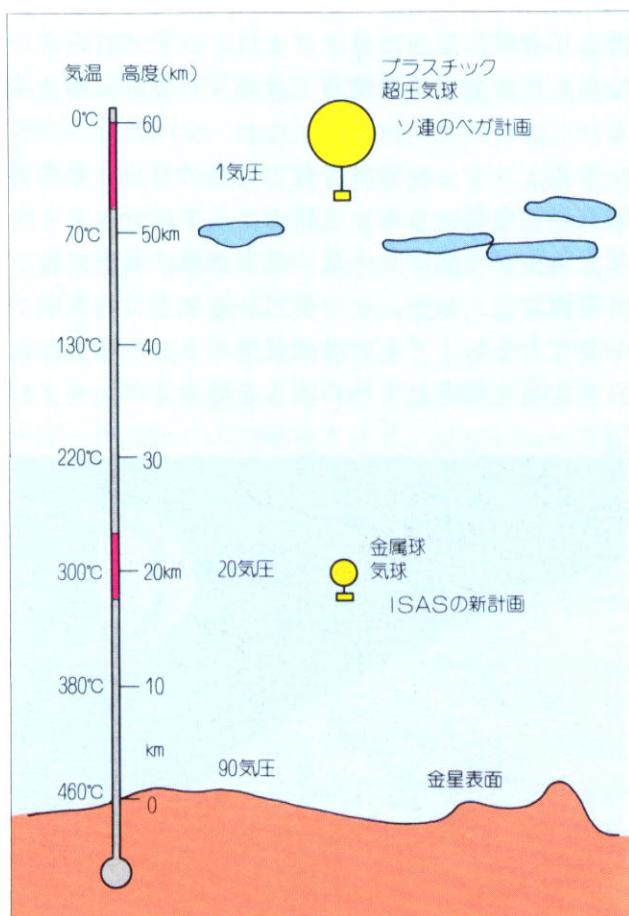
たものが新たに提案された。この技術開発も興味あるものである。

次の問題は電子機器の耐熱問題である。さいわいNaS電池という高温でしか作動しない電池が開発されているが、通信テレメトリー用の送信機が難題である。どうも現在のSi半導体を駆使したエレクトロニクス系を冷却して使用せざるを得ないようである。冷却方式としては、断熱層の中にエレクトロニクスを入れ、数100gのアンモニアの蒸発熱を用いて、約10日間冷却するという案が提案されている。

4. 近点の高度制御

エアロキャプチャの減速量は大気密度に比例する。惑星の大気密度は、統計力学の教えるボルツマン分布に従ってほぼ指数関数的に高度とともに急激に減少する。この計画ではオービタは大気突入後には軌道制御はできないので、金星大気突入時の高度を2km程度の精度で制御しないと、オービタは金星表面に衝突するか燃えつきるか、あるいは逆に金星の周回軌道に入らずに再び離れててしまう。2kmの精度の軌道制御というと、ボイジャー計画のスイングバイ飛行と同程度のものであり、光学カメラによる航法が必要になる。

金星の大気密度の絶対値にも不確定さはあるし、オービタ機体形状に依存する空力制動量の大きさ(空力抵抗係数 C_D)にも誤差はある。オービタとバルーンプローブの機体形状を相似にとり、バルーンプローブを先に大気に突入させてその経験す



金星大気の環境

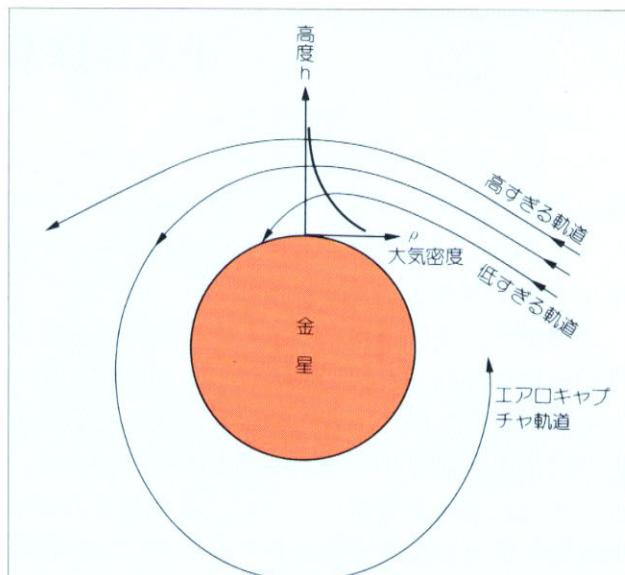
る加速度を知る事により、この不確定な大気密度と空力係数（の積）を正しく推定できるはずである。これを用いてオービタに最終軌道修正を施せば、エアロキャプチャの軌道制御はより確実になる。

5. おわりに

以上のようにこのミッションは、気球、空力、熱、軌道決定、電子機器等の広い力を結集して初めて成功するミッションである。

その成果のエアロキャプチャも金星の高度20kmの気球も理学、工学的にも意義ある世界最初の快挙となるはずで、90年代の宇宙研が挑戦する一つのテーマミッションであると信じている。

（齊藤宏文）



エアロキャプチャの軌道

地球の双子星“金星”の謎

金星は太陽系の惑星の中で最も地球に似た天体である。質量は地球の約80%，半径、密度はわずかに小さいだけである。生まれた場所も形成進化過程もよく似ていたと考えられ、金星は地球とほぼ同じ化学組成を持ち、その大局的な内部構造は大きくは違わないだろうと予想されている。

しかし、金星の磁場は地球の核に起因する磁場に比べてきわめて弱い。慣性能率から中心部に質量が集中していることはわかっているが、地球のような鉄の中心核があることが確認されたわけではない。また、金星は地球より太陽に近く、受け取る放射エネルギーは大きいに、厚い二酸化炭素大気の温室効果によって表面温度は470℃という高温になっている。このため金星表面には地球のような海洋は存在していない。地表での高温無水状態は岩石の力学的性質を大きく変え、地球

のプレートテクトニクスとは別の金星独自のテクトニクスが発達している可能性がある。

金星にも地殻にしわをよせてできる巨大山脈や地球の大西洋をはさむ南米とアフリカの海岸線のように重ね合わせられる地域が見つかっている。これらは金星表面が水平方向に運動した証拠と考えられている。探査機マゼランによって昨年の夏から集められている詳しい地形データの解析は、金星地形に関する新たな知見を与えてくれるとともに、これらの地形が地球と似た過程で形成されたかどうかを明らかにすると期待される。

地球の双子星と言われる金星が、どのようにして地球とまったく異なる側面を持つようになったのか。この疑問を解決することは、金星や地球の進化のみならず太陽系の起源に大きく迫ることになるだろう。

（早川雅彦）

探査機マゼランがとらえた金星の姿
(レーダのデータをコンピュータ処理したもの)

小天体探査の科学的意義

小天体は次の二点で独自性をもつ：

(1)一般の惑星と比べて、小天体では形成時の状態が比較的よく保たれている。いわば太陽系の化石天体であり、太陽系の起源を研究するうえで貴重な天体である。

(2)数が多く多様性に富む。したがって、たとえ外国が探査を行った後においても、独自性を出すことができると同時に、その探査は大きな意味をもつ。また外国との相補的な協力が可能である。ここでは小惑星と彗星について、その探査の科学的意義を簡単に論じてみたい。

小惑星は太陽系初期における大規模な衝突破壊で生じた破片天体であると考えられている。その破片の一部は隕石として現在でも地球に降ってきていている。隕石は現在の太陽系起源論の基礎データである。わが国は隕石研究の先進国である。そして南極隕石のおかげで研究はさらに発展しつつある。しかしあれわれが手にしている隕石は本当に小惑星を代表したサンプルであるのかは大いに疑問である。種々の隕石と小惑星のタイプとの関係の確立はぜひ行われねばならない。小惑星探査はこれまで蓄積してきた隕石研究の成果の真の意味を明らかにするうえで決定的な役割を演じるだろう。小惑星はまだ探査の手が及んでいない天体である。基本的なデータ、例えば形、大きさ、質量

が決定できるだけでも、小惑星形成についての大きな手掛かりが得られるだろうことは言うまでもない。

一方、彗星は揮発性成分（種々の氷）に富む始源天体である。ハレー彗星以後の段階では、サンプルの持ち帰りが大きな目標となる。地上の実験室内での分析は現在の彗星科学を隕石学のレベルまで高めるだろう。特に揮発性成分まで持ち帰ることができれば、これまで研究が手薄な原始太陽系の低温環境についての大きな情報が得られる。最近、小惑星と思われていた天体にも彗星的な特徴を示すものが見つかってきている。両者の相互関係も興味ある問題である。 (山本哲生)



ESAの探査機ジオットがとらえたハレー彗星



彗星は太陽近傍に回帰して初めて尾を形成するので観測がし難く、敢えて薄明という悪い条件下で見るとか、いつ来るか判らない新しい大彗星を待つとか、大変研究がしづらい天体である。しかし1986年のハレー彗星回帰の際には新たな観測手

段として探査機を彗星に接近させ、直接観測を行う国際連合艦隊が組織され、この天体のガス、塵、プラズマ諸現象に対する理解が大変進んだのは周知の通りである。

たとえば塵に限ってもその組成・質量分布が可能な限り検討され、特にこれまで誰も見なかった 0.1μ 以下のサイズの塵が数の上では圧倒的に多く、しかもその内容が有機分子（CHON粒子）であるなど思いもよらぬ結果が得られた。

一方、これまで長年にわたり米国の Brownlee がU-2機を成層圏に飛ばして、そこに漂う塵を集めており、それらは揮発物が抜けたフワフワの部分に、岩、石墨、有機タールなどの小粒があることから、地球に捕えられた彗星塵ではないかと言われているが未だ確証はない。

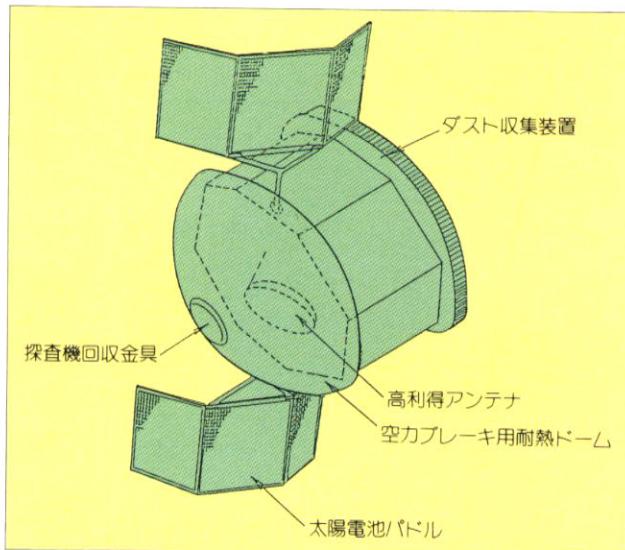
こういった現状からハレー彗星観測成果のレビューの最終段では、やはり次のステップとして彗

星の塵ないし核物質のサンプルリターンが必要であるとの結論が一般的となつた。特に彗星コマからの塵サンプルの回収は、フライバイ・ミッションで可能なため、探査機の地球帰還時における回収を日米協力で行えれば、M-Vの打ち上げ能力を以てしても手の届くミッションとなる。

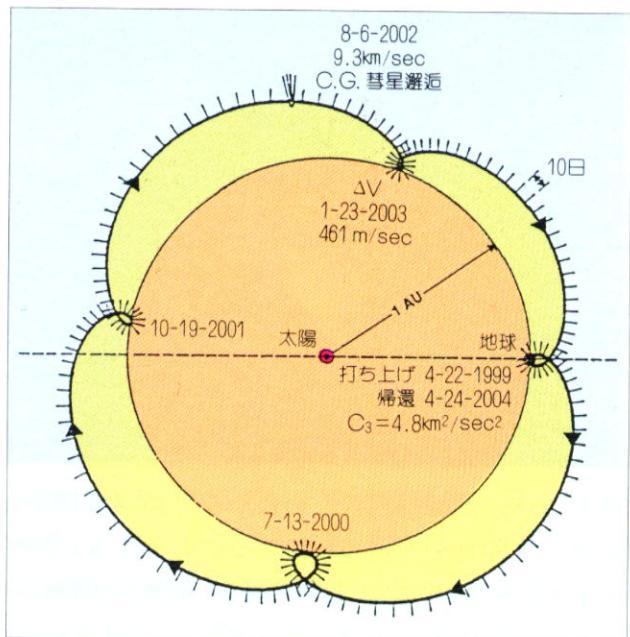
1987年ハワイで開催されたISY会議の席上、彗星コマのサンプル・リターンに関する日米協力の可能性が討議され、SOCCER(Sample Of Comet Coma Earth Return)計画として日米のジョイント・ワーキング・グループが結成された。

SOCCER計画実現のためには、まずどの彗星に探査機を送るかを検討しなければならない。その際の条件としては以下のようない項目があげられる。
 ①塵やガスを多く出す彗星であること、②なるべく近日点距離が小さく活発な彗星であること、③過去の観測履歴が明確で、探査機の邂逅軌道計算が立てられること、さらに探査機を送り込み地球に戻すという観点から、④打ち上げエネルギーの小さいこと、⑤邂逅時に塵を無傷で収集するためフライバイ速度が小さいこと、⑥地球への帰還が容易なように探査機軌道は地球公転軌道と同期軌道であること等々、多くの条件が課せられる。

現在知られている短周期彗星数十個について、上の①から③の条件にあてはまるターゲットを探した結果、JPLのヨーマンスの言葉によれば、「金、銀、銅メダル候補」と呼ばれる3群の彗星が候補としてあげられた。まず金メダル候補は比較的良く観測されており、塵が多く、ガスの生成率も高い彗星であり、コフ(Kopff)、チュリュモフ・ゲラシメンコ(C.G.)及びワイルド2(Wild 2)が該当し



SOCCEER探査機の外観



C.G.ミッション(1999年打上げ)

ている。銀メダル候補には、バータネン(W.T.)、ホンダ・ムルコス・バジュサコバ(H.M.P.)があげられ、これらは今後観測機会が多く、ターゲットとして有望な彗星である。銅メダル・グループは観測機会の少いことが難点ではあるが、狙い得るものとして、タットル・ジャコビニ・クレサック(T.G.K.)、フィンレイ(Finlay)及びドウ・トゥア・ハートレイ(D.T.H.)の3彗星がリストアップされた。

一方1990年代後半の打ち上げを想定して、このメダル候補群とは独立に、ミッション達成の難易度の観点から上記④～⑥他の条件を満足する候補彗星を探した結果は、何たる神の配剤か、C.G.が最も望ましく、W.T.がこれに続き、次いでT.G.K.となり、観測上からの順位と全く一致する結果となつた。C.G.あるいはW.T.へは打ち上げエネルギーも小さく、彗星邂逅時の相対速度も10km/s以下でダストの無傷での収集も可能であり、地球への帰還にも大きな速度修正は不要である等、M-Vでの打ち上げが充分可能との検討結果が得られたが、問題は打ち上げの時期であり、C.G.へは95年5月、W.T.へは95年10月または96年2月という発射の窓がネックとなり、実現が困難となつた。

そこで浮上したのが、2000年前後を打ち上げ時期とした場合のSOCCER計画である。同様の手順で候補となる彗星へのミッション・フィージibilitィの検討がなされたが、天はそう度々は絶好のチャンスを御与え下さるものではないようで、2000年前後の打ち上げに関しては全般的に彗星との



邂逅の後、地球帰還のためにかなりの速度修正を必要とする結果が得られている。たとえば、1999年4月打ち上げでC.G.に行く場合、前頁の上図に示したように、打ち上げエネルギー(C_3)やフライバイ速度は95年のミッションと大差ないが、地球帰還用に約460m/sの速度修正が必要である。これは探査機に搭載する燃料に換算して約70kgの負担に相当するが、打ち出し高度を極力下げる等の手段を採れば、M-Vによって打ち上げ可能な範囲内にあると考えられる。

前頁下図は軌道上巡航状態でのSOCCER探査機の外観である。特徴は直径約2.2mの探査機下部のほぼ前面にセットされたダスト収集装置であり、彗星邂逅時には太陽電池パドルを畳んでダストによる損傷を避けると共に、ダスト収集部を進行方向に向けて彗星コマに突入する。一方探査機上部には地球との通信用高利得アンテナが搭載されているが、それは電波透過性のある酸化シリコン等の耐熱材料によるドームで被われている。このドームは地球帰還時に空力ブレーキによって軌道を下げる際に探査機を空気との摩擦による高熱から守るためのものである。その頭部には宇宙ステー

ションあるいはシャトルから発進した軌道上作業船(OMV)が探査機を回収する際のドッキング用金具が取付けられている。

概念設計結果によれば探査機の重量は2液式推進系の燃料約170kgを含んで約510kg、このうちダスト収集装置が40kgを占め、彗星の核を観測するカメラやガンマ線検出器等の観測機器として20kg程度が搭載できる見込みである。

2000年前後の彗星ミッションとして現在米国のCRAF(彗星ランデブー／小惑星フライバイ)計画が進行中であるが、このCRAF計画ではコフ彗星がターゲットとなっており、バックアップの候補としてワイルド2があげられている。これらはいずれも前述の金メダル候補であり、SOCCERのターゲットをCRAFと同じ彗星にすれば、同じ時期にランデブーによる観測とサンプル・リターンとが行われるという意義が生まれるだけではなく、CRAFがSOCCERの彗星接近に際してパス・ファインダーの役目を果たせるという大きな利点がある。残念ながら、このいずれの彗星に行くのにも大きな打ち上げエネルギーを必要とするため、M-Vでは無理である。しかしながらGEOTAILと同じ方式の日米協力により、打ち上げロケットを米国側が担当することになれば、SOCCER探査機をコフ彗星あるいはワイルド2彗星に送り込むことが可能となる。その場合には探査機設計にも余裕が出るため、CRAFと相補う形での観測機器をさらに搭載できるというメリットも生まれてくる。

日米ジョイント・ワーキング・グループでは以上のような議論を積み重ねており、3月開催の打ち合わせを経て、SOCCER計画の実現に向か、何らかの結論を出したいたと考えている。

(上杉邦憲)



18世紀に太陽系内の惑星の軌道半径がある規則性を持っていることが指摘され（ティティウス・ボーデの法則）、火星と木星の間に別の惑星が存在する可能性も示唆されました。ついに1801年1月1日、望遠鏡による組織的な搜索により最初の小惑星セレスが発見されました。小惑星はその後もぞくぞくと発見され続け、現在その数は4000をはるかに越えています。それらはその名の通り惑星と呼ぶにはあまりにも小さく、一番大きいセレスでも月の3分の1もありません（直径940km）。

今世紀後半に開始された深宇宙探査も、ボエジ

ヤーの海王星探査をもって太陽系の惑星の主要メンバーについての一応の探査が終わり、最も未知の天体として取り残されているのがこれら小惑星であります。小惑星は、

- なぜ小さいのか、
- なぜ沢山あるのか、
- なぜ色々な種類のものがあるのか、
- 大惑星の割れたかけらか、未発達の惑星なのか、
- 地球上に落ちて来る隕石との関係はどうなのか、

など多くの謎を残した天体です。

このような小惑星を探査できれば、小惑星形成過程や進化の謎及び隕石と小惑星の関連の解明など、太陽系の科学に大きな貢献をなしひとげられると思われます。もちろん世界で初の試みです。一方、工学的にみても、この探査には高度の自律機能が必要です。探査自体を遂行することが強い工学的な意義を持つことができます。かくして、この小惑星ランデブー計画は工学衛星計画の一つとして提案されているのです。一言でいえば、光学、視覚情報に基づいた高度の自律、自動化技術の集大成を図ることと言えましょう。

現在のところ有望とされているいくつかの探査候補について、ダイレクト移行による最終ペイロード重量等を調べた結果を表に示します。現時点でも最もフィージブルな候補天体はおそらくアンテロスだということができます。アンテロスはアモール群に属する小惑星で、その近日点距離は

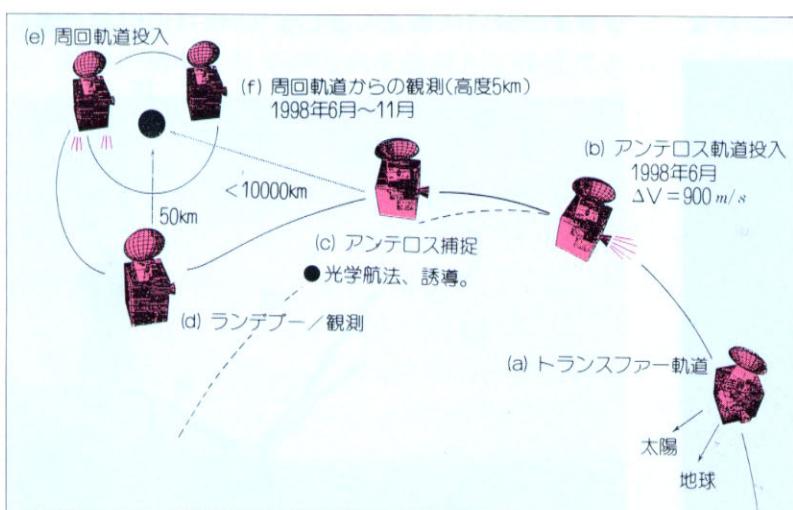
最も簡単なダイレクト移行による小惑星探査候補

名前	打ち上げ	到着	C3 (km ² /s ²)	相対速度 (km/s)	初期重量 (燃料込み)	最終重量 (燃料なし)
EROS	1/98	12/98	33	1.6	11.2%	6.5%
ALINDA	1/98	10/00	75	0.9	1.7	1.3
AMOR	3/96	8/99	49	2.4	6.9	3.0
G.G.	7/98	4/00	32	5.1	11.8	2.1
IVAR	7/98	5/00	53	1.1	6.1	4.2
TORO	10/97	2/01	26	4.0	13.7	3.6
1953RA	8/98	7/00	57	2.5	5.2	2.2
ANTEROS	5/97	6/98	30	0.9	12.3	9.1
	6/99	8/00	27	1.8	13.3	7.2
	5/04	8/05	34	1.0	11.1	7.8
ANZA	10/98	5/01	55	0.9	5.6	4.2
ATEN	12/97	4/99	37	5.7	10.2	1.5
BACCHUS	11/98	3/01	40	2.5	9.3	4.0
1980BA	10/98	10/00	35	0.8	10.6	8.1
1982DB	2/97	5/98	17	1.9	17.1	8.9
	1/98	1/00	31	1.2	11.9	7.9
	2/99	3/00	9	3.0	20.7	7.5
	1/00	10/01	26	0.8	13.7	10.6
	1/02	5/03	21	0.5	15.5	13.3

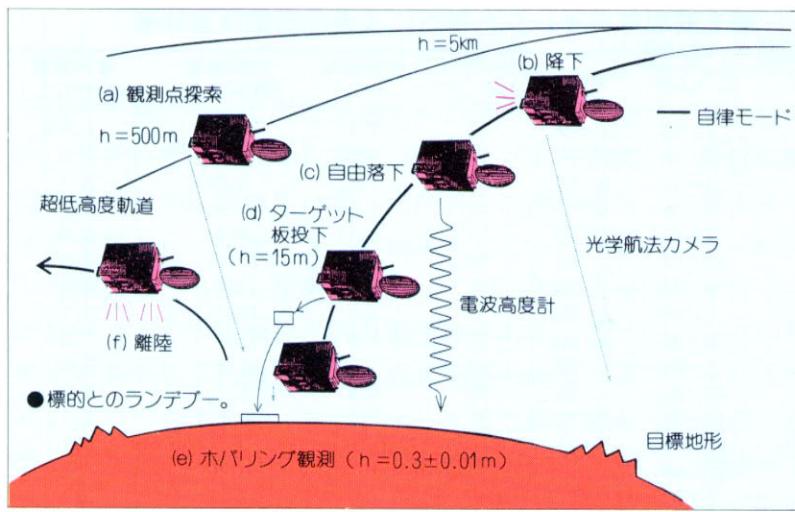
1.06AU、遠日点距離は1.80AUで、スペクトル型はS型です。

1997年5月、M-Vに2段式上段ステージを導入して打ち上げられた探査機は約1年かけて太陽の回りを2/3周し、翌1998年6月にアンテロス軌道に到着します(下図)。搭載の光学航法カメラがアンテロスを捕捉できる程度にはアンテロスの軌道も決められているはずです。探査機は3軸安定化されており、太陽電池面が太陽方向に、ハイゲインアンテナは地球方向に指向制御されています。1km/secにおよぶ大きな軌道制御がOMSエンジンの噴射で行われる予定です。アンテロス軌道に投入直後は、まだアンテロスとの距離は数万km残されていますが、光学航法カメラでアンテロスを捕捉して、相対軌道要素を決定する計画です。その後、アンテロスに対して約50kmまでの距離に異なる方向から数回のランデブーを行い、その表面を

撮像して形状を観察し、自転軸の推定を行うとともに、相対的な軌道データの解析から質量や形状をより正確に推定します。到着時点では、アンテロスは1等星以上の明るさに見えているはずです。アンテロスの引力圏は50km以下で、探査機がひきずりこまれる心配はありません。こうした情報に基づいてその後の近接観測軌道を決定することになります。この段階までには全体の地図もつくり終えていて、ミッションの半分以上は成功したと言えるでしょう。1998年11月までの5ヶ月間は、



アンテロス到着までのイベント



ホバリング観測のイベント

高度が約5kmの極軌道上を周回して、表面のさらに詳細な地図(分解能1.4m)を作成し、それをもとに地上でホバリング観測点の選択を行うことになります。

この計画のメインイベントは何と言っても超近接ホバリング観測にあります。これはもう接触と言って良いのかもしれません。地球との通信回線を確保しつつ観測させるにはこれが最も良い方法でしょう。“着陸”できるほどアンテロス表面の重力加速度は大きくはないので、自分を表面に結びつけておくよりはホバリングの方がうまい観測方法でしょう。探査機はスラスターにより表面上数十cmのところに静止して観測を行うことになります。観測期間は1998年の11月～1999年の4月までの約5ヵ月間位でしょうか。観測装置として探査機はX線分析装置と質量分析器を搭載しています。X線分析装置は太陽X線で励起される小惑星表層からの蛍光X線を観測することができます。1998年は太陽が特別に活動的とは言えないため、鉄な

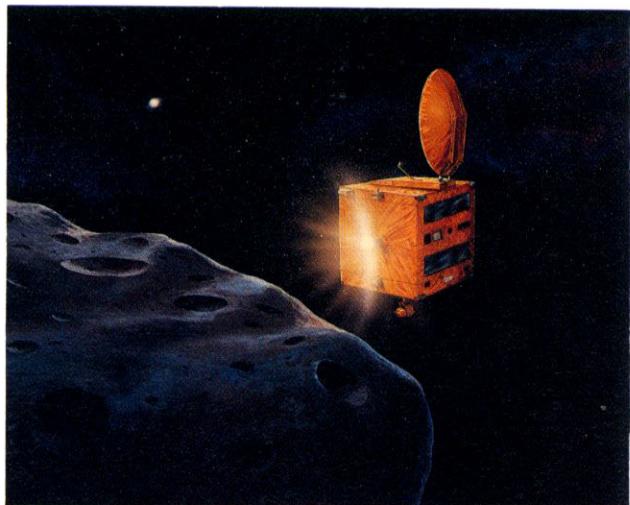
どの原子番号の大きな元素の励起はありませんが、小惑星を主として構成していると思われるマグネシウムやアルミニウム、シリコンについては観測が十分可能です。

地球からのコマンドによりホバリング観測点付近の特徴ある目標地形を記憶させられた探査機は、高度約500mの超低高度周回軌道に移行して、観測点を自律的に比較／判断／確認して、軌道を離脱します(左図)。比較的高い高度では電波高度計が有力な測定武器で

す。電波高度計で高度を計りながら降下を続け、高度約15mで今度はターゲット板を投下します。非常に近距離では小惑星の表面が余程特徴を持っていない限り、正確に自分の姿勢や位置を知ることは大変難しいと考えられます。ところがターゲット板(標的)を表面に落とすという妙案があります。以後はターゲットを光学航法カメラで捕捉し、その視覚情報に基づいて位置・姿勢を制御し、観測点上空に静止すれば良いわけです。これがホバリングなのです。

この一連の動作は、地上からの時間遅れが往復約30分もあるためリモートコントロールはほとんど不可能で、地上での判断を介さない探査機の自律運用に頼らねばなりません。自律運用には、多くの判断機能が要求されますが、それを実現させるハードウェア、ソフトウェアの開発、実証こそが本計画中最も重要な工学ミッションであります。

アンテロスは大きさも3km位しかない小さな天体です。しかしそこには、太陽系の生成を知る上でとても貴重な宝があることでしょう。さあ、星の王子さまに会いに旅立ちましょうか。(川口淳一郎)





M-V型は全段固体の3段式ロケットです。全備重量約130ton、全長約30m、平行部外径約2.5m、衛星投入能力は低高度軌道に約2tonで、与えられた制約内で能力を増すべく努力が続けられています。性能向上のためには、新材料の採用等による構造／機構部材の軽量化のほか、固体ロケットの特性を生かして飛翔中のいわゆる重力損失を低減させるモータ設計を意図しており、一方高空でノズルを伸展／展開して高開口比を得る機構を採用し、高比推力が得られるように努めています。また、低高度(～150km)で最終段打出しを行い、特に月／惑星ミッションのような高エネルギー・ミッションでの能力増を図れるように計画されています。このような高エネルギー・ミッションでは、第3段の上にオプションとしてキックモータが装備されます。

1995年初頭に1号機を打上げる予定で、この特集の諸計画はいずれもM-V型の性能と開発スケジュールを念頭に置いて立てられています。

(第1段)

第1段モータは推進薬重量約70ton、2つのセグメントからなっています。推力方向制御はM-3S IIの補助ブースタで採用した可動ノズルで、ロー

ルはSMRC(Solid Motor Roll Control)と称される小型の固体モータで行います。

最大の特徴はそのグレイン設計で、先に述べた重量損失を抑えるため、推薬充填率を劣化させることなく早期に燃焼を終了させるようになっています。有効燃焼秒時は約45秒で、直径が約半分のM-3S IIロケットの第1段より短くなっています。推力曲線は意図的に尾を引くように計画されており、これにより第2段分離までの可動ノズルによる姿勢制御を可能にし、しかも分離時に第1段を過剰に加速しないような推力レベルが選ばれています。

モータケースの材料には新開発の高張力鋼HT-230が用いられ軽量化に貢献しています。

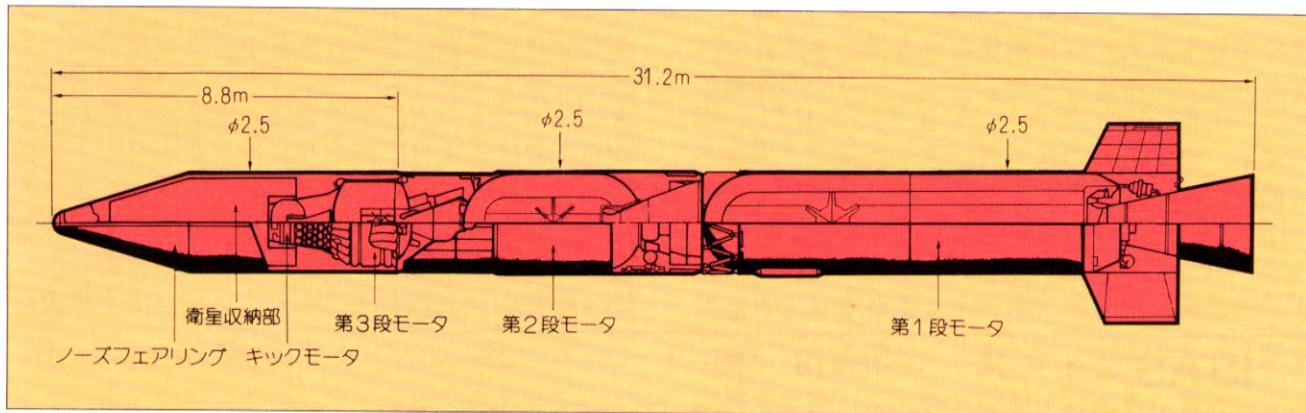
なお、これまでのM型ロケットの能力を増強してきた補助ブースタは廃止され、単純化が図られています。

(第2段)

第2段モータは、推進薬重量約30ton、ロール制御はSMRC、推力方向制御はこれまでのMロケットで実績のある2次噴射(LITVC)によります。

特徴は、伸展／展開ノズルの採用で、これを高空での燃焼開始時に展開させることによって、打上げ時の機体形状の制約を踏まえた上で高開口比を実現します。また、第1段との分離と第2段の点火を同時に行ういわゆるファイア・イン・ザ・ホール方式(Fire-in-the-hole)をとり、いずれもモータの主流に依存する第1段の可動ノズル制御と第2段のLITVC制御を連続して行うことにより、第1段／第2段の段間制御装置を別途導入することを避けています。

第2段燃焼終了後の姿勢制御はピッチ／ヨー／ロールとも小型の固体ロケットによるSMSJ(Solid



M-V型ロケットの構成

Motor Side Jet)で行います。モータケース材料には第1段同様のHT-230を採用します。

(第3段)

第3段モータは、推進薬重量約10ton、燃焼中の推力方向制御は可動ノズル、燃焼中のロールとその前後の3軸の制御はヒドラジンを燃料とするサイドジェット装置で行います。

従来スピニ安定方式を採ってきた第3段を3軸方式にしたことは大きな変更です。これは、月・惑星ミッションで最後のキックモータステージをパーキング軌道上でコースティングさせる場合の便も考慮した結果です。

モータケース材料にはFRPのフィラメント・ワインディングを用い、軽量化と低価格化を追求します。

(搭載機器)

搭載電子機器については、基本的にはM-3S IIまでに確立された技術を用います。ただ、姿勢基



準には従来のスピニテーブル上のFRIGに替えてFOG(Fiber Optical Gyro)をストラップダウン方式で使用する予定です。

(松尾弘毅)

★ISASニュースの忘年会都合で日時を変更していただいたにも係わらず、結局欠席てしまいました。毎年暇だったことはありませんが、今年も忙しそうです。せめてカラ元気でがんばります。本年もよろしく。

(松尾弘毅)

★興味深い記事、充実した内容を目ざし、パソコンを用いた編集の合理化や掲載記事の分類・統計等々、今年の目標は大きいが…… (荒木哲夫)

★我が銀河の中心にはブラックホールが有り、その回りでは超スピードでガスが回転し星でさえも吸い込まれているそうです。ところが吸い込まれ過ぎて吐き出されるガスも有ること。今年は廻り廻って吸い込まれるのか吐き出されるか。

(五十嵐勉)

★メガサイエンスとして多くの人手と予算を使う宇宙科学研究ですが、それ故に一層、研究成果が広く伝えられなければなりません。宇宙研のアクティビティーを伝えるISASニュースの使命は重要ですので、大いに頑張りたいと思います。

(小原隆博)

★この原稿をKSCで書いています。「おおすみ」以来20年、今後もこの地を飛び立つ衛星達が宇宙の情報を伝えてくれるでしょう。鹿児島発の宇宙のホットな情報を今後もお送り致します。

(紀伊恒男)

★最近他機関の「××研ニュース」をよく目にす

る。すわ強力なライバルの出現か!と色めきたって目を通す。全頁カラー印刷の立派なものもあるが、全体の構成、記事内容の豊富さでわがニュースは群を抜いている。しかしここは驕らずに何か新しいものを積み上げられるよう、今年もガンバ

(芝井 広)

★今年の全国大学ラクビー選手権決勝戦は見ごたえがあり久し振りに興奮した。今年はISASニュースも早明戦のようにエキサイティングな読者の心を釘付けするような紙面作りに努力しますのでよろしくお願ひします。

(高橋義昭)

★今年も、読者の皆さんを唸らせるような創造的な企画と、火傷しそうなホットな記事を心がけます。タレント達は「フォーカスされた」と言うそうですが、皆さんは「ISASニュースされる」かも知れませんよ。

(中谷一郎)

★新年号いかがでしたか。ヌードも神様のものだと文部省公認ということです……。「主張」と「遊び心」とが貫かれるニュースにしたいのですが、なかなか。脱皮しながら大きく大きく伸びたいものです。

(的川泰宣)

★ISASニュースの編集委員に加えていただいてから今年は4年目に当たります。数ヵ月ごとの割付当番になった月は結構たいへんですが、毎月の編集委員会はたいへん楽しいひとときです。本特集号でも多くの方々のご協力をいただけました。ISASニュースを今年もよろしく。

(山本哲生)