

LUNAR-A 計画

ー 我が国初めての固体惑星探査としての月ミッション ー

藤村 彰夫¹・早川 雅彦¹

1. はじめに

自らの機器で観測して固体惑星の研究したいと思っていた人達にとって 1990 年度は希望に満ちた年であった。この年、文部省宇宙科学研究所が今まで持っていた M-3SII 型ロケットの打ち上げ能力を 2 倍以上も上回る新しい大型の M-V 型ロケットの開発に着手したからである (図 1)。今までの M-3SII 型は、1 号機、2 号機がハレー彗星探査機「さきがけ」「すいせい」を我が国としては初めて惑星間空間に送りだしたし、5 号機は孫衛星「はごろも」とその母船「飛天」を米ソに次いで月周回軌道に送り込むなど、惑星間空間に探査機を送り込むパイオニア的使命を果たした。しかしこのロケットは本格的な固体惑星探査には力不足の感は免れ得なかった。

M-V 型ロケットは打ち上げ時重量 130 トン、公称外径 2.5m、全長約 30m で地球周りの低軌道ならば約 2 トンの衛星を打ち上げられる。この M-V 型は、ペンシルロケット以来の日本独自の技術を蓄積して到達した 3 段式のロケットで、全段が固体ロケットモータでできていることと惑星探査を目的として設計されていることが特徴である。このロケットは 1971 年に「たんせい」を打ち上げた M-4S 型以来の科学衛星打ち上げ用の M(ミュー)シリーズで初めて全段ロケットを新規に開発するもので、この新型

ロケットに大きな期待がかかっていることがうかがわれる。月や惑星へ探査機を送り出す場合は、M-V の 3 段目の上段に取り付けられたキックモーターと称する第 4 段のロケットにより地球周回のパーキング軌道から目的とする惑星へ出発する (図 2)。M-V 型ロケットは 1994 年度の 1 号機、MUSE-B(地球周りのスペース VLBI 用衛星)の打ち上げを目指して開発研究に入り、M-V-2 号機、M-V-3 号機を用いて LUNAR-A(月探査機)、PLANET-B(火星探査機)と次々に惑星探査機を送り出すことになる。

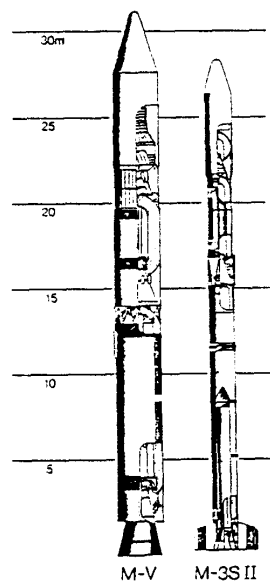


図 1. M-3SII 型と M-V 型ロケットの比較。

¹宇宙科学研究所惑星研究系

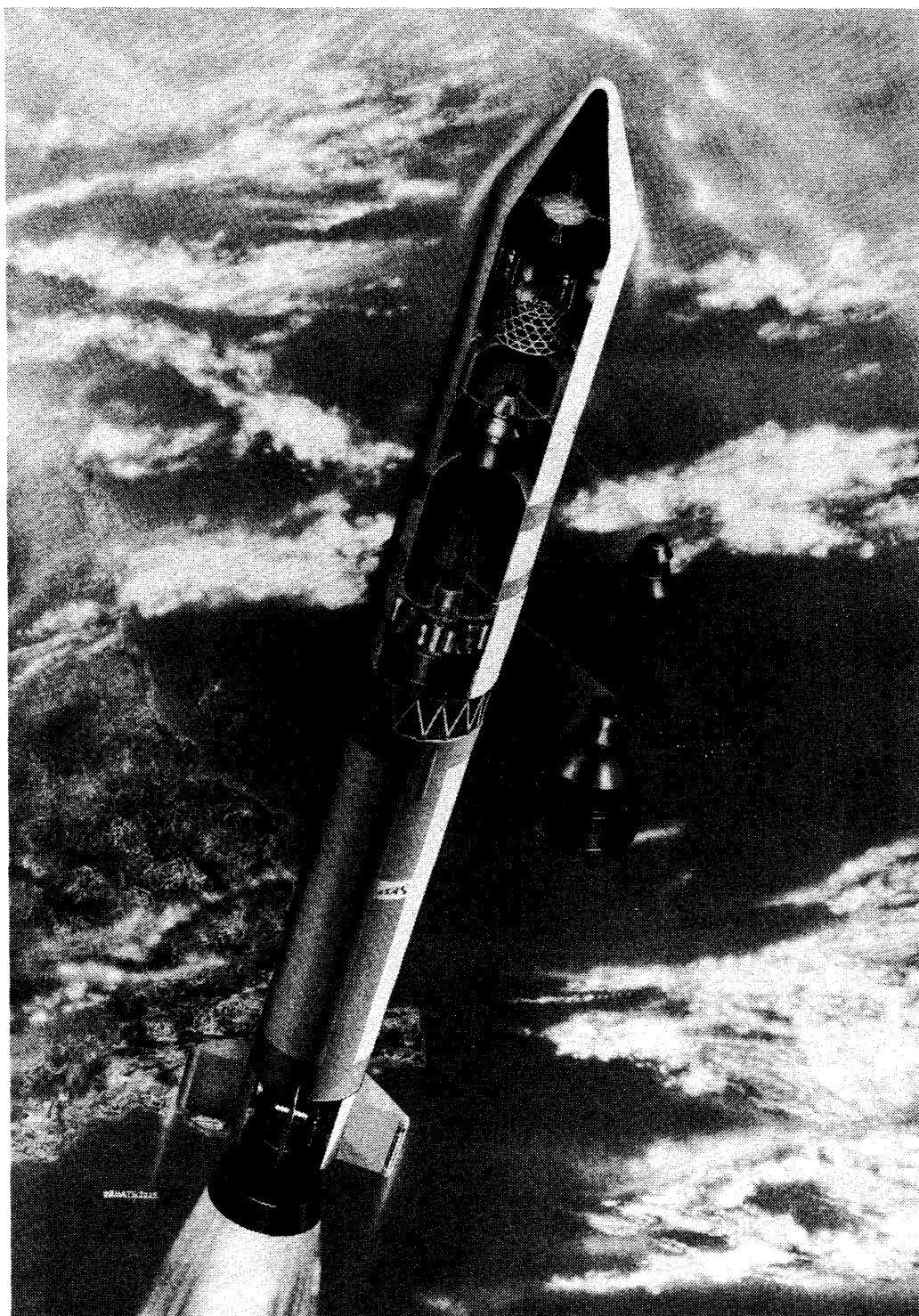


図 2. LUNAR-A 探査機と第 4 段キックモーターをノーズフェアリング内に納めて飛び立った M-V 型ロケットの飛行想像図.

2. LUNAR-A の目的・概要

LUNAR-A ミッションでは月ペネトレータと呼ばれる無人科学ステーションを月面の3地点に埋設設置する。その深さは1m~3mであり、設置にはペネトレータが月面に向かって落下する速度の一部を利用する。この深さまで観測機器を潜らせることにより、昼夜で $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 以上に及ぶ月面での過酷な温度条件から逃れ、搭載電子機器などを $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下の恒温に守ることができる。そして、それによって主観測機器の地震計、熱流量計による観測を高い精度で実施することができると考えている。ミッションの目的は約1年の期間、自然月震や隕石の衝突による月震と地殻熱流量の観測を行い、得られた結果から月の内部構造や進化に関する情報を引き出すことである。このミッションの特徴の1つは、今までの惑星探査で行われていたような遠隔探査を主とした惑星表層の観測とは違って、月の内部を直接探る地震計や熱流量計を主観測装置としていることである。

アポロ計画による月震観測により表側の“海”の下構造はある程度明らかになったが、高地や裏側における月内部構造に関してはほとんど分かっていない。月の裏側、高地における地殻の厚さを正確に求めることによって、月の初期進化過程でのマグマオーシャンのスケールを決め、また全月の難揮発性元素の存在度推定を確かなものにすることができる。月マントルの地震波速度構造をアポロ計画で得られたものより高精度で推定できれば、マントルの鉱物組成や m 値 ($=\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$) に関する重要な情報を得ることになる。これらは月地殻やマントルの進化と月の起源を研究するための基礎的な情報であり、重要な意味をもっている。月にコアがあるか否かはいまだ明かではないが、これの有無を明らかにすること、また、存在する場合にはそのサイズを決めることは月の起源と進化にとってキーデータとなろう。これは現在ほとんど無いとされている月磁場の起源に関しても重要な情報となる。さらにペネトレータ地震計は広大な月全面に衝突してくる隕石のカウンターとして衝突頻度や衝突規模を

観測する機能も合わせ持つこととなる。このデータもまた惑星科学上重要な意味をもっている。

月の内部から表面に向けて熱の流れがあるが、その源は月形成時の集積熱の余熱と月の化学進化の結果として地殻に濃集した長寿命の U や Th などの放射性元素の壊変熱である。従ってこの熱の流れを観測することで月内部の温度分布を推定でき、更に放射性元素の存在度についての知見が得られる。熱流量 Q は熱伝導率 K と地温勾配 dT/dz の積で与えられるので、地温勾配と熱伝導率の2つの独立な量を直接に観測することで熱流量を計算で求めることができる。

3. ルナー・ペネトレータ

ペネトレータは直径十数 cm、長さ 1m 弱の槍形をした探査プローブで、月面に約 300m/s の速度で衝突して月レゴリスに潜り込むハードランダーである。このペネトレータ機体内部には、約1年間にわたって搭載機器に電力を供給する電源電池、3成分地震計、月レゴリス熱伝導率計測器、温度勾配計測器、加速度計、傾斜計、データ収録用メモリ回路、データ処理用 CPU、VHF 送受信器、アンテナなどが搭載される予定である。月レゴリスに貫入するときの衝撃からこれら搭載機器を守るために、空隙は直径数十ミクロンの微細な中空ガラス球を高強度樹脂で固めた充填材で埋めてある。これら全てを収納するペネトレータ構体は先端がチタン合金、胴体部が炭素繊維強化プラスチックであり、全てを合わせた実機総重量は約 13kg と極めて軽量である。

計画では3機のペネトレータを抱いた母船がスピンを利用して順次ペネトレータを切り放す(図3)。ペネトレータは母船の軌道から離脱するための軌道離脱ロケットモーターおよび減速ロケットモーターと単純な制御器から成るペネトレータモジュールによって月面近くまで運ばれ、減速の後に切り放されて所定の姿勢と貫入速度で目標地点に突入する(図4)。1機のペネトレータは地球側赤道近傍のアポロ12号着陸地点付近に、もう1機は赤道地帯の月裏

側、残りの1機は高緯度地域に打ち込まれることになっている。この配置によりアポロ地震観測で得ら

れた結果を最大限有効に利用しながら月内部構造を精度良く推定することが可能になる。

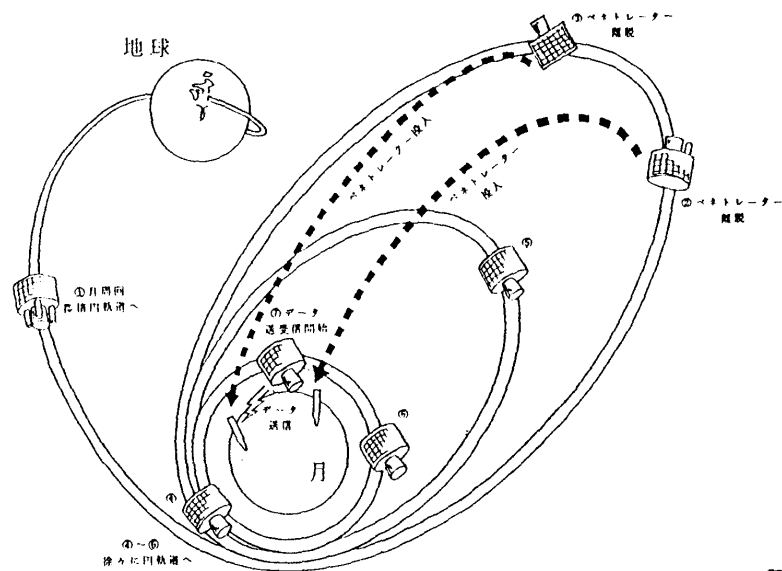


図3. ペネトレーターの投入シーケンス.

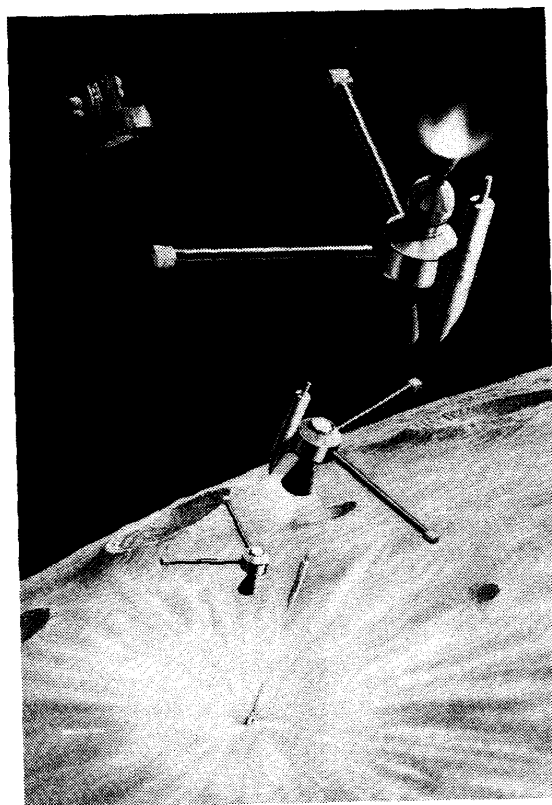


図4. 月面に貫入するペネトレータの様子.

母船と3機のペネトレータをトータルとして最小のエネルギーで月に送り込むためには、ペネトレータ毎に必要な減速量が異なる。従って各々のペネトレータモジュールはそれに合わせて最適化されている。設置される場所毎に月面貫入角度も違うし、貫入後の温度環境も約 -20°C から約 -40°C と随分と違っているため、ペネトレータ本体もそれに合わせて設計される。もっと詳しく言えば、この温度の違いは搭載電源電池の寿命にも影響するし、通信アンテナの伸展などにも影響する。予備的な数値シミュレーションによれば、熱流量観測のためには貫入した時のペネトレータの温度と月面レゴリス内との温度差が $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度以下であることが望ましい(図5)。そのためペネトレータの機体温度を設置緯度

合わせてコントロールすることも必要となる。この温度制御はペネトレータ機体外壁の塗装パターンを変えることで熱の入出力をコントロールして行う。しかしペネトレータにとってより重大な問題は、ハードランディングに伴う衝撃に耐え、その後1年間にわたって高精度で観測可能な搭載機器の開発である。搭載機器の受ける衝撃加速度はペネトレータの先端などの形状にも依存するが、適切な形状に選ぶことにより秒速 $250\sim 300\text{m/s}$ 程度の貫入速度に対して数千G程度まで低くすることが可能である。衝撃のG値を下げるためにも、またペネトレータがレゴリス中に潜り込むことを前提に設計されている搭載機器のためにも、ペネトレータの潜り込み特性を十分研究しておくことが重要である。

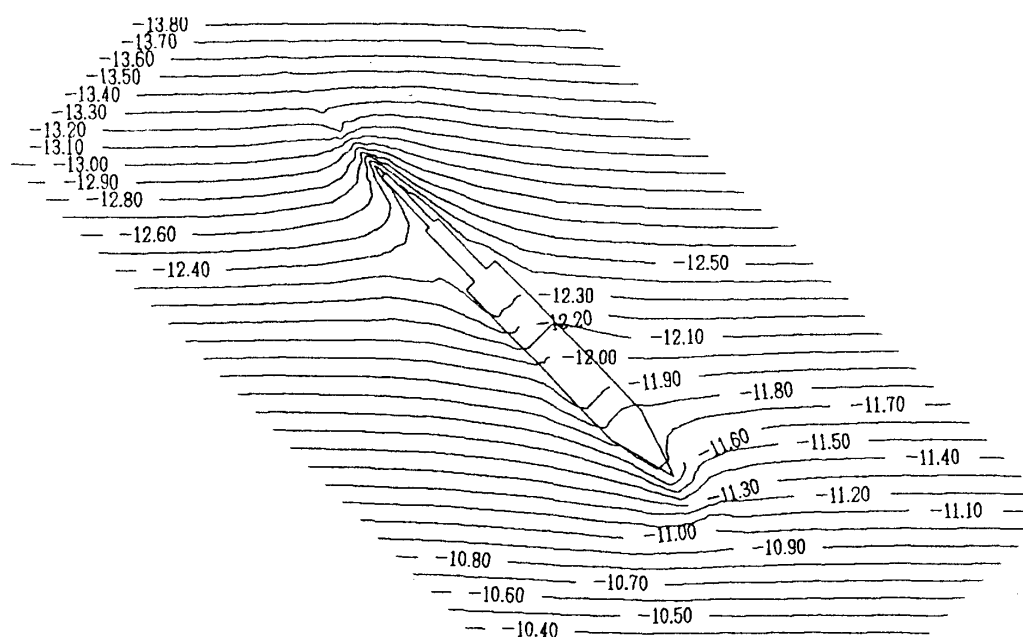


図5. 月レゴリスに貫入したペネトレータの定常状態での温度分布.

ペネトレータの搭載電子機器の構成部品のIC、トランジスタ、その他電子部品の耐衝撃性の研究は、1984年頃から名古屋大学の直径15mm火薬銃を用いて実験的に始められた。それ以降、直径10mmや30mmの射出装置を用いて貫入姿勢や先端形状に

関する実験や、直径50mmの射出装置を用いた部品評価実験を行っている。また直径90mmのペネトレータによる自由落下衝撃実験や衝撃試験機による予備実験を併用し、貫入実験の回数を減らす工夫をしている。1986年以降は年に10~15機のペースで

直径 120mm のほぼ実物大のペネトレータを用いた貫入実験を宇宙研能代ロケット実験所で行っている(図 6)。この実験では射出速度約 250m/s で約 15kg のペネトレータモデル機体を真空容器中の月面疑似砂に打ち込み、ペネトレータ機体構体、電子機器、電源、アンテナ、熱伝導率計、地震計、地震計回転機構などの耐衝撃性、ペネトレータの潜り込み特性などについての基礎的データを取得している。標的砂は縦 2m、高さ 1.8m、幅 1.5m の砂箱にいれてあり、月レゴリスの粒度分布に合わせている。

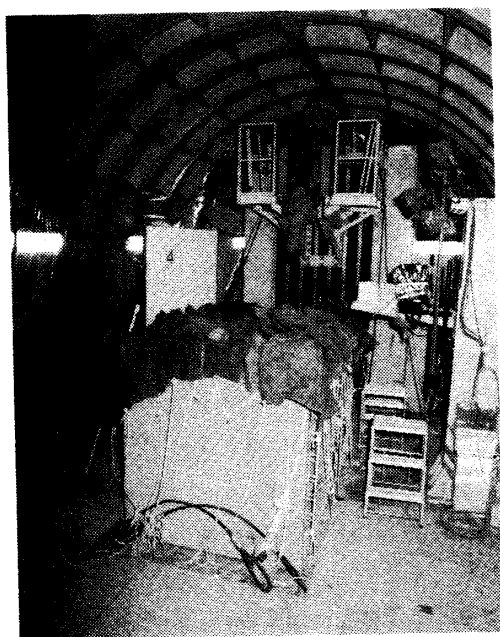


図 6. 真空槽内に設置されたペネトレータ射出装置(能代ロケット実験所)。手前には月面疑似砂を入れた砂箱が見える。砂箱上部は砂飛散防止用シートで覆ってある。

4. ミッション機器

(1) 搭載地震計

地震計は月ペネトレータの主観測機器である。1 機のペネトレータには上下動 1 成分、水平動 2 成分の合計 3 台の地震計が搭載される予定である。地震計の開発目標は、固有周期 1 秒、 $10\text{V}/(\text{cm/s})$ 以上の感度をもち、小型軽量で数千 G の耐衝撃性を持つものである。現在できあがっている地震計は、重量が 500g 弱であって、直径 5cm、長さ 5cm の円柱状

をもち、固有周期が 2~3.5 秒、感度が $\sim 5\text{V}/(\text{cm/s})$ 程度で数千 G の貫入時の衝撃加速度に耐える電磁式のものである。この地震計は地上用の短周期地震計に勝るとも劣らない性能を持っているとの評価を受けている。地震計の姿勢は月到着後に回転機構により調整されるが、地震計回転機構は可動部を持つ装置であり、これに耐衝撃性をもたせることはきわめて困難と考えられていた。しかし 1 万 G 程度の衝撃に対する機器の耐性は、可動部の移動距離を極力小さくすることや、衝撃の集中する部分の耐衝撃性を上げることで対処できることが明らかにされつつある。

観測はプレ・トリガー方式で月震のイベントだけを観測することが考えられている。これはスタンバイ時に大部分の電子回路の電源を切って省電力化を図ることとメモリの節約のためである。電力節減のために地震の規模に応じデータ取得時間を変えることや大きな地震による振動が長時間続いている場合はその振動が納まるまで観測を停止するなどの方法をとることが考えられている。地震の信号は 10bit 程度のデジタル信号として取得されるが、これを搭載データ処理装置により圧縮してメモリに収納する。時刻信号と共に収納された地震データはペネトレータと月周回母船と会合時にまとめて送信される。この会合は 15 日毎の約 2 時間おきの数回であり、結果として 15 日毎に数 100 秒の通信可能時間が確保される。この間に母船からペネトレータに必要な命令を送り、ペネトレータの時計をチェックし、ペネトレータからはメモリに収納されている地震データや熱流量データを送り出す必要がある。この通信能力からもペネトレータのメモリ総量は数 Mbit に決まってしまう。

(2) 搭載熱流量計

ペネトレータは月表層の温度が殆ど影響しない一定の地温勾配を持つ深さまでレゴリス中に潜り込み、機体表面に多数点設置した温度計とヒータにより温度勾配と熱伝導率の計測を行う。温度は相対温

度を $1/100^{\circ}\text{C}$ 以上の精度で測定する熱電対式温度計とそれより粗い精度で絶対温度を測定する抵抗温度計の両方で測定する。測定された温度差とペネトレータの停止角度からレゴリス中の温度勾配を算出する。また、ペネトレータ機体外壁に設置したヒータを加熱してレゴリスの熱伝導率を計測し、先に述べた温度勾配データと組み合わせることで地殻熱流量を推定する。

熱流量計測の最も困難な点は、内部に熱源があり、熱伝導の良い材質に取り付けられた温度センサーで、熱伝導の悪いレゴリスの温度勾配を計測することにある。ペネトレータの内部機器の空隙は上述したように微細な中空ガラスを樹脂で固めたポッティング材で埋められている。このポッティング材は通常断熱材と言ってよいほど熱伝導は悪いが、月レゴリスは更に熱伝導が悪い。このため温度勾配の計測をペネトレータで殆ど熱が発生していない貫入間もない期間に行うか、特別に温度計測用の時間を確保することが必要かも知れない。現在数値実験などで解析中であるが、ペネトレータ機体内部で発生する熱をヒートパイプと機体後部のアンテナを通してペネトレータの後方(上)側の低温のレゴリス層中に捨てる方法を採用する必要があるかも知れない(図5)。

5. ペネトレータ共通機器

(1) 電源

ペネトレータの電源はすべて1次電池で賄う予定である。太陽電池、原子力電池、燃料電池などは観測機器の寿命を格段に延ばす可能性がある。しかし月面上に太陽電池パネルを残してペネトレータだけを潜り込ませることが困難であること、軽量で高出力で耐衝撃性のある原子力電池や燃料電池を限られた期間に開発する見通しが無いことなどから、エネルギー密度の高いスーパーリチウム1次電池を使用する予定にしている。スーパーリチウム電池内部は電解液や柔らかい物質、電極などの硬い物質が混在していて衝撃に対して弱いのではないかと懸念されていた。しかし、適切な構造の電池を採用することで1万G程度の衝撃に耐えられることが実験的に明らかにされてきた。現在の見積では、地震計測、時計、熱流量計測、データの処理・保存、通信などペネトレータで1年間に使用する全てをこのスーパーリチウム電池で構成された約3kgの電源で賄う。電池の性能が良いこともあるが、ペネトレータの搭載電子機器は最近の電子機器の進歩を取り入れて徹底的な省電力化を実施する。このためICなどの部品は3V以下の低電圧で働くマイクロパワーの民生品を積極的に使用する。これは従来のロケットや衛星搭載電子機器が宇宙用規格を満たしたものであることと比べて著しい違いである。

と懸念されていた。しかし、適切な構造の電池を採用することで1万G程度の衝撃に耐えられることが実験的に明らかにされてきた。現在の見積では、地震計測、時計、熱流量計測、データの処理・保存、通信などペネトレータで1年間に使用する全てをこのスーパーリチウム電池で構成された約3kgの電源で賄う。電池の性能が良いこともあるが、ペネトレータの搭載電子機器は最近の電子機器の進歩を取り入れて徹底的な省電力化を実施する。このためICなどの部品は3V以下の低電圧で働くマイクロパワーの民生品を積極的に使用する。これは従来のロケットや衛星搭載電子機器が宇宙用規格を満たしたものであることと比べて著しい違いである。

(2) ペネトレータのアンテナおよび通信

月レゴリス中に潜り込んだペネトレータは尾部から4本の棒状アンテナを延ばし、これによって月周回軌道上の母船と通信回線を確保する。月表面物質を作っている物質は地球の砂や岩石などと違って水を含まないため電波吸収が少なくアンテナは埋没していても十分に機能する。アンテナはペネトレータ内部で発生した熱を低温のレゴリス中に逃がす排熱器としても機能することが期待されているし、月面上の $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 以上の温度振幅からペネトレータを守るためにも、レゴリス層中数10cm以下に埋没している必要がある。ペネトレータの中には月の裏側に設置され地球から直視できないものがあることその他に、ペネトレータの通信機器が小型に成らざるを得ないことから地上との直接の通信ではなくペネトレータ母船経由になる。ペネトレータ母船と地上の通信は宇宙科学研究所の臼田局の64mアンテナによって行われることになる。このアンテナはハレー探査機との通信用に最初に使われた深宇宙通信用のものであり、ハレー探査機「さきがけ」や「すいせい」、工学試験衛星「飛天」との通信などの経験から、ペネトレータ母船との通信に関しては何等問題は生じないと思われる。

(3) 加速度計・傾斜計

ペネトレータの科学観測機器ではなくて搭載が要請されているものは、月面貫入時の衝撃加速度計測装置とペネトレータの停止角度計測を行う傾斜計である。加速度計はペネトレータの貫入時に1回だけ機能し、ペネトレータがどの程度レゴリスに潜り込んだのかなどの情報を収集する。この部分の電子機器は導電状態で約1万Gの衝撃を受けることになる。貫入時の衝撃加速度計測は数ミリ秒間の現象を忠実に記録することが望ましいが、ペネトレータの主要電子機器は省電力化のため比較的低速で動作するのでこれを貫入時の衝撃加速度波形観測には利用できない。そこで衝撃時の現象を比較的良く表現する最大加速度、平均加速度、継続時間などを計測することを検討している。

ペネトレータの傾斜データは月レゴリス中のペネトレータの停止姿勢を知るために必要である。熱流量観測において観測された温度差から温度勾配を算出するためにペネトレータの停止角度が必要であり、地震計の設置姿勢コントロールにも傾斜データが必要とされるであろう。小型、軽量、単純で耐衝撃性のある傾斜センサーとして最も有力視されているものは、液体中のバブル位置を検出するタイプのものである。

6. その他搭載の可能性が考慮されている観測機器

上述してきたようにLUNAR-Aミッションの主観測機器は3機のペネトレータに搭載された地震計と熱流量計である。その意味ではペネトレータと地上との通信をリレーする月周回軌道上のペネトレータ母船は補助的な役割を担っているといえるが、これの軌道を解析することで月重力場の観測を行うこともできる。この場合は特別な観測機器を必要としないが、もしペネトレータ母船に重量的に余裕が生じた場合に搭載してはどうか検討されている観測機

器に光学航法用撮像カメラやダスト検出器がある。またペネトレータモジュールに重量的余裕が生じた場合は月秤動観測用VLBI電波源の月面上の設置が検討されている。

7. 将来の惑星探査ミッション

現在、惑星科学分野の研究者と宇宙工学分野の研究者間である程度検討が進められている惑星関係のミッションには(a)小惑星ランデブー、(b)彗星コマ・サンプリングリターン、(c)金星バルーン、(d)月/火星ローバーがある。(a)は地球軌道近傍にやってくるアポロ・アモール群の小惑星の周回軌道に入り、種々の遠隔探査の後、ほぼ軟着陸と言っていい地上20cm~30cmで数10分間のホバリングを数回以上行って表層の化学組成を調べる計画である。(b)は彗星核近傍をフライバイしコマ中の塵を採取して地球に持ち帰り、地上の精密な分析機器で塵を分析して太陽系始源物質を研究する計画である。(c)は金星の中層大気中に金属性バルーンを浮かべ、大気の外からは観察できない金星大気の運動を観測・研究する計画である。(d)の月/火星ローバー計画は月あるいは火星に小型無人探査移動車両を軟着陸させて、これら天体の表面の地形学的、地質学的研究を行うことを目的としている。これらミッションはM-V型ロケットでも実現できるのではないかと考えられており、科学的にも工学的にも大変興味深い計画と言える。

ここでは現状の手段を生かして惑星探査を進める場合について述べたが、近い将来、国際プロジェクトとして惑星探査を進めていくことも盛んになるであろう。また宇宙開発事業団が開発中のH-IIロケットのようなM-V型ロケットよりも更に大型の乗り物を使った惑星探査を将来実行するためにも、惑星探査に必要なノウハウを取得する時代が到来したと言えよう。