ペネトレータによる月内部の計測*

水谷 仁**

藤村彰夫**

早川雅彦**

田中 智**

白石浩章**

Understanding of Lunar Interior by Penetrators /
Hitoshi MIZUTANI, Akio FUJIMURA, Masahiko HAYAKAWA, Satoshi TANAKA
and Hiroaki SHIRAIISHI

Key words: moon, lunar interior, lunar exploration, LUNAR-A, seismology, heat
flow measurement, seismometer

1. はじめに

様々な惑星探査機により、我々の太陽系のなかの惑星の表面の姿が明らかになりつつある。いまや冥王星を除くすべての惑星について、我々は少なくとも惑星の表面はどのようなものであるかについて第1近似的描像が持てるようになった。しかし、本当に惑星がどのようにして作られ、どのようにして進化してきたかを明らかにする上では、惑星表面のデータだけでは不十分である。

これまでの惑星探査は惑星へのフライバイや周回軌道上からのリモートセンシングによる偵察の段階だったと言える。

これに対して将来の惑星探査では、惑星全体における詳細な調査を要求されるものになるであろう。例えば惑星の内部を探る調査、惑星の環境の時間的变化、地域ごとの変

化を探る調査などが重要な課題になる¹⁾。

これらの第2世代の惑星探査にとって、必須になると思われることのひとつは惑星表面に観測機器のネットワークを設置することであろう。惑星内部探査のための地震観測網、気象変動観測のための気象観測網など、惑星表面に複数の観測点を設け、ネットワークを組まなければ有意義なデータが得られない観測が多くある。しかし従来の惑星表面への着陸方式をとる限り、1回のミッションでは1地点にしか観測機器を降ろすことができないので、複数の地点に観測機器を設置するには大きな困難がある。ペネトレータはこのような困難を回避し、新しい時代の要求にこたえる、惑星探査のための新しい手段を提供するものである。

2. ペネトレータの有効性と制約

ペネトレータには他の手段では実現できない次に述べるような利点がある。

- (1) 低コスト化：ペネトレータは少なくとも惑星表面に軟着陸することを前提としていないために、通常の惑星着陸機にくらべ、小型で、低コストで観測機器を惑星表面に設置できる。
- (2) 温度制御が簡単：ペネトレータという言葉が示すように、ペネトレータは惑星表面から地下に貫入するので、惑星表面からボーリングしないで、直接に地下の観測機器を送り込むことができる。一般に大気を持たない惑星の表面では昼夜の温度差が大きく、観測機器の温度環境には厳しいものがある。一方このような惑星表面は熱伝導率の低いレゴリス（砂層）で覆われており、レゴリス層へわずかに貫入するだけで、温度環境は著しく改善されることが分かっている。

* 原稿受付 平成9年8月20日

** 宇宙科学研究所（相模原市由野台3-1-1）

水谷 仁

1967年東京大学理学研究系博士課程中退、理学博士。1981年名古屋大学理学部地球科学科教授。1987年宇宙科学研究所惑星研究系教授、現在に至る。研究分野：惑星物理学。著書：クレータの科学、月の科学（共著）

藤村彰夫

1975年名古屋大学大学院理学研究科博士課程

修了、理学博士。1984年名古屋大学理学部助手、1988年宇宙科学研究所惑星研究系助手、1991年宇宙科学研究所惑星研究系助教授、現在に至る。研究分野：惑星物理学

早川雅彦

1989年名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士。1990年宇宙科学研究所惑星研究系助手、現在に至る。研究分野：惑星物理学

田中 智

1992年東京大学大学院理学研究系博士課程中退、理学修士。同年宇宙科学研究所惑星研究系助手、現在に至る。研究分野：惑星内部物理学

白石浩章

1995年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、理学修士。現在同博士課程在学中。研究分野：惑星科学、惑星探査

- (3) 地下観測の手段を提供：リモートセンシングでは不可能な惑星の地下の状況を調べるには、観測機器を地下に設置する必要がある。たとえば地下の物質の岩石の組成の測定や、熱流量観測をしようとすれば、どうしても惑星の地下に観測機器を置かなければならないが、ペネトレータは自動的にこれを実行できる。

このように利点の大きなペネトレータであるが、また次のような制約もある。

- (1) 高い耐衝撃性が要求される：ペネトレータは一般には惑星表面にハードランディングするので、惑星表面に衝突する時に大きな衝撃を受ける。したがって、ペネトレータ本体、内部に搭載される機器は大きな衝撃に耐えられるように製作されていなければならない。
- (2) 通信、電力に制限：ペネトレータの本体は地下に貫入するので、そこから地球、あるいは母船に通信するには通信をレゴリス層を通じて行う必要がある。電力についても、ペネトレータが地下にあるので、太陽電池によって電力をもらうことができない。しかしこの問題は、ペネトレータの一部を惑星表面に残るようにすることで回避できる可能性がある。

3. ペネトレータの貫入特性と耐衝撃性

観測機器を惑星の表面から適当な深さに貫入させるためには、高速で惑星表面に衝突するペネトレータの重量、形状、貫入速度と貫入深さの関係を明らかにしておく必要がある。ここでは月探査用ペネトレータとして開発された槍型の物体の貫入特性の特徴について、簡単に触れることにする。

月面全体を数 m~10 m の厚さで覆っているレゴリス層は非常に細かい粒度の砂である。このような物質の中での物体の運動を純粋理論的に予測するのはきわめて困難であるために、ペネトレータの貫入特性のキーポイントは実験的に決める必要がある。

図 1 に宇宙科学研究所ペネトレータ開発チームが月レゴリス模擬砂を使って貫入実験を行って得た実験結果の一例を示す²⁾。これらの実験結果から色々な大きさ、重量、速度で貫入したペネトレータの貫入深さはおよそ次のような式で表されることが判明した。

$$d = aN \frac{M}{S} \log \left\{ 1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right\}$$

ただし、

d ：貫入深さ

v ：衝突速度

v_0 ：砂の硬さに対応した速度の次元を持つ係数

N ：ペネトレータの先端形状による係数

図 1 ペネトレータ衝突速度と貫入経路長の関係。データは突入角度が 50°（水平面からの角度）で迎角がゼロの場合の色々な形のペネトレータに関するものをまとめたもの。□と+印は先端形状が先を切ったコーン型のもの、△と逆△は先端がオジャブ型のもの

M ：ペネトレータの質量

S ：ペネトレータ構体の最大断面積

a ：砂の硬さに依存する比例数

上式の形そのものはペネトレータが砂中で受ける抵抗が速度の 2 乗に比例するとした時に得られるものであり、これが実験データと比較よく合うことは興味深い。しかし実際のペネトレータが砂中での減速を記録した加速度記録から見ると、ペネトレータの受ける抵抗は速度の 1.5~2.0 乗に比例しているように見える³⁾。

一方、貫入距離の予測が上の式から付けられれば、これによりペネトレータが受ける平均的な加速度（実際には減速度） G の推定がつく。現在宇宙科学研究所で開発されている月探査用ペネトレータでは、衝突速度が 300 m/s、貫入距離が 2 m、ペネトレータの平均的な加速度は 2 250 G 程度であるが、最大加速度は約 10 000 G に達する。

このような貫入特性からペネトレータはその概念上、惑星表面での衝突時に大きな加速度を受ける。ペネトレータ内部に搭載される機器は高い耐衝撃性を持たなければならない。高い耐衝撃性を機器に持たせる基本的な原理は、衝撃を受けることによって、機器コンポーネントのそれぞれが大きなひずみを持たないように工夫することであり、そのためには衝撃力をなるべく大きな面で支えることである。月探査用ペネトレータでは可動性の必要な地震計などの一部分を除いてはすべてのコンポーネントがエポキシ樹脂とガラス性のマイクロバルーンの複合体でポッティングされて、耐衝撃性を高めている。

4. LUNAR-A ペネトレータの概要

ペネトレータによる月内部計測の第 1 番目のミッションとして計画されているものが、1998 年度に打ち上げられる予定の LUNAR-A ミッションである。このミッションでは、月探査機は近月点、遠月点の月面からの距離がそれ

図2 月ペネトレータの月面貫入までのシーケンスの概略

図3 LUNAR-Aのペネトレータの月面での観測状況の模式図

ぞれ 45 km, 200 km になるような月を周回する楕円軌道に投入される。ペネトレータはこの探査機から切り放され、図2に示したようにペネトレータ後端に取り付けられた小型の逆推進ロケットにより軌道速度を打ち消し、高度約 25 km から自由落下をはじめ。ペネトレータは自由落下中に姿勢制御を行い、月面衝突時にはペネトレータは月面に対して垂直になる⁴⁾。月面への衝突速度は自由落下開始高度によって決まっており、約 280 m/s である。

このように月面へ投下されたペネトレータは地下約 2 m の深さまで貫入し、静止する(図3参照)。月面表層の物

質は電気伝導率はきわめて低いために、この深さからでも電波によって上空の母船と交信することが可能である。LUNAR-A の場合は、約 2 週間ごとに上空に飛来する母船に 400 MHz の UHF 帯を使ってデータとコマンドを転送する。

ペネトレータの内部に搭載されている計測機器としては、加速度計、傾斜計、地震計、熱流量計がある。加速度計はペネトレータの月面貫入時の衝撃を計測し、ペネトレータの貫入速度、貫入深さを求めると共に、これらより月面表層の力学的性質を求めようとするものである。傾斜計はペネトレータがどのような姿勢(鉛直からの角度)で静止しているかを把握しようとするものである。これは熱流量計の観測と組み合わせて、月内部の温度勾配を推定する時に必須の観測である。地震計、熱流量計については別項でさらに詳しく述べることにする。

ペネトレータの電力はすべて内部に搭載された塩化チオニル系リチウム電池でまかなわれる。電池部分は単 3 電池型のもの 106 本で構成されており、合計約 600 W・h の電力を供給できるものである。母船との通信はペネトレータ最後部に搭載されているアンテナによって行われる。ペネトレータからの送信は 1 W の送信機を使い、母船と 1~0.256 kbps の送信レートが得られるものである。

5. LUNAR-A 計測機器

5.1 地震計

月の内部を調べる方法には色々なものがあるが、もっとも直接的なものは地震波を使ったトモグラフィの手法を使うものである。これは地球の内部構造の解明に利用されているものであるが、基本的には月の内部構造を明らかにすることにも応用できる。しかしこのためには地球の地震観測網と同程度の密な観測ネットワークが必要である。先に述べたように月面に観測網を展開するにはペネトレータが有効であると思われるが、LUNAR-A はこの最初の試みである¹⁾。

地球の地震に比べ月の地震(すなわち月震)はきわめて小さなエネルギーのイベントであるが、地震以外の原因による地面の振動(雑音振動)は月面では地球に比べ圧倒的に小さいので、地震計の感度を十分高くすることができれば、このように小さな月震でも検知できる月震計を製作することが可能である。

図4にLUNAR-Aの月震計の概念図を示す。基本的にはこの月震計は電磁型地震計であり、強力な静磁場の中をばねにつるされたコイルが動く時に発生する電圧を通じてコイルの運動を検知するものである。従って月震計の感度は磁場の強さ、コイルの巻き数に比例するが、コイルの巻

サイズ ($D=5\text{cm}$, $L=5\text{cm}$)
 発電感度 $12\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{s})$
 固有周期 $T=1.0\text{Hz}$, 重量 350g

図4 LUNAR-A 用の月震計の構造の模式図

図5 LUNAR-A 用月震計のレスポンス曲線。比較にアポロ計画で使われた月震計の性能も示した

き線の長さが長くなりすぎると、この線に発生する熱雑音電圧が回路系の雑音を支配するようになる。また月震計が月面の動きを記録できる周波数帯域は、ばねとコイルがつくる力学系の特性と記録をディジタル化するサンプリング間隔（周波数）によって決まる。図5にLUNAR-A月震計の周波数特性を示す。これから分かるように、この月震計の感度が高い範囲は $8 \sim 0.7\text{Hz}$ 程度である。この周波数範囲の上限（ 8Hz ）は、月震計のデータ数を通信の制約上サンプリング周波数を 16Hz にするためのフィルタ特性によるものであり、周波数の下限（ 0.7Hz ）はばねの固有周期を 1.0s 以上にするのが重量、体積の制限上

困難であったことに起因している。

アポロ計画で設置された月震計の記録によれば、月震波のエネルギーの大部分が $1 \sim 2\text{Hz}$ 周波数帯域にあるので、LUNAR-A月震計はアポロ月震計よりも10倍程度高い感度で月震を観測することができる。絶対的感度としては、月面が振幅 $1\text{A}/\text{Hz}$ の振動を行えばこれを検知する能力がある。

地震計は本来的には上下動1成分、水平動2成分の3個のセンサが1組になっている。しかしペネトレータの体積が限られているために、LUNAR-Aペネトレータには上下動1成分、水平動1成分のものしか搭載されていない。地動の上下動、水平動を感知するためには月震計の感度軸をそれぞれ正しく鉛直、水平に設定する必要があるが、ペネトレータの機軸が必ずしも鉛直になるとは限らない。地震計は2軸の回転軸をもつ回転機構の中に搭載され、ペネトレータ貫入後に回転機構を駆動し、月震計を正しい方向に向けることができる仕組みになっている。

月震計は常時アナログセンサ部分のみが働いており、このアナログ部分の256秒間のみがバッファメモリー上で記録されつつ次々と更新される。一方これらのアナログ信号はアナログ的に2つの時定数をもつ積分回路に入れられ、雑音と信号の比較を常時行い、月震の到来を監視する。あらかじめ設定した基準により、信号が月震到来と判定されれば、メインのADコンバータ、CPU、メモリーが起動されその後の信号を記録する。この記録も最初の256秒間のデータを調べて、この記録がさらに月震の信号らしいと確認されて初めて本格的にデータ取得を開始する。さらにその後、この月震の規模その他の情報を推定し、推定された月震の規模に応じて信号を記録する時間を決定し、無意味なデータとなるべくとらないようにしている。

5.2 熱流量計

月の内部から表面に出てくる熱流量は月の内部の温度を推定する上でもっとも基礎的なデータであると同時に、この熱を生み出しているU、Th、Kなどの放射性発熱元素の存在度を推定する上でも重要な情報を与えてくれる。これらの元素の存在度は月を作ることになった材料物質の宇宙化学的な特徴を明らかにする点で、月の起源を考える上でも重要である。

月の熱流量を計測するためには、月の内部において温度が深さと共にどう変化するかを表す dT/dz と月の物質の熱伝導率 K をそれぞれ測定する必要がある。この方法は地球の熱流量を計測する時にも使われる方法であるが、地球の陸上では、気温の年変化、地下水の流動などにより、地表面の近くでは温度が乱されており、多くの場合信頼できる dT/dz を計測するためには 100m 以上の深さの穴を掘らなくてはならない。幸い月の場合は地下水が流れていないことや、月の表面の熱伝導率がきわめて低いために、月の日周、年周変化の影響は深さ 30cm 以深には実質上

図6 LUNAR-A用の熱伝導率計の概念図

及ばない。このことからペネトレータの機体軸に沿った方向に何点かの温度を測定することで、月の色々な深さでの温度を計ることができる。

月の表層の色々な深さでの温度は、ペネトレータの表面およびペネトレータ内部に埋め込まれた熱電対（クロメル-アルメル）および白金抵抗温度計によって測定する。

月表層物質の熱伝導率計の概観を図6に示す⁵⁾⁶⁾。熱伝導率測定の方法は月の物質の一部をある一定（5 mW）の電力で熱し、その部分の温度上昇率を測定することによって推定するものである。月物質の熱伝導率が大きいほど温度上昇率が小さくなるので、ヒータ加熱、ヒータオフの時の非定常温度変化のパターンから熱伝導率を決めることができる。図6で見ると、小型ヒータがペネトレータの外壁に埋め込まれる銅板の下に張られており、ヒータの中心部の温度が熱電対で測定される。この温度変化の大小が計測精度を左右するが、これにはヒータからの熱が有効に月物質へ伝達される必要がある。このため熱電対の直径を50 μm という極めて細いものにして、熱電対を通してなるべく熱が逃げないような注意もしてある。

月内部の温度と熱伝導率の測定から原理的には月内部からの熱流量が測定されるはずであるが、実際にはペネトレータという異物を月の内部に持ち込むことにより測ろうとしている月内部の温度場を乱す。このためペネトレータの貫入によりどれだけ月内部の温度場が乱されるかについて、十分な解析が必要である⁷⁾。このためにペネトレータそのものの比熱、熱伝導率など熱物性値をあらかじめ測定

しておかなければならない。この解析の精度が得られるべき熱流量の推定値の精度を決めると言って過言ではない。

6. 最 後 に

ペネトレータは将来の惑星探査において新しい展開を切り開く可能性を持ったものである。LUNAR-A 月探査計画におけるペネトレータはこのための最初の一步と位置づけられるであろう。LUNAR-A のペネトレータに搭載される地震計、熱流量計については重要な点について解説したが、ペネトレータの利用方法はこれらの観測機器以外にも数多くあると思われる。またこのようなペネトレータの技術は月・惑星探査以外にも色々な分野で利用可能なものと思われる。そのうちもっとも直接的な利用としては地球上で、人間が観測機器を運べないような、火山や南極のような地域での地球物理的観測をペネトレータを利用して行うことであろう。これらについてはすでに宇宙科学研究所と火山研究者、極地研究者との共同開発研究⁷⁾が進められており、将来性の高い観測手段を提供するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) H. Mizutani: Lunar Interior Exploration by Japanese Lunar Penetrator Mission, LUNAR-A, J. Phys. Earth, **43**, (1995) 657.
- 2) ISAS Lunar Penetrator Team: Report of the 12th Penetrator Impact Experiment, SES-TD-92-014, Inst. Space Astronaut. Sci., (1993) 240.
- 3) H. Shiraishi: Dynamical Characteristics of the Lunar Penetrator and Development of Accelerometer Onboard, Master Thesis, Univ. of Tokyo, Faculty of Science, (1996) 111.
- 4) Y. Morita, J. Kawaguchi, T. Nakajima, M. Hinada and T. Naide: Attitude Dynamics of the LUNAR-A Penetrator, Proc. AIAA/AAS Astrodynamics Conf., AIAA 92-4370, (1992) 6.
- 5) K. Horai, A. Fujimura, S. Tanaka and H. Mizutani: Measurement of the Lunar Regolith Thermal Conductivity in the LUNAR-A Mission, Lunar Planet Sci., **XVI**, (1991) 360.
- 6) S. Tanaka, K. Horai, H. Mizutani, A. Fujimura, M. Hayakawa, H. Araki and M. Abe: Heat Flow Measurement by Lunar Penetrators, Proc. ISAS Science Spacecraft and Space Observation, (1992) 229.
- 7) K. Shibuya, M. Kasahara, M. Hayakawa, A. Fujimura, K. Kaminuma and H. Mizutani: Application of GPS Differential Positioning for the Development of the Antarctic Penetrator, J. Phys. Earth, **41**, (1993) 291.