

# H-IIを利用した月遠隔探査ミッションについて

佐々木進<sup>1</sup>、飯島祐一<sup>1</sup>

宇宙科学研究所と宇宙開発事業団とが協力して、21世紀初頭にH-IIロケットを用いた大型の月遠隔探査計画を実施するための準備検討が現在急ピッチで進められている。この計画は、月の科学探査と月面利用の可能性の調査という2つの側面をもった探査計画であるが、本稿では主として科学探査計画の側面から紹介する。この探査計画は、実施体制など今後すみやかに乗り越えるべき課題もあるが、科学ミッションとして充分練り上げられた計画を持って臨めば、月の科学の分野で目覚ましい成果をもたらすことができるだけでなく、広く惑星科学の興隆に寄与できると期待されている。既に我が国の惑星探査ミッションとしては、宇宙科学研究所の計画として、M-Vロケットを用いたルナA、プラネットB、ミューゼスC計画が進められつつあるが、宇宙開発事業団のH-IIロケットを用いた惑星科学探査計画が実現すれば、科学者にとってより幅の広い探査計画の視野が開けてくることになる。

## 1. 計画が生まれた背景と準備の状況

我が国の月探査計画の最初の組織的な検討は、1985年に宇宙科学研究所に設置された月探査ワーキンググループにより行われた。このワーキンググループは、宇宙科学研究所の次期ロケットM-Vを用いて実施する月科学探査の検討を行い、1987年に宇宙理学委員会に月ミッション提案書<sup>[1]</sup>を提出した。この提案は、ペネトレータミッションと

遠隔探査ミッションを2機連続ペアで実施したいというものであった。しかしながら、この内、ペネトレータによる月内部構造探査計画は認められルナA計画としてスタートしたが、月の遠隔探査計画は認められなかった。月起源と進化の解明という点では、内部構造探査とともに遠隔探査によるグローバルマッピングという両輪が必須であることから、月遠隔探査についてもその本格的な実施が固体惑星科学者により望まれていた。

我が国の固体惑星探査の将来計画については、これまで宇宙科学研究所の月・惑星将来計画ワーキンググループや日本惑星科学会の将来計画委員会で議論されてきた。一方1994年には、宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会から、21世紀初頭からH-IIロケットを使った一連の月探査を宇宙科学研究所と宇宙開発事業団とが協力して実施するとの考えが示され、本年1月の宇宙開発政策大綱の改定では基本方針の一つとして取上げられるに至っている。H-IIによる月探査は、これまでの宇宙科学研究所の科学衛星計画よりも大型であり、惑星科学のソサエティ全体にとっても大きな影響を持っているので、固体惑星グループとして全国的に関心をもった研究者が集まり、将来の月探査の科学的意義や実施体制などについて議論してきた。

これらの議論の結果、H-IIを用いた月探査は科学者が積極的に取り組むべきものであり、また第1号機のミッションとしては、月周回衛星を使った遠隔探査手法によるグローバルマッピング探

<sup>1</sup>宇宙科学研究所

査から始めるべきとの大筋の結論に達している。これらの検討に参加したグループが中心となり、1995年11月には宇宙科学研究所の宇宙理学委員会に月周回衛星ワーキンググループの設置を提案し、審議の結果認められた。月周回衛星ワーキンググループのメンバーは、大学や国立天文台などの文部省の機関のみでなく、宇宙開発事業団や通産省、郵政省、建設省などに属する研究機関のメンバーにより構成されている。1996年1月現在、ワーキンググループでは、搭載科学機器候補の検討、本ミッションの概念設計、実現可能性の検討などを精力的に進めている。これらの検討結果はミッション計画提案書としてまとめられ、本年3月中旬ごろ宇宙理学委員会へ提出される予定である。ミッション計画提案書が宇宙理学委員会で認められれば、実施すべき宇宙科学計画として予算申請が行われ、実現への第一歩を踏出すことになる。

## 2. 月遠隔探査ミッションの概要

### 2.1 現在検討されている探査計画全体の概要

打ち上げは、2002年が現段階の目標と考えられている。ミッション計画については、これまで宇宙開発事業団でその全体の概念が検討されている[2]。探査機はH-IIで打ち上げられ、ホーマントランスファー軌道で月周回軌道に投入される。月周回軌道での探査機のドライ重量（燃料以外の重量）は約1600Kgであり、遠隔探査用の科学機器が約300kg、着陸機重量が約410kgと見積もられている。月周回軌道は、今後の各科学探査項目からの要求を考慮して決められるが、現在では一つの案として、高度100kmの準極軌道が考えられている。ミッションの最終段階では、月面の磁場探査のために高度を下げる案も検討されている。姿勢は、遠隔探査機器群の視野が常時月面を向くよう、3軸姿勢制御を行うことが考えられている。画像機器が搭載されると想定されるため、扱うデータ量は非

常に大きいものになる。地上へのデータ回線として15MBPS程度、データ記録容量として10GB程度が必要と見積もられているが、その実現には搭載通信系だけでなく地上の受信設備も含め今後検討が必要である。ミッション期間は、1年から2.5年程度が想定されている。着陸機は月面軟着陸技術の実証を目的としたものではあるが、電波源など小型の科学機器を搭載することも検討されている。着陸実験機は月周回軌道投入後、早い段階で切り離されることになっており、データは周回衛星を経由せず直接地上に送信される。

### 2.2 現在提案されている科学探査項目の概要

H-IIを利用した月遠隔探査ミッションでの科学探査項目については、固体惑星科学研究者のグループが検討した「大型月科学探査検討報告書」（平成7年7月及び11月）[3]に詳しく述べられている。1995年12月に開催された月周回衛星ワーキンググループ会議では、本ミッションではこれまで得られている月の科学の知見に対し、数倍という成果のレベルではなく一桁上の成果を目標とすべきであるとの議論がなされている。ここでは、月周回衛星ワーキンググループの中で現在検討が進められている科学探査項目の候補について、その概要を紹介する。

#### (1) 月表面の元素及び鉱物のグローバルマッピング

これにより、月の地殻の組成やバルク組成の推定、ひいては月起源の解明にせまろうとするものである。搭載科学機器としては、蛍光X線分光計、ガンマ線分光計、可視赤外撮像分光計が候補となっている。幸い月周回ミッションの実施が想定されている2000年初頭は太陽活動が盛んであり、月面からの蛍光X線の励起が強いと予測されるため、主要元素以外の元素の検出も可能であると期待されている。太陽活動が盛んである点は、誘導核のガンマ線計測にとっても有利である。高波長分解

能を持つ可視赤外撮像分光計では、カンラン石、斜方輝石、単斜輝石、斜長石などの鉱物組成比を求めることが期待できるが、地上へのデータ伝送速度の制約を考慮した空間、波長分解能の最適設定の検討が必要とされている。

## (2) 月表面の地形のグローバルマッピング

上述の組成探査と合わせて、地質構造の成因、熱史、進化の解明を行う。搭載科学機器としては、可視TV、高度計、レーダーサウンダーが候補である。これらは別途計測される重力データと組み合わせることにより、地殻の構造や厚さの情報をもたらす。月は、数m~数十mの厚さのレゴリスの下に地殻や基盤が存在すると考えられているが、レーダーサウンダーはその構造地形（断層、火山、溶岩流など）や鉱床についての情報をもたらすことができる。地形と元素や鉱物の関係から地質構造の成因の推定も可能となる。また、月の地形の情報は、その火成活動、膨張、収縮などの熱史と進化の研究を行うためにも不可欠である。斜長石地殻からなる高地は、マグマオーシャンから軽い斜長石が分化し表面に浮上して形成されたものか、またはマグマが何度も地殻に貫入した結果形成されたものとの二説があるが、地殻の組成のばらつきを観測することにより、これらの問題に一定の制約を与えることができる。月の表面には、40億年以上前の激しい隕石の衝突の歴史が刻まれている。これらのクレータとその周辺を探査することにより初期太陽系空間の様相を明らかにすることができる。また、地形の情報は、将来の地震計設置場所やサンプリング場所などの選定や、月面天文台など科学施設の設置場所の選定にも必要である。

## (3) 磁場のマッピングと月の電磁的性質の計測

月表面や月岩石には、微弱ではあるが磁場が確かに存在する。その形成機構として、初期のダイナモ作用、月形成時の宇宙空間磁場の残留、隕石

の衝突による励起磁場の焼きつきなどが提案されているが、決定的な説はない。月磁場がなぜ形成されたかを解明することは、月科学の重要な課題の一つとされている。また月の電磁応答を調べるための磁場探査は月の電気伝導度や内部構造を解明するための有力な方法とされている。月表面の遠隔磁場探査のためには、高度80km以下の軌道をとる必要があると同時に、衛星本体からの磁場の影響を避けるための技術的対策が必要である。一方、変動する太陽風磁場や地球のジオテイル通過を利用した月の電磁応答探査では、月の周回衛星だけでなく着陸機にも磁力計を搭載する必要がある。このための磁力計は着陸機自体からの磁場の影響を避けかつ夜の低温に耐えるためのアイデアが必要である。

## (4) 月の慣性能率と秤動の計測

周回衛星及び月面に電波源をセットすることにより、月の慣性能率を精密に決定することができる。この手法は相対VLBIと呼ばれて国立天文台のグループにより検討が進められており、電波源本体についても既に基礎開発研究が行われている。月の慣性能率の精密な値は、月の中心核の大きさの情報と組み合わせることにより、中心核の成分を正確に推定することが可能となり、ひいては月起源の解明に寄与することができると期待されている。

## (5) 月環境の計測

月の放射線環境、ダスト環境、電磁環境の研究は、将来の月環境利用のために不可欠であるだけでなく、それぞれ固有の重要な科学的意義を含んでいる。磁場の影響を受けない月面での放射線の精密観測は、太陽フレア粒子と銀河宇宙線の研究に大きな寄与をすると期待される。質量分析機能付きダスト計測器による計測は、起源の推定など宇宙ダストの研究に新しい展開を与える。太陽風粒子計測器や波動観測装置は、太陽風そのものの観測だけでなく、太陽風と月との相互作用を明ら

かにすることができる。また、コヒーレントなS,Xバンド波を利用した電波科学により、高度30km付近まで存在していると言われている月電離層についても検証が可能であると考えられている。

(6) 月からの科学観測

この分野の研究としては、月周回衛星からの惑星電波の観測と地球周辺環境の撮像計画が提案されている。衛星が月の裏側にまわり込んだ時には、

地球からの電磁ノイズが遮蔽されるため、木星電波などの惑星電波を高感度で観測することができる。地球撮像計画は、月付近の軌道が地球周辺を撮像する観測点として適していることを利用したものであり、これにより地球磁気圏の巨視的な構造を解明しようとするものである。現在、撮像対象として、極端紫外光、真空紫外から近赤外領域の分光、高速中性粒子が検討されている。

事項	ルナA	ルナ プロスペクタ	H-IIを利用した月遠隔探査ミッション (下記は全て検討中の案)	モロ(MORO: Moon-orbiting Observatory)
打上年	1997年	1997年	2002年	2003年
打上機	M-V	Lockheed Launch Vehicle	H-II	Arian-5 Share Flight
軌道	軌道傾斜角25度 200 - 300 km	極軌道 100 km	準極軌道 100 km前後	極軌道 100 km
探査	ペネトレータ 遠隔(TV)	遠隔	遠隔、着陸実験機	遠隔
衛星重量	540 kg	233 kg	2800 kg	1200 kg
科学観測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・月震</li> <li>・熱流量</li> <li>・TVカメラ(遠隔探査)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>\gamma</math>線分光計</li> <li>・中性子分光計</li> <li>・磁力計、電子反射計</li> <li>・<math>\alpha</math>粒子分光計</li> <li>・ドップラー重力計測実験</li> </ul>	(検討中の項目) <ul style="list-style-type: none"> <li>・蛍光X線</li> <li>・<math>\gamma</math>線分光計</li> <li>・レーザーリダリング</li> <li>・可視赤外線撮像分光計</li> <li>・可視カメラ</li> <li>・レーザー高度計</li> <li>・電波源による相対VLBI</li> <li>・磁力計</li> <li>・高エネルギー粒子線</li> <li>・宇宙ダスト</li> <li>・電磁環境</li> <li>・惑星電波観測</li> <li>・地球周辺イメージャー</li> </ul>	(候補) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ステレオカメラ</li> <li>・紫外・可視・赤外線撮像分光計</li> <li>・<math>\gamma</math>線分光計</li> <li>・マイクロ波計測器</li> <li>・サブミリメートル実験</li> </ul>

表1 今後実施が予定あるいは検討されている月探査ミッションの比較。衛星重量は燃料を含んだ重量。H-IIを利用した月遠隔探査ミッションの内容については、1996年1月現在、月周回衛星ワーキンググループが検討している暫定的な案である。

### 3. 月遠隔探査ミッションの位置付け

月の探査は1950年代に始まり、ルナ、レンジャー、ルナオービタ、アポロの計画で1970年代初頭まで活発に行われた。その後しばらくは探査計画は実行されなかったが、1990年代に入ってからガリレオとクレメンタインが遠隔探査を行っている。月探査に対する国際的な関心が再び高まる中で、今後も我が国のルナA計画(1997年)を始め、米国のルナプロスペクタ(1997年)、ヨーロッパのモロ計画(2003年)が計画されている。本計画の実施は、現時点ではモロ計画の直前に設定されているが、これら他の月ミッションでの探査内容を充分考慮した上で、本ミッションでの科学探査の項目を設定する必要がある。これらの探査ミッション計画と本計画との比較を表1に示すが、本計画は他のミッションと比較して大型であることが特徴となっている。

一方、この月遠隔探査ミッションは、前述の「大型月科学探査検討報告書」の中で提案されているH-IIによる一連の月探査構想の第1号機として位置付けられているものである。21世紀初頭からのこの一連の月探査構想では、第1号機での遠隔探査ミッションの後、月面上に展開する地震計ネットワークによる月内部構造探査、さらにその後、ローバ探査とサンプルリターン計画が、一連の有機的なつながりをもった科学ミッション計画として提案されている。これらの大型月探査計画と我が国の他の惑星探査計画の関連を図1に示す。

### 4. 科学ミッションとしてスタートするために

H-IIによる月の遠隔探査計画は、前節で述べたように他の今後の月探査計画と比較しても大型の計画である。大型の探査計画が必ずしも、大型の科学成果をもたらすとは言えず、大型であるがために科学計画として必要な融通性や機動性が充分確保できない可能性も指摘されている。しかしながら、科学ミッションとして十分な検討と周到な準備を行えば、大型であることを存分に活かした科学探査ミッションが可能であると期待される。科学探査ミッションの成否は、他の科学プロジェクトと同様、結局はどれだけ多くの科学者が燃えるような情熱をもって参加するかにかかっている。本計画を有意義な科学ミッションとしてスタートさせるため、より多くの惑星科学者がこの計画に積極的に参加することが期待されている。

### 参考文献

- [1] 宇宙科学研究所 月探査ワーキンググループ、1987：月ミッション計画書
- [2] 宇宙開発事業団、1995年10月：月周回観測・着陸実験衛星システム構想
- [3] 宇宙科学研究所 大型月科学探査ワーキンググループ、1995年7月及び11月：大型月科学探査検討報告書

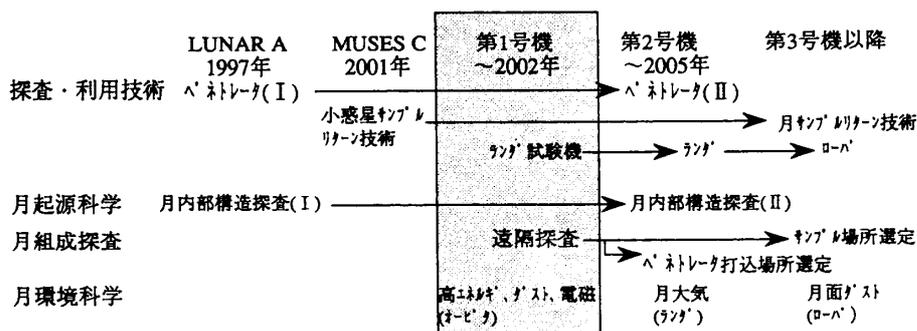


図1 H-IIを利用した一連の月探査ミッション構想と他の固体惑星ミッションの中での第1号機(月遠隔探査ミッション)の位置付け。