

SELENE「月探査周回衛星」ミッションについて

佐々木進¹⁾、飯島祐一²⁾、加藤学³⁾、滝沢悦貞⁴⁾

宇宙科学研究所¹⁻³⁾、宇宙開発事業団⁴⁾

- 1) 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, 0427-59-8332, sasaki@newslan.isas.ac.jp
- 2) 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, 0427-59-8184, iijima@planeta.sci.isas.ac.jp
- 3) 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, 0427-59-8369, kato@planeta.sci.isas.ac.jp
- 4) 茨城県つくば市千現 2-1-1, 0298-52-2240, takizawa@rd.tksc.nasda.go.jp

あらまし 2003年に予定されている月探査周回衛星 SELENE (Selenological and Engineering Explorer) ミッションでは、H-IIA ロケットを用いて、月の極軌道周回衛星とリレー衛星で構成される大型の探査機を月に送ることが計画されている。この計画の科学目的は、月の起源と進化の研究、月環境の解明、月からの科学観測の3本柱から成っている。月の起源と進化の研究は、月面の元素や鉱物、月表層の構造、月磁場のグローバルマッピングと月重力場の計測により行う。月環境については、電磁環境、高エネルギー粒子環境、プラズマ環境を計測する。月からの科学観測では、地球プラズマ圏の撮像と惑星電波の観測を行う。観測機器の総重量は約 275kg、ミッション期間はノミナルで14ヶ月が予定されている。

キーワード 月ミッション、月科学、月の起源と進化、月環境

Scientific Objectives of SELENE Mission

S. SASAKI¹⁾, Y. IJIMA²⁾, M. KATO³⁾ and Y. TAKIZAWA⁴⁾

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)¹⁻³⁾
National Space Development Agency of Japan (NASDA)⁴⁾

- 1) 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 0427-59-8332, sasaki@newslan.isas.ac.jp
- 2) 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 0427-59-8184, iijima@planeta.sci.isas.ac.jp
- 3) 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 0427-59-8369, kato@planeta.sci.isas.ac.jp
- 4) 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 0298-52-2240, takizawa@rd.tksc.nasda.go.jp

Abstract A moon-orbiting observatory mission, SELENE (Selenological and Engineering Explorer), is planned for 2003. The SELENE will consist of a main orbiting satellite at about 100 km altitude near the polar circular orbit, a relay satellite on an elliptical orbit with an apolune at 2400 km, and a landing module (propulsion module). The scientific objectives of the mission are; 1) study of the origin and evolution of the moon, 2) in-situ measurement of the lunar environment, and 3) observation of the solar terrestrial plasma environment from the lunar orbit. The SELENE will carry instruments for scientific investigation including mapping of lunar topography and surface composition, measurement of the gravity and magnetic fields, and observation of lunar and solar terrestrial environments. The total mass of scientific payload is about 275 kg. The mission period will be typically 14 months.

key words Lunar Mission, Lunar Science, Origin and Evolution of the Moon, Lunar Environment

1. はじめに

月は人類に最も身近な天体として、既に多くの探査機が訪れている。特に人類が初めて地球以外の天体に残すことになったアポロ計画（1969-1972年）では月についての膨大な知見が得られ、月に関する科学は飛躍的に進歩した。しかしながら、月の起源と進化という月科学の最も基本的な問題については、現在でも依然として未解決の問題として残されている。月の起源と進化の問題は、地球の起源と進化の問題にも直接関わっており、惑星科学の中でも最も重要な問題の一つとして位置付けられている。

アポロ計画以来しばらくは月の探査は行われなかったが、1990年代に入ってから月探査の機運が再びかまっている。1994年のクレメンタインに続き、今年に入ってからルナプロスペクタ [1] が探査を行っている。来年には我が国のルナA [2] がペネトレータを用いた月の内部構造探査を実施することを計画している。更にヨーロッパやロシアでも21世紀初頭の月探査ミッションの検討を進めている。

我が国では、ルナAに引き続く計画として、2003年を目指した月探査計画 SELENE [3] の準備が進められている。SELENEは我が国の大型ロケット H-IIA を用い、アポロ計画以来最大級の探査機を月に送り込み、月の起源と進化を解明するためのデータを取得すると共に、月面軟着陸等の将来の月探査に欠くことのできない技術開発を行うことを主な目的として計画されている。

2. SELENE ミッションの概要

図1にSELENEのミッション計画を示す。探査機は打ち上げられた後、直接、月遷移軌道に投入され、約5日間で月を周回する楕円軌道に到達する。月遷移軌道投入時の衛星の総重量は約2900kg、月軌道投入時の重量は約2000kgである。月楕円軌道から軌道制御マヌーバを繰り返し、最終的に高度100km、極周回のミッション軌道に到達する。途中、遠月点2400km、近月点100kmの楕円軌道の段階でリレー衛星を切り離す。ミッション軌道では月面のグローバルマッピングを行うとともに、リレー衛星経由の周回衛星のドップラ計測により月裏側の重力場データを取得する。約1年間の遠隔探査ミッション終了後は、周回衛星の推進機部分（推進モジュール）を切り離し、月面への軟着陸実験を行う。推進モジュールにはVIBI観測用電波源が搭載されており、リレー衛星に搭載される電波源と組み合わせ、地上からの相対VLBI観測を約2ヶ月にわたって実施する。

図2に周回衛星の構成図を示す。周回衛星の姿勢は月面観測機器の視野方向である+z軸を月面方向、x軸を進行方向に向けるための3軸制御を行う。-y軸方向の太陽電池パネルは回転して太陽を追尾する。周回衛星は約2時間で月を周回する。隣接軌道間の距離は赤道上で約35kmであり、約1ヶ月でもとの軌道に回帰する。軌道の昇交点経度の調整を行うことにより、より細かいトレースでグローバルマッピング観測を行うことができる。周回衛星は、高速データレイトの画像機器を含むため、データレコーダの容量として約10ギガバイト、地上局へのデータ伝送の速度として約10Mbpsを予定している。

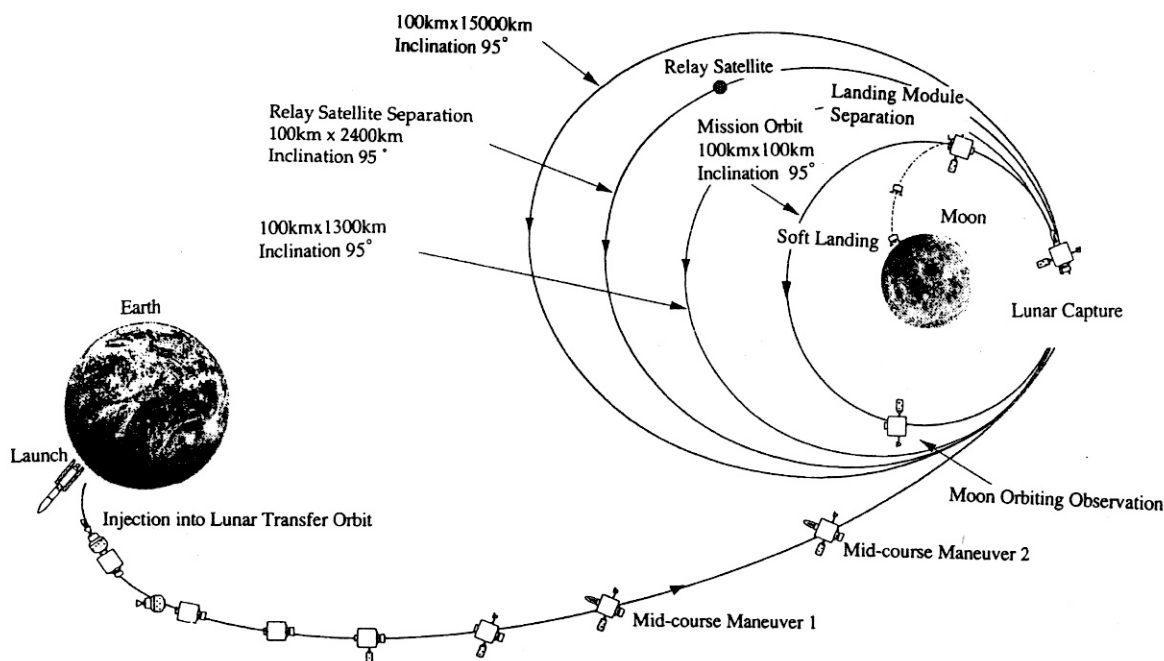


図1 SELENEのミッション計画

月周回衛星からの月面の探査項目として、蛍光X線と γ 線観測、撮像、可視近赤外分光観測、レーダによる地下探査、レーザによる高度計測、月磁場計測を行う。月環境の分野では、高エネルギー粒子、プラズマ、電磁波動を計測する。また、月からの科学観測として、地球周辺プラズマ環境の撮像と惑星電波の観測を行う。これら周回衛星による観測の概念を図3に示す。衛星がリム部を通過するタイミングを利用して、コヒーレントなS,X帯の電波を利用した電波科学手法による月電離層の検出も予定している。

3. 科学研究項目と搭載観測機器

月科学に関連する探査項目は、月面の元素、鉱物組成、表層地形・構造、磁場のグローバルマッピング、及び重力場計測である。これらの計測結果を組み合わせることにより、図4に示すようなアプローチで月の起源と進化の謎に迫る。SELENEでは、月の環境計測と月からの科学観測を行う機器を含め、表1に示すように全部で14項目の観測が行われる。

3.1 月表面の元素と鉱物組成のグローバルマッピング

元素及び地質、鉱物のグローバルマッピングを行うことにより、月の地殻の組成やバルク組成の推定を行うことができる。元素分布の計測は、蛍光X線分光計とガンマ線分光計で行う。蛍光X線分光計は、Si, Mg, Alなどの主要元素を、20kmの空間分解能で計測することができる。ガンマ線分光計は、U,Th,Kなどの放射性元素や10種類程度の元素の存在度を160km程度の空間

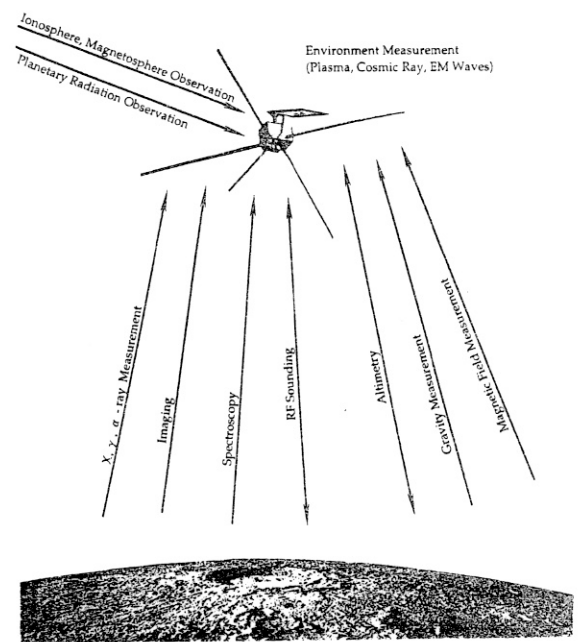


図3 周回衛星による観測の概念

分解能で計測することができる。21世紀初頭は太陽活動が盛んであり、月面からの蛍光X線や誘導核のガンマ線の励起が強いと予測されるため、この時期は通常の時期よりも高いS/N比での計測が可能となると期待される。またアルファ線分光計も搭載し、月面からのラドンやポロニウムの検出を行う。

地質の区分は、低波長分解能(0.4~1.6 μm を9バンドで計測)ではあるが高空間分解能(20m)の多色撮像を行うマルチバンドイメージャで行う。マルチバンドイメージャの空間分解能は、クレメンタインよりも

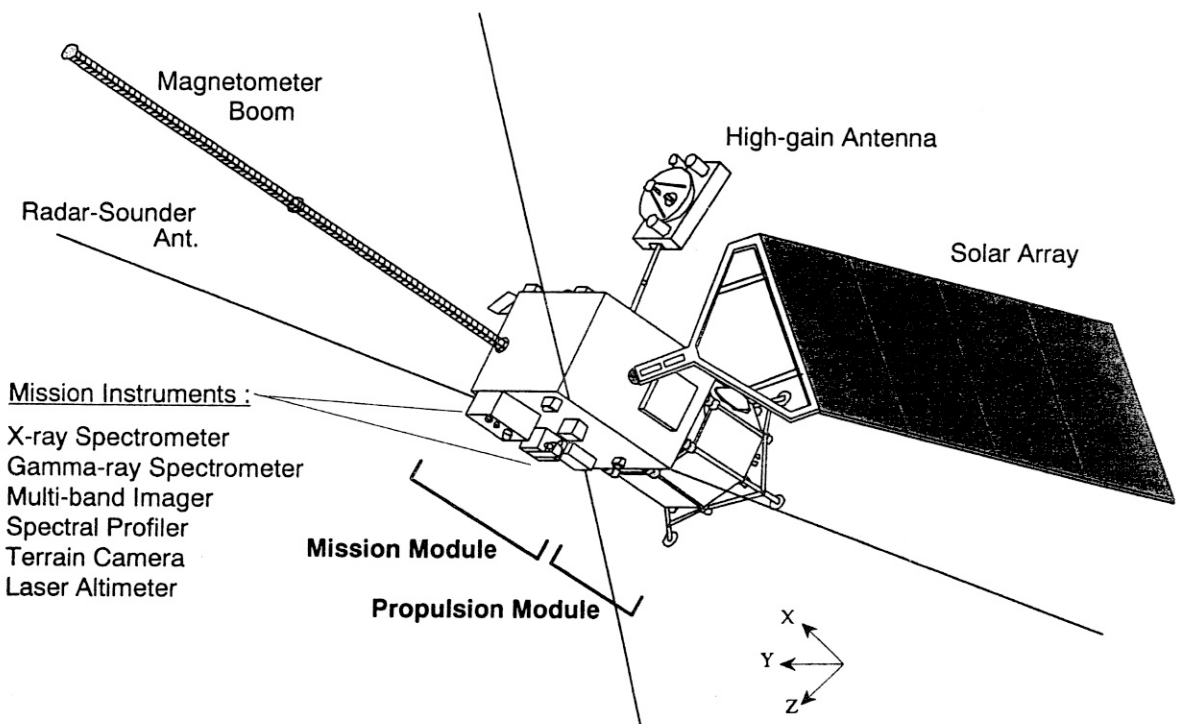


図2 周回衛星の機器配置図

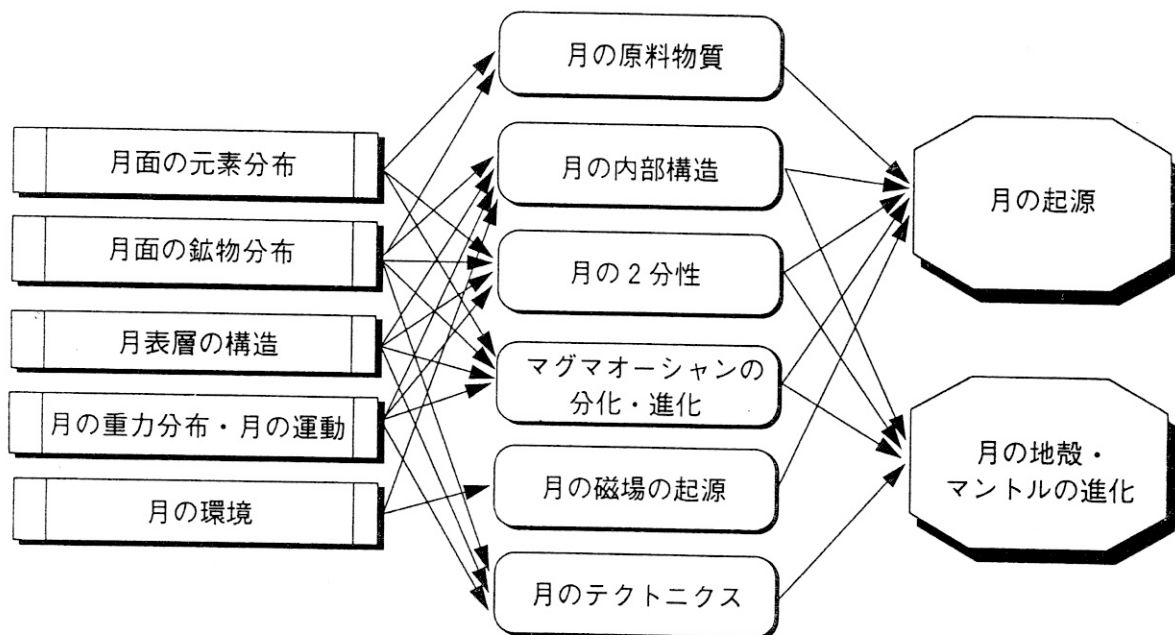


図4 月の起源と進化の研究のアプローチ

約1けた高い。鉱物の同定は、低空間分解能（500m）ではあるが高波長分解能（ $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ を $6 \sim 8\text{nm}$ でサンプリング）の分光が可能なスペクトルプロファイラで行う。スペクトルプロファイラにより、カンラン石、斜方輝石、単斜輝石、斜長石などの鉱物の同定を行うことができる。図5にマルチバンドイメージャとスペクトルプロファイラの観測の刈り幅の関係を示す。両観測器からのデータを相補的に組み合わせることにより、鉱物組成のグローバルマッピングが可能となる。また、地下100km程度の深部の物質が露呈している可能性のあるクレータの中央丘などの地形では、スペク

トルプロファイラの連続分光により、地下物質の鉱物を同定することも期待できる。

3.2 月表層のグローバルマッピング

月表層については、地形カメラ、レーザ高度計、レーダサウンダーによりグローバルマッピングを行う。地形カメラは、10mの空間分解能を持つステレオカメラである。レーザ高度計は、全球を軌道に沿って約800mごとに、高度分解能約5mでマッピングする。これらにより、従来のものよりもはるかに詳細な月地形図がほぼ全球にわたって得られるだけでなく、地形と元素や鉱物の相関から地質構造の成因の推定も可能となる。

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、地下5kmまでを分解能100mで探査できるレーダサウンダーにより、その構造地形（断層、火山、溶岩流など）や鉱床を探査することができる。図6にレーダサウンダーによる地下探査の概念を示す。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、レゴリスに埋もれている地殻の構造分布を明らかにすることにより、これらの問題の解決に寄与する。

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重要である。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、このミッションで得られる地形の情報は、将来の地震計設置場所やサンプリング場所などの

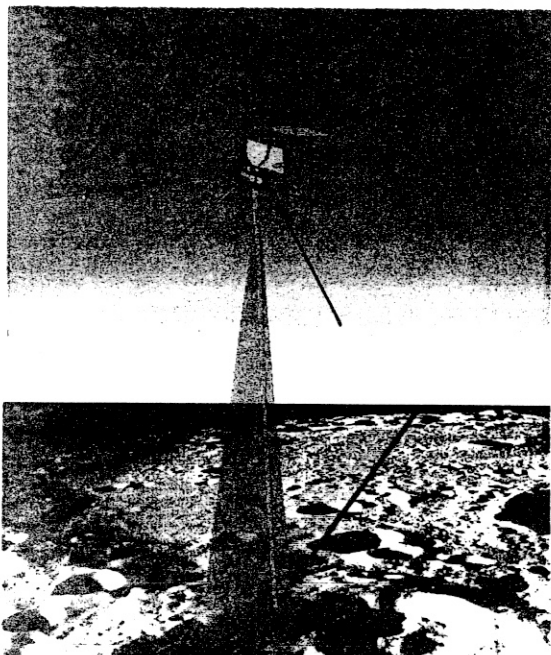


図5 マルチバンドイメージャの観測領域（幅17.5km）とスペクトルプロファイラの観測領域（幅500m）

計測項目	観測機器	観測方法・観測内容
元素分布	蛍光X線分光計	X線CCD検出器 Al, Si, Mg, Feのグローバルマッピング、空間分解能20km
	ガンマ線分光計	高純度Ge半導体検出器 U, Th, K等のグローバルマッピング、空間分解能160km
鉱物分布	マルチバンドイメージャ	紫外・可視・赤外撮影分光、0.4~1.6 μm を9バンドで観測、バンド幅20~30nm 月面地質区分、空間分解能20m
	スペクトルプロファイラ	可視・近赤外連続スペクトル分光、波長帯域0.5~2.6 μm 、サンプリング間隔6~8nm 鉱物同定・鉱物組成、空間分解能500m
地形・表層構造	地形カメラ	斜方視2台のカメラによる高空間分解能ステレオ撮像 空間分解能10m
	月レーダサウンダー	HF波（周波数5MHz）を用いて地下レーダ探査（深さ方向に約5km、約100mの分解能） アンテナ共用で太陽・惑星電波（10k~30MHz）の観測
重力場	レーザ高度計	Nd:YAGレーザレーダ（レーザ波長1064nm） 極暗黒域も含めた地形探査、約800m毎に計測（パルス間隔2Hz）、高度分解能5m
	衛星電波源・月面電波源	リレー衛星及び推進モジュールに搭載するS, X波電波源を用いた相対VLBI観測 リレー衛星の位置決定精度1m、着陸した推進モジュールの位置決定精度10cm
重力場	リレー衛星	周回衛星と地上局間のドップラー計測による月裏側の重力場計測 遠月点高度2400km、近月点高度110km（軌道投入時）
	磁力計	3成分フラックスゲート型磁力計 磁気異常のグローバルマッピング、確度0.5nT
月面環境	粒子線計測器	銀河宇宙粒子、太陽フレアに関連した高エネルギー重粒子の測定、低エネルギー領域（1~30MeV）、高エネルギー領域（8~300MeV）、月面からの α 線検出（4~6.5MeV）
	プラズマ観測器	プラズマの3次元質量・エネルギー分析（10eV/q~30keV/q）
	月電波科学観測	月リム通過時にコヒーレントなS, X帯電波を用い希薄な月電離層の検出
地球プラズマ圏	プラズマイメージャ	月から地球磁気圏・プラズマ圏を極端紫外~可視域により撮像

: 月の科学（月の起源と進化）
 : 月での科学
 : 月からの科学

表1 SELENE 搭載観測機器

選定や、月面天文台など科学施設の設置場所の選定にも役に立つと考えられる。

3.3 重力場探査

月の裏側の周回衛星の軌道をリレー衛星経由でドップラー観測することにより（図7）、これまでの月探査衛星で実現できていなかった月の裏側の重力データを100km以下の高空間分解能で取得することができる。これにより重力テクトニクスの議論が可能となり、レーザ高度計の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得ることができる。

また推進モジュールの月面軟着陸後は、リレー衛星及び月面の電波源からの電波を地上から相対VLBIの手法で観測し、それらの位置を極めて正確に決めることができる。これにより、月の重力場、秤動の振幅と周期をこれまでより1桁以上精度良く求める。重力場と秤動から求められる力学的扁平率により、月の慣性率を精密に決定できる。月の慣性率の精密な値は、LUNAR-A計画で得られると期待されている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であり、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。

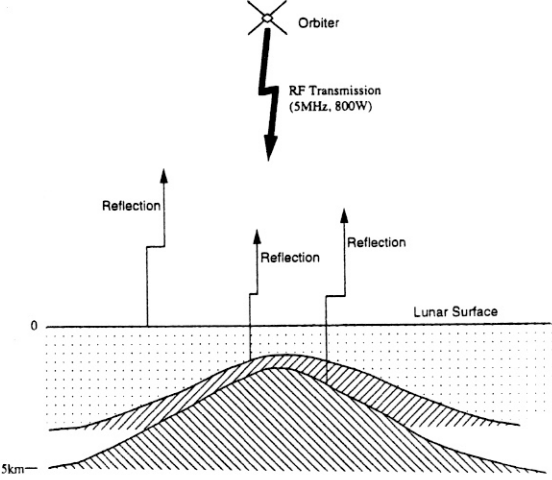


図6 レーダサウンダーによる地下探査の概念図

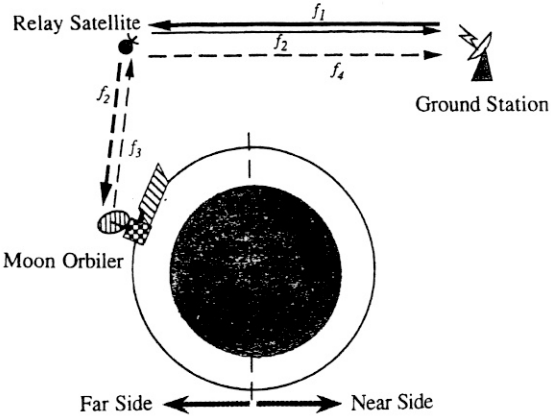


図7 リレー衛星による周回衛星のドップラー信号の中継

3.4 磁場探査

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ことがアポロによる観測や持ち帰った月岩石の分析により明らかにされており、ルナプロスペクタでも全球にわたる計測が進行中である。月磁場の形成機構として、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。月磁場がどのように分布しなぜ形成されたかを解明することは、月の形成と進化の研究に重要な制約を与えることになる。月表面の微弱な磁場探査のためには、できるだけ高度の低い軌道からの計測が望ましい。燃料に十分余裕がある場合には、高度100kmの約1年の周回探査の終了後、周回高度を数十kmまでに下げて観測を行うこともオプションとして計画している。

3.5 月環境の計測

月の放射線環境、電磁環境、プラズマ環境の研究は、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。高エネルギー粒子の観測は、同位元素にいたるまでの宇宙重粒子線を弁別して観測することで、太陽系や星間物質の組成とその進化の解明に寄与することができる。プラズマ観測器やレーダサウンダーに組み込まれる波動計測装置は、太陽風そのものの観測だけでなく、月のウェイク構造など、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バンドの通信キャリアを利用した電波科学により、高度20km付近まで存在している可能性のある希薄な月電離層についても検証を試みる。

3.6 月からの科学観測

SELENEでは月軌道からの科学観測として、惑星電波の観測と地球周辺プラズマ環境の撮像を行う。周回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、木星電波や土星電波などの惑星電波を高いS/N比で観測することができる。また、月の掩蔽を利用することにより、太陽電波源の分布と構造についても観測が可能となる。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、可視光から極端紫外光までの波長による観測により、オーロラの発達過程や地球プラズマ圏の巨視的なダイナミクスを解明することが期待できる。

4. まとめ

月探査周回衛星計画SELENEミッションの科学的課題と期待できる成果について記述した。SELENEでは

14項目の科学観測が予定されている。これにより、1) 月面の元素や鉱物、月表層の構造、月磁場のグローバルマッピングと月重力場の計測による月の起源と進化の研究、2) 月の電磁環境、高エネルギー粒子環境、プラズマ環境の計測、3) 月からの地球プラズマ圏の撮像と惑星電波の観測、が行われる。1996年にはこのミッション遂行のために200名以上の科学者、技術者からなるSELENEプロジェクトチームが組織された。1997年までのフェーズAスタディにより、このミッションの科学的意義と実現可能性が検討され、1998年からはプロジェクトの実行を前提としたフェーズBスタディが開始されている。

参考文献

- [1] Hubbard, G.S., Binder, A.B., Dougherty, T.A., and Cox, S.A., "The Lunar Prospector Discovery Mission: A New Approach to Planetary Science", 48th International Astronautical Congress, Turin, Italy Oct., 1997.
- [2] Mizutani, H., Nakajima, S., Kawaguchi, J., Saito, H., Fujimura, A., and Hinada, M., "Japanese Lunar Exploration, LUNAR-A", 30th COSPAR Scientific Assembly, Hamburg, Germany, July, 1994.
- [3] 月周回衛星ワーキンググループ、月探査周回衛星計画提案書、平成8年3月