

セレーネ計画による月の科学探査

○佐々木進、飯島祐一、田中孝治、加藤學、橋本正之、水谷仁、鶴田孝一郎（宇宙科学研究所）
滝沢悦貞（宇宙開発事業団）

Scientific Research and Instruments in the SELENE Mission

S.Sasaki, Y.Iijima, K.Tanaka, M.Kato, M.Hashimoto, H.Mizutani, K.Tsuruda, and Y.Takizawa

Key Words: Lunar Science, Lunar Exploration, Origin of the Moon

Abstract

SELENE(Selenological and Engineering Explorer) is a lunar orbiting mission for lunar science and technology development. 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. After launch failure of H-II-8 rocket in November 1999, the program has been rescheduled and the configuration of spacecraft has been modified. The soft-landing experiment was cancelled and launch date is changed to 2004 from 2003. In the new configuration, the spacecraft consists of a main orbiting satellite at about 100 km altitude in the polar circular orbit and two subsatellites(relay satellite and VRAD satellite) in the polar elliptical orbits.

1. 序論

月周回衛星セレーネ計画は、昨年のH-II-8号機の打ち上げ失敗後のプロジェクト見直しにより、打ち上げ年度が2003年から2004年に変更となり、着陸実験の実施も見送られることになった。ただし科学探査という点ではベースラインの変更はない。本ミッションの科学目的は、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本柱である。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270kg、ミッション期間はノミナルで12ヶ月が予定されている。

2. ミッションの背景

月科学の分野では、米国のアポロ計画(1969-1972年)で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根元的な問題について

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。

アポロ計画以来長い間月の探査は行われなかったが、1990年代以降月探査の機運が再び高まっている。1994年のクレメンタインに続き、1998-1999年にはルナプロスペクタ [1] が月探査を行った。今後も、2002年にはヨーロッパの遠隔探査ミッション SMART-1 [2] が予定されており、2003年には我が国のルナAがベ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。

セレーネ計画はアポロ以来最大規模の月探査計画として、2004年を目指して準備が進められている。この計画では最新技術を駆使した各種の遠隔探査センサーにより月面のマッピングを行うとともに、月重力場のデータを取得する。本ミッションによって得られるデータは、アポロ計画のデータがその後数十年にわたって惑星科学研究者に使用されたと同様、ミッション終了後長期にわ

たって世界の研究者の基盤データとして使用できるものと期待されている。

3. 観測計画の概要

探査機は各種のセンサーを搭載して遠隔探査を行う主衛星と月重力場の研究のための2機の副衛星（リレー衛星とVRAD衛星）から構成される。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2100kgである。月楕円軌道から軌道制御マヌーバを繰り返し、主衛星は最終的に高度100km、軌道傾斜角90度（極軌道）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、遠月点800km、近月点100kmの楕円軌道でVRAD衛星を切り離す。ミッション軌道では月面の全球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異常を測定する。またリレー衛星とVRAD衛星に搭載される電波源の地球からの相対VLBI観測により月重力場のデータを取得する。図1に各種搭載機器による観測の計画を示す。観測ミッションは約1年間実施されるが、軌道維持の燃料に余裕があれば観測ミッションは延長される予定である。

図2に周回衛星のセンサー配置を示す。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軸又は-x軸方向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、データレコードの容量として約100ギガビット、地上局へのデータ伝送の速度として10Mbpsを予定している。

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。



☆マサチューセッツ工科大学、スウェーデン、地形カメラ、蛍光X線分光計は日照時のみ観測。

☆プラズマイメージャは日陰時で表側の時観測。

☆電波科学はミッション期間中10回程度実施。

図1 セレーネの観測計画

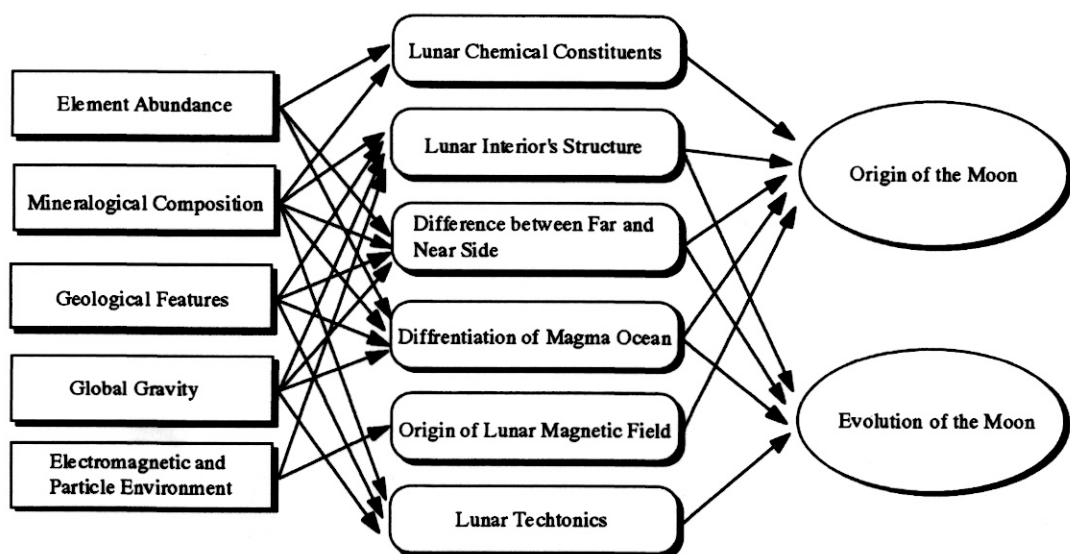


図4 月の起源と進化の研究のアプローチ

を行う。

地質の区分は、低波長分解能 ($0.4\sim1.6\mu\text{m}$ 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 ($0.5\sim2.6\mu\text{m}$ を6~8nm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。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。

4.2 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1600m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5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。

Measurement Item	Instrument	Characteristics
Element Abundance	X-ray Spectrometer	CCD 100cm ² , Energy range 0.7–8 keV, Resolution 90 eV, 5μm Be film, Solar x-ray monitor, Calibrator with sample, Global mapping of Al, Si, Mg, Fe distribution, Spatial resolution 20km
	Gamma-ray Spectrometer	High pure Ge crystal 250cm ² , Energy range 0.1–10MeV, Resolution 2–3 keV, Stirling refrigerator 80°K, Global mapping of U, Th, K, O, Al, Ca, Fe, Mg, etc., Spatial resolution 160km
Mineral Composition	Multi-band Imager	UV-VIS IR imager, Si-CCD and InGaAs, 9 bands in 0.4–1.6μm(Si: 415,750,900,950,1000; InGaAs: 1000,1050,1250,1550nm), Band width 20–50nm, Spatial resolution 20–60m
	Spectral Profiler	Spectrometer, Si pin photo-diode and InGaAs, Band 0.5 to 2.6μm, Spectrum Sampling 6–8nm, Spatial resolution 500m, Calibration by halogen lamp, Observation of standard lunar site
Topography, Geological Structure	Terrain Camera	High resolution stereo camera(±15°), Si-CCD, Spatial resolution 10m
	Lunar Radar Sounder	Mapping of subsurface structure, Frequency 5MHz(4–6MHz swept in 200 μs every 50ms), four-15 m antennas, 5km depth with 100m resolution, Observation of natural waves (10k–30MHz)
	Laser Altimeter	Nd:YAG laser altimeter (1064nm, 100mJ, 15ns), Si-APD, Beam divergence 3 mrad(30m spot) Height resolution 5m, Spatial resolution 1600m (pulse rate 1Hz)
Gravity Field	Differential VLBI Radio Source	Radio sources on Relay Satellite and VRAD Satellite(3 S-bands, 1 X-band), Several tens of mW, Differential VLBI observation from ground (3 stations or more)
	Relay Satellite	Far-side gravimetry using 4 way Doppler measurement, S uplink, S spacelink, X downlink, Perilune 100km and Apolune 2400km at orbit injection, Doppler accuracy 1mm/s(10sec)
Magnetic Field	Lunar Magnetometer	3-axis flux gate magnetometer, Accuracy 0.5nT, 32 Hz sampling, Mast 12m, Alignment monitor
Lunar Environment	Charged Particle Spectrometer	Measurement of high energy particles, Si-detectors, Wide energy range 1.8–28(p), 4–113 MeV(Fe), High energy range 50–430MeV(Fe), Alpha particle detector 4–6.5MeV, 400cm ²
	Plasma Analyzer	Plasma energy and composition measurement, 5eV/q–28keV/q(ion), 5eV–17keV(e)
	Radio Science	Detection of tenuous lunar ionosphere using S and X band coherent carriers
Earth Ionosphere	Ionosphere	

□ : Science of the Moon (Origin and Evolution)

□ : Science on the Moon

■ : Science from the Moon

表1 SELENE 搭載観測機器

4.3 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6)、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、リレー衛星及びVRAD衛星の電波源か

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、月の重力場をこれまでより1桁以上精度良く求める。月の重力場の精密な値は、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。

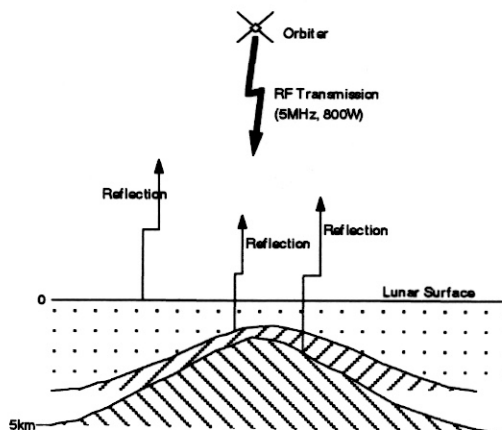


図5 レーダサウンダーによる地下探査の概念図

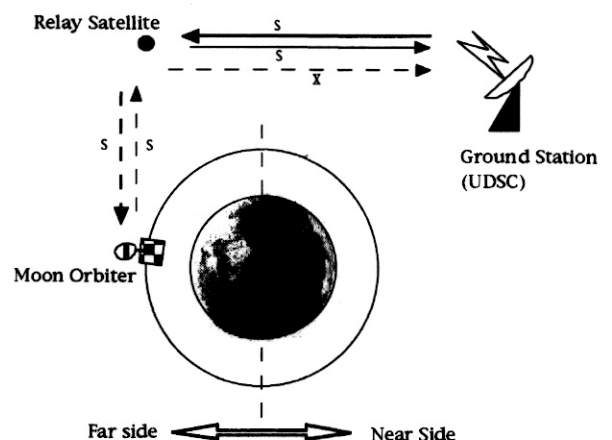


図6 リレー衛星による周回衛星のドップラー信号の中継

4.4 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行われた。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50kmまでに下げて観測を行うこともオプションとして考えられている。

4.5 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。

4.6 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。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

と極端紫外光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。

5. まとめ

月周回衛星計画セレーネ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。セレーネでは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。これまで各観測機器のセンサー部とデータ処理部の試作試験が行われ、その結果をもとに本年度よりフライトモデルの設計を開始している。

参考文献

- [1] Binder, A.B., Lunar Prospector: Overview, Science, 281, 1475-1476, Sept. 1998.
- [2] Foing, B.H. et al., The ESA SMART-1 Mission to the Moon with Solar Electric Propulsion, Adv. Space Res. Vol.23, No.11, 1865-1870, 1999.