

月周回衛星計画の目指すサイエンス

佐々木進、飯島祐一、月周回衛星ワーキンググループ

宇宙科学研究所

神奈川県相模原市由野台 3-1-1

0427-51-3911

sasaki@newslan.isas.ac.jp, iijima@planeta.sci.isas.ac.jp

あらし

宇宙科学研究所と宇宙開発事業団の共同ミッションとして、21世紀初頭の実施を目指した月探査周回衛星計画の準備が進められている。この計画は、H-II ロケットを用いて、月周回衛星、着陸実験機及びリレー衛星で構成される大型の探査機を月に送ろうとするものである。このミッションの目的は、月の起源と進化の研究、月環境の解明、月からの科学観測、及び、月面利用の可能性の調査、の4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、月重力分布、月磁場をグローバルにマッピングすることにより行う。月環境については、電磁環境、高エネルギー粒子環境、微粒子環境を計測する。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。本稿では、月探査周回衛星計画で提案されている科学研究項目とその期待される科学成果について紹介する。

キーワード 月周回衛星、月科学、月の起源と進化、月環境

Scientific Goal of the Moon-Orbiting Mission

The Institute of Space and Astronautical Science

Susumu SASAKI, Yu-Ichi IJIMA and Moon-orbiting Mission WG

3-1-1, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa

0427-51-3911

sasaki@newslan.isas.ac.jp, iijima@planeta.sci.isas.ac.jp

Abstract

A moon-orbiting observatory mission in the early 21st century is now under investigation jointly by ISAS and NASDA for lunar science, lunar environment research, and technology development for future lunar exploration. The mission will consist of a main orbiting satellite at about 100 km altitude near the polar circular orbit, a relay satellite, and a lander. 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. This paper describes the payload instruments and their scientific achievements expected in the mission.

key words

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

1. 月探査周回衛星計画の概要

月探査周回衛星の打ち上げは、2003年頃が現段階での目標とされている。H-IIで打ち上げられた探査機は、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2800kg、月軌道到着時の重量は約1900kgである。ミッション機器としては、遠隔探査用の科学機器が約305kg、着陸実験機重量が約410kgと見積もられている。遠月点4300km、近月点100kmの楕円軌道の段階でリレー衛星を切り離す。その後、高度100km、軌道傾斜角95度の円軌道に移動する。図1に周回衛星の概念図を示す。姿勢は遠隔探査機器の視野面である+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。1ヶ月毎に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、データレコーダとして10ギガバイト、地上局へのダウンリンクのビットレイ

トとして10~15Mbps程度が必要とされている。

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、レーザによる地下探査、レーザによる高度計測、月磁場計測、が計画されている。月環境の分野では、ダスト、高エネルギー粒子、プラズマ、電磁波動の計測が計画されている。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が計画されている。コヒーレントなS,X波を利用した電波科学手法による月電離層の検出は、衛星がリム部を通過するタイミングを利用して、間欠的に実施される。

約1年の高度100kmでの観測後、余剰燃料があれば高度約70kmに降下し、磁場計測、重力計測、特定領域の高分解能遠隔探査を行う。軌道維持が終了した後は、次第に近月点が低下し最後には月面に衝突してミッションを終了する。

着陸実験機は、円軌道投入後早い段階で切り離される。着陸点は月の表側の海が想定されており、自立航法で月面に軟着陸を行う。着陸後、蛍光X線観測と月面電波源の運用を行う。月面電波源のための電力系以外のシステムは、最初の夜で全てミッションを終了する。月面電波源は、約1年間にわたり電波を放射し地上局で受

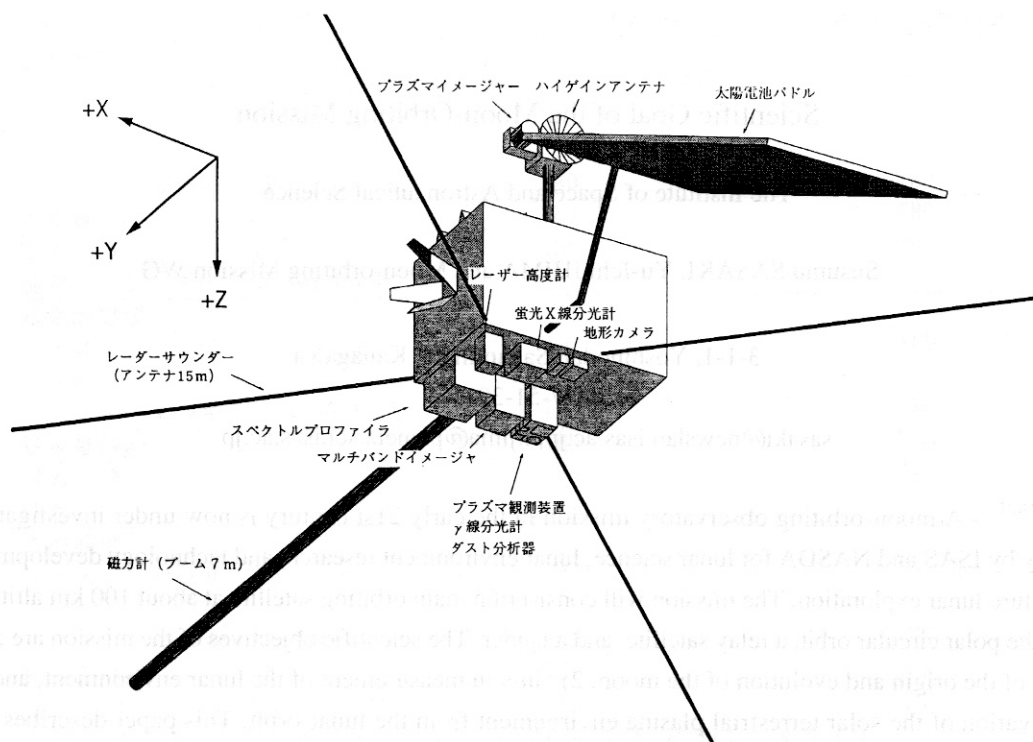


図1 月周回衛星の概念図

信して、周回衛星からの衛星電波源観測と合せ相対VLBI観測を行う。

遠月点高度4300km、近月点高度100kmの楕円軌道に投入されるリレー衛星は、オムニアンテナを用い、周回衛星と地上局との間の4 Way Doppler及び地上局との2 Way Dopplerを行って、月の裏側全面について、10mgalの精度で重力場を計測する。

2. 提案されている科学研究項目と搭載機器

H-IIを利用した月遠隔探査ミッションの科学目標と科学探査項目及び搭載機器案については、宇宙科学研究所の理学委員会のもとに組織された月周回衛星ワーキンググループが作成した提案書(平成8年3月)[1]に詳しく述べられている。なお、この月周回衛星ワーキンググループは、大学だけでなく、国公立の研究所や宇宙開発事業団などの機関から、本ミッションに興味を持つ広い分野の研究者が参加して組織されたものである。ワーキンググループ活動の中で、各項目の科学研究を検討するためのサブワーキンググループが組

織され、必要な搭載機器の検討が行われた。表1に、現在検討されている搭載機器の案を示す。ここで示されている機器性能は、概念検討の結果に基づくもので、今後更にその実現性の検討が進むにつれ変更される可能性がある。

2.1 月表面の元素及び鉱物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、12km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120km程度の空間分解能で計測することができる。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での計測が可能となると期待されている。

地質の区分は、低波長分解能(0.35~1.0 μmを10バ

表1 現在検討されている搭載機器一覧

搭載機器	主要性能
蛍光X線分光計	ガス蛍光比例計数管、Mg,Al,Si,Fe等の検出、空間分解能12kmx12km
ガンマ線分光計	高純度Ge半導体検出器、反同時検出器(CsI,Si)、スターリング冷凍機、空間分解能直径120km
マルチバンドイメージャ	可視近赤外撮像分光、空間分解能20m、刈り幅17.5km、バンド0.35-1.0 μm、フィルター10バンド
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、スターリング冷凍機、バンド0.5-1.9 μm、波長分解能5nm、空間分解能500m
地形カメラ	ステレオ画像、刈り幅17km、空間分解能5-10m、
レーダサウンダー	5MHz,15mアンテナ4本、刈り幅15km、地下約5kmまで、深度分解能100m、自然波動受信器
衛星電波源、月面電波源	X、S帯波、衛星位置精度1m以下、月面電波源位置精度10cm以下、相対VLBI地上局
レーザ高度計	Nd:YAG2台、ビーム0.3mrad、高度分解能5m、サンプリング間隔約300m
磁力計	3成分フラックスゲート磁力計、精度約0.5nT、マスト長7.5m
ダスト分析器	衝突プラズマ検出方式、質量分析機能2台(1台は月面からのダスト検出用)
プラズマイメージャ	紫外(304,834,1216Å)、可視、高速中性粒子
粒子線計測器	高エネルギー重粒子、低エネルギー重粒子、LET分布計測器
プラズマ観測装置	イオンエネルギー質量分析器1台、イオンエネルギー分析器1台、電子エネルギー分析器2台
リレー衛星	遠月点高度4300km、近月点高度100km
着陸機蛍光X線分光計	励起用線源、X、α、陽子線検出、原子番号6-40の元素分析

ンドで計測)ではあるが高空間分解能(20m、刈り幅17.5km)の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(0.5~1.9 μ mを5nmでサンプリング)の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、斜長石などの鉱物組成比を求めることが期待できるが、このためにはスペクトルを鉱物組成比に変換するために必要なデータベースを室内実験により今後整備していくことが不可欠である。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できる可能性があり、この点でも大きな期待がもたれている。本ミッションでの月表面の元素及び鉱物のグローバルマッピングの科学的意義を表2に示す。

2.2 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、レーザサウンダーによりグローバルマッピングを行う。地形カメラとしては、5~10mの空間分解能を持ち、刈り幅17kmのステレオカメラが提案されている。レーザ高度計は、全球を軌道に沿って約300mごとに、高度分解能約5mでマッピングすることが可能である。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広

い領域にわたって得られるだけでなく、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。

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、地下探査の可能なレーダ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しことができる。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、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、これらの問題に一定の制約を与えることができる。

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索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。

本ミッションでの月表層のグローバルマッピングの科学的意義を表3に示す。

2.3 重力探査

周回衛星及び月面の電波源からの電波を相対VLBIの

表2 月表面の元素及び鉱物のグローバルマッピング

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
蛍光X線	アポロで空間分解能30-100km 月面の赤道付近9%の探査 Mg,Al,Si	空間分解能12km 月面の90%以上 Mg,Al,Si,Fe,Na (フレア時Ca,Ti)	アポロより高い精度で地殻の組成推定、Mg#取得 地形・地質構造に対応するスケールで主要元素組成の取得	なし
γ 線	アポロで空間分解能半径60km、月面の赤道付近9%の探査 約5種類の元素 NaI分解能46KeV	空間分解能半径60km、月面全球約10種類の元素 HP-Ge分解能1-2KeV	アポロより高い精度で微量成分放射性元素の存在度の推定	PROSPECTOR (BGO分解能88KeV、検出限界は今回のものより6倍程度低い) MORO (性能的にはほぼ同等だが、衛星はスピン型のため検出限界は今回のものより2倍程度低くなる)
スペクトルプロファイラ	連続分光と言う点では初めての試み	500m幅 0.5-1.9 μ m 5nmサンプリング	分光画像との組み合わせでグローバルに鉱物同定 クレータ壁、中央丘により内部物質の鉱物同定	MORO (下記参照)
マルチバンドイメージャ	クレメンタイン100m分解能、0.4-2.7 μ m 11バンド全球	20m分解能 0.35-1.0 μ m 10バンド全球	鉱物組成の高空間分解能グローバルマッピングにより地質・物質区分	MORO (空間分解能250m、波長0.25-3 μ m 波長分解能20nm)

表3 月表層のグローバルマッピング

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
地形カメラ	クレメンタイン 分解能10m、UV-VIS画像内 を短冊状に数%撮像	5-10m分解能 ステレオカメラ 刈り幅17km	分光画像と組み合わせ地形と 地質の関連を明らかにする クレータの密度分布計測	MORO(16,32,64m 分解能)
レーザ高度計	クレメンタイン 40m精度 軌道に沿って1km毎 緯度±75°	30mフットプリント 5m高度分解能 300m×3km (赤道) メッシュで全球	クレメンタインより約5倍の メッシュ密度による表面形状 の精密決定	MORO (マイクロ波 高度計) 空間分解能 600×600m 高度分解能 5m
レーザサウンダー	アポロでの5,15,150MHz での実験、3kmの深さまで。 データ記録処理に問題あり。 探査場所も極めて限られて いる。	5MHz 5km深さ 100m分解能 全球マッピング	初めての全球地下探査 高地の地殻探査よりマグ マオーシャンの証拠発見の 可能性 海のテクトニクスの解明	なし

手法で観測することにより、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、月の慣性能率を精密に決定できる。月の慣性能率の精密な値は、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。

一方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、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。

本ミッションでの月の重力探査の科学的意義を表4に示す。

2.4 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いる。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、月の形成と進化の研究に重要な制約を与えることになる。とくに、アポロ計画では、月の磁気探査は月面のわずか5%しか実施されておらず、本計画で月面の90%以上の探査が行われれば、月磁場の成因解明に画期的な進歩をもたらす可能性がある。また、太陽風磁場の変動に対する月の電磁応答を調べることにより、月の電気伝導度や内部構造を探査することができる。月表面の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。高度100kmの約1年の周回探査の終了後は、可能であれば、周回高度を80km以下まで下げ観測を行うことができるよう、ミッション計画をたてることとしている。本ミッションでの磁場探査の科学的意義を表5に示す。

2.5 月環境の計測

月の放射線環境、ダスト環境、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

表4 重力探査

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
リレー衛星	なし	4300km×10km 楕円軌道	初めての月の裏側の重力探査 重力異常、地殻の厚さの情報 から地殻進化の解明	MORO ただし、高度100kmの サブサテライト
電波源	なし	周回衛星、月面 に設置	相対VLBIにより衛星の位置 は1m以下の誤差、月面電波 源は10cm以下の誤差で位置 計測。重力場と慣性モーメ ントのこれまでより1桁高 精度の情報	なし

表5 磁場探査

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
磁力計	アポロで全球の5%の探査	全球の90%の探査, 0.5nT精度 70km, 2ヶ月の低高度探査も目指す	月磁場の成因の解明 ダイナモ説の検証 電磁応答解析による月内部の電気伝導度推定	PROSPECTOR ただし、高度100kmのみ 太陽静穏期の計測

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。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。また、月起源のダストが検出されれば、月起源ダストの地球周辺ダスト環境への寄与が定量的に見積もられるようになる。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、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バンド波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と言われている希薄な月電離層についても検証が可能である。本ミッションでの月環境の計測項目とその科学的意義を表6に示す。

2.6 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プラズマ環境の撮像計画が提案されている。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感度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、これ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。本ミッションでの月からの観測項目とその科学的意義を表7に示す。

3. 将来計画との関連

月の探査は、アポロ計画以来しばらく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。1997年には我が国のLUNAR-A計画と米国のルナプロスペクタ計画の実施

表6 月環境の計測

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
ダスト	月周回軌道では初めて	速度、方向 質量、質量分析	月起源(初めて)、星間、 太陽系起源ダストの同定	なし
高エネルギー 粒子	GEOTAIL等	重粒子望遠鏡 線量計	月での有人活動に必要な 基礎データ取得 GEOTAILより幾何学的因子 が約2倍、粒子収集能力が 20-30倍。Feまでの重粒子の 同位体弁別計測	ACEミッション(98-02) ラグランジュ点 センサー面積は約70cm ²
プラズマ環境	月周回軌道では初めて (WIND衛星で月ウエイク 2回通過)	エネルギー、質量 方向(イオン) エネルギー、方向 (電子)	月-太陽風相互作用 月-磁気圏相互作用 反射電子計測による月磁場 計測	なし
電磁環境	月周回軌道では初めて (WIND衛星で月ウエイク 2回通過)	電磁波動	月-太陽風相互作用 磁気圏プラズマ波動計測	なし
電離層 プラズマ	ルナ19(1972)、高度20kmまで、 最大2000/cc、ただし精度が 悪く、その存在は確定して いない。	S,Xのコヒーレン トな2波による 電波科学	月電離層の有無の結論と 発生機構の研究	なし

表7 月からの科学観測

	これまでの到達点	今回の到達点	科学的意義	今後の類似ミッション
地球周辺 環境イメージャ	なし	可視、紫外 極端紫外、 高速中性粒子	オーロラの南北半球共役性 プラズマ圏のダイナミックス 磁気圏撮像	AKKA磁気圏撮像 衛星(98-99)(低分解能) IMAGE(2000初頭) 極周回
惑星電波	月周回軌道では初めて	GEOTAIL改良型 FFT,掃引 波形捕捉	太陽電波、地球電波に邪魔 されず木星、土星電波観測 太陽電波源の構造	なし

が予定されている。ヨーロッパでも月周回衛星のMORO計画(2003年)が提案され、月探査は国際的な高まりを見せている。本ミッションは、長期的には、宇宙科学研究所の大型月科学探査ワーキンググループが提案したH-IIによる一連の月探査構想[2]の第1号機として位置付けられているものである。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。

このような月の起源と進化を中心テーマに据えた月の科学探査が一段落した次のフェーズでは、月面天文

台や太陽地球系環境観測ステーションなどによる、月からの本格的な科学観測が行われることになる。さらに将来は、月は、理学、工学、医学、生物学などの科学研究の場として、広く利用されることが期待されている。

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所 月周回衛星ワーキンググループ、1996年3月：月探査周回衛星計画提案書、科学観測機器検討書 (Appendix B)
- [2] 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