

ついに始まったわが国の月探査

独立行政法人宇宙航空研究開発機構教授 加藤 學

1. はじめに

2007年9月14日に「かぐや(セレーネ)」衛星が打ち上げられた。H2A ロケットを使って、1トン余りの燃料込みで約3トン重量の人工衛星が打ち上げられた。日本の月探査は、1990年に「ひてん」衛星で月軌道投入などの技術試験を行っており、2度目の月行きである。アポロ計画では1回に2名の宇宙飛行士を月面に着陸させ、科学観測を行った後再び地球に帰還しており、打ち上げ時重量は約44トンという極めて大きなものであった。無人の衛星では「かぐや」は大型であり、観測機器重量は約300kgで中国のチャンゲの2倍、インドのチャンドラヤーンの5倍である。これらの月探査計画は全て月周回からのリモートセンシングでグローバルマッピングを行うものであり、次号機以降の着陸探査機のプリカーサーミッションと位置づけられていることも共通する。

「かぐや」衛星の月軌道投入方法についても様々な提案や議論があったが、地球周りの静止軌道から月軌道へ、フェージング軌道を採用して月周回に投入した。地球を2回半周回する打ち上げ後約3週間の月軌道投入までに、太陽補足・太陽電池パドル展開、ハイゲインアンテナ展開・スターセンサ確立により衛星の電源と通信・姿勢の確立を行った。この間に軌道投入誤差修正などのミッドコースマヌーバを2回、バス機器の動作チェックの他、地球から約11万kmの位置で「遠ざかる地球」のハイビジョン撮像が実施された。

月軌道投入ではまず、近月点高度100km、遠月点高度12,000kmの楕円軌道で軌道傾斜角90度の南北両極を通過する極軌道に「かぐや」衛星は投入された。その後遠月点を下げるマヌーバを行い、ノミナル観測高度の100km円軌道に打ち上げ後約5週間の10月19日に到着した。その間に2つの子衛星「おきな」(リレー衛星)と「おうな」(VRAD衛星)が、近月点高度100km、遠月点高度2,400kmの楕円軌道と、近月点100km、遠月点800kmの楕円軌道に放出された。高度100kmの円軌道に到達した後、

月軌道から地球のプラズマ圏を撮像観測するプラズマイメージャの立ち上げと、両端長が30mの2対のサウンダーアンテナ、および先端に磁力計を装着した長さ12mの伸展マストが展開された。

展開が全て終了すると、高電圧印加を含め観測機器の電力立ち上げが行われた。約2ヶ月かけて観測機器動作チェックを行い、12月21日に10ヶ月のノミナル観測期間に入った。ノミナル観測期間では高度維持と月中心指向の姿勢制御を行って観測を続けている。

2. 月科学観測機器

「かぐや(セレーネ)」計画は宇宙開発事業団と文部科学省宇宙科学研究所の共同ミッションとして開始されたため、評価選定や審査を両方で行うこともあったが、バス機器の開発担当は宇宙開発事業団、観測機器の開発は宇宙科学研究所が責任を持つという切り分けで開発がスタートした。「かぐや」衛星には、14種類の科学観測機器と広報活動を目的としたハイビジョンカメラが搭載された。

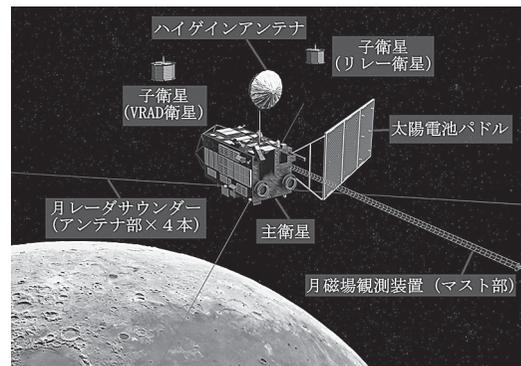


図1 「かぐや」衛星の構成

図1に「かぐや」衛星の構成を示す¹⁾。表1に搭載機器の観測項目とその機器の特徴がまとめてあり、**蛍光X線分光計**と**ガンマ線分光計**は、それぞれの特徴を生かして月面元素組成の測定を行っている。**蛍光X線分光計**は、エネルギーの高いX線フォトンでもピクセル内に留まる深い受光層を持つCCDを使い、月面から励起される二次X線を分光分析

表1 「かぐや」衛星に搭載されている科学観測機器と観測内容

月面元素組成の測定	
蛍光X線分光計(XRS)	X線CCDによる月面の主要元素(Mg, Al, Si, Fe, Na等)組成のマッピング観測, 空間分解能20km
ガンマ線分光計(GRS)	高純度Ge半導体検出器によるK, U, Th等の分布のマッピング観測, 空間分解能120km
月面鉱物組成の測定	
マルチバンドイメージャ(MI)	紫外・可視・近赤外分光撮像, 波長帯域0.4~1.6μm, 9バンド(波長分解能20~50nm), 空間分解能20m
スペクトルプロファイラ(SP)	可視・近赤外連続分光観測, 波長帯域0.5~2.6μm(サンプリング間隔6~8nm), 空間分解能500m
月表面地形・地下構造の測定	
地形カメラ(TC)	高分解能ステレオカメラ, 空間分解能10m
月レーダサウンダー(LRS)	HFサウンダーによる月表面構造のマッピング(周波数5MHz, 探査深度2~5km), 自然プラズマ波動・電波観測
レーザ高度計(LALT)	Nd:YAGレーザ高度計, 高度分解能5m, パルスレート1Hz
月重力場の測定	
リレー衛星搭載/対向中継器(RSAT-1,2)	主衛星と地上局間のドップラー信号の中継による月の裏側の重力場計測
相対VLBI用電波源-1,2(VRAD-1,2)	リレー衛星とVRAD衛星に搭載される電波源の相対VLBI(超長基線電波干渉計)による重力場観測
月面プラズマ環境の測定	
月磁場観測装置(LMAG)	フラックスゲート型磁力計による磁場測定, 精度0.5nT
プラズマ観測器(PACE)	低エネルギー荷電粒子のエネルギー・質量分布, 5eV/q~28keV/q(イオン), 5eV~17keV(電子)
粒子線計測器(CPS)	月面からの放出ラドン(α)の観測および, 高エネルギー粒子の観測, 電子30keV~1MeV, プロトン100keV~60MeV, 重粒子2.5~370MeV/n, アルファ線4~6.5MeV
月電波科学観測(RS)	S/X帯電波による希薄な月電離層の検出
月からの科学	
プラズマイメージャ(UPI)	月周回軌道から行う地球プラズマ圏とオーロラの撮像
広報用実験	
高精細映像取得システム(HDTV)	月周回軌道からの地球および月のハイビジョン撮影

することにより月面の主要元素を測定する。二次X線の励起は太陽の放出するX線が行うため、太陽活動を同時に観測している必要がある。CCDの使用によって従来のものから装置の小型・軽量化と高性能化が図られている。**ガンマ線分光計**は高純度ゲルマニウムの検出器を使って月面からのガンマ線を計測し、月面の元素を測定している。ゲルマニウム検出器はエネルギー分解能が高いため観測スペクトルから元素分別するのが容易である。この検出器の動作温度は液体窒素温度以下であるので、液体窒素の供給の困難な宇宙では使用に難があったが、近年電動の機械式冷凍機の開発が進み、冷凍機を搭載して計測が行えるようになった。月面のK, U, Thなどガンマ線を自然に放出している元素の他、宇宙線によって励起されガンマ線を放出する元素の計測も行える。また、従来センサとして用いられてきたシンチレータではエネルギー分解が困難で主要構成元素のアルミニウムと区別がつけられなかった水素元素も容易に分別でき、水素、水の存在を確かめることができる。

マルチバンドイメージャと**スペクトルプロファイラ**は相補的に月全球の鉱物組成を測定する。**マルチバンドイメージャ**はCCDの表面に9種の可視・近赤外領域のバンドパスフィルタを取り付け、平行移動しつつ多バンドで分光撮像する。月表面にある鉱物に特徴のあるバンドを比較して、鉱物種とその分布を面的に明らかにする。衛星の飛行高度100kmからの空間分解能は1ピクセル相当の20mであり、従来なかった分解能で月の表・裏両面の鉱物分布を明らかにしている。**スペクトルプロファイラ**は回折格子を使って可視・近赤外領域で高い波長分解能で分光することにより、月面にある鉱物を正確に決定する。望遠鏡の刈り幅(500m)分の空間分解能であるため空間的には平均的な分布を見ている。

地形カメラ、**月レーダサウンダー**、**レーザ高度計**は、月表面と5km程度の深さまでの地殻の凹凸(トポグラフィ)を明らかにしている。**地形カメラ**は、2つの1次元CCDを用いて平行移動により面的にステレオ撮像し、デジタル高度マップを月全球にわたって作成している。またCCDの1ピクセル分の

空間分解能は 10m に相当し、これまでにない分解能で高度地図が作られていることになる。月レーザサウンダーは 5MHz の電波を月面に送信し、誘電率の不連続面で反射してくる電波を受信する。空気・水のない月面で 5MHz 電波は 5km 程度の深度まで進入できるため、5km 程度までの月表層の地質活動の名残としての不連続面、断層の存在が明らかになっている。アポロ計画では周回に待機した飛行士によってサウンダー実験は行われているが、全球の 1% である。レーザ高度計は近赤外のパルスレーザ光を月表面に送って、反射してくるまでの時間を計測して月面の高度を測定している。レーザの繰り返し周波数は 1Hz であり、月面での分解能は 1.6km である。また地形カメラによる高度マップの基準点に使われ、局所的な高度分布図を作成するのに利用される他、月全体の形についての情報をもたらす。

2つの子衛星「おきな」と「おうな」は重量約 50kg、約 1m の八角柱小型衛星である。主衛星から月周回で放出される時に加えられた毎分 10 回転のスピンド安定させ、初速度で航行するのみであり、何ら推進装置は持っていない。これらの子衛星には電波をリレーする中継器と電波発信源が載っている。地球から発信した電波を月の裏側を飛行中の主衛星に「おきな」衛星の中継器を介して往復(4-ウェイ)させ、微小な飛行速度の変化を追跡して月裏側の重力場を計測している。月の裏側の重力場は従来ほとんど計測されておらず、外縁部での観測と表側の重力場の外挿で推測しているのみであった。子衛星から発信される電波を、距離の精密にわかっている地上の大きく離れた 2 点のアンテナで受けて、電波の位相差を測ることによって子衛星の位置がわかる。月の表側に衛星がいる時しか観測できないが、20cm の精度で軌道位置が決定できている。表側のより局所的な重力分布、すなわち重い(軽い)物質の分布が明らかになる。この手法は VLBI(超長基線電波干渉法)という地球で使われている手法である。

月磁場観測装置、プラズマ観測器、粒子線計測器、電波科学観測は、月の周りの電磁環境、太陽および宇宙放射線環境を測定している。アポロ計画で月から持ち帰られた岩石は、過去に磁場にさらされた可能性が指摘されている。そのような磁場が月にあったのかどうかを知るには精密に観測する以外に方法はない。そのため他の観測機器の出す磁場の影響を

取り除くため、マストを使って衛星本体から離れた位置に磁力計を置いて観測している。月は大気がないので太陽風や銀河宇宙線が降り注いでいる。どんな種類の放射線がどの方向からどの程度降り注いでいるかのデータはまだない。宇宙空間の放射線分布などの科学知識の取得ということ以上に、月で活動しようとする人類にとって生存のために必要な基礎データとなる。

プラズマイメージャは月軌道から地球のプラズマ圏を一見して、オーロラなどグローバルスケールで発生するプラズマ現象を明らかにする。月レーザサウンダーは 10Hz から 30MHz 程度までの自然電波を検出する機能も持っている。太陽のみならず、木星なども電波を発している。月の裏側は地球の騒音が遮断され微弱な自然電波の観測には最適場所であるので、主衛星が月の裏側を飛行中に受信が行われている。

ハイビジョンカメラシステムは月軌道から地球や月表面の高精細な映像を家庭の茶の間に中継し、月に親しんでもらい月探査の意義の理解を進めようという、広報活動に利用されている。月軌道での放射線は、大気によって保護されている地球近傍とは桁違いに強いと推測されている。したがって高集積回路をふんだんに使ったハイビジョンカメラシステムが耐えられるかどうか、具体的には「白キズ」と呼ばれる放射線障害が映像に現われるかどうか、推定される放射線量をシステムに実際照射して耐性を調べた。6ヶ月程度までなら鮮明な映像を送ることができるという結論は得ているが、実際の放射線環境はどうであるか、興味のあるところである。

3. データ統合で明らかになる月の謎

「かぐや」衛星に搭載された観測機器は、ハイビジョンカメラも含め宇宙での使用がこれまでなかった世界最高のエネルギー分解能、空間分解能、高精度のものであり、世界最初の実験のものも含め個々の観測機器データのみで高い科学成果が得られるであろう。しかし、複数の観測機器データを統合するともっと大きな科学成果を生み出せる。従来 2つ、3つの探査機で実行していた項目を一気に同時に実行する「かぐや」計画は効率の良い計画である。統合サイエンスの例を挙げると、月の形成最終期にはマグマオーシャンが存在したか？ 月の二分性の起源

は？ 月のバルク組成は？ 月のプラズマ環境は？ 磁場はあるか？ かつてあったか？ という月の起源と進化の謎に答えることができるであろう。

月の起源と進化についての惑星形成論や計算機シミュレーションの作ったシナリオによると、月は原始地球に火星サイズの原始惑星が斜めに巨大衝突(ジャイアントインパクト)してできたガスとダストの雲の一部が再度集積して出来上がったとされている²⁾。またその集積の時間はきわめて短く 10 万年以下で、集積によってもたらされるエネルギーが熱に変わり原始月の表面はどろどろのマグマの大洋(マグマオーシャン)になっていた、とされている。巨大衝突説の都合の良い点は、月が地球とは元素組成がかなり違っていることや、月が惑星の衛星としては巨大であり、地球に単に捕獲されただけのものではないことの説明がつくことである。マグマオーシャン説はアポロ計画での最大の科学成果の一つと言われているもので、月から持ち帰った岩石を調べ、高地から持ち帰った岩石は斜長岩というアルミニウム・カルシウムに富んだ岩石であり、海と呼ばれる低地から持ち帰った玄武岩(地球の火山帯に見られ、溶けたマグマが地表に出てから固化してできた岩石)より軽いものであることから、マグマの大洋に斜長岩の陸地が浮かんでいるという描像が描かれた(図 2³⁾)。地球や他の惑星もこのような過程を経て形成されたのであろうか？ 現在の地球はそのようなマグマの大洋があったように見えない。深いマグマ溜りから連続的にマグマが上昇、貫入し高地を形成しているように見える。全部で 400kg もの岩石が地球に持ち帰られたが、月の表側の赤道付近からの月岩石のみの分析データから考えられた説である。月の裏側や極地は表側とは全く違った様相を呈しているのも、もっと詳細に全球にわたって元素・鉱物・岩石の分布を調べ、30 年前に出された説を検証する必要がある。「かぐや」衛星搭載の複数の観測機器データを統合すると、新しい月の猫像を実証的に描くことができる。

月の表面にはたくさんの大小様々なクレータが分布する。裏側の南極付近には直径 2,500km の太陽系最大のクレータ盆地(South-Pole Aitken Basin)が広がっている。クレータは直径の 1/10 の深さにえぐられているだけでなく、深部の岩石の噴出も見られる。したがって、たくさんあるクレータの中央

マグマオーシャンモデル 模式図

図 2 マグマオーシャンモデル

付近(衝突時の衝撃波のリバウンドで高まって丘を形成しているものが多い)を調べると月地殻のかなりの深さまで物質を調べることができることになる。「かぐや」衛星のような周回のリモートセンシングでは月深部の構造までは直接調査できないが、クレータの調査で深さ 300km まで元素組成がわかってしまうと月全体積の 50% がわかることになる。アポロ計画での月震観測による推測を援用すれば月の全球(バルク)組成についても従来より格段に理解が進み、巨大衝突でできた地球・月領域のガス・ダスト雲がどんなものであったか、理解できるようになる。

4. おわりに

わが国の月探査の第一歩である「かぐや」衛星が打ち上げられてから半年、定常観測に入って 2ヶ月、月の 2 日間(2昼夜)の観測が終了した。上記「かぐや」の科学成果が見えてくるのは間もなくである。

参考文献

- 1) <http://www.kaguya.jaxa.jp>
- 2) Ida, S., Canup, R.M., and Stewart, G.R., Nature 389, 353-357, 1997.
- 3) Longhi, J., Proc. 9th Lunar Planet. Sci. Conf., 285-306, 1978.