



かぐや (SELENE) が解き明かすもの



JAXA宇宙科学研究本部
固体惑星科学研究系
教授

かとう まなぶ
加藤 學



JAXA総合技術研究本部
誘導・制御技術グループ
主任開発員

まつもと しゅういち
松本 秀一



JAXA宇宙科学研究本部
SELENEプロジェクト
チーム 主任開発員

まつい かい
松井 快



JAXA宇宙科学研究本部
SELENEプロジェクト
チーム 主任開発員

そぶ え しんいち
祖父江 真一

月周回衛星「かぐや」(SELENE)は、2007年9月14日10時31分(日本時間)にH-IIAロケット13号機により種子島宇宙センターより打ち上げられ、10月4日に月を回る軌道に入り、10月18日に高度約100kmの観測軌道に到達した。その後、12月20日まで、観測機器の初期機能確認を行った後、12月21日から定常観測運用を行っている。「かぐや」の最新情報については、<http://www.kaguya.jaxa.jp>において公開を行っている。

(1) 月周回軌道への投入、軌道姿勢制御技術の実証

「かぐや」は、打ち上げの約45分後にロケットから分離され月遷移軌道に投入された。衛星分離後、太陽をサーチしながら0.5deg/sでゆっくりと回転する太陽サーチ/捕捉モードに入り、太陽センサーの視野中心を太陽方向に向ける太陽捕捉が完了した後、11時44分に太陽電池パドルを展開した。その後、「かぐや」は、太陽指向で0.4deg/sでゆっくり回転する太陽指向クルージング状態で、地上局からのコマンドを待つ待機状態となった。地上局可視が確保できた後、スピン停止運用、三軸確立運用、ハイゲインアンテナ展開運用を実施して、20時38分に、「かぐや」の姿勢を月遷移軌道定常姿勢(太陽センサー視野中心が太陽方向を向き、+Z軸が天の南極を向く姿勢)に移行させた。

「かぐや」は、月周回軌道に投入するための月会合条件を合わせるために、図1に示すように、地球を2周回し、その間に、3回の軌道制御(軌道投入誤差修正($\Delta Vc1$)、周期調整1($\Delta Vp1$)、周期調整2($\Delta Vp2$))と各軌道制御の誤差補正(軌道制御誤差補正($\Delta Va1$)、周期誤差補正($\Delta Vc2$)、LOI1条件調整($\Delta Vc3$))を計画していた。衛星分離の約18時間後に、軌道投入誤差修正マヌーバ($\Delta Vc1$)を実施したのをはじめとして、順調に軌道制御を実施し、各軌道制御の評価結果を反映させて軌道制御計画を立案するこ

とにより、最後の誤差補正軌道制御として予定していたLOI1条件調整マヌーバ($\Delta Vc3$)をキャンセルできるほど、正確な軌道制御を実施することができた。

最初の月周回軌道投入(LOI1)は、「かぐや」を地球周回軌道から月周回軌道に移行させる最も重要かつクリティカルな軌道制御であった。2007年10月4日8時55分(JST)に、LOI1を開始し、約25分間の軌道制御を順調に実施し、「かぐや」を月を周回する軌道に投入することに成功した。その後、7回の軌道制御(LOI2、3、4、5a、5b、5c、6)を実施して、2007年10月18日に、「かぐや」を高度約100kmの月定常観測運用の軌道に投入させることができた。

「かぐや」を月観測軌道に投入した翌日10月19日には、「かぐや」の姿勢を、月を観測するための姿勢である月心指向姿勢(+Z面を常に月の中心方向に向けて飛行する姿勢)に移行させ、同時に、太陽電池パドルの太陽追尾とハイゲインアンテナの地球追尾を開始させ、「かぐや」で月の定常観測運用を実施するための定常制御モードへの移行を完了した。

以上のように、「かぐや」の軌道・姿勢制御技術はすべて予定どおり成功裏に実施することができ、優れた軌道・姿勢

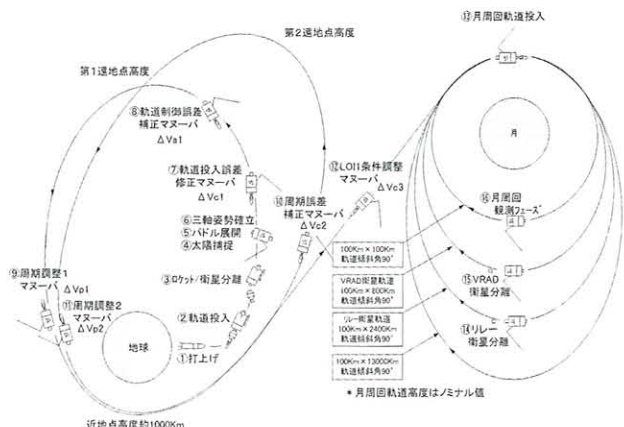


図1. 「かぐや」の月遷移軌道及び月周回軌道投入の概念図

制御技術を実証した。また、月周回軌道中での熱制御技術等についても併せて実証し、「かぐや」を用いた月探査衛星に関する基礎技術の取得を行うことができた。現在、「かぐや」は、安定した飛行を続けている。

(2) 「かぐや」の科学 — 月の起源・進化の解明

1) アポロ計画でわかったこと

月の科学はアポロ計画から始まったと言ってよい。アメリカは人類を月に送るといってつもない事業を遂行して国威発揚を行ったが、以後「月科学」とか「惑星科学」とか言われるようになる科学はここから始まった。アポロ計画に先立って人間を安全に月面に降ろし、再び地球に帰還させるため着陸候補地点の徹底的な撮影があった。最も空間分解能が高い月面写真は1mのものまでがルナーオービタ2号、3号によって撮影された。走査線が見えていたり、現像液の乾燥むらが残っていたりする写真であるが、赤道付近の写真がくまなく撮られているので、現在でも月地形学では有効である。この写真を撮る作業からわずか3年で人類は月に到達した。2週間程度の月ツアーであったが、6回の着陸で12人の宇宙飛行士が月面で活動した。その活動では科学観測と岩石試料の収集に多くの時間が費やされた。科学観測では、月震活動、熱流量、ソイルメカニクス、地球-月間のレーザー測距、太陽風データ収集、表面磁場測定、宇宙線測定などが、「月面から」あるいは「月面での」その場の観察として行われた。月震観測と月の運動を測定するレーザー測距はアポロ計画終了後も継続され、月の内部構造がおぼろげながらわかるようになってきた。

図2はアポロ計画で明らかになった月内部構造を表す模式図である。長く続かなかった11号設置のもの、設置をしなかった17号のもの以外の4局のネットワークで月震の発震位置の決定や内部構造の推定の結果が表されている。地殻、マントル、核または減衰層の3層構造を持っているようで地球と似ている。中心核はありそうであるが、700km以下の大きさであり、地球の核の占める大きさ（半分の径）に比べかなり小さい。

アポロ計画では400kgもの月岩石試料が持ち帰られ岩石鉱物学研究、年代学研究などが詳細に行われた。そこから生まれた最大の産物と言われる成果にマグマオーシャン（マグマの大洋）説がある。月の形成最終期では、隕石様物質の集積エネルギーの解放により、月の表層が加熱溶解され、マグマオーシャンが形成された。その後の冷却により析出した斜長岩（アノーツサイト）とMgに富むマグマが重力分離し、月の高地が形成された。さらに重くて大洋の底に沈積していたマグマから玄武岩マグマが部分熔融し、表面に噴出して表

側の海を形成した、という説である（図3）。月の起源として有力視されているジャイアントインパクト（巨大衝突）説には月の集積に要する時間が数年から100万年と様々あるが、このような短時間の集積はマグマオーシャンの出現に都合がよい。1億年程度の長い集積では全体が熔融状態にある期間がなく、熔融は不均一になる。月の集積時のマグマオーシャンの深さについても60kmとするものから300km、あるいは600kmとするものまで様々である。マグマオーシャンは深い方が都合がよいとするのは、集積後期の隕石様物質の重爆撃によって掘り返されたはずの岩石に斜長岩と対になる沈積岩が見つからないからである。

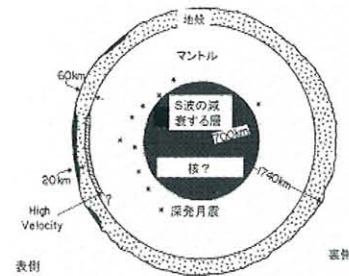


図2. 月内部構造モデル (Toksoz et al., 1973)

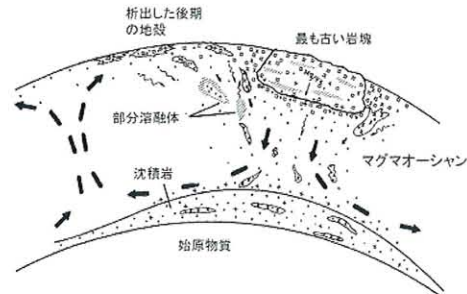


図3. マグマオーシャンモデル (Longhi, 1978)

文献・Toksoz, M.N., et al, Proc. 4th Lunar Sci. Conf., vol. 3, 2529-2547, 1973
 ・Longhi, J., Proc. 9th Lunar Sci. Conf., 285-306, 1978.

2) 「かぐや」の目指す月の科学

「かぐや」では蛍光X線分光計とガンマ線分光計が主要元素、放射性元素を測定する。またマルチバンドイメージャとスペクトルプロファイラが鉱物組成を決定する。両者のデータを統合すると岩石のタイプがわかることになる。さらに子衛星を使った重力場の測定はマスコンのような密度不均一性の存在や地殻の厚みを決める。

これらの結果は、裏側の高地と呼ばれる地域の岩石タイプとその分布を明らかにする。マグマオーシャンはどこから固化が始まったか、岩石タイプはどのように変化して現在の状態まで進化したかが明らかになる。もし岩石の分布に固化の順序が何ら見られないとすると、マグマオーシャン説は崩れることとなる。先に述べたように短い時間で月が形成されたとするジャイアントインパクト説は、マグマオーシャン説の



検証によってその妥当性が明らかになる。

月の誕生以降の大きな地質イベントには、裏側南極域の巨大衝突盆地（南極エイトケン盆地）の形成と表側の広範囲な海の形成があり、元素・鉱物組成分布、重力のほか、表面地形や月レーダサウンダーによる地下構造の測定がこれらのイベントの実態を明らかにする。これらの実態を明らかにするとこれらのイベント以前の月が復元されることになる。

アポロ計画で持ち帰られた岩石試料中にかつて微弱ながら磁場にさらされたということを記憶する鉱物が含まれている。初期には小規模ながら地球と同様の磁場発生があったのかもしれない。とすれば、弱いながらも磁場が今も残留しているはずである。この謎に答えるため月磁場観測装置による磁場測定を行っている。

アポロ時代に行われた太陽風や宇宙線の測定を精度の高い最新鋭の観測機器で行っている。現在の月を取り巻く環境についての計測も実施している。

このように、「かぐや」においては、昨年12月の定常運用開始から今日まで現代の月の科学を推進する観測データの収集を継続している。

(3) 「かぐや」での月利用調査検討

将来の月ミッションに対して「かぐや」で期待される成果は、大きく分けて、1) 水資源マップ、2) 極域日陰日照MAP、3) 鉱物・元素（鉄、チタン、イルメナイト）マップ及び4) 極域DEM（Digital Elevation Model）が挙げられる。

- 1) 水資源マップはガンマ線分光計からのデータの解析結果に基づき、月の極域、特に永久日陰となる場所に存在すると、過去の中性子線の計測から予想されている水氷の情報が見られると考えられる。水は月面基地でECLSS（ENVIRONMENTAL CONTROL AND LIFE SUPPORT SYSTEM）向けに大量に消費される酸素、生活水などを現地で補充可能にする貴重な資源である。ガンマ線観測では、水氷が月表面から30cm程度の深さまで観測可能である。
- 2) 極域日陰日照マップは、月の極域の日陰日照状態を所定の頻度で計測し、月面の季節変動に合わせた日陰日照状態の変化をマップ化するものである。将来の月面基地での主要なエネルギーの確保や温度環境の予測に不可欠な情報である。

標準プロダクトとして地形カメラの低太陽高度（朝、夕）での反射率マップを空間分解能（解像度）10m、マルチバンドイメージャの反射率データが解像度20mで作成される。

これらの地形カメラとマルチバンドイメージャのデータを組み合わせて、従来のクレメンタインの観測では不可能

であった季節を含めた高精度な極域日陰日照マップの作成が期待される。

- 3) 鉱物・元素（鉄、チタン、イルメナイト）マップは、月面でのECLSSやエンジンの燃料に必要な酸素の製造に有利なチタン鉄鉱（イルメナイト）の分布を、前述の元素分布などを測定する蛍光X線分光計とガンマ線分光計とマルチバンドイメージャの組み合わせにより、鉄、チタンのマップを基に生成される。また、鉱物・元素の絶対量の見積りは、鉄、アルミニウムなど各機器共通に観測できる元素については、蛍光X線分光計とガンマ線分光計とマルチバンドイメージャの観測データを相互に参照することで、より正確に求められると期待される。

また、酸素製造に有利なチタン鉄鉱（イルメナイト）の分布を、MIの高次処理プロダクトとして作成することを計画している。

- 4) 地形カメラによるステレオ視データ、極域の観測で観測ポイントが集中するレーザー高度計を使って極域の相対数値標高モデル（DEM）を作成する。

(4) 「かぐや」による宇宙科学の普及・啓蒙促進への貢献

「かぐや」に搭載されたNHKと開発したハイビジョンカメラにより、平成19年9月30日に11万km離れた場所から世界で初めて地球の動画撮影に成功した。また、月周回軌道（高度約100kmの極軌道）においても、11月4日に、ハイビジョンカメラにより、かぐやから見た、月面に昇る地球の出と地球の入りの撮影に成功した（図4.参照）。また、アポロ着陸地点などの月面の撮影も実施した。

これらのハイビジョンカメラの映像は、世界で初めてのものであり、極めて鮮明に取得でき、日本のみならず世界の多くのメディアで取り上げられている。また、「かぐや」の科学観測機器で平成19年10月からの初期機能確認などで取得した観測データについても、一部を広報用としてホームページで公開している。これらは、TV、雑誌、学会誌などで広く活用され、宇宙科学の普及・啓蒙促進へ貢献している。



図4. 「かぐや」から見た月の南極付近での地球の入り