



着陸した「はやぶさ」のカプセル<提供 JAXA>

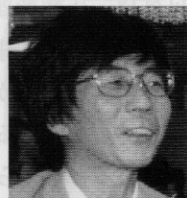
糸川先生をはじめとした宇宙研の伝統をここに刻むためでもある。最近、過去にもまして、宇宙開発をとりまく環境は厳しくなりつつあり、政策などにも翻弄されるきらいがあるが、もし、我々が、さきがけからはやぶさへと繋げることができた科学技術の蓄積のもっとも重要な原因は何かと問われたならば、それは、宇宙研という特別な文化を育む土壌だったということができるだろう。

私、また我々がこうして深宇宙探査に関われたような経験や感動は、次の世代へ確実に受け渡して行かなくてはならない。それが、もう指を折って数えられるくらいになってしまった私の在職期間に残された任務だと考えている。

アポロ以来最大の月探査機「かぐや」

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所教授

佐々木 進 (ささき すずむ)



夜空に煌々と輝く月、月は太陽とともに私たちにとって最も身近な天体であり、私にとっても折々の想い出のシーンの背景に懐かしく残る独特の存在である。月は人類がその足跡を残した唯一の天体ではあるが、どのようにして生まれたのかは今でも謎に包まれている。この謎を解き明かすことを目指して、1999年に月探査機「かぐや」の開発が始まった。「かぐや」は2007年9月に打ち上げられ、2009年6月まで月の周回観測を行って、月の起源と進化に関する多くのデータを取得するとともに、地球や月の美しい映像を世界に届け続けた。「かぐや」は提案時代から数えると、プロジェクト終了まで実に14年間もの長い歴史を持つ計画であり、メンバーも入れかわりつつ進化した。私は、プロジェクト全体を通じて、主として観測機器の開発と運用に携わった。最初から最後まで係わることになった数少ないメンバーの一人としてかぐやの計画をふり返る。

1. 計画の背景と生い立ち

有人で探査の行われたアポロ計画(1969年～1972年)以来長い間月の探査は行われなかったが、Back to the Moonのかけ声のもと、1990年代から人類は再び月へ探査機を送るようになった。これは将来月を利用するためにはまず調査を行う必要があるという実利的な背景もあったが、アポロ計画で始まった月科学の研究が一段落し、月の起源と進化を明らかにするためにはさらに本格的な探査を行いたいとの惑星科学者の強い希望があったことが大きな動機と

言えよう。

このような背景のもと、我が国では当時先行していたLUNAR-A(ベネトレータによる月内部探査計画)に引き続く計画として、月の女神にちなんで名付けられた月遠隔探査機SELENE(Selenological and Engineering Explorer)の計画が始められた。SELENEは打ち上げ前一般公募により「かぐや」という愛称が与えられ、今では「かぐや」の名前が広く用いられている。この計画は当時の宇宙科学研究所(ISAS)と宇宙開発事業団(NASDA)の初めての大型の共同プロジェクトとしてスタートし、1996年に組織されたNASDA、ISAS、国立天文台、大学、研究機関の科学者と技術者からなるプロジェクトチームが「かぐや」計画推進の母体となった。NASDAが衛星システムの開発、ISASが観測機器開発を分担したが、私はISAS側のメンバーとして15の観測ミッションのとりまとめ担当となった。当時私は飛翔体周りに形成される宇宙環境の研究に興味があり、その頃参加していたSFU(Space Flyer Unit)での宇宙環境計測のプロジェクトも一段落した段階であったので、次は月周辺に形成される宇宙環境に研究の場を拓けるべく張り切って参加した。NASDAとISASは設立の目的や衛星の開発手法も異なり、いわゆる文化の違いも大きかったが、両機関それぞれが得意とする技術、手法を組み合わせ、先端的でかつ確実なミッションを実現することを目指し共同の事務所において開発をスタートさせた。共同事務所は、筑波(NASDA)でもなく相模原(ISAS)でもな

い駒場に置くことにしたことは当時の微妙な関係を反映している。当初は意識合わせをするためだけに時間を使うことも多かったが、頻繁に開催した連絡会議の中で次第に共同プロジェクト推進のための共通の意識が育まれてきた。「かぐや」は打ち上げまでに多くの試練を受けることになったが、異なる資質を持つメンバーそれぞれが得意の分野で貢献し力を合わせるとき、チームとして強力で多様な力を発揮できることを、後に実感することになった。

2. ミッションの目的

「かぐや」の主な目的は、月の起源と進化の解明を行うことであり、この分野の研究は「月の科学」と呼ばれている。月の起源には捕獲説(月は地球に捕らえられた)、分裂説(月は地球から飛び出した物質で形成された)、双子集積説(月と地球は近傍で独立に作られた)、という古典的な説以外に、比較的新しい説として巨大衝突説(火星程度の大きさの天体が地球に衝突し放出された地球と衝突天体の双方の物質から月が形成された)がある。巨大衝突説がこれまで得られている月の各種のデータと比較的矛盾が少ない説であると考えられているが、いずれの仮説もその当否は未だに明らかではない。私自身は月の起源についての専門家ではなかったが、巨大衝突説もなかなか信じられず、「かぐや」で定説を覆すような歴史的な新しい発見があるのではないかと密かな期待もあった。「かぐや」には、月の起源と進化の研究だけではなく月の環境を調べたり、月から地球を観測するという科学目標もあったが、最も社会的にアピールする「月の起源」の解明を錦の御旗として計画を進めた。また今後の月探査のための技術の獲得や将来の月利用のための資源や地形の調査も私にとっては興味ある目標であった。当初の計画段階にはなかったが、月探査や宇宙開発の面白さを一般にアピールすることを目指した高精細テレビカメラ(ハイビジョンカメラ)も追加で搭載することとした。科学観測を目指す衛星でこのような広報用の機器に搭載リソースを割くことには科学コミュニティの一部から批判があり扱いに苦慮することもあったが、結果的に広報面で予想以上の重要な役割を果たし、「かぐや」の名前を世界に知らしめることになった。

3. 衛星開発

「かぐや」は、1995年からの提案書作成、システム概念設計、搭載機器試作試験の準備段階を経て、1998年に開発予算が認可された。当初は2003年度を打ち上げ目標とし、周回衛星による遠隔探査ミッションだけでなく着陸探査ミッションも含んだ極めて野心的な計画であった。しかしながら、着陸ミッションについては技術的な成熟度の問題もあり、2000年には「かぐや」の計画からは切り離し、

将来の後継ミッションに委ねることになった。遠隔探査用のセンサーの数が多く性能もそれぞれ最先端のものを狙ったため設計段階で四苦八苦の状況に陥っていた中、着陸機という大きな開発要素が無くなったことから正直“ほっと”する面もあったが、将来につながる野心的なミッションという側面が失われたようで非常に残念に感じたことも事実である。着陸機の代わりに子衛星をもつこととしたため、「かぐや」は最終的に主衛星と2機の子衛星で構成されることになった。図1に月遷移軌道上での「かぐや」の外観図を示す。衛星システムは、信頼性を最大限確保するため、新規の技術は必要最低限とする方針とし、開発手法についても技術試験衛星・地球観測衛星の手法を適用した。

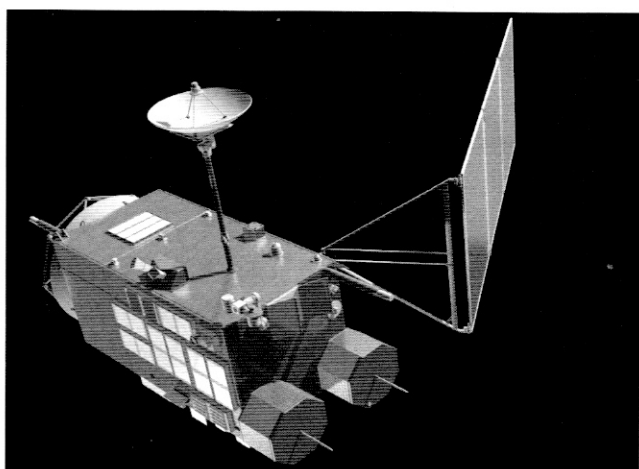


図1 月遷移軌道上の「かぐや」のイラスト。主衛星と子衛星2機が結合された状態で月へ向かった<提供 JAXA>

一方科学観測機器については、科学者や技術者から構成される機器選定委員会により搭載機器の科学的意義と技術的実現性の評価に基づく選定が行われた。科学観測機器は他の科学衛星の手法にならない、主任研究者チームがその開発に責任をもつという体制で開発した。「かぐや」の最大のミッション目的が「月の起源と進化の解明」であり、その研究コミュニティの母体は月惑星科学者であったが、我が国では当時この分野は揺籃期で日本惑星科学会が組織されて間もない時期であった。そのためこの分野の研究者は衛星搭載機器を開発した経験に乏しく、先端的なセンサーを如何にして衛星搭載機器として仕上げるかという点が私たちにとっては大きな課題であった。このためプロジェクトチーム内に専任の観測機器担当チームを組織し、各主任研究者チームの機器開発を横断的に支援するような体制をとった。観測機性能の追求を極限まで求める研究者チームと、信頼性、スケジュール、資金の観点から注文をつける観測機器担当チームとの間で激論を戦わせる場面もしばしばあったが、試験などの共同作業を通じ次第に一体感が醸成されていった。この観測機器担当チームは開発が終了し



図2 14年間にわたる「かぐや」の歴史。準備・提案の段階で宇宙開発事業団、宇宙科学研究所でミッション提案書が作られ、1999年からプロジェクトがスタートした。2007年に打ち上げられ約20ヶ月の月探査を行った後、2009年6月に月面に落下してそのミッションを終了した

た後は、システム総合試験実施の中核メンバーとなって機器運用に習熟し、打ち上げ後は観測運用の中核的な役目を果たすことになった。この方式は「かぐや」特有の方式であったが、プロジェクトの成功に極めて重要な役割を果たしたと言えよう。

「かぐや」の生い立ちから終了までの経過を図2に示す。1999年からプロジェクト化された計画ではあったが、ロケットの不具合や予算の制約のため4度にわたり打ち上げ目標年度が変更となり、打ち上げは結局、提案書段階から12年後、開発着手から9年後になった。2004年に発表されたブッシュ米大統領の新宇宙政策や、中国・インドの月探査計画の急迫がなければ、「かぐや」の打ち上げ年度はもっと遅れた可能性がある。計画の遅延は、追加予算の確保、製造メーカーの担当者やチームメンバーの異動、プロジェクトチームメンバーのモチベーションの維持、寿命品の信頼性の確保など、プロジェクトの存続に係わる大きな試練となった。ふり返ってみると衛星の製造・試験を行いながらの計画遅延への対応が精神的にも最も苦しかった時期であった。この時期、計画遅延だけでなく、開発資金の不足、予想外の機器不具合など多方面からの同時多発的な試練にみまわれたが、多様な人材を束ねたプロジェクト

チームであったことがこれらの試練を乗り越える大きな力となった。

「かぐや」特有の要求事項として、衛星全体としての電磁的なノイズ、残留磁場、表面帯電を極限まで低減する必要があり、これには想像以上の知恵と作業が必要であった。科学観測機器は、一般にこのような電磁的コンタミネーションを抑えることを衛星に要求するが、比較的小型の科学衛星ではなんとか実現できる要求でも、大型で大電力(約3kw)の「かぐや」の場合はそれらを満足することが容易ではなかった。衛星全体の電磁干渉対策が不十分だと個々の観測機器は単体としては高性能でも衛星上ではその性能を発揮することができない。プロジェクトチーム内に優秀で行動力のある若手メンバーで構成される専門のワーキンググループを置き、設計段階からの対策、特殊な電磁シールド材の使用、太陽電池カバーガラスの導電性コーティングなど可能と思われるあらゆる手段をとるとともに、試験で徹底的に問題点をつぶしていった。その結果、一部妥協せざるを得ない点もあったが、最終的には観測機器要求を満足する電磁的にクリーンな衛星として仕上がった。

4. 運用と成果

「かぐや」は、2007年9月14日に打ち上げられ、同年12月末から定常観測を開始した。打ち上げから月周回の観測軌道投入までの運用経過を図3に示す。打ち上げと月軌道への投入は極めて順調で、想定以上の燃料の余裕ができたため、10ヶ月の定常観測を終了した後も半年以上の観測運用を行うことができた。月への旅は順調ではあったが、月遷移軌道から月周回軌道に入れるためのエンジン噴射はワンチャンスの失敗の許されない運用であったため、極めて緊張した。軌道投入に成功したときの喜びは今でも忘れられない。衛星の管制は相模原の「かぐや」のために開発した「月ミッション運用解析センター」で行ったが、停電などで運用に支障がでないよう予備電源対策をとるとともに、地震などの災害でセンターそのものが機能不全に陥るような万一の場合に備えて、臼田にあるアンテナ局からも非常時の管制ができるよう装置や人員を確保した。極めて確率の小さい事象への対応であったが、確実な運用に万全を尽くすというプロジェクトチームの姿勢の現れであった。

探査機の土台をなすバス機器は保守的な設計指針を貫いたため全体として殆ど不具合無く運用されたが、観測姿勢維持に必要な3軸姿勢制御を司るリアクションホイールが故障した。リアクションホイールは冗長機能を持たせるため4台で構成されており、姿勢制御はスラスターでも可能であったため、観測ミッション達成には実質的な影響はなかったが、衛星の基幹機能に係わるため深刻に受け止めた。原因の究明と対策に非常事態並みの体制で取り組んだが、外国製品のため情報が必ずしも十分ではなく、基幹部品については国産製品を使うことが如何に重要かを痛感することになった。

15種類のミッションを担った14台の観測機器は一部所期の性能の出ない機器もあったが、当初予定した観測目標はほぼ全て完遂した。月軌道投入度、各観測機器チームが順番に管制センターに陣取り、打ち上げ後初めて自分たちの機器のチェックアウトを行ったが、予定通りの性能が確認できたときの研究者たちのこぼれるような喜びの表情を見るたびに心からの安堵と喜びを感じた。月面の元素分布、鉱物組成、地形・地下構造、磁場、重力場、プラズマ

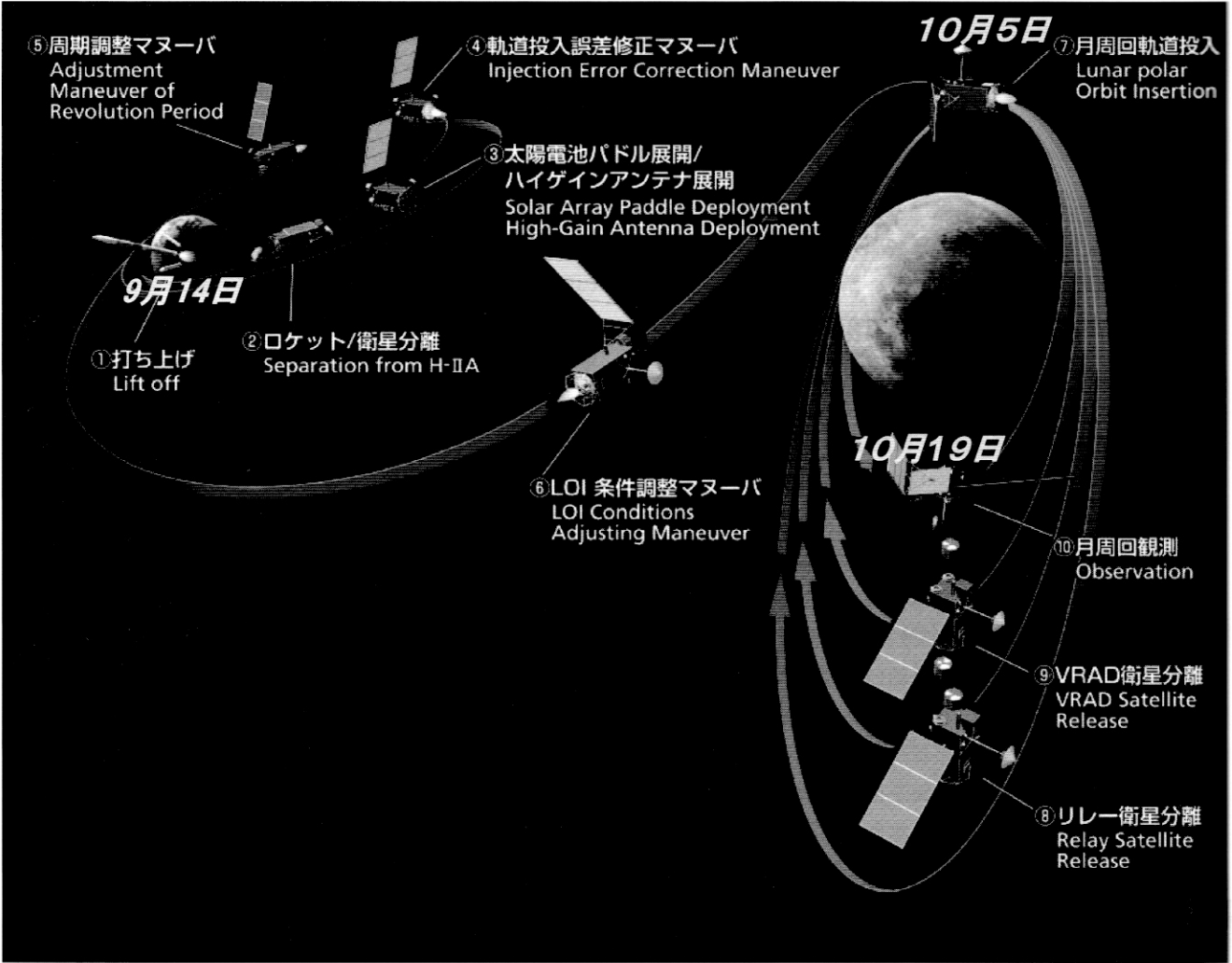


図3 「かぐや」の打ち上げから観測軌道到着までの運用経過<提供 JAXA>

環境について高い精度と分解能で計測が行われ、クレータの鉱物分布、月の裏側のクレータの形成年代、海の部分の地下の層状構造、表側と大きく異なる裏側の重力場、月特有のプラズマ環境など数々の新しい発見があった。観測機器の運用で意外に悩まされたのは宇宙放射線による障害である。宇宙線障害の発生は当然起きうると予測し、障害時には自動的に安全モードに入るよう設計していたが、実際に放射線障害が発生すると、その他の要因による“たちの悪い”故障でないことを慎重に確認する必要がある、再立ち上げに当たっては観測機器担当者とともに神経をすり減らした。

「かぐや」の主衛星は2009年6月11日に月面に落下した。燃料の許す限り最大限観測期間を延長したため、最後の軌道変更で所定の場所に落下させることができるかどうか一抹の不安があった。予定時間に予定した場所に正確に落下させることができた瞬間には、管制室に陣取った運用チームの喜びが爆発した。私自身は、長い年月にわたりほぼ毎日が「かぐや」とともにあった日々が終わり、達成感とともに我が子を失ったような喪失感も味わった。落下場所は地球からみて南側の縁付近である。「かぐや」は「月に願いを」キャンペーンで41万人の方々の名前とメッセージを刻んだプレート板を持って地球を飛び立ったが、最終的に月の表側の分かり易い場所に届けることができ、「かぐや」は最後まで良い仕事をしてくれた。

5. おわりに

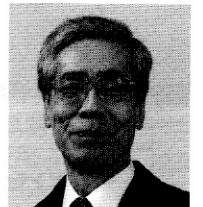
「かぐや」はアポロ計画以来最大級の本格的な月探査であり、科学探査計画としては異例の大きさの予算規模と人員で実施された。「かぐや」はISASとNASDAの共同ミッションとしてスタートしたが、プロジェクトの途中の2003年に両機関は航空技術研究所とともにJAXAとして統合された。今にして思えば、2機関の共同計画として発足した「かぐや」の計画は後日の社会的要請による3機関統合の先駆けとなったと言えよう。

またヨーロッパの月探査機 SMART-1 とともに、中国、インド、米国と続く世界の本格的な月探査ブームの先駆けでもあった。「かぐや」のデータの解析により、月の重力場、地下構造、地形とその年代、表面組成、環境について既に多くの発見がなされている。今後も膨大な科学データから様々な新事実が見いだされ、「月の起源と進化」の研究で定説を覆すような歴史的な展開があることも期待できる。また広報用のハイビジョンカメラで撮影された「地球の出」などの美しい映像は日本だけでなく世界の人々に予想以上の感動を与えることができ、「かぐや」の名は科学の粋をこえて広く知れわたることになった。「かぐや」計画は長い道のりのプロジェクトではあったが、宇宙開発に携わる研究者にとって時代を画する実にやりがいのあるプロジェクトであったと言えよう。

M-V 型ロケットの開発

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 所長

小野田 淳次郎 (おのだ じゅんじろう)



M-V 型ロケットとは

1955(昭和30)年のベンシルロケットの実験から15年後、宇宙科学研究所の前身である東京大学宇宙航空研究所は1970年、我が国初の人工衛星「おおすみ」をL(ラムダ)-4S型ロケットで打ち上げた。L-4S型ロケットは衛星打ち上げ技術習得の為に小型ロケットであったが、習得した衛星打ち上げ技術は同研究所のM(ミュー)ロケットへと引き継がれ、翌1971年、M-4S型ロケットが我が国2番目の人工衛星「たんせい」を打ち上げた。Mロケットは同研究所(含後継組織)の全段固体の科学衛星打ち上げ用ロケットである。以降、四半世紀の間にMロケットはM-3C、M-3H、M-3S、M-3SII型へと順次改良され、

その間に20機の科学衛星・探査機を打ち上げ、我が国の宇宙科学の発展に大いに貢献した。

しかし、1980年代後半に至ると、1990年代及び21世紀初頭の月・惑星ミッションを含む諸科学ミッションの遂行には、当時使用され始めたばかりのM-3SII型ロケットより大きな能力を持つ打ち上げ手段が必要であるとの要請が強くなり、我が国としていかなる輸送手段を確保するのが最適であるかについての議論が宇宙開発委員会の下で行われた。その結果、科学ミッションの進展に対応するために、Mロケットの大型化を宇宙科学研究所が行うのが適当とされ、

(1)全段固体ロケット技術の維持発展を考慮すること、