

目経サイエンス

月の謎を解く探査機「かぐや」

アポロ計画以来の本格的な月探査機が打ち上げられる
月の起源と進化の謎を解き明かし
人類の月進出のための基礎を築く

加藤 學 (宇宙航空研究開発機構)



月に降り立った宇宙飛行士は眼前に広がる風景に息をのんだ。頭上には太陽がぎらついているのに空は夜のように真っ黒。地上と違って雲ひとつなく、恐ろしいほど透明度が高い。月面は雪原のようにまばゆく輝いている。台地

に立ってあたりを見渡すと、足元から地平線へと続く地面がゆったりした曲面を描き、飛行士は自分が今、巨大な球体の上にいることを実感した。

月を周回する司令船が月の夜側に入ったとき、パイロットがキャビンの明

かりを消して窓の外を眺めると、地上では見ることがかなわない、信じられないほど多くの星々がきらめいていた。暗闇の中、青く輝く巨大な天体「地球」が姿を現し、その光に照らされて月面は青白い光に満たされた。



アポロ計画の宇宙飛行士が撮影した月写真をデジタル技術で色鮮やかに再現した写真集『フル・ムーン』（日本語版は新潮社刊）。その中に収載されたエッセイ「最果ての地」で科学ジャーナリストのチェイキン（Andrew

Chaikin）は宇宙飛行士たちが見た月の景色をこのように活写している。

人類初の月着陸から約40年が過ぎた今夏、アポロ計画以来の本格的な探査機が月に旅立つ。開発したのは日本で、種子島からH2Aロケットで打ち

月へ向かう 宇宙航空研究開発機構構築宇宙センターで整備中の月探査機（2006年10月）。愛称は「かぐや」。計画名はセレーネ（SELENE）。SELenological & ENgineering Explorerの略称（Selenologyは月科学）で、月の女神の名前にもちなむ。「かぐや」は種子島宇宙センターに運ばれ、打ち上げへの準備作業が進んでいる。前ページは月軌道上のかぐやの想像図。

月と地球を見る15の眼

かぐやは15種類の観測装置を搭載し、月の表面の組成や地形、重力、月周辺の磁場や飛び交う荷電粒子などを幅広く調べる(右ページ以降の囲み参照)。かぐやは静止衛星よりもはるかに地球から離れているので、その“地の利”を生かし、地球の

南北両極域で輝くオーロラの全体像を調べる。月の裏側は人類が出す人工の電波源からも隠れることになるので、静かな環境を生かし、宇宙空間を飛び交う自然の電波も観測する。ハイビジョンカメラで月面上からの「地球の出」などを撮影する。

リレー衛星

月の裏側にいるかぐやと地上局の間の電波を中継する。電波を発信し、月の表側の重力測定にも利用。

重量50kg、大きさ1m×1m×0.7m
高度100km×2400kmの楕円軌道



ハイゲインアンテナ
(地上との交信用)

VRAD衛星

電波を発信し、月の表側の重力測定に用いる。月上空の電離層の探査にも利用する。

重量50kg、大きさ1m×1m×0.7m
高度100km×800kmの楕円軌道



レーダサウンダーのアンテナ
(長さ15m、電波による地下探査)

太陽電池パドル

かぐや(主衛星)

重量3トン(燃料搭載時)
最大発生電力3.5kW
大きさ2m×2m×5m
高度100kmの月極軌道

ガンマ線分光計

粒子線計測器(電子、陽子、α線を計測)
マルチバンドイメージャ(広範囲の可視光・近赤外線を観測)
スペクトルプロファイラ(狭い範囲の可視光・近赤外線を詳しく観測)
地形カメラ(月面の立体画像を撮影)

蛍光X線分析計

レーザー高度計
プラズマ観測装置(月上空の荷電粒子を観測)
プラズマイメージャ(地球のオーロラなどを観測)
ハイビジョンカメラ(高精細画像で「地球の出」などを撮影)

磁場観測装置
(長さ12mの軽量マストの先端に設置)

上げられる。アポロ計画はギリシャ神話の太陽の神の名前に由来するが、今度の探査計画は月の女神にちなみセレーネ(SELENE)と略称される。一般の人々に親しみを持ってもらおうと探査機の愛称が一般公募され、最も多かった「かぐや」に決まった。竹取物語のかぐや姫にちなむ名前だ。

かぐやは重量2トン(燃料を積んだ打ち上げ時は3トン)、全長約5m、高さとは幅は約2mでマイクロバスに近い。打ち上げ予定日は8月16日。まず地球を2周する間に約13畳分の広さがある太陽電池パドルや通信用ハイゲインアンテナを展開、軌道調整の後、月に向けて飛行を始め、約5日後には地球から38万km離れた月近傍に到達、

月周回楕円軌道に投入される。徐々に軌道高度を下げながら2つの子衛星を分離した後、高度100kmの月周回観測軌道に入る(28ページの図)。ここまでで約40日間の日程だ。その後、長さ15mの電波アンテナ4本と磁場観測装置をつけた12mのマストを伸ばし、各種観測機器をチェック。約1年にわたって月を観測する。

かぐやは高度100kmの月上空に浮かぶ観測ステーション。アポロ宇宙船には3人の飛行士が乗ったが、かぐやに人は乗らない。アポロ計画の時代には存在しなかった高度なコンピューターが人の頭脳の代役を務める。人の目の代わりとなるのは機械の眼。人間は可視光でしかものを見ることができな

いが、かぐやの眼は可視光のほかにガンマ線、X線、赤外線でも月を見る。こうしたさまざまな種類の光(電磁波)で月を眺めると、人の眼では見ることができない別の月面の風景が浮かび上がる。それは例えば元素や鉱物、岩石の分布だ。

かぐやは月面からやって来るさまざまな種類の光を受けるほか、自らも“サーチライト”で月面を照らして月の素顔を調べる。サーチライトの1つはレーザー光線。月面からの反射光をもとに地形を精密に調べる。測定誤差は5mだ。高度約100kmから観測することを考えると、精度はかなり高い。

もう1つのサーチライトは電波。長さ15mのアンテナ4本が放射する強

さまざまな種類の光で元素や鉱物、岩石を探る

月は地球よりはるかに小さいので重力が弱く、大気を持つことができない。だから太陽や宇宙空間から降り注ぐガンマ線やX線、紫外線、粒子線などは大気にブロックされることなく月面に到達する。もちろん可視光線も直達する。月面の物質はこれらを浴びて反応を起こし、さまざまな波長の光（電磁波）を出したり吸収したりする（下はその概念図）。それをとらえれば月面の元素と鉱物の分布がわかり、それらの情報から岩石の種類も特定できる。かぐやが観測する光は波長の短い順にいうとガンマ線、X線、可視光、赤外線だ。

月面からのガンマ線には2つの発生機構がある。1つは宇宙から降り注ぐ高エネルギー粒子線「宇宙線」を浴びることで各種元素が放射するガンマ線。宇宙線が月面に衝突して中性子が発生し、この中性子が月の各種元素と反応して、その元素に固有の波長のガンマ線を出す。氷が存在すれば水素が出すガンマ線を検出できる可能性がある。もう1つのガンマ線源は月面にあるウランやラドン、トリウムなどの放射性元素が自ら出すガンマ線で、これらも各元素に固有の波長を持っている。こうした各種ガンマ線をガンマ線分光計で観測する。

各種元素はまた太陽からのX線を受けて励起し、特定波長のX線（蛍光X線）を出す。太陽面でフレアと呼ばれる爆発現象が起きると太陽からのX線が急激に強まり、それによって月も蛍光X線で明るく輝く。そうしたときは観測の好機で、普通のレベルのX線強度では反応しない元素や、微量にしか存在しない元素からの蛍光X線もとらえられる。

逆に言うと、蛍光X線の強度は、太陽が放射するX線の強度によって変化するので、かぐやは太陽のX線も同時に計測し、その強度を勘案して月面の各種元素の分布密度を見積もる。かぐやは各種物質の標準試料を搭載しており、それからの蛍光X線をもとに観測機器を較正し、データの信頼性を確保する。元素組成がわかれば鉱物や岩石に関する情報も得られる。

月面が放射する可視光と近赤外線にも多くの情報が含まれて

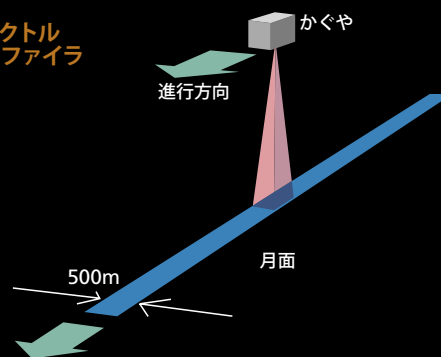
いる。各種鉱物は固有の結晶構造を持っており、太陽光と反応して特定波長の光だけを吸収する。だから鉱物からの反射光を調べると、特定波長の光だけが極端に弱まる。この波長ごとの光の強度変化のパターンから各種の鉱物や岩石の分布がわかる。

かぐやは幅約20kmの広い地域を9つの異なる波長で観測する装置（マルチバンドイメージャ）と、幅500mの狭い範囲を約300の異なる波長で詳しく観測する装置（スペクトルプロファイラ）の2種類を搭載している。アポロ宇宙船の着陸地点付近は実際に月面の岩石や地質が調べられているので、そうした地域の観測データを装置の較正に利用する。

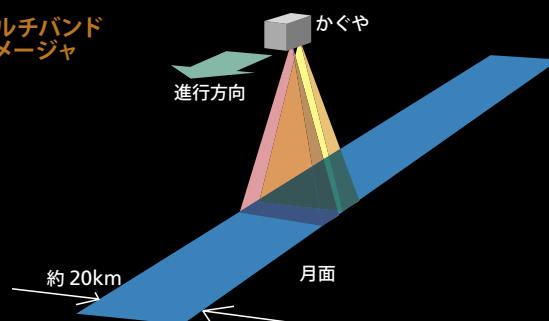
月面からは電磁波とともに粒子も放出されている。放射性元素が出す α 線（ヘリウム原子核）だ。かぐやが搭載する粒子線計測器は α 線の観測からラドンなどの放射性ガス濃度を評価する。ある地域で α 線の大きな変動が観測されれば、そのあたりからガスが放出されたことがわかる。

ガンマ線観測の際に述べたように、月面に宇宙線がぶつかることで中性子が発生するので、これも上空から観測できる。中性子は水素原子にぶつかったときだけ減速する（エネルギーが減る）ので、大量の水があれば、その上空だけで中性子の減速が検知される。ルナプロスペクターはこの手法で氷の存在を探ったが、かぐやでは中性子は観測しない。

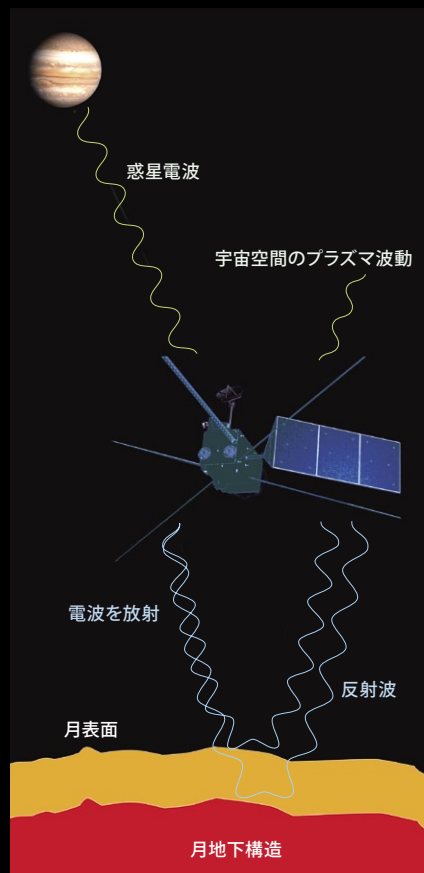
スペクトル
プロファイラ



マルチバンド
イメージャ



光で地形を、電波で地下を

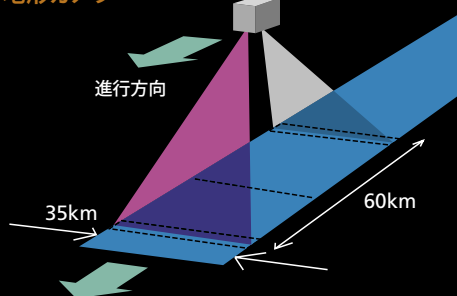


月面の地形はカメラとレーザー高度計で調べる。地形カメラはかぐやの進行方向斜め下方と後方斜め下方の狭い帯状地域を撮影する(下図)。2つの違う角度から撮影すると地形を立体的に把握できる。レーザー高度計は波長約 $1\mu\text{m}$ の赤外線レーザーを月面に照射し、その反射光を計測してかぐやと月面との距離を精密に求める(右下の図)。その測定精度と計測密度はクレメンタインをはるかにしのぐ。これまで計測されていない緯度 75° 以上の極地域もカバーする。1年間で3000万地点以上の高度を計測する。

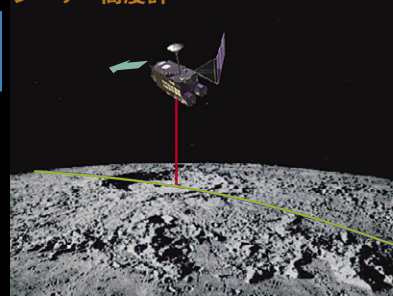
月表面は水を含んでいないので電波を照射すると、その電波は水に吸収されることなく地下深くに伝わり、地層の境界面など物質の密度や特性が急に変化する場所で反射して戻ってくる。はるか高空から実施する地中レーダーだ(左)。

かぐやは長さ15mのアンテナ4本を使って波長60mの電波を放射、その反射波が戻ってくるタイミングを精密に計測し、反射波がどれくらいの深さから戻ってきたのか調べる。クレメンタインもレーダー探査を実施、反射電波の特性を詳しく調べることで南極域に氷が存在する可能性を突き止めた。かぐやでどのようなデータが得られるのか注目されている。木星が出す電波(惑星電波)なども観測する。

地形カメラ



レーザー高度計



月上空の環境を観測

月面には地球のような磁場は存在しないが、月面のところどころに岩石が磁気を帯びた「磁気異常」地域がある。なぜそうした場所が存在するのか? その謎を解けば月の進化や内部構造の解明につながる。かぐやは、地球磁場の10万分の1以下の非常に微弱な磁場まで計測できる磁力計で上空から磁気異常を観測する。かぐやの各種搭載機器が発生する磁場の影響を避けるため、磁力計は本体から12m伸ばしたマストの先に取り付けられている。

月は非常に希薄だが大気が存在する可能性がある。大気といっても地球大気のような中性の分子からできているのではなく、荷電粒子からなる大気(電離層)だ。その存在はまだ確認されていない。成因についてはいくつかの仮説がある。例えば、太陽から吹き出す電子など荷電粒子の流れ「太陽風」が月面にぶつかって、月面から原子がはじき飛ばされたりしてできたというシナリオなどだ。

かぐやは軌道上の荷電粒子の質量やエネルギー、密度、速度、温度などをプラズマ観測装置で調べる。子衛星が出す電波が月の電離層によって変化を受ける可能性があるため、これを地上局で測定する。月面に磁場が存在すると、太陽風の電子は月面近くで鏡のように反射されて戻ってくる。この電子をとらえることで、間接的に月表面の磁場の強さを知ることができる。

力な電波は、月の地下数kmまで到達して戻ってくる。この反射波を分析すると最深5kmくらいまでの地下構造がわかると考えられている。富士山を逆さにしたよりもさらに深いところまで月内部を“透視”できるのだ。巨大クレーターなどの地下がどうなっているかが見えてくるだろう。

かぐやそのものを“探り針”として、月面各点の重力を調べるのも重要な使命だ。重力によって、電波で調べるよりもさらに深いところの様子が見えてくる。かぐやのさまざまな“眼”で見た月の風景は、アポロの宇宙飛行士がもたらした月の風景写真とは違った意味で、人類に多くの驚きをもたらしてくれることになるだろう。

では、かぐやはどんな月の謎を解く

月の裏側の重力を調べる

かぐやの観測で大きなウエイトを占めるのが重力測定だ。月にはマスコン（Mass Concentration）と略称される異常に重力が強い地域がある。非常に重い物質が月表面近くに存在するため、アポロ宇宙船が着陸する際、マスコンの影響を受けて目標着陸地点から外れたこともある。月の重力マップは月の内部構造を知る重要な手がかりだが、これまで重力は月の表側しか精密に調べられていなかった。それは観測に大きな制約があるからだ。

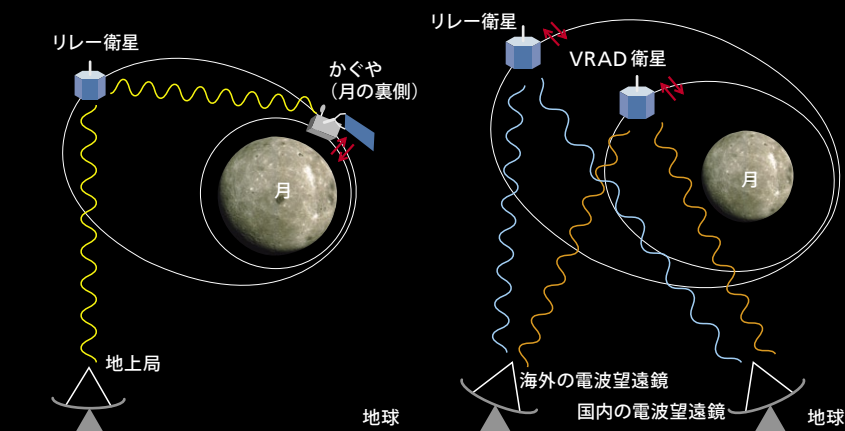
重力測定に使うのは月周回探査機そのもの。探査機は地上の基地局からの電波を中継器で地球に送り返しているが、重力の変動で探査機が上下に振れると、送り返される電波の周波数がドップラー効果によって変動する。だから地上局で電波の周波数の変化を測定すれば、月の重力場の変動がわかる。

この観測では原理的に、探査機が月の表側の真ん中あたりを飛んでいるときに最も感度がよい。探査機の上下動がストレートに電波の周波数変動に変わるからだ。しかし、月の表側でも縁のあたりになると、探査機が大きく上下動しても、地球に

向かう電波はあまり変化しなくなる。探査機が月の裏側に回ったら観測自体が不可能になる。米探査機ルナプロスペクターは月の裏側の重力マップを作ったが、それは大きく高度をとって月の裏側を回ること、地球から死角になる部分を極力減らす工夫などをしたからだ。ただ、月から離れるほど探査機が受ける重力場の変動は小さくなるので、観測精度は落ちる。

かぐやは2つの子衛星（右下の写真）を使うことで、月の表側の縁近くでも、月の裏側でも精密に重力を測定する。かぐやが月の裏側を飛ぶとき、子衛星の1つリレー衛星で電波を中継する（下の図の左）。これにより月の裏側でもドップラー効果による周波数の変化をきちんと観測できるようになる。

月の表側の縁あたりの重力測定ではリレー衛星と、もう1つの子衛星VRAD衛星を使う。両子衛星から電波を発信し、人工の電波星にする。この電波星を地球にある複数の電波望遠鏡で同時観測して動きを追うことで、高精度の重力測定が実現する（下の図の右）。観測には国立天文台の望遠鏡のほか中国、欧州、オーストラリアの望遠鏡も加わる。



JAXA

手がかりを与えてくれるのか。これまでの探査を振り返りながら、月とはどんな天体であり、何がわかっていて、何がわかっていないのかみてみよう。

月科学の始まり

月は、望遠鏡を使えば地球からかなり詳しく観察できる。1950年代末から1970年代半ばにかけて米国とソ連（当時）は合わせて約50機もの無人月探査機を送り出した。アポロ計画の有人月探査は6度に及び、約390kgに達する月の石や塵が持ち帰られた。ソ連

のルナ計画（無人探査）でも約300gの月試料が回収された。

しかし、それでもなお、月に関する謎の多くは解かれなかった。アポロ計画は「月に人類を送り込むこと」を最優先課題としていたことが背景にある。月に着陸する場合、ごつごつした場所だと軟着陸に失敗する恐れが高まるし、着陸船が砂の中に沈み込んで地球に戻れない事態になるのもまずい。無人探査機で膨大な数の月面写真を撮ったのは有人機の着陸地点を選び出すのが主目的で、無人探査機による月表層の調

査は人類月着陸の安全性評価に重点が置かれた。綿密な事前調査が実り、アポロ計画では人類初の月着陸に成功したアポロ11号以降、宇宙船の事故に見舞われた同13号を除いて、当初予定通り月に行って戻ってきた。

米ソの月探査は国威発揚が狙いだったためアポロ11号による人類初の月着陸で一番乗り競争に決着がついた後は一般の関心が急速に薄れ、巨額予算も重荷となってアポロ計画は1972年の同17号で打ち切られた。ソ連のルナ計画も1976年のルナ24号による月

面試料の地球への持ち帰りが最後となった。米ソは宇宙ステーションの建設に力を注ぎ、ソ連崩壊による冷戦終結後は、生命存在の可能性がある火星の探査が米国を中心に活発に進んだ。

だが、月の研究者にとってみれば状況は違った。アポロ計画は月の起源と進化を探る月科学のスタートラインにすぎなかった。宇宙飛行士が持ち帰った月の石や塵はさまざまな研究機関で分析され、飛行士が月面に設置した4基の月震計は、月内部で起こるかすかな振動を地球に伝えてきていた（月震計の観測は1977年まで続いた）。

月を周回するアポロ司令船には当時としては最先端の各種センサーが搭載され、月面の化学組成や磁場、重力などが調べられた。レーザー光による高度測定や電波による地下探査も試みられた。こうした観測データと月サンプルの分析結果、無人探査機が撮影した膨大な月面写真などを総合的に検討して、研究者は月はどうな天体なのかを解き明かし始めた。

巨大衝突とマグマの海

人類を月に送り込むのが主目的とはいえ、アポロ計画などで得られたデータは膨大で、それによって月の理解は飛躍的に進んだ（G. J. テイラー「アポロが残した科学の財産」日経サイエンス1994年9月号）。第1は月の起源について巨大衝突説が最有力候補として絞り込まれたこと。原始地球に火星サイズほどもある原始惑星が衝突、その際に放出された膨大な量の破片が集積して月が誕生したという説だ。

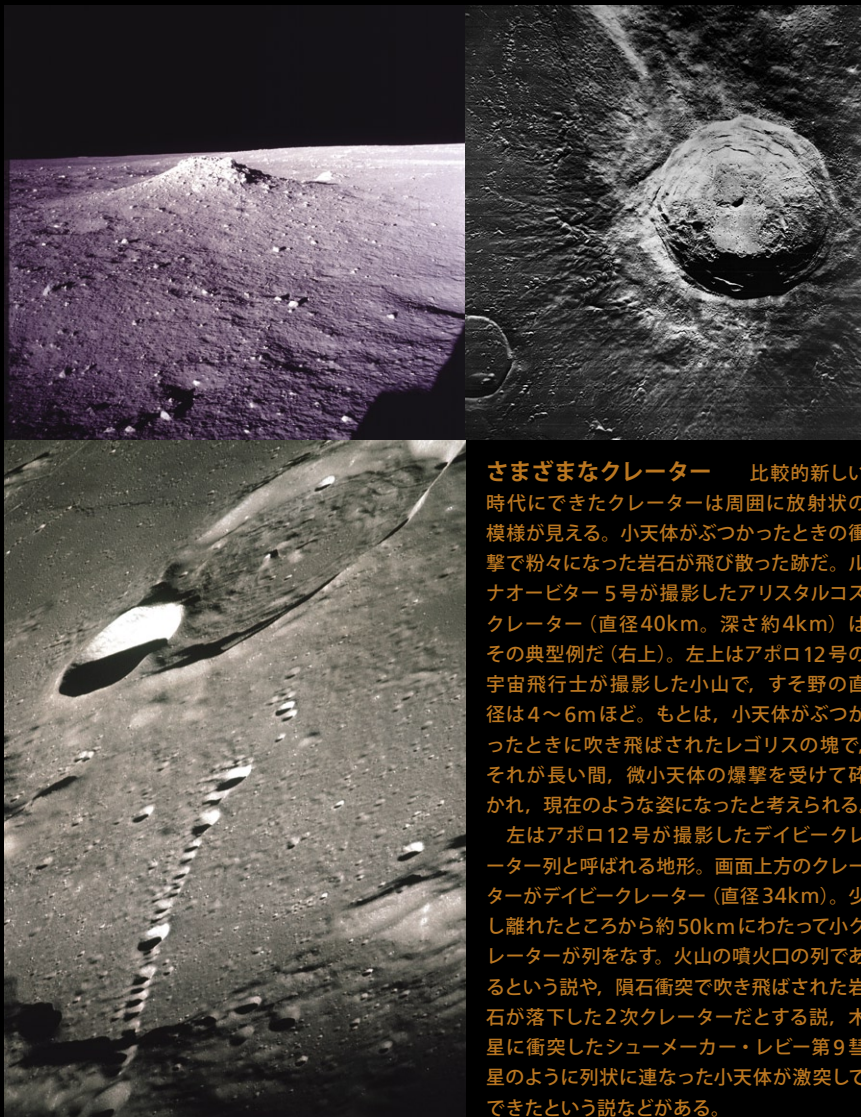
月の進化と内部構造に関しても進展がもたらされた。月は誕生初期、深さ数百kmのマグマが表面全体を覆っていた可能性が高いことが明らかになった。これをマグマオーシャン（マグマの海）と呼ぶ。マグマに含まれる軽い成分が浮き上がって月の地殻となり、

クレーターと砂漠の世界

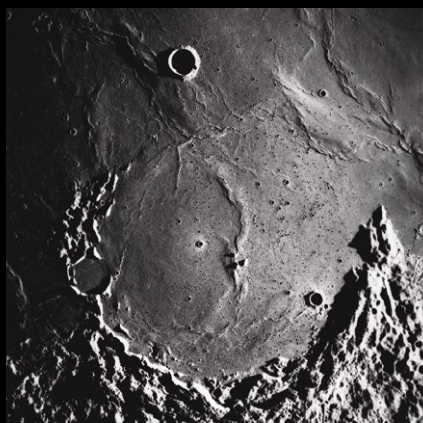
月はクレーターと砂漠の世界だ。地球は大気があるので、宇宙から飛来する小さな塵などは大気との摩擦で燃え尽きて地上まで落ちてこない。しかし、月は目に見えないような塵でも猛スピードで月面に激突し、周囲の岩石を吹き飛ばしてクレーターを形成する。月ができて約45億年、小は微細な塵から、大は直径数km以上の小惑星・彗星まで、月は爆撃にさらされ続け、無数の衝突クレーターができ、吹き飛ばされた大小無数の岩石の破片が降り積もった。

こうして形成された月の塵はレゴリスと呼ばれる。アポロ計画で月に初めて着陸したアポロ11号の宇宙飛行士の靴跡が月面にくっきり残る写真がよく知られている（右）。それを見るとレゴリスがいかに微細なものなのかわかる。

クレーターのほかに月面を特徴づけているのは海が存在だ。かつて月にも火山活動が見られ、サラサラした溶岩が月面に大量に流れ出し、それが冷えて海となった。海が暗い色に見えるのは、溶岩が黒っぽい色をした玄武岩質だからだ。レゴリスの中には、微小なガラス球も混じっているが、これは隕石衝突による破片ではなく、溶岩が噴水のように噴出したとき、その微細な飛沫が急冷されてできたものだ。



さまざまなクレーター 比較的新しい時代にできたクレーターは周囲に放射状の模様が見える。小天体がぶつかったときの衝撃で粉々になった岩石が飛び散った跡だ。ルナオービター5号が撮影したアリスタルコスクレーター（直径40km。深さ約4km）はその典型例だ（右上）。左上はアポロ12号の宇宙飛行士が撮影した小山で、すそ野の直径は4～6mほど。もとは、小天体がぶつかったときに吹き飛ばされたレゴリスの塊で、それが長い間、微小天体の爆撃を受けて碎かれ、現在のような姿になったと考えられる。左はアポロ12号が撮影したデイビークレーター列と呼ばれる地形。画面上方のクレーターがデイビークレーター（直径34km）。少し離れたところから約50kmにわたって小クレーターが列をなす。火山の噴火口の列であるという説や、隕石衝突で吹き飛ばされた岩石が落下した2次クレーターだとする説、木星に衝突したシューメーカー・レビー第9彗星のように列状に連なった小天体が激突してできたという説などがある。



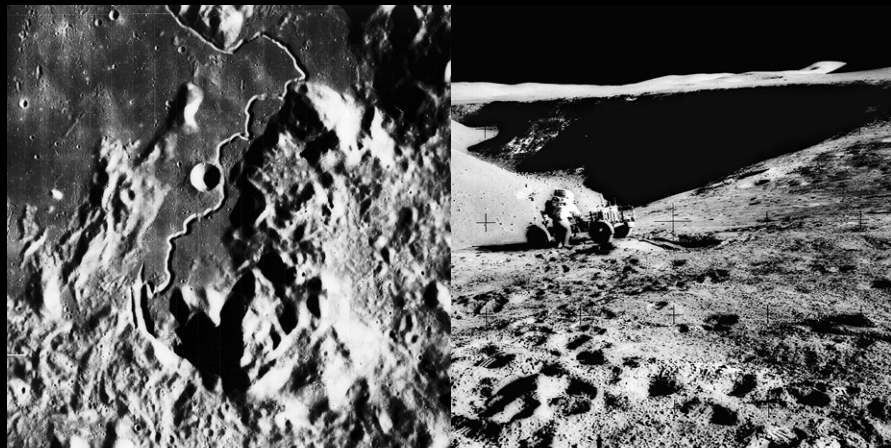
海に埋まるクレーター アポロ16号が撮影したルトロンヌクレーター（直径116km）は半分近くが「嵐の大洋」に埋まっている。クレーターの中央に形成された小高い山がかろうじて顔を出している。ルトロンヌクレーターが形成された後に、火山活動によって溶岩が流れ出て嵐の大洋が誕生したことが読み取れる。



月上空に浮かぶアポロ宇宙船 月の上空に浮かぶアポロ12号。高度は約110km。かぐやが投入される月の極軌道の高度は100kmなので、かぐやも、この写真中のアポロ12号とほぼ似たような感じで月を観測することになる。



割れた巨石 アポロ計画最後の有人探査となったアポロ17号の宇宙飛行士が撮影した一軒家ほどもある巨石。山の斜面を転がり落ちてきて割れたとみられている。



蛇行する谷 左上はルナオービター5号が撮影した「雨の海」の縁近くの月面写真（画面上が北）。西側に雨の海の一部が見え、その縁近くに蛇行する谷「ハドレーリル」が見える。東側にある山がちの場所は、雨の海の縁を構成しているアベニン山脈。アポロ15号は画面右上のハドレーリルが大きく曲がるあたりに着陸した。右上の写真はハドレーリルの縁あたりを探査車に乗る宇宙飛行士。

ハドレーリルのような蛇行谷は火山活動の副産物だ。溶岩がわき出して雨の海ができた際、表面直下を溶岩が川のように流れ、流れ去った跡にトンネルができ、そのトンネルの天井が崩壊して谷ができた。谷はその後、大小多数の隕石衝突によって浸食され、凹みはなだらかになっていったと考えられている。

重い成分が沈んで月のマントルができあがったというシナリオが書かれるようになった。月のクレーターは39億年前から38億年前にかけての約1億年の間に集中的に形成されたらしいこともわかった。この時期は「隕石の重爆撃期」と呼ばれるようになった。

しかし、まだまだデータは不足していた。月は自転周期と地球の周りを回る公転周期が一致しているので、地球から見える月面は常に一方の側の半球であり、これを「月の表側」、地球から見るできない半球を「月の裏側」という。アポロ宇宙船が着陸したのはすべて月の表側の低緯度から中緯

度にかけてで、ソ連のルナ計画の無人探査機が着陸したもの同様だ。月を周回するアポロ司令船が観測したのは月の赤道に近い地域だけだった。

月の全球探査へ

私たちが日ごろ見ている月の表側は「海」と呼ばれる暗い色の地域と「高地」と呼ばれる明るい色の地域に大別される。海は表面が平坦で全体がなめらかなのに対し、高地はクレーターが多くて起伏が激しい。ところが、無人探査機が撮影した写真によって人類が初めて知った月の裏側には海はなく、クレーターであばたとなった高地ばかりだ

った。こうした月の表側と裏側の大きな相違については、いまだにその理由がわかっていない。だからアポロ計画やルナ計画のデータだけで月の起源や進化を研究するには限界があった。

このデータ不足を解決するには、月の表側も裏側も極域つまり全表面を高精度で測定することが求められた。その解が月の南北両極上空を通過する極軌道に、各種測定機器を搭載した大型探査機を投入することだった。探査機の軌道面は固定されているが、月は1カ月で自転するので、探査機は1カ月で月の全域を視野に収めることができる。実際、数多くの地球観測衛星は

月はわからないことばかり

月は有人探査が実施された唯一の天体。しかし、アポロ計画やルナ計画は月を理解することよりも、人類を送り込むことを目的としていたため、月の起源や進化など依然として謎が多い。かぐやはそうした謎を解くための新たな手がかりを提供してくれるだろう（背景は火星探査機「のぞみ」が月接近時に撮影した月の裏側の写真）。

外見の謎

大きな質量 月の質量は地球の質量の1/80。他惑星の衛星は最大でも母惑星の質量の1/1000程度なので、月は突出して大きい。

大きな角運動量 地球の自転と、月の地球周りの公転を合わせた「地球・月系の角運動量」は他の地球型惑星と比べてずば抜けて大きい。

少ない揮発性元素 比較的低い温度で気化してしまうカリウムや鉛などの揮発性元素が地球に比べて少ない。

消えた磁場 地球は中心核の液状部分（外核）の流動によって磁場が生み出されているが、月にはそうした仕組みによる強い磁場は存在していない。しかし、ところどころに月の岩石が磁気を帯びた地域があり、かつては月にも磁場が存在したことがわかった。その磁場の発生の仕組みや、なぜそれが失われたのかはわかっていない。

大きく違う表と裏 月の表側（地球に面した側）は「海」と呼ばれる黒っぽい部分が多く見られるのに対し、裏側は白っぽい「高地」が大部分を占める。「海」と「高地」では組成が大きく異なる。なぜ月の表と裏でこんなに違うのかわからない。

内部の謎

月震の原因は アポロ計画で月の表側の赤道域に置かれた地震計で「月震」が観測された。地球の重力による潮汐力が引き金となって起こると考えられているが、月震によって解放される地下のひずみ量は、潮汐力から推定されるひずみ量より大きいと見積もられており、原因ははっきりしていない。

わからない内部構造 月震のデータから月も地球と同様、地殻とマントル、中心核からできているとみられているが、本当にそうなのか、月の表側と裏側では違いがあるのかどうかなどよくわかっていない。

非常に小さな中心核（コア） 鉄を主成分とする地球のコアの質量は地球全体の約30%を占めるが、推定される月の鉄コアの質量は月全体の数%。なぜそんなにコアが小さいのか、地球のコアと同様、一部はまだ溶けた状態なのかどうかなどわかっていない。

起源と進化の謎

わからない成り立ち 月は地球とほぼ同時期、約46億年前に誕生した。その成因には、分裂説、捕獲説、双子説、巨大衝突（ジャイアント・インパクト）説の4つがあるが、どれが真実であるのか、わかっていない。

「マグマの海」はあったのか アポロ計画で持ち帰られた月の石の分析から、誕生直後、月の全域がどろどろに溶けた「マグマの海（マグマオーシャン）」だったと考えられるようになったが、そうでないという説もある。

隕石の“重爆撃”はあったのか 約38～40億年前、月に集中的に巨大隕石が降り注いだ「重爆撃期」があったとされるが、それが真実かどうかは確定していない。

火山活動はいつ始まり、いつ終わったか およそ40億年前、ウランなど月内部の放射性元素の崩壊熱が熱源となり、溶岩が月面に流れ出た。大規模な火山活動は約30億年前に終わったとみられているが、はっきりとはわかっていない。

月開発の上での謎

極域に氷は存在するか 月探査機ルナプロスペクターは南北両極に合わせて100億トン超とも推定される氷が存在する可能性を明らかにした。氷は解かせば飲用に、水を分解すれば呼吸に必要な酸素ができ、同時に得られる水素とともに宇宙船の燃料になる。しかし、本当に氷があるかどうかはわかっていない。

有用資源はどこにどれほどあるか 月面の鉱物や元素の分布は100kmくらいの大まかな精度では調べられているが、詳しい分布はわからない。

隕石はどのくらいの頻度で落ちているか 月は大気がないので、小さな隕石でも大気によって燃え尽きることなく月面に激突する。その激突は月面での発光現象として、地球から観察される。こうした隕石の激突がどのくらいの頻度で起きるかは、月に人類が進出する際、考慮すべきデータになるが、よくわかっていない。

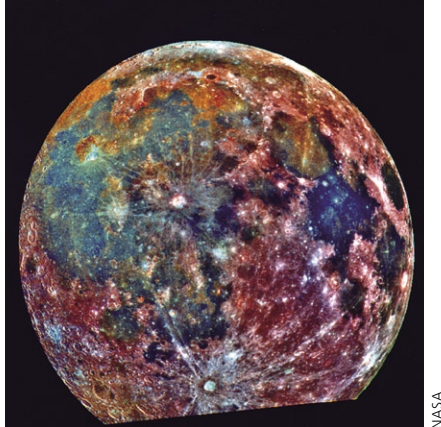
地球の極軌道を周回している。アポロ計画終了後の米国で、月の極軌道を周回する探査機の計画が構想されたのは自然な流れだった。だが、財政難の中で宇宙ステーション建設や他の惑星探査があり、スペースシャトル事故もあって計画は実現しなかった。

1994年、長い空白期間の後、小型月探査機クレメンタイン（Clementine）が打ち上げられたが、主役は米航空宇宙局（NASA）ではなくペンタゴン（米国防総省）だった。仮想敵国の不穏な動きを軌道上から早期に察知する高性能センサーの試験を月を対象に実施するのが目的だったが、月探査にも利用された。次いで1998年、NASAの小型探査機ルナプロスペクター（Lunar Prospector）が打ち上げられた。これら両探査機によって月の全球の元素分布や重力場、地形などに関するマップが初めて作成され、研究者が驚くようないくつもの発見がもたらされた。

相次ぐ大発見

その1つは月の裏側の南極地域で見つかった太陽系の天体で最大のクレーターだ。サウスポール・エイトケン・ベースン（盆地）と呼ばれるこのクレーターの直径は約2500km、深さは約12km。仮に東京を中心に円を描けば、日本列島と朝鮮半島の大部分がすっぽりと中に入ってしまう。

月には小惑星や彗星が激突してできたクレーターが大小無数にあるが、サウスポール・エイトケン・ベースンはあまりにも巨大すぎ、しかもできた後に多数の小天体が激突して、もとの形が崩れていたため、写真では判別がつかなかった。クレメンタインのレーザ高度計によって巨大な凹みが初めて浮かび上がった（P. D. スピューディス「ふたたび月へ」日経サイエンス2004年3月号）。このほかにもベースンと名付けられた場所は非常に凹んで



月の元素分布 木星探査機ガリレオが月接近時に観測したデータをもとに作られた月の元素分布地図。青色はチタンに富み、オレンジ色はチタンに乏しく、紫色は火山活動に由来する組成で、赤色は鉄とチタンに乏しい。月の右側に見える静かの海は青色、月の左側にある嵐の大洋は青とオレンジ色が多い。元素分布地図は月の進化や内部構造を探る重要な手がかりになる。下方中央はティコクレーター。これよりもはるかに分解能が高い地図がかぐやによって得られる。

いることが判明、ベースンが超巨大クレーターであることが確実になった。

クレメンタインは簡易レーダーも搭載しており、その探査によって南極近くに貴重な物質が存在している可能性を突き止めた。氷だ。そのあたりは日が当たっていないため写真では暗くなっているが何もわからないが、レーダー画像は、そこに膨大な量の氷が存在するらしいことを物語っていた。

氷の起源については次のようなシナリオが考えられている。“汚れた雪玉”である彗星が月に激突すると、氷の一部は月面に残るが、月の昼、太陽で加熱されると蒸発して宇宙空間に逃げてしまう。ただ、極域の深い凹地になると永遠に太陽光が差し込まない。この永久日陰地域は常に -200°C 以下になっているので、水分子がやって来ると氷となって蓄積する。クレメンタインのレーダーは、こうしたシナリオで実際に膨大な量の氷が眠っている可能性があることを明らかにした。

続くルナプロスペクターも中性子の観測装置で両極域を探索、北極地域にも氷があるらしいことを突き止めた。

両極域の氷は合計100億トン以上と推定されるが、確証は得られていない。ルナプロスペクターは探査終了後、南極近くのクレーターに激突、その様子を地球の望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡で観測したが、水は検出できなかった。

しかし、本当に膨大な量の氷が表面近くに存在するなら、それは月科学上での大発見にとどまらず、人類月進出の上でも非常に重要だ。莫大な費用をかけて地球から水を運ぶ必要がなくなるからだ。飲料水用のほか、水を分解すれば呼吸に必要な酸素ができ、同時に得られる水素とともに宇宙船の燃料になる。

クレメンタインなどにより、永久日陰地域の近くに、常に日が当たり続ける高地が存在する可能性も明らかになった。極域では日射が弱く、赤道域ほどの酷暑にならない。夜がないので太陽光発電で電力を安定供給できる。その上、近くに氷があれば人類の居住にとって、これほど最適な場所はない。極域の氷は今後の重要な探査課題だ。

両探査機によって作成された月全球の元素分布や鉱物分布の地図は、極域

の氷のほか、アポロ計画で持ち帰られた各着陸地点近くの月の石や塵がどのように広域分布しているかも明らかにした。一例はアポロ12号と14号が持ち帰った微量元素に富む珍しい玄武岩クリープ (KREEP; Kはカリウム, REEは希土類元素=Rare Earth Elements, Pはリン) だ。地球において、クリープを構成する微量元素はマグマが冷えて固まる際、マグマ残液の中に濃集する傾向が知られる。月の進化を解明する重要な手がかりになる岩石とみられていたが、これは月の各地に分布するわけではなく、アポロ12号・14号が着陸した嵐の大洋に特に多く存在することがわかった。放射性元素のトリウムも嵐の大洋に偏在していた。

一方、鉄は月の表側で多く、月の裏側のサウスポール・エイトケン・ベースンでは周りの高地に比べ多かった。重力は新しい時期に形成されたベースンのいくつかで強いことがわかった。

ただ、得られた全球の地図は分解能などの点で不十分だった。例えば元素分布のデータは月面約100km四方の平均値で、月全球での分布傾向はわか

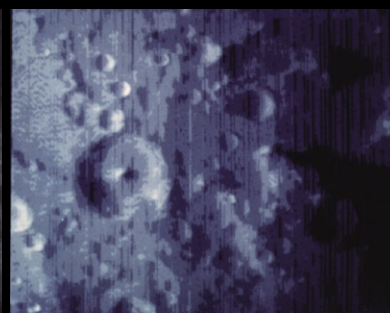
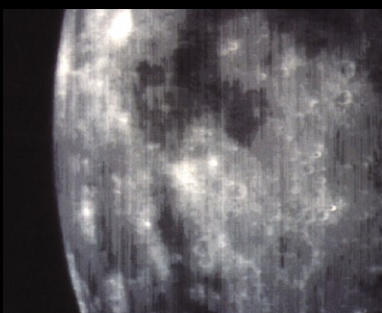
るのだが、場所ごとの細かい情報は載っていない。クレメンタインの重量は月周回軌道投入時で約230kg、ルナプロスペクターは同約160kgと小型で、搭載する観測装置に制約があった。さらに、周回軌道の制約から極域など十分な内容の観測ができない地域もあった。そのため、極域を含めた全域について、より大型の探査機で、月面のさまざまな情報を同時に高精度で観測する必要性があった。そしてこれに応えるべく送り出されるのが、かぐやだ。

かぐやの出番

かぐやの月軌道投入時の重量は約2トンとクレメンタインやルナプロスペクターの約10倍。その分、高性能の大型装置を多数搭載できる。例えばX線観測装置による元素分布の空間分解能は20km以下にまで高められた。項目によっては10km以下になる。地形を調べるカメラの分解能は10m。可視光と赤外光の観測から鉱物分布を調べる装置の分解能は20mで、クレメンタインより一桁高く、感度も高い。

かぐやの観測期間は1年。計画が成

月に行った日本最初の探査機「ひてん」



ひてんは重量は約200kgと、かぐやの1/10以下の小型機で、機体上部に子衛星の「はごろも」(重量約10kg)を載せている(左)。スイングバイのほか地球大気との摩擦を利用して減速・軌道変更をするエアロブレーキの実験をした。宇宙塵の観測なども実施。最後にはフレネリウスクレーター付近に衝突した(上の2枚は、ひてん搭載カメラがとらえた月面)。習得したスイングバイの技術は日米共同の磁気圏観測衛星ジオテイル (GEOTAIL) でも使われた。

功すれば、その膨大なデジタル観測データによって、非常にリアルな仮想の月をコンピューターの中に構築できる。その月は10mの精度で正確に月面の起伏が再現され、どこにどんな元素や鉱物、岩石がどれほどあるのかが手に取るようにわかる。重力や磁場の強さが示され、地下数kmまでの構造も見える。上空100kmにどのような荷電粒子がどれほど存在するのかわかる。

研究者はパソコンのキーボードをただだけで、月の行きたい場所に瞬時に行くことができる。かぐやはバーチャルではあるが、非常に多数の人々に月旅行を実現させてくれるのだ。

日本の月探査は1980年代に準備が本格化し、1990年、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の前身機関の1つ、文部省宇宙科学研究所が探査機「ひてん」を打ち上げた。月や惑星探査に不可欠なスイングバイなどの軌道制御技術の習得と、新しい衛星搭載機器の機能試験などが目的だった。

スイングバイとは天体の重力を利用して、燃料を使わずに探査機の向きや速度を変える技術で、ひてんは月を使うスイングバイで加速と減速の実験に成功し、子衛星「はごろも」を月周回軌道に投入した。ひてんも最終的には月周回軌道に投入され、1993年、指令を受けて月の「豊かの海」に落下した。落下直前までひてんは稼働し続け、迫り来る月面の画像を送り続けた（左ページの囲み）。

その後、宇宙科学研究所は月のスイングバイによって探査機「のぞみ」を火星に向けて送り出し、探査機「はやぶさ」を小惑星イトカワに着陸させた（川口淳一郎『『はやぶさ』の挑戦 小惑星探査時代の幕開け』日経サイエンス2006年6月号）。両探査機は多くのトラブルに見舞われたが、それを糧に宇宙研は月・惑星探査の技術と知識を習得した。「のぞみ」は月接近時、米

月探査の歴史

冷戦時代、米国とソ連（当時）は国家の威信をかけて月への一番乗りを目指した。1950年代から1960年代半ばにかけてはソ連がリード、ルナ計画では月の裏側を初めて撮影し、初めて無人機による軟着陸に成功するなどの成果を上げた。

米国は最初期、パイオニア計画で月を目指したが失敗に終わり、レインジャー計画による月撮影を経て、サーベイヤー計画でソ連の後塵を拝する形で無人機を軟着陸させた。その後、アポロ計画によって形成は逆転、1969年のアポロ11号による初の人類月着陸で勝敗は決した。

米ソによる月探査が1970年代前半に終了した後、長い空白期間が続いたが、1990年代に入って日本と米国による無人探査が始まり、2000年代になると欧州も初の探査機を送り込んだ。今後は日本のかぐやに続いて、中国とインドがそれぞれ初の月探査機を送り出す予定だ。米国も再度の月有人探査を視野に無人探査機を来年打ち上げる。

1959年 ソ連（当時）のルナ3号、月の裏側を初めて撮影。

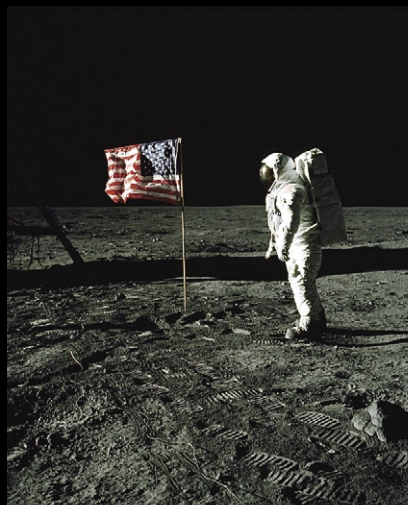
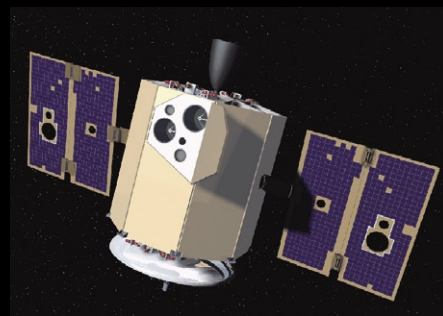
1966年 ルナ9号が、初めて月に軟着陸。ルナ計画では7回に及ぶ軟着陸に成功し、無人探査車による調査や月面標本を地球に持ち帰る無人サンプリリターンを行った。米国のサーベイヤー1号もルナ9号に続いて軟着陸した。サーベイヤー計画では5回の軟着陸を行い、月表層のデータなどを収集した。

1969年 アポロ11号による初の人類月着陸（下の写真）。

1972年 アポロ17号によるアポロ計画6度目で最後の有人月探査。

2004年 欧州初の月探査機スマート1（最下段）が月周回軌道から月面を探査。

2007年 日本の「かぐや」が月周回軌道から総合調査の予定。

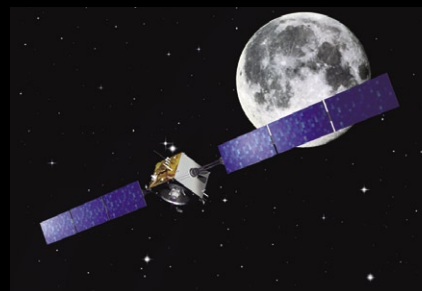


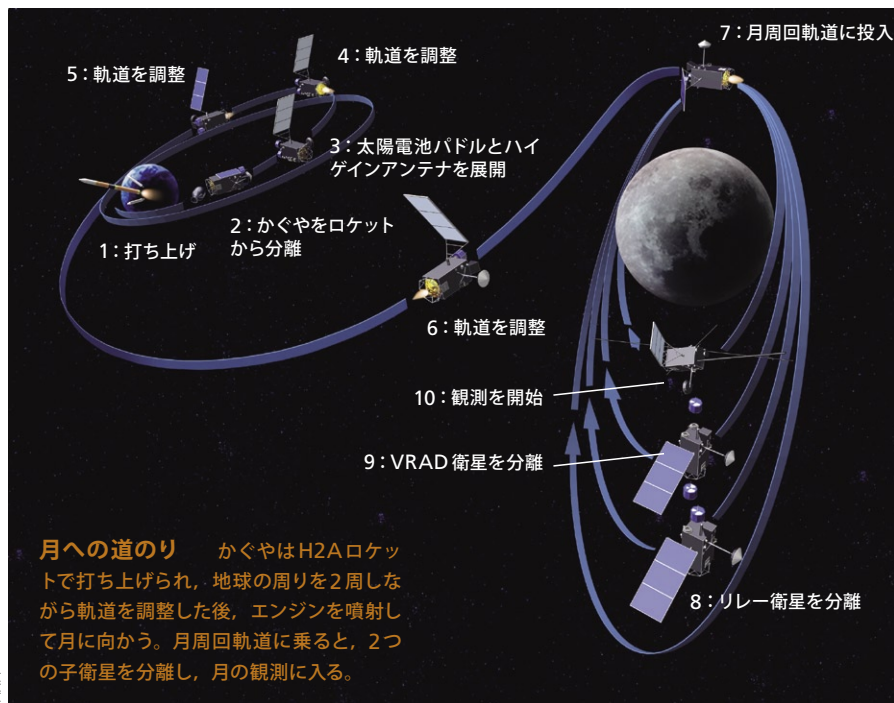
1976年 ルナ24号によるルナ計画最後の探査。

1990年 日本初の月探査機「ひてん」が月周回軌道に、最後は月に衝突。

1994年 米国のクレメンタイン（右上）が月周回軌道から重力や鉱物を探査。

1998年 米国のルナプロスペクター（右中央）が月周回軌道から探査、両極域に氷が存在する可能性を明らかにした。





ソの探査機以外で初めて月の裏側を撮影した（24ページの写真）。

当初計画では、ひてんに続いて月探査機ルナー A（LUNAR-A）が1990年代に打ち上げられる予定だった。内部に月震計と熱流量計を組み込んだ一種の槍（ペネトレーター）を月面に打ち込み、月の内部探査をしようという意欲的な計画だったが、ペネトレーターの開発が大幅に遅れた結果、製作されていた探査機本体が劣化、計画案そのものにもリスクの高さが指摘されるようになったため2007年初めに中止となった。かぐやは日本にとって、いわばこれまでの総決算となる月・惑星分野の探査機といえる。搭載する15台の観測機器に携わる研究者と技術者は300人に及ぶ。

月探査ラッシュ

月探査は今、アポロ計画以来の活況を見せ始めようとしている。欧州宇宙機関（ESA）は欧州初の小型探査機スマート（SMART）1を2003年に打ち上げた。ひてんと同様、スイングバイ技術の習得とイオンエンジンという

新型エンジンの技術実証が主目的で、高性能の観測装置は搭載していなかった。探査終了後の2006年9月、月に衝突させられ、その模様が地球から望遠鏡で観測された。

かぐやに続き年内にも中国初の月探査機、嫦娥（チャンア）1号が打ち上げられる。名称は中国の神話に出てくる月に昇った女性にちなむ。2008年にはインド初の探査機チャンドラヤーン（Chandrayaan；月の乗り物）1号と米国の探査機、ルナリコネサンスオービター（Lunar Reconnaissance Orbiter）とエルクロス（LCROSS；

Lunar Crater Observation and Sensing Satellite）が打ち上げられる。エルクロスは月の南極域のクレーターに打ち込まれ水の存在を調べる。それ以外の3機はいずれも月周回探査機だ。

中国は2012年頃には軟着陸を目指す予定で、2018年頃には地球への月試料の持ち帰りを計画している。チャンドラヤーン2号は月着陸を試みる。ロシアは月の内部構造を調べるルナグロブ（LUNA-GLOB）を打ち上げる予定だ。さらにその先には米国の探査船「オリオン」による有人月探査が計画されている。

すでに日本も、かぐやの後継機や、開発のめどが付いたペネトレーターによる新規探査計画の検討を進めている。

月探査は世界経済の反映でもある。まず、冷戦時代の超大国だった米ソが月に行き、続いて米国に次ぐ経済大国になった日本、統合を果たした欧州、急速な経済成長を遂げつつある中国とインドが月に向かう。中国とインドは国威発揚の意味が強いが、米国の探査は再度の有人探査を見通した本格的なもので、経済復興しつつあるロシアも探査に再参入する。月探査も国際競争と協調の時代を迎えることになる。そうした中で、かぐやが後に続くこうした探査機群の道しるべ役になれるかどうか。かぐやの成否は日本にとどまらず、世界が注目している。 ■

著者 加藤 学（かとう・まなぶ）

宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部固体惑星科学研究系研究主幹・教授。月探査機「かぐや（SELENE）」のサイエスマネージャ。搭載する観測装置の1つ、蛍光X線分光器を担当する。小惑星探査機「はやぶさ」にも参画、2013年頃に欧州宇宙機関（ESA）とJAXAが共同で打ち上げる予定の水星探査機ベピコロンのメンバーでもある。

もっと知るには…

かぐや（SELENE）のウェブサイト <http://www.selene.jaxa.jp/ja/index.htm>

『月のきほん』 白尾元理著、誠文堂新光社、2006年、1680円。

『1億個の地球』 井田茂・小久保英一郎著、岩波書店、1999年、1260円。

『月の科学—月探査の歴史とその将来』 P. D. スピューディス著、水谷仁訳、シュブリンガー・フェアラーク東京、2000年（品切れ）。

『特集：太陽系の新しい常識』 科学、2007年2月号、岩波書店。