

かぐやが見た月の600日

日本の探査機「かぐや」は、これまでよく知られていなかった月の裏側と南北極域の詳しい様子を初めて明らかにし謎に包まれている月の起源と進化の道筋を解明する手がかりをつかんだ

加藤 學 (宇宙航空研究開発機構)

夜空に煌々と輝く月、青空に浮かぶ淡く白い月。2年ほど前の2007年10月から今年6月までの約600日間、私たちが眺める月の上空に「かぐや」が浮かんでいた。探査機かぐやは人類の眼となり、高度100kmから月面をつぶさに観察し、地形や重力、岩石分布、磁場などに関する膨大な量のデータを地球に送ってきた。

そして6月11日未明、宇宙航空研究開発機構(JAXA)相模原キャンパスの管制室から、燃料切れを迎えたかぐやに、月面に落下させるためのエンジン噴射の指令が送られた。かぐやは指令通り、月の南半球にある小クレーターの縁の斜面に、ほぼ水平方向からぶつかり、その使命を終えた。かぐや

からの信号が途絶えたとき、管制室に詰めていた人々の間から自然に拍手がわき上がった(次の見開きページ)。

月は常に一方の側を地球に向けている。これを月の表側という。自転周期と地球の周りを回る公転周期が一致しているためだ。だから、それと反対の側、月の裏側は、いくら大きな望遠鏡でも、地上からは見ることはできない。同様に月の南極や北極あたりも非常に見えにくい。1950年代から70年代にかけて、米国とソ連(当時)はアポロ計画、ルナ計画と呼ばれる月探査を行ったが、詳しく調べたのは月の表側の赤道域から中緯度域だけだった。

それが、かぐやによって裏側と南北両極域を含む月の全体状況が非常に高

い精度で観測され、デジタルデータとして記録された。「アポロ計画以来」と呼ばれる大規模探査でどんなことがわかったのか、総合的な研究報告がまとまるのは1～2年先だが、すでに数多くの論文が発表されている。かぐやが月でどんな発見をしたのか、そのあらましを紹介する。

わかってきた月の裏側

かぐやはマイクロバスほどの大きさがある大型探査機で、打ち上げ時の総重量は3トン。月の南北両極の上空を通過する高度100kmの円軌道(極軌道)を2時間で周回しながら地形や重力、鉱物分布、磁場などを測定した。月の地平線の上に輝く青い地球のハイ

ビジョン映像もお茶の間に届けた。

かぐやが明らかにしたことを一言で言えば「月の裏側はどういうところなのか」ということだ。米Science誌は2009年2月13日号でかぐやの特集を組み、かぐやによる月面画像が表紙を飾った。表紙の見出しも「SELENE and the Lunar Farside」だった(右の画像)。SELENE(セレーネ)はかぐやの正式名称(「かぐや」は愛称)、lunar farsideは月の裏側を意味する(月の表側はlunar nearsideという)。

私たち人類が数百万年、眺め続けた月の表側は「うさぎの餅つき」に見立てられる黒っぽいところと、それ以外の白っぽいところに二分される。黒っぽいところは「海」と呼ばれる。表面が平坦でクレーターが少なく全体が滑らかになっている。白っぽいところは「高地」と呼ばれ、クレーターが多く起伏が激しい。

では月の裏側はどうなっているのだろうか? 表側と同じような白黒の模様が見えるのだろうか? それともまったく違った表面をしているのか? 今からちょうど400年前、ガリレオが望遠鏡で月を眺め、月の世界を詳しく知ることになって以来、人類はこうした

疑問を抱いてきた。

それが明らかになったのは、今から50年前の1959年。ソ連のルナ3号が月の裏側の写真を送ってきた。それを見た天文学者は驚いた。表側とはまったく違っていたからだ。表側に見られた黒っぽい海はほとんど見られず、全体が白っぽい高地だった(月の裏側のクレーターなどに旧ソ連地域の地名や研究者の名前が多いのは、裏側の探査でソ連が米国に先行したことによる)。

10年後の1969年、アポロ計画で月の表側の有人探査が実現した。そして、黒っぽい海の正体は、火山活動で噴出したマグマが冷えてできた玄武岩の平原であること、白っぽい高地は斜長石や輝石を主成分とする岩石からなることがわかった。玄武岩は日本国内でもよく見られる火山岩だが、高地に見られる岩石は地球では珍しい。

しかし、わかったのはここまで。なぜ表側と裏側で風景がこうも違うのか、なぜ表側に海があって裏側にはないのか、こうした問いについては答えが出ていない。この月の二分性の問題は、月の起源と進化(どのように月が生まれ、どのようにして現在のような姿へと変化したのか)の解明とも密接につなが



っている。そして、この謎を解き明かすのが、かぐやの最終目標だ。

全球の高精度地形図を作成

月の裏と表の違いを議論する場合の基本となる情報は月面の起伏が正確に記された地形図だ。かぐやはレーザー高度計を使って詳細な月の地形図を作った。1秒間に1発、レーザー光のパルスをも面に発射、その反射光が戻ってくるまでの時間から、月面の起伏を

お茶の間で月の見物 かぐやにはハイビジョンカメラが搭載され、視聴者がかぐやに乗って月面を見下ろしているかのような映像がお茶の間に届けられた(画像は南極エイトケン盆地の一部)。

JAXA/NHK



月探査機「かぐや」 左は整備中の風景。底部に推進エンジンがある。上部の手前に見えるのはハイゲインアンテナ（右ページのイラスト参照）。上部の奥手に子衛星が見える。上の写真は、かぐやが月に落下したときの管制室の模様。関係者の間からは自然に拍手がわき上がった。

高度の精度4m、位置の精度約80mで割り出す。従来の地形図の高度の精度は数百mだったので、約2桁精度が向上した。かぐやが受ける月の重力は場所ごとに微妙に違うため、飛行高度が変動する。この軌道変化を常時、地上から追跡して、レーザー高度計のデータを補正し、高精度を実現した。レーザー高度計による測定点の総数は最終的に1000万点を大きく超えた。全球平均で5～6kmに1点の高度データを得たことになる。米国地質調査所が作成した月の地形図の基準点（米探査機クレメンタインの月画像から写真測量）の数は約30万点だったので1桁以上の精度向上になる。

特に南北両極域の地形はあまり調べられておらず、月における暗黒大陸のような存在だったが、かぐやによって、月の中で最も詳しく地形が知られる地域になった。かぐやは極軌道を周回する関係から、極域で最もレーザー高度計の測定点の密度が高く、200m四方に1点に達する。かぐやによって、極域に関する情報は飛躍的に増大した。

定まった月の形

得られた膨大な量の地形データから、月の平均半径は1737.15kmと求まった（地球の赤道半径は6378km）。赤道半径が極半径より少し長い扁平な形で、扁平率は約1/800と地球の扁平率

（約1/300）より小さく、より球に近い（扁平率がゼロだと完全な球を意味する）。月の重心は、月の形状から求めた中心から少しだけ地球側にずれており、そのずれは正確には1.93kmであることも明らかになった。

地形図からはさまざまな情報が読み取れる（地形図は30ページ）。月の平均半径の地点を高度0mとすると最高地点は裏側の赤道近くにあるクレターの縁で高度10.75km（地球の最高地点はエベレスト山の標高8.85km）、一方、最低地点は裏側の南極近くにある大盆地「南極エイトケン盆地」の底でマイナス9.06kmだった（地球ではマリアナ海溝の水深10.92km）。

この高低差は約20km。従来知られていたより2km広がった。最高点と最低点がいずれも裏側にあることは、その地域の起伏の激しさを物語る。レーザー光の矢を月面に降らせて作ったかぐやの地形図は、月の表と裏のコントラストを明瞭に浮かび上がらせた。少し不思議な感じがするが、月よりはるかに遠い金星や火星については、すでに米国の探査機によって高精度の地形図が得られている（金星は硫酸の雲に覆われて地表が見えないので、極軌道を周回しながらレーダー測量された。火星については近年、多数の探査機が送り出されている）。今回、かぐやによって詳しい月の地形図が得られたことで、月の地形を金星や火星、地球と比較分析できるようになった。

その結果、広がり方が90～180kmの地形の起伏は、月の方が3惑星より激しいことがわかった。このことは月の地殻が3惑星の地殻より硬いことを意味し、それゆえに重力に打ち勝って激しい起伏が維持されていると考えられる（月も地球と同様、表層部は地殻とマントルからなることがアポロ計画で明らかになっている。地殻の厚さは表側で60km、裏側で約100kmと推定されている）。

では、なぜ月の地殻は硬いのだろう？ それは地殻内部に水のような揮発成分が少ないことが、その原因と考えられる。揮発成分が少なさは、月の起源と進化の謎を解く上で、重要な手がかりになる。地殻ができる段階で揮発成分が失われていたとすれば、それは月の誕生初期は超高温状態であったことを示唆する。

重力異常のマップを作る

かぐやによって作られた高精度の地形図は重力探査やレーダーによる地下探査などのデータを解析する土台にもなった。

まず重力探査。紹介したように、月を周回するかぐやの軌道は場所ごとの重力の微妙な違い（重力異常という）を反映して高度が変動する。逆に言えば、かぐやの軌道のふらつきから、月の各地点の重力が平均より強いのか弱いのかがわかる。このデータをもとに、月全球の重力異常マップが作られた（次のページ）。

特に今回、月の裏側について正確な重力異常マップが初めて得られた。重力変動を知るには探査機の軌道のふらつきを高精度で追跡する必要があるが、月の裏側に入ると、探査機と地球との直接交信が不可能になるので、これまで信頼性が高い重力異常マップはなかった。この問題を解決するため、かぐやは子衛星「おきな」を中継衛星にして、地球との回線を維持することで、月の裏側でも軌道のふらつきを追跡することに成功した（おきなは、かぐやが月の裏側にいるとき、かぐやと地球の両方が視野に入る場所にいる）。

重力異常は地形の高低と物質密度の大小という2つの要因が複合して起きるので、データを解析するには、それぞれの場所において重力異常をもたらす要因を切り分ける必要がある。例えば高い山の上空でも、重い物質がある場所の上空でも、重力は平均値より大

きくなり、重力異常は正の値となる。一方、深い谷と、軽い物質がある場所の上空ではいずれも重力は平均より小さく、重力異常は負の値をとる。

そこで威力を発揮するのが、かぐやが作った地形図。地形図から地形の高低による重力異常の値が計算で求まるので、この計算値を重力異常の測定値から差し引けば、物質密度の大小が要因で起こる重力異常が求まる（補正の仕方には2通りあり、目的に応じて使い分ける）。私たちは地形図を使って、重力異常を読み解く作業を続けている。

表と裏で違うクレターの地下

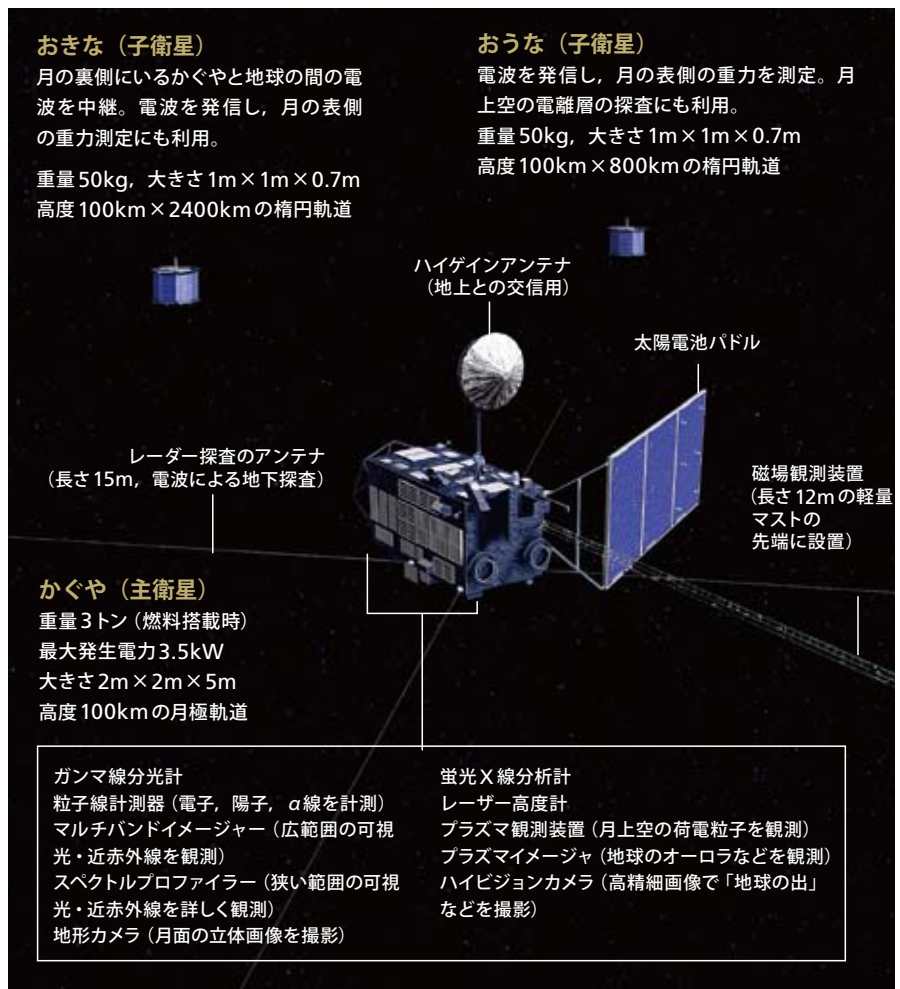
重力異常マップから、直径200kmを超える大型クレターの重力異常のパターンが月の表と裏でまったく違うことがわかった。直径200kmは関東平野がすっぽり入るほどの広さだ。ク

レーターもこれほどのサイズになると、盆地と呼ばれたり、表側では海と呼ばれることが多い。

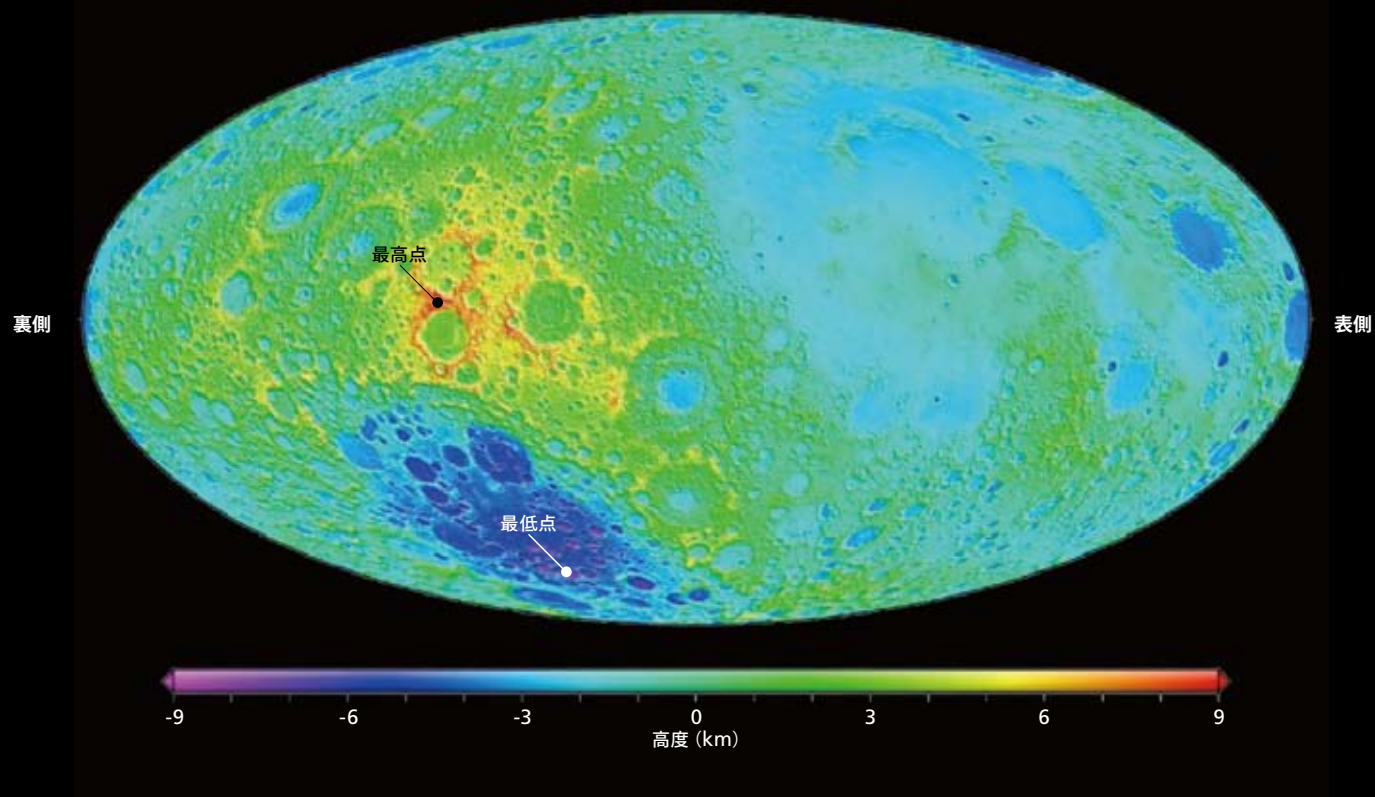
巨大クレターの重力異常は大きく2つにタイプ分けされた。第1のタイプはクレター中心から外側に向かって重力異常が正→負→正となる多重リングの形を示すもの。第2のタイプは、そうしたリング状のパターンが見られず、クレターの内部全体で重力異常が正の値を示す（次ページ）。

アポロ計画でよく調べられた表側の巨大クレター（海）は、ほとんどが第2のタイプ。だから裏側の巨大クレターも第2のタイプに類するもののがかなりあってよさそうに思えるが、ほとんどが第1のタイプだった。

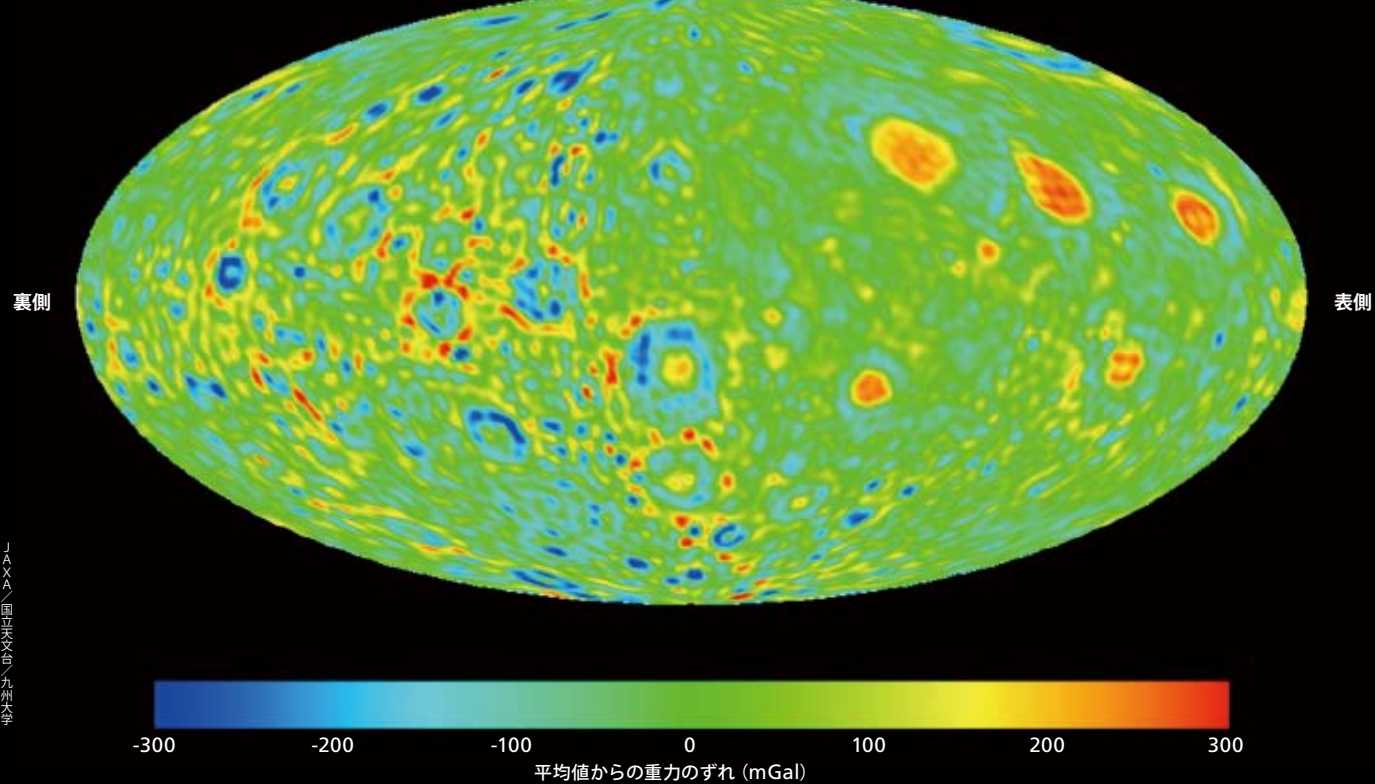
巨大クレターのでき方を考えてみよう。大きな石を池などに投げ入れると、水面は石によって押しのけられて



月の地形図



月の重力異常マップ



大きく違う表と裏 かぐやが作った月の地形図(上段)を見ると、月の表側はやや低い平坦な場所「海」が目立つ。高いところはほとんどない。一方、裏側は赤道地域に高い場所が多く、南極に近いところに非常に広い低地「南極エイテン盆地」があり、それぞれの地域に月の最高点と最低

点がある。重力異常マップ(下段、単位はmGal、地球の重力は980Gal)の月の表側を見ると、表側の海の地下が平均より重力が大きく、地表近くに重い物質が存在することがわかる。月の裏側にはそうした場所はなく、巨大クレーターのとこにリング状の重力異常の変動パターンが見られる。

凹み、その外縁部から水が飛沫として飛び上がる。次の瞬間、水面の凹みの中央部が盛り上がり、さらには中央の盛り上がり外側に向かってリング状の波として伝わっていく。巨大隕石が月面にぶつかる時も、似たようなことが起きる(右のイラスト)。クレーター中央部に盛り上がった丘ができたり(中央丘という)、クレーター内部にリング状の盛り上がり観測されるケースもある(多重リングクレーターという)。

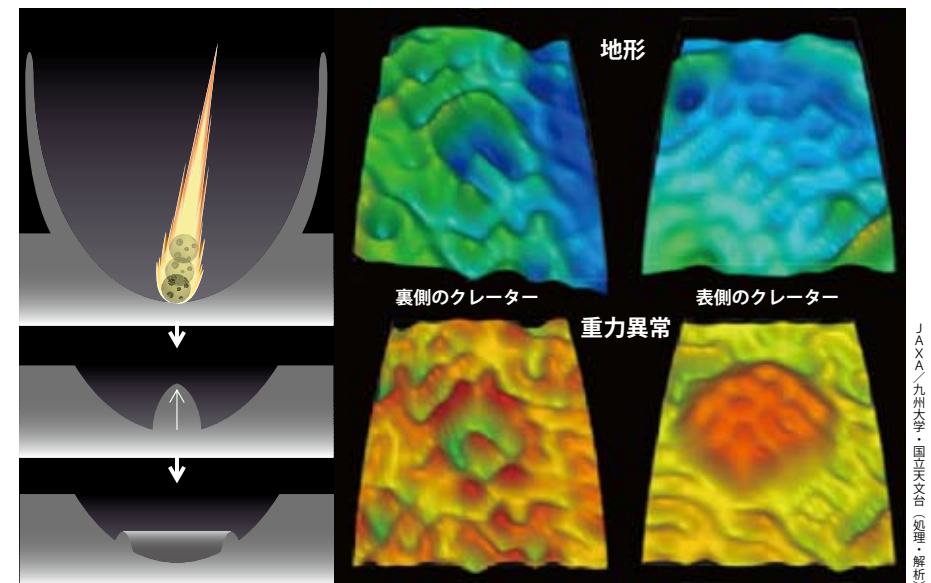
巨大クレーターはいずれも40億年前～35億年前に形成されたと考えられる。ではどうして表と裏でこのような重力異常のパターンの違いが生じたのだろうか？ それは、当時の月の地殻の少なくとも深さ100kmくらいの領域までは、温度が表と裏でかなり違っていたのが原因とみられている。

月は地球と同様、約45億年前に生まれ、最初はマグマの海で覆われていたとも考えられている。しかし、5億年が過ぎたころには、月の裏側の地殻は表側より冷えて硬くなっていたのだろう。そこに巨大隕石が落下してくると、紹介したようなプロセスで大型クレーターができ、中央丘などが形成された。

重力異常が第1のタイプに属するクレーターはその典型だ。クレーター中心丘の盛り上がり、その周囲の凹み、そしてクレーターの縁の盛り上がりという地形の凹凸が、ほぼそのまま重力異常に反映していると考えられる。地殻が冷えて硬かったため、クレーター形成直後の地形が“凍結”されたとみてよいかもしれない。

反対に表層部が温かく軟らかかったらどうなるのだろうか？ それが第2の重力異常を示す表側の大型クレーターで起きたことだと考えられる。

約40億年前、表側の表層部(地殻とマントル上層部)は裏側よりも高温で軟らく、変形しやすくなっていた。



クレーターと重力異常 巨大隕石が落下すると、周囲の岩盤を吹き飛ばし、その底の中央が盛り上がり、その盛り上がりリング状の波として広がる(左のイラスト)。月の裏側のクレーターにそうした地形が見られる(中央上は地形図。オレンジ色→緑色→青色の順に低くなる)。重力異常のパターンは地形の凹凸とよく対応している(中央下は重力異常マップ。重力はオレンジ色→黄色→緑色の順で弱くなる)。月の表側のクレーターはクレーターができ、マグマが噴出して玄武岩の平原になったため、のっぺりした盆地のように見える(右上は、その地形図)。重力異常は、その盆地全体で正の値を示し、盆地の表層近くに高密度の物質が存在することを示している(右下は、その重力異常マップ)。

そのため巨大隕石が衝突すると、受けた衝撃の反動でマントルの盛り上がり広域で起きた。マントルは地殻より密度が高いため、クレーター全域で重力異常が正の値になったと解釈できる。また地殻が温かければ容易にマグマが形成される。クレーターの底からは、水のようにサラサラした玄武岩質マグマが噴き出してクレーターの底を満たし、「海」と呼ばれるようになった。玄武岩は周囲の岩石より重いの重力異常が正になる一因ともなった。

つまり、大型クレーターの重力異常が示す表と裏の違いは、月の初期、表と裏で冷えるペースがかなり違っていたことを示唆している。

レーダーで地下を見る

では月の表側の地殻はいつごろまで温かかったのだろうか？ 別の言い方をすれば、いつごろになって冷えたのだろうか？ それを知る手がかりも、かぐやはつかんだ。重力異常は周回軌道

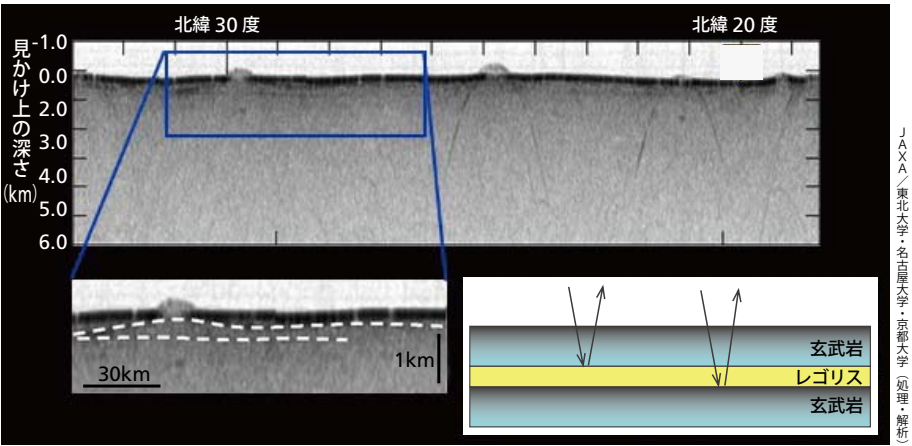
上から月の地下を探る有力な手法だが、かぐやはもう1つ、地下を探るレーダー観測装置(レーダーサウンダー)を搭載していた。そのデータから新発見がもたらされた。

レーダー探査では長さ15mのアンテナ4本を使って強力な電波を月面に放射する。電波はレーザー光と同様、月面で反射して戻ってくるが、一部は地中深く数kmも進み、地層境界面や断層面など物質の密度や特性が大きく変わる場所で反射して戻ってくる。月の表層は地球と違って電波を吸収する水を含んでいないので、地中でもかなり深くまで伝わるからだ。この地下からの反射波が戻るまでの時間を手がかりに地下構造を探る。

ただ、データ解析はレーザー高度計より手間がかかる。電波はレーザー光より格段に広い範囲の月面にぶつかって戻ってくるからだ。

例えば、かぐやの軌道直下から少し離れた場所に山などがあれば、その山

海の下にもう1つの海 レーダーによる地下探査で、晴れの海の地下数百mに、もう1つの古い海が埋まっていることがわかった（上段の図は東経20°の経線上、北緯30°～20°の地下断面。縦軸は補正前の見かけ上の深さ。実際の深さはこの1/2～1/3）。クローズアップ画像（下段左）には2本の破線が引かれている。上の破線が表層からの反射面、下の破線が古い海の表面だと解釈できる。下の破線は古い海と新しい海間のレゴリス層の上面と下面からの反射波が合わさったもの（下段右のイラスト）。



の斜面からの反射波は、軌道直下の地層境界面からの反射波に近い時間遅れで戻ってくることがある。地形に由来する反射波と、地下構造の反映である反射波を分別する作業が必要になる。そこで威力を発揮するのが最初に紹介した高精度の地形図だ。地形図があれば、測定された反射波のどれが、周囲の山や谷から戻ってきたものか特定でき、それらを除外することで、正確な地下構造の情報が得られる。

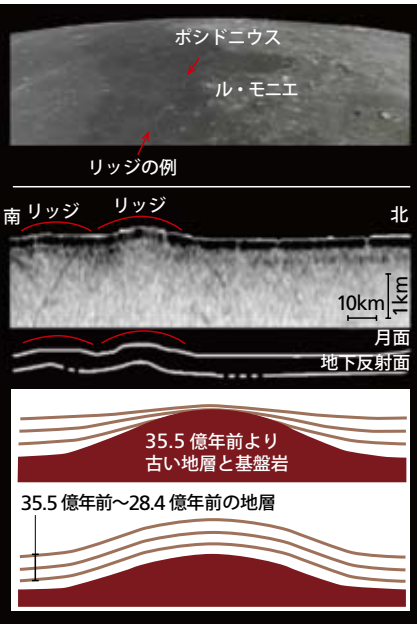
アポロ計画でも月の表側の赤道域のごく一部を実験的にレーダー探査したことがあるが、かぐやでは月全域の地下をレーダー探査した。電波のパワーは、かぐやの方がアポロ計画のものより10倍近く強いので、それだけ地下を深く探れる。反射波も強まるので、地層境界面などを明瞭に描き出せる。

「晴れの海」の地下で新発見

かぐやのレーダー探査グループはまず、データ解析が比較的簡単な平坦地域の地下構造の解明に取り組んだ。月で平坦な地域は表側にある海。重力異常の話でも触れたように、月の海は大型クレーターで、その凹みが玄武岩の溶岩で海のように満たされてきた。

そうした海の1つに「晴れの海」がある。その玄武岩の平原は約28億4000万年前の火山活動でできたものだとなっている。その年代はクレーターの数から推定された。大気を持たない月は、地球とは違って地表の浸食作用がないので、隕石落下によるクレ

ーターがそのまま保存される。だから古い時代に形成された表面ほどクレーターの数（個数密度）が増える。アポロ計画で有人探査された地域は、採取した岩石の分析から絶対年代がわかっているのも、クレーターの個数密度と絶対年代の対応関係が高い精度で決められている。



リッジから読み解く歴史 晴れの海にある帯状の盛り上がり「リッジ」（上段の図）の地下をレーダー探査すると、地下に埋まった古い海の存在を示す成層構造が乱されことなく、盛り上がったことがわかる（中段の図）。もしリッジが、35億5000万年前に古い海ができてから徐々に盛り上がったのなら、上に示すイラストの上段に描かれる構造になるが、新しい海（現在の晴れの海）が28億4000万年前にできた後に盛り上がりがあったのなら、イラストの下段のような構造、つまりレーダー探査が示す画像のようなになる。

この晴れの海をレーダー探査したところ、深さ数百mに電波を強く反射する平坦な境界面が広範囲にわたって存在することがわかった（上の図）。

そして、その境界面を追跡していくと、境界面が月表面に露出している場所があった。その場所も玄武岩の平原で、クレーターの数から約35億5000万年前に形成されたことが判明した。このことから、晴れの海の地下数百mには、約35億5000万年前にできた玄武岩の平原が埋まっていることがわかった。

そこで次のようなシナリオが浮かび上がってきた。まず約35億5000万年より前の時代に巨大隕石が落下し、晴れの海のもとになる大型クレーターができた。クレーターの底からはマグマが流出し玄武岩の平原となった。その後、数百万年、数千万年と時間が過ぎるうちに、平原には大小さまざまな隕石が落下し、その際の衝撃で破碎されてできた砂や塵（レゴリスと総称される）が表面を厚く覆うようになった。その後、再び火山活動が始まってマグマが噴出し、表面のレゴリス層を覆う形で玄武岩の新たな平原が形成された。その火山活動が終息すると、再びレゴリスが降り積もり始めた……。

詳しい分析によると、晴れの海では約35億5000万年前に玄武岩の平原が形成された後、約1億年の間、レゴリスが積もって厚さ1mほどの層を形成

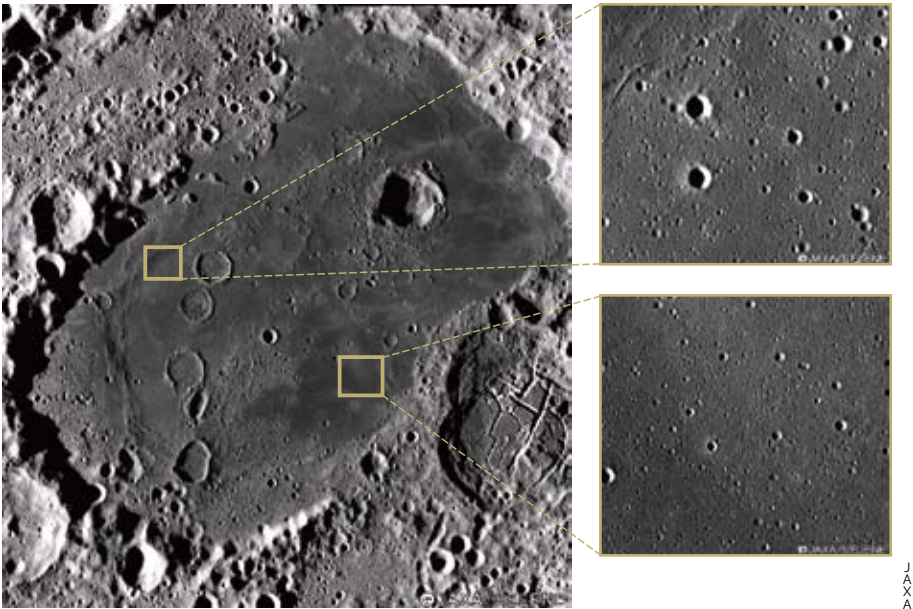
した。そして約34億4000万年前から再び火山活動が始まり、最終的に終息したのが28億4000万年前だったようだ。その間の約6億年で厚さ数百mの玄武岩層が形成されたことになる。かぐやがとらえた地下数百mにある境界面は、分厚い玄武岩層にサンドイッチにされた1mほどの薄いレゴリス層の上面と下面で電波が反射して戻ってきたものと理解できる。

では他の海の地下はどうなっているのだろうか？ レーダー探査のデータ解析は、嵐の大洋や雨の海、危機の海、スミス海などでも進んでいるが、いずれの海の地下でも、晴れの海と同様、地下数百mのところに平坦な境界面が検出された。このことは、月の表側の地下においては、当時、広い範囲で共通した活動が起きていた可能性が高いことを意味する。表側の地殻は、月ができて15億年以上過ぎても、火山活動が広域で起きるほど温かかったことになる。

晴れの海ではもう1つ発見があった。月の海は基本的には平坦で、そこに大小のクレーターが形成されているが、畑の畝（うね）のように盛りあがった帯状の地形「リッジ」なども見られる。このリッジの地下がどうなっているのか、かぐやはレーダーで探った。紹介したように、晴れの海では地下数百mに平坦な境界面が検出されたが、リッジがある場所では、その境界面は月表面と平行を保ちながら全体として盛りあがっていた（左ページ下図）。

こうしたリッジの地下構造は次のようなことを物語っている。現在、リッジが見られる場所は、少なくとも最後のマグマの噴出が終わって玄武岩の平原が形成されるまでは、周囲と同じような平坦な場所だった。そしてその後、広域的な力を受けて盛り上がりが起き、リッジが形成された。

「広域的な力」を生み出した要因と考えられるのは月全体の冷却だ。月が



月の裏側の火山活動 月の裏側にも数は少ないが海がある。その1つがモスクワの海（左）。かぐやの地形カメラで北西側地域（画面左上の四角）と東側地域（画面右下の四角）についてクレーターの個数密度を詳しく調べたところ、それぞれ35億年前、25億年前に形成されたことがわかった。月の裏側の火山活動は30億年前頃には終息したと考えられていたが、見直しを迫られることとなった。

冷えて縮めば表面積も減るので、表面には必然的に“しわ”ができる。この“しわ”がリッジだ。

とすれば月の少なくとも表側では、晴れの海で火山活動が終息した28億4000万年前より新しい時代になって、表層部がかなり急速に冷えリッジができたことになる。

これはリッジ形成の定説を覆す見方だ。実はアポロ計画での実験的なレーダー探査でも、晴れの海の地下に反射面が見つかったことが、その深さは数kmと推定された。これは少なくとも厚さ数kmの玄武岩層が存在することを意味した。多くの研究者は、それほど分厚い玄武岩層なら、その重みが岩盤に与える力によって周囲の地形が変形を受けるはずだと考え、その表れがリッジだと解釈された。かぐやによってアポロ時代の知識は大きく修正されることになった。

かぐやのレーダー探査のデータ解析作業は、今後も続く。月の裏側や南北両極域の地下がどうなっているのか、新発見が期待できそうだ。

表と裏の違いに新たな光

月の表と裏がかなり違うことは、かぐやの地形図や重力異常マップによって明瞭になった。その違いをもたらす要因として、月が誕生してから10億年くらいの間、表と裏では表層の温度がかなり違っていた可能性が浮かび上がった。これに関連して表側の海のレーダー探査によって、表側では誕生後10億年～15億年ころでも広域的な火山活動があったこと、その後になって冷却が急速に進んだらしいこともわかってきた。

しかし一方では、表と裏の違いを“緩和”するような意義を持つ発見もあった。月の裏側の火山活動の終息時期に関する発見で、かぐやの地形カメラによる月面画像の解析でわかった。

地形カメラはかぐやの進行方向斜め下方と、後方斜め下方の帯状地域を10mの分解能で撮影する。月面の同じ場所を2つの異なる角度から撮影して地形を立体的に把握する。レーザー高度計は測定点の位置と高度が正確に求まるが、測定点以外の場所がどのよ

うな地形になっているのかはわからない。地形カメラの画像解析が進んで、レーザー高度計の測定データと組み合わせることができれば、より精密な月研究ができるようになる。

もちろん、地形カメラの画像データだけでも、さまざまな発見がある。その1つが年代推定精度の向上だ。これまでの月の裏側の画像は表側と比べて分解能が悪く、直径数百m以下のクレーターになると正確な直径を調べて個数密度を求めることができなかった。そのため裏側の各地域の形成年代の推定精度が低く、月の進化を考える上で問題となっていた。かぐやの地形カメラは分解能が10mなので、直径200～300mのクレーターまで正確に把握でき、個数密度を求められる。月の裏側の年代決定精度は格段に向上することとなった。

地形カメラのグループが取り組んだのがモスクワの海の年代再評価だった。月の裏側にも数は少ないが海がある。その1つが裏側の北半球にある直径約300kmのモスクワの海で、表側の海と同様、大型クレーターの内側が玄武岩の平原となっている。重力異常も高い正の値を示し、裏側の火山活動を知

るカギを握る地域と考えられていた。地形カメラの画像分析から決まったモスクワの海の形成年代は地域ごとにかなり違いがあることがわかった。海の北西側は35億年前なのに対し、東側地域は25億年前に形成されたことがわかった。この25億年前という年代は重要な意味を持つ。

これまでの研究によると、月の火山活動は表側では10数億年前まで継続していたのに対し、裏側では30億年前には終息したと考えられていた。ところが今回、モスクワの海で25億年前という年代が出たことで、裏側の一部地域では従来説より5億年も長く活動が継続していたことが明らかになった。つまりそれだけ表側と裏側での火山活動継続期間のギャップが狭まったことになる。月の進化を考える上でどのような意味を持つのかは、これからの研究課題だ。

明らかにになった共通点

かぐやは月の表側と裏側の相違点ではなく共通点も発見した。それは表側も裏側も地下10～20kmあたりは、斜長岩でできている可能性が高いということだ。この岩石は、ほとんど斜長

石からなる（構成鉱物の90％以上が斜長石で占められる）。

月の高地表面の岩石が斜長石と輝石を主成分とすることは冒頭で述べたし、海は玄武岩の平原だ。しかし、それらはあくまで表面近くの岩石分布であって、地殻の本体は斜長岩だと考えられている。だが、そうしたことは間接的証拠から言われていることで、さまざまな場所を掘って直接、斜長岩であることを示したわけではない。ところが今回、かぐやは実質的にそれと同じ調査を行い、斜長岩を見つけ出した。

用いたのは月面の“色”を測定する装置。岩石を構成する各種の鉱物は、それぞれ固有の色を持つ。だから月面の色を正しく測定できれば、鉱物の分布がわかり、鉱物分布から岩石が特定できる。かぐやは計画通り、月の全表面の色の測定に成功した。測定データから鉱物分布図を作り、それを立体地形図に落とし込めば、月の起源と進化の解明に役立つのはもちろん、月の鉱物資源開発の基礎資料ともなる。

ただ、測定データから月面の色を決めるのは大変な作業だ。太陽光の当たる角度や、表面を覆うレゴリスの粒の大きさ、表面の起伏の具合などで、見た目の色は微妙に変化する。だからそうした影響をきちんと補正した上でなければ正しい色はわからない。

そこでまず、最重要と思われる地域から分析作業を進めた。クレーター中央丘だ。直径数十km以上のクレーターでは、その隕石衝突の反動で、地下深部の物質が盛りあがって中央丘を形成する。中央丘は、普通だったら地下数kmから数十kmにある物質が月表面に出現している特別な場所、月内部の“覗き窓”なのだ。

かぐやが月の裏と表、約10個の大型クレーターにある中央丘（特に丘の斜面）を調べた結果、それらはすべて斜長岩だった。斜長岩はアルミニウムやカルシウムに富む白っぽい岩石で軽

い。月は誕生時、マグマの海に覆われていたとするマグマオーシャン説が有力視されているが、そのマグマの海にプカプカ浮いていたと考えられているのが斜長岩の塊で、それが地殻のもとになったとされる。

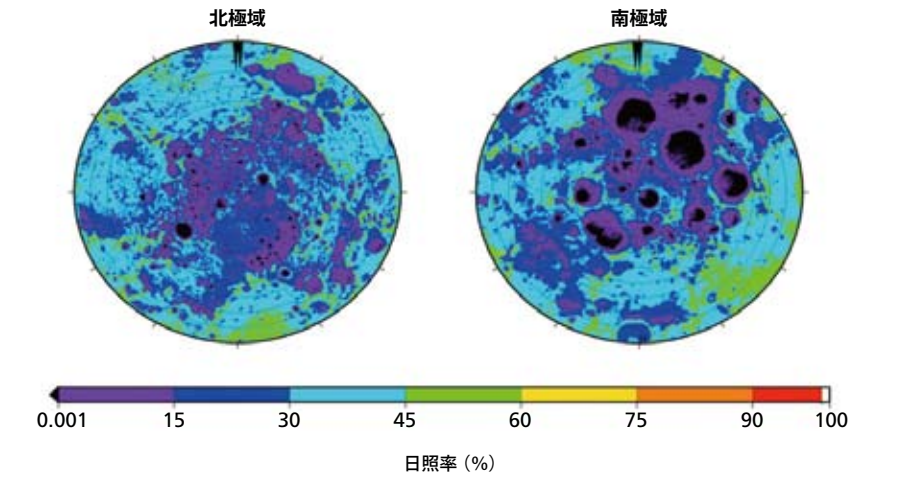
今回、月の表と裏、いずれの場所のクレーター中央丘でも斜長岩が見つかったことで、月の地下には普遍的に斜長岩の層が存在する可能性が高まった。これはマグマオーシャン説を裏付ける証拠とも考えられるが、実際の月表面の高地の岩石は斜長石のほかに輝石も主成分であることから、地殻形成のシナリオはそう単純ではなさそうだ。

極域に光

これまでは月の表側と裏側の二分性の問題について、かぐやの成果を紹介してきたが、もう1つ、かぐやは月の両極域での探査でも存在感を示した。南北両極域は、人類の月進出の拠点になると考えられるが、これまで正確な地形図すらなかった。かぐやはレーザー高度計を使って、高精度な地形図を作り、地形カメラを用いて氷が存在する可能性について1つの回答を出した。

両極域は月の中でも特別な場所だ。月の自転軸は黄道面（地球の公転軌道面）に対してほぼ垂直なので、極域では、ほぼ常に太陽が地平線近くにある。つまり永遠の朝（夕）が続く世界だ。だから極域の高い山の上なら、他の山などの影に入ることがなく、常に日が当たり続ける可能性がある。こうした場所は「永久日照地域」と呼ばれ、有人基地の建設候補地となる。そこに太陽電池を置けば、常に電力を供給できるからだ（極域以外の場所では、太陽が当たらない夜が2週間も続くので、電力確保が難しい）。

反対に、極域のクレーターの中のくぼ地なら、ずっと日が差さない。こうした場所は「永久影地域」と呼ばれ、氷があるのではないかとされている。



浮かび上がった永久影 かぐやのレーザー高度計のデータを元にした地形図の分析から、南北両極域にある永久影の地域が浮かび上がった。左は北極域（北緯85°以上）、右は南極域（南緯85°以上）で、黒い色の部分が永久影。その面積は北極域が1236km²、南極域が4466km²で南極域の方が広い。

永久影地域は常に零下100℃以下になっているので、その近くに彗星（彗星の核は氷が主成分）が落下すれば、衝突の際の高熱で発生した水蒸気が、永久影のところに来ると冷えて氷となる。数十億年の間にそうしたことが繰り返されれば、かなりの氷が永久影地域に蓄積している可能性がある。

実際、1990年代、米国の2つの月探査機クレメンタインとルナプロスペクターの極域探査で氷の存在をうかがわせるデータが得られている。氷からは水が得られ、酸素と水素を作ることできる。有人活動や宇宙船の燃料として重要な資源だ。

では本当に永久日照地域や永久影地域は存在するのだろうか？ そして永久影地域の中に氷は眠っているのだろうか？ こうした問いの答えを見つかる任務を負ったのがかぐやだった。

かぐやのレーザー高度計のグループは、コンピューター上で極域の立体的な地形を再現、どんなところに影ができるか調べた。

月の自転軸は黄道面に完全に垂直ではなく約1.5°傾いているので、地球ほどではないが（地球は自転軸が23.4°傾いている）、天球上の太陽高度が上下する。そのため1年を通じてみ

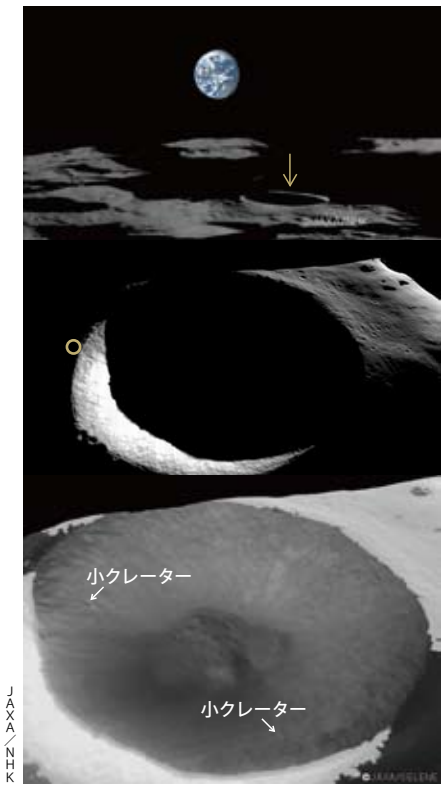
ると、影の長さが微妙に違ってくる。そうした影響を考えながら影の動きを調べてみると、日照率（1年のうち太陽光が当たる日数の割合）が100%の場所、つまり永久日照地域は存在しなかった。北極域での最高の日照率は89%（1年365日のうち325日は昼）、南極域では最高86%。日照率が高かったのはクレーターの縁や、クレーターなどから離れた孤立峰などだった。

一方、永久影地域は両極域で見つかり、面積的には南極域の方がかなり大きかった。では永久影に氷は存在するのだろうか？ かぐやの地形カメラのグループは南極点にあるシャクルトンクレーターの永久影の画像を詳しく調べた〔シャクルトン（Sir Ernest H. Shackleton）は南極探検家。南極海で船が座礁、1年半以上に及ぶ漂流の末、奇跡の生還を果たした〕。

シャクルトンクレーターは直径21km、底の直径は6.6km、縁と底の高度差は4.2km。永久影の場所ならカメラで撮影しても、真っ暗で何も見えないのではないと思われるかもしれない。しかし、このクレーターでは1年のうち数日間だけ、クレーターの内側斜面の上方に日が当たる。そして、その斜面で散乱された弱い光がクレー



月の地下を覗く窓 かぐやの地形カメラが撮影したティコクレーターの中央丘。“丘”といっても、その頂上はクレーターの底から2480mの高さだ。この中央丘の色を、かぐやの観測装置スペクトルプロファイラーで測定したところ、斜面部分が斜長岩でできていることがわかった。他のクレーター中央丘でも同様に斜長岩の存在が明らかになった。



南極点の永久影の中 シャクルトンクレーター（上段、矢印）は南極点にあり、その底は永久影になっているが、1年で数日、内壁上部に日が当たる（中段、南極点を○で表す）。そのチャンスを狙って、微弱な光をとらえられる地形カメラを向けると、永久影の中の地形が見えた（下段）。

ターの底を照らしてくれる。かぐやのグループは、このチャンスを狙って地形カメラを向けた。

地形カメラは太陽光の1万分の1の明るさを検知できるので、その弱い光の照明で、永久影の中を撮影することができた。もちろん永久影の中を見たのは世界で初めてのことだ。

もし永久影の中の一部が、周囲と比べて光をよく反射しているようなら、そこに氷が存在する可能性が高い。スケートリンクを見ればわかるように、氷は光をよく反射するからだ。しかし、残念ながらクレーターの底部には、光をよく反射する場所は見られなかった。

ただ、これで氷の存在が否定されたわけではない。氷がレゴリスと混ざっていたり、レゴリスの下に隠れていれば、地形カメラでは存在を確認できな

い。かぐやのレーダー探査は極域でも実施されているので、今後、データの解析が進めば、こちらの方から氷の存在が確認されるかもしれない。

また、かぐやはガンマ線観測装置も備えていたので、水を構成する水素が出すガンマ線をとらえていた可能性もある。ただ、水素のガンマ線はアルミニウムが出すガンマ線と非常に似ており、両者を切り分けて水素の存在を検出するには至っていない。仮にシャクルトンクレーターに氷がなかったとしても、永久影の場所はたくさんあるので、他を探せば見つかるかもしれない。氷探しは始まったばかりだ。

月から吹き上がる風

かぐやは月の本体と同時に、上空を飛び交う荷電粒子（プラズマ）や磁場も観測、いくつもの発見をした。

月を取りまく空間を理解するために、まずは私たちの地球の状況について説明しておこう。地球は窒素と酸素を主成分とする大気で覆われていると同時に、磁場によっても包まれている。マントルの下には高温高压で液状になった鉄を主成分とする外核があり、この液状鉄の流動によって強い磁場が生み出されているからだ。地球を包むこの磁場が、太陽からやって来る高エネルギー荷電粒子（陽子やヘリウム原子核などのイオンと電子）、「太陽風」を阻止するバリアとなっている。ただ、一部の荷電粒子はバリアを越えて極域上空に突入、それによって大気が発光する。それがオーロラだ。

一方、月は大気がなく、月全体を包む磁場もないので、太陽風は月面に直接ぶつかる（月を包む磁場がないことから月内部に液状鉄の層は存在しないと考えられている）。では、ぶつかった太陽風の高エネルギー粒子はどうなるか？ これまではすべて月面に吸収されてしまうと考えられていたが、かぐやは月面にぶつかって戻ってくる粒

子の存在を明らかにした。

かぐやは高度100kmの月の極軌道を2時間で1周する。太陽風が吹き付ける昼側を1時間飛ぶと、太陽風が遮られた夜側に入り、さらに1時間飛ぶと昼の世界に戻るというサイクルを繰り返す。実際、かぐやの荷電粒子の観測データを見ると、昼側では月面とは反対の方向から飛来する多数の荷電粒子が観測され、夜側に入るとそうした粒子が急減してゼロになり、夜の終わりに近づくともた増え始めるという繰り返しになっている。

ところがかぐやは昼側を飛行している間、数は少ないものの月面の方からも荷電粒子（イオン）が飛来していることを発見した。月から吹き上がってくるイオンの“風”をとらえたのだ。

月からの風は、かぐやが月の昼側を飛行している時間に限って定期的に吹くため、その正体は太陽風が月面にぶつかって反射・散乱されたものだと考えられる。

月からのイオンの風の強さ（単位面積当たり毎秒飛来する粒子数）は太陽風イオンの強さの0.1～1%。太陽風イオンは陽子（水素原子核）とヘリウム原子核が主成分だが、月方向から来るイオンはほとんど陽子だった。詳しいメカニズムの解明はこれからだ。

定常的な月からのイオンの風とは別に、昼の時間、特定の場所の上空を通るときに限って月から吹き上げてくる高速イオンの風の存在も明らかになった。その速さは太陽風の6倍に達するものもあった。この特別な風が吹き上げているのは月の裏側の南半球高緯度地方にある「南極エイトケン盆地」。太陽系最大規模の直径約2500kmに達する巨大クレーターだ。

南極エイトケン盆地上空でかぐやはもう1つの異変をとらえた。紹介したように、月には全体を取りまく磁場はないが、ところどころに弱い磁気を帯びた「磁気異常地域」がある。月の起

源や進化を解明する上で重要な手がかりになるとみられる。かぐやも超高感度の磁場観測装置で探査、点在する磁気異常地域を調べた。今年に入って飛行高度を従来の100kmから50km、さらには10kmまで下げ、月面の微弱磁場の分布状況を記録した。磁気異常地域の中でも特に大きかったのが南極エイトケン盆地だった。

南極エイトケン盆地の磁気異常地域は、その上空に局所的な磁気圏を生み出している。こうした磁気圏に太陽風がぶつかると、荷電粒子は鏡のように反射され、電磁気的な相互作用によって加速を受ける。かぐやはこうして生み出された高速イオンの風を受けたと解釈できる。

平穏無事に過ぎた600日

かぐやは2007年11月に試験観測を始めてから今年6月に月に落ちるまでずっと姿勢が安定し、順調に飛行を続けた。観測機器のごく一部にトラブルはあったが、おおむね順調に稼働し、当初計画を上回る質と量のデータが得られた。

予想外のこともあった。太陽があまりにも静かだったことだ。私たちが眺める太陽は変わらぬ輝きを放っているように見えるが、ときに“嵐”を起こす。太陽表面で起こる爆発現象（太陽フレア）で、その際には強力なX線が放射され、通常太陽風よりはるかに大量で高速の荷電粒子が放出され、地球や月に津波のように押し寄せてくる。かぐやの飛行期間中、大規模な太陽フレアが1回や2回は起きてもよさそうなものだったが、1度もなかった。

太陽嵐が生み出す高エネルギー荷電粒子は、かぐやの観測機器にダメージを与える。それが1度も起きなかったことで、ほとんどの観測機器は当初予定していた定常観測期間が2008年10月に終了した後も、引き続いて高精度の観測を行うことができた。例えばハ

イビジョンカメラの心臓部となる画像素子CCDの寿命は半年程度とも思われていたが最後まで機能した。その結果、飛行高度が100kmから10kmに下がった段階で、より迫力のある月面映像を撮影できた。

一方、太陽嵐が起きなかったことを残念がる観測グループもあった。太陽嵐の際に放出されるX線を待ち望んでいたX線観測グループだ。月表面の岩石を構成する各種元素は、太陽嵐の強力なX線を浴びると、それぞれ固有の波長のX線を放射する。そのX線をかぐやでとらえれば、微量しか存在しない元素も含めて、各種元素の分布を高精度で測定できる。しかし結局、そうした機会は訪れなかった。

私たちはこれまではデータを取るのに一生懸命だった。振り返ってみればあっという間の600日だった。これからはデータの解釈に力を注ぐことになる。当初思っていたよりデータ解析が難しいものもあるが、そこは知恵の絞りどころだ。それぞれの観測機器のデータ解析に見通しがつけば、今度はそれらを総合することで、月の起源と進化の謎に迫ることになる。

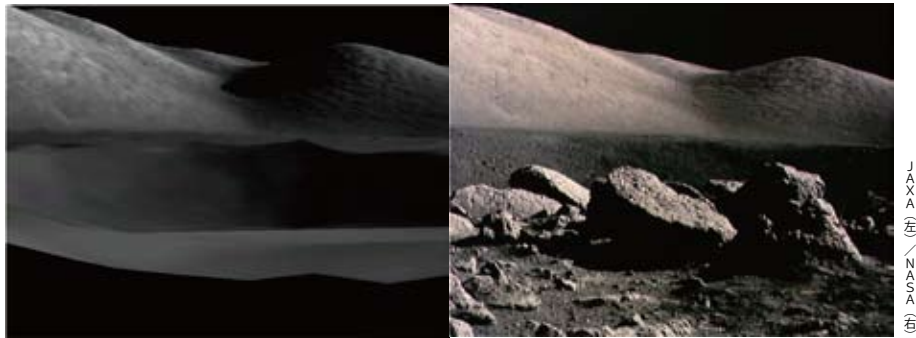
次は着陸探査

それと同時に進めなければならないのは、次の月探査に向けた準備だ。月の探査は私たちだけが取り組んでいるのではない。中国は初の月探査機、嫦

娥（チャンア）1号を、かぐやから約1カ月遅れて2007年10月24日に打ち上げた。同年11月には高度200kmの月周回軌道に乗り、月面の撮影や元素分布の測定などを開始、残燃料が少なくなったことから2009年3月1日、月の表側に落とされた。中国は今回の経験を踏まえ、嫦娥2号を月に軟着陸させて月面探査をする予定だ。2018年頃には月の岩石を持ち帰る計画の実現を目指している。

一方、インドは2008年10月22日、同国初の月探査機、チャンドラヤーン（Chandrayaan；「月の乗り物」の意味）1号を打ち上げ、11月12日には、かぐやと同じ高度100kmの極軌道に乗せた。その2日後の11月14日、インド初代首相ネールの誕生日に合わせて、国旗が描かれた小型探査機を分離、月の南極点近くに落下させた。観測は欧州宇宙機関（ESA）との共同プロジェクトだ。2010年代初頭に打ち上げ予定のチャンドラヤーン2号も嫦娥2号と同様、月軟着陸を目指している。

米国はかぐやが月に落ちた1週間後の6月18日（日本時間6月19日）、11年ぶりに月探査機を打ち上げた。エルクロス（LCROSS；Lunar Crater Observation and Sensing Satellite）とルナ・リコネサンス・オービターだ。エルクロスは10月、南極域にあるクレーターの永久影地域に打ち込まれる予定で、その様子をルナ・リコネサ



人類月着陸の地を仮想訪問 かぐやの地形カメラの画像を処理すれば、月のどの場所から見た風景でも再構成できる。例えばアポロ17号の着陸地点から見た風景を再現すると（左）、飛行士が月で撮影した写真とそっくりの風景になった（右）。ただし解像度の関係から手前の岩石は再現できない。アポロ15号の着陸地点についても飛行士が移した月の写真とそっくりの風景が再現された。

「かぐや」の地球出発から月に帰るまで

2007年9月14日、種子島に台風が近づき雨模様の日が続く中、晴れ間を待ってかぐやが打ち上げられた（右の写真）。地球から月までは直線距離で約38万km。アポロ計画では約4日間で月に到達したが、かぐやは慎重を期し20日間かけた。まず地球を周回する楕円軌道に乗せ、軌道上でエンジンを噴かせて楕円軌道の最遠点を月の公転軌道に達するほどまで伸ばす。こうした楕円軌道を2周半したところで、かぐやは月と遭遇することとなった。

ここで、かぐやは方向を変えて約30分の逆噴射で減速することで、月の重力圏にとらえられ、10月4日、月を周回する楕円軌道に移った。かぐやは2つの子衛星「おきな」「おうな」を相次ぎ分離、それぞれを所定の月周回軌道に投入した。おきなは、かぐやが月の裏側にいるとき、かぐやと地球との間の信号のやり取りを中継するリレー衛星、おうなは月の重力測定用の電波の発信源としての役割を果たすVRAD衛星だ。

10月19日、かぐやは南北両極上空を通過する高度100kmの円軌道に乗った。これが目標としていた観測軌道で、2時間で月を一周する。月の自転周期は約27日なので、かぐやは27日の半分、つまり約2週間をワンサイクルとして、月の全球を探索することになる。観測軌道に乗った後、かぐやは磁場計測用のマストと電波アンテナの伸展に成功、11月1日から試験観測を開始し、観測機器の機能確認を順次行った。12月21日から定常観測に入った。この間、月面のハイビジョン撮影が重点的に実施され、11月14



月からの初画像に見入る 2007年11月3日、JAXA かぐや管制室で。



JAXA

日にはNHK特別番組として高度100kmから見た月面のリアルな映像がお茶の間に流れた。

そして2008年、かぐやは1年を通じて月を観測した。運用上、重要なイベントは日食（地球から見たときは月食）と姿勢の前後反転だった（右ページ右上の写真は2009年2月10日、月から見た日食の画像）。かぐやは太陽電池パドルで電力を供給し、月の陰に入ったときは蓄電池の電力を利用する。通常の場合、かぐやは最長でも1時間、月の陰の中を通り抜ければ、日の当たる側に出るので、蓄電池を利用する時間は比較的短い。しかし、日食の間は何周にもわたって日が当たらないので蓄電池に頼る時間が非常に長くなる。日食時は管制室に緊張感が漂ったが、無事切り抜けた。

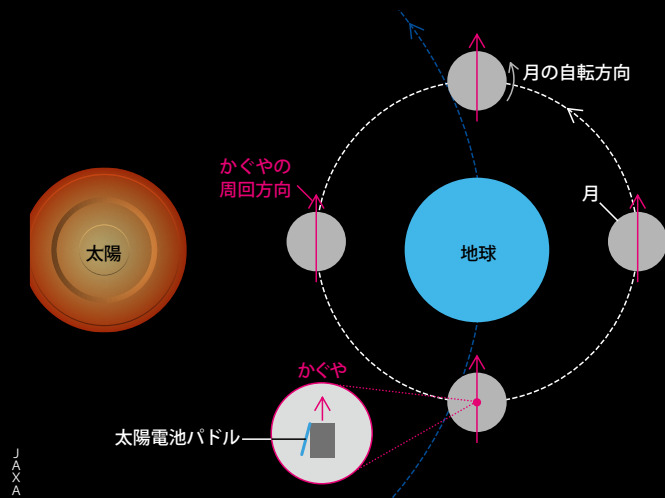
姿勢反転は、かぐやの機体の向きを180度変える操作だ。かぐやの太陽電池パドルは1枚なので、ずっと同じ方向を向いて周回していると、かぐやの月周回軌道面と太陽の位置関係が変化する。すると、太陽電池パドルが、かぐや本体の陰になる時間が増え、十分な電力が供給できなくなる。2度の方向転換は問題なく終えることができた。

試験観測の開始から満1年を迎えた2008年10月31日、当初予定通り定常観測を終了した。軌道維持のための燃料がまだ残っており、観測機器のほとんどが正常に稼働していたことが

ら、翌11月1日以降も引き続いて観測を継続し、取りこぼしたデータの取得などを進めた。

2009年2月、かぐやは軌道を変更し、高度を100kmから50kmへ、最終的には10kmへと下げた。高度10kmから撮影されたハイビジョンカメラの映像は、かぐやが今にも月面に着陸していくような迫力に満ちたものだった。月面に近くなれば、それだけ観測データの位置分解能が向上する。月面の磁場の強さは地球と比べて桁違いに小さいので、かぐやには超高感度の観測装置を搭載していたが、月面に近づけば、磁場がより強まり、月面のどこにそうした磁場を生み出す“もと”が存在するのか、より高精度で特定できるようになった。

2月12日、月の裏側の重力観測に大きな貢献を果たした子衛星おきなが月の裏側に落下した。そして6月11日、かぐやは残存燃料をほぼ使い切ったため、私たちの指示に従って軌道を修正、月の表側の南半球の計画通りの場所に落下した。もう1つの子衛星おうなは、おきなとは異なる月周回軌道にあり、今後約5年間は月を周回するとみられるが、かぐやの観測が終わったこと、管制にコストがかかることから、6月29日をもって運用を終了した。



月を周回するかぐや かぐやは月の南北両極上空を通る高度100kmの円軌道から月を観察する。上の図は天の北極から見た様子。このような位置関係にあると、太陽電池パドルは太陽側に向いている。しかし、この状態のまま半年たつとパドルは太陽とは反対の側にくるので、そうなる前に、機体を反転させてパドルを太陽側に向ける制御をする。

とで知見が得られた。残る課題は安全に軟着陸させる技術を開発、実証することで、それに向けた取り組みも進んでいる。

かぐやの成功によって、日本の月探査は大きな一歩を踏み出した。しかし、先は長い。月に関心を持つ若い人々の力も得て、着実に前進していきたいと思っている。 ■



日経サイエンス

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）」のサイエンスマネージャ。搭載する観測装置の1つ、蛍光X線分光器も担当する。小惑星探査機「はやぶさ」にも参画した。かぐやの研究成果を一般に広く知ってもらおうと、各地での講演などにも取り組んでいる。

もっと知るには…

「月の謎を解く探査機『かぐや』」, 加藤 学, 日経サイエンス2007年8月号。『最新・月の科学』, 渡部潤一編著, NHKブックス, 2008年, 1123円（税込）。宇宙航空研究開発機構（JAXA）のかぐやホームページ, <http://www.kaguya.jaxa.jp/>



月から見たダイヤモンドリング 太陽が地球によって隠される月から見た日食。地球には大気があるので、太陽光が地球の縁を回り込むようにして月にやってくるためリングができる。リングの欠けは月面の部分。

2007年

9月 14日 種子島から打ち上げ
10月 4日 月周回軌道（楕円軌道）に乗り、徐々に高度を下げる
10月 9日 子衛星「おきな」を分離
10月 12日 子衛星「おうな」を分離
10月 19日 高度100kmの円軌道（極軌道）に乗る
10月 28日 磁力計を付けたマストを伸ばす
10月 29日 レーダー探査のアンテナを伸ばす
11月 1日 試験観測を開始
12月 21日 定常観測開始

2008年

2月 20日 月から見た日食
4月 3日 「かぐや」の機体の向きを反転
4月 6日 ハイビジョンカメラによる「満地球の出」を撮影
8月 16日 月から見た日食
10月 7日 「かぐや」の機体の向きを再反転
10月 31日 定常観測を終了
11月 1日 後期観測を開始

2009年

2月 1日 50kmの低高度での観測を開始
2月 10日 月から見た日食
2月 12日 「おきな」が月の裏側に落下
6月 11日 「かぐや」が月の表側の南半球に落下
6月 29日 「おうな」の運用を終了