

# 「かぐや」がとらえた月の地形と重力

佐々木 晶

総合研究大学院大学教授 天文科学専攻／自然科学研究機構 国立天文台教授

宇宙からの月探査が始まって半世紀が経つが、地形や鉱物組成についての詳しいデータは得られていなかった。2007年に打ち上げられた日本の月探査衛星「かぐや」は、1年余り観測を続け、全表層の様子を初めて明らかにした。

## 表の顔、裏の顔

今から400年前、天体望遠鏡を発明したガリレオ・ガリレイは、月面を観察してスケッチを残している。それ以降、数多くの地上望遠鏡による観察が行われてきたが、月の自転は公転と同期しているため、地球から観察できるのは月の表側だけである。そのため、月の裏側の観察は、宇宙探査機の登場を待たなければならなかった。

1959年10月、旧ソ連の探査機「ルナ3

号」は月をフライバイして、月の裏側を初めて撮像した。溶岩が衝突盆地を埋めている暗い「海」が広がる表側と異なり、月の裏側には「海」地域は非常に少ないことが明らかになった。そこには、反射率が高いため明るい「高地」と呼ばれる地域が広がっていた。月の「表」と「裏」の姿は大きく異なっていたのである。

一方、アメリカはNASAが有人月探査を推し進め、1969年7月20日、「アポロ11号」の2人の宇宙飛行士が月面の「静かの海」に降り立った。アポロ計画では計

6回の有人月面調査が行われ、さまざまな種類の岩石を地球に持ち帰った。分析により、月の高地は斜長岩と呼ばれる明るい色の岩石が主成分であると考えられた。そして、月の形成初期に表面付近が一度融けて、そこから固化する過程で斜長岩を含むさまざまな岩石が形成されたという「マグマの海」説が生まれた。

1980年代には、原始地球に起きた巨大衝突によって放出された物質から月が形成されたという、「巨大衝突説」が提唱される。これによれば、熱い初期状態、すなわち「マグマの海」が説明できる。国立天文台では小久保英一郎准教授が、巨大衝突後の月形成過程の数値計算を行っている。

ところが、月の表と裏の違いの原因についてはまだ解明されていない。アポロから20年以上たった1994年に打ち上げられたクレメンタイン探査機（NASA）により、ようやく月全体の鉱物組成や地形のデータが取得されたが、観測期間が2ヵ月と短く、詳細なデータは得られていなかった。

## 「かぐや」を育てた研究者たち

「かぐや」は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）により進められてきた月探査衛星である。当初はセレーネ（SELENE）と呼ばれていた。14種類の観測機器（表）による詳細なりモートセンシング観測により、月全球について基本的なデータを



図1 打ち上げ前の「かぐや」。上端に2機の子衛星「おきな」「おうな」が搭載されている。

表1 「かぐや」の科学搭載機器

レーザー高度計は、表層構造、重力分布の両方に記されている。このほかに、広報用のハイビジョンカメラ2機がある。

元素分布	XRS：蛍光X線分光計 GRS：ガンマ線分光計
鉱物分布	SP：スペクトルプロファイラ MI：マルチバンドイメージャー
表層構造	TC：地形カメラ LRS：月レーダーサウンダー LALT：レーザー高度計
環境	LMAG：磁力計 UPI：プラズマイメージャー CPS：粒子線計測器 PACE：プラズマ観測器 RS：電波科学観測
重力分布	VRAD：相対VLBI用衛星電波源 RSAT：リレー衛星中継器 LALT：レーザー高度計

図4 ハイビジョンカメラが撮影した月面の地球の入り。2007年11月7日12時07分（日本時間）に撮影された動画から切り出した。月の南極の地平線に地球が沈むときをとらえている。



取得して、月の進化を明らかにすることを目的としている。「かぐや」の総重量は約3トン。日本が打ち上げた太陽系探査機では最大である。

この計画は、月の全面高分解能撮像とともに、内部構造が大きなターゲットであった。セレーネという名称もなかった1990年代なかば、私はプロジェクトの原案をまとめる作業に携わっていた。リレー衛星を使った月の裏側の重力計測や、レーダーサウンダーによる地下構造探査といった野心的な観測が、当初から盛り込まれていた。

もともとセレーネ計画には月着陸試験機が含まれており、VLBI観測の電波源を搭載して長期間運用することにより、月の回転変動を調べることが計画されていた。しかし、着陸船は中止となり、重力観測を強化する目的でVLBI観測のための子衛星がもう1機搭載されることになった。VLBI（Very Long Baseline Interferometry：超長基線電波干渉法）は、遠方の電波源（探査機や電波星）から発信される電波を、距離の離れた複数のアンテナで受信、その到達時刻の差を精密に計測して、電波源の方向すなわち天球上の位置を正確に求める方法である。

「かぐや」には多くの大学・機関が参加している。総研大でも、JAXA宇宙科学研究本部（宇宙科学専攻）および国立天文台（天文科学専攻）が関わっている。カメラや鉱物イメージャーはJAXA宇宙科

学研究本部のグループが担当している。国立天文台は、九州大学、JAXAと協力して、子衛星を用いた重力探査を行うとともに、レーザー高度計で月の地形を測定する。重力探査の主任研究員は、国立天文台の花田英夫准教授と九州大学の並木則行助教、高度計探査の主任研究員は国立天文台の荒木博志助教である。国立天文台では、これまで2名の総研大生が「かぐや」の月重力計測プロジェクトに参加しており、月探査機のVLBI観測の研究で博士号を取得している。

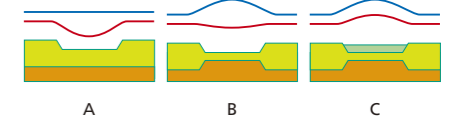
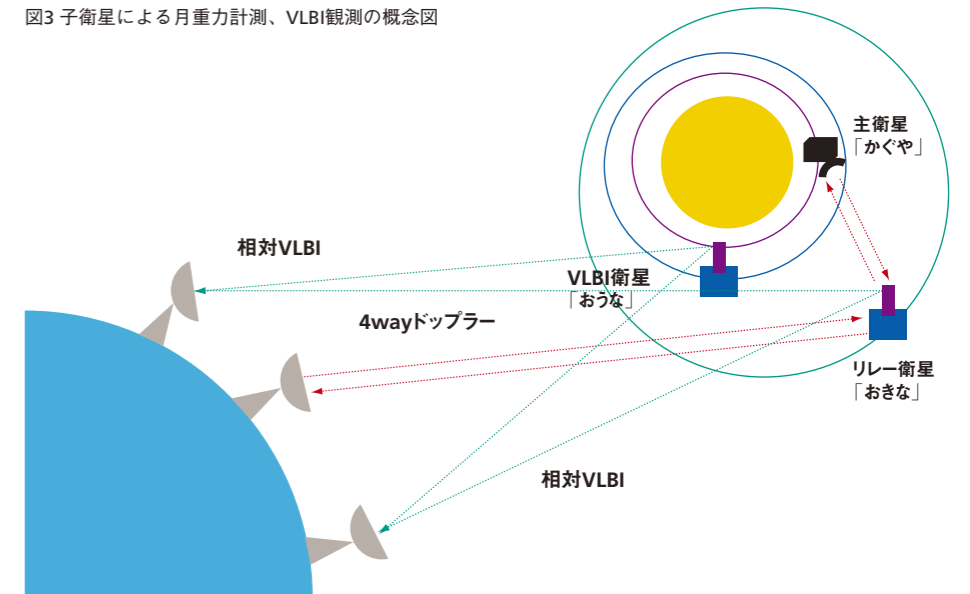


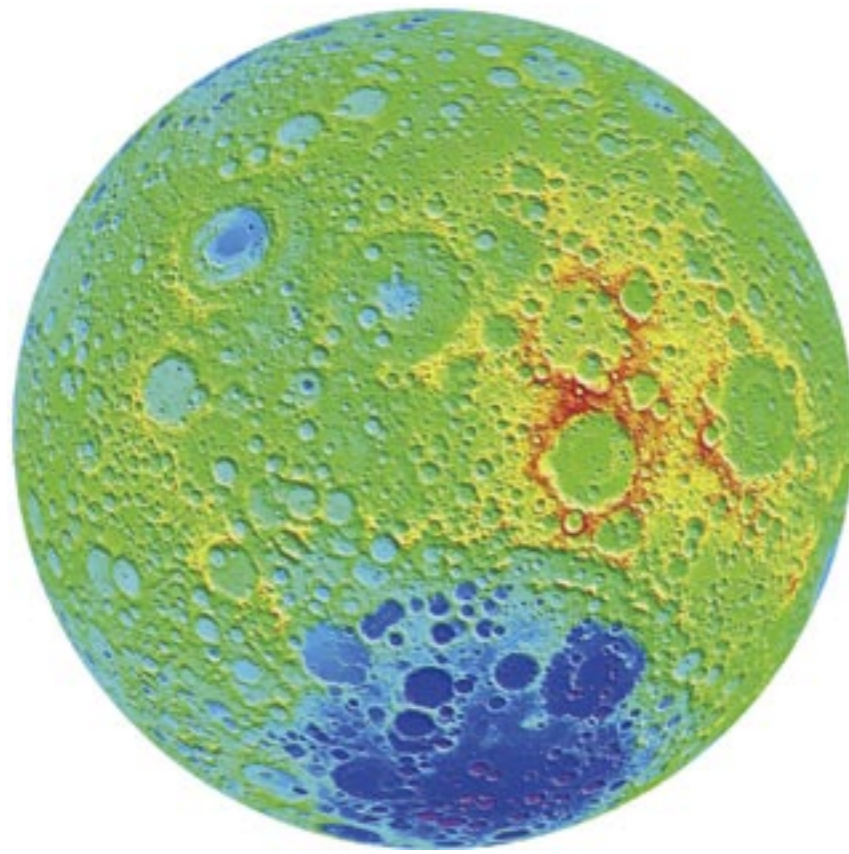
図2 重力と内部構造

赤線はフリーエア重力異常で、探査機の高度を補正した天体基準面での重力。青線はブーゲ重力異常で、フリーエア重力異常から地形の影響を除いたもの。ブーゲ重力異常から、内部の密度変化に関する成分や、地殻・マントルの境界を議論することができる。地殻や上部マントルが変形しやすい場合、地殻の荷重と浮力がつりあうアイソスタシー効果により、マントル物質が上昇してBのような構造になる。Cは凹地に地殻より密度の高い溶岩が噴出している場合で、中心部でブーゲ重力異常が高くなっている。

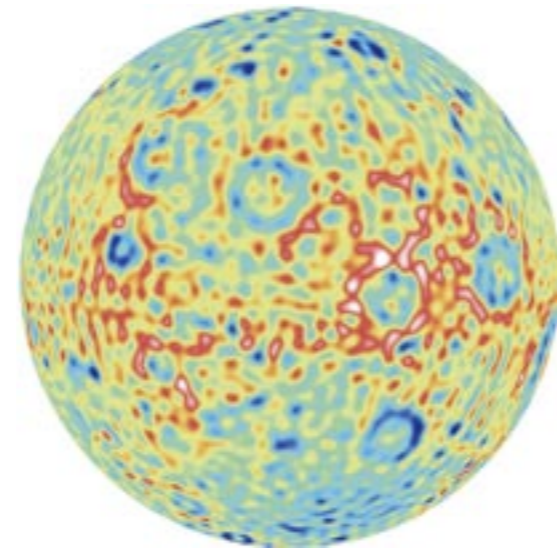
図3 子衛星による月重力計測、VLBI観測の概念図







裏側の地形図  
標高の高い地域が赤色、低い地域が青色で描かれている。下側の標高の低い地域が南極イイトケン盆地で、大きな衝突により形成された。



裏側の重力分布図  
重力が強い地域が赤色、弱い地域が青色で描かれている。

図5 月の裏側の地形図と重力分布図（フリーエ重力異常図）（国立天文台/JAXA）

### 重力分布から月の内部を探る

天体の進化を探るためには、表面の物質の分布や地質構造を調査するだけでは限界がある。内部構造を知ることで、はじめて議論できることは多い。

内部構造を知るための有効な手段は、地震波による探査である。アポロ計画のときに月面に月震計が設置され、4台が地球の潮汐力によって発生する「月震」や隕石の衝突による震動などのデータを長期間送ってきた。しかし、アポロ計画の着陸点は表側の限られた領域であり、測定された地殻の厚さの分布は限定されている。

内部構造探査でもう一つ重要なのは重力探査である。重力は、表面地形だけではなく内部の密度によっても変化するため、天体の内部構造を調べるための有力な手段である。図2は、内部構造と重力の関係を示している。地球型惑星や月で

は、岩石質マントルの周囲を、密度の低い岩石で構成される数10 kmの厚さの地殻が覆っている。AとBは同じような表面地形だが、地殻で支えられている場合と、地殻・マントルの境界が変形している場合では、重力の分布が異なってみえる。

重力分布は、天体を周回する探査機の運動を追跡することで求められる。探査機は速度変化はドップラー効果を計測して取得できる。また、探査機の天球上の位置はVLBI観測で定めることができる。

月はいつも地球に表側を向けているため、月の裏側にいる探査機を直接追跡することができない。そのため、これまでの月の重力のデータは、表側の探査機の軌道から間接的に推定した誤差の大きなものであった。図3のように、「かぐや」は、リレー衛星「おきな」を使い、月の裏側にいるときの主衛星の運動を追跡する。これにより、月全体の正確な重力場を取得することができる。さらに、「おきな」

とVLBI衛星「おうな」からの電波を同時に複数のアンテナで観測することで、「おきな」の軌道を正確に求めて重力場の精度を向上させることができる。

「かぐや」は2007年9月14日に打ち上げられ、10月9日にリレー衛星「おきな」、12日にVLBI衛星「おうな」の分離に成功した。そして11月6日、リレー衛星経由で初めて、月裏側の主衛星の軌道計測に成功した。つまり、月の裏側の重力を測定できたことになる。また、2つの子衛星を同時にとらえるVLBI観測にも成功した。1年以上にわたり重力観測に活躍した「おきな」は2009年2月12日、役目を終えて月面に衝突した。

### レーザーで地形をみる

月の地形の探査も重要である。レーザー高度計は、衛星から月面に向かってレーザー光パルスを発射し、月面で反射された光が戻るまでの往復時間を測定す

ることで、衛星と天体表面の間の直線距離を測る装置である。この方法により、北極や南極（極域）のクレーター内など日の当たらない場所の地形も測定できる。クレメンタイン探査機にもレーザー高度計は搭載されていたが、空間解像度は40 kmほどで、しかも緯度75度以上の極域データは取得できていなかった。

「かぐや」は、高度100 kmの極軌道（南極と北極を通る軌道）をとる。高度計は昼夜ともにデータを取得できるので、月の自転とともに、ほぼ2週間で月全球の高度データを取得することができる。この地形データは、地域的な地質構造を解析するのに有用である以上に、重力のデータと組み合わせて内部構造の情報を求めるのに使われる（図2）。

月周回軌道でのレーザー発射試験は、他の観測機器の試験が終わった後の11

月末に予定されていた。11月26日午前1時22分、レーザー発射のコマンドを送信した。そして、モニター画面に高度を示す100 km前後の数値が現れて、計測成功を確認した。ちょうど月の南極付近であったため、衝突クレーターに覆われた表面の変化を反映して、数値はかなり変動する。海に入ると、一転して変動は少なくなった。皆で苦勞してきた機器が順調に月面を観測していることに感動を覚えたひとときであった。そして12月末から、レーザーパルスを連続して送信する定常運用が始まった。

「かぐや」には、電波により数kmまでの浅い内部構造を探る観測機器「レーザーサウンダー」も搭載されている。特に玄武岩の海の内部構造や、高地で地下に隠れている玄武岩地層の確認などが期待される。

ところで、観測機器の試験が行われている11月は、データ送信量に余裕がある。そのため、広報用のハイビジョンカメラによるビデオ撮像が集中的に行われた。図4は、11月7日に取得した地球の入り画像である。

### 「かぐや」で見た月の素顔

月の地図 レーザー高度計が動きだして2週間あまりたった2008年1月半ば、月全球のデータを取得した。この時点で、世界で初めて両極の地形データが得られただけではなく、月全球のデータ精度も高まった。初期のデータをもとに、国土地理院の協力を得て月の地形図を作成して公開した。<http://gisstar.gsi.go.jp/selene/> これは大きな反響を呼び、地図学会の優秀地図にも選定された。おそらく、地球以外の地図が選ばれたのは初めてのこ

## 月のまわりの電離大気

今村 剛

総合研究大学院大学准教授 宇宙科学専攻/宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部准教授

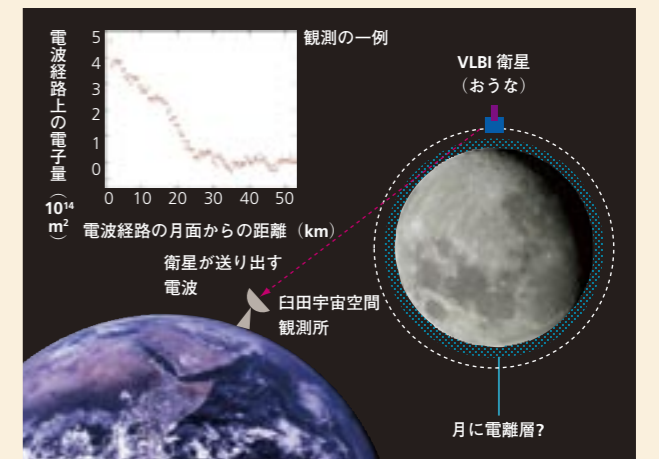
私たちは、「かぐや」ではやや変り種のテーマとして、月面から高度数十kmにまで広がる月の電離大気を調べています。これは、月周回衛星と地球の受信局とを結ぶ電波を用います。衛星が受信局から見て月の裏側に隠れるとき、電波が月の縁をかすめます。そこに電離大気があると、周波数がわずかにずれるのです。

この電離大気、実は多くの研究者が存在を疑っているものです。というのは、月にはアルゴン (Ar) やネオン (Ne) を主成分とする非常に薄い大気があるのですが、それらが太陽紫外線を浴びて生成する電子やイオンは大変微量なはず。しかも、月面には太陽風という磁気を帯びた希薄な電離ガスが吹き付けて周辺の電離ガスを持ち去ってしまうので、ほとんど何も残っていないはずなのです。

理論的に予想される電子密度は1 cm<sup>3</sup>あたり1個程度です。しかし、1970年代の旧ソ連の月探査機によって、1 cm<sup>3</sup>あたり1000個もあるというデータがもたらされました。この結果はあまり信じられていないのですが、もし本当であれば電離気体の未知の供給源の存在を意味しており、これは一大事です。

この観測の難しいところは、電波の経路上には月の電離気体

よりもはるかに濃い地球の電離層があり、これが観測データに大きな誤差をもたらすことです。それでも私たちは、これまでに200回を超える観測を行い、昼側の月面近くを電波が通過する際に電波経路上の電子量が増える傾向があるといった、興味深い結果を得つつあります。30年来の謎に決着をつける日はすぐそこに来ているようです。





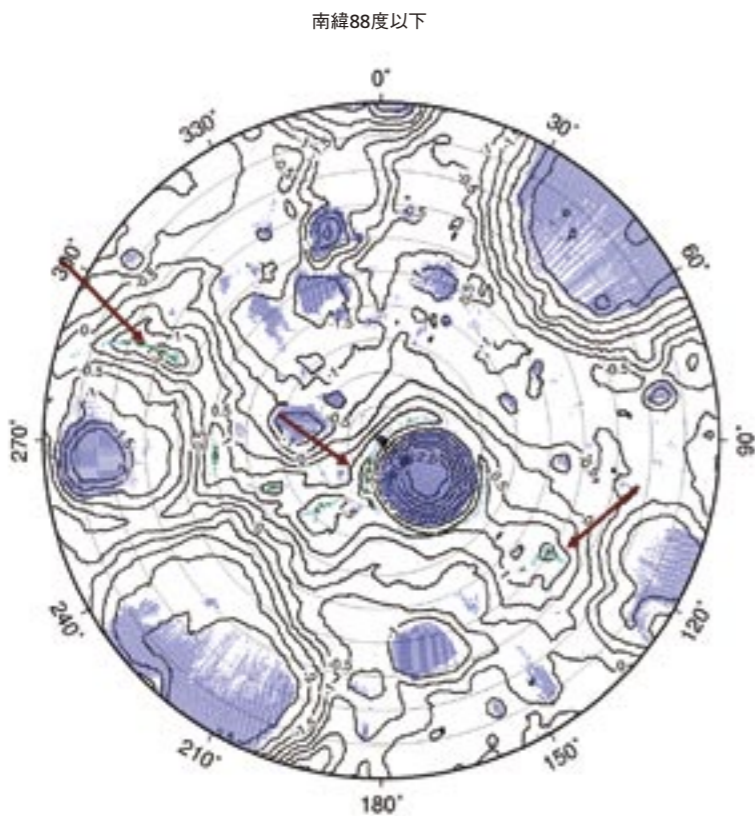


図6 月の南極域の日照率（国立天文台の野田寛大助教が作成）  
赤は日照率80 %以上（矢印の先）、緑が70 %~80 %、水色が60 %~70 %、青が0 %。

とだろう。さらに観測点を増やして600万点あまりのデータから作成したのが図5左の地形図である。2008年末までに計測された高度データ数はクレメンタイン探査機のデータより1桁以上増え、1200万点を超えた。

**極域に氷はあるか** 月の自転軸は黄道面に対してほぼ直交しているため、極域のクレーター内部には、太陽光が当たらない永久日陰が存在する。この領域には、彗星の衝突などで蒸発した水蒸気が氷として凝縮している可能性が指摘されている。また、極域では地球と同様に夏と冬が半年ずつ続き、さらに標高の高いクレーターの縁など山の頂上では、冬の間でも太陽の日が照り続ける日照率の高い場所があると推測されていた。

月面は、昼夜とも2週間続くため、赤道付近では夜の-160℃から昼の100℃以上まで温度変化が非常に大きい。極域の日照時間の長い場所では温度変化が小さく、太陽エネルギーも使えるので月面の

活動拠点としては望ましい。しかも氷を利用することができれば、有人活動にも有利である。

これまでは正確な地形データがなかったため、日照率や永久日陰の分布の正しい計算ができなかった。「かぐや」は極軌道をとるため極域ではレーザー高度計の観測点が多く、高解像度でデータを取得できた。これから求めた日照率の分布が図6である。日照率が80 %を超える赤色で示された地域は非常に限られている。解析に用いた空間分解能（北緯85度で500 m×500 m）では永久日照地域はなく、最大の日照率は北極域で89 %、南極域で86 %であった。

「かぐや」の高分解能地形カメラは高い感度を有している。クレーターの永久日陰の中にも、時期によっては縁で反射した光が中を照らす時期がある。それをねらって撮像を行うと、これまで全くわからなかった永久日陰のクレーター内部の様子が明らかになった。図7は、月の南極にあるシャクルトンクレーターの

内部である。もし氷が表面に存在するならば、反射率の高い領域として検出できるはずであるが、この図には見られない。永久日陰の水は、存在したとしても、表層の下に隠れているのであろう。

**月の裏側がより見えてきた** 「かぐや」が月の表側を飛んでいるときには、地球から直接、衛星の追跡を行う。「かぐや」が月の裏側において、リレー衛星が「かぐや」と地球の双方から通信できる時、リレー衛星を経由した重力測定を行う。昨年未までに月の裏側ほぼ全域の重力場データを取得することができた（図5右）。

その結果、月の裏側では、これまで曖昧だった重力異常が明瞭に見えるようになった。裏側の円環状の重力分布は、地形図に見られる衝突盆地に対応している。データを解析すると、重力と地形との相関関係が非常に高くなったことがわかった。これは、裏側の高地については、衝突地形が表面付近の地殻でよく支えられていることを示している（図2）。

これまでの解析から、表側に比べて裏側の地殻は衝突地形が形成されたときに、かなり速く冷えて固くなっていたのではないかと想定できる。おそらく、月の冷却速度が表側と裏側では異なっていたと考えられる。

#### より詳しく、より深く

「かぐや」による地形・重力探査の結果は、2009年2月に米サイエンス誌に掲載されて、注目を集めてきている。月の地形と重力という、最も基本的な物理量

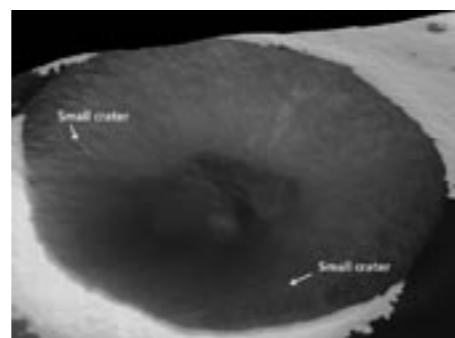


図7 月の南極にあるシャクルトンクレーターの地形カメラによる画像。カメラ撮像の主任研究者はJAXAの春山純一助教である。

の正確な分布図を日本が作り上げたことの意義は大きい。また、地形カメラや鉱物分布を調べるカメラも、月全球の詳細なデータを初めて取得している。これにより、月の地殻の様子が明らかになりつつある。今後は、高度計のデータを地形カメラによる高解像度の地形データと統合することで、月全体にわたる高精度地形図を作る計画である。

月の進化を解き明かす上で、金属コアの密度、大きさといった基本量がまだ明らかになっていない。「かぐや」の成功を受けて、月着陸探査を行い、月震計ネットワークによる月震測定や月の自転運動の変動の詳細測定により、コアのサイズや状態を調べる計画が進んでいる。国立天文台は、JAXAと協力して月着陸探査を推進していく予定である。さらに、火星や木星の探査も将来は実現したいと考えている。



佐々木 晶（ささき・しょう）  
新しい分野に飛び込むのは勇気が必要ですが、その発展期を体験できる喜びがあります。私が大学院に進学したときには、日本では惑星科学の研究者は数が少なく地球外の天体を探査した経験はありませんでした。「のぞみ」「はやぶさ」「かぐや」と太陽系探査に関わるなかで、私の研究分野は、当初の惑星形成から、大気、ダスト、火星、小惑星、月へと広がりました。その後、宇宙風化作用（天体の反射スペクトル変化）の研究で評価されて、小惑星に名前（shosasaki）が付けられました。現在では、将来の月・火星着陸探査、木星系探査などの計画立案にも関わっています。

## 歴史ある最北の研究所

—国立天文台水沢キャンパス

### 佐々木 晶

岩手県奥州市水沢区。ここに総研大でもっとも北にあるキャンパスがある。国立天文台水沢キャンパスは、もともとは緯度観測所と呼ばれ、今から100年以上前の1899年に創設された歴史ある研究機関である。それはまだ、東北大学が創設される前のことである。「かぐや」の重力・地形研究を担っている国立天文台のRISE（ライズ）月探査プロジェクトはこの水沢キャンパスを本拠地としている。

19世紀末、国際共同で星の運動を追跡して地球回転の変化を研究するプロジェクトが動きはじめた。世界中のほぼ同じ緯度帯に望遠鏡を置いて、星の運動を観測するのだ。日本では水沢が選ばれ、臨時緯度観測所が設立された。金沢生まれの天文学者、木村栄（きむら・ひさし）が所長として赴任し、観測を開始した。

数年後、木村は、理論的にこれまで考慮されていなかったZ項を導入すると、世界中の観測データの緯度変化をよく説明できることを発見した。これは、明治期の日本が初めて天文学・地球物理学の分野で成し遂げた大きな成果で、国際的にも高く評価された。その後も常設の緯度観測所として、地球回転などの観測が続けられた。

1980年代に入ると、VLBI（本記参照）観測をプロジェクトの中心に据えることになり、国立天文台発足時に合併することになった。現在、キャンパスの中には直径10 mと20 mの2台の電波望遠鏡がある。20 m望遠鏡は、同型のものが石垣島、鹿児島、小笠原父島にあり、VLBIネットワークとして活躍している。この電波望遠鏡群により星までの正確な距離を求めて銀河系の地図を作るのがVERAプロジェクトであり、月探査とともに、水沢の2本の柱を構成している。「かぐや」のVLBI観測でも、このネットワークは活躍している。

初代所長、木村栄の名前は月面のクレーター（Kimura Crater）として残っており、「かぐや」が詳細な画像を取得している。このクレーターが命名されたのは1970年、奇しくもZ項の原因が地球内部の流体核にあることが明らかになった年であった。また、水沢をしばしば訪れた京都大学の天文学者、山本一清の名前も月面にある（Yamamoto Crater）。月面に名を残している日本人は10人程度と少ない。そのうち2人が水沢に深い関わりのある研究者であることは興味深い。

緯度観測所の初代の建物と、1921年に建てられた旧本館は、2007年に耐震改修工事が行われ、一般に公開されている。平泉や盛岡を訪問される機会があれば、ぜひ立ち寄っていただきたい。



左は1899年に建てられた臨時緯度観測所。現在は「木村記念館」として公開されている。右は緯度観測所旧本館。宮沢賢治がアイデアを育んだとされる。現在は奥州市の「奥州宇宙遊学館」として、天文学・宇宙科学の一般普及の場として利用されている。