

# 月周回衛星「かぐや」(SELENE) サイエンス特別編集号について

平成21年2月13日

宇宙航空研究開発機構

SELENEプロジェクト



月周回軌道でのおきな分離時のかぐや(想像図)

空へ挑み、宇宙を拓く

# サイエンス特別編集号の構成

1. 表紙: 地形カメラによるモスクワの海画像

2. 論評(perspective)

かぐやの研究に関する論評

3. 研究論文(Reports)

1) Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon  
月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の月レーダサウンダーによる月の表側の海の部分の地下構造探査

2) Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry  
月周回衛星「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)によって得られた月の全球形状および極域地形図

3) Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)  
「かぐや(SELENE)」の4ウェイドップラ観測から得られた月の裏側の重力場

4) Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera  
月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の地形カメラによる月の裏側のマグマ噴出活動の長期継続

# サイエンス2月13日号の表紙と論評



論評: Seeing the Missing Half

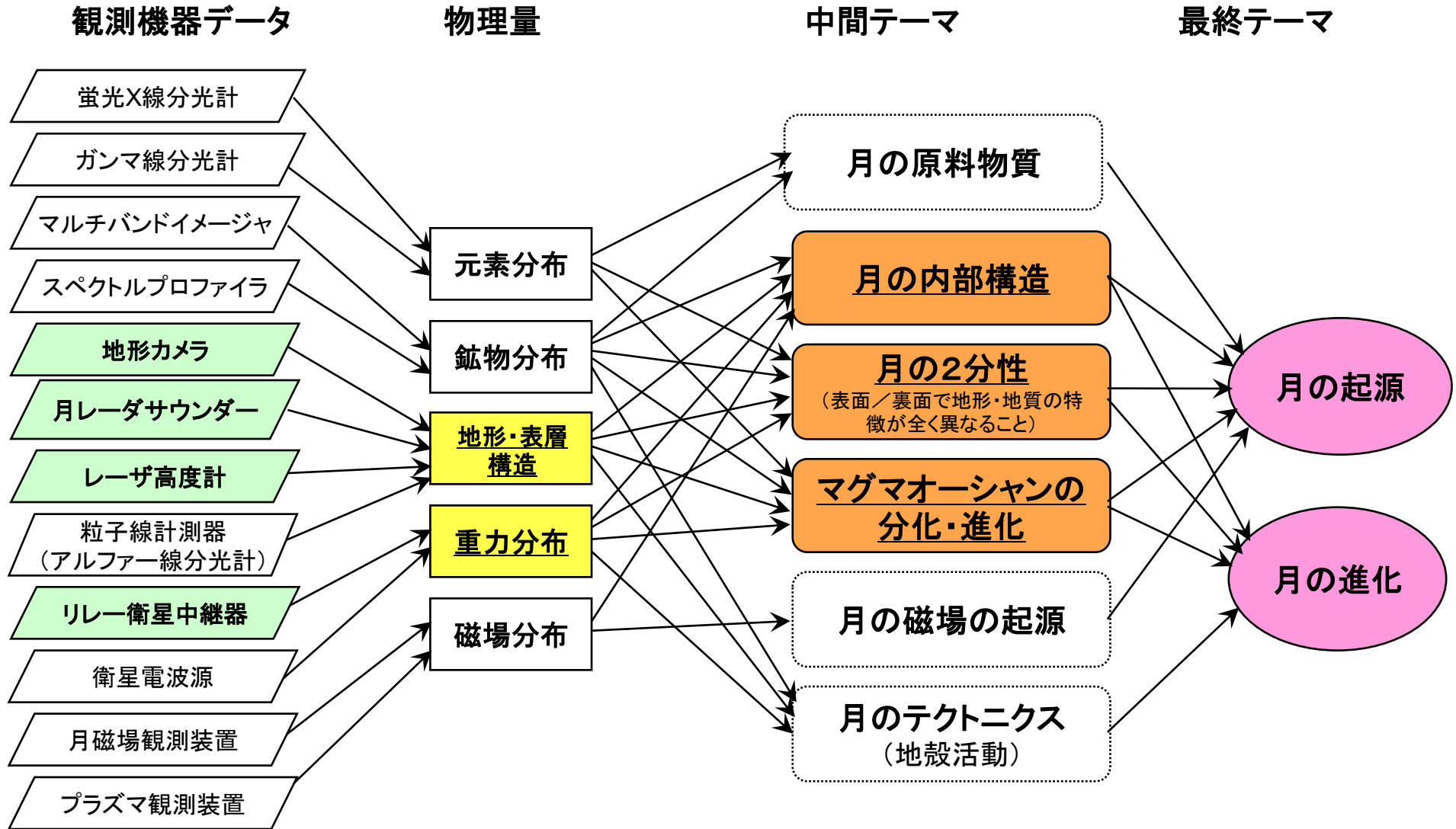
残されていた半分(裏側)に関する知見

Gregory A. Neumann and Erwan Mazarico

NASAゴダード宇宙飛行センタ,

- 月の表と裏の違いの紹介
- 4つのかぐやの論文で得られた知見の概要
- かぐやおよび中国、インド、アメリカ、および他の月探査から得られる成果への期待

地形カメラによるモスクワの海の画像

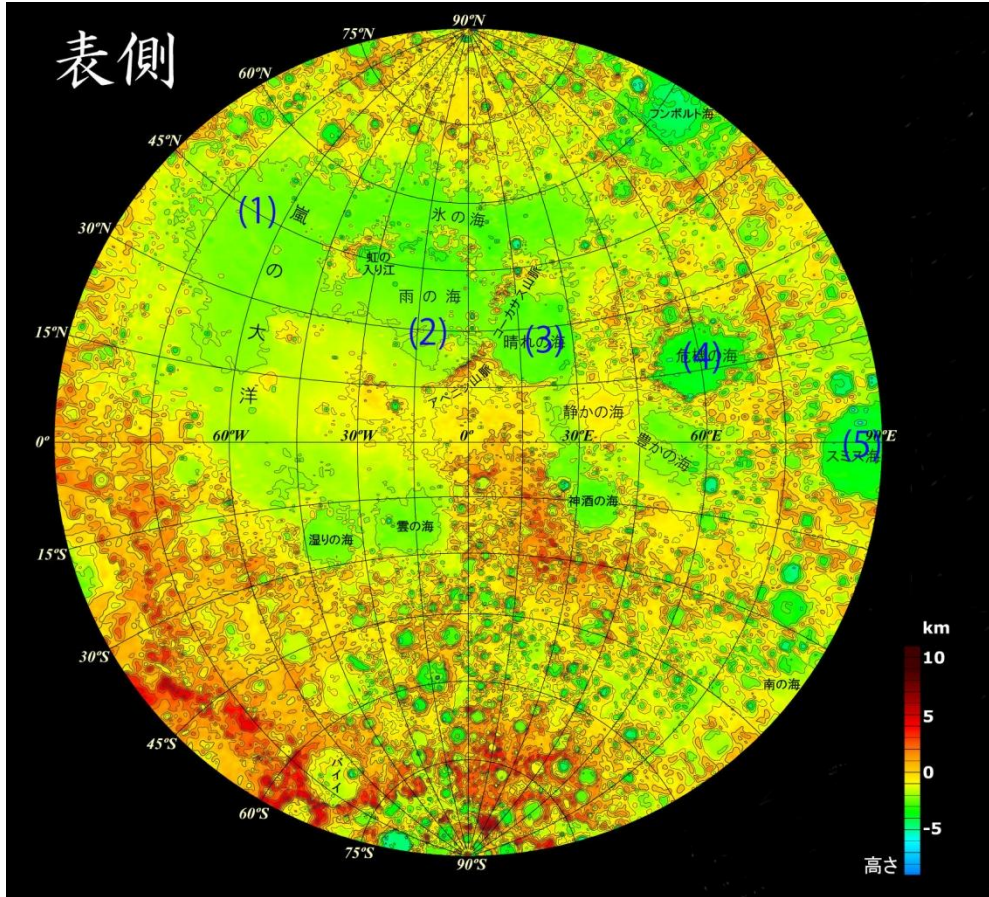


かぐやの観測データによる「月の起源と進化の解明」プロセス



# 月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の月レーダサウンダーによる月の表側の海の部分の地下構造探査

## Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon



提供: JAXA/国立天文台/国土地理院

図1 「かぐや」月レーザ高度計の観測データから作成された月の表側の地形図。

(1)から(5)が本研究が対象とした月の海の領域です。

月レーダサウンダーのサウンダーモード観測により、次の内容に関する新たな知見を得ることができました。

### 知見1

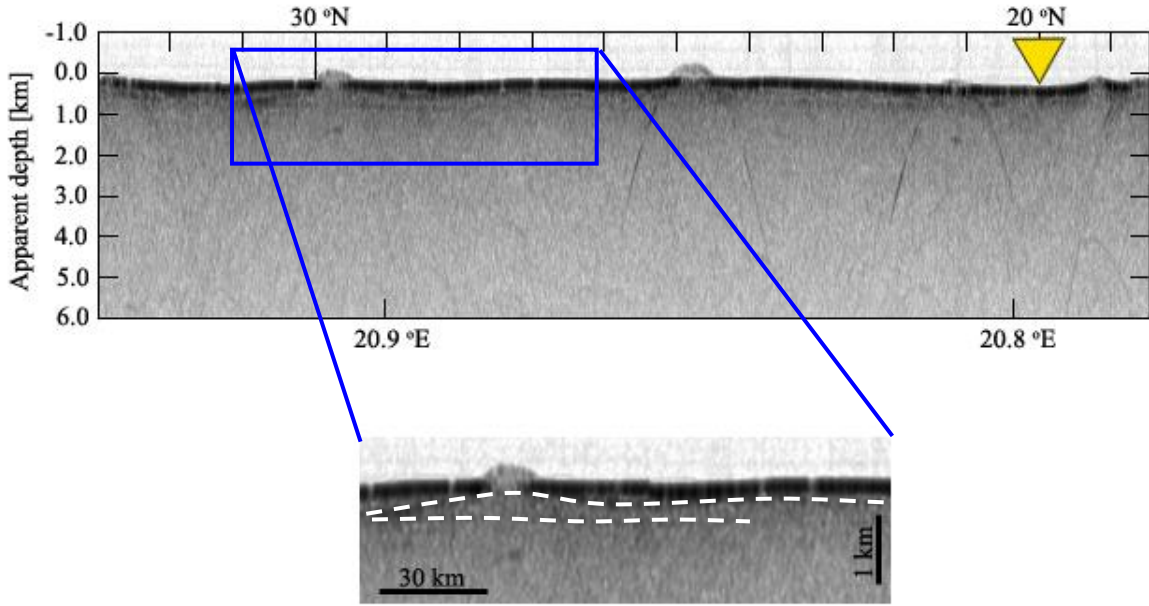
晴れの海(左図(3)※1)など月の表側の海において、地下数百メートルの深さに層状構造があること。この層状構造は、海の盆地を埋めている玄武岩とその間に挟まれるレゴリス※2などからなっており、褶曲(しゅうきよく)していること。

### 知見2

LRSによる地下探査で捉えられた地下の褶曲の状況から、褶曲を起こした地殻変動は地層群の自らの重さによって発生したものであるとの従来の考えを覆し、月全体の冷却が主たる要因となっていること。

※1 晴れの海(Mare Serenitatis): 月の表側の代表的な海の一つ(直径約600km, 北緯 28° 東経 17°)。アポロ17号が晴れの海の近辺に着陸した。

※2 レゴリス: 月の表面に分布する細かい砂のような堆積物で、厚さは数10cmから数10m程度



(C)JAXA/SELENE

図2 晴れの海のLRSによる地下の解析画像(レーダグラム※1)

処理・解析: 東北大学、名古屋大学、京都大学

※1 レーダグラム(Bスキャン図) 横軸を観測時刻, 縦軸をレーダーエコー反射面までの距離としたレーダーの解析画像。「かぐや」LRSの場合は横軸は月の地理緯度, 縦軸は反射面の見かけの深さを示す。

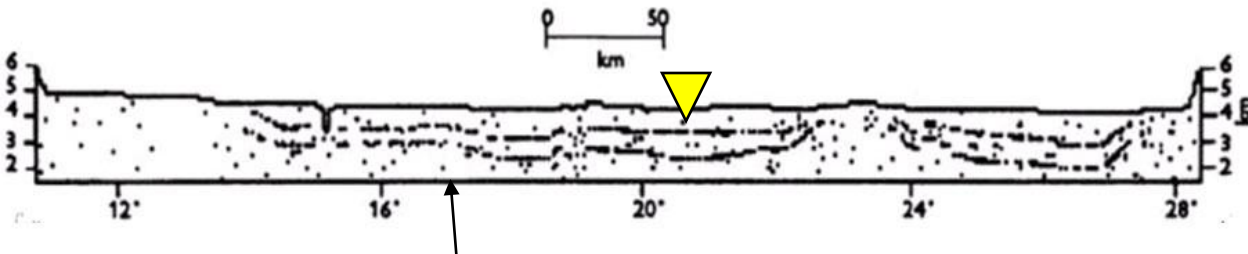


図3 1972年アポロ17号の実験的なサウンダー観測(ALSE, Apollo Lunar Sounder Experiment)

縦軸はみかけの深さ(km)、横軸は経度(東経)を示しています。

出展:Peeples, W.J., Sill, W.R., May, T.W., Ward, S.H., Phillips, R.J., Jordan, R.L., Abbott, E.A., and Killpack, T.J. (1978) Orbital radar evidence for lunar subsurface layering in Maria Serenitatis and Crisium, Journal of Geophysical Research, Vol.83, No.B7, pp.3459-3468.

図2のLRS画像では、見かけの深さ※2約500mと800m付近に反射面があることがわかります。LRSの深さ方向の空間分解能は75mです。表面3箇所認められるドーム状のものとそこから伸びる双曲線状のパターンは、側方にあるクレータ内壁からの反射です。

図3はアポロによる観測で、同じ晴れの海(北緯20°付近)において、表面からの見かけの深さ2.7kmと4.7kmに反射面が観測されています。

今回のLRSによる観測では、ALSEで観測された同じ地点(黄色い三角印)において、見かけの深さ2.7kmと4.7kmには反射面は観測されませんでした。その一方、ALSEでは、LRSで観測された見かけの深さ500mと800mの反射面は報告されていません。これは、ALSEの深さ方向の空間分解能が1200mと低く、浅い部分の地下構造を十分に識別できなかったためと考えられます。

※2 見かけの深さ 電波が真空中を進むと仮定した場合の到達する距離を尺度とした深さ。電波が実際に岩石中を進む速度は、岩石の電気的な性質(誘電率)によって変わるため、実際の深さは、見かけの深さの2分の1から3分の1程度である。この資料では、深さは全て見かけの深さで示している。

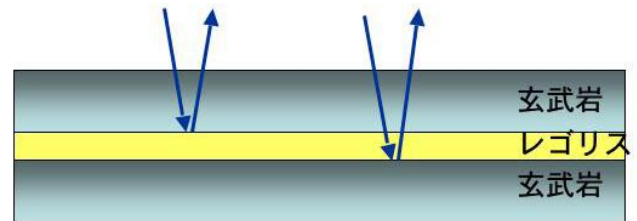
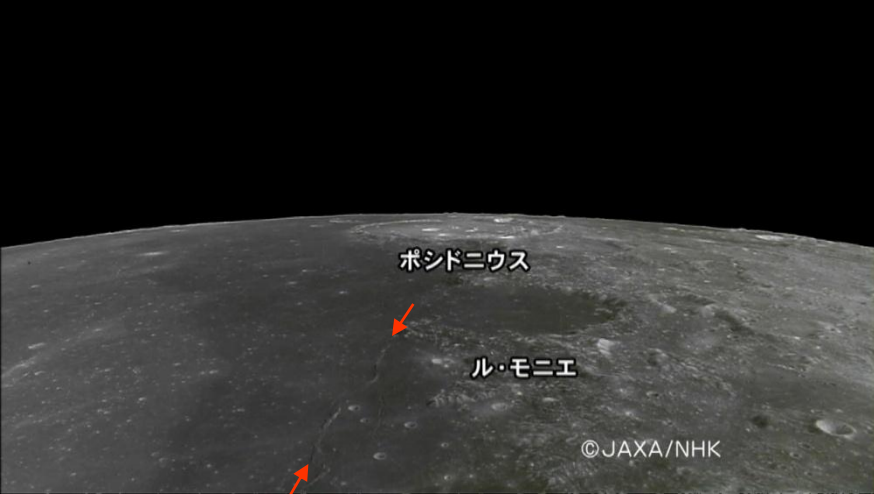


図4 地層群の模式図

海の玄武岩が大規模な溶岩流として噴出した際に、次の溶岩流の噴出までの間に時間の差があり、その間に玄武岩の上にレゴリスが数10cmから数mくらいの厚さで堆積したと思われます。さらに大規模な溶岩流がその上に行くと、溶岩流の間にレゴリス層がサンドイッチされたような構造になります





リッジの例 図5 かぐやHDTV映像

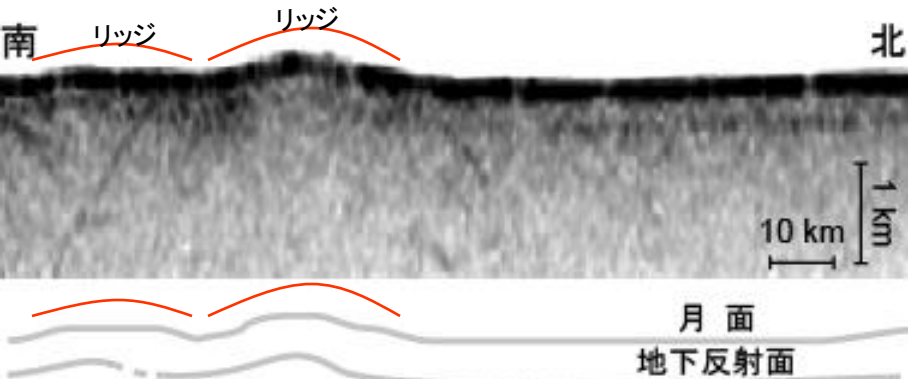


図6(上図) 晴れの海におけるLRS観測データ. 赤色の弧は、リッジの位置を示す。(下図)月面とこのデータから検出された地下反射面.

(C)JAXA/SELENE 処理・解析: 東北大学、名古屋大学、京都大学

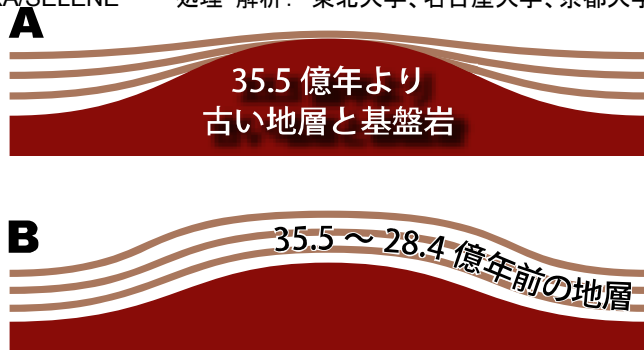


図7 堆積と褶曲の時期の違いによる、地層の厚さの水平変化を示す模式図

A) 背斜(上に凸になった褶曲構造)が成長しながら地層が堆積した場合. 従来のもの  
B) 地層が堆積し終えてから背斜が成長した場合. 今回のLRSの観測結果が支持するもの

・図5のように月の海の大平原には、細長く盛り上がったリッジと呼ばれる地形(矢印の部分)がみられます。LRSによる晴れの海の地下構造の観測(図6)によれば、地下の反射面は、地表のリッジの地形面と平行になっています。  
→ 海の玄武岩は粘性が低かったために、冷えて固まったときには表面が水平な溶岩原をつくります。

・これまでの考え(図7A): 堆積物荷重が褶曲を駆動するという、従来のモデルから予想されたもの(褶曲による地層の厚さ変化を示すもの)。

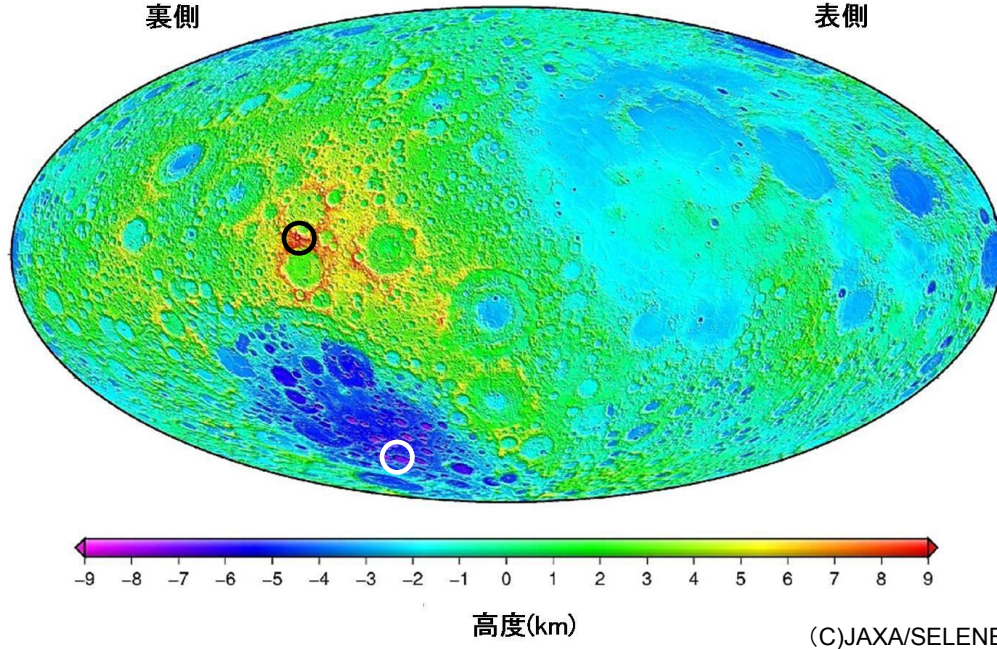
・LRSの観測で得られた知見(図7B): LRSの観測で得られた地下構造の情報では、褶曲構造が反射面と月面とのあいだにある玄武岩の堆積後に形成されたことを示しています。

→ **従来の考えとは異なり、この地域では月面を約28億4千万年前に玄武岩が覆っている**ので、それ以降にリッジが出来たことをLRSの観測は示唆しています。

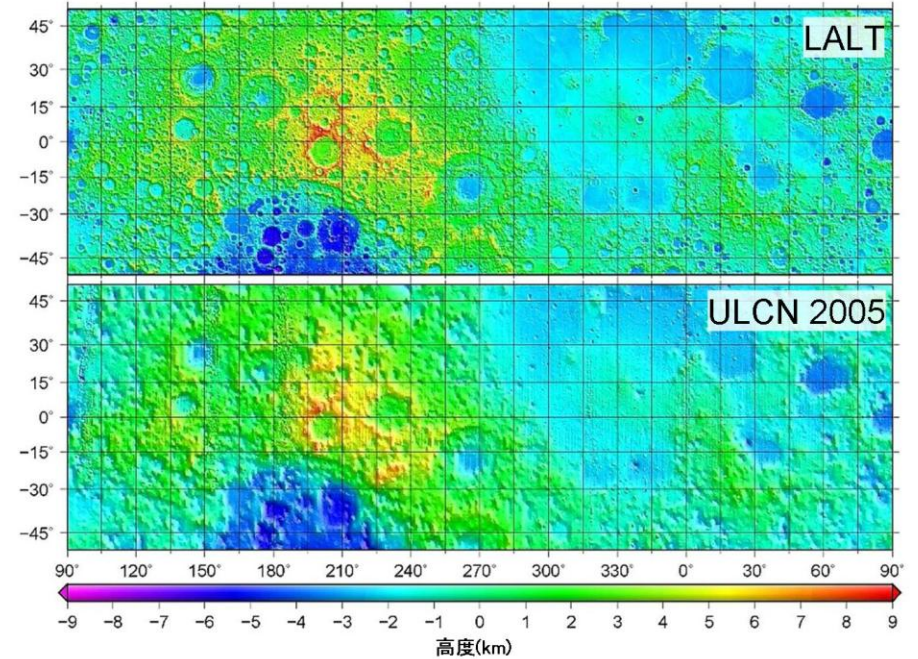
このようにしてリッジが形成された原因としては、28億年前をすぎても全球的冷却の度合いが予想外に大きく、冷却により月全体が収縮し、表面に皺としてリッジができたものと考えられます。例えば水星では、表面積の縮小によってできる断層が知られており、全球的冷却がその原因とされています。

# 月周回衛星「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)によって得られた月の全球形状および極域地形図

## Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry



ハンメル等積投影図法による月地形図。高度基準は重心原点の半径1737.4kmの球面。黒丸は月面最高点、白丸は月面最低点の位置を示す。処理・解析：国立天文台



メルカトル図法による月地形図(上が「かぐや」、下がUCLN 2005)

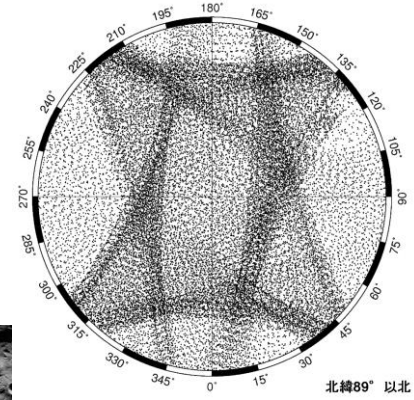
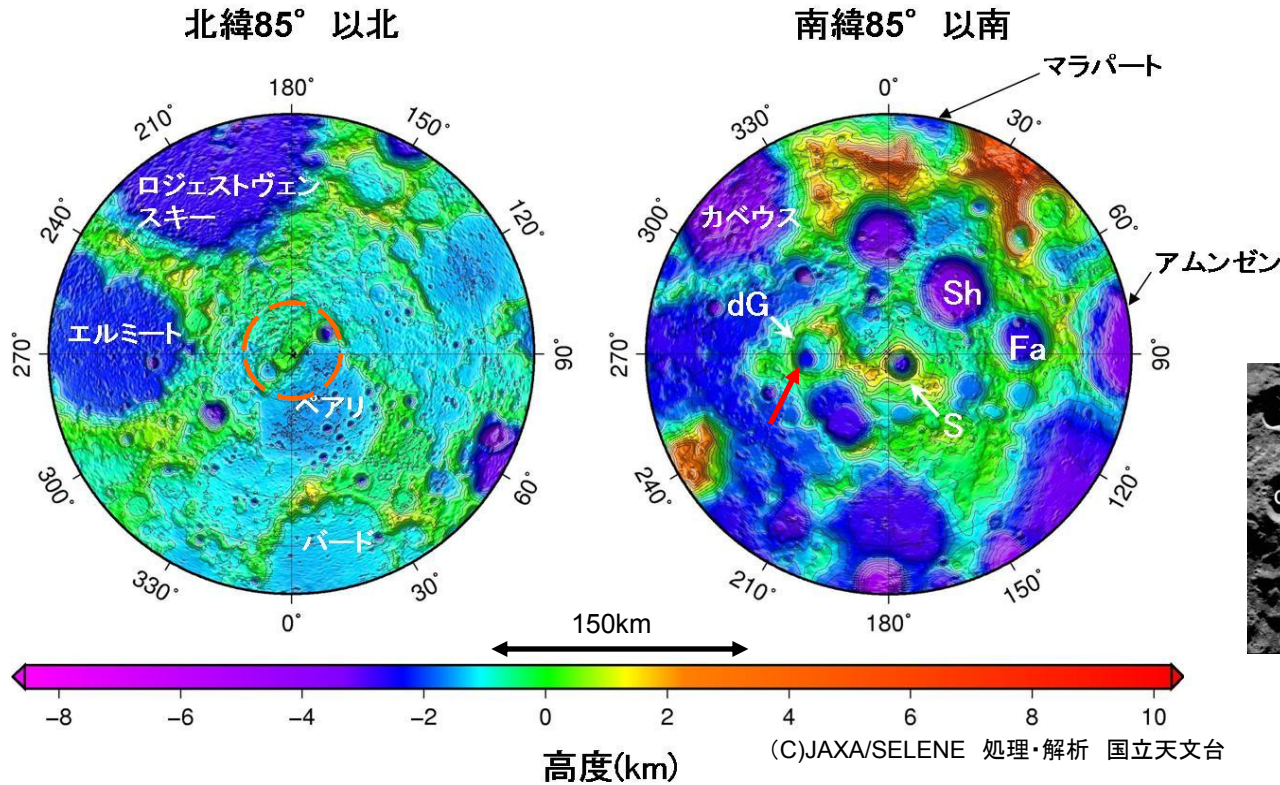
・「かぐや」搭載のレーザ高度計(LALT)のデータを用いて分解能0.5度以上の月全球地形図を作製し、次のような知見を得ました。

**知見1** 計測点数は2008年3月末の段階で約677万点。高度の精度は約4m(1 $\sigma$ )、位置の精度は約80m(1 $\sigma$ )です。従来の全球月地形モデルULCN 2005では27万点。高度決定精度は数百メートルとされていますが、上右図の比較で明らかのように、オリエンタルベイスンの多重リング構造など、2-300km以下のサイズの地形再現が劇的に向上しています。

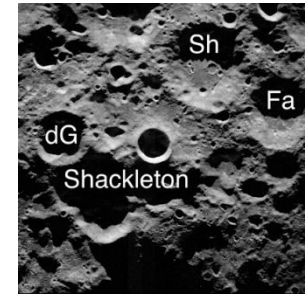
**知見2** このデータにより、月の最高地点はDirichlet-Jackson盆地の南端に(-158.64° E, 5.44° N, +10.75 km)、最低地点はAntoniadiクレータの内部にあり(-172.58° E, 70.43° S, -9.06 km)、高度差は従来考えられていたよりも2km以上大きく、19.81kmであることがわかりました(ULCN 2005では17.53kmとされていました)。



# 世界で初めて高度計のデータを用いて作成された 精密かつ全域の極域地形図



北極付近(緯度89° 以上)の  
LALT計測点分布。観測点の  
間隔は2km以下。



Campbell et al., 2006  
*Nature* **443**, 835-837  
(19 October 2006)

**知見3** 世界で初めて高度計のデータを用いて作成された精密かつ全域の極域地形図を作製し、次の知見を得ました。

- ・Sh: シューメーカー(Shoemaker), Fa: ファウステイーニ(Faustini), S: シャクラトン(Shackleton), dG: デ=ヘルラテ(de Gerlache)
- ・極域は計測点の分布が比較的稠密であるため直径2-3km程度の小クレータもはっきり捉えています。
- ・月探査機の画像や地上レーダ観測では日照条件や観測条件に制約があるため、従来の月極域(特に南極域)の地形図には欠測領域が多くありました。今回のLALTの観測により世界で初めて欠測領域のない月極域地形図の作製に成功しました。
- ・例えばシャクラトンクレータやデ=ヘルラテクレータの(地球から見て)裏側にある凹み、またデ=ヘルラテクレータ内部の直径約15kmのクレータなどはLALTの観測で初めて明確になった地形です。
- ・この地形図は、将来の月探査における着陸や基地の候補地探索に重要な役割を果たすものと期待されます。また極域の日照日陰条件についてはすでにLALT観測機器チームから昨年、米国地球物理学会Geophysical Research Letters誌に論文発表されています(Noda et al., *GRL*, 35, L24203, 2008)。

## 知見4 月の基本形状の決定

- ・半径: 1737.15km
- ・重心(COM)と形状中心(COF)\*1のずれ: 1.93km  
COM→COFの方向

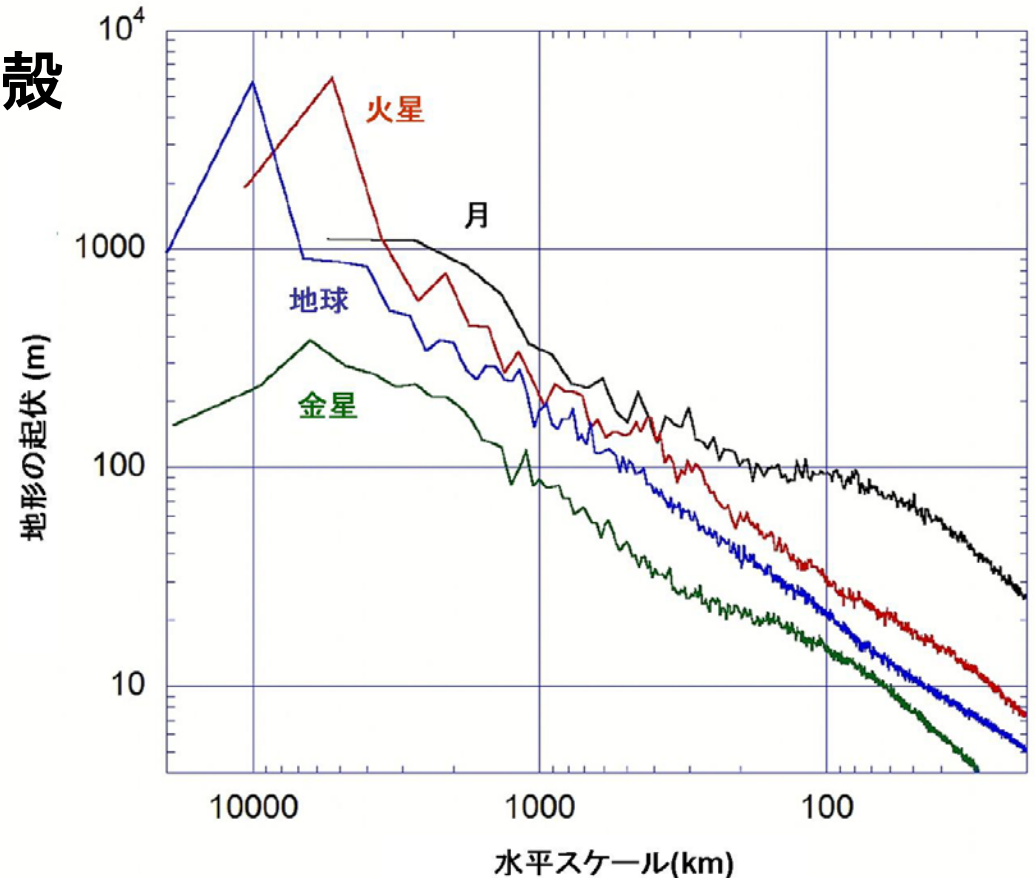
※1 形状中心の位置(-157.59° E, 7.10° N)

- ・極半径: 1735.66 km
- ・赤道半径: **1737.90 km**  
→赤道扁平率: **1/775.5**
- ・\* 月極半径の直接計測は世界初

※赤道半径と赤道扁平率を訂正しました。  
(平成21年2月24日訂正)

## 知見5 月面地形から推定される地殻の特徴

- ・地球、金星、火星に比べると地形の起伏が大きい。
- ・水平スケール90-180kmで、さらにその差が大きくなる。
- 月の表層(地殻)は硬く、起伏の大きな地形を支えられる。
- 原因として対象天体においては、水などの揮発性物質が非常に少ない。





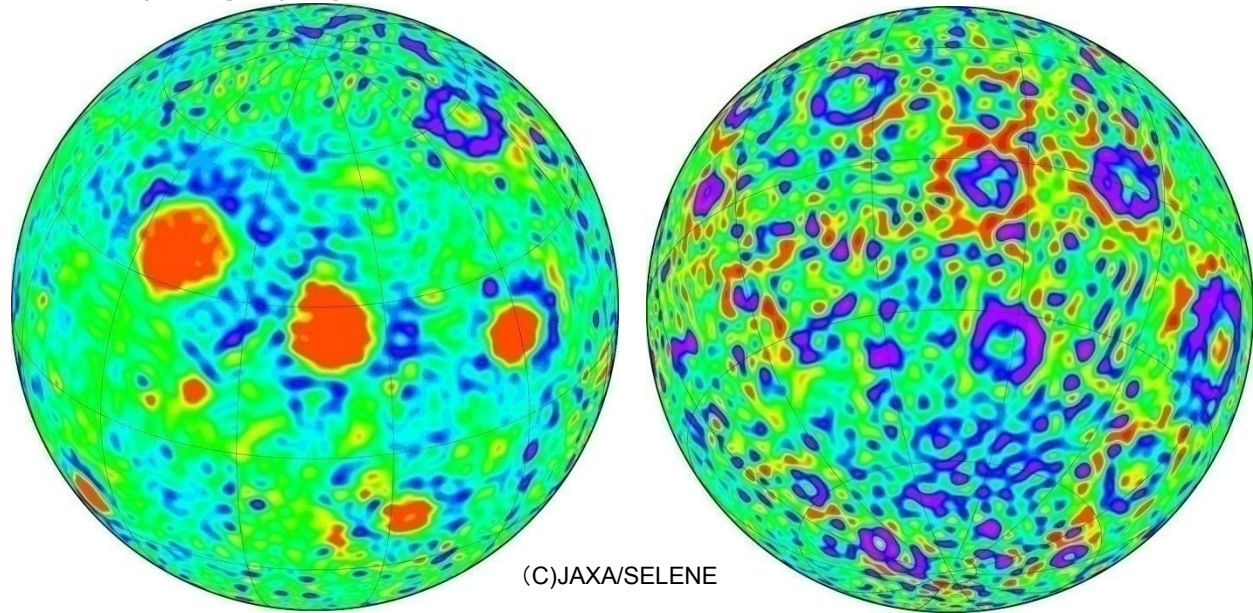
# 「かぐや(SELENE)」の4ウェイドップラ観測から得られた月の裏側の重力場 Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)

リレー衛星(おきな)を用いた世界で初めての月の裏側の重力場の直接観測により、三つの新しい知見が得られました。

**知見1** 月全体の重力分布を観測しました(上図)。特に月の裏側の重力異常\*1が「かぐや」の観測によって初めて明らかになりました(右上図)。

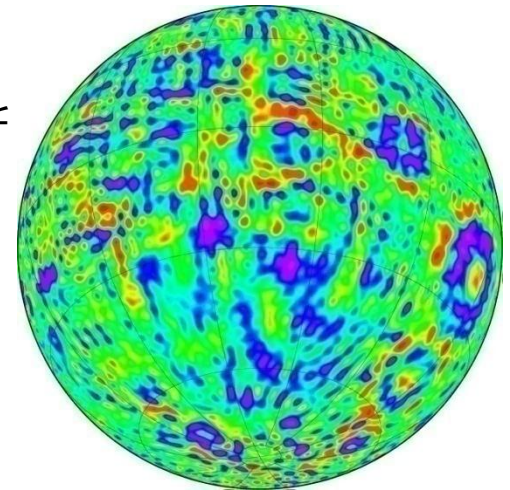
- 以前から月の表側にはマスコン\*2と呼ばれる強い正の重力異常が見つかっていました(左上図の赤丸)。

- 一方、月の裏側は観測データが乏しく、東西南北に伸びた細長い筋状の重力異常があるだろうと推測されていました(下図)。しかし、このような重力モデルは月表面のクレータ地形にそぐわないので、月科学の大きな問題でした。「かぐや」の観測では、裏側の重力異常はクレータや盆地\*5にふさわしい丸い形をしていることがはっきりと示されました。



かぐや重力場モデル(SGM90d \*3)による重力異常図. 左は月の表側を北東から見下ろした図. 右は裏側を南西から見上げた図. 赤色は重力が強い地域を, 青色は弱い地域を表している。(処理・解析: 九州大学、国立天文台)

かぐや以前のモデル(LP100K\*4)による裏側の重力異常図. 上段右図と同じ方向から見ている。



\*1 重力異常: 月の重力は一律ではなく、地形や地下に存在する物質の密度に応じて、地域毎にごくわずかな重力の強弱があります。それぞれの地域での重力値から月全体の平均を引いた差を重力異常と呼びます。

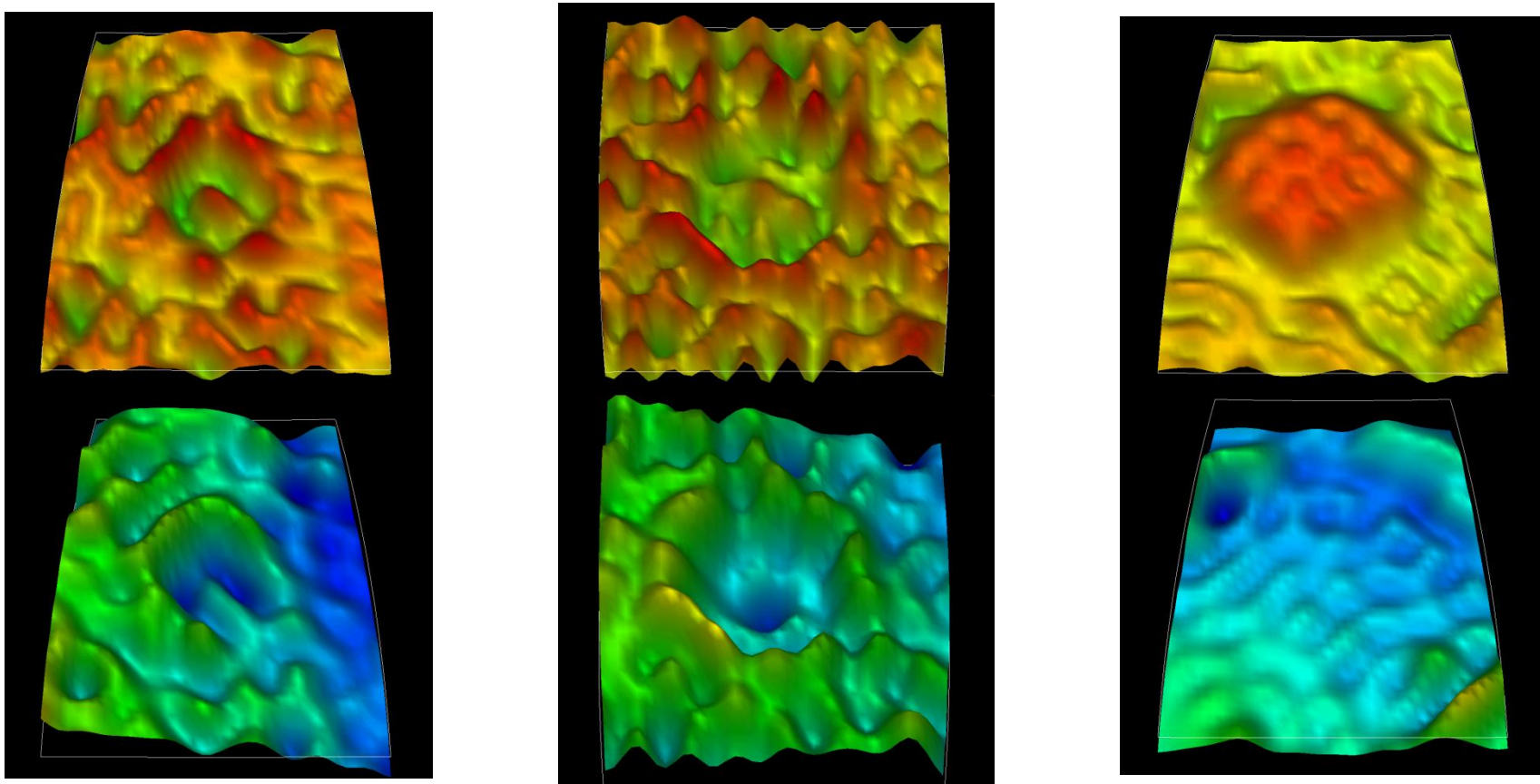
\*2 マスコン: 衝突に伴うクレータ形成過程で、過剰なマントル上昇や玄武岩の海の集積が起きることによって質量の過剰集中が保持され、正の重力異常=マスコンが生成されます。

\*3 SGM90d: かぐやの観測データから作成された重力場モデル。

\*4 LP100K: NASAのコブプリフ博士らによって2001年に発表された月の重力場の地図。Lunar OrbiterやApolloから最新のLunar Prospectorに至る米国の探査機が取得したデータを総合的に解析した結果。

\*5 盆地: 直径が200 kmを越える大型クレータ、構造変動の痕跡を残しているものが多く、クレータ内部に溶岩が噴出している場合もある。





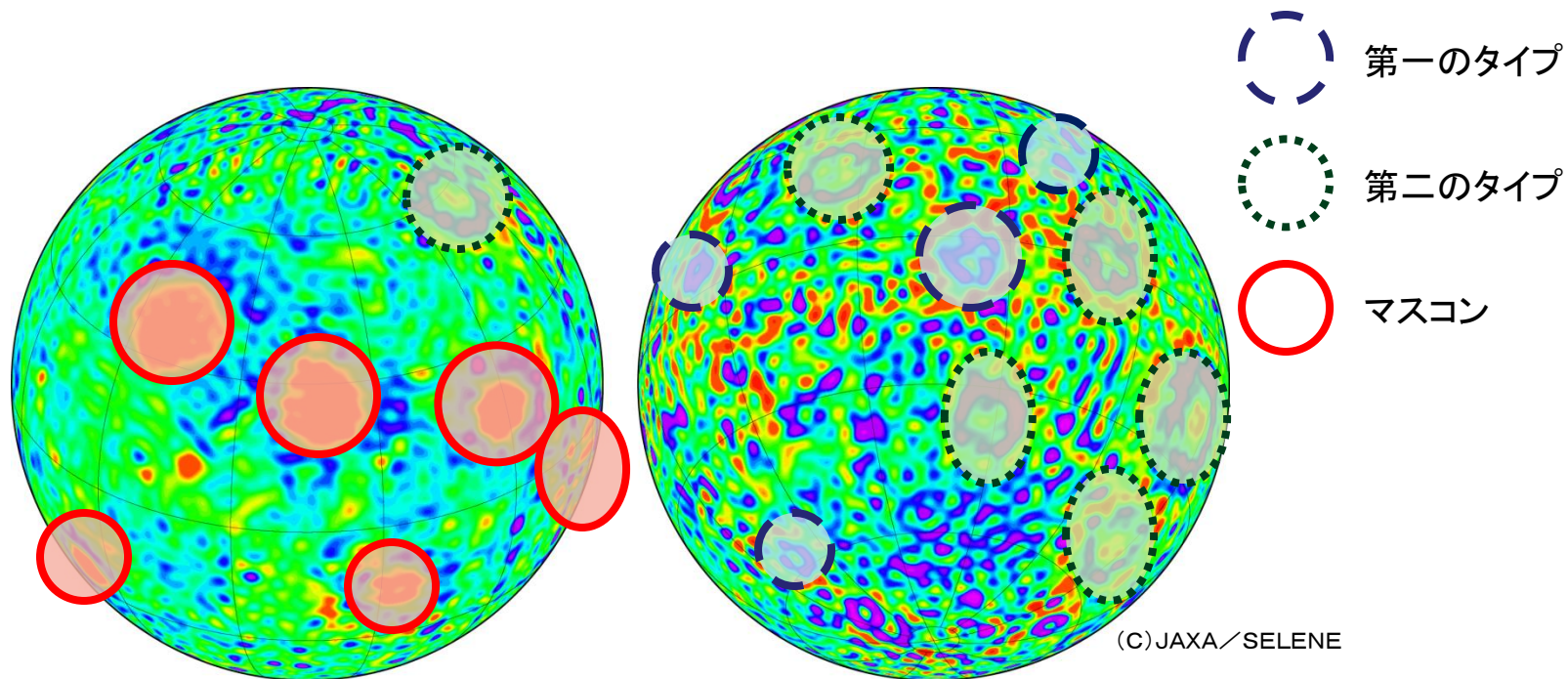
盆地の重力異常(上段)と地形(下段)。左からローレンツ盆地(Type I)、ヘルツシュプルング盆地(Type II)、雨の海(マスコン)  
 (C)JAXA/SELENE 処理・解析: 九州大学、国立天文台

## 知見2 月の盆地の重力異常は三種類のタイプに分けられることが明らかになりました。

- ・ 第一のタイプ(Type I 図左)は中心から外側に向かって重力異常が正～負～正のリング形をしています。
- ・ 第二のタイプ(Type II 図中央)も正～負～正のリング形をしていますが、中央のピークが第一のタイプに比べてやや低く、盆地内部には溶岩噴出の痕が残されていることがあります。
- ・ 第三のタイプは以前からマスコンと呼ばれていた重力異常(図右)で、台地のように山頂部が平らで、周囲が切り立った形をしています。マスコン盆地の内部は例外なく多量の溶岩が噴出しており、第一、第二のタイプのような大きな窪みは溶岩で埋まっています(図右下)。

**知見3** 三つのタイプの盆地は、月の内部構造や進化に強く関連していることが推測できました。第一と第二のタイプは、地殻とマントルが冷たく、固い状態で形成された衝突盆地です。第一のタイプは、盆地形成後現在まで地形が凍結されたままでしたが、第二のタイプは中央部が落ち込み、地殻の亀裂を伝って溶岩が噴出したと推定されます。一方、マスコン盆地は、衝突が起きた後も地殻とマントルが暖かく、柔らかい状態で形成されたと考えられます。マスコン盆地形成後には激しい溶岩噴出がおきました。

三つのタイプの盆地には形成年代に大きな時間差はありません。しかし、月面上での分布に偏りがあります。第一のタイプと第二のタイプは裏側に、マスコン盆地は表側に分布します。従って、盆地が形成された40-35億年前頃の月内部は表側が高温で、裏側が低温だったことが分かります。このことは月の表側と裏側の二分性が表面だけではなく、内部にまで及んでいることを意味します。また、表側と裏側の温度の違いは月の進化に大きな影響を与えたはずで



(C) JAXA/SELENE

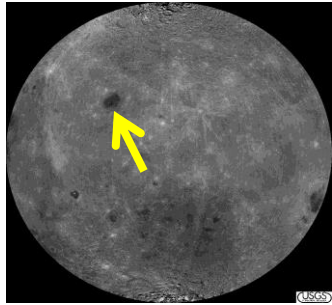
三つのタイプの盆地の分布。左は月の表側を北東から見下ろした図、右は裏側を南西から見上げた図  
 (処理・解析：九州大学、国立天文台)



# 月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の地形カメラによる月の裏側の マグマ噴出活動の長期継続



## Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera



月の裏側。矢印の先  
がモスクワの海  
<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/Clementine/images/albedo.far.jpeg>

・かぐや搭載の月の表面で10m分解能をもつ地形カメラによって得られた画像データをもとに、クレータ年代学手法※1により、これまで十分な研究がなされていなかった月の裏側の海(モスクワの海など)の形成年代を調べました。

**知見** この結果、モスクワの海の一部領域など25億年前に形成された領域がいくつか見いだされ、裏側においても海を形成するような内部活動が、少なくとも25億年前まで継続していたことを、今回の論文で初めて明らかにした。

※1 表面のクレータの個数密度からその場所の形成年代を推定する手法。クレータの個数密度が高いほど、その場所は古いとするもの。

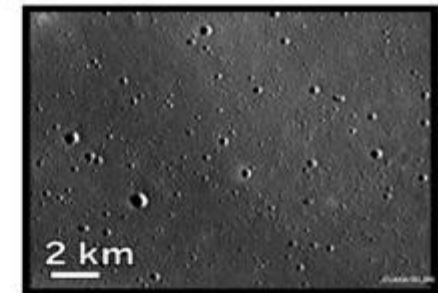
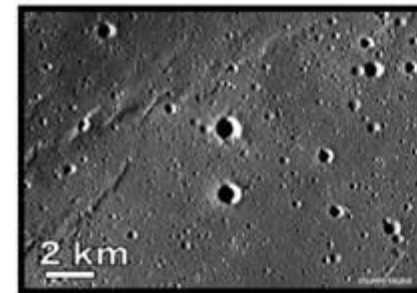
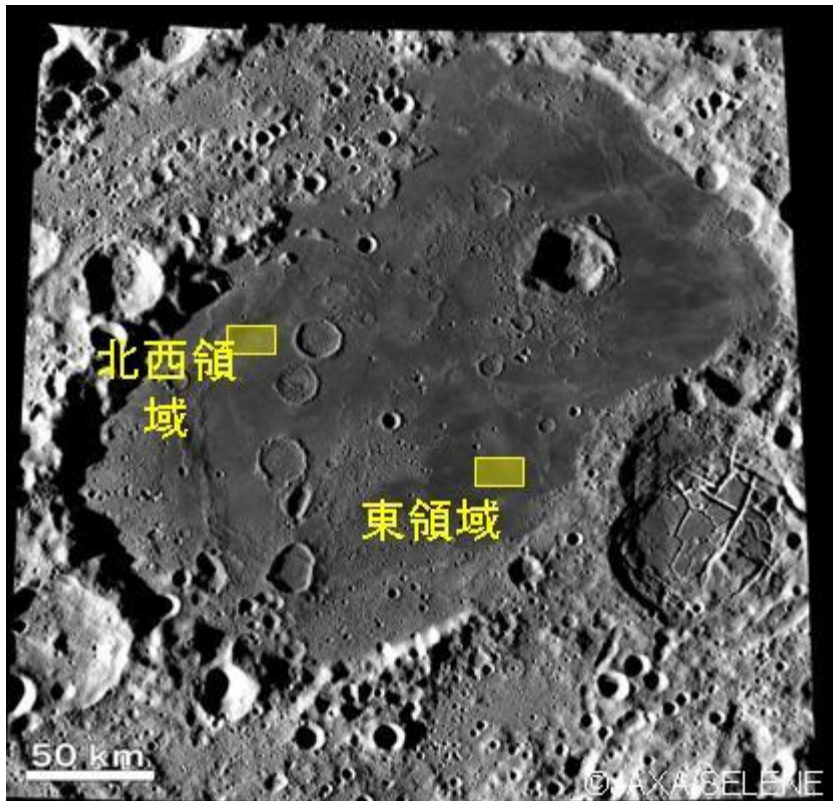


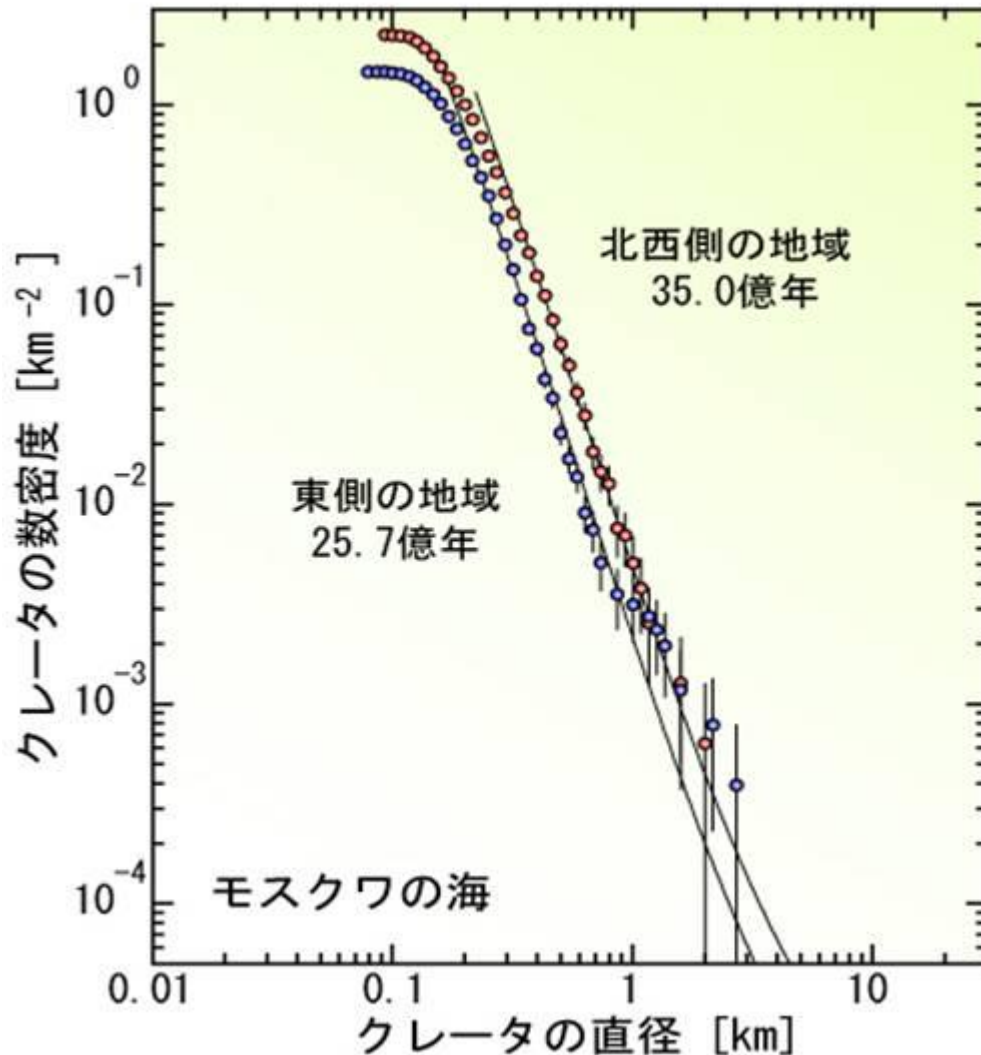
図2 図1の拡大画像(左が北西の領域、右が東の領域)



# 地形カメラによる月の裏側の海の年代推定

## 今回のクレータ個数密度計測結果

### —モスクワの海—



(C)JAXA/SELENE

- これまでの月の裏側の画像データでは、直径数100m程度のクレータについては、正確な直径や個数密度を調べるのが、十分に出来なかった。

- しかし、より高分解能な「かぐや」の地形カメラによって、直径200~300m以上の小さなクレータが正確に把握できるようになった。

- これまでの観測データから30数億年前に形成されたと考えられていたモスクワの海では、東側の地域(前のページの東領域)で、クレータの個数密度が小さいことから、更に若く約25億年前に形成されたということが推定された。

# 論文著者一覧

## 1) Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon

小野高幸\*1、熊本篤志\*1、中川広務\*1、山口靖\*2、押上祥子\*2、山路敦\*3、小林敬生\*4、笠原禎也\*5、大家寛\*6  
\*1 東北大学、\*2 名古屋大学、\*3 京都大学、\*4 韓国地質資源研究院、\*5 金沢大学、\*6 福井工業大学

## 2) Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)

並木則行\*1、岩田隆浩\*2、松本晃治\*3、花田英夫\*3、野田寛大\*3、Sander Goossens\*3、小川美奈\*2、河野宣之\*3、浅利一善\*3、鶴田誠逸\*3、石原吉明\*3、劉慶会\*3、菊池冬彦\*3、石川利明\*3、青島千晶\*4、黒澤耕介\*5、杉田精司\*5、高野忠\*2  
\*1 九州大学、\*2 宇宙航空研究開発機構、\*3 国立天文台、\*4 富士通、\*5 東京大学

## 3) Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry

荒木博志\*1、田澤誠一\*1、野田寛大\*1、石原吉明\*1、S. Goossens\*1、佐々木晶\*1、河野宣之\*1、神谷泉\*2、大嶽久志\*3、J. Oberst\*4、C. Shum\*5  
\*1 国立天文台、\*2 国土地理院、\*3 宇宙航空研究開発機構、\*4 ドイツ航空宇宙研究所、\*5 オハイオ州立大学

## 4) Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera

春山純一\*1、大竹真紀子\*1、諸田智克\*1、本田親寿\*1、横田康弘\*1、安部正真\*1、松永恒雄\*2、小川佳子\*2、宮本英昭\*3、岩崎晃\*3、佐伯和人\*4、山路敦\*5、浅田智朗\*6、出村裕英\*6、平田成\*6、寺藺淳也\*6、鳥居雅也\*7、C.M. Pieters\*8、J-L. Josset\*9  
\*1 宇宙航空研究開発機構、\*2 国立環境研究所、\*3 東京大学、\*4 大阪大学、\*5 京都大学、\*6 会津大学、\*7 富士通、\*8 ブラウン大学、\*9 スイス宇宙研究所