



Title	3.2.1 地殻構造と組成
Author(s)	長岡, 央; 大竹, 真紀子
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 59-64
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/83234">https://doi.org/10.18910/83234</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 3.2 「かぐや」等探査機観測による知見

### 3.2.1 地殻構造と組成 [長岡央, 大竹真紀子]

(a) 「かぐや」の可視・近赤外分光観測データに対する解析から、高地地殻表層にある比較的小型で新しいクレーターでは、斜長石と共存する少量の苦鉄質ケイ酸塩鉱物は高 Ca 輝石が支配的であることが報告された (Ogawa et al. 2011). 一方、従来の月試料の分析からは高地地殻物質には高 Ca 輝石よりも低 Ca 輝石の方が多く含まれると考えられており、今回の観測事実とは矛盾している。また月試料の分析からの推定値に比べて前述の観測データの方が苦鉄質ケイ酸塩鉱物の量が多い結果となっている。この研究で解析した小型(直径 30 km 以内)のクレーターが掘削したのは地殻の比較的浅い領域(3 km 程度)であると推定される。今回の解析結果が月地殻の浅い領域を代表していると考えられるならば、マグマオーシャンの固化が進み斜長石の固化・浮上・集積が起こり始めた初期に形成した高地地殻の最上部は、地殻のより深い領域に比べて苦鉄質ケイ酸塩鉱物に富み、かつ苦鉄質ケイ酸塩としては高 Ca 輝石に富んでいる可能性がある。すなわち地殻最上部では斜長石の浮上により上部地殻が押されて斜長石結晶粒子間からマグマが抜ける効果が相対的に弱い。またマグマの組成の違いから高 Ca 輝石に富んでいたと推測

される。このデータの解釈としてはこの他にも、観測された高 Ca 輝石は高地地殻がマグマオーシャンから形成した時に固化したのではなく、その後、今回観測された小型のクレーターが形成する時に衝突に伴って温度が上昇し、地殻物質が再溶融・固化して形成した二次的なものである可能性もある。高 Ca 輝石が初期地殻の構成物であった場合には、従来このような初期地殻の組成に関する観測結果が報告された例はなく、これが本当であればマグマオーシャンからの地殻固化過程の初期を知る情報である。

(b) 「かぐや」の可視・近赤外分光観測データから、月の原始地殻である高地地域の比較的新しいクレーターの中央丘と盆地のリング上には全てに普遍的に非常に純粋な斜長岩(含まれる苦鉄質ケイ酸塩鉱物の量が非常に低く、2, 3 %程度以下。このような斜長岩を Purest Anorthosite (PAN)と名付けた)が存在することがわかった (Ohtake et al. 2009)。従来、月試料の分析値から月高地の斜長岩には 10~20 %の苦鉄質ケイ酸塩鉱物が含まれると考えられていたのに対し、「かぐや」で普遍的に見つかった PAN は含まれる苦鉄質ケイ酸塩鉱物が非常に少ない。またクレーター中央丘や盆地のリングがクレーターや盆地形成以前に地殻のどの深さに存在していたのかをクレーターおよび盆地の直径から推定すると、PAN が見られたのは地殻中の約 3~30 km の深さに対応している。このことは、月の高地地殻の組成が従来考えられていたよりも苦鉄質ケイ酸塩鉱物に乏しい厚い(30 km 程度の)層からなる可能性を示している。このような純粋で組成の均質な斜長岩を何十 km の厚さで大量に形成するには、非常に大規模なマグマが存在する必要がある、マグマオーシャンが存在していたことの最も直接的な証拠と言える。その後、このような純粋な斜長岩の存在は「かぐや」の分光データを使ってより全球的に解析した研究 (Yamamoto et al. 2012) や、「チャンドラヤーン 1 号」による観測データを用いた研究でも確認されており、これらのことは従来の高地地殻の組成推定値に修正が必要であることを示唆するとともに、従来地殻形成(マグマオーシャンの固化)過程として苦鉄質ケイ酸塩鉱物が 10~20 %程度含まれるとされていた地殻形成モデル(マグマオーシャン固化モデル)の変更が必要であることを示す。これら「かぐや」で得られた地殻物質の組成情報は、(1)で紹介した苦鉄質ケイ酸塩鉱物に比較的富む層が表層(~3 km)に存在し、その下により純粋な斜長岩で構成された層が存在することを示唆している。地殻の組成や形成過程に変更を加えることは、すなわちマグマオーシャンの初期組成の変更を意味し、またその後の固化過程の結果である月内部構造・組成にも影響する。

(c) 「かぐや」の可視・近赤外分光観測データから、月高地地殻にごく少量含まれる苦鉄質ケイ酸塩中に含まれるマグネシウムと鉄のモル比 ( $Mg/(Mg+Fe) \times 100$  を求めたもので、Mg#と呼ばれる)が表と裏で異なり、裏の方が Mg#が高く(マグネシウムが鉄に比べて多く含まれ)、かつこの値が裏から表側地殻にかけて連続的に低い方へ変化していることがわかった (Ohtake et al. 2012; 図 3-4)。この観測事実は、従来言われていた地形(標高)や地殻厚、溶岩流の噴出面積、液相濃集元素の濃度など月の二分性に加えて、高地地殻の化学組成にも表と裏に違いがある、二分性があることを示した最初の例である。また裏側の北半球のディリクレ・ジャクソン盆地周辺で最も Mg#は高く、最高で

80 程度である。従来の月帰還試料の分析によると、月の原始地殻である高地地殻を構成する斜長岩は Mg# が 50~70 程度であると考えられており、これは地球の斜長岩に比べて低いことから、月の地殻は鉄に富んだ斜長岩で構成され则认为られてきた。ただし、数は少ないが月隕石には Mg# が 70 を超えて 80 程度になる斜長岩の存在が報告されており (Takeda et al. 2006), そのような、よりマグネシウムに富んだ地殻の存在が示唆されている。マグマから斜長岩が形成する時、より先に固化した斜長岩は Mg# が高く、相対的に後に固化するほど Mg# が低くなる性質を持つことから、この観測結果(裏で Mg# が高く、裏から表にかけて連続的に低くなる傾向)は、月裏側は表側に比べてより先に固化した地殻(原始的な地殻)から成ることを示す。このような地殻の形成順序となっている原因は現在も解明されていないが、少なくとも、従来のような月中心から同心円状に均一にマグマオーシャンが固化し結晶が集積していくようなモデルではこの観測事実を説明できず、水平方向(表裏方向)に不均一な固化(地殻形成)過程が起こっていた可能性を示唆している。これまでに不均一な固化過程も提案されており(地球が存在することで月表側の表面温度が 2,3K 程度高くなるため、マグマオーシャンの中で表と裏という大規模な対流が起こるとする説など), 今回の観測結果を受けて今後、これら不均一なマグマオーシャン固化モデルの検証を行うことが必要となっている。一方、従来の月帰還試料に比べて今回観測された Mg# がより高い値を持つことは、一部の月隕石で高い Mg# の斜長岩の存在が報告されている事実と合わせると、月の高地地殻の Mg# は地殻形成の初期には従来 70 程度と考えられていた値よりも高く、80 程度であり、より地球に近い組成を持っていたことが考えられる。地殻の Mg# が高いことはすなわちマグマオーシャンの Mg# がより高いことを意味しており、この成果もマグマオーシャンの初期組成に修正を与えるとともに、マグマオーシャンの固化過程の不均一性を示唆する結果である。

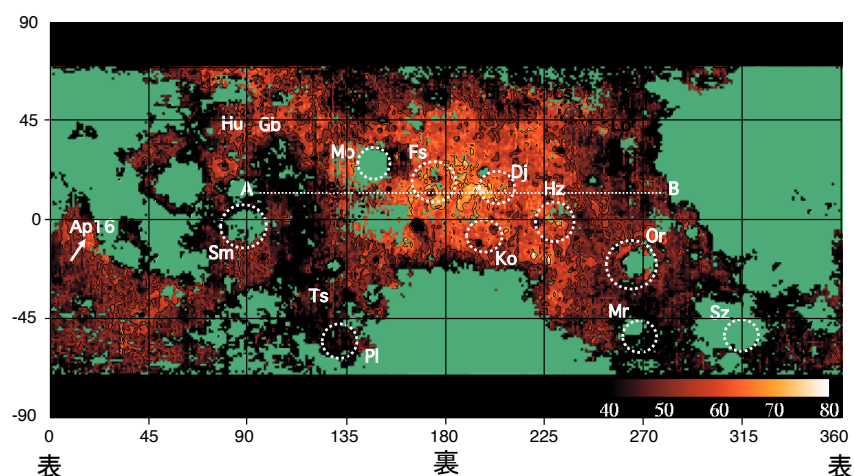


図 3-4 月斜長岩の Mg# マップ (Ohtake et al. 2012) より改編。この図は月の裏側が中心に描かれている。

(d) 「かぐや」のガンマ線分光観測データからは、液相濃集元素であるトリウムの量が月高地地殻の中では裏側北半球の領域 (Zone A, Zone B) で最も低いことがわかった (Kobayashi et al. 2012; 図 3-5). 一方, 「かぐや」を始め近年の月探査機による重力場観測により地殻の相対厚さが得られており, それによると月の表より裏側では 20 km 程度厚いと推定される(地殻厚の表と裏の二分性). ただし, これは重力場データから月面上で地殻が最も薄いと考えられる *Moscoviense* 盆地における地殻の厚さをゼロと仮定した場合の相対値であり, 実際の厚さ(絶対値)の提唱値は研究者により 2 倍もの開きがあり, よくわかっていない. さらに, 両者の絶対値はともかくとして, 「かぐや」で観測した高地地殻のトリウム濃度と地殻厚の間には相関があり, 地殻が厚い地域でトリウムの濃度が低く(裏側高地), 地殻が薄くなるにつれてトリウムの濃度が上昇する(表側高地). トリウムは液相濃集元素であるため, マグマの固化が進むほどトリウムの濃度は高くなる. このトリウムの濃度分布と地殻厚との関係性は, 従来一部の研究者から提案されていたような, *Imbrium Basin* 形成による放出物の堆積(高地地域のトリウムの濃度分布はマグマオーシャンの固化過程を反映したものではなく, 表側への巨大な天体衝突に伴う放出物の堆積により, 同衝突で形成した盆地からの距離に比例してトリウムの濃度が減少するとする説 (Haskin 1998; Lawrence et al. 1998) では説明がつかないことも示された. そのため「かぐや」によって得られた本成果は, 月の裏側の方が表に比べてより先に固化した地殻であり, その固化過程に伴って地殻の厚さも変化していることを示唆する. その原因として, 例えば地殻が裏側から水平方向へ成長すると同時に厚さ方向へも成長し, それに応じてトリウムの濃度が変化して, 現在表と裏で観測されるようなトリウムの濃度分布をもつに至ったと考えることができる. ただしこのようなことが実際に起こったのかについては今後の検証が必要である. このトリウムの濃度分布で得られた結果は, 前述の可視・近赤外分光データから得られた *Mg#*による結果(月裏側で高地の *Mg#* が高く, 表側に向けて連続的に低下)と調和的であり, 両方とも月の裏側地殻の方が表と比べ, より未分化(より先に固化した)地殻であることを示唆する.

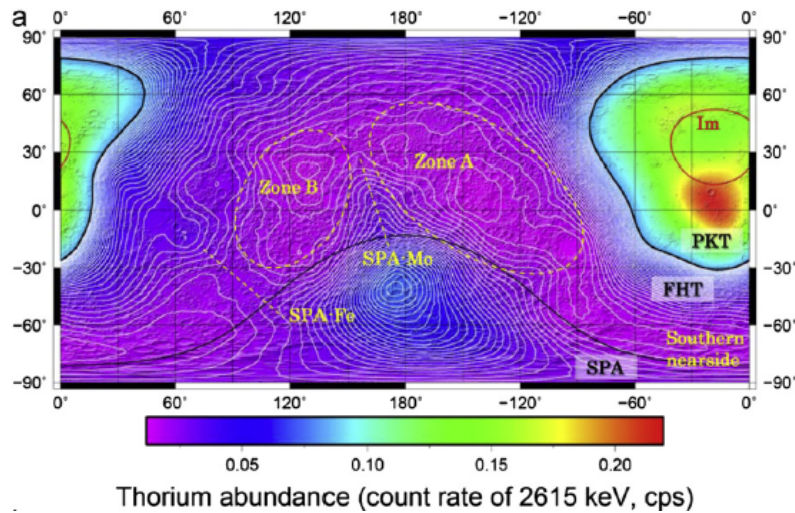


図 3-5 月面のトリウムマップ (Kobayashi et al. (2012)より). カラーバーは観測されたトリウムのガンマ線の計数率 (cps = count per second)を示し、等高線は同じ地殻厚であることを示す。

(e) 前述のトリウムの濃度分布と近年の月探査機によって得られた地殻厚とを比較することによって、トリウムの濃度が低い領域では Kobayashi et al. (2012) で言われるように確かに相対的に地殻厚は厚いものの、定量的に見るとトリウムの濃度がほぼ同程度に低いにも関わらず地殻厚の差異はトリウムの濃度の差異の何倍もある領域があり、単純なトリウムの濃度と地殻厚の(反)比例関係にはないことがわかった (Yamamoto et al. 2016). この原因として地殻形成過程に 2 つのステージがあり、最初のステージで薄い地殻が複数個の核となる領域から主に水平方向に成長し、ある段階でこの薄い地殻が月面を覆う、2 番目のステージで今度は地殻が主に厚さ方向に成長する、という過程を想定することで説明可能とされた. これら得られた観測事実を説明する地殻の成長過程を明らかにするとこは、マグマオーシャンの固化過程を明らかにすることにつながり、重要である. ただし、提案されたような地殻成長が実際に起こったのかどうか、今後の検証が必要である.

(f) 現在、地形として確認できる月面最大の盆地は SPA 盆地であるが、地形として明確には残っていないものの、月面の化学組成など情報から、それよりも大きな Procellarum 盆地が月表側に存在するという説が古くから提唱されて来た (Whitaker 1981; Feldman et al. 2002). ただし、これまではそれを確認する決定的な証拠は見つかっておらず、この説は広く受け入れられるには至っていなかった. この問題に対し、「かぐや」の可視・近赤外分光観測データから、従来提案されてきた Procellarum 盆地の周囲に、低 Ca 輝石を主成分とする岩石が特に多数分布することがわかった (Nakamura et al. 2012). 今回の解析では輝石の吸収強度の強いスペクトルを選択的に抽出した結果であるため、該当の低 Ca 輝石が観測された領域は高地地殻だとは考えづらい. したがって、観測された低

Ca 輝石は Procellarum 盆地の形成により掘削・放出された物質が溶融・再固化して同盆地の周囲に堆積したものであると解釈される。また、このような巨大な盆地が本当に形成されていたならば、その形成時期はマグマオーシャンの固化が終わる前であった可能性が高く、その形成にともなって地殻が大きく掘削・放出されて裏側に堆積して厚い地殻を作る。また地殻だけでなくその下に存在したはずの液相濃集元素の濃集層(盆地形成当時まだ完全に固化していなかった可能性がある)が月の表側に濃集した可能性もあるなど、さまざまな影響を与えたはずである。これら影響によって現在観測される月の二分性が形成したのではないかと、との提案がされている。このような巨大な盆地がマグマオーシャンの固化終了前に形成したならば、それは間違いなく同固化過程に大きな影響を与えたはずであり、巨大盆地の形成を示す他の証拠を得ることや、この盆地がいつ形成したのかを知ることが重要である。

まとめ：

ここで紹介した研究成果はいずれも、マグマオーシャンの固化過程は「かぐや」以前までのような、均一な月中心からの同心円モデル(シンプルな固化モデル)では説明が付かないことを示唆している。また、これら成果は、これまでに我々が入手・分析していた試料は月のごく一部であり、月の組成、特にマグマオーシャンの組成は我々が推定していたものと異なっていることを示すものである。またこれら成果は、これら課題を解決するためにはどこでどのような探査を行うべきかの指針を与えている。今後の探査においては、このような観点で新しい観測、研究を行うことにより、新しいモデルの構築や検証を行うことが必要となる。