



Title	1.4.2 全球マッピングが明らかにした月
Author(s)	山下, 直之; 長岡, 央
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 8-13
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/83225">https://doi.org/10.18910/83225</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

#### 1.4.2 全球マッピングが明らかにした月 [山下直之, 長岡央]

「かぐや」に搭載された科学観測装置は打ち上げ時点において月探査史上最高精度を誇り、それらによる大規模な月観測の結果、従来の表層組成(元素組成・鉱物組成)への理解を一新するような科学的発見が多く報告されてきた。ここでは各章で紹介する成果を簡単に俯瞰する。

##### (a) 月の全岩元素組成に繋がる表層組成の理解

月の全岩元素組成(バルク組成)は、月の起源物質とその後の物質進化の過程を制約する上で最も重要な情報の一つである。「かぐや」以前における月科学においても、数値計算や、周回機による探査データと月試料(月隕石及びアポロ、ルナミッションで持ち帰られた月岩石)データを基にバルク組成の推定が行われてきた。バルク組成の十分な理解には、表層に存在する物質の分布とその起源への理解が不可欠である。月表層の物質分布を知るために、全球マッピングにより元素・鉱物分布を高精度で取得する必要がある。例えば、難揮発性元素の一つであるトリウム(Th)の月全量の推定値は、各文献により地球の等倍から2倍程度と開きがあった。月裏側の大部分を占める高地では、トリウムが非常に枯渇しているため、ルナ・プロスペクターによる低分解能観測では高精度な定量観測ができず、バルク組成推定を困難にしていたのが「かぐや」以前の問題点である。「かぐや」観測はこのような問題点を大きく改善することに成功した(Jolliff et al. 2000; Warren 2005; Taylor et al. 2006; Yamashita et al. 2010)。

##### <天然放射性元素の全球分布>

「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計は、月探査で初めて半導体検出器である高純度ゲルマニウム(Ge)結晶を用い、過去に実施された観測と比べ20倍以上高いエネルギー分解能を持つ。その結果、天然放射性元素であるカリウム(K)、トリウム、ウラン(U)について、それら元素由来のガンマ線を単独で同定することに成功した。トリウムは宇宙化学の観点から、その高い凝縮温度のため難揮発性元素に分類される。したがって、月に取り込まれたトリウム量は熱での散逸は少なく、月を形成した初期物質の情報を保持している。またこれらの元素はその化学的挙動から、液相濃集元素に分類され、マグマ内での特徴的な挙動からマグマの結晶固化過程を追跡するためのトレーサとしての役割をもつ。また、これら元素は放射性であるため、惑星内での熱源とし

てその後の火成活動に影響を与えたことから、その存在量と分布は月の熱史を理解する上で非常に重要な情報である。

特に「かぐや」では、カリウム、トリウム、ウランの存在量がもともと少なく高精度な観測が難しかった高地領域において、これら3元素の分布の違いを明らかにすることに成功し、月の形成過程にあらたな制約を加えることができた。成果の詳細は、2章3章にて詳しく紹介する (Kobayashi et al. 2010, 2012; Yamashita et al. 2010)。

#### <主要元素の分布>

月を構成する岩石は、主にケイ酸塩鉱物であるカンラン石、輝石、長石に加え、鉄とチタンの酸化物であるチタン鉄鉱(イルメナイト)を含むところが他の天体と比較して特長的な点である。特に月の海とよばれる領域で、このイルメナイトの含有量が非常に大きく変動することが、過去の探査結果や回収試料から明らかにされてきた。特にチタンは主要元素の中では液相濃集性が高く、固化の最後のほうで鉱物に取り込まれる。

月の海はマントルが部分熔融してできたマグマが、表層に噴出したことでできた領域である。したがって海における元素分布の不均質性は、起源となるマントルの化学的不均質性を反映していると解釈できる。「かぐや」の分光カメラにより、鉄(Fe)とチタン(Ti)の存在量が、ガンマ線分光計によりカルシウム(Ca)の存在量が明らかとなった。特にカルシウムの存在量を高精度で取得したのは、「かぐや」が世界初である。海領域でみられるこれらの元素量の変動は、マントルの不均質性やその構造を推定する鍵となる (Otake et al. 2012; Yamashita et al. 2012)。

#### (b) マグマオーシャンに関わる発見

従来の月試料分析により提唱されたマグマオーシャン仮説では、最初に晶出するカンラン石がマグマよりも密度が大きいため深部に沈み、次に晶出する輝石も同様に沈むことでマントルを形成する。そして、液体状の残りのマグマ(メルト)の組成が鉄に富んできた時点でメルトより密度の小さい斜長石が晶出し始め、それらが浮上する際に一部の苦鉄質鉱物(カンラン石、輝石)をトラップし、斜長岩質な地殻を形成したと考えられてきた。その時形成される斜長岩質な地殻は、Ferroan anorthosite (FAN; 苦鉄質鉱物が高い鉄/マグネシウム量比(後述の Mg#)をもつ)と呼ばれ、全表層を一様に覆っていたものと考えられてきた。

一方で、月隕石研究の進展により斜長岩質な月隕石の中には、FAN よりも明らかに鉄量に比べマグネシウム量の高いものが報告されている。このような月隕石の存在から、従来の FAN のみを形成するマグマオーシャンモデルでは、月の様々な場所から飛来(ランダムサンプリング)しているはずの月隕石の化学組成を説明できない問題点が指摘されるようになった。「かぐや」の観測では、まさにこの従来のマグマオーシャンモデルの見方を変える様々な科学的成果が全球的に発見された。

#### < 純粋斜長岩の発見 >

従来のマグマオーシャンモデルに大きな変革を与えた「かぐや」成果の一つが、純粋斜長岩(Purest anorthosite, PAN)の全球的な観測である。これはアポロで回収された FAN の分析結果をもとに構築されたマグマオーシャンモデルでは考慮されていない、斜長岩地殻の新組成である。この発見により、月の地殻構造とその形成過程への理解に大きな変革をもたらし、従来の単純なマグマオーシャンモデルの修正を提起した。さらに純粋斜長岩の発見とその全球分布の解明は、物質科学やマグマオーシャンの数値計算モデルの今後研究プロセスへも強い影響を与えた (Ohtake et al. 2009; Yamamoto et al. 2012; Nagaoka et al. 2014).

#### < 高地領域のマグネシウムナンバー分布とトリウム分布および地殻厚の関係 >

「かぐや」の高精度観測により、従来の観測では判別できなかった月高地の表側と裏側の化学的特長の違いが報告された。従来月の裏側と表側の違い(月の二分性)については多くの指摘がされていたものの、化学組成の観点から定量的に月の裏側高地と表側高地の差を明らかにし、月の形成過程に言及できたことは、「かぐや」の大きな成果の一つといえよう。

その中の一つが月高地でのマグネシウムナンバー(Mg#)の違いである。メルトから鉱物が結晶化する際、元素毎の化学的特長の違いから、初期にはマグネシウムが優先的に鉱物へ取り込まれ、後期になるほど鉄の割合が増加する。マグネシウムと鉄の含有量のモル比を表す指標であるマグネシウムナンバー( $Mg\# = \text{molar } 100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ )は、マグマからどのような時系列で鉱物が結晶化したかを示す。「かぐや」に搭載された連続スペクトル分光計の観測データから、高地領域のマグネシウムナンバー分布の推定に初めて成功した。その結果、月の裏側高地は表側高地と比較してマグネシウムナンバーが高いことが明らかとなった。これは月高地が一様に結晶化したのではなく、月裏側高地が最初期に形成し、その後裏側から表側にかけて地殻が形成されたことを示唆している。

裏側と表側にみられるこのような傾向は、トリウム分布からも観測することができた。トリウムは液相濃集性の高い元素なので、マグマ分化の後期になるほど取り込まれた量は増加する。「かぐや」で観測したトリウム量と地殻厚の関係から、月の裏側から表側にかけてトリウム量は増加し地殻厚が減少することがわかった。これらの新たな観測事実は従来の一様な FAN 地殻の形成モデルの再考を促した (Kobayashi et al. 2012; Ohtake et al. 2012).

#### (c) マントル・地殻の構造と元素組成、鉱物組成

分離したマントルと地殻の体積規模やその組成を決めることは、マグマオーシャンの固化過程やその規模を決める上で重要である。「かぐや」以前の構造探査においては、地震波を用いたマントル・地殻構造の深さ推定や重力場による密度の推定などが

行われてきた。また、大きな衝突盆地に着目し、そこからの噴出物分布と組成、その起源深度から、地殻組成について深さ方向分布の推定がなされてきた。一方「かぐや」では、衝突クレーター形成により地殻深部まで掘削された物質の分布を高空間分解能で観測することにより、純粋斜長岩やカンラン石岩体などといった新たな地質情報を得ることに成功した。

#### <純粋斜長岩層の構造>

先に紹介した純粋斜長岩は、比較的大きな衝突クレーター(直径が 100 km 以上)の中央丘において普遍的に分布することが「かぐや」によりわかった。このことから純粋斜長岩の大規模な岩層が地殻のある深さに全球的に存在している可能性が示唆された。この成果は従来の地殻構造モデルを大きく変革することになり、その結果月バルク組成の見積もりも大きく変わる可能性を秘めている (Ohtake et al. 2009; Yamamoto et al. 2012)。

#### <マントル由来のカンラン石の発見>

「かぐや」により得られた連続分光スペクトルの解析結果から、大きな衝突盆地の周辺にカンラン石が大部分を占める岩体が発見された。スペクトルから予想されるカンラン石含有量は、地殻物質とは対応しておらず、その産状からも、より深くに存在するマントル物質を掘り返したものである可能性が高い。我々はまだ月マントルの直接的証拠を手にしていないこともあり、これらカンラン石岩体の起源特定が望まれる発見である (Yamamoto et al. 2010)。

#### (d) 内部構造・磁場

地殻やマントルといった内部構造の情報は、月バルク組成を決定する上で必須の情報である。重力場や磁場による内部構造の探査では、表層で観測できる元素や鉱物分布よりも深い領域の物理情報を得ることができ、月内部の構造や組成を制約する重要な情報を提供する。

#### <火成活動の変遷>

「かぐや」搭載の高分解能地形カメラ画像を用いたクレーター年代学により、月表側で起きた火成活動の歴史が明らかとなった。特に重要な発見としては、最も若い玄武岩の噴出は約 15 億年前であることが挙げられる。このような固化年代をもつ月試料はまだ発見されておらず、「かぐや」の全表層にわたる高分解能観測により初めて明らかになった。特に若い玄武岩は熱源元素が多く濃集する PKT(月表側の雨の海と嵐の大洋周辺を指す)領域に噴出していることがわかった。これは若い玄武岩の噴出に熱源として天然放射性元素が関わっていた可能性を示唆しており、月内部における KREEP 層(月マグマオーシャンの最終残液層)とマントル層との関係性を制約する重要な発見である (Morota et al. 2011a)。

#### <月の磁場観測と磁極変動の痕跡発見>

「かぐや」に搭載された磁力計及び過去の探査データを用いることで、大昔の月には地球と同じように大規模な磁場が存在していたこと、そのころの月の磁極は極と月裏側中低緯度付近の二箇所に集中していたこと、が明らかとなった。この結果から、月の磁場がコア(中心核)のダイナモ作用によりつくられていたこと、過去の自転軸が今とは大きくずれた位置にあったことがわかり、これらの発見は、月の起源と進化を理解する上で重要な成果である (Takahashi et al. 2014).

#### <マントル最下部の描像>

数値計算結果と「かぐや」の重力場データを比較することで、月マントル最下部には潮汐加熱により熱せられ、軟らかくなった層が今も存在していることを突き止めた。この成果は月深部の構造推定に強い制約を与えることができる (Harada et al. 2014).

#### (e) 磁気圏・大気

月にはナトリウムやカリウムなどの揮発性元素を含む非常に薄い(地上で人工的に達成可能な真空度よりも薄い)大気の層が存在することが地上観測から示唆されている。この薄い大気は月表面物質を起源としていと考えられているが、その詳細はまだ解明されていない。「かぐや」では、月表層・周辺の電子やイオンを観測することで月表層や大気環境等の情報を詳細に調査した。

#### <月に到達していた地球の酸素>

「かぐや」観測により、月が地球の磁気圏尾部にあるプラズマシート内に入っている期間に月周辺の酸素イオン濃度が増加することがわかった。これは地球由来の酸素が月まで到達している証拠であると解釈できる (Terada et al. 2017).

#### (f) 資源

資源という観点から注目されている元素として、希土類元素(レアアース)が挙げられる。これらの元素の中には、磁石に用いられるネオジムやレーザーに用いられるイットリウム等が含まれ、現代産業を支える重要な資源にも関わらず、地球上での産出は限られ、日本の輸入は中国にほぼ頼っているのが現状である。アポロで持ち帰られた KREEP と呼ばれる物質は希土類元素に非常に富んだ物質で、このような液相濃集元素が最後まで結晶に取り込まれずに溶け残った結果できた産物である。希土類元素の分布は、化学的挙動が近いカリウムやトリウム、ウランのガンマ線観測から得ることができる。特に月の表側に広がる PKT では、これら希土類元素が濃集している可能性がある。

もう一つの資源として期待されているのが揮発性物質(水、ヘリウム 3 等)である。

「かぐや」の観測では現在までに、表面探査による直接的な水の存在証拠は得られていない。しかし、「かぐや」以降のインドのチャンドラヤーン 1 号による分光観測やアメリカのルナ・リコネッサンス・オービターによる中性子分光観測の結果などで水の存在が示唆され、今後の月探査では極域の揮発性元素をどのように利用するかが鍵

の一つとなる。特に極域にその存在が示唆されている水は、電気分解により水素と酸素に分解し、月往還機の帰りの燃料や深宇宙探査機の燃料として利用できる点が注目されている。また、月面での新たなエネルギー源として特に中国や韓国は、ヘリウム3に重点をおき、その確保と利用を強く押し進めている。ヘリウム3は地球上では極微量しか存在し得ないが、永きにわたる太陽風からの照射が見込まれる月面では地球よりも高い存在量が見込まれるため、将来の宇宙探査における資源として注目されている。水素やヘリウム3は、揮発性が非常に高いので、低温の極域に濃集している可能性が高い。またチタンによる捕獲にともない、チタン量の多い海領域で濃集している可能性があることも示唆されている。今後は物質科学の観点から、これら元素とチタンとの関係を明らかにすることが必要となるだろう (Pieters et al. 2009; Sanin et al. 2017).