

特集「かぐや」が見た新“月世界” 月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計で 探る月表層の元素分布

唐牛 譲¹，柴村 英道²，小林 正規³，奥平 修¹，山下 直之¹，
小林 進悟¹，晴山 慎¹，長谷部 信行¹

(要旨) 日本初の大型月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計(GRS)は、これまでの月探査に比べて高いエネルギー分解能を有する。「かぐや」搭載GRSの最初の2ヶ月間の観測により、O, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Th およびU 由来のガンマ線を検出することができた。これらの元素のうちThを中心にして、最も簡便な解析方法の一つであるバンド解析法で得られた、空間分解能 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の月面ガンマ線強度の全球分布地図について紹介する。

1. はじめに

月は地球から最も身近な天体であり、唯一人類が訪れ、地質調査が行なわれた地球外の日体である。月は地球に比べて天体サイズが小さいために、火成活動が形成初期に終息したと考えられている。実際、アポロ計画で得られた試料の放射性年代値からも太陽系の年齢と同程度の45億年に近い値が複数得られている[e.g. 1]。従って、月は生成初期の情報を非常に多く保存しており、月の形成過程を明らかにすることで固体惑星の初期形成過程を解明する糸口になると期待されている。

1969年からはじまったアポロ(米国)やルナ(旧ソ連)の着陸船による月探査によって、約382kgの岩石が地球に持ち帰られた。詳細な物質科学的研究が行われた結果、多くの情報が得られるとともに、固体惑星一般の進化に関する理解は理解は大幅に進展したと言える[e.g. 1]。しかしながら、これらの探査機が着陸・調査した地域は、月の表側の赤道付近に限られていた[2]。これに対して、クレメンタイン[3]やルナプロスペクタ[4]による遠隔探査では、月極軌道を周回することで全球観測が実施された。この結果、アポロやルナの試料は月表側の直径1500kmの雨の海(Mare Imbrium)

を形成した巨大衝突で放出されたKREEP物質に富む地域から採集されたことが明らかになってきた[e.g. 5]。KREEP 物質とは、液相濃集元素(マグマが冷えて結晶を晶出していく過程で結晶中には取り込まれず液相中に濃集する元素群の総称で、Thは代表的である。)であるK, REE(希土類元素), Pに富む岩石という意味で、月のマグマオーシャン過程の固結末期の液相に選択的にこれらの元素が濃集して生成したと考えられている物質である。一方、1970年代以降、南極や砂漠から数多く発見されるようになった月隕石は、化学組成や鉱物組成の多様性から、月面での隕石の衝突によって無作為に宇宙空間に放出されたと考えられている[6]。そのため月隕石の中には探査機により直接サンプリングされていない裏側起源のものも存在すると考えられている[e.g. 7]。ここ数年の月隕石の研究によって、アポロ・ルナ試料からはわからなかった月地殻の形成史について、新しい事実が明らかになるとうしている。非常に偏った化学組成を持つ地域由来のアポロ試料に基づいて推定されてきたこれまでの月の起源や進化論は見直すべき時に来ている。そのような観点からも、新たに月の起源と進化の謎に迫る目的で打ち上げられた月探査衛星「かぐや」の意義は大きい。

「かぐや」に搭載された14種類の科学観測機器のうち、我々のグループはガンマ線分光計(GRS)を担当している[8]。ガンマ線を測定することにより月面の元素分布を調べ、月地殻の形成過程や月の起源の謎に迫ろうと

1. 早稲田大学
2. 埼玉県大
3. 日本医科大

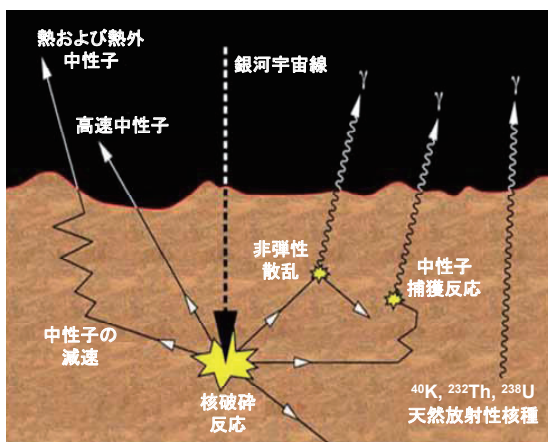


図1: 月表層におけるガンマ線の発生機構の模式図。

している。本稿ではガンマ線分光法を用いた月面の元素分布を調べる方法、および12月21日から2月17日までの観測データを基にした初期観測結果を紹介する。

2. 月表面から発生するガンマ線

月表層の元素組成分布は、月の起源と進化を解明する上で最も重要な情報のひとつである。月面の主要元素および天然放射性元素組成の分布を決定することにより、月地殻の形成過程や地殻が形成したときの環境および地殻形成後の熱的活動の状況を推定することができる。さらには月全体の化学組成に制約を与えることができる。

ガンマ線分光法を月探査に用いることにより、月表層の多数の元素について組成を調べることができる。

月表面は地球と異なり大気が無く、固有磁場も極めて弱いために、常時、銀河宇宙線に曝されている。銀河宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの荷電粒子であり、その成分の9割近くを陽子が占める。銀河宇宙線は月面に毎秒1個/cm²程度入射し、月面物質の原子核と衝突して多数の中性子を作り出す。生成した中性子は、月面の物質と弾性散乱や非弾性散乱を幾度も繰り返しながら、最終的に原子核に取り込まれる(中性子捕獲核反応)か、あるいは宇宙空間に漏出される(図1)。これらの核反応の際に原子核固有のエネルギーを持つガンマ線が発生する。また地球同様に月にも天然放射性核種(²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K等)が存在し、核種特有のガンマ線を発生する。これらのガンマ線の一部は月表面から宇宙空間に漏れ出し、それらのガンマ線を月周回軌道から遠隔探査することで、主要元素、天然放射性元素および中性子を捕獲しやすい微量元素の月面濃度分布を調べることができる[e.g. 9]。

これまでガンマ線分光計は、月面の元素組成を調べる有力な方法として用いられてきた。しかしながら過去の月探査に用いられてきたガンマ線検出器は、エネルギー分解能が低いシンチレータであった(アポロではNaI(Tl) [10]、ルナプロスペクタではBGO[11])。ガンマ線分光におけるエネルギー分解能は、各元素を同定する能力に直結するため、得られる科学的な結果に重大な影響を及ぼす。月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計は月探査において初めてGe半導体検出器を用いている。Ge半導体検出器はシンチレータ検出器に比べ、数十倍もエネルギー分解能が高いため、これまでのガンマ線分光による結果を凌駕する

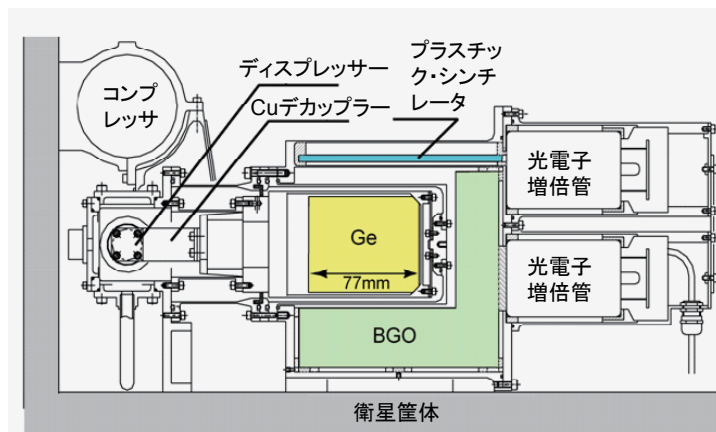


図2: 月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計の概略図。

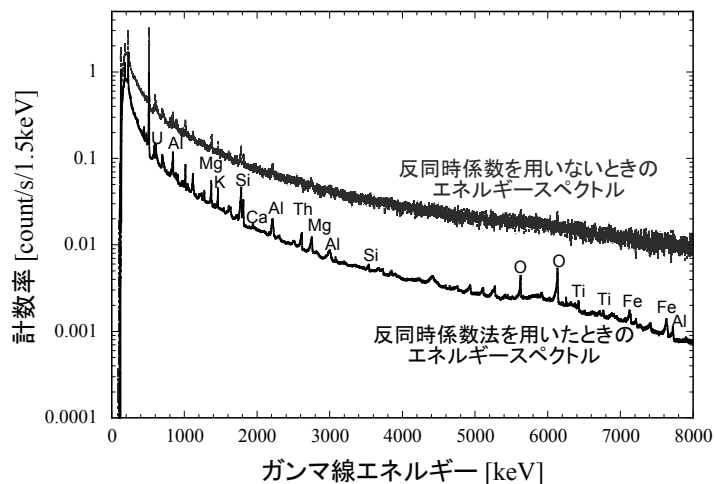


図3: 反同時計数法を行なったときと行っていないときのガンマ線エネルギースペクトルの比較。

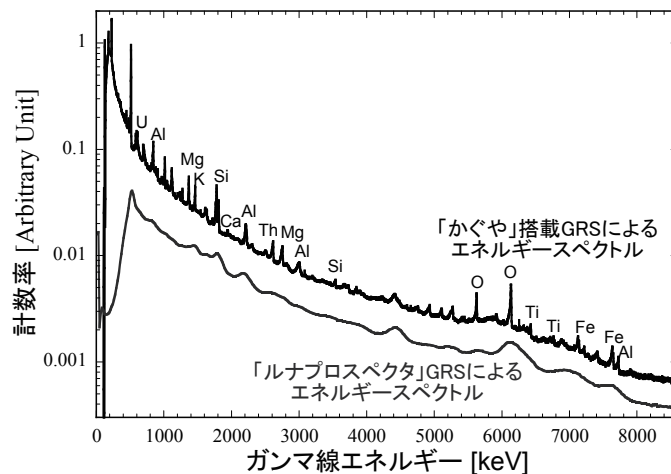


図4: 「かぐや」搭載GRSと「ルナプロスペクタ」搭載GRSのガンマ線エネルギースペクトルの比較。

科学データを取得することができた。

3. 月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計

「かぐや」搭載ガンマ線分光計(図2)は、月表層で発生するエネルギー0.2～12MeVのガンマ線を計測して、月面全域にわたり元素(H, O, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Th, U等)の分布を調査している。

月探査衛星「かぐや」は主検出器としてエネルギー分解能が優れたGe半導体検出器を月探査機に世界で初めて搭載している。また、副検出器として、BGO

及びプラスチックシンチレータを採用し、反同時計数法によりバックグラウンド計数を低減している。反同時計数法とは、主検出器と副検出器に同時に放射線が入射した場合の信号を除去する方法で、衛星方向から入射した放射線や月からのガンマ線でも主及び副検出器でコンプトン散乱したガンマ線を取り除くことにより月由来のガンマ線ピークを効率よく観測することが可能となる。これにより、月探査のガンマ線分光計として、前例の無い高精度な月面の元素観測を可能にした。

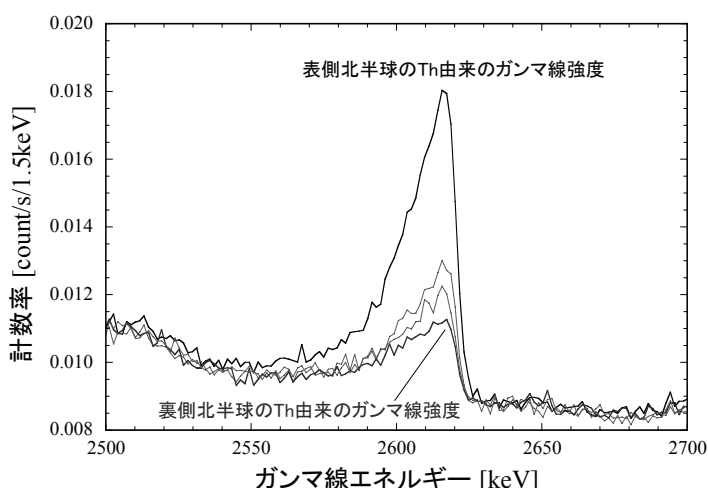


図5: 表側北域および裏側北域のTh由来ガンマ線(2615 keV)ピークの比較。

4. 観測結果

月探査衛星「かぐや」は平成19年10月18日に月上空100kmの極軌道に投入された。その後、GRSの健全性を確認するための各種試験を行なった。最終的に実観測を行うための電圧である3.1kVまで印加電圧を昇圧し、約1.5時間観測を行い、GRSが正常に動作していることを確かめた(図3)。さらに「かぐや」の定常運用開始前の12月14日から試験的に反同時計数法を用いたGRS運用が開始され、翌年2月17日までの間、月由来のガンマ線を正常に観測することができた。ただし、探査機の軌道や姿勢の調整に要した時間、Ge検出器の不感時間などを考慮に入れると、この期間の「かぐや」搭載GRSの実効的な観測時間は、約28日間に留まる。しかし、反同時計数法を用いたことで、バックグラウンドガンマ線を大幅に除去することに成功し、図3からわかるように元素由来のガンマ線ピークを鮮明に観測することができている。

約2ヶ月間にわたる観測データを積算したガンマ線エネルギースペクトルを図4に示した。同図に示した「ルナブロスベクタ」搭載GRSにより得られたスペクトル[12]と比較すると、「かぐや」搭載GRSのエネルギー分解能が非常に優れていることがわかる。エネルギー分解能に優れる「かぐや」搭載GRSのガンマ線エネルギースペクトルから、主要元素であるO, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe, さらに天然放射性核種である ^{40}K ,

^{232}Th , ^{238}U 由来のガンマ線ピークを単一ピークとして同定することができた。ガンマ線強度は月表層の元素濃度に対応していることから、ガンマ線強度を測定することで月表層の各元素濃度を見積もることができる。

月を表裏と南北半球で4分割して、それぞれの地域の観測データを比較すると、天然放射性核種である ^{40}K , ^{232}Th および ^{238}U 由来のガンマ線強度に明らかな地域差が見られた。例として ^{232}Th の地域差を図5に示す。 ^{232}Th の濃度決定にはTh壊変系列である ^{208}Tl から放出される2615 keVのガンマ線ピークを用いる。Th由来のガンマ線強度は表側北半球で最も強く、裏側北半球で最も弱い。月の表側北半球にはMare Imbrium, 嵐の大洋周辺地域(Procellarum KREEP Terrane: PKT)と呼ばれるKREEP物質が偏在した地域が存在し、最もThに富む地域であることが報告されている[13]。さらに、裏側北半球は長石質高地地域(Feldspathic Highland Terrane: FHT)と呼ばれるTh濃度が最も低い地域が広がっている[13]。「かぐや」搭載GRSの観測結果は過去の報告と矛盾しない結果である。

「かぐや」搭載GRSによる観測結果を用いて、月面の元素分布地図の作成を試みた。しかしながら一度シャッターを押したら画像が得られるカメラとは異なり、月面から放出されるガンマ線の強度は弱いために、細かく分割した月面元素分布地図を作成するには長時間の観測が必要である。これに対して、本稿で用いているデータの積算時間は、実効観測時間として約1ヵ月

であるために、裏側のFHTに代表されるTh濃度の低い地域においてはTh由来の有意なガンマ線ピークを確認することができなかった。そこで、本稿ではガンマ線分光における初期分析法としてバンド解析法を用いた[14]。この方法は目的元素由来のガンマ線ピーク近傍のカウント数を全て積算する方法である。ルナプロスペクタGRSによる最初の報告でも同様の方法が用いられている[15]。この方法では連続部であるベースラインのカウント数も同時に積算してしまうため、Thの絶対存在量を見積もる方法としては不適切であるが、各々の地域におけるガンマ線強度を相対比較するには有効で簡便な解析法である。緯度経度共に5°に分割した各地域のTh由来のガンマ線エネルギーピーク範囲(2.54～2.65keV)のカウント数を積算したガンマ線強度分布地図を図6に示す。PKTと呼ばれる地域のTh由来のガンマ線強度が非常に強くなっていることがわかる。Mare Imbriumを取り囲むようにThが最も濃集している地域が存在し、裏側の南極域エイトケン盆地(South Pole-Aitken Terrane : SPAT)周辺にも比較的高いThの濃集が見られる。これらの結果はルナプロスペクタによって作成されたTh分布地図[e.g. 13]と非常に良く一致している。今後、観測時間が増加することにより、より詳細なTh分布地図を作成することが可能になるであろう。天然放射性核種である²³²Thが月の表側の限られた地域に偏在していることは、月地殻が形成した後の火成活動に大きな影響を与えたことが予想される。Thに加えてKやUの詳細な分布を確度良く調べることににより、月地殻の進化過

程の一端を理解することができる。

月の地殻を構成している主要な岩石は、地球と同様に火成岩である。月地殻は“高地”と“海”と呼ばれる地域に大別され、それぞれ斜長岩(AlやCaを多く含む)と玄武岩(MgやFeを比較的多く含む)から構成される。それぞれの岩石は光の反射率が異なるために、月にうさが餅がついているような模様が見える。これらの地殻構成成分がどのようにして形成されたのかを明らかにするためには、月面の元素分布を正しく知らなければならない。例えば斜長岩中に含まれるMgとFeが、高地全体にどのような比で分布しているかがわかれば、月は全球的な溶融(マグマオーシャンステージ)を経験したのかを推定することができる。一方、月の重要な熱源である天然放射性核種の分布がわかれば、月地殻がこれらの熱源によってどのような変成過程を経験したのかを推定することができる。以前の月探査によって、天然放射性核種は海が集中している表側の地域に濃集していることが報告されている。しかしながら、これらの核種が特定の地域に濃集した理由や、その絶対量の正確な見積もりは得られていない。「かぐや」搭載GRSによって期待される月面元素分布地図の作成は、月地殻の形成過程解明のために極めて重大な情報をもたらしてくれるものと世界中の月科学者から期待されている。

5. まとめと将来の展望

月探査に初めて高分解能Ge半導体検出器を用いた

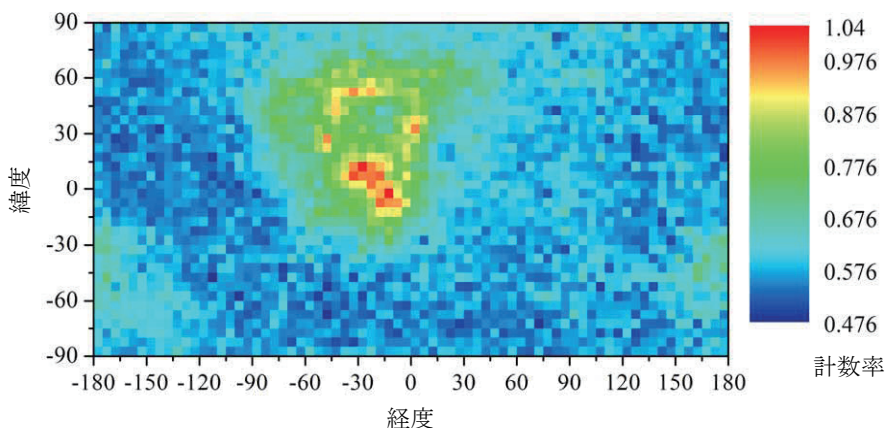


図6: Th由来ガンマ線強度の全球分布地図(5°×5°マップ)。

「かぐや」搭載GRSによる運用最初期の2ヶ月間の観測によって、月面におけるThの分布を調べることができた。より長期間の観測を行うことにより、詳細な濃度分布を調べることが可能となる。さらにTh以外の元素、特に主要元素(Feなど)についてもこれまでに無い観測精度で分布地図を作成することが期待されている。しかしながら、現在得られているカウントレート地図は、月上空100kmにおける単純な検出イベント数の積算値に基づいている。これに対して正確な月面濃度地図を作成するためには、検出器の温度変化による波高値の変化、宇宙線強度の変化、衛星高度の変化、検出器の空間応答関数を用いた月面ガンマ線強度への変換、などの各種補正を行わなければならない。さらに、衛星筐体由来のバックグラウンドガンマ線の寄与評価、ガンマ線エネルギースペクトルでのピークフィッティングの高精度化等も、各元素の月面濃度を決定する上で不可欠な要素である。今後はこれら諸問題の解決と適切な補正を行なうことにより、多くの元素について正確な月面濃度分布地図を作成することが、「かぐや」搭載GRS解析チームとしての課題である。

月は地球から最も近い天体であるにも拘らず、実は形成過程の詳細はわかってない。地球のような核の有無、月全体の化学組成、表裏の地殻構造と元素組成の違いなど、月の成り立ちに関する重大な“なぞ”について、我々は回答を得ていない。さらに、月面に存在する可能性が示唆されている水氷や、鉱物資源が「どこに」「どの程度」存在しているかを知ることは、将来人類が月に進出したときの貴重な情報となるだろう。「かぐや」搭載のほかの機器との協調も計画されており、例えばGRSと同様に元素分布を観測する蛍光X線分光計との相互補正、また可視近赤外域の光学カメラによる観測結果と統合的に解析して決定精度の向上を図る予定である。さらに、月探査衛星「かぐや」には観測精度の高い14種類の装置が搭載され、観測機器固有の科学目標を個別に達成するとともに、複数の観測機器のデータを統合し、「月の起源と進化」を解明することを目指している。

謝 辞

本研究で使用したデータは、JAXAのかぐやプロジェクトの下で開発され、運用されている「かぐや」搭

載ガンマ線分光計によって観測されたものです。各関係方面の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Heiken G.H et al. (1991) "Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon". ed. by Heiken, G.H. et al., Cambridge University Press.
- [2] Warren P.H. and Kallemeyn G.W. (1991) Proc. NIPR Symp. Antarct. Met. 4, 91-117.
- [3] Nozette S. et al., (1994) Science 266, 1835-1839.
- [4] Binder A.B. (1998) Sciecn 281, 475-476.
- [5] Arai et al. (2008) EPS 60, 433-444.
- [6] Korotev R.L. et al. (2003) GCA 67, 4895-4923.
- [7] Takeda H. et al. (2006) EPSL 247, 171-184.
- [8] Hasebe N. et al. (2008) EPS 60, 299-312.
- [9] Yamashita N. et al. (2008) EPS 60, 313-319.
- [10] Bielefeld M.J. et al. (1976) Proc. Lunar Sci. Conf., 7, 2661-2676.
- [11] Feldman W.C. et al. (1999) Nucl. Inst. Methods A422, 562-566.
- [12] Lawrence D.J. et al. (2004) JGR 109, E07S05.
- [13] Jolliff B.L. et al. (2000) JGR 105E2, 4197-4216.
- [14] Pieters C.M. and Englert P.A.J. (1997) "Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition". ed. by Carle M.P. and Englert P.A.J., Cambridge University Press, Chapter 15.3.3.
- [15] Lawrence D.J. et al. (1998) Science 281, 1484-1489.