

特集「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」

月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計による高解像度月表層元素分布図

唐牛 譲¹, 小林 進悟², 晴山 慎², 山下 直之³, 小林 正規⁴,
柴村 英道⁵, 長谷部 信行¹

2010年4月14日受領, 2010年5月6日受理.

(要旨) 月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計は月面元素組成分布の調査を目的としており, 1年半の観測期間の間で複数の条件が異なる観測を行った. 衛星高度が100kmの定常運用時に取得されたデータの解析が進み, これまでに天然放射性元素の月面濃度分布地図が作成された. また, 低高度軌道運用時の観測データは, 軌道高度が定常運用時の約半分であるために空間分解能が向上していること, 放射線損傷によるGe検出器のエネルギー分解能劣化をアニーリング運用により性能回復した後の観測データであること, さらに観測積算時間が十分に長いことにより, 高解像度・高精度な月面元素組成分布地図を提供するものと期待される. ただし, 高精度な濃度マップ作成のためには, 観測条件に合わせた各種補正のための更なる検討が必要である.

1. はじめに

月は地球から最も身近な天体であり, 帰還試料と隕石試料を共に入手できる唯一の天体である. アポロ・ルナ計画による帰還試料は採取地が既知であるが, 試料を回収した地域は月の表側の限られた地域に集中している. これに対して月隕石試料は, 起源地域を特定することは困難であるものの, 組成・組織の多様性から月面の広い地域から飛来したものであり, 裏側起源の隕石も含まれていると考えられている[例えば1]. さらに月は, 帰還試料と隕石試料の両者があるというだけでなく, 多種類にわたる遠隔探査情報が全球にわたって得られている稀有な天体であると言える. アポロ計画やルナ計画による帰還試料や月隕石試料に対する様々な手法による精力的な研究により, 月地殻の形成過程に対する理解が深まりつつある. 月隕石試料は鉱物学的・化学的な多様性を示していることや[例えば2],

1990年代に打ち上げられたクレメンタインおよびルナプロスペクタによる遠隔探査により月全球の地質的・組成的な多様性が示されたことは[例えば3], 月地殻の進化過程が想像以上に複雑であったことを明確にした. 地球に比べて簡単なプロセスを経て形成されたと考えられる月の原始地殻の形成過程に対する理解は, 地球を含めた固体惑星の初期進化過程の全容を解明するための重要な知識であると考えられる.

2007年9月に打ち上げられた月探査衛星「かぐや (SELENE)」は, 2009年6月に月面に制御落下するまでの約1年半にわたり, 14種類もの科学観測機器を搭載して, 月極軌道を周回して月全球を調査した[4]. 「かぐや」探査は, 世界最高性能の各種科学観測により, 複雑な月地殻の形成過程を解明することを含めた「月の起源と進化」を究明することを目的としており, 現在も数多くの研究者たちが日夜取得されたデータと奮闘している. 本稿では衛星「かぐや」に搭載された科学観測機器の一つであるガンマ線分光計[5]による成果を紹介する. 特に, 2008年12月に行われたバックグラウンド観測, アニーリング運用, および2009年に行われた低高度軌道運用による取得データのエネルギー分解能・空間分解能の向上と, それに伴う科学成果の

1. 早稲田大

2. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

3. フランス宇宙放射線研究センター (CESR)

4. 千葉工大

5. 埼玉県大

karouji@aoni.waseda.jp

優位性について紹介する。

2. 「かぐや」搭載ガンマ線分光計

月や惑星の起源・進化を解明するために、天体表面の元素組成とその分布に対する知識は不可欠である。ガンマ線分光法は、月・惑星遠隔探査において、目的天体表面の元素組成を調べることができる有用な手法である[例えば6]。これまでも月(アポロ15・16号[7], ルナプロスペクタ[8])や火星(マーズオデッセイ[9]), 小惑星(ニア[10])などに対してガンマ線分光法は用いられており、月や火星、小惑星などの表面元素組成分布が明らかになりつつある。

月や火星の表面は地球と異なり大気が無いもしくは薄く、固有磁場も弱いため、常時銀河宇宙線に曝されている。宇宙空間を飛び交う高エネルギーの荷電粒子である銀河宇宙線が月や火星の表面に入射し、天体表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、表面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反応を起こすか、あるいは宇宙空間に放出される。上記の非弾性散乱や中性子捕獲反応により、各原子核固有のエネルギーを持つガンマ線が発生する。さらに、天然放射性核種(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 等)の放射壊変にともない放出されるガンマ線が存在し、これらのガンマ線の一部は天体表面から宇宙空間に漏れ出す。このように天体表面から漏れ出してきたガンマ線を周回軌道上で観測することにより、天体表面の元素組成分布を調べることができる。

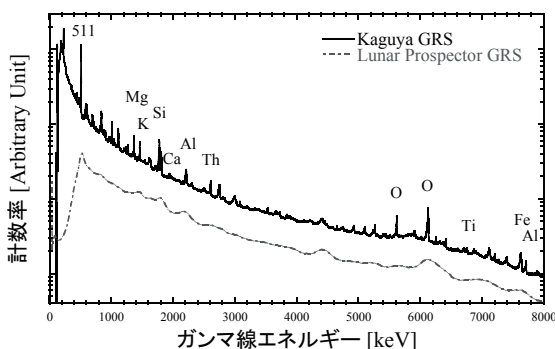


図1: 観測期間が2009年2月10日から5月28日までの低高度軌道運用時(ピリオド3)のKGRSによるガンマ線エネルギースペクトル(実線)。比較のためにLPGRSのガンマ線エネルギースペクトルを示す(点線)[11]。

「かぐや」搭載ガンマ線分光計(KGRS)は、月探査においてはじめてGe半導体検出器を採用した[5]。これまで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の低いシンチレーション検出器であった(アポロ(AGRS)ではNaI(Tl)[7], ルナプロスペクタ(LPGRS)ではBGO[8])のに比べて、数十倍も高いエネルギー分解能を有するKGRSは、主要元素および天然放射性微量元素のガンマ線ピークを世界で初めて一意的に同定することを可能にし(図1)、これまでに無い高精度な元素濃度分布地図を作成することが期待されている。特に、月の熱進化に重大な寄与を及ぼす天然放射性元素であるK, ThおよびU, さらに地殻構成岩石を分類するために必要な主要元素であるO, Mg, Al, Si, Ca, TiおよびFeの濃度分布を調査することを目的としている。これまでのAGRSやLPGRSでは衛星軌道やガンマ線検出器のエネルギー分解能に問題があったため、全球元素濃度分布図としてはK, ThおよびFeのみ報告されている[例えば11]。これらの元素の全球濃度分布図は月の進化過程を考察する上で重要な情報であったものの、熱史にとって最も寄与の大きいUや岩石の分類に必要なMg, Al, SiおよびCaなどの元素濃度分布図は与えられていないのが現状である。さらに近年では、LPGRSによって提供された元素濃度分布地図の絶対濃度を疑問視する声も複数報告されている[例えば12]。KGRSは、これまでに報告された元素濃度分布図の評価をするとともに、これまでに報告されていない主要元素やUの濃度分布図を提供することを目的としている。

3. ガンマ線観測

KGRSのデータは観測期間によって観測条件の異なるいくつかの区分に分けなければならない。以下に観測期間および観測条件をまとめる(表1)。

3.1 定常運用

KGRSの定常観測は2007年12月14日から開始された。平均衛星高度が100kmであった2008年12月末までの期間、Ge結晶への印加電圧が異なる2種類の観測を行った。2007年12月14日から2008年2月18日までの約2ヶ月間(実効観測時間: 32.8日)、Ge結晶への印加電圧を3.1kVに昇圧して観測を行った(ピリオド1)。

表1. KGRSの運用状況と取得データの評価.

	期間 (UT)	実効観測時間	印加電圧	衛星高度 (km)	エネルギー分解能*	空間分解能
ピリオド1	2007.12.14 - 2008.2.16	32.8日	3.1 kV	100±20	8.8 keV	(130 km) ²
ピリオド2	2008.7.7 - 2008.12.16	78.6日	2.5 kV	100±20	16.6 keV	(130 km) ²
ピリオド3	2009.2.10 - 2009.5.28	69.5日	2.5 kV	50±20	7.1 keV	(67 km) ²
BG運用(1)	2008.7.4	1.0時間	2.5 kV	100±20		
BG運用(2)	2008.12.11 - 2008.12.12	9.3時間	2.5 kV	100±20		
アニーリング運用	2008.12.16 - 2008.12.25					

*積算期間におけるK由来の1461keVガンマ線ピークでの平均エネルギー分解能.

太陽電池により電力を得ている「かぐや」は、月が地球の影に入る月食の期間、観測を中断する。2008年2月20日から22日の月食の間、KGRSは観測を中断した。月食明けの2月23日にKGRSの観測を再開したところ、突然Ge検出器のノイズがひどくなり、KGRSの観測を続けることができなくなった。4ヶ月にわたる原因調査の結果、Ge結晶への印加電圧を下げることで(2.5kV)、正常なデータを取得できることがわかった。そこで、2008年7月7日から2008年12月16日までの約5ヶ月間(実効観測時間：78.6日)、Ge結晶への印加電圧を2.5kVに昇圧して観測を行った(ピリオド2)。

3.2 低高度軌道運用

「かぐや」計画は2008年10月末日をもって定常運用を終了した。その後、衛星「かぐや」を月面に制御落下させる6月まで、後期運用として計画は続けられた。11月から12月までは観測未了地域をカバーするために100km高度での観測を続けたが、2009年1月に衛星の軌道を100kmから50kmまで下げた。これは衛星軌道を低高度にすることで大きな成果につながることを期待される観測機器(例えば月地場観測装置[4])による観測を実施するために行われたものである。ガンマ線分光法は天体表面と検出器との立体角によって空間分解能が決定するため、衛星軌道高度が下がると空間分解能は向上する。KGRSも衛星高度が下がることにより有用なデータが取得できるものと期待して、低高度軌道運用時にも観測を行った。観測は2009年2月10日から開始し、制御落下させる直前の5月28日までの約3ヶ月間(実効観測時間：69.5日)、Ge結晶への印加電圧を2.5kVとして観測を行った(ピリオド3)。立体角の計

算により、低高度軌道運用データの空間分解能(約67 km×67 km)は、定常運用時の空間分解能(約130 km×130km) [13]に比べて約2倍優れていることがわかった。

KGRSは高電圧を印加する機器であるため、放電といったリスクを低減するために、ガスジェット噴射による衛星の姿勢・軌道制御の際には観測を中断していた。しかしながら後期運用であるピリオド3の観測では、衛星の姿勢・軌道制御の際にも中断を挟まなかったため、十分に長い実効観測時間を稼ぐことができた。ガンマ線分光法では観測時間が長いほど濃度決定精度が良くなるため、エネルギー分解能が同程度であるピリオド1の2倍以上の観測時間が得られたピリオド3では、より優れた統計精度でデータが取得できた(表1)。さらに、ピリオド3のデータはピリオド2よりもエネルギー分解能が優れているために(表1)、同程度の観測時間であるにもかかわらず、ピリオド3ではピリオド2よりも高精度な観測データを得ることができている。

3.3 バックグラウンド観測運用

KGRSは、月面から放出されるガンマ線の他に、銀河宇宙線や月面から放出された中性子との相互作用により衛星構体や検出器自身から放出されるガンマ線を同時に計測する。衛星や検出器自身から放出されるガンマ線をバックグラウンドガンマ線と呼ぶ。月面由来のガンマ線強度を見積もるためには、バックグラウンドガンマ線の強度を正確に見積もらなければならない。このために、2008年7月4日および12月11・12日にバックグラウンド観測のための運用(BG運用)を行った(総実効観測時間：10.3時間)。

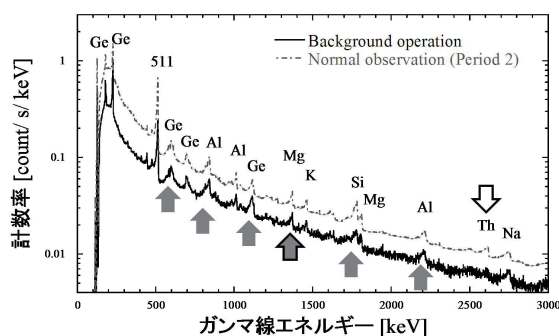


図2：バックグラウンド観測運用時のガンマ線エネルギースペクトル(実線)。比較のために月面を向いている定常運用時(ピリオド2)のスペクトルを示す(点線)。灰色の上向き矢印はバックグラウンドガンマ線の寄与が大きいピーク、白抜きの下向き矢印はバックグラウンドガンマ線の寄与が小さいピークを指している。線付の灰色上向き矢印はMg由来の1.37MeVガンマ線ピークである(本文参照)。

衛星「かぐや」は、1周回で衛星がちょうど1回自転する角速度に保持することで、常に衛星のZ軸が月中心方向を指向するように制御されており、+Z面に取り付けられたKGRSは常に月中心方向を向いている。これに対してBG運用では、衛星の姿勢が慣性系に固定になるように制御することで、観測装置が取り付けられている+Z面が深宇宙を向く時間を作り、KGRSの視野の中に月が入らないようになる時間帯の観測データを取得した。本運用により、バックグラウンドガンマ線と衛星を透過した分だけの月面由来ガンマ線を計測した。図2はバックグラウンド観測運用によって得られたスペクトルと定常運用(ピリオド2)により得られたスペクトルを比較したものである。BG運用時のガンマ線スペクトルは、衛星や検出器を構成するAlやGe、Al原子核が破碎されて生成するMg、およびAlが中性子捕獲反応してできるSi由来のガンマ線強度が高いことを示しており、またTh由来のガンマ線強度が小さいことから衛星にはほとんどThが含まれていないことが確認できた。例えば、定常運用時の1368 keVのMgガンマ線計数率は8.4 cpm(カウント/分)であるのに対して、バックグラウンドMgガンマ線計数率は5.1 cpmあり、正味の計数率($3.3 = 8.4 - 5.1$ cpm)よりもバックグラウンドの寄与が大きい。このため、バックグラウンドの寄与率を精度よく求めなければ、高精度なMg濃度分布地図を作成することができない。

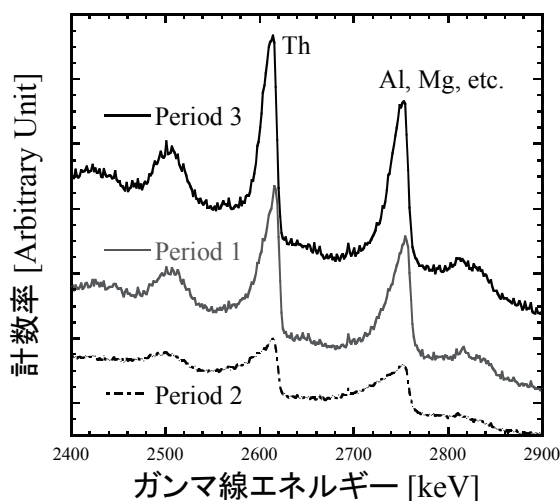


図3：各ピリオドにおけるTh由来の2.61MeVピーク付近のガンマ線エネルギースペクトルの比較。

3.4 アニーリング運用

ガンマ線検出器の中でも特にGe検出器は放射線損傷による性能劣化が顕著に現れる[例えば6]。詳細なメカニズムの解明はされていないが、高エネルギーの粒子に曝され続けると、放射線照射量に比例してGe検出器のエネルギー分解能は劣化する。放射線損傷によりエネルギー分解能が劣化したGe検出器は、アニーリング(焼鈍し)によって性能が回復することが経験的に知られており、マーズオデッセイガンマ線分光計などのGe検出器を用いたガンマ線観測機器に広く用いられている。KGRSでは、2008年12月16日から25日にかけてアニーリング運用を行った。ヒータにより徐々にGe結晶の温度を上昇させて、 $85 \pm 5^\circ\text{C}$ で48時間Ge結晶のアニーリングを行った。アニーリング後、数日かけてGe結晶を -190°C 以下に冷却し、ガンマ線観測を行った。図3は観測開始初期のデータであるピリオド1、放射線損傷による劣化が顕著に現れているピリオド2、およびアニーリング後の観測データであるピリオド3の各観測期間におけるTh由来のガンマ線ピーク(2.61MeV)付近のスペクトルを比較したものである。ピリオド3のスペクトルは、アニーリングにより観測初期のピリオド1と同程度までエネルギー分解能が回復されていることがわかる。

Ge検出器の稼働温度付近(約 -195°C)まで冷却しているとGe検出器の放射線損傷によるエネルギー分解

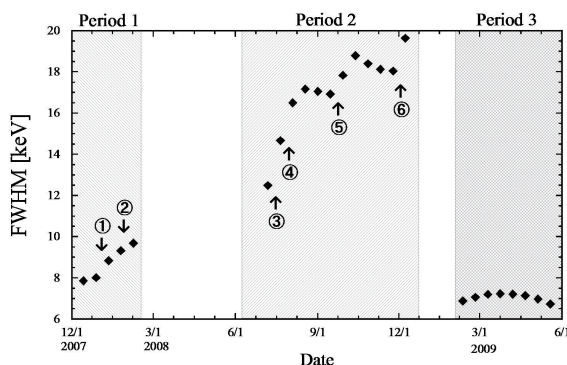


図4：KGRSの1.46MeVにおけるエネルギー分解能の時間変化。矢印は主な昇温イベント：①1月6日，計画外ULD*；②2月4・5日，衛星軌道高度制御運用；③7月16日，衛星軌道高度制御運用；④8月2・3日，衛星軌道傾斜制御運用；⑤9月10日，衛星軌道高度制御運用；⑥12月11・12日バックグラウンド運用。ピリオド2の最後に最も分解能が劣化している点は，積算時間が短いことに起因するフィッティングエラーの影響による。*ULD：アンローディング。衛星の姿勢制御のための機器の一つであるリアクションホイールにたまった角運動量を解放するための運用。計画外に行われたULDでは，KGRSの冷凍機も停止した。

能劣化はほとんど現れないが，Ge結晶を -150°C 以上に昇温すると放射線損傷は一気に顕在化する。ピリオド2までは，「かぐや」の各種運用(例えば軌道高度補正など)の際に，冷凍機を止めていたため放射線損傷の顕在化が著しかった。これに対し，アニーリング後のピリオド3では，常に冷凍機を稼働し続けてGe結晶温度を -190°C 以下に保った。これによりピリオド3ではエネルギー分解能の著しい劣化は観測されず，高精度なデータを取得することに成功している。図4は2週間毎の観測データにおけるKGRSのエネルギー分解能の変化を示したものである。分解能はK由来のガンマ線ピーク(1.46MeV)における半値幅(FWHM)で表した。ピリオド1および2では，Ge結晶の昇温の影響でエネルギー分解能が徐々に劣化しているが，ピリオド3ではGe結晶を昇温しなかったことにより分解能の劣化が顕在化していないことがわかる。

4. 観測結果

4.1 定常運用データによる月面K・Th・U濃度分布

KGRSは優れたエネルギー分解能を有するため，元素由来のガンマ線ピークを一意的に同定することができ，高精度に各元素由来のガンマ線強度を求める

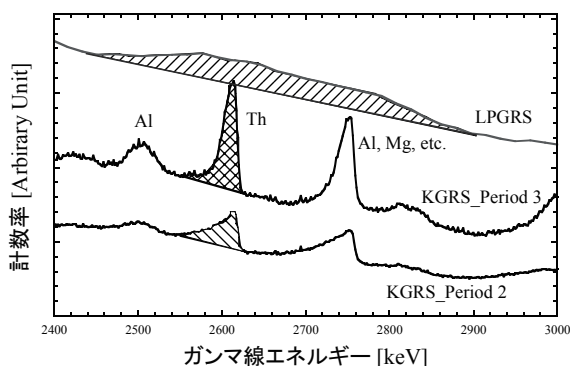


図5：KGRSのピリオド2およびピリオド3で取得されたTh由来ガンマ線ピーク。斜線はTh由来のガンマ線ピーク面積(強度)を示す。比較のためにLPGRSのスペクトルを示す[11]。

ことができる。このため，KGRSと月面との立体角，KGRSのガンマ線検出効率を決定することで，絶対法により月面の元素濃度を求めることができる。特に天然放射性元素由来のガンマ線強度は，銀河宇宙線の強度変動や月面物質の平均質量に依存する中性子フラックス変動の影響を受けずに，単純な壊変定数に依存するため，KGRSの観測データから月面元素濃度へ変換するための濃度換算係数を求めることが容易である。Kobayashi et al. [13]はK，ThおよびU由来の各ガンマ線エネルギー別に濃度換算係数を見積もり，KおよびThの濃度分布図を作成した。濃度分布図は，ピリオド1のデータを使用して， $450\text{km} \times 450\text{km}$ 準等面積に月面を分割し，それぞれの地域のガンマ線エネルギースペクトルからK(1.46MeV)とTh(0.9MeV)由来のガンマ線を解析することにより作成した。

Yamashita et al. [14]は，ピークフィッティング法によりTh(2.64 MeV)とU(1.76MeV)由来のガンマ線強度を見積もり，Kobayashi et al. [13]により与えられた濃度換算係数を用いて，ThおよびUの月面濃度分布地図を作成した。月面のU由来のガンマ線ピークから直接U濃度分布地図を作成したのはこれまでに例がなく，「かぐや」によって初めて得られた科学成果の一つであると言える。マップはピリオド1とピリオド2のデータを用い， $9^{\circ} \times 9^{\circ}$ 等緯度等経度に分割して作成している。得られた月表層におけるU/Th比は 0.27 ± 0.01 であり，アポロ試料により求められているU/Th比(=0.28 [15])とよい一致を示した。さらにYamashita et al. [14]は，月面の平均元素濃度($\text{U} = \sim 0.3 \text{ ppm}$ ； $\text{Th} = \sim 1.2 \text{ ppm}$)を見積もった。この結果は，これまで

の報告(e.g. Th = 1.7 ppm [15])よりも明らかに低い値であり、月は難揮発性元素に富むというこれまでの解釈とは一致しない傾向を示している。

4.2 低高度軌道運用データによるThマップ

ガンマ線分光法により観測することができる核ガンマ線の中でも天然放射性元素であるTh由来のガンマ線は、強度が高いために比較的短時間の積算時間でもガンマ線ピークを検出することができる。例として、図5にピリオド2とピリオド3での全観測時間を積算した2.4 ~ 3.0 MeVにおけるガンマ線スペクトルを示す。図5の斜線範囲で示すように、Th由来のガンマ線(2.61 MeV)強度は2.56 MeV ~ 2.62 MeVの範囲の総カウント数(gross面積)から連続部バックグラウンドカウント数(background面積)を差し引いたカウント数(net面積)により求める(全ピーク積算法)。比較のためにLPGRSのスペクトルを示しているが、KGRSのエネルギー分解能が極めて優れており、Th由来のガンマ線ピークを一意的に抽出することができていることがわかる。また、KGRSのスペクトルでは、Th由来の2.61 MeVピークの低エネルギー側にAl由来の2.5MeVピーク($^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$)が確認できる。半減期が短いことに起因するドップラー効果の影響により、このAl由来のピークは幅の広い形状を示す。高精度にTh由来のガンマ線強度を導出するためには、2.5MeVのAlドップラーピークの寄与を取り除くためにピークフィッティング法を用いなければならない[例えば14]。しかしながらピリオド3のスペクトルはエネルギー分解能が優れているため、全ピーク面積法によるピーク強度算出法でも精度よくThピーク強度を見積もることができる。これに対し、ピリオド2のスペクトルはエネルギー分解能が劣化しているため、Th由来ピークの低エネルギー側にAl由来の2.5MeVドップラーピークが干渉してしまい、全ピーク面積法によるピーク強度算出法ではThピーク強度を精度よく算出することができない。前述のように、ピリオド3の観測時間はピリオド2と同程度であり、かつエネルギー分解能が優れているため、統計精度が格段に向上している。以上より、ピリオド3のデータは各元素由来のガンマ線強度を見積もるのに大変有用であると結論できる。

月面の中でも嵐の大洋周辺地域(Procellarum KREEP Tarrane : PKT [3])には液相濃集元素である

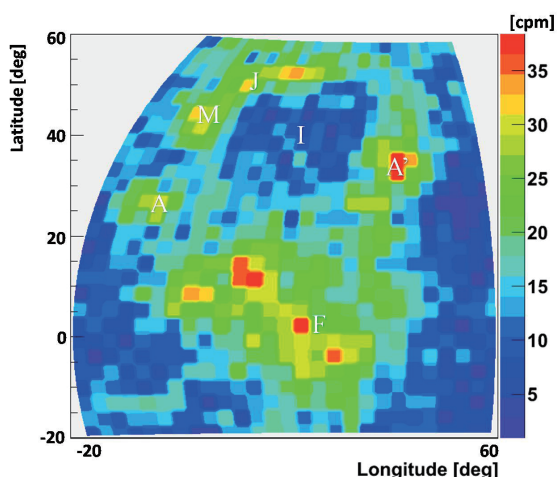


図6：ピリオド3で取得されたデータに基づくPKT領域(N60°~S20°、E60°~W20°)におけるTh由来ガンマ線強度分布図(3°×3°マップ)。図中のラベルは月の地名を示す：A, アリスタルコスクレータ；A', アリステイルスクレータ；F, フラマウロ丘陵；I, 雨の海；J, ジュラ山脈；M, メラン・クレータ。

Thが最も濃集しているため、PKT領域のTh相対存在量分布を調査することは最も容易である。そこでピリオド3の観測データを用い、PKT周辺領域(N60°~S20°、E60°~W20°)のThガンマ線強度分布図を作成した(図6)。当該領域を3°×3°に分割して、Th由来のガンマ線強度は全ピーク面積法により求めた。衛星高度の変動に関しては、月面と検出器の間の単純な幾何効率のみの補正を行った。また、バックグラウンドガンマ線の補正は行っていない。得られたThマップは、雨の海でTh存在量が低く、雨の海を取り囲むようにアリスタルコスクレータやアリステイルスクレータ、ジュラ山脈やフラマウロ丘陵などにThが濃集している地域が点在しているという特徴を示している。このような特徴は、これまでのLPGRSによる報告[例えば16]やKGRSによる報告[13, 14]と一致している。ただしKGRSによるこれまでの報告は、ピリオド1およびピリオド2の衛星高度100kmにおける観測データを用いた解析であったため、空間分解能が3°×3°よりも大きかった(Kobayashi et al. [13]では450km×450km(赤道域で約15°×15°)；Yamashita et al. [14]では9°×9°)。これに対してピリオド3のデータは空間分解能が優れているため(表1参照)、高解像なTh分布地図を作成することができる。さらに詳細な解析を行うことにより、高精度・高解像度な全球Th分布地図を作成す

ることが可能であろう。

以上より、(1)低軌道運用であること、(2)積算時間が比較的長いこと、(3)アニーリング後の取得データであること、(4) Ge結晶の昇温を抑えたことにより、高精度・高空間分解能な月面元素濃度分布地図を作成するための有用なデータをピリオド3で取得できたことが確認された。しかしながら、(a)定常運用における衛星高度の変動率は約20%であるのに対し、低軌道運用における衛星高度の変動率は約40%であること、(b) BG運用はすべて定常運用衛星高度(100km)で行われていること、(c)打ち上げ前の地上試験データは全てGe結晶への印加電圧を3.1kVで取っているのに対し、ピリオド3のデータは印加電圧2.5kVで取得している点などは、高度補正、バックグラウンド補正および計数効率・ゲイン補正などの各種補正を困難にしており、ピリオド3のデータから高確度な元素濃度を決定するためには更なる検討が必要である。

5. まとめ

約1年半に亘る「かぐや」搭載ガンマ線分光計の観測により、条件の異なる3種類の観測を各期間(ピリオド1, 2および3)で行った。定常運用時のピリオド1および2で取得されたデータの解析が進み、これまでに天然放射性元素であるK, Th, Uの月全球濃度分布地図が作成されている。得られた濃度分布地図から、月の熱史にかかわる考察が進むことであろう。またピリオド3での観測データは、低高度軌道運用時の観測データであるため、定常運用時の観測(ピリオド1および2)に比べて2倍程度空間分解能が優れている。また、ピリオド3の観測データはアニーリングによるGe検出器の性能回復運用後の取得データであるため、ピリオド1と同程度のエネルギー分解能を有し、さらにピリオド2に匹敵するほどの観測時間を得ることができたことから、各観測期間のデータの中で核ガンマ線の強度を最高精度で導出することが可能である。したがって、ピリオド3の観測データを解析することにより、高解像度・高精度な月面の主要および天然放射性元素の分布地図を作成できることが期待される。ただし、ピリオド3の観測データから元素の絶対濃度を算出するためには、多くの補正をシミュレーションに頼らざるを得ず、高確度な分析データを提供するには更なる検討が

必要である。

謝 辞

「かぐや」搭載ガンマ線分光計の開発・運用に当たり、JAXAの「かぐや」プロジェクトチームの皆様には多大なるご助力をいただきました。また本稿執筆にあたり、岡田達明博士には有意義な査読意見をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet Sci. Lett., 247, 171.
- [2] Korotev, R. L., 2005, Chemieder Erde, 65, 297.
- [3] Jolliff, B. L. et al., 2000, Journal of Geophysical Research, 105E2, 4197.
- [4] <http://www.kaguya.jaxa.jp/>
- [5] Hasebe, N. et al., 2008, Earth Planets Space, 60, 299.
- [6] Pieters, C. M. and Englert, P. A., 1993, Remote Geochemical Analysis, Cambridge University Press.
- [7] Adler, I. et al., 1973, Moon, 7, 487.
- [8] Felman, W. C. et al., 1999, Nucl. Inst. Methods, A422, 562.
- [9] Boynton, W. V. et al., 2004, Space Sci. Rev., 110, 37.
- [10] Trombka, J. I. et al., 1997, J. Geophys. Res., 102, 23 729.
- [11] Lawrence, D. J. et al., 2004, J. Geophys. Res., 109, E07S05.
- [12] Warren, P. H., 2005, Meteorit. Planet. Sci., 40, 477.
- [13] Kobayashi, S. et al., 2010, Space Sci. Rev., in press.
- [14] Yamashita, N. et al., 2010, Geophysical Research Letters, in press.
- [15] Lucey, P. et al., 2006, Reviews in Mineralogy Geochem., 60, 83.
- [16] Prettyman, T. H. et al., 2006, J. Geophys. Res., 111, E12007.