

月裏側高地物質サンプルリターンミッションの提案（日本惑星科学会誌・遊星人へ投稿中）

Proposed sample return mission from the lunar farside highland

大竹真紀子¹, 荒井朋子², 武田弘², 唐牛譲¹, 佐伯和人³, 諸田智克⁴, 小林進悟⁵, 大槻真嗣¹, 國井康晴⁶

1: 宇宙航空研究開発機構, 2: 千葉工大, 3: 大阪大, 4: 名古屋大, 5: 放医研, 6: 中央大学
Makiko Ohtake¹, Tomoko Arai², Hiroshi Takeda², Yuzuru Karouji¹, Kazuto Saiki³, Tomokatsu Morota⁴, Shingo Kobayashi⁵, Masatsugu Otsuki¹, Yasuharu Kunii⁶

責任著者：大竹真紀子

所属：宇宙航空研究開発機構

住所：〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

電話番号：050-3362-5998

ファックス番号：042-759-8516

電子メールアドレス：ohtake.makiko@jaxa.jp

（要旨）従来、月の地殻組成は月リターンサンプルや月隕石の分析値を基に推定されてきたが、最近になって、月周回衛星“かぐや”データを用いた研究などにより、既存の月リターンサンプルとは異なる組成の、より早い分化段階で形成した始原的な地殻物質が月裏側に存在する事が指摘されている。これら未採取の月裏側地殻物質を入手し、詳細な化学組成情報を得る事は、月の内部構造、バルク組成、月マグマオーシャンの固化過程（熱履歴）を知ることに加え、月・地球系の形成過程を考える上でも重要な課題である。本提案では、来る10年の惑星探査計画として、月裏側の高地地域から未採取地殻物質のサンプルリターンを行い、地上分析による詳細な組成分析、同位体分析を行うことにより、これら科学目標達成を目指すミッションを提案する。

1. はじめに

月地殻組成を把握することは、月の内部構造やバルク組成を理解し、また月マグマオーシャンの固化過程を知る上で非常に重要である。従来、月地殻組成の研究は月リターンサンプルや月隕石の分析[e. g., 1, 2], リモートセンシングによる観測データなどを用いて行われてきたが、最近になって月周回衛星“かぐや”他月探査衛星による、主にリモートセンシング観測の成果により、これまでの理解とは異なった化学組成の情報が得られつつある。例えば、月地殻に従来の推定より純粋な斜長岩が普遍的に存在する[3]ことや、月深部物質であるカンラン石が盆地周辺に分布すること[4]などが報告されている。

これらリターンサンプルや月隕石の分析研究、リモートセンシングによる研究の全てにおいて、新しい成果が示すのは、これまでの月リターンサンプルは月表層約1/6程度のごく限られた領域からのサンプルでしかなく、それらの分析値が月地殻の代表値ではないこと、これまでに採取されていない岩石がまだ多種存在するという事実である。

2. 提案ミッション概要

2.1 ミッションの目的

本ミッションでは、地球、月、火星など比較的大型の固体天体の進化や地球・月系の起源を知る上で、現状、唯一直接的に天体形成直後の地質を調べる事のできる月、を研究対象とし、月マグマオーシャンの全貌を解明することを目的とする。探査手法として、月マグマオーシャンの全貌解明の鍵となる月裏側の始原的試料を入手する、サンプルリターンミッションを提案する。月周回衛星“かぐや”の最新成果をもとに、月裏側に月マグマオーシャンの痕跡が認められるサンプルが存在する事が指摘されている。ただし、リモートセンシングによる観測データだけで行う研究には限界があり、今後の月惑星科学の飛躍的な進展には次段階としてのサンプルリターンミッションが必須である。月マグマオーシャンの痕跡が残る月裏側地域から、未採取の、アポロ試料とは全く異なるサンプルを持ち帰り分析することで、月科学だけでなく月惑星科学を飛躍的に進展させることができる。

“かぐや”による最新の月探査データは、月裏側高地の一部に、マグマの分化程度の指標であるMgナンバー(苦鉄質鉱物中のMg/(Mg+Fe)モル%)が従来知られていたサンプル値よりも高く[5](図1)、液相濃集元素であるThの濃度が最も低い[6](図2)領域が存在することを示している(図中で表側は経度0~90° および270~360°、裏側は経度90~270°の領域)。マグマから鉱物が析出する際に、固液分配作用によりFeに比べてMgがより多く鉱物中に取り込まれ、また、Thは鉱物中に取り込まれにくいためマグマに濃集する。そのため、より多くの鉱物を析出した後のマグマ(分化したマグマ)はMgナンバーが小さく、Th濃度が高くなり、そのマグマから析出する鉱物のMgナンバーも小さく、Th濃度は高くなる事が知られており、これらパラメータはマグマの分化程度の指標として使われる。そのため、前述の“かぐや”による成果は、月裏側の該当領域に表側サンプルよりもより分化度が低く、より早い段階でマグマオーシャンから固化した、未採取の地殻物質が数100kmスケールで存在する事を意味する。月裏側が表側よりも“始原的”になる理由としては、地球からの輻射などにより表側が裏側に比べて冷えにくかったために、対流で地殻物質が濃集した裏側から地殻成長が進んだとするモデル[2, 7]や、表と裏で垂直分化過程が異なり、表側では分化の進んだマグマからしか地殻物質(斜長岩)が浮上できなかったとするモデルなどが考えられる。

これまでの理解では、高地地殻はMg値が地球の初期地殻物質に比べて低い(Mgナンバーは50から70程度)と考えられて来たのに対し、Ohtake et al. [5]で報告されているような、より高いMgナンバーを持つ地殻物質はこれまでに得られておらず(間接的に月隕石の中にこの領域から来たものではないかと推定されているものは存在する[2])、その存在を直接的に確認し、Mgナンバーのバリエーション、詳細鉱物量比、年代測定などを行うことにより、地殻形成過程を考え、また月マグマオーシャンの組成(従来推定よりも高いMgナンバーを持つ可能性もある)や分化を推定することは、現在最も重要な科学目標の1つである。

これら理由から、複数あるサンプルリターン候補のうち、月裏側高地からこれら未採取地殻物質のサンプルリターンを行う事が最優先と考える。採取されたサンプルについて、地上における年代測定、主要・微量元素測定等を実施することにより、以下の項目を明らかにする。

●月裏側高地地殻の化学組成把握

月裏側高地地殻の化学組成を正確に把握するとともに、表裏の比較により月裏側地殻が表より本当に“始原的”なのか確認する。1点のサンプリングにより典型地質を理解するだけでなく、これまでのリモートセンシングデータにグラントトゥルースを与えることで、全球レベルでの化学組成理解の精度を高める。

●マグマオーシャンからの地殻固化年代および固化過程理解

既存のリターンサンプルおよび表側由来と考えられる月隕石に含まれる地殻物質と、新しくサンプリングする裏側の地殻物質の固化年代を比較することにより、表裏での固化時期差異（有無）を調べる。これによりマグマオーシャン固化過程に実測の時間軸を初めて導入する。

●地殻固化時のマグマオーシャン組成推定

主要・微量元素組成から、地殻が固化した時点でのマグマオーシャンの組成を推定する。表側サンプルから想定されていたマグマオーシャン組成との比較や、岩石学的研究成果と合わせる事で、バルクとしてのマグマオーシャン組成とその分化過程を定量的に理解する。

●月のバルク組成推定

上記マグマオーシャンの組成や別途推定する月マントル組成、コアサイズ推定など情報を合わせ、月のバルク組成を推定する。求められる月バルク組成と地球との比較により、地球・月系の起源物質の類似性・相違性について、定量的に把握する。

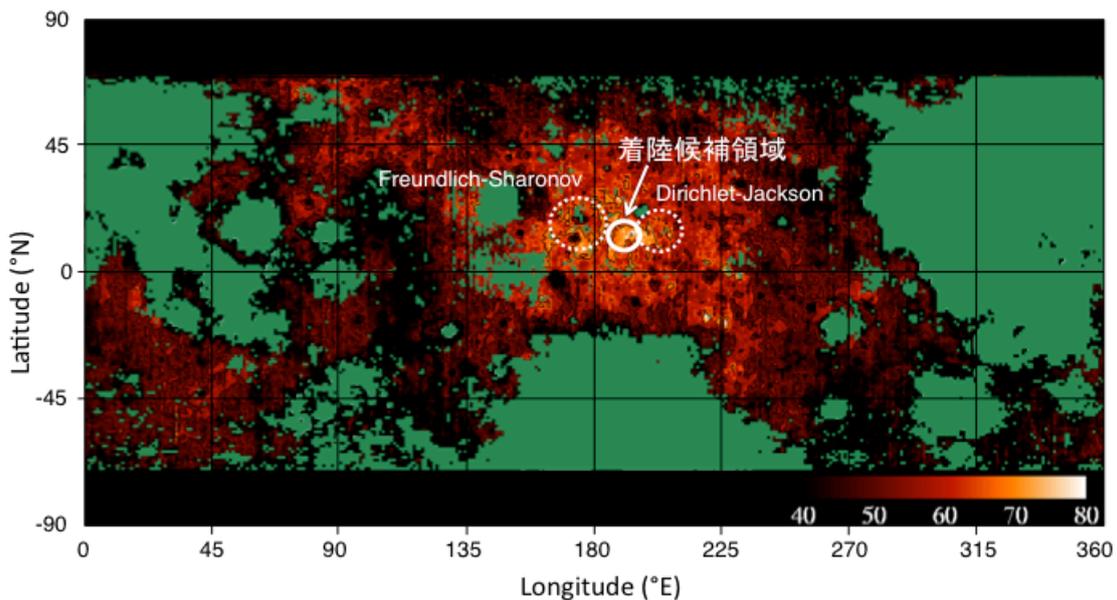


図1 高地地殻中の苦鉄質鉱物のMgナンバー分布（マグマの分化度を示す指標）

表に比べて裏側（経度90～270°）の赤道よりやや北側の領域にMgナンバーが高い領域が存在し、表と裏でMg#が異なる二分性が確認出来る。なお、最もMgナンバーが高いのはFreundlich-SharonovとDirichlet-Jackson盆地の間の領域。本ミッションにおける着陸候補領域を白丸で示す。

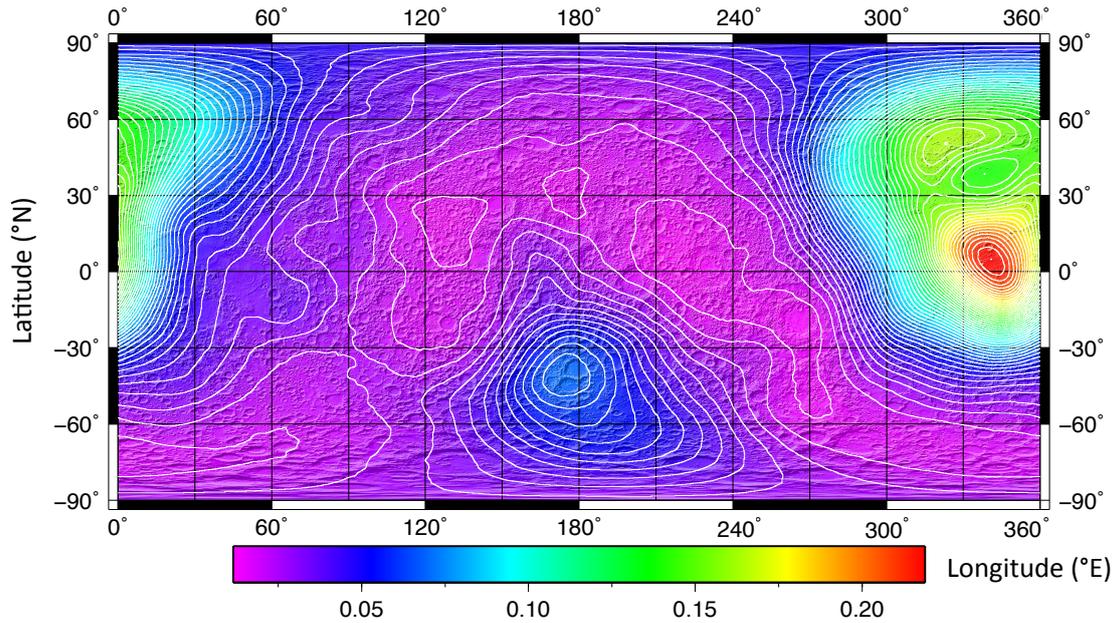


図2 かぐや搭載 γ 線分光計による月全球のTh濃度分布(2615 keVのカウントレート, cps) 表の大部分に比べて裏側(経度90~270°)にTh濃度の低い領域が広く存在することが解る。

2.2 ミッションのサクセスクライテリア

本提案においては、未採取地殻物質のサンプルリターンが最優先科学目的であるが、加えて可能であれば、同領域に飛散物として存在していると推定されるFreundlich-SharonovやDirichlet-Jackson, SPA(South-Pole Aitken)盆地のインパクトメルトを採取出来れば、これら盆地の形成年代を決定する事で、後期重爆撃期の有無が解り、さらに科学成果が大きい。

最優先科学目的である未採取地殻物質のサンプルリターンと、同時に達成できる可能性のある盆地のインパクトメルトのサンプルリターンの2つについて、その重要度から、本ミッションのサクセスクライテリアを以下のように設定する。

ミニマムサクセス：最優先科学目的に適合するサンプルを地上に持ち帰る

ノミナルサクセス：試料選別の上で最優先科学目的に適合するサンプルを必要量地上に持ち帰る

マキシマムサクセス：最優先科学目的に加えインパクトメルトサンプルを持ち帰る

なおサンプルリターンは本来、1カ所で全ての重要な月科学が解明されるものではない。これまでの成果をふまえて、高地地域の他にも液相濃集元素に富む領域(PKT: Procellarum KREEP Terrane [8])など複数の重要地域が認識されていることから、サンプルリターンミッションはシリーズ化すべきである。ただし、今回の提案ではシリーズ化は検討の範囲外であると想定されるため、シリーズ化を前提とせず、それら重要地域の中でも最重要な裏側高地からのサンプルリターンに限定して議論している。なお、今回提案する裏側高地からのサンプルリターンが実現され

れば、月高地地殻の組成理解については、それ単体で十分な科学的成果が得られるものであり、シリーズ化して初めて成果が得られるという性格のものではない。

サンプルリターンのシリーズ化を考える場合の、他のサンプリング候補地点としては、PKTやPKTと高地境界、表の典型地殻などがあげられる。

2.3 着陸地点

着陸地点としては、前述のMg値やTh量など情報から、裏側のFreundlich-SharonovからDirichlet-Jackson領域（図1の白丸領域）を提案する。なお、Thの低い領域は一部月表側にもあるが、Mgナンバーが高い領域は裏側のみに存在するため、着陸地点は裏側が必須である。

また、リモートセンシングデータから、目的とする始原的な地殻物質は該当領域に数百kmの広がりを持つことが解っており、着陸点は高地の大型盆地間でレゴリスに覆われた普遍的な場所であるため、クレータ内・周辺など特殊な場所に着陸する必要は無い。

2.4 他提案との協調

本提案では、月面からのサンプルリターンを行う事により、地球上に持ち帰ったサンプルの地上詳細分析を実施して前述のサイエンス目的達成を目指す。月面でより重要なサンプルを選定する目的や、インパクトによる生成物の分析による盆地年代の推定の目的においては、その場年代測定ミッションなど、その場観察のできる観測機器およびミッションとの協調が有効である。今後、この点についても検討を行う予定である。

3. 探査機構成および運用

探査機の構成は周回機、着陸機と帰還カプセルからなり（オプションでローバを検討）、着陸機に搭載するマニピレータと分光カメラを用いて周辺数mの範囲から簡易なサンプル選定をした上で、サンプル収集を行う。サンプルする高地地殻物質である斜長岩の岩石片は、現地に存在する主要な岩石であり、特殊なサンプルの選別は不要である。サンプルの選定手順は以下の手順でおこなう。a) 結晶質岩石チップのピックアップ、b) 分光観測（可能であれば主要元素測定）による斜長岩同定、c) 組織観察による角レキ岩化、再溶融・変成等2次過程を受けたかどうかの識別、受けないものを選定。

サンプル選定後、帰還カプセルによりサンプルを持ち帰る。持ち帰るサンプル量は1サンプルにつき分析に必要な量30g×10種とし合計で300gを想定する。ただし、分析に必要な最低サンプル量については、今後引き続き検討を行う。

なお、周回衛星は常に地球から可視となるラグランジュ点近傍のハロー軌道に投入し、サンプル選定・採取等行う間に地上との通信手段を確保する。

4. ミッションの科学目標、および「惑星探査の長期的展望」に於ける本提案の位置づけ

本提案で行う裏側高地地殻からのサンプルリターンは、第一段階地球型惑星固体探査パネルにおいて、“2. 年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明”に対応づけられる。特に、従来データの不確定性をなくし初期進化の描像をより具体化することが、今後の重要な科学目標と

考えられると記述されているが、中でも不定性の第二としてあげられている“表層物質の組成”の詳細な把握においては、いかにその場観測によるデータ取得技術が向上しようとも、サンプルリターンに勝るものはない。その意味で、本提案は“表層物質の組成”の詳細な把握を行い、さまざまな推定やモデルに結論を出すための最適、唯一の探査である。なお、第一段階地球型惑星固体探査パネルに対して、本提案に関連した提案が複数なされている[9-12]。

5. 搭載観測機器の候補、およびミッション科学目標との関係

観測機器としては、ノミナルではサンプル選別のための可視・近赤外分光カメラ（着陸機のマニピレータ周辺に搭載し、サンプルの反射スペクトルを1mm/pixel程度の高空間分解能で観測することにより、目的とするサンプルであるかどうかの識別と、持ち帰ることが可能なサイズ・形状であるのかどうかを判断する）を想定している。さらに着陸点周辺岩石の組成や状況を把握し、持ち帰るサンプルの分析データとの比較を行うための中レンジ分光カメラの搭載が望ましい。また、マニピレータによるサンプル採取のために、やや広角の単バンドカメラが必要である（マニピレータの稼働領域などによっては1台でなく複数カメラが必要な場合有り）。

6. 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ

前述の科学目標達成のため、下記のサンプル採取および採取地点周辺の分光観測が必要である。

サンプルの総質量：目標300g（Minimum successでは30g程度以上）

サイズ：レゴリス、小岩片（2, 3cm径程度）

種類（個数）：レゴリス10箇所、小岩片20個程度（1種の質量10g以上）

化学組成：高地物質+（Maximum successではインパクトメルト）

サンプル採取領域：Nominal successでは着陸機周辺数m範囲のサンプリング。Maximum successではローバを用いて着陸機周囲1km程度からのサンプリング。

サンプル採取地点周辺の観測：着陸機搭載の中レンジカメラにより、着陸機周辺1.2km程度領域の分光観測データを取得する。観測機器として、SELENE-2に提案中の分光カメラALISと同程度のカメラを想定する（参考：ALIS提案書[13]）。

7. 開発体制

現在想定している開発体制を以下に示す。

大竹真紀子：サンプル選定用分光カメラPI担当、かぐや搭載分光カメラ(MI)PI の経験有り

荒井朋子：採取サンプル選定法検討担当、隕石、アポロサンプル分析経験有り

武田弘：採取サンプルの目標設定担当、隕石、アポロサンプル分析経験有り

唐牛譲：帰還カプセル最適化検討を担当（帰還サンプルは、はやぶさのサンプラーをベースに考える）、サンプルキュレーション検討、はやぶさの帰還サンプルキュレーションの経験有り

佐伯和人：着陸機搭載周辺観測用中レンジ分光カメラPIを担当、SELENE-2に分光カメラPIとして提案中

諸田智克：サンプル選別、サンプリング等運用全般を担当、複雑な運用を行った、かぐや搭載観測機器LISMの運用、コマンド作成を担当の経験有り

小林進悟：計測機器放射線耐性評価，計測機器の運用中取得データ解析を担当，かぐやの γ 線データ解析経験あり

大槻真嗣，國井康晴（工学系）：サンプル採取機構担当（マニピレータを検討中），SELENE-2用マニピレータ，および次期月探査WGで行ってきたサンプルリターンミッションの検討経験有り

8. 技術課題

8.1 サンプルング技術

着陸機に搭載するマニピレータを用いてサンプルングを行う。SELENE-2をはじめ将来探査に向けてこれまでも検討されており，技術的に大きな課題は無いが，国内でのマニピレータを用いた試料サンプルングの実績がないことから，目的に合った適切なサイズや機構等，引き続き検討が必要である。

マニピレータを用いたサンプルング機構は，月探査だけでなく火星等他の天体探査に置いても応用可能な汎用的な技術であり，開発必要性は高い。

8.2 サンプル帰還技術

帰還サンプラー本体は，“はやぶさ”に搭載されたカプセルを想定しているが，月面からの離陸，地球軌道への帰還は燃料検討等含めて新規技術である。ただし，1次的な検討は次期月探査WGで行われたサンプルリターンミッションの検討[14]において行われており，ある程度の実現性が確認されている。そのため，本技術開発に必要な期間（開発終了まで）は3-8年程度と想定している。次期月探査WGで行った検討では，サンプル帰還の手法として2つの方法，1)ダイレクトに帰還カプセルが上昇して帰還するケース，2)周回軌道上に衛星を残してそれを利用するケース，が検討されており，どちらの手法とするのかによって開発要素やコスト等大きく異なるため，本ミッション実施に向けては早期のトレードオフが必要である。

なお，月への軟着陸技術は，表側については検討中のSELENE-2ないし小型試験衛星SLIMで実証されることを想定し，ここでは技術課題としてはあげていない。

9. まとめ

最近の月周回衛星“かぐや”データ等を用いた研究結果により，既存の月リターンサンプルの分析結果を中心に考えられてきた月地殻化学組成，地殻形成過程，月マグマオーシャンの組成などに更新が必要である事が明らかとなった。特に，月裏側の高地地域の一部に，既存の月リターンサンプルとは異なる組成の，より早い分化段階で形成した始原的な地殻物質が存在する事が指摘されており，これら月裏側地殻物質を入手し，詳細な化学組成情報を得る事は，月の内部構造，バルク組成，月マグマオーシャンの固化過程や熱履歴を知ることに加え，月・地球系の形成過程を考える上でも重要な課題である。この課題を解明するために最も有効な探査として，月裏側のFreundlich-SharonovからDirichlet-Jackson領域の，ベースン間で原始地殻の攪乱の少ない領域に着陸し，未採取地殻物質のサンプルリターンを行い，地上分析による詳細な組成分析を行うミッションを提案する。

参考文献

- [1] Warren, P. H. 1993, American Mineralogist 78, 360.
- [2] Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Let. 247, 171.
- [3] Ohtake, M. et al., 2009, Nature 461, 236.
- [4] Yamamoto, S. et al., 2010, Nature Geoscience 3, 533.
- [5] Ohtake, M. et al., 2012, Nature Geoscience 5, 5384.
- [6] Kobayashi, S. et al., Earth Planet. Sci. Let. (In press).
- [7] Arai, T. et al., 2008, Earth Planets Sci. 60, 433.
- [8] Jolliff, B. L. et al., 2000, J. Geophys. Let. 105, 4197.
- [9] 荒井朋子他, 第一段階地球型惑星固体探査パネルへの提案書, 月コペルニクスクレータのリターンサンプルの年代分析による太陽系相対年代学(クレータ年代学)の検証と確認.
- [10] 荒井朋子他, 第一段階地球型惑星固体探査パネルへの提案書, 月コペルニクスクレータからの地殻・マントル岩石のサンプルリターン.
- [11] 荒井朋子他, 第一段階地球型惑星固体探査パネルへの提案書, 月の表裏地殻のサンプルリターン: 月出発物質への同位体組成制約.
- [12] 大竹真紀子他, 第一段階地球型惑星固体探査パネルへの提案書, 月の起源と進化における重要科学項目の解明.
- [13] 佐伯和人他, SELENE-2 観測機器提案書 (ALIS).
- [13] 報告書: 月サンプルリターンシステムの概念検討 (JAXA 資料).