

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

月岩石試料と月探査データに基づく月地殻の  
形成過程

Formation processes of lunar crust on the  
basis of lunar rock samples and remote  
sensing data

申請者

長岡 央

Hiroshi NAGAOKA

物理学及応用物理学専攻 宇宙放射線物理学研究

2014年12月

月は、他の地球型惑星に比べて、初期惑星進化の情報をよく保存している天体である。従って、月の形成過程の理解は、地球を含めた大型の岩石惑星が、どのような物質進化を経て現在の姿にいたったか考える上で重要な起点となる。しかし、現在の月を構成している地殻成分は、多種多様な組成と組織をもつ。これは月が地殻とマントルに分かれた後も、継続的な火成活動や隕石衝突による変成作用を経て、現在の姿に至ったことを反映している。そのような月試料の中から、初期地殻形成時の情報を得るためには、隕石衝突による変成や汚染の影響の少ない形成初期の地殻成分の情報が極めて重要である。アポロ計画で回収された月試料は、表側のごく限られた地域から回収されたものである。しかも多くの回収試料は、Procellarum KREEP Terrane (PKT)と呼ばれる高Th濃度領域からの元素の汚染を受けた角礫岩である。

月周回探査や月隕石の発見により、月の全球的な地殻情報が得られるようになると、アポロ試料分析結果に基づく従来の月地殻形成モデルであるシンプルなマグマオーシャン説の問題点が浮き彫りとなってきた。さらに、従来の遠隔探査で得られた元素情報は、特に低濃度領域では精度が低く、詳細な月モデル化には不十分なデータだと言える。このような背景に立ち、本論文では全球からのランダムサンプリングである月隕石を含めた月試料を分析して得られた高精度な元素情報と、日本の探査衛星「かぐや」が取得した最新の全球観測結果とを比較した。これらの観測事実はアポロ試料に基づく従来の月形成モデルでの説明は不十分であることを明らかとし、モデルの修正が必要であることを述べている。特に、かぐや観測によりクレータ中央丘から発見された純粋斜長岩帯の存在については、従来のマグマオーシャンモデルでは、主要な地殻成分として認知されていなかった。申請者は、月隕石の中から複数の純粋斜長岩を発見し、その分析データを基に、その起源について考察している。

本論文は7章よりなるが、以下に各章の概要を記し評価を述べる。

第1章では、序論として太陽系固体惑星の起源と進化という惑星科学の根源的テーマの中で、「なぜ月を研究するのか」というその研究動機について述べている。地球のような大型の岩石惑星では地殻物質の始原的情報が長期の火成活動により消失してしまう。本章では形成初期からの物質情報を最もよく保存している月を研究する動機とその重要性が、詳しく述べられている。また、固体惑星の起源と進化を研究する上で、その天体の元素組成を把握することの重要性についてまとめられている。

第2章前半では、月科学分野において現在一般的に用いられている用語や月の地域について、その背景にふれながらまとめられている。本章後半ではアポロ試料に基づく月地殻形成モデル「マグマオーシャン説」と、月隕石と「かぐや」の成果から導かれる月のモデルを対比させ、ア

ポロ試料に大きく依存した月地殻形成モデルの問題点について言及している。これは、月隕石研究と全球遠隔探査の情報がアポロ回収試料では知り得なかった月全球の地殻情報を含んでいるためである。本章では、これらの最新データを統合的に取り扱い、全球的な地殻情報から得られる新たな知見を反映させた月地殻研究の必要性が強調されており、本研究の目的が整理されている。

第3章では、アポロ探査以後最大規模の月探査衛星かぐやの概要とその成果がまとめられている。かぐやは、14個の科学観測機器を搭載し、月全球をくまなく観測した。申請者はガンマ線分光計（KGRS）の解析チームのメンバーとして、そのデータの校正や解析に携わってきた。かぐやの観測で得られた結果から、月裏側においてマグマオーシャンから最初期に固化したと考えられる斜長岩地殻の存在や、大規模クレータの中央丘には殆ど苦鉄質鋳物を含まない純粋斜長岩（PAN）の存在が示された。この章では、かぐやの高精度観測で初めて明らかとなった観測事実と隕石研究との関連性を示し、隕石研究の意義とその統合的な解釈の必要性が強調されている。

第4章では、本研究で使用した月試料の分析方法と実験概要についてまとめている。本研究では、①原子炉中性子を用いた中性子放射化分析、②マイクロスケールまで絞った電子線を用いたX線分析、③可視近赤外領域の反射光を観測した反射分光、これら3種類の異なる分析実験を併用して月試料を測定している。本研究では、月試料は希少試料であるので、少量の試料量からできる限り多くの惑星化学的情報を得るために、複数の分析手法を併用していることに特徴がある。試料の全岩元素組成は中性子放射化分析により求め、試料中の鋳物の元素組成は電子線照射によるX線分析、可視近赤外反射分光を使用している。申請者自身が、手法の異なる隕石の分析と月探査機の観測データの解析を行うことで、それぞれの元素情報と鋳物情報から得られた結果を統合的に議論することが可能となり、この研究手法は本研究の特色である。

第5章では、上に述べた分析手法を用いて得た月試料の分析データを基に、それらの化学的・岩石学的特徴をまとめ、それぞれの起源について考察している。斜長岩地殻由来の月隕石は、表層での隕石衝突による混合を受けた角礫岩が多くを占め、かつ苦鉄質鋳物を多く含むのが特徴である。したがって、苦鉄質鋳物をほとんど含まないPANの存在については、月隕石研究では今まで言及されていない。この研究の焦点は、裏側高地が起源とされる月隕石 Dhofar 489 グループから純粋な斜長岩片を複数個発見し、遠隔探査で提唱されたPANの存在を月隕石とアポロ試料の研究に基づき実証したことである。岩石学・鋳物学的研究から、これらの岩石片は月隕石中から見つかる角礫岩片よりもさらに斜長石に富み（98%以上）、PAN層に由来する地殻成分であることを物質科学の立

場から初めて実証した。さらに、これら純粋斜長岩片に少量含まれる苦鉄質鉱物の Mg ナンバー (Mg#) は、60 近くから 80 以上と大きな組成変化をもつことを本研究で初めて明らかにしている。

第 6 章では、上で述べた月隕石とアポロ試料の分析結果及びかぐや観測データの解析結果を基に、月斜長岩地殻の化学的特徴について議論し、より統合的な考察を行っている。月斜長岩地殻について、隕石衝突の影響を強く受けた角礫岩混合層と純粋斜長岩層を対比させている。純粋斜長岩中の苦鉄質鉱物の Mg# の不均質性について、かぐやの観測結果と比較し、その原因を議論した。Mg# の不均質性は、(1) 純粋斜長岩層の全球的な集積メカニズムに起因する場合と、(2) より局所的な元素分配により引き起こされた場合の二通りの可能性について議論している。ここで述べられている形成メカニズムはアポロ試料のみに基づく均質な斜長岩地殻モデルでは説明できず、斜長岩地殻の分布は従来のモデルを大きく修正し、より複雑な形成メカニズムを経て現在に至っていることを示している。

第 7 章では、本研究論文の総括を行い、今後の月探査に向けた展望をまとめ、将来の月試料回収計画における科学目標の指針を提案している。

本論文を要約すると、申請者は全球探査に基づいて提唱された純粋斜長岩について、異なるいくつかの分析方法を用いて、初めて月隕石から純粋な斜長岩片を複数個発見した。さらに、その隕石結果とアポロ試料の分析結果及び遠隔探査の観測結果とを組み合わせることで、月地殻の初期物質である純粋斜長岩が、月の全球にわたり広く分布していることを固体物質の分析の立場から実証した。純粋斜長岩片に含まれる微小の苦鉄質鉱物の Mg# が従来示された値に比べて、マグネシウムに富む組成から鉄に富む組成まで幅広く変化していることを初めて明らかにした。従来の鉄に富んだマグマから地殻を作る単純なマグマオーシャン説では、この Mg# が示す幅広い組成差を説明できないことを指摘している。そのために、純粋斜長岩の生成には新たな形成過程が必要であることを示唆している。申請者は、月隕石から得られた高精度な鉱物及び元素情報を反映させ、その形成過程に化学組成への制約を与え、初期地殻成分の形成の理解を進展させた。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

2014 年 12 月

審査委員

主査	早稲田大学教授 (理学博士; 早稲田大学)	長谷部信行
	早稲田大学教授 (理学博士; 京都大学)	鳥居祥二
	早稲田大学准教授 (博士(理学); 早稲田大学)	太田亨
	東京大学名誉教授 (理学博士; 東京大学)	武田弘