

## 月の太古の火成活動

広島大学 寺田健太郎

### はじめに

私達を魅了する満月のウサギのシルエット。あの「白と黒」の美しいシルエットは、いつ頃どのようにしてできたのでしょうか？この素朴な疑問は、実は「月の科学」において未だ解決されていない最も重要な研究テーマの一つです。筆者らは「月隕石の局所年代分析」という世界的にも類を見ない独自の分析法を駆使し、この問題解明に取り組んでいます。

### 研究の背景

「月の科学」の始まりは、約400年前にガリレオ・ガリレイらが月に望遠鏡を向け、月面の凸凹した地形を詳細に観察した頃まで遡ります。しかし月はいつも同じ面を地球に向けているため、全球規模で「月」を議論できるようになったのは、周回衛星が打ち上げられた1960年代以降のことです。このリモート観測により、(i)月の表面の白く凸凹した「高地」と呼ばれる地形と黒くなだらかな「海」と呼ばれる地形があること(図1)、(ii)「海」の多くは月の表側の大きい盆地を満たすように存在しており、裏側には「海」は殆ど存在しないこと、が明らかになりました(図2)。また、1969～1976年の米国のアポロ計画・旧ソ連のルナ計画によって持ち帰られた約380kgの月試料を実験室で詳

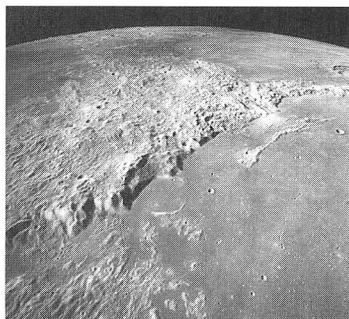


図1. 月の表面の白く凸凹した「高地」と呼ばれる地形と、黒くなだらかな「海」。実際には、地球のような「液体の水」が存在している訳ではありません (NASA 提供)

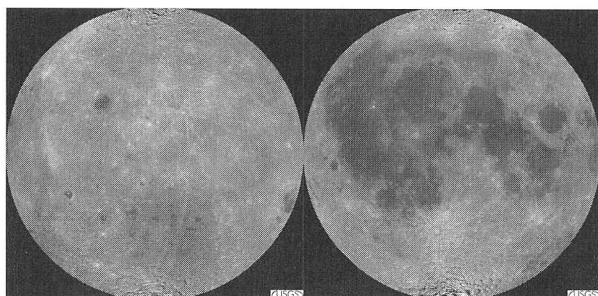


図2. 月の裏側(左)と表側(右)の写真。「海」は表側に集中している(USGS提供)

細に調べることにより、「高地」と呼ばれる領域は カルシウム(Ca)やアルミニウム(Al)やケイ素(Si)を主成分とする斜長岩からできており、「海」と呼ばれる領域は火山活動によって地下から噴出したマグマが冷えて固まった玄武岩でできていることがわかりました。また、後述するような放射年代分析の結果から、「高地」と呼ばれる領域は今から41~45億年前に、「海」は今から30億年前から39億年前にできたことがわかりました。また多くの衝突溶融岩(隕石衝突によって融けた岩石が再び固まったもの)が見つかり、その年代が38~40億年の年代を示す事から、今から約39億年前頃に、月面に直径数百kmの盆地やクレーターと呼ばれる「お椀型」の窪地を形成するような彗星や小惑星などの衝突が立て続けに起こった時期「後期重爆撃期」があったことがわかっています。このことから、月の歴史は、白く見える高地が45~41億年前にでき、39億年前頃に大きな盆地やクレーターができ、その後、39~30億年くらい前に黒く見える「海」ができた、というのが定説になっています。

ところが、1990年代になり、NASAが再び月を目指したクレメンタイン、ルナプロスペクター探査機の月全球のリモートセンシング観測により、アポロやルナの試料は、KREEP 物質と呼ばれるカリウム(K)、希土類元素(REE; Rare Earth Element)、リン(P)、ウラン(U)、トリウム(Th) 等の特殊な微量元素(専門用語で「不適合元素」)が多い地域から採集されていることが明らかになってきました。これにより、広く受け入れられている「月の進化論」は化学的に偏った岩石試料を元に構築されている可能性が指摘され始めました。

一方、未探査領域の「海」の年代を推察する方法に、単位面積当たりのクレーターの数密度分布を比較し、地質ユニットの相対年代を議論するクレーター年代学というアプローチが考案されています(隕石等の物体が月面に均等に衝突すると仮定すると、古くにできた領域は、新しくできた領域よりも、隕石物質に曝される時間が長いため、単位面積当たりのクレーターの数が多い)。Neukum等のグループは、アポロ計画で着陸した地点の月試料の絶対年代と単位面積当たりのクレーター密度分布を基準に、過去45億年間にわたる絶対年代と単位面積当たりのクレーター密度分布の相関を数式化し、未探査

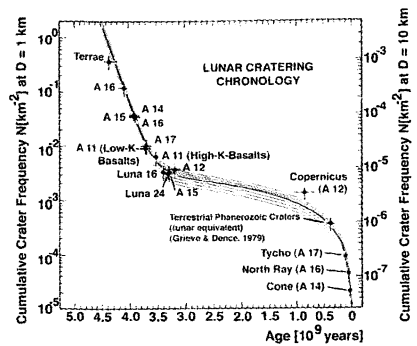
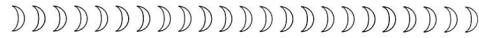


図3. 絶対年代とクレーター密度分布の相関図。アポロ・ルナ計画で採取された岩石試料の絶対年代とその地域のクレーターサイズの密度分布の関係を外挿することで(経験則)、未探査領域のクレーターサイズの密度分布から絶対年代を知る方法。(D. Stöffler & G. Ryder G.: Rev. Mineral. Geochem. 60, 519(2001)より引用)



領域の絶対年代を推察する方法を提唱しました(経験則に基づくため、モデル年代とも言われる。図3参照)。ドイツのHiesinger等のグループは、月周回衛星ルナ・オービター等で取得された月の表側の「海」のクレーターのサイズ分布を精査し、(1)月の火成活動は、約40億年前に始まり、約11億年前に終わった事、(2)玄武岩の地質ユニットの大多数は 30~38億年前に形成された事、(3)20~22億年前にも火成活動が活発になった可能性があること、(4)火成活動時期には地域性があり、Oceanus Procellarum(嵐の大洋)領域では最も若い11億年前の地質ユニットが存在すること、などを指摘しています(図4、5参照)。但し、この年代の評価方法は、クレーター密度のカウント方法や太陽高度依存性などの不確定要素の多い「モデル年代」であることに注意を払う必要があります。現在、「かぐや」の高解像度の画像データを用いて、月の表側の年代値の追試、及び裏側のクレーター年代について調査が進められており、その結果が楽しみです。

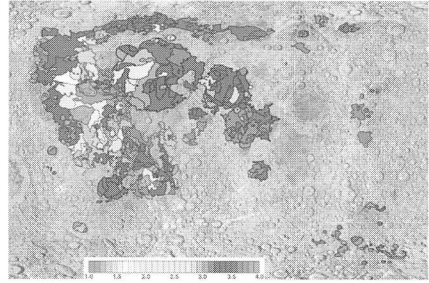


図4. リモート観測によるクレーターサイズの密度分布のデータに基づいた、未探査領域の「海」のモデル年代のマップ(H. Hiesinger et al.: LPI XXXIX Contribution No. 1391 (2008)より引用)

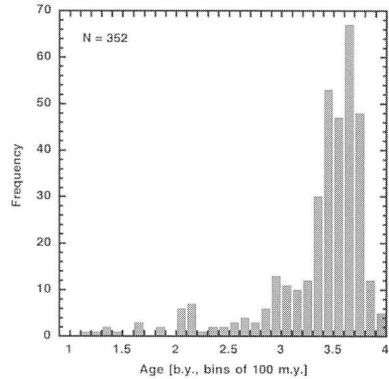


図5. クレーター年代学に基づく、月の表側の「海」の年代分布(H. Hiesinger et al.: LPI XXXIX Contribution No. 1391 (2008)より引用)

## 月隕石からの年代情報

一方、近年、南極氷床や砂漠などから、月面を飛び出し地球に飛来したと考えられる隕石(月隕石)が数多く発見されています。アポロ・ルナ試料が、月の表側の赤道付近に限局したサンプルであるのに対し、これらの月隕石は、月の裏側や深部を含む未探査領域からのサンプルである可能性が高く、「月の地殻進化が全球レベルでどのように起こったのか」を理解する上で重要な鍵として注目されています。しかし、これらの月隕石の多くは、起源の異なる岩石片や鋳物片の寄せ集めである多種混合角礫岩であり、更に角礫化時(月面上でのインパクト時)の熱変成等により放射壊変系が乱されているなど、火成活動に関する正確な年代情報を引き出す事が困難とされてきました。

そこで筆者らは、広島大学の年代分析装置SHRIMP(図6)の高い空間分解能を駆使し、リン酸塩鉱物の局所ウラン-鉛年代分析の開発に取り組んできました。数ppm~数百ppmのウランを含むリン酸塩鉱物を狙って、約10 $\mu$ mに絞った酸素イオンビームを照射する我々の手法(局所分析と呼びます)は、「海」起源と「高地」起源の碎屑物の混合のような複雑な組織を持つ月試料の年代分析に適しています。また、ターゲットのリン酸塩鉱物は比較的閉鎖温度が高く(~600 $^{\circ}$ C)、インパクトのような2次のイベントに対し放射壊変系がリセットされにくいこと、また多少のインパクトにより変成を受けた場合にも、 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ 系、 $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ 系の二つの壊変系を同時に評価する事により、結晶化年代と変成年代の二つを導出できることなど、角礫質の年代分析に適しています。筆者等はこれまで、約10ヶの「海」起源月隕石のU-Pb年代分析を行い、未探査領域の火成活動の絶対年代を明らかにしてきました。まだサンプル数が少ないものの、月隕石が示す「海」の火成活動は概ね29~39億年の年代を示し、アポロ計画やルナ計画の着陸地点の年代と調和的な結果となりました。このことから、ウサギの姿に見える黒いシルエットは、おおよそ39億年前から29億年前までの約10億年間の間に形成されたと考えられます。このことは、リモートセンシング観測による「クレーター年代学」の結果(図5)とも整合的です。

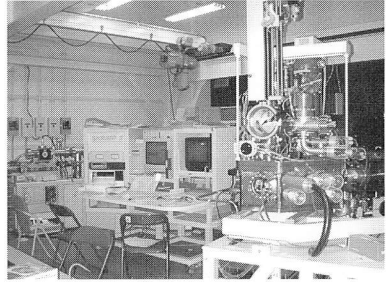


図6. 広島大学設置の年代分析装置SHRIMP

しかし筆者等は最近、カラハリ砂漠で発見されたボツワナ産月隕石Kalahari 009隕石中に43.5億年前の火成活動の痕跡を発見しました(図7、図8)。この結果は、これまでアポロ・ルナ月試料の放射年代分析やリモートセンシング観測によるクレーター年代などから知られていた月の火成活動時期である29~39億年を約4億年も遡るもので、月形成直後の数億年内(つまり従来の説では高地の形成時期)に「海」を形成する火成活動が既に始まっていたことを示唆します。さらに興味深いことは、このKalahari009隕石は、これ

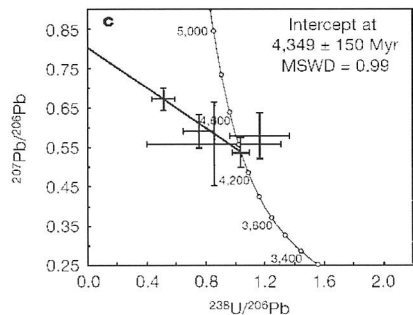
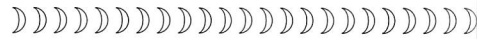


図7. トータルPb/Uアイソクロンダイアグラム。分析データの回帰直線とU-Pbの進化曲線との交点から43.49 $\pm$ 1.50億年という結晶化年代が得られた(Terada et al.: Nature 450, 849(2007)より抜粋)



までに見つかっている「海」起源の玄武岩やリモートセンシングで観測される「見えている」「海」のThやKREEPの元素濃度よりも1~2桁低いことです。これまで、玄武岩がKREEP成分を多く含む理由として、(1)月のマグマオーシャンの最終固化物質であるKREEP層が地殻直下に44億年前頃には形成し、その後、より深部に起源を持つ玄武岩マグマが噴出する際にKREEP層を横切る為にKREEP物質で汚染される、(2)高濃度のKREEP成分こそが玄武岩マグマの熱源である、という説が提唱されてきました。しかし、Kalahari 009隕石のKREEPやThの濃度は非常に低く、KREEP層によって汚染されていると考えられにくいことから、(1)KREEP層が月全球規模で発達していなかった可能性や、(2)KREEP成分を熱源としない玄武岩マグマの生成過程、を示唆する結果として、従来の「月の進化モデル」の再考を迫る重要な知見となりました(Terada et al. Nature 2007年12月6日号)。現在、筆者等は、「巨大インパクトの数億年後に誘発される下部マントルの上昇に起因する火山活動説」が有力であると考えています。月形成直後の約45億年前の太陽系内にはまだ微惑星が存在しており、直径約千kmの盆地を形成しその後、下部マントルの上昇を誘発させる巨大インパクトが起こっていた可能性が十分に考えられるからです。

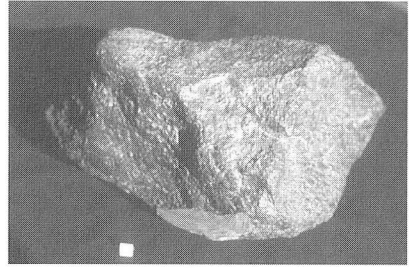


図8. 43.5億年前の月最古の火成活動の痕跡を残すカラハリ009隕石。左下のサイコロの一边は1cm (Münster大学 Bischoff氏提供)

## Kalahari009隕石とCryptomareとのリンク

地上からの観測やリモート観測から、反射率の高い白っぽい領域(高地起源の碎屑物の多い領域)にできたクレーター周辺の、下層の黒い物質(玄武岩マグマ?)が掘り起こされ、まき散らされた特徴(ダーク・ハロー・クレーター(DHC))が見つかり、白い高地起源の碎屑物の下に「Cryptomare(埋もれた海)」が存在することが予想されてきました(図9)。Cryptomareの概念自身には特に年代学的な制約はないものの、「海」の表面を碎屑物で覆うイベントとして約39億年前の後期重爆撃期の可能性が高い事から、Cryptomareの形成年代は39億年よりも古いである

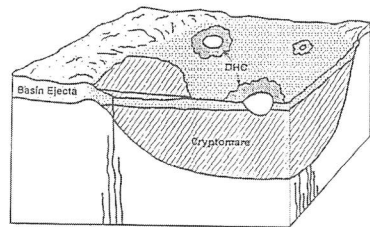


図9. Cryptomare(埋もれた海)の概念図。Antonenko et al. (Earth, Moon and Planets, 69, 141 (1995))による

うことが予想されてきました。また、近年のリモート観測からは、掘り返されたダーク・ハロー・クレーター(DHC)のチタン含有量が求められ、Cryptomareは $\text{TiO}_2 < 1.5$ 重量%以下の極低チタン玄武岩に分類される玄武岩であることもわかってきました。

今回発見されたKalahari009隕石のもう一つの特筆すべき特徴は、形成年代が43.5億年と非常に古いにも関わらず、宇宙線照射年代が約220年と若い事です。この事は、この岩石が43.5億年前に固結後、長い間宇宙線照射が遮られる少なくとも月面から数mの深さに埋もれていたことを意味します。また、対応する40億年よりも古い年代を示す地質ユニットや、低いTh濃度を示す地質ユニットがリモート観測で見つからないこと、更にはKalahari009隕石中のチタン濃度が低くDHCのチタン濃度と類似する事などから、筆者等は、Kalahari009隕石は人類が初めて手にした「知られざる太古の海(cryptomare)」からの岩石(隕石)である、と考えています(Terada et al. Nature 2007年12月6日号)。

この隕石は、これまで発見された月隕石の中で最も大きく13.5kgもあるため、世界中の研究者が手にして研究することが可能です。これまでベールに包まれてきた、地球-月システムの初期進化プロセスを解明する「ロゼッタストーン」になると期待されます。

## 今後の展望

太陽系46億年の歴史において、天体と天体の衝突による惑星物質の角礫化は、月面に限らず、普遍的かつ頻繁に起こっていた天体現象と考えられています。実際、地球に飛来する隕石の多くは角礫化した複雑な鉱物組織を示しています。我々が開発した鉱物レベルの年代分析というユニークな分析技術を、これまでuntouchableであった角礫岩質隕石に応用することにより、これまでベールに包まれてきた太陽系創成期における微惑星の複雑な進化過程を一つ一つ紐解き、「新しい太陽系年代学」を拓きたいと考えています。

### 著者紹介



#### 寺田健太郎(てらだ・けんたろう)

広島大学大学院理学研究科・准教授

生まれも育ちも甲子園。1994年、大阪大学理学研究科物理学専攻で、ブラックホール新星のX線観測に関する研究で博士号(理学)を取得後、広島大学に着任。以来、イオンマイクロプローブSHRIMPによる局所年代分析法の開発と「太陽系の起源と進化」に関する研究に従事。2006年より現職。