

月面物質の重要性

- 惑星物質の宝庫、地球再発見の場所として -

三浦保範（山口大学理工系大学院）

yasmiura@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

要旨：

月面には、月・地球・小惑星帯・彗星起源の 4 種類の鉱物物質が分布する惑星物質の宝庫である。月面における地球起源物質は地球の大衝突イベントと生命絶滅進化を示し、その他の月外物質は有機物と水分子そして重元素の保存を示している。地球惑星に残っていない物質が分布する地球再発見ができる重要な場所である。多起源の物質からなる月面物質のその場分析と分析測定（地球内外基地など）技術開発を進展させることによって、月面が火星探査などにおける宇宙燃料補給所としての好適な惑星物質の宝庫であるとともに、私たちの住む地球惑星をさらに深く知ることのできる身近で重要な天体である。

1. 夢のある月面試料のサイエンス：

米国のアポロ月面探査と旧ソ連（ロシア）ルナ探査で地球に持ち帰られた月面試料は、それまでの観測データからの推測を変えて、新しい情報をもたらしている。地球からみえる大きな地形でその起源が不明であった円形のクレーター構造は、火山（地球のサブダクション帯での物質圧縮・放出プロセス）型カルデラ地形ではなく、隕石（正確には隕石母天体の月外物質）による衝突孔地形を埋めた玄武岩（地球でいう火山岩）が孔底から充填している比較的古い地形（いわゆる月のクレーター）であることが分かった。月面の試料の研究から、多くの事実が分かり、宇宙地球科学が飛躍的に進展し、また月に特徴的な材料工学への新たな挑戦が始まっている（表 1）。

表 1 . 1960 年代の月面探査試料で主な新たに分かったこととこれからの問題点

事項	新たに分かったこと	これからの問題点
試料の年代	月で最古の試料	残存している場所と割合
衝突物質	月 - 地球系の巨大衝突	月と地球起源の残存物質の詳細
地球の衝突物	地球の衝突物質が堆積	球粒の年代測定の推進
月外隕石物質	隕石母天体起源	炭素質隕石と OH 含有鉱物探査
月外彗星物質	彗星の衝突（地形のみ）	残存場所や元素の探査
月面の水合成	水素と酸素の合成反応	月面からの分離技術の推進
資源素材探査	還元鉄球粒の生成	元素濃縮（衝突）場所の探査

- 1) 月の試料年代：月面試料で新しい年代測定法が生まれ、太陽系では隕石と共に最古の試料が発見され、月誕生期までの情報が逆れる。これまで月の赤道付近の試料であったが、別の月面場所と残存している割合の調査が期待されている。
- 2) 衝突物質：月は火星大天体が原始地球に衝突してできた高温破片の集合体であると理解されているので、月 - 地球系の巨大衝突を示す物質による月クレーターの形成過程、そして月地形を形成したときの地球起源の残存物質の詳細の調査が期待されている。
- 3) 地球の衝突物：地球に小惑星天体が衝突したときの物質が地球では海底に堆積しているが、プレートテクトニクスの運動で古いものは破壊されるか地球内部で分解されているので地球での研究に限界がある。しかし、海水と地殻活動のない月では、地球からの衝突物（ガラス球粒など）が残存しており、将来地球の岩石（花崗岩、片麻岩など）の変形が発見される可能性が高い。月には大気がないので地球の大気のようにブレーキがかからないのでガラス化がかなり進んでいると思われる。月面には海水がないので、堆積はすべて衝突物の落下運動によるものである。したがって月面で衝突孔が隣接する場合に堆積物質の起源の解釈には、多面的に見ることが必要になる。
- 4) 月外隕石物質：月面には小惑星の隕石母天体起源のものが直接衝突しているが、大気がないので衝突破壊されるため、元素が多く残存している。月面に、月外隕石物質起源の元素が多いとして有名になった親鉄元素（鉄・ニッケルなど）と白金族元素（白金・イリジウムなど）は、この例である。地球の地質境界（白亜紀末期など）で発見された親鉄・白金族元素は衝突飛散して再堆積した元素である。月面に大気がなくても、斜め衝突によって生き延びた月外隕石物質として炭素質隕石があり、この中に OH 基を含む含水珪酸塩鉱物が NASA-JSC の研究者によって発見され話題になっている。
- 5) 月外彗星物質：大気がないので、彗星が大気で燃焼せず直接衝突しているのが地形から推測されているが、残存場所の調査や軽元素の探査が期待されている。
- 6) 月面の水合成：月面には太陽風起源の水素イオンと岩石中の酸素と合成反応を起こしたら月面の水ができるので、効率的な月面からの分離技術の進展が望まれる。また、南極付近のクレーター内部に彗星の残骸が氷結して残存している可能性があるのは、有機物の発見に大切な情報です。
- 7) 資源素材探査：月面の岩石に多い $\text{Si} \cdot \text{Al} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Fe} \cdot \text{O}$ の資源利用と還元鉄球粒の衝突生成、そして数回に及ぶ衝突高温分離による元素濃縮場所（地球では地下高温マグマによる過程）の探査が期待されている。

2. 月面物質の同定と多様な物質：

月を含めて太陽系惑星物質を分析器で同定するのは、キャラクタリゼ - ション（特質化）をする必要があり、数種の科学データ（構造、組成、年代、産状、冷却速度、衝撃変成度など）が揃わないと最終的な結論がでない。

$$f(\text{total})=f(\text{physics})+f(\text{chemistry})+f(\text{time})+f(\text{space})+f(\text{cooling rate})$$

月面のある多様な物質は、主に 4 種（月・地球・小惑星帯・彗星起源）の起源物質がある（表 2）。火星起源の岩石は、今後発見の期待がもたれている。

表 2 . 月面における 5 種類の起源物質を同定するキャラクタリゼ - ション化

起源	構造	組成	年代	産状	冷却速度	衝撃変成度	その他
月	斜長岩・破碎岩	月クラスト	45～39 億年	高地	徐冷・衝突急冷	多様な衝突度	地球の酸度同位体
	玄武岩	月クラスト	39～0 億年	海	徐冷・衝突急冷	小規模衝突度	地球の酸度同位体
地球	球粒状ガラス	地殻マントル	4-0 億年	表側	衝突急冷	衝突放出	地球の酸度同位体
小惑星	石質・鉄	地殻～コア	45～億年	全面	衝突急冷	衝突破壊	隕石の酸度同位体
	炭素質隕石	クラスト的	45～億年	全面	衝突急冷	衝突破壊	隕石の酸度同位体
彗星	炭酸ガスと氷水	C H O	不明	全面	衝突蒸発	衝突放出	有機物の素材
火星	岩石 (SNC)	SNC 隕石	41～8 億年	全面	衝突急冷	衝突破壊	SNC 隕石酸度同位体

月面物質の重要性として、古い月面物質と高温鉱物重元素の探査ができること、月外物質の小惑星・彗星・地球・火星などからの岩石の衝突堆積を調べること、炭素質隕石・彗星などによる有機物と水分子の軽元素を月面で検出すること、そして地球起源の衝突放出物質が月面において発見でき、それから地球の大衝突イベントと生命絶滅進化を示すガラス球粒などを発見できることから詳細な地球の衝突進化が分かること、などです。

3. 分析機器および分析方法：

これらの多種多様な月面物質のその場分析と分析測定（地球内外基地など）に必要な機器（表面画像、分析画像、分析スペクトルパターンなど）の搭載が必要である。

- 1) 光学および電子線による表面画像観察：拡大ズーム式高性能 CCD カメラの開発品利用が必要で、重元素の分布は、電子線像とくに B E I（後方散乱電子線）画像装置の開発が望まれる。
- 2) 多起源の月面岩石の探査：X 線分光器、ガンマ線分光器、可視赤外分光カメラ

- ラ、遠隔 SIMS、B E I 像などで月面岩石の同定を塊破片などから識別する。
- 3) 隕石・彗星物質の探査：岩石状破片は X 線分光器、ガンマ線分光器、可視赤外分光カメラ、遠隔 SIMS、B E I 電子線像などで識別する。有機物と水分子は、同位体分光器と遠隔 SIMS など分析する。
 - 4) 地球起源の衝突放出物質：主にガラス状になった球粒などは、電子線像とともに B E I (後方散乱電子線)、イオン画像で重元素分布がわかり、そして遠隔 SIMS など構成元素・同位体分析をする。

4. 分析機器の開発：

多様な月面物質においては、衝突高温反応で重元素が残るので、電子線像とともに B E I (後方散乱電子線)像を観察できるコンパクト装置を開発したい。この種の開発は欧米でもないので、この機器の開発を日本電子(株)系研究所と共同で開発を進めて見たい。

そして、宇宙空間で使用できる C C D 光学カメラと分析装置(X 線分光器、可視赤外分光カメラ、遠隔 SIMS な)を一体化したコンパクト分析装置で地球から制御できる装置を最終的に開発して、宇宙物質分析器としてローバーの搭載したい。この分析機器の開発問題は、各々の分析装置を開発してから、最終的に一体化した装置に組み立てるのが望ましい複合装置である。この種の遠隔制御の装置は分析精度を上げることと、トラブル修理を考えて簡素化することとは全く対立する内容である。しかし、高性能の小型電子化装置でこの問題に対応できる時代にもなっている。

5. その他

遠隔 SIMS とレーザー SIMS などの開発は、田中らの講演論文に詳細提案がある。また、詳細な起源確認の分析実験は、人間という万能分析器と地球の高性能実験室での試料分析が最適で、その意味でサンプルリターンが最適です。しかし、飛躍的な科学と技術の発展が、短・長期的の惑星探査計画に非常に重要であるので、月面でのその場分析と月外軌道実験室(月または地球のスペースステーションでの分析の可能性)も含めての研究進展が期待されている。

主な文献：

D.McKay et al.: Lunar Resources (NASA, JPL)

G.Heiken, D.Vaninam, B.French: Lunar Source Book (Cambridge Univ. Press)

Y.Miura.: Space Exploration (CNES)