

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

鉱物スペクトル，X線，ガンマ線データを総合した月原始地殻の再構築

武田 弘¹，春山 純²，大嶽久志²

1. 月表層物質の特性

月の二分性 (dichotomy) に関連し、月面での物質分布より考察したいと思う。これまでの月物質の研究で得られた重要な事実は、月が形成された初期の物質は、そのままの形では何処にも残っていないと言うことである。激的な隕石様物体の衝突による機械的攪乱と、熱的変成で、ポリミクト変成岩などに変わっている。したがって、クレータの壁などに残る層状の物質分布からは、月地殻のものの構造等は解からない。

月の原始地殻は、マグマオーシャンより形成されたとされているが、そのグローバルな構造の痕跡や、マントルに沈積した岩石は見つかっていないのも、このような理由による。すなわち、地殻形成途中から隕石様物体の激しい衝突で、破壊、攪乱、熱変成が起り、もとあったままの状態では残されていないことによる[1]。わずかに小さな岩石片として、希に生き残っているものはある。それゆえ、現在月表面に残されている物質のうちから、原始地殻そのままの生き残り試料がもっとも多く残されている地域を探索して、月原始地殻を再構築し、その形成過程を推定する基盤とすることに大きい意義がある。

本発表では、アポロ試料及び月隕石より、再構築された月地殻の分化過程を示し、月初期にマグマオーシャンから最初に晶出固化した可能性を持つ物質を推定する。しかし、それが強度に再結晶

した角レキ岩の可能性もある。これを月探査で解決する方法を探る。

2. アポロ月試料，月隕石，リモートセンシングデータよりの再構築

月地殻が攪乱された物質から出来ているので、月形成モデルを考えるには、月の原始地殻を再構築することから始めなければならない。まず最初にできた月地殻の構成物質を同定するためには、初期に晶出した鉱物組合せと化学組成を持ったものであるかを確認することが先決である。この確認のためには、次の3つのスクリーニングを掛ける：(1) 隕石の衝突で混入される可能性のある微量元素により汚染されていないこと；(2) 45億年の結晶化年代を持っていること；(3) 地殻深部で形成冷却された輝石の組成と組織を持っていること。

このような純正の地殻構成岩石の、これまでのデータから再現された、月地殻の結晶分化過程は、斜長石の $\text{Ca} \times 100 / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ 値と輝石、カンラン石の $\text{Mg} \times 100 / (\text{Mg} + \text{Fe})$ の関係で現される。地殻深部の岩石を代表するMg系列岩と、地殻表層部の鉄に富む斜長岩の、不連続な2つのトレンドがある。月の裏側から来たとされる月隕石よりは、斜長岩のトレンドをMgに富んだMg系列岩にまで延長したトレンドがある。これが、斜長岩岩山の最初に固結しだしたところの物か、角レキ岩の再結晶したのかは、はっきりしていない。また、HED隕石母天体マントルの分化傾向から推定される、月の

1 千葉工大付属研Chiba Inst. of Tech.

2 宇宙開発事業団NASDA先端ミッション研究センター

マントル物質に対応する, 鉄の富む斜長岩トレンドに対し直角なトレンドも見出されていない。

月の海の溶岩地殻は, 月深部での熱的歴史と物質分布に関する情報を知らせてくれる重要物質である。溶岩タイプとその地域的分布と形成年代はスペクトル型とクレータ密度より推定されてきた。溶岩タイプは離散する $Fe/(Fe+Mg)$ 比とTi量により3種に区別されてきたが, 最近の月隕石の研究より, その連続的分布が提唱されている。従来クレメンタインのスペクトルデータより, ルーシー等の方法で間接的に鉄, チタン量が推定されてきたが, その誤差は大きい。

このようにアポロ月試料から確立したかに見えた月地殻のグローバルな様相は, 揺らいできている。ここにSELENEの結果が期待される所以である。

3. SELENE計画による探査

原始物質がそのまま残っているのではなく, 隕石衝突による熱変成で, 別の結晶質の岩石に変わっている可能性も大と言うことは, X線, ガンマ線データによる化学組成だけでなく, 結晶状態が期待される鉱物のものであるかを分光学的研究で推定する必要がある。ガラス質物質と区別するためには, スペクトルデータを使い, インパクトメルトや結晶質変成岩と区別するには高解像度地形データを参照する。X線データより得られる実測の Fe, Mg, Ti 量により補正した方法は, 高解像度スペクトルデータ利用に大きな道を開くことで, 利用価値は高い。

ここで提唱する研究課題は, それぞれ他の探査目的のために得られる上記の観測項目を組合わせて研究するものである。必要データは最高10km程度の解像度(元素により異なる)のX線データより得られる Fe, Mg, Ti, Ca, Al, Si などのグロー

バルマップ[2]と, ガンマ線データ[3]より得られる100km程度の解像度の K, U, Th などのグローバルマップである。3つのデータセットを組み合わせると期待される成果を, 項目別に述べる。

3.1 原始地殻の岩石が多く保存されている地域

原始地殻の岩石を見つけるためには, 結晶分化の際に系統的变化をする $Ca/(Ca+Na)$ 比と $Fe/(Fe+Mg)$ 比が必要である。 Na は測定できないので, $Al/(Al+Si)$ 比を参考とし, ガンマ線データの K 濃度[3]との相関を見る。またKREEP岩石の混合の可能性を排除し, 初期物質であることを確かにするため, ガンマ線データの U, Th 量を知る必要がある。これらの元素分布傾向よりみて, もっとも Mg と Ca に富み, U, Th を少なく含む始原始的な斜長岩とカンラン岩の分布する地域を探す。特にマントルに由来するカンラン岩と, マグマオーシャンより最初期に固結した斜長岩岩山ブロックの探査には, 大きな意義がある。

この探査の過程で発見される, もっとも良く原始地殻が保存されている地域は, 将来のサンプルリターンミッションの候補地として, 更にローバーなどによる探査で, 非分散型X線蛍光分析装置と粉末X線回折計を組合わせたものを用い, 上記のものが真の結晶質の岩石で, 隕石衝突により汚染されたものでないことを確認するミッションに発展する展望が開けている。

3.2 マグマオーシャンよりの最初の斜長岩岩山

クレメンタインのデータより, 高地地殻を構成する物質には, ほぼ純粋に近い斜長岩も月北極裏側に形成されていた可能性がある。このような物質は, $Mg/(Fe+Mg)$ 比が高い苦鉄質ケイ酸塩鉱物を含むはずである。クレメンタインのデータでは, Lucey等の方法[4]でバルク岩石の FeO 量が低い斜長岩が上記地域にあることは解かっているが, そこ

に少量のカンラン石があるのか、輝石があるのかは、高感度のスペクトルデータより決めなければならない。そのMg/(Fe+Mg)比は、X線のデータで確認する必要がある。

この斜長岩は科学的意義と同時に、その資源的利用にとっても重要である。とくに、太陽電力発電ユニット用のシリコン薄膜生産に欠かせない高純度SiO₂粉末と、Al金属を抽出するためのAl酸化物を分離製造できるなど、高純度斜長岩利用を見込んだそのサイトの探査も考慮する必要がある。

3.3 マントル物質を代表するカンラン岩

アポロ試料72415はマントル物質であるカンラン岩とされて来たが、Ryderら[5]により、カンラン岩に化学的ゾーニングが残っていることより、もっと浅いマグマよりの沈積物となった。月のマントル物質を掘り出すようなクレーターは、南極SPエトキンス内にあるとされてきた。クレメンタインのデータによると、これらの物質はインパクトメルトなどでできるLKFMタイプの岩石であるとされている。しかし、LK (low-K) というにはガンマ線のデータより、Kの分布を知らなくてはいけない。またカンラン石の吸収スペクトルが確認され、そのMg/(Mg+Fe)比がX線データよりマントル物質のものとされぬかぎり希望はもてない。

3.4 月の海の溶岩分布

月の海の溶岩地殻探査にも上記データは活用される。12km解像度のX線データ[2]を用い、実測のFe、Ti量よりLucey等の方法を補正し、より高解像度のスペクトルデータによるFe/(Fe+Mg)、Tiなどのグローバルマップを作成する。この図と高解像度地形図のクレータ密度より、南極で回収されたような月で最も古い溶岩のある海盆と、最も新しい火山活動のあった地域を探し、その岩石タイプを同定する。新しい溶岩で覆われた下にある、別

のタイプの溶岩を、古い溶岩を突き抜けて出来たクレータの底に探すことも出来る。月隕石の放出されたクレータを探す事が出来れば、一回の月サンプルリターン探査を行ったのと同等の価値のある探査が出来る。

4. 将来の探査

SELENE I 探査で、ここで提唱したような課題の進展がみられても、さらにサンプルリターンミッションで目的とするsampleの濃集されている場所の探査には、さらに高感度、高解像度の分布データが得られる必要がある。これには今後のHgCdTe検出器や分光器の開発にまたれるところが大きい。SELENE I で得られた場所をIIで精査し、IIIでローバー探査を行なった後、サンプルリターンミッションで実際のサンプルを採取することが必要であろう。真の月地殻の岩石はリモセンだけでは決定し得ない総合的な物質科学的手法による研究が必要である。

参考文献

- [1] Takeda H., Miyamoto M., Mori M., Wentworth S. J. and McKay D. S. (1990) Mineralogical comparison of the Y86032-type lunar meteorites to feldsparitic fragmental breccias 67016. *Proc. Lunar Planet. Sci.* 20, 91-100.
- [2] Okada T., Kato M., Fujimura A., Tsunemi H. and Kitamoto S. (1998) Abstr. 32nd COSPAR Meeting, Nagoya.
- [3] Hasebe N. (1998) Abstr. 32nd COSPAR Meeting, Nagoya.
- [4] Lucey P. G., Blewett D. T., Johnson J. L., Taylor G. J. and Hawke B. R. (1996) Lunar

titanium content from UV-VIS measurements.

Lunar Planet. Sci. 27, 781-782.

- [5] Ryder G. (1992) Chemical variation and zoning of olivine in lunar dunite 72415: Near surface accumulation. *Proc. Lunar Planet. Sci.* 22, 373-380.