

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

SELENE分光観測を総合して解析されるアノーソサイト地殻の形成過程

岡田達明¹

1. セレーネの分光観測による月の地殻探査

2003年に打ち上げが予定されているセレーネ月探査計画で得られる可視近赤外、蛍光X線、ガンマ線の分光観測データから、月の高地地殻の形成・進化過程についての情報を得る可能性について述べる。セレーネ計画では多種類の観測機器による月のグローバルな探査を行うが、ここでは4種類の分光観測のデータを総合した解析を考える[1-3]。それらの観測の特徴を表1に示す。多色分光撮像とガンマ線観測は、それぞれクレメンタインとルナーブロスベクタによって全球観測されているが、セレーネでは1桁高い空間分解能で地質区分ができたり、また検出できる元素の数と精度が著しく向上する。可視近赤外分光と蛍光X線分光は初めての主要な鉱物と元素の全球観測であり、かつ高い空間分解能で情報を得ることができる。

月の高地の物質は、初期に発生したらしい斜長

岩質（アノーソサイト）からハンレイ岩質まで連続的にバリエーションがあり、高地の物質が地域や形成年代によって変化していることを示す。高地地殻の表面は隕石衝突によってある程度破碎された。しかし、グローバルに分光観測を行い、大局的な物質分布を調べたり、クレータやベーズンの底や中央丘などに対して詳細に解析することで、地殻物質の系統的な水平・垂直分布を推定できる可能性がある。また、溶岩流の組成変化や地域による違いから、マントル物質とその分布、不均質性についての情報が得られるかもしれない。さらに月の表裏で半球的な特徴が異なる「二分性」は、月の進化過程を知るための制約条件となる。それが表層地形のランダムさによる特徴としてではなく、月の進化過程で生じた非対称性として考えられることが多いからである。以下では、二分性も考慮に入れたいくつかの月地殻の進化モデルを考えそれらに期待される、地殻の物質分布とその検証方法について議論する。

表1：セレーネの分光観測とその特徴

測定種類	観測内容	有効空間スケール	過去のデータからの向上
多色分光撮像	地質区分, FeO, TiO ₂	数100m～数km	空間分解能（1桁向上）
可視近赤外分光	主要鉱物（OPX, CPX, OL, PL, 等）	～数km	初の高波長分解能観測
蛍光X線分光	主要元素組成（Mg, Al, Si, Fe 等）	～20km	初の全面観測。元素数と精度
ガンマ線分光	主要元素（O, Si, Fe, Mg, 等） 放射性元素（K, U, Th）	～100km	元素数と精度

¹ 宇宙科学研究所

2. 月の二分性の構造と形成

月の二分性の本質がどのような構造として存在し、どのような過程で形成されたかを示す証拠は得られていない。幾つかのアイデアを図1に示す。二分性が地殻の表裏の平均的な厚さの違いによる場合、その形成過程として、(a) マグマオーシャン中で成長した厚い地殻が浮遊した、(b) 一様な厚みの地殻の形成後、内部の熱対流に伴う熱いブリューム状上昇流によって地殻が削られ、薄化した、(c) 一様な厚みの地殻形成後、隕石衝突によって地殻上部の一部がはぎ取られて地殻が薄くなったり、放出物が別の場所に堆積した、などが考えられる。二分性が地殻の表裏の平均密度の違いによる可能性もあり、(d) 初生地殻の周囲に年代とともに組成の異なる物質を付加しながら地殻が

拡大した、(e) マグマオーシャンが局所的に発達した、などが考えられる。一方で、二分性がマン托ルの不均質性やコアの非対称性による可能性も否定できない。月の進化過程で全球的に溶融し、物質の混合が十分進まない限り、マン托ルの不均質は生じ得る。クレータやベーズンの底などマン托ル由来の物質が露見するかもしれない場所や、溶岩流の場所・年代による変遷に対して、分光観測によって鉱物・元素組成を調べることで、マン托ルの岩石学的特徴とその空間的な不均質性を推定することができる。ただしこのような観測対象となる場所が地域的に偏っているのが難点である。一方、コアの非対称性は、コア形成過程が不完全で終わってしまった場合に生じ得る。この場合、分光観測で直接的な情報を取得するのは困難である。

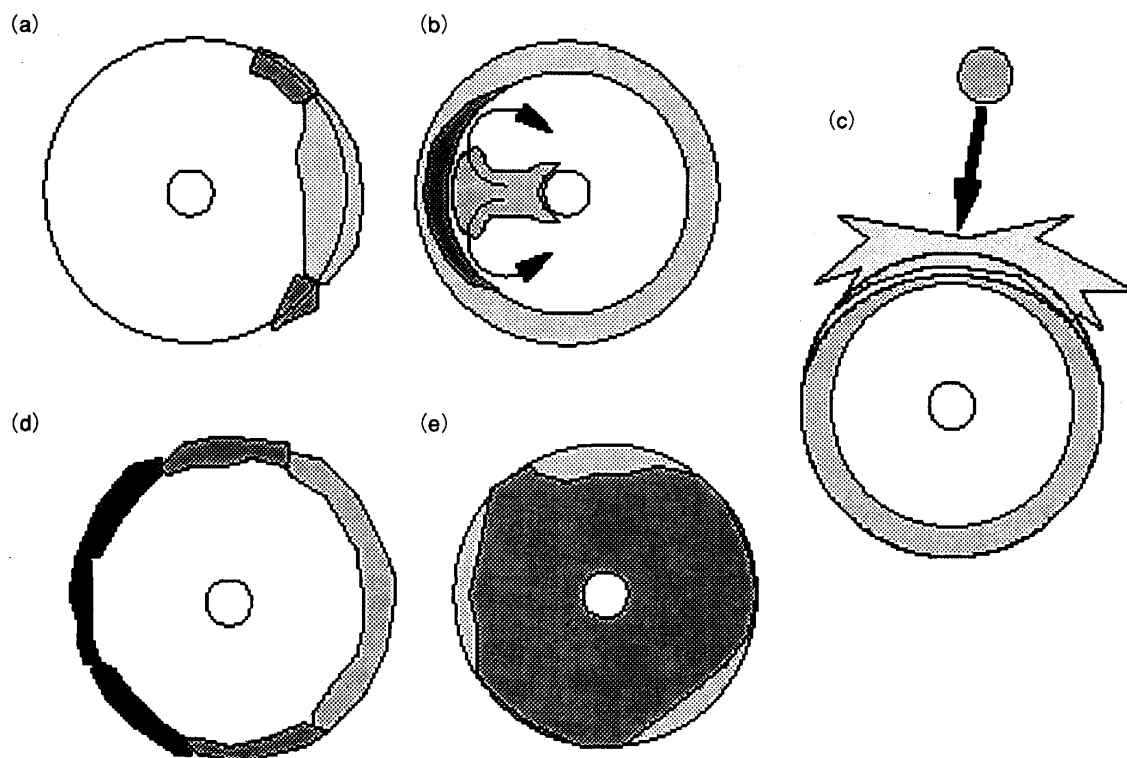


図1 月の二分性の形成過程のアイデア。表裏での地殻の厚さの違いによるもの：マグマオーシャン中の厚い地殻が形成され、浮遊した (a)、高温のブリューム状上昇流によって地殻が削られ、薄化した (b)、巨大衝突によって表面に一部が薄化したり、その噴出物が裏側に堆積した。表裏での地殻密度によるもの：地殻の成長過程で、地殻の平均密度に系統的分布が生じた (d)、マグマオーシャンが局所的で、地殻密度に不均質が生じた (e)。

3. 月の高地地殻の形成と進化

3.1 月の熱史と高地地殻の形成

月の形成過程によって月の初期温度分布は大きく異なり、違った熱史を経ることになる。初期温度が高いほど全球的で大規模なマグマオーシャンが生じるが、初期温度が低いほどマグマオーシャンの溶融の深さや地域が減少してゆき、ついにはマグマオーシャン自体が存在できなくなる。

高地に広く存在している斜長岩が生成するには、ある程度以上の深さ（月の重力場では300～400km）のマグマオーシャンの存在が不可欠とされる。地殻形成過程には静的・動的の2種類が考えられ、両方の過程が働いたと考えられる。一つは、生成した固体成分が重力によって物質分配される静的な過程であり、マグマオーシャンの表面で水平方向に一様な組成の地殻を作る。その地殻は、月形成初期の多数の巨大隕石の衝突によって破壊されてしまったかもしれない。破片は熱対流によって移動し、下降流付近の場所で合体・成長し、大陸を形成する。少数の超大陸が成長するのか、幾つかの大陸が形成され、やがて合体するのか、大陸の規模と数は熱対流の規模、ひいてはマグマオーシャンの深さによって決まると考えられる。マグマオーシャンの規模は、その後の地殻の形成・進化過程を方向付ける要因となる。

3.2 高地地殻の水平・垂直分布

静的な地殻形成過程が支配的な場合は、地殻物質の水平分布はほぼ一様になるだろう。そのとき地殻は垂直方向に厚みを増す方向で成長するが、年代とともにより鉄に富み、アルミニウムの減るマフィックな組成へと徐々に変遷すると考えられる。一方、大きな大陸が形成される動的な地殻形成過程では、古い地殻を中核として、新しい地殻物質が周囲に付加して成長してゆく。物質が年代

とともにマフィックな組成へと変化すると、地殻物質の水平分布は同心円状になる。複数個の大陸が合体する場合、各大陸の平均年代が違えば平均組成が異なることもあり得る。さらに大陸境界の縫合線部は結晶中に入りにくい元素（放射性元素のK, U, Thも含む）も多く存在するかもしれない。垂直方向への地殻成長では、静的に物質が付加成長して系統的な組成変化を示すような場合もあれば、対流によって運ばれた物質が大陸下部に付加する場合もあるだろう。大陸の沈み込みも起きたかもしれない。また、マグマオーシャンが局所的であった場合、マグマオーシャン毎に異なる組成の地殻が形成されたり、マグマオーシャンの隙間の領域には、地殻分別前の岩体が存在するかもしれない。マグマオーシャンが存在しなかった場合は、噴出斜長岩が水平方向に無秩序に分布すると考えられる。また、多くの貫入岩体があり、垂直方向にも複雑な組成を示すだろう。

以上の特徴は、原理的には分光観測で主要鉱物や主要元素、放射性元素の分布を調査することで得られる。しかし地殻表層部は隕石衝突による破碎や、レゴリスの堆積によって、本来の地殻物質の調査は容易でない。代表的な破碎物の飛散距離は、海と高地の境界領域の幅が100km程度[4]であり、コペルニクス・クレータなどのエジェクタや2次クレータの広がり範囲が100～200kmであることから概算的に見積もることができる。表層の組成は、直径数100kmの地域の地殻を代表すると考えるのが妥当だろう。地殻の垂直方向の組成分布の情報を得るには、大小さまざまな規模、即ちさまざまな深さのクレータやベズンの底などを選び、分光観測する必要がある。直径20km以上のクレータはお碗型から平底をもつ型に変わり、地殻下部の物質が見られると期待される。クレータの中央丘などは、地殻下部の情報を含む可能が指摘されており、重要な観測対象である。中央丘は直径数

表2: 幾つかの月地殻の形成過程とセレーネ分光観測で調べる内容

形成過程	物質分布の特徴	二分性
静的過程が卓越	水平方向に一様, 下部ほどマフィック	上昇流や巨大衝突による薄化
巨大大陸形成	同心円状の水平分布, 垂直方向はほぼ一様	厚い地殻の浮遊
巨大大陸+静的厚化	同心円状の水平分布, 下部ほどマフィック	表裏の密度差
大陸合体	大陸毎の違い, 縫合線部の特徴	表裏の密度差, 浮遊
部分的マグマオーシャン	地域毎の違い, 地殻分化前の物質の存在	表裏密度差, マントル不均質
連続的火山活動	水平・垂直方向の微細構造	内部に起因

km~数10kmであり, それが鉱物・元素組成探査の空間分解能の目標値の一つの目安である. 小規模のものは可視近赤外, 中・大規模のものは可視近赤外と蛍光X線での観測が可能である. 表2に, ここで挙げた月の高地地殻の形成・進化過程と分光観測の項目についてまとめた. 補足として, 各々の場合で可能性のある月の二分性の成因についても併記した.

4. その他の観測との総合解析

分光観測によって物質的情報に加えて, セレーネの地形カメラや高度計, レーダサウンダーなどの観測を総合することによって, 観測対象地域の基準面からの高度や深さ, 地下構造の情報が追加され, 地質構造や形成過程に関する理解を深めることができる. また, セレーネの重力探査やルナーAの地震波, 熱流量などの探査の情報を総合することで, 地殻・マントルの境界などの構造や, 地殻・マントルの進化過程モデルへの制約, マントルの不均質性の検出などについての信憑性を増すだろう. それによって, 月の二分性の構造と形成についての理解も深まると期待される.

参考文献

- [1] Otake, H., Matsunaga, T., and LISM WG, Optical Observation of the Lunar Surface from Lunar Orbiting Satellite. Proc. ISAS Lunar Planet. Symp., 29, 5-7, 1996.
- [2] Okada, T., Kato, M., Fujimura, A., Tsunemi, H., and Kitamoto, S., X-ray fluorescence spectrometry from Selene orbiter. Submitted to Adv. Spac. Res., The Moon: Recent and future scientific exploration in 32nd COSPAR, 1998.
- [3] Hasabe, N., Mitani, S., Kubo, K., Shibamura, E., Kashiwagi, T., and d'Uston, C., Gamma-ray spectrometer for Japanese lunar polar orbiter (abstract). The Moon: Recent and future scientific exploration in 32nd COSPAR, 1998.
- [4] Fischer, E. and Pieters, C., Lunar surface aluminum and iron concentration from Galileo solid state imaging data, and the mixing of mare and highland materials. J. Geophys. Res., 100, 23,279-23,290, 1995.