

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

海の溶岩流出と大型クレーター盆地の構造

高田淑子¹

1. 多重リング構造と海の分布

月の海といわれる溶岩の流出している地域は、そのほとんどが大型クレーター盆地の内部に位置する。また、これらの大型クレーター盆地の多くは、形態学上、多重リング型クレーターに分類され、クレーター底が平坦で、クレーターを取り巻くように山脈が同心円状に連なる構造をしている。月の表側西端部に位置するオリエンタル盆地をとりまくリング状山脈は、内側の斜面が急峻にもかかわらず、外側の斜面が緩やかであることから、リング構造が内側にずれ落ちる正断層である可能性が指摘された [1]。この考え方は、ドイツのリースクレーターなど地球表層に観察されるクレーターの内部や周辺部で、断層地形が発見されていること [2]、浸水した粘土層での原爆実験で、クレーターの周囲に、約1時間後環状のクラックが形成されたこと [3] などからも指摘されている。

さらに、近年のクレーター形成の数値シミュレーションでは、ダイナミックに衝突クレーターが掘削された後、圧力・温度依存型の岩石強度モデルを考慮に入れて応力場の変化を追跡すると、クレーターの内壁やリングとリングの間に半径方向に張力が発生することが明らかにされている [4]。このように、リング構造と断層構造は密接な関わりがあり、月の海盆にはリング状に形成される断層構造＝リングテクトニクスによってひきおこされるマグマティズムが存在する可能性がある。

大型クレーターのもう1つの特徴は、エジェクタの放出により、クレーター内で大規模な質量欠損がおきることである。このため、クレーターの中心部では、アイソスタシーを保持するために、月の地殻―マントル境界が上昇することが考えられる。オリエンタル盆地の中心地域では、重力と地形のデータから、モホ面の深さが約20kmと比較的浅いことがわかっており、月のモホ面上昇によるものと考えられている [5]。このモホ面上昇に伴わせて、海の荷重で海盆自体が変形を起し、クレーター内部に断層構造等が発達する＝ベースメントテクトニクスも、何らかのマグマティズムを発生させる可能性が高い。以上のように、海の形成が大型クレーターの構造に起因することは、その分布状態からしても明らかであろう。

2. 月の裏側の海盆の分布の特徴

月の海は、表側では面積の約30%を占めるが、裏側では1%にも満たない。このことから、表側の方が裏側に比べ、溶岩流の流出量など火成活動が活発であったことが考えられる。また、裏側に存在する海のほとんどがインプリアン期に形成されたと考えられており、表側で、ネクタリアン期やエラトステニアン期の溶岩流も発見されているのと対照的である。さらに、溶岩は、表側では分光観測から10タイプ以上に分類されているが、裏側では未確認である [6]。裏側では、リッジや断層構

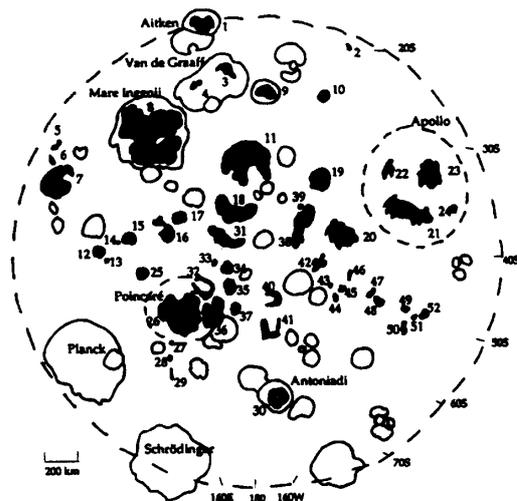
¹ 宮城教育大学 地学

造も少数地域でしか存在していない。以上のことは、月の裏側では海盆の占める面積が数少ないことが第一の理由であろうが、ほとんどの領域の最高解像度がルーナーオービターの約300 mということにも起因していると考えられる [7].

しかし、たとえば、裏側南半球に存在するサウスポールエイトケン (SPA) 盆地の内部には、多数の大型クレーターが存在し、現在52個の溶岩流出地域がパッチ状に存在することが確認されている [8]. SPAの現在の地殻の厚さは、中心部が25km、クレーターの端 (リム) で70kmと推定されており、地形と相関があるにみならず、海の占有面積とも相関がある (図1). これは、オリエンタル盆地において、海の溶岩が半径約1/2以内の領域を埋め尽くし、その外側はリングとリングの間にわずかに流出しているという特徴と相似している。この流出量の分布の違いは、クレーターの中心地域がベースメントニクス、クレーターのリングの間は、リングテクトニクスが有為の可能性もある。SPA

内部の海盆を見ると、実際には多様な特徴があることがわかる。アポロ17号の高解像度写真でSPA北端部に位置するエイトケンクレーターの内部をみると、分光特徴の違うドームが存在することや、数枚にわかれていた溶岩流など、複雑な流出形態を表している [9]. 他のSPA内部の海盆についても、高解像撮像することにより、噴出形態や溶岩タイプに多様性・系統性が見つかる可能性があるのではないか。また、それぞれの海盆が、SPA内部にパッチ状に分布することから比較的流出場所の同定が容易である。これらの噴出形態や溶岩タイプとSPA内部地域との相関は、溶岩流出のローカリティ・分布・流出形態と、リング・断層との位置関係・地殻の厚さやクレーターの深さ等の構造パラメーターとの因果関係を明らかにする絶好の場所であると考えられる。流出規模・形態・化学組成・流出年代等を、これら溶岩流の分布と関連付けることでマグマソースの多様性と流出場所との関連を示すことができる可能性が高い。

(a)



(b)

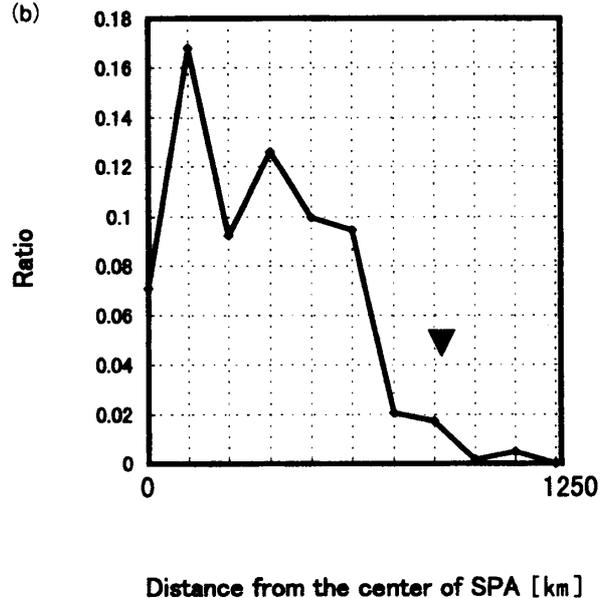


図1 (a) サウスポールエイトケン盆地内の溶岩地域の分布。[8より抜粋]、(b) クレーター中心からの距離に対する海の領域の面積比率。海的位置、面積のデータ[8]から作成。クレーター半径1250km。▼は、内リングの位置を示す。

3. 調査対象—1：溶岩流の多様性とローカリティ

流出規模を特徴づける第一のパラメータとして流出量がある。流出量は、溶岩流の数、分布面積、層の厚さから推定することができる。溶岩流の数や分布面積は、溶岩流境界・末端、反射率の変化等から見積もり、層の厚さは溶岩流の末端の高さや、クレーターのサイズからクレータースケーリング [10] を利用して測定する (図2)。末端流の高さの測定には、地形の陰影や地形図が寄与する。しかしながら、陰影を利用し推定した高度は、本来の最大高度とは正確には異なる。太陽高度より小さい斜度は無視されるため緩やかな傾斜の場合は、誤差が大きくなる。また、クレータースケーリングは、本来新しいクレーターに適用されるため、大型の海盆に対しては適用が困難である。そのため、小さく比較的新しいクレーターを利用して、掘削深度とクレーター底に露出している物質から層の厚さを求めることも必要である。また、ALSEレーダーの結果では、明らかに海の玄武岩の層構造が確認されている [11]。そのため、サウンダーを利用した溶岩層の厚さの推定が、今後、鍵になるであろう。

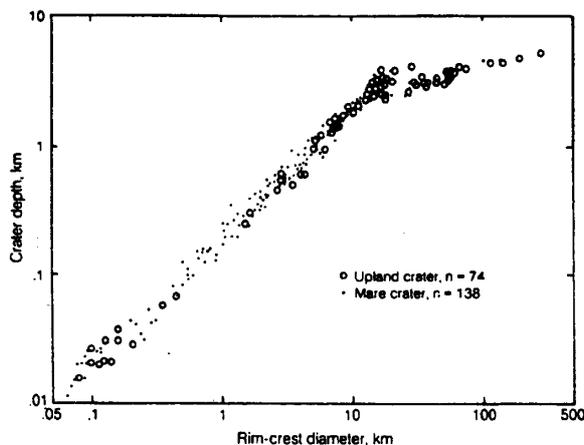


図2-1 海の溶岩の厚さの推定方法—クレーター直径と深さの関係 [10より抜粋]。

化学組成に関しては、地形カメラでとらえられる溶岩流境界によって層区分を判断し、多バンドカメラの情報から地層の岩層を推定する。たとえば、Tiの量は、由来するマグマの深さ、あるいは、流出年代と相関があるといわれている。Tiの含有量マップ [12] はこれら2つの重要なパラメータと海盆地形との関係を明らかにする鍵となる可能性がある。

流出年代に関しては、岩石サンプルが存在しない領域が大部分のため、絶対年代を放射年代の崩壊等を測定して絶対年代を求めることができない。クレーターの直径と累積数密度の関係、溶岩末端

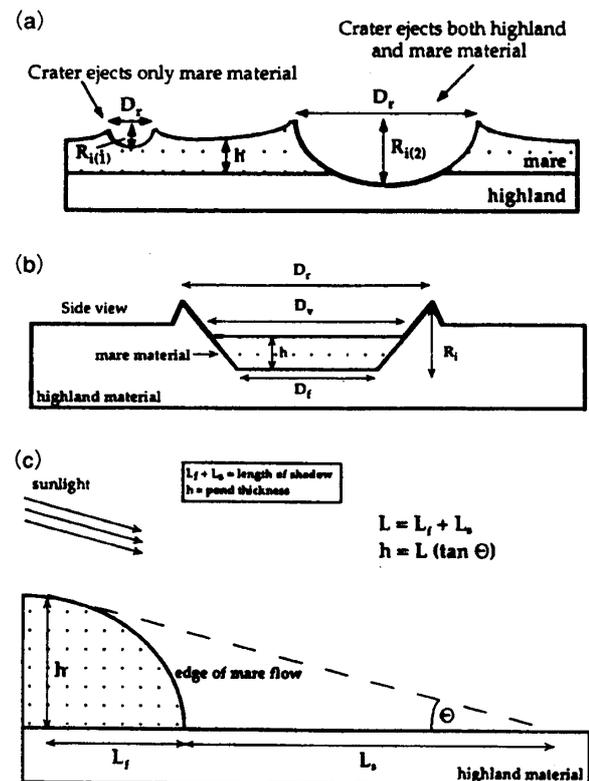


図2-2 海の溶岩の厚さの推定方法 [8より抜粋]。

(a) クレータースケーリング則を利用した方法。直径を計測し、深さを図2-1に従い推定する。海の上に形成された小クレーターが、海の層を貫通しているか否かを判定することにより、海の層の厚さを制限する。

(b) クレータースケーリング則を利用し、海盆を1クレーターとして、厚さを推定する。

(c) 溶岩流の末端などで、陰影を利用して高さを推定する方法。

から得られる層序, 他のクレーターから飛来するエジェクタを鍵層とする層序等から決定することが必要となる。

4. 調査対象—2: 溶岩地形と海盆テクトニクス

溶岩地形の中には, リッジと呼ばれる凸構造, 線形谷といわれる直線状の凹構造が海盆の周縁部に沿って観測されている。リッジ構造は, 地形断面図を作成することにより, 左右非対称であれば海盆内部の圧縮場を示す衝上断層, 左右対称であれば, 海に埋もれたリングが周囲の溶岩層がアイソスタティックに沈降し, 相対的に隆起してできた構造と考えられる [13]。また, 線形谷は, リッジ形成より古く, 海の荷重がリソスフェアをたわませ, 海盆周縁部で張力が発生し断層を形成すると考えられ, リッジや線形谷の地形の分布から, リソスフェアの厚さと溶岩の噴出史を関連づけるテクトニクスモデルが提唱されている [14]。今後は, このようなモデルの検証をしつつ, これらの溶岩地形から海盆テクトニクスを定量化していくことが重要である。

参考文献

- [1] Howard, K. A., Wilhelms, D. E., and Scott, D. H., 1979: Lunar basin formation and highland stratigraphy, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 309-327.
- [2] Chao, E. C. T., R. Huttner, and H. Schmidt-Kaler, 1978: Principal Exposures of the Ries Meteorite Crater in Southern Germany. *Bayersches Geologisches Landesamt*, 84 pp.
- [3] from H. J. Melosh, 1989: *Impact cratering*, Oxford Univ. Press., 245pp.
- [4] O'keefe, J. D. and T. J. Ahrens, 1998:

Calculations of Complex Crater Formation Extended to Thermo-Elastic Regime. *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX* (1822-1823).

- [5] Bratt, S. R., S. C. Solomon, J. W. Head, and C. H. Thurber, 1985: The deep structure of lunar basins: Implications for basin formation and modification. *J. Geophys. Res.*, **90**, 3049-3064.
- [6] Pieters, C. M., 1978: Mare basalt types on the front side of the Moon. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, **9th**, 2825-2849.
- [7] Wilhelms, D. E., 1987: The Geologic History of the Moon. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* **1348**, 302pp.
- [8] Yingst, R. A. and J. W. Head, 1997: Volumes of lunar lava ponds in South Pole-Aitken and Orientale Basins: Implications for eruption conditions, transport mechanisms, and magma source regions. *J. Geophys. Res.*, **102**, 10,909-10,931.
- [9] Takata, T., 1998: Spectral Analysis of Volcanic Features in Aitken Crater on Lunar Farside. *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX* (1598-1599).
- [10] Pike, R. J., 1974: Depth/Diameter Relations of Fresh Lunar Craters: Revision from Spacecraft data. *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 291-294.
- [11] Peeples, W. J., W. R. Sill, T. W. May, S. H. Ward, R. J. Phillips, R. L. Jordan, E. A. Abbott, and T. J. Killpack, 1978: Orbital Radar Evidence for Lunar Subsurface Layering in Maria Serenitatis and Crisium. *J. Geophys. Res.*, **83**, 3459-3469.
- [12] Lucey, P.G., D. T. Blewett, and B. R. Hawke. 1997: FeO and TiO₂ concentrations in the South Pole-Aitken basins: Implications for

mantle composition and basin formation. *J. Geophys. Res.*, **103**, 3,701-3,708.

- [13] Sharpton, V. L. and J. W. Head, 1987: Stratigraphy and structural Evolution of Southern Mare Serentiatia: A Reinterpretation Based on Apollo Lunar Sounder Experiment Data. *J. Geophys. Res.*, **87**, 10,983-10,998.
- [14] Solomon, S. C. and J. W. Head, 1980: Lunar Mascon Basins: Lava Filling, Tectonics, and Evolution of the Lithosphere. *Rev. Geophys. Space Phys.* **18**, 107-141.