

特集「衝突現象・衝突地形」

月におけるクレータ生成率不均質

諸田 智克¹,

1. クレータ生成率の不均質とは？

太陽系の多くの衛星では、自転周期と公転周期が同期しており、常に公転運動の進行方向に同一面を向いている。この同期回転は衛星表面において、クレータ生成率（単位時間・単位面積あたりに形成されるクレータ数）に空間的な不均質を引き起こすことが予想される。その不均質のパターンとしては、進行方向を向いている位置、apex でクレータ生成率が最大となり、そこから角距離とともに減少し、180°逆の位置、antapex で最小になると考えられる。これは、雨の日に車を運転していると、フロントガラスに多く雨が当たり、リアガラスではあまり雨は当たらないことに例えることができる。この場合、衛星が車で、衝突天体が雨に相当する。

これまでクレータ生成率不均質に関して、主に数値計算や解析的な研究が多く行われている [e.g., 1, 2]。それらにより、クレータ生成率不均質の程度は、(a) 衝突天体の惑星系に対する相対速度、(b) 衛星の公転軌道速度に依存することが知られている。もし、衛星の公転速度が衝突天体の速度に近ければ、不均質は顕著になり、逆に、衝突天体の速度が衛星の公転速度に比べ十分に大きければ、不均質は起きない。

外惑星の衛星は公転軌道速度が大きいいため、クレータ生成率不均質の程度はかなり大きいと予想される。例えば、木星衛星のガニメデやカリストにおける apex でのクレータ生成率は antapex に比べ、5~20倍高く見積もられている [e.g., 1, 2]。しかし実際に、ガニメデ表面のクレータ分布を調べてみると、それより

も小さく、2~4倍程度しかない [3]。カリストにいたっては、クレータ分布は一様であるように見える。このギャップの原因として、クレータ密度が平衡状態になっている可能性や、衛星がその歴史の大部分の間、同期回転していなかった可能性、または、局所的な表層の再形成が複数回起こり、多くのクレータが消されてしまった可能性などが考えられている [2]。逆に、海王星衛星トリトンのクレータ分布は極端に非対称で、公転運動の前面では直径 4 km 以上のクレータは150以上存在しているのに対して、後面では全く無い [3]。この原因は未だよく分かっていないが、トリトンの特徴である逆行公転と関係しているのかもしれない [2]。このように、クレータ生成率不均質の記録は、その衛星の進化に関する多くの興味深い情報と、更なる謎を与えてくれる。

一方、月も同様に同期回転している。しかし最近まで、月のクレータ生成率に地域差があることを示した報告例はなかった。そもそも多くの研究者は、月ではクレータ生成率不均質は無い、または、例えあっても非常に小さいものだと考えていたように思われる。では、本当に月にはクレータ生成率不均質が無いのだろうか？

2. 月のクレータ分布の記録

これまで月のクレータ生成率不均質に関する議論が無かったことは、多くの研究者の先入観だけでなく、それを調べることの困難さに原因があると考えられる。例えば、クレータ生成率不均質の有無を確認するため

1. 金沢大学大学院自然科学研究科

には、クレータ分布を調べるのが最も直接的なアプローチであろう。実際に、月表面を見て明らかに、地域によりクレータ密度は大きく異なっている。しかし、それは主として表層年代の違いによるもので、そこからクレータ生成率不均質の情報だけを分離し、見いだすことは難しい。

そこで我々[4]は、光条クレータの同定を行い、その分布を調べることを試みた。光条は、放射状に伸びた高アルベドの構造であり、クレータからの新鮮な放出物や二次クレータから成ると考えられている。一般に光条を持つクレータはコペルニカン（過去10億年間）にできたと考えられている。つまり、光条の有無を調べることで、表層の年代に関係なく、同一期間（コペルニカン）に形成されたクレータのみをカウントすることができる。しかし、月表層の地質の違いが光条の保存年代に影響を与える可能性がある。そのため光条の同定は、比較的地質が一樣である、東経70~290の高地の領域で行った。

図1は前面（公転の進行方向を向いている半球）と後面にある光条クレータのサイズ頻度分布の比較を示す。すべてのサイズ範囲で、前面のクレータ密度は、後面より高い。つまり、前面では後面よりもクレータ生成率は高かったと考えられる。また、図2は apex

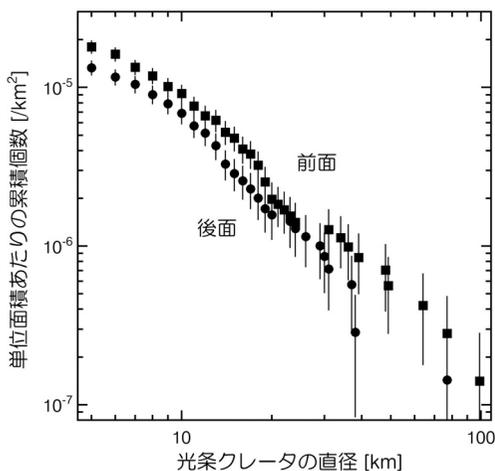


図1：前面と後面にある光条クレータのサイズ頻度分布。

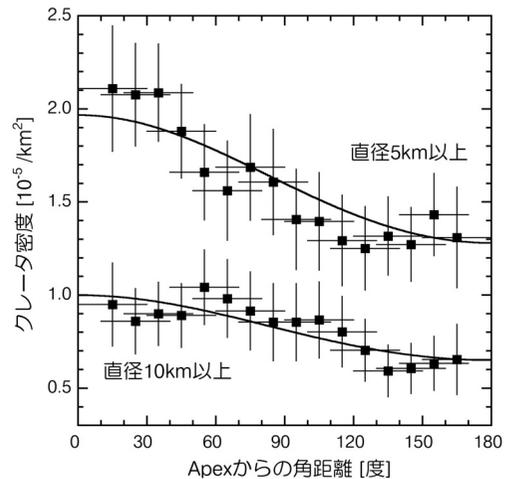


図2：apexからの角距離で表した、直径5、10km以上の光条クレータの数密度。Zahnle et al. [2]の式を光条クレータ分布にフィットしたものを実線で示す。横軸のエラーバーはクレータ密度の見積りに用いた領域を表す。

からの角距離の関数として、光条クレータの数密度を示したものである。これを見ると、クレータ密度は空間的に一樣ではなく、apex付近では高く、antapex付近では低い。以上のことから、月のクレータ生成率が不均質であることは明らかである。

また、得られたクレータ密度分布は理論ともよく一致している。図2の実線はZahnle et al. [2]の式を観測されたクレータ分布にフィットさせたもので、次式で与えられる。

$$\Gamma = (1 + 0.0781 \cos \beta)^{2.74} \dots (1)$$

ここで、 Γ は月平均で規格化したクレータ生成率、 β はapexからの角距離を表す。この式から、apexのクレータ生成率比はantapexに比べ 1.50 ± 0.09 倍高いことがわかる。これまで多くの研究者が先入観により、クレータ生成率不均質を無視してきたことを考えると、この値は非常に大きいのではなかろうか。

以上のように、月のクレータ生成率も不均質であることが明らかとなった。先にも述べたが、クレータの分布は、月の進化に関する様々な興味深い情報を含んでいる。クレータ生成率不均質は、そのような情報を引き出すためのツールとしての有効性を持っていると

ともに、月の進化を左右した一つの要因としても重要である。以下では、クレータ分布の記録を元に、(a)地球-月システムにおける衝突天体の推定、(b)クレータ年代学への影響、そして最後に、(c)月の進化への寄与、について考察を行いたい。

3. 衝突天体の正体は？

上で述べたように、過去の理論的な研究からクレータ生成率不均質の程度は、衝突天体の惑星系に対する相対速度に依存することが知られている。よって、逆にクレータ生成率の不均質の程度がわかれば、理論と比較し、その見積もられる速度から、衝突天体の特定が可能となる。

一般に、地球-月システムにおいてクレータを形成してきた天体は、地球軌道を横切るような軌道を持った小惑星や短周期・長周期彗星である。それぞれの地球-月システムに対する接近速度は大きく異なり、小惑星では10~20km/s、彗星では20~60km/sと見積もられる。しかし、それぞれがどの程度の比率で衝突してきたかはよく分かっていない。

一方、地球、月クレータの統計的な研究などから[e.g., 5]、顕生代ではそれ以前に比べて、クレータ生成率が約2倍に増加したという報告がなされている。その増加の原因はよく分かっていないが、高い生成率が数億年続いていることを考えると、原因を太陽系外に求めることが妥当であろう。その場合、彗星の衝突頻度が重要な鍵となってくる。例えば、太陽系が他の恒星と接近すると、オールトの雲を構成している"彗星の卵"は擾乱を受け、その一部は太陽方向に落下し、多くの長周期彗星が生まれるだろう。もしこのようなメカニズムが顕生代の高クレータ生成率の原因であるなら、顕生代における衝突天体は、それ以前に比べ、比較的大きい接近速度を持っていたと予想される。

図3は、衝突天体の接近速度の関数として、理論的に予想されるクレータ生成率比を示す。光条クレータ分布から得られた 1.50 ± 0.09 のクレータ生成率比は、

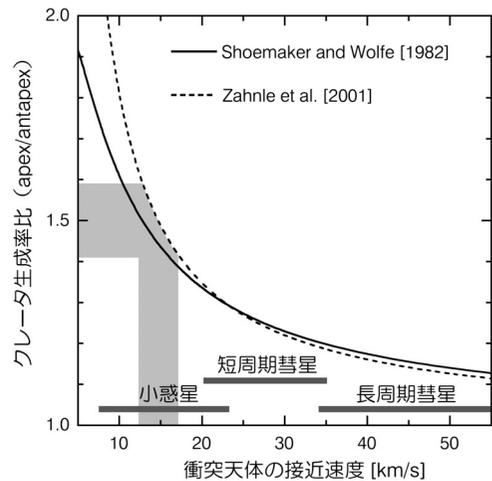


図3：理論的に予想されるクレータ生成率比 (apex/antapex) と観測値の比較。観測された不均質の範囲 (灰色部分) は、小惑星の接近速度とよく一致している。

おおよそ12~17km/sに一致する。これは小惑星の速度とよく合っている。この結果からは、顕生代に彗星衝突が大幅に増加したとは考えにくい。しかし、見積もられた12~17km/sの接近速度は過去10億年間の平均値であるため、過去数億年における衝突天体の変化を調べるためには、解像度が足りないのかもしれない。もし McEwen et al. [5] が提案している、コペルニカンにおけるクレータ生成率の30%の増加が事実であると仮定し、その増加分がすべて彗星の衝突によるとするならば、月に普遍的に衝突を起こしてきた天体は12~13km/sの接近速度を持っていたことになる。つまり、地球-月システムに定期的に衝突してきた天体は小惑星であり、彗星の衝突はクレータ生成率を変化させるような $+\alpha$ の役割であったと考えられる。いずれにせよ、10億年という長いタイムスケールでみたとき、彗星による衝突は稀であり、大部分の衝突は小惑星によるものであったと言えよう。

4. クレータ年代学への影響

一般に、固体惑星、衛星表面では、古い地域ほど多くのクレータが存在し、若い地域ほどクレータは少な

いと考えられる．このような簡単な原理に基づき、形成されたクレータの頻度から、その地域の年代を見積もる方法をクレータ年代学と呼ぶ．クレータ年代学は、画像データから年代決定ができるといった簡便さのため、特に月や火星の様々な地域に広く用いられてきた．

クレータ年代学から、絶対年代を決めるためには、表層年代とクレータ数密度の関係を知る必要がある．それは、アポロ、ルナ計画で持ち帰った岩石サンプルの放射年代と、着陸地点のクレータ密度を関係づけることで得られた[e.g., 6] (図4)．従来のクレータ年代学では、クレータ生成率が空間的に一様であると仮定し、全ての地域で同様な年代-クレータ密度カーブを用いてきた．しかし上で述べた理由から、月ではクレータ生成率が不均質であるため、それぞれの地域に見合ったカーブで年代決定する必要がある．

アポロ、ルナ着陸地点は、経度0付近、つまりクレータ生成率が平均的な位置に分布していることから、それから得られた既存の年代-クレータ密度カーブ(図4)は、月の平均であると考えられる．もし、過去40億年間のクレータ生成率不均質の程度が、過去10億年間のものと同様であったと仮定すると、(1)式から、それぞれの地域における年代-クレータ密度カー

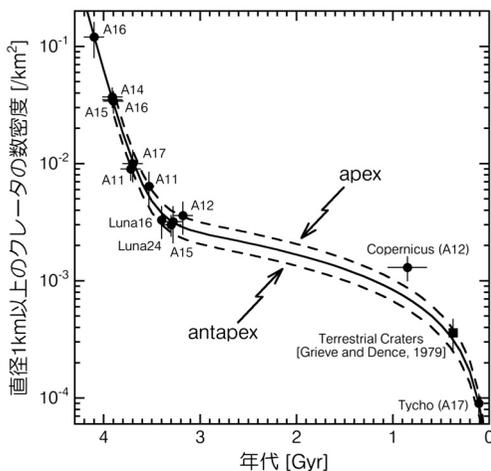


図4：月における表層年代とクレータ密度の関係 (Neukum and Ivanov [6]から改変)．点線は apex と antapex でのローカルな年代-クレータ密度カーブ．

ブを求めることが可能である．このクレータ生成率不均質一定の仮定は、玄武岩質溶岩が吹き出した35-38億年前以降、月は安定して現在と同じ方向を向いていたと考えられることや、過去40億年間の衝突天体のサイズ分布と速度分布が大きく変化していないことから[6]、第一近似として妥当であろう．

図4は、apex、antapexでのローカルな年代-クレータ密度カーブを示す．それぞれのカーブから求められる年代差は特に10~35億年の期間で大きく異なる．例えば、apexとantapex付近に直径1km以上のクレータの数密度が0.002/km²の地域があったとすると、標準の年代-クレータ密度カーブからは24億年に年代決定されるが、実際はそれぞれのローカルカーブから、20、30億年であると考えられる．このように、同じクレータ密度を持つ地域でも、クレータ生成率不均質の影響で、10億年もの差が生じる．以上から、月表層のより正確な年代決定と、それによる月の進化の更なる理解のため、クレータ年代学におけるクレータ生成率不均質の補正の必要性は明らかである．

しかし Namiki and Honda [7]が指摘しているように、直径数 km 以下のクレータは、二次クレータを多く含んでいる可能性があるため、年代決定に使用できないかもしれない．それは、クレータ年代学の精度と分解能の限界を示唆するものである．この問題は、Lunar-A や SELENE などの将来のミッションで得られる高解像度画像の有効性を考える上でも重要であるため、更なる検討が必要であろう．

5. クレータ生成率不均質と月の進化

クレータ生成率が不均質であったことは、月の進化に大きな影響を与えた可能性がある．特に月の初期には、数百~千 km サイズのクレータをつくるような大衝突が頻繁に起こっており、また、当時は月の軌道速度が大きかったためクレータ生成率不均質はより極端だったと予想されことから、その影響は多大なものであったと考えられる．その影響の痕跡は現在の月にも

残っているかもしれない。特に、月の二分性はその候補であると言えよう。

ここで言う月の二分性とは、表側と裏側の間で、地殻の厚さや海の分布に明らかな非対称があることを指す。例えば、月の重力異常データの解析から、表側の地殻は平均55kmの厚さであるのに対し、裏側の地殻は67kmで、12km程度裏側が厚く見積もられている [8]。一般に月の同期回転は、月形成当時の強い潮汐力により、かなり初期に成立していたと考えられる。月の二分性は同期回転と何らかの関係があると思われ、その起源を説明するために、これまで多くのモデルが提案されてきた。しかし、この問題は未だ解決しておらず、月に関する最大の謎の一つである。

例えば、Loper and Werner [9]は、月初期におけるマグマオーシャン内の大規模な対流が、冷却に伴って結晶化した斜長石を裏側へと運び、裏側の地殻を厚く

したという説を唱えた (図5)。この解釈では、そもそも地殻は非対称に形成され、現在に至っているとされる。

しかし、ベースンの地下構造をみて明らかのように、大規模な天体衝突は月の地殻の形状を大きく変形させたと考えられる。例えば、ベースンの直下では、クレータ形成とそれに伴ったマンツルの上昇により地殻は薄くなり、ベースン周辺では放出物の堆積のため、厚くなる。月形成直後、そのような大衝突は頻繁に起こっており、幾度も月地殻は変形を受けたはずである。つまり、現在の地殻の形状は、重爆撃期に起こった大量の大衝突の名残りであると考えるのが妥当であろう。実際に、月の地殻が薄い地域はすべて、現在発見されているベースンの位置とよく対応している。以上のことを考慮すると、表側と裏側の地殻の平均的な厚さの違いは、クレータの形成頻度が違った結果であると考えられる (図5)。これを裏付ける証拠として、ベースンのサイズ分布の比較から分かるように、裏側に比べ表側に多くのベースンが存在していることが挙げられる (図6)。

しかし、前章まで述べてきたように、クレータ生成率の不均質は月の表側と裏側ではなく、前面と後面の間で起こるはずである。地球-月システムにおける衝

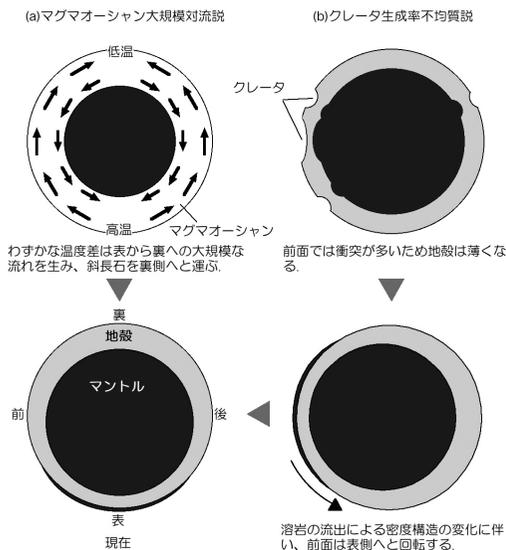


図5：月の二分性を説明する2つのモデルの模式図。(a) マグマオーシャン内大規模対流説：初期の月は高温の地球に近かったため、表側は裏側に比べ冷えにくかった。その僅かな温度差は表側から裏側への大規模な流れを引き起こし、結晶化した斜長石を裏側に集めた。(b) クレータ生成率不均質説：当時の前面では衝突が頻繁に起き、地殻が薄くなる。その後、玄武岩質溶岩が流出し、apex-antapexの方向に慣性モーメントが最小となる主軸がつくられる。その結果、1000~10000年の時間をかけて、前面が表側へと回転した。

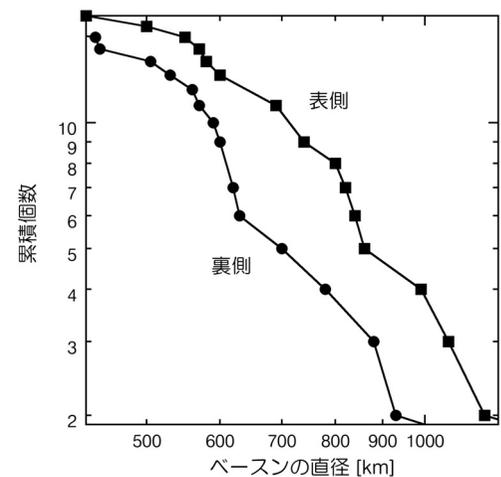


図6：表側と裏側にあるベースンのサイズ頻度分布 (Wilhelms [10]のベースンリストより作成)。

突を想定した数値計算による研究でも、表側と裏側の間で明らかな非対称をつくるほどのクレータ生成率不均質は起きないことが示されている[11]。この不均質パターンの"ずれ"は、月の方向が変化したと考えることで、簡単に説明できる。おそらく以前は、現在の表側が前面を向いていたのであろう。当時のクレータ生成率不均質は選択的に前面の地殻を薄くし、表側への玄武岩質溶岩の流出を助けたと考えられる(大衝突が溶融を直接引き起こしたか否かは定かでないが)。結果的に月の密度構造は大きく変化し、apex と antapex を結び方向に慣性モーメントが最小となる主軸がつけられた。Melosh [12]によると、慣性モーメントが最小となる主軸が地球方向を向いた場合に同期回転は安定し、それは1000~10000年といった短いタイムスケールの間に起こると予想される。このことから前面から表側への方向転換は、地殻非対称の形成の直後には完了していたと考えられる。

しかし、その地殻非対称がつけられる間、同期回転の方向をどのようにして維持したかが問題である。そもそも重爆撃期の初期では、同期回転を崩すような大衝突が頻繁に起こった可能性があり、その都度、慣性主軸の方向を変化させたかもしれない。おそらく重爆撃期間、前面を向いている半球は連続的に入れ代わったと考えられる。ある時前面を向いていた半球は、高い衝突率により、次第に慣性主軸最小の方向と一致し、地球方向に回転する。その後の前面となった半球もまた同じように地殻の薄化がはじまり、以前の慣性主軸の方向を変化させ、表側への方向転換を起こす。これを繰り返したと予想され、現在の表側は、重爆撃が終了し、玄武岩質溶岩が流出する直前、つまり最後の前面であったのではないか。この解釈では、地殻二分性をつくる間、その前につくられた地殻二分性で同期回転を支えていたということになる。

このようなモデルが実際に起こりうるか否かは、地殻二分性の形成と月の方向転換のタイムスケールの兼合いで決まり、地殻二分性を短時間でつくるような激しいクレータ生成率不均質が必要となろう。しかし、

月形成から重爆撃期終了までの期間における月軌道進化や衝突天体の接近速度の理解が不完全であるため、クレータ生成率不均質の程度と地殻二分性の形成のタイムスケールを定量的に評価することは難しい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、「衝突現象・衝突地形小研究会」での議論を参考にさせていただいた。研究会のお世話をいただき、本稿の査読者でもあった神戸大の平田成氏、また、神戸大の中村昭子、JAXAの中村良介の両氏、参加者の方々に深く感謝します。また、本稿の内容に関し、金沢大学の古本宗亮、鶴飼啓之の各氏に有益なコメントをいただいたことを心より感謝します。

参考文献

- [1] Shoemaker, E. M. and R.F. Wolfe, 1982, in "Satellites of Jupiter" (edited by D. Morrison), Univ. Arizona Press, 277.
- [2] Zahnle, K. et al., 2001, *Icarus* 153, 111.
- [3] Schenk, P. and S. Sobieszczyk, 1999, *Bull. Am. Astron. Soc.*, 31, 1182.
- [4] Morota, T. and M. Furumoto, 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.* 206, 315.
- [5] McEwen, A.S. et al., 1997, *J. Geophys. Res.*, 102, 9231.
- [6] Neukum, G. and B.A. Ivanov, 1994, in "Hazards due to Comets and Asteroids" (edited by T. Gehrels), Univ. Arizona Press, 359.
- [7] Namiki, N. and C. Honda, 2003, *Earth Planet. Space*, 55, 39.
- [8] Neumann, G. et al., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 16841.
- [9] Loper, D.E. and C.L. Werner, 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, E6, 10.1029/2000JE001441.

- [10] Wilhelms, D.E. 1987, The geologic history of the Moon, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.
- [11] 石崎康子, 古本宗充, 1997, 遊星人 6, 12.
- [12] Melosh, H.J., 1975, Earth Planet. Sci. Lett., 26, 353.