

氏名	諸田智克
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第540号
学位授与の日付	2003年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	Asymmetrical Cratering on the Moon (月におけるクレータ生成率の非一様性)
論文審査委員(主査)	古本 宗充(研究科・教授)
論文審査委員(副査)	河野 芳輝(理学部・教授) 奥野 正幸(理学部・教授) 寅丸 敦志(理学部・助教授) 栗田 敬(東京大学・教授)

学位論文要旨

ABSTRACT

The synchronous rotation of the satellite ought to cause a spatial variation in the cratering rate over its surface. Cratering asymmetry caused by impactors with lowest velocity is investigated. The motions of the impactors are simulated by invoking Hill's equation in a restricted four-body (The Sun, Earth, Moon, and a projectile) problem. The obtained cratering rates are asymmetrical with the maximum values at the apex. Objects that are captured by the Earth-Moon system to have retrograde geocentric orbits substantially contribute to the asymmetry in the cratering rate. In order to investigate spatial variation in the recent cratering rate, 222 rayed craters larger than 5 km in diameter are identified. The crater density decreases as a sinusoidal function of the angle from the apex. The observed ratio of the density at the apex to that at the antapex is 1.5. The ratio suggests that recent lunar craters are formed mainly by NEAs rather than comets with higher encounter velocities. The distribution for the lunar basins is asymmetrical not between the leading and trailing hemispheres but between the nearside and farside. I assume not only the spatial variation in the cratering rate but also the lunar reorientation after the heavy bombardment. The asymmetry in the basin distribution is arisen during post-Nectarian period rather than pre-Nectarian period. For the post-Nectarian basins the nearside density is

2 - 3 times higher than the farside density.

はじめに

太陽系の多くの衛星は自転・公転周期が一致しており、常に惑星に対し同一面を向けている。このような衛星の同期回転は、クレータ生成率に地域差を起す [e. g., Wood, 1973]. 地域差のパターンとしては、公転運動の進行方向を向いている位置 (apex) でクレータ生成率は最大で、その位置からの角距離とともに減少し、進行方向の逆側を向いた位置 (antapex) で最小となると考えられる。

過去のシミュレーションや理論的な研究から [e. g., Ishizaki and Furumoto, 1997; Zahnle et al., 2001]、クレータ生成率の地域差の程度は衛星の公転速度と、その惑星—衛星システムに対する衝突天体の速度に依存することが知られている。衝突天体の速度に対し、衛星の公転速度が大きければ、クレータ生成率の地域差は顕著となり、逆に衛星の公転速度が十分に小さければ、地域差は起こらない。

これらのことから、もし衛星速度、衝突天体速度とクレータ生成率の地域差の関係が定量的に理解されれば、衛星表面に記録されたクレータの分布を年代ごとに調べることで、過去の衛星の軌道進化や衝突天体の変化を推察することができる。本研究では月における (1) 光条クレータと (2) ベースンの分布の地域差について調べる。光条クレータは比較的最近に形成されたクレータで、ベースンは太陽系形成初期の重爆撃期に作られた大クレータである。

月のクレータ分布を調べる前に、まず衝突天体の速度とクレータ生成率の地域差の関係を見直す必要がある。過去の研究では太陽の重力場が考慮されておらず、特に低速度の天体によって起こるクレータ生成率の地域差がどの程度であるか知られていない。

数値シミュレーション

ここでは地球の軌道に近い衝突天体を想定し、ヒル方程式 [Nakazawa and Ida, 1988] を用いた 4 体 (太陽、地球、月、小天体) シミュレーションを行った。地球—月システムから 15 ヒル半径離れた位置から小天体の軌道を計算し、月に衝突した場合、その衝突位置を計算し、分布を調べた。月の公転速度の影響を調べるため、現在の地球—月間距離とその半分の場合で数値計算を行った。

それぞれの場合で、684、1897 回の衝突が起こった。衝突頻度の分布は、理

論的に期待されるパターンと同様に、apex で最大で、antapex で最小である。その計算したクレータ生成率の apex/antapex 比は 2.4、3.3 であった。この地域差は過去の太陽重力を無視した見積もりに比べ、極端に小さい。

月に衝突した天体の半数近くは一度地球重力にトラップされ、地球周回軌道を経験する。順行軌道にトラップされた小天体は月に均質に衝突するが、逆行にトラップされた天体の大部分は月の前面に衝突する。

光条クレータの分布

まず光条クレータの同定を行う。光条はクレータから放射状にのびた高いアルベドを持つ構造で、年代と共にアルベドは低くなる。一般に、光条を持つクレータは過去約 10 億年間に形成されたと考えられる。

光条の有無を判断する際に、NASA の探査機クレメンタインにより得られた 750nm-mosaic 画像を用いる。クレメンタイン画像は低位相角の条件下でえられたものであるため、月表面岩石のアルベドをよく反映しており、光条を持つクレータの検出に適している。しかし高緯度地域では太陽光の入射角が大きくなり、光条は発見しにくい。そのため、光条クレータのカウントは比較的 low 緯度 (42°S - 42°N) で行った。また、表層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ことから [e.g., McEwen et al., 1997]、表側の海 (70°W - 70°E) と裏側にある South Pole-Aitken Basin、4 の海を解析地域から除いた。光条クレータの同定にはそのクレータサイズの 1/20 以上の解像度が必要とされる [McEwen et al., 1997]。クレメンタイン画像の解像度は 0.1-0.2km/pixel であることから、直径 5km 以上の光条クレータの同定が可能と考えられる。

直径 5km 以上の光条クレータ 222 個を同定した。同定した光条クレータの密度は McEwen et al. [1997] の光条クレータの密度とよく一致することから、本研究の解析範囲にある光条クレータをすべてカウントできたと考える。

apex からの角度の関数として光条クレータの分布を調べた結果、明らかに apex 付近でクレータが多く、antapex に近づくにつれ減少していることがわかった。apex/antapex 比は 1.50 ± 0.09 である。上で述べたように、クレータ生成率の地域差の程度は、惑星—衛星システムに対する衝突天体の速度に依存する。本研究で得られた 1.50 ± 0.09 の比は、10-17km/s の衝突天体の速度に相当する。この速度は NEAs (Near Earth Asteroids) の地球—月システムに対する速度 (10-15km/s) とよく一致する。この結果から、過去 10 億年における主な衝突天体は NEAs であり、短周期、長周期彗星のようなより高速度の天体による衝突は稀であったと考えられる。

ベースンの分布

Wilhelms [1987]で挙げられた 45 のベースンの分布を調べた。予想されるような前面と後面の間の非対称はみられない。しかし、ベースンの数に表側と裏側で明らかな違いがみられた。このことから、月の現在の表側は重爆撃期において、前面を向いていたと考えられる。

その表裏側における違いは pre-Nectarian ベースンではほぼみられない。これはおそらく、ベースンを形成した大衝突によりたびたび月の地球潮汐によるロックがはずれたためであろう。逆に post-Nectarian ベースンでは表側と裏側の非対称が大きい。そのベースン密度の表裏比は 2-3 倍である。これは低速度天体を想定したシミュレーションで得られる前面後面比とほぼ一致する。このことから、ベースンを形成した小天体は地球軌道に近い微惑星であったと考えられる。

参考文献

- Baldwin, R. B., *Icarus*, 61, 63-91, 1985.
- Ishizaki, Y, and M. Furumoto, *Planetary People*, 6, 1, 12- 18, 1997 (in Japanese).
- McEwen, A. S., J.M. Moore, and E.M. Shoemaker, *J. Geophys. Res.*, 102, 9231-9242, 1997.
- Morota, T., M. Furumoto, R. Honda, and Y. Yokota, *Proc. ISAS 31st Lunar Planet. Symp.*, 118-121, 1998.
- Nakazawa, K., and S. Ida, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 96, 167-174, 1988.
- Shoemaker, E.M., and R.F. Wolfe, in *Satellites of Jupiter*, edited D. Morrison, University of Arizona Press, Tucson, pp. 277-339, 1982.
- Wilhelms, D.E., *The geologic history of the Moon*, U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1348pp, 1987.
- Wood, J.A., *The Moon*, 8, 73-103, 1973.
- Zahnle, K., , P. Schenk, S. Sobieszczyk, L. Dones, and H.F. Levison, *Icarus*, 153, 111-129, 2001.

学位論文審査結果の要旨

本論文は、小天体が月に衝突することによってできるクレータの空間分布に関する研究結果を報告したものである。月を含めて太陽系の衛星のほとんどは、自転速度と惑星の周りでの公転速度とが一致している。このような場合、衛星は同じ面を進行方向に向けているため、天体との衝突頻度は前面で高く、後面で低いと予想される。外惑星の衛星ではそれが観測されている。しかしながら従来、月においてはその非対称性は弱くて観測されないというのが常識であった。これは、月の公転速度が他の衛星に比べて遅いからだとして、納得されてきていた。著者は近年得られた月の画像を丹念に調べ、比較的最近（約8億年以内）に形成されたと考えられる、明るい放出物を持つクレータを選び出し、非対称性の検討を行った。その結果、明瞭な非均質性を発見した。月の進行方向の地点でのクレータ頻度は、その反対側の地点での頻度より1.5倍大きいことを示した。一方、著者は天体衝突のシミュレーションも行い、このような非対称が地球近傍に公転軌道の遠日点を持つ天体との衝突を考えることで、公転速度の遅い月でも発生することを示した。従来の考えでは、衝突天体の多くは彗星であると考えられてきたが、著者の結果はこれが間違いであり、少なくとも小さな衝突天体は、彗星軌道から小惑星軌道へ変化した後に月に衝突していることになる。本論文は、月については地球に衝突する天体に関して、従来の常識を覆すとともに新たな情報を与えている。よって博士論文に値すると判断される。