

月の非対称クレーター分布と近地球小惑星

伊藤孝士(自然科学研究機構国立天文台天文シミュレーションプロジェクト・天文データセンター)

1 同期回転衛星と非対称なクレーター分布

潮汐相互作用は太陽系の中で広く見られる現象であるが、そのために自転周期と公転周期が一致してしまった衛星が多く見られる。このような衛星（同期回転衛星）は母惑星に対して常に同じ面を向けて公転しているが、それは衛星がその進行方向（軌道運動の方向）に対しても常に同じ面を向けていることを意味する。衛星が常に同じ面をその軌道運動の方向に向けていれば、進行方向を向いた半球（本稿では前面と呼ぶ）はその反対側の半球（後面と呼ぶ）よりも数多くの衝突を受けているというのは自然な予想である。

木星のガリレオ衛星や海王星のTritonについては、この予想（衝突痕すなわちクレーターの分布が前面と後面で非対称になること）は実際に確認されている。こうした衛星に比べると公転周期が長く、衝突天体の相対速度が小さい地球の月には非対称なクレーター分布は確認されて来なかった。けれども2003年、日本人研究者のグループが探査機Clementineが取得した画像データを精査することにより、月面に存在する光条クレーターと呼ばれる比較的新しいクレーターもこのような非対称な空間分布を持つことを明らかにした¹⁾。

月のように自転と公転が同期した衛星上のクレーター非対称分布の程度は、主として衛星の公転速度と衝突天体の衝突速度（相対速度）に依存する。衛星の公転速度が大きければ前面には後面に比べて多数の天体衝突が発生する。逆に衛星の公転速度が小さければ、後面にも前面とさほど変わらない数の衝突が発生する。例えば衝突天体が衛星に対して極めて小さな相対速度を持っており、ほぼ静止している極端な状況を考えてみれば、衛星の前面に衝突が集中することはすぐに理解される。衛星に対する衝突天体の相対速度が大きく、かつ天体が接近する方向が等方的な場合には、結果として生成される衝突痕の非対称性はさほど大きくならない。要するに、クレーターの非対称性の様子を事細かに観察してそれを検証することにより、各種の衛星上にあるクレーターを作った衝突天体の力学的起源について制約を与えることが出来るのである。本研究では多数の試験天体を用いた数値実験を遂行することで、月面で観測されるクレーターの非対称分布を作り上げた衝突天体がどのような力学的起源を持っているのかについて情報を得ることを試みる。とりわけ現在知られている近地球小天体が月と衝突する際にどのような非対称衝突分布を持つのか、その力学モデル依存性はどのようなものかを明らかにしたい^{2,3)}。

2 初期設定と数値実験

今回の数値実験では幾つかの近地球小天体の集団を想定し、そこから出発して惑星摂動下での各天体の軌道進化を数値積分して、各惑星への接近頻度や月への衝突確率を計算する。手続きの必要上、数値実験は第一段階と第二段階のふたつに分かれる。

第一段階では月を直接組み込まず、近地球小天体領域から出発して月-地球系の作用圏へと突入する天体の軌道要素分布関数を得る目的で一億年間の連続数値積分を行う。今回は観測される近地球小天体の軌道要素分布に対して観測バイアス除去作業を行い、本来観測されるべき天体の分布を推定した力学モデルから算出される天体群のうち絶対等級 $H < 18$ である明るい天体18,000個を扱った⁴⁾。このモデルではメインベルト内端の v_6 共鳴帯、木星との3:1平均運動共鳴ゾーン、火星と軌道交差する領域、メインベルトの外側、およびTNO円盤、という五領域にある天体群が近地球小天体の生成に寄与する。初期状態から出発して各小天体の軌道進化に関する数値積分を一億年間実行し、地球の作用圏に突入する試験天体の軌道要素分布を得る。この計算で重要なことは、多くの試験天体が力学進化の途上で惑星や太陽との衝突もしくは木星などによる散乱・系外放出過程を経て失われるということである。実際の太陽系ではこのような天体喪失過程と並行して何らかの小天体生成過程が働いて近地球小天体が次々と供給され、地球近傍でのそのフラックスは過去30億年ほど一定に保たれてきたものと考えられている。このような状況を数値実験で再現するため、私達は衝突や散乱などの要因で取り除かれた天体を直ちに初期条件から補充する方法を実装した。即ち近地球小天体の定常供給モデルの実現である。

計算の過程でもう一つ考えるべきことは、18,000個では試験天体数がまだ不足だということである。例えば軌道半長径2AU近傍に3,000個の試験天体を配置しても、一億年間で地球に衝突するものはわずか100個程度である。この状況では月には数個の衝突しか期待できず、クレーターの記録と照合するのが困難になる。この問題を解決するため、地球の作用圏上で天体の複製を実行する。試験天体の運動がカオス性を持っていることを利用し、作用圏上に記録された遭遇速度・遭遇位置とわずかに異なる軌道を多数発生させ、その軌道情報から月に衝突する天体の衝突速度などを求めるのである。この部分の計算、つまり月への試験天体の直接衝突の計算部分に関しては地球の作用圏内のみで

行うため、大量の天体を投入することが可能である。これを私達は第二段階の数値実験と呼ぶが、今回は合計で数百億個の複製試験天体を使用した。

3 実験結果

第一・第二段階の数値実験の結果、近地球小天体の月面への衝突頻度の前面後面比すなわち非対称性が計算される。この結果に対してクレーターのスケールング則や衝突天体のサイズ頻度分布の効果を加味することで、クレーターの非対称衝突データと直接比較できるようなる(図1)。一見して分かるように数値結果(図1(a))と観測データ(図1(b))は整合的とはいえない。図1が語るのは近地球小天体の数値実験から得られた非対称クレーター分布が観測値よりずっと小さいということだが、これは月面クレーターの非対称分布を形成した衝突天体群には現在私達が知っている近地球小天体群よりも月-地球系に対する相対速度の小さな天体が数多く含まれることを示唆する。即ち、近地球小天体群には私達がまだ知らない「遅い」天体が多く潜んでいるかもしれないのである。そうした「遅い」天体群の相対速度は現在の近地球小天体のそれ (~22 km/s) の半分程度、10-12 km/s と予想される⁵⁾。また図1(b)に示したクレーター記録が直径5 km以上のものを対象にしていることから、こうした遅い天体は直径200-300 mのものまでを含み得ることになる。

今回の数値実験結果の現実性の検証については今後の実証データの取得を待つ必要がある。たとえば最新の月探査データを用いたクレーター記録の取得、WISE

やPan-STARRSなどサーベイ観測望遠鏡を用いた近地球小天体の軌道要素分布の更新、などである。そのような実証データを取得した上で観測バイアスを除去する操作を行えば、今回の数値実験結果から予想される「遅い」未発見小天体の実在・非実在に関して何らかの制約が与えられると思われる。もしもこうした「遅い」天体が存在するとすればそれらは月-地球系の近傍や共軌道上⁶⁾に存在するはずであり、将来のスペースガード計画にも何らかの影響を与えるであろう。

参考文献

- 1) Morota, T. and Furumoto, M., Asymmetrical distribution of rayed craters on the Moon, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **206**, 315-323, 2003.
- 2) Ito T. and Malhotra, R., Dynamical transport of asteroid fragments from the ν_6 resonance, *Adv. Space Res.*, **38**, 817-825, 2006.
- 3) Ito T. and Malhotra, R., Asymmetric impacts of near-Earth asteroids on the Moon, *Astronomy & Astrophysics*, **519**, A63, 2010.
- 4) Bottke, W. F. *et al.*, Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects, *Icarus*, **156**, 399-433, 2002.
- 5) Malhotra, R. and Jeongahn, Y., Dynamical investigations on the leading/trailing asymmetry of lunar rayed craters, *1215*, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, held 2-7 October 2011 in Nantes, France.
- 6) Connors, M., Wiegert, P. and Veillet, C., Earth's Trojan asteroid, *Nature*, **475**, 481-483, 2011.

図1. 月面衝突頻度の非対称性を今回の数値実験(a)³⁾と実際の観測データ(b)¹⁾とで比較した。月の進行方向(パネルa内のy軸方向)に関する衝突の非対称性のみを示している。横軸は月前面の頂点(apex)から測定した角度、縦軸は相対的なクレーター密度。曲線は正弦関数によるフィッティングで、apexからの角度180°(右端)で1となるよう規格化してある。

