

数値実験による月面クレーター非対称分布の再現

伊藤孝士¹⁾

¹⁾ 自然科学研究機構国立天文台

Numerical reproduction of the asymmetric distribution of lunar craters

Takashi Ito¹⁾

Abstract

Recent lunar explorations have revealed that there is a signature of asymmetric crater distribution on the lunar surface, probably caused by the synchronous rotation of the Moon. In order to obtain the information about dynamical origin of the projectiles that created the asymmetry, we carried out a series of numerical integrations to reproduce the direct impact flux on the Moon with a large number of test particles. Although it turned out that the current near-Earth asteroids can largely account for the observed asymmetric crater distribution, our numerical result also suggests potential existence of more smaller and slower near-Earth objects that have not been detected yet.

Key Words: Asteroids; Craters; Moon; Asymmetric impacts

1 クレーター分布の非対称性

太陽系惑星の衛星には長い年月に渡る潮汐相互作用などのためにその自転周期と公転周期が一致してしまっているものが多く見られる。木星の衛星にそのようなものは幾つかあるし、わが地球の衛星である月はその最たる例である。このような衛星は常に母惑星に対して同じ面を向けて公転している。1960年代に月探査計画が実行されるまで人類が月の裏側の様子を知ることができなかった所もここにある。

衛星が母惑星に対して常に同じ面を向けて公転しているということは、衛星がその進行方向に対しても常に同じ面を向けているということの意味する。一般に衛星の表面は多数のクレーターが存在し、長年にわたる小天体の衝突の歴史の証左となっているが、衛星が常に同じ面をその進行方向に向けているとすれば、進行方向を向いた面(前面と呼ぶ)はその反対側の面(後面と呼ぶ)よりも多くの衝突を受けることにな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(衝突痕つまり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月にはこの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よ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⁾。これは極めて画期的な発見である。

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ことは容易に想像できよう。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遜色ない数の衝突が発生してもおかしくはない。衝突天体の相対速度に関しては、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、ほぼ静止に近いような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もほぼランダムな場合には、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ことも自明である。

このような考察から言えることは、クレーターの非対称性の様子を事細かに観察し、それを数値的または理論的に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ということである。かつての研究でもそのような試みは行われてきたが、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の情報を得ることを試みる。クレーターは人類にとって馴染み深い地形のように思えるが、実のところはまだ謎に満ちており、今でも太陽系の歴史に関する貴重な情報源として研究の最前線に位置するターゲットなのである。

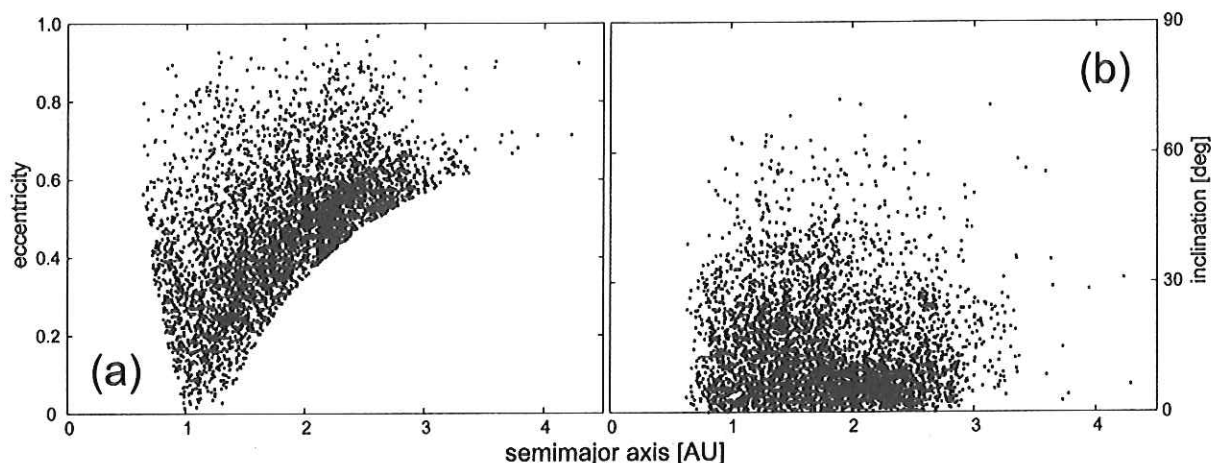


図1. 今回の数値実験に用いた試験天体群の一例である近地球小惑星的な天体の軌道要素分布。(a)軌道半長径と離心率の分布、(b)軌道半長径と軌道傾斜角の分布。

2 数値実験

数値実験とは言え状況設定はごく簡単である。幾つかのありそうな衝突天体(試験天体)の集団を想定し、そこから出発して惑星摂動下での各試験天体の軌道進化を数値積分して、最終的には月への衝突確率を計算するというものである。まず最初の段階では月を直接組み込まず、地球-月系の作用圏に突入する天体の軌道要素分布関数を得る目的での長期の数値実験を行った。ここで考えるのは以下の三種類の天体群である。(1)近地球小惑星的天体で、現在観測されているApollo, Amor, Aten各群の小惑星と似たような軌道要素を持つ天体を約9200個準備する。(2)メインベルトの内端を形成する強い永年共鳴 ν_6 の近傍に約36000個の試験天体を準備する。(3)より遠くから接近する天体の例として、2と3の間にあるTisserandパラメータを持つ木星族彗星的天体を約46200個用意する。これらの天体の初期軌道要素分布のうち近地球小惑星的天体についてのものを示したのが図1である。このような状態から出発して一億年間の数値積分を実行し、各惑星への衝突確率を求めると同時に、地球の作用圏に突入する試験天体の軌道分布を得る²⁾。

地球の作用圏に試験天体が突入する確率は実は高くない。例えば永年共鳴 ν_6 の近傍に3000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。このため、月への試験天体の衝突を再現するために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、その軌道を持って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。今回の計算では合計200億個以上の試験天

体の運動を作用圏内で検証した。これは天体同士の相互作用を考えなくても良い試験天体だからこそ出来る計算であると言える。

3 実験結果

こうした過程を経ることで月面への衝突頻度の前面後面比、すなわち非対称性を計算することができる。これにクレーターのスケーリング則やサイズ頻度分布の効果を加えてクレーターのデータと直接比較できるようにしたのが図2である。図を見てわかることは、月の光条クレーターが持つ非対称分布はほぼ現在観測されている近地球小惑星的な天体の衝突により説明できるだろうということである。もちろん、月に衝突する天体の大半はそもそも近地球小惑星なのであるから、この結論はさほど驚くには当たらない。しかし図2を仔細に眺めると、実は観測されたクレーターの非対称性は今回の数値実験で得られたものよりもやや大きいことが分かる。このことは、光条クレーターの非対称分布を作った天体群は現在の近地球小惑星群よりも更に相対速度が小さいもの、つまり地球軌道に近い領域を周回しているものを含んでいることを示唆している。

今回の計算で使った試験天体の軌道要素は実際に観測されている天体のものを基本にし、それに近い軌道要素を持つ仮想的な天体を想定して計算を行っている。実際の太陽系に存在する近地球小惑星はもちろんすべてが観測されているわけではないから、こうした計算に於いては本来は観測されていない天体の軌道要素を推定し(いわゆる「観測バイアスを取り除く」作業)、そこから数値実験を開始する必要がある。けれども、まだ観測されていない天体の多くはより大きな離心率やより大きな軌道傾斜角を持っているものに違いなく³⁾、そのような天体の衝突によるクレーターの分布の非対称性は比較的小さくなるものと予想される。即ち観測バイアスを取り去った初期値から出発しても今回得られた結論は不変であると予想される。

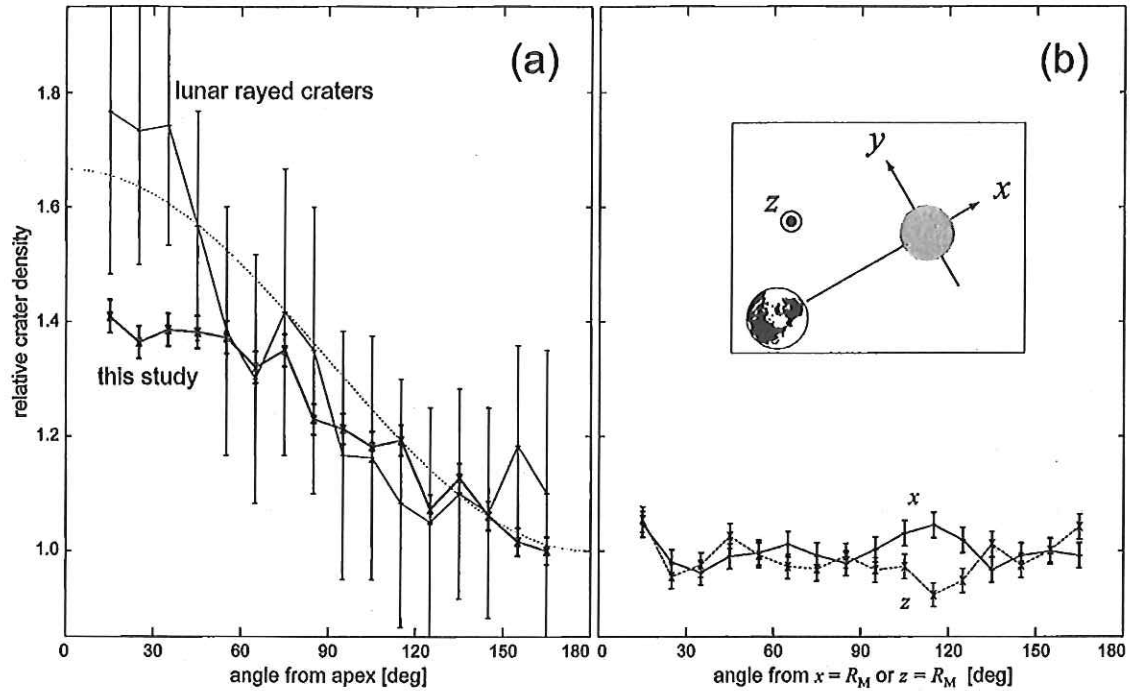


図2. 数値実験より得られた月面衝突頻度の非対称性を実際のクレーターデータ¹⁾と比較したもの。座標系の定義は(b)の枠内に示されたとおりである。(a)月の進行方向(y)に関する衝突の非対称性。(b)月の表裏方向(x)および南北方向(z)に関する衝突の非対称性(こちらには実際のクレーターデータは示されていない)。

かぐや計画に代表されるような現在そして将来進められる月探査計画の成果がこのようなクレーター分布の謎を解く重要なデータを供給してくれることに疑いの余地は無い。今回報告したような計算の信憑性や確かさは、そのような探査データにより検証されてゆくべきものである。

参考文献

1) Morota, T. and Furumoto, M., *Asymmetrical distribution of rayed craters on the Moon*, Earth Planet. Sci. Lett.,

pp. 315-323, 2003.

2) Ito T. and Malhotra, R., *Dynamical transport of asteroid fragments from the ν_6 resonanc*, Adv. Space Res., 38, pp. 817-825, 2006.

3) Bottke, W.F. et al., *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*, Icarus, 156, pp. 399-433, 2002.

(2008年3月22日受付, 2008年6月15日受理)