

月への天体衝突の非一様性

石崎康子¹、古本宗充¹

1. 月のクレータの表側と裏側の差

良く知られているように、月の表側と裏側とは、その地形や地質に大きな差がある。表側には、今から約30~38億年前にできた非常に大きなクレータの底を、月内部から流出した溶岩が埋めたことによって形成された海がある。一方裏側には、この海のような大きなクレータは少なく、多くのより小さいクレータでこぼこしている高地からなる。つまり月の表側と裏側とは、クレータの分布に違いが見られる。

図1は、月の表側、裏側のそれぞれの直径250km以上のクレータについて直径-頻度関係を示したも

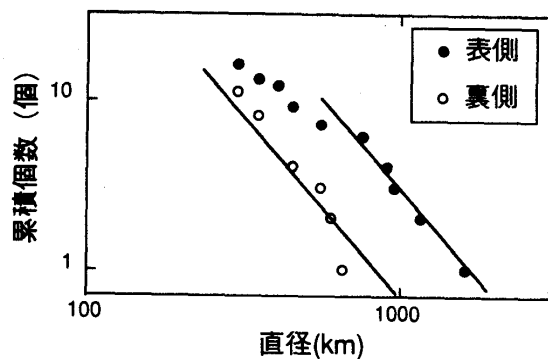


図1. 月の直径250km以上のクレータの直径-頻度関係。横軸はクレータの直径(km)、縦軸はその直径より大きなクレータの数。黒丸は表側、白丸は裏側のクレータを表している。同直径のクレータについては、裏側に比べて表側が約4倍多いことが分かる。

のである。黒丸は表側、白丸は裏側のクレータを表している。同直径のクレータの分布密度を見ると、裏側に比べて表側が約4倍大きい。従って、この図からも、裏側に比べて表側の方が大きいクレータの数が多いといえる。また、表側のクレータの直径-頻度関係について、直径の小さいものの点と実線が合わないのは、直径の小さいものほどそれより大きなクレータによって消され、その分の数が減ってしまった為といえる。従って表側について特にこの様な傾向が現れていることも、裏側に比べて表側に大きなクレータが多いことを表しているといえる。

図2はShaw[1]による、最近10億年間に形成された、まだ光条の残っているコペルニカンクレータ

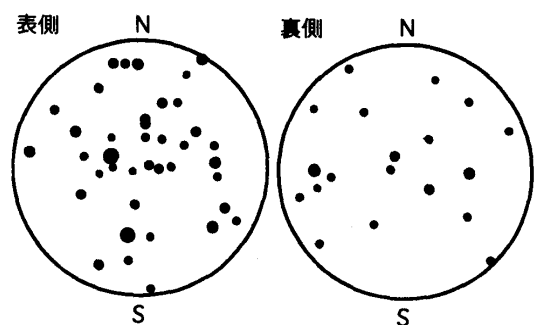


図2. 最近10億年間に形成されたコペルニカンクレータの分布における、表側と裏側の違い。比較的新しいクレータについても、裏側に比べて表側の数が多いことが分かる。

¹金沢大学理学部地球学科

の分布である。これらの比較的新しいクレータについても、表側と裏側とで分布が異なることが分かる。

もし月が単独で公転・自転しているならば、隕石はランダムな方向からやってくるため隕石の衝突によって形成される月面のクレータの分布もランダムになるはずである。従って月面のクレータの分布に、大きな偏りが生じないと予想される。しかし上述したように、実際の月面のクレータの分布には、偶然生じたにしては大きすぎると思われる偏りが見られる。つまり月の表側と裏側とでクレータ分布密度が異なるのは、偶然ではなく何らかの原因が存在する可能性がある。

この原因の一つとして、月と地球が隣接しており、かつ月が常に地球に同じ面を向けて公転していることが考えられる(これらのことを以下、地球・月システムと呼ぶことにする)。すなわち、地球の重力場の影響と、地球に対する月の向きが固定さ

れているということが重なって、月の表裏のクレータの分布の差を生み出している可能性がある。

月に比べ地球の引力は非常に大きい。従って月へ衝突する隕石も地球の引力の影響を強く受けているはずである。地球の引力の影響を受けた隕石は地球側へとその軌道が曲げられる。その結果月の表側により多くの隕石が衝突することが考えられる(図3)。つまり地球の存在が、表側の隕石衝突確率を高めており、その隕石衝突確率の違いが、上述したような表側と裏側の違いとして現れている可能性がある。

月のクレータ分布における非対称が、過去において発生したと考えると、もう一つ別の機構が考えられる。それは、Shoemaker and Wolfe [2] が木星の衛星について指摘しているのと同様に、月の前面と後面の隕石衝突パターンが異なる場合である。ここでいう前面とは月の進行方向側の半面のことであり、後面とは前面の反対側の面のことである。

月の前面と後面とでは、同じ飛行速度の隕石が衝突しても、相対的に隕石の衝突速度が異なる。特に前面との正面衝突の時に衝突速度は最大となり、後面に追突したときに最小となる。隕石の衝突速度が大きければ大きいほど、形成されるクレータは大きくなるため、相対的に衝突速度の大きい前面ではより大きいクレータ、逆に後面では小さいクレータが形成される(図3)。

ここで昔の月が現在の表側を向けて進行していたと仮定する。この時月では、上述した理由によって前面では大きめの、後面では小さめのクレータが形成されたと予想できる。このようにして隕石が衝突を繰り返すうち、月内部で質量の不均質が生じ、その結果重くなった前面が地球の引力に引かれて回転し、地球側を向く。つまり、昔の前面が現在の表側となったということである。この仮定が成り立てば、現在の表側と裏側のクレータの直径-分布密度関係の違いを説明できる。

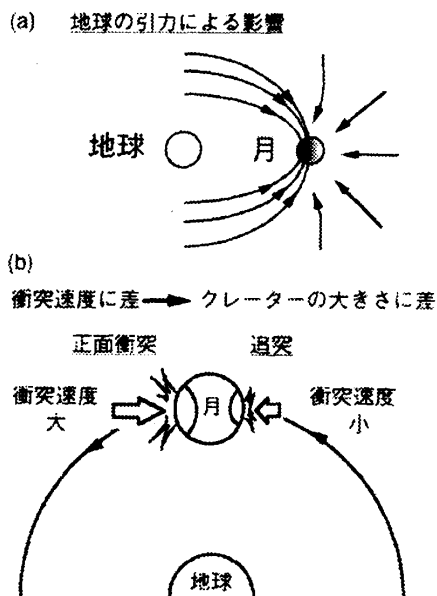


図3. 月の表側と裏側とで、クレータの分布に非対称が生じる原因。(a)は、表側と裏側とで隕石衝突パターンが異なる場合。(b)は、前面と後面とで隕石衝突パターンが異なる場合。

2. 数値実験

数値実験では、月が地球に常に同じ面を向けて公転しているという地球・月システムへ、その公転軌道面上のランダムな地点から隕石が飛んでくるという2次元モデルを想定した。図4はそのモデル概念図である。なお、衝突天体については、惑星が集積した後の、離心率の高い小惑星や彗星を考え、それらが比較的高速でヒル半径内に入ってきた場合を想定した。

まず、月の公転軌道面上における地球を中心とした半径100万kmの円周上のランダムな点から隕石を発射する。発射角度は、発射点と地球の中心を結ぶ線の両側45度の範囲内でランダムにした。地球・月間距離を変えて計算することを考慮して大きめに範囲を取ったが、現在の地球・月間距離では、月に衝突する可能性があるのはおよそ両側21度以内であるので、本実験については余分に範囲を取りすぎたと言える。ここでは比較的高エネルギーの天体との衝突を想定しているため、隕石に対する太陽や他の惑星の影響は無視することとし、地球と月の引力のみが作用すると仮定して軌道計算を行った。そして計算後の隕石の位置が地球または月の半径内に入った場合を隕石衝突と判断し、表、裏、前面、後面それ

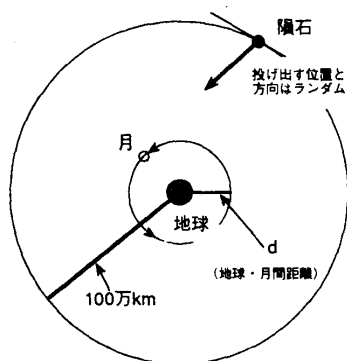


図4. モデル概念図

ぞれの衝突回数をカウントした。

隕石の初速度は、上述したように小惑星や彗星などの天体との衝突を想定しているので、15km/s, 20km/s, 25km/sとした[3]。速度を3通りに変えたのは、衝突回数に速度依存性があるかどうかを確かめるためである。そしてそれぞれの場合において、100万回ずつ隕石を発射した。

隕石の位置計算は、時間間隔を10秒として行った。しかし、例えば地球への衝突が起こっても、計算後の隕石の位置が地球の外である場合などは、衝突しても衝突していないと判断される可能性がある。従って衝突の有無の判定における誤差をできるだけ小さくするために、地球あるいは月に対して、それぞれの半径の5倍以内まで接近した隕石については、時間間隔を1秒とした。運動方程式の積分は各ステップの間、付近の重力場は一定として行った。多少近似はあらいが、今回のような速度で飛来する隕石は、ほとんどの場合地球や月を周回することなく衝突するので、月の表や裏への衝突率の差の検出に於いては、十分な仮定であると考えられる。

月は過去においては現在よりも地球の近くを公転しており、時間とともに地球から遠ざかっていったことが分かっている。地球・月間距離が異なれば、隕石への引力の働き方が異なってくる可能性も考慮して、地球・月間距離を現在の距離の半分にした場合の計算も、同様に行った。

3. 実験結果

数値実験の結果を、表1に示す。表1には、表側、裏側、前面、後面の衝突回数とそれぞれの比が記してある。比は、裏側の衝突回数を1としたときの表側、あるいは後面を1としたときの前面の値である。表の上段は、地球・月間距離が現在と同じ場合、下段は地球・月間距離が現在の半分の場合である。

表1. 計算結果. (a)は現在の地球-月間距離, (b)は現在の半分の地球-月間距離

(a)		15 km/s		20 km/s		25 km/s	
初速度		回数	比	回数	比	回数	比
		表側	935±61	1.09±0.14	854±58	0.98±0.13	882±59
裏側		857±59	1	872±59	1	871±59	1
前面		927±61	1.07±0.14	870±59	1.02±0.14	914±60	1.09±0.15
後面		865±59	1	856±59	1	839±58	1

(b)		15 km/s		20 km/s		25 km/s	
初速度		回数	比	回数	比	回数	比
		表側	862±59	0.94±0.13	843±58	0.97±0.13	828±58
裏側		916±61	1	873±59	1	884±59	1
前面		988±63	1.25±0.17	928±61	1.18±0.16	919±61	1.16±0.16
後面		790±56	1	788±56	1	793±56	1

100万回隕石を発射したうち、いずれの場合も、月へはおよそ1,800回前後衝突した。月の表側、裏側、前面、後面に分けたときのそれぞれの衝突回数は、いずれもおおよそ800回から1,000回程である。隕石の初速度の違いによる衝突回数の違いはほとんど見られない。

隕石の発射間隔は時間的にほぼ等しいとすると、月への隕石の衝突が、周期性を持たず時間的にランダムに発生しているならば、隕石を発射した期間中の月への隕石衝突確率は、ポアソン過程に適合するはずである。ポアソン過程に適合するならば、隕石の衝突間隔は指数分布に従う。計算結果から

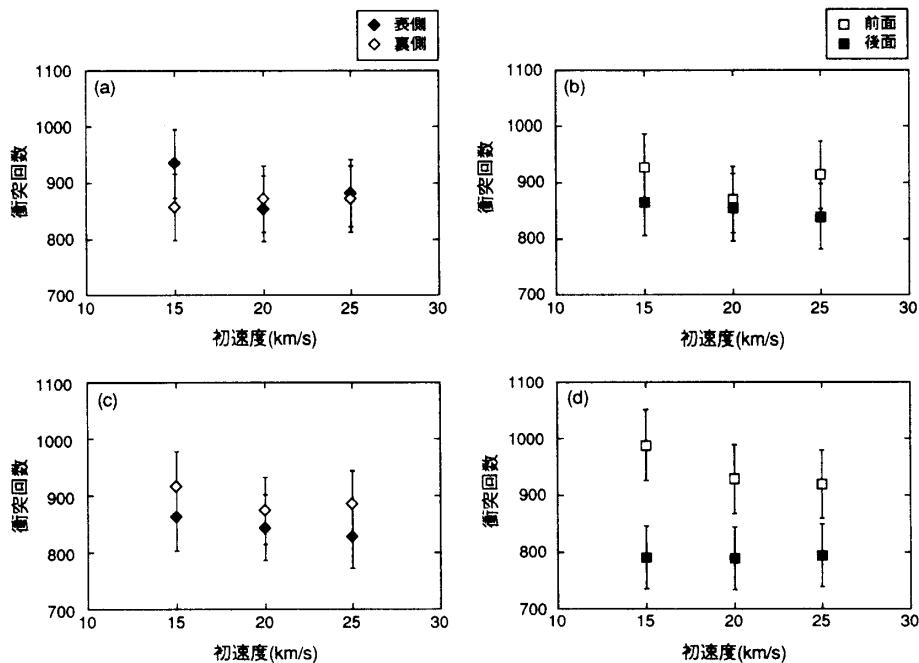


図5. 計算結果. 横軸は隕石の初速度, 縦軸は月への衝突回数である. (a), (c)は表側と裏側の比較, (b), (d)は前面と後面の比較である. また, (a), (b)は現在の地球・月間距離, (c), (d)は現在の半分の地球・月間距離である.

求めた衝突間隔と衝突回数との関係と、衝突間隔とその間隔で衝突する確率を調べてそれらの関係を比較したところ、両者はほぼ一致していた。つまり、月への衝突は時間的に全くランダムに起こったことになり、月への衝突回数の分布がポアソン分布になっているといえる。従って誤差については衝突数の平方根を標準偏差とみなし、その2倍を利用した。

3.1 表側と裏側の衝突回数の比較

図5(a)(c)に表側と裏側の衝突回数を比較したものを示す。表側と裏側とでは衝突回数にそれほど大きな差は見られない。ただし現在の半分の地球・月間距離の場合は、誤差の範囲内ではあるがどの初速度の場合も裏側の衝突回数が若干多い。これは、月が地球に近いため地球の陰となり、本来表側に衝突するはずの地球側から飛んでくる隕石が月より先に地球に衝突してしまうことによって、表側の衝突回数が裏側に比べて少なくなるためと思われる。

この図から、図1のクレータの直径-分布密度における表側と裏側の違いを説明できるほど、月の表側と裏側とでは隕石の衝突確率に差はない事が分かった。

3.2 前面と後面の衝突回数の比較

図5(b)(d)に前面と後面の衝突回数を比較したものを示す。白の四角が前面、黒の四角が後面である。どの場合も前面の衝突回数が多い。また、現在の地球・月間距離の場合の前面後面差が大きくて約80回に対して、現在の半分の地球・月間距離の場合の方はその差は全体的に大きく、約120から200回という結果になった。

さらに前面と後面の比較を行う場合、先に述べたように、衝突速度差が大きいことによって生じる形成クレータのサイズの差の効果を考慮しなければならない。図5にはこの効果は含まれていないので、この効果も含めた見かけの衝突回数を求める必要

がある。

衝突時の隕石が持つエネルギー E と形成されるクレータの直径 D の間には以下のような関係がある。

$$D = E^{1/3} \quad (1)$$

また、単位面積当たりのある直径以上のクレータの数 N とその直径 D の間には以下のような関係があることが分かっている(図6)。

$$N = BD^{-2} \quad (2)$$

(2)式を概念的に表したものが図6である。横軸にクレータの直径 D 、縦軸に分布密度 N それぞれの対数をとると実線のようなになる。仮にこの実線を、月の平均的な地域の直径-分布密度関係とする。月面に比較的衝突速度の大きい地域があった場合、同じ個数のクレータが形成されたとしてもその地域のクレータは全体的に大きくなる。そのため、直径-分布密度関係は図6実線矢印で表されているように右へシフトして、点線のような関係になる。これは見方を変えると、同直径のクレータの数が増加して、点線矢印のように上方へシフトしたように見える。つまりクレータの大きさの違いを数の違いとして見る事ができる。

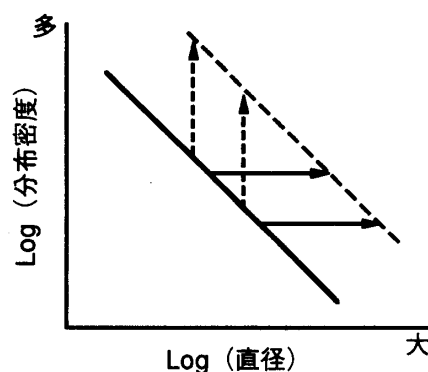


図6. 衝突速度の大きい地域におけるクレータの直径-分布密度関係の概念図。実線は、月の平均的な直径-分布密度関係。点線は、衝突速度の大きい地域の直径-分布密度関係。

このような観点で、大きさの違いを個数の違いに換算し、新たに前面後面それぞれの見かけの衝突回数を求めた。それを図7に示す。横軸が隕石の初速度、縦軸が見かけの衝突回数の比(後面の衝突回数を1としたときの前面の比)である。点線は、Shoemaker and Wolfe [2] の式を利用して求めた値である。これには衝突速度が異なることによって生じる、衝突確率の差と形成クレータのサイズの差の両方の効果が含まれている。本研究での計算結果の比の方が全体的に低い値を示しているのは、点線が、衝突速度差が最大である前面の頂点と後面の頂点の比を示しているのに対して、計算結果の比は、前面半球の平均値と後面半球の平均値の比を表しているためと考えられる。現在に比べて過去の方が、若干前面/後面比が大きい。これは、月の進行速度が現在よりも速かったためといえる。これらの差も、図1の直径-分布密度関係における表側と裏側の4倍という差を説明できるほど大きくはない。しかしながら、見かけの衝突回数は、前面が後面に比べて、約2~3割多い事が分かった。

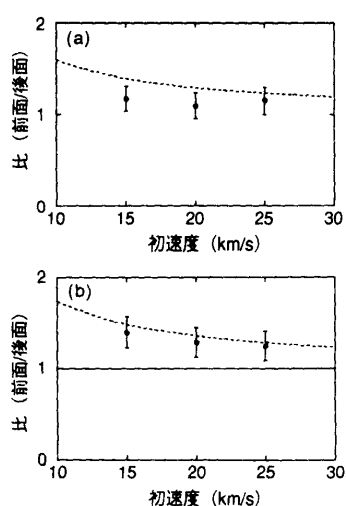


図7. 衝突速度差によるクレータのサイズの差を考慮した見かけの衝突回数比。横軸は隕石の初速度、縦軸は見かけの衝突回数比(後面の衝突回数を1としたときの前面の値)。(a)は現在の地球・月間距離、(b)は現在の半分の地球・月間距離。点線は、Shoemaker and Wolfe [2] による値。

5. 東の海はもっと若い!

本研究では、月の表側と裏側とで、クレータの直径-分布密度関係が異なることに着目し、この違いが生じる原因として二つのことを考えた上での数値実験を行った。

一つ目の原因として、表側と裏側とで隕石の衝突確率が異なることを考えた。しかし、数値実験の結果からは、表側と裏側とで隕石の衝突確率に有為な差は見られなかった。

二つ目の原因としては、前面と後面とで隕石の衝突速度は異なり、相対的に衝突速度の大きい前面に多くの大きなクレータが形成され、後に月が回転して昔の前面が現在の表側となったということ考えた。しかし、衝突速度の差に起因するクレータの大きさの違いからだけでは、現在の月における表側と裏側のクレータの直径-分布密度関係の違いを説明できないことが分かった。以上のことから、表側と裏側とでクレータの直径-分布密度関係の違いが生じた原因を探るには、さらに別の要因を考慮する必要がある。

また本実験によって、前面と後面とでは見かけの衝突確率が、前面の方が後面のおよそ2~3割高いこと、さらにその割合は地球・月間距離が短いほど、すなわち過去へ遡るほど高くなることが明らかになった。これは、月へ隕石が場所によらず一様に衝突してきたということを前提としているクレータ年代学の仮定を否定するものである。この数値実験の結果は、クレータ年代学による年代は実際の年代に比べて、前面のクレータは古めに、後面のものは新しめに求められていることを示唆している。このことから、例えば現在前面に位置する東の海については、クレータ年代学によって求められた年代が実際の年代に比べて2~3割古く求められている可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、金沢大学理学部地学科物理地学講座の方々には多くの有益な助言を頂きました。深く感謝いたします

参考文献

- [1] Shaw H. R., 1994: Craters, Cosmos, and Chronicles, *A New Theory of Earth*. Stanford University Press, Stanford, California, pp.688
- [2] Shoemaker, E. M. and Wolfe, R. F., 1982: Cratering time scales for the Galilean Satellites. in *Satellites of Jupiter* (Morrison, D., Ed.), Univ. Arizona Press, 277-339.
- [3] Hartmann, W. K., 1977: Cratering in the Solar System. *Sci. Am.* **238**, 84-99.