

# 月のクレーター再考

岡本 義雄 \*

## 1. はじめに

昔から月面のクレーターの成因は火山説と隕石説の間で激しい論争が続いていた。アポロ11号の着陸の後、ほぼ隕石説で決着したが、隕石説に立つクレーターの形成再現実験は1970年代を中心に盛んに試みられた。これらの実験では破壊的な圧力を再現するため、衝突速度km/sのオーダーを実現する大掛かりな装置と特殊な材料を用いた報告が多い。それに比べて、教材としての教室で行う実験については報告がほとんど見られない。そこで、まず身近な材料を用いた簡単な教材用クレーター再現実験について報告し、後の章で隕石説を補完するクレーターの大きさと個数に関する統計的特徴等について、実習を交えて考察する。

## 2. 教材実験の試行と結果

月表面を模すために木の台の上に各種の粉体層を敷いたものを作った。そして隕石を模した“弾”を角度と初速度を変えて、このターゲットに打ちこむことにした。発射装置はゴムを用いた手製のパチンコを製作した。実験の際、クレーターの再現形態(形、直径等)と弾を撃ち込む際の様々なパラメータ、用いた材料との関係を詳しく調べた。

### (1) ターゲットと弾の材料

月表面を模擬する材料としては、ベビーパウダーが、形態の再現に最も好結果を出した。小麦粉は付着性と内部摩擦が大きく、トンネル状のクレーター孔ができるなど、本実験には適さなかった。図1にベビーパウダーと小麦粉のSEM(走査型電子顕微鏡)による写真を、また、図2に粉の内部摩擦を測定した結果(別稿<sup>1)</sup>参照)を示す。ベビーパウダー

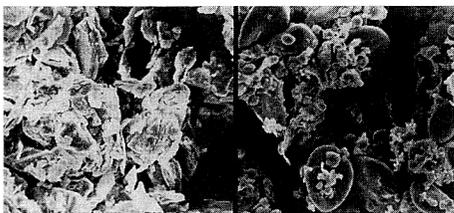


図1 ベビーパウダー(左)と小麦粉(右)のSEM写真

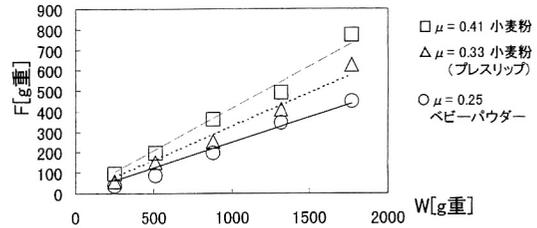
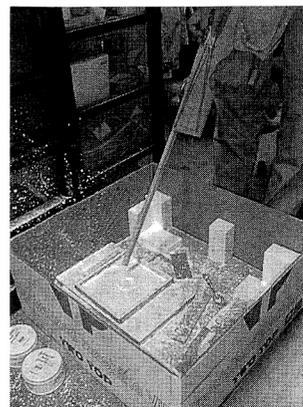


図2 粉の内部摩擦係数測定の結果 (別稿<sup>1)</sup>を参照)

は粘土鉱物の一種タルク(滑石)が原材料で、その形態に比して内部摩擦が小さい。

次に弾としては、様々な菓子を試みたが、最終的にマシュマロ(直径1cm×長さ2cm)を1/2長に切ったものに落ち着いた。こういったアナログ実験においては、全体のスケールを小さくすると、物理的性質を相似にするため、物質の硬さも小さくする必要がある。これはスケール相似則と呼ばれる。これから、弾として非常に柔らかいものが要請される。実際の隕石のように衝突で粉々に壊れる程度の柔らかさを持ち、パチンコから容易に打ち出せるものは、身近な物質の中には残念ながら探し得なかった。

### (2) 実験の概要



再現実験の様子と再現されたクレーターを図3に示す。パチンコを引く距離、打ちこむ角度を示すスケールを装置に付している。また、ターゲットまでの距離を一定に保ち、ねらいを定めるため、先に棒をつけた。ダンボール箱は粉の飛散防止に用いた。



図3 実験装置(上)と生成されたクレーター例(下) 右のクレーターには弾の引きずり跡が残る(後述)

\* 科学教育部 理科第二室

ターゲットは木の板に四角の枠をかぶせ、その中に薄くベビーパウダーを敷き詰める。準備ができたなら、パチンコのホルダーに半分に切ったマシュマロ(約1 cm径)をはさみ、ねらいをつけて弾を打ち出す。棒を付けたこの装置でも、ねらいを定めるのは結構難しく、生徒実験として興味を持たせることができると思う。

### (3)実験の結果と検討

ターゲットの厚さ、打ちこむ際の角度等を変えた実験結果を、次に記す。

① 粉の厚さを変更した結果を図4 Aに示す。厚さは6-10mm程度が適当で、これより厚くすると、弾が粉にめりこむ。図より厚さ6 mmを超えるとクレータ径に目立った増大が見られなくなることが注目される。粉の層の下には硬い木の板があるが、これは月面の柔らかい表面層の下に岩盤があるという地下構造を模したものである。孔の形態の再現性からこの設定は適当であると考えられる。

② 次に、打ちこみ角を鉛直から次第に水平方向に傾けてみた。この結果を図4 Bに示す。これによれば鉛直から30度あたりまでは打ちこみ角とクレータ径にはあまり関係がない。また、打ち込み角が小さいときもクレータ自体の真円度はさほど変化しないのが特徴である。ただ、弾が横に逃げる際の引きずりの後が残ることが多い(図3参照)。火星の表面クレータではこれが確認されており、10度以下の極めて低い入射角でできる<sup>2)</sup>とされる。本実験ではマシュマロがつぶれることはないのもっと大きな角度でもこの引きずり跡が現れやすい。このあたりは弾の材料についての今後の検討課題である。

③ 次に、弾とクレータの直径比を調べるため、マシュマロを適当な大きさに細かく切り分けた実験を行った。この結果を図4 Cに示す。弾のサイズ(実際は球ではないが球で近似)とクレータ径は、見事に比例する。比例定数は4-5程度で現実の例(20程度と見積もられる<sup>3)</sup>)よりはるかに小さい。これは弾の初速度が小さいことに起因する。

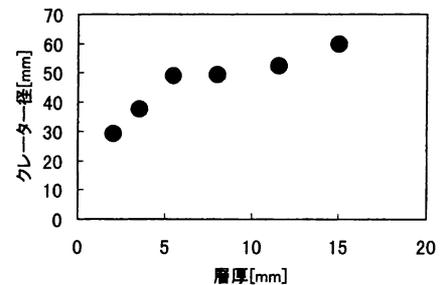
本実験の弾の初速度を簡単な仮定で求めてみる。パチンコの弾性エネルギー(EE)がすべて弾の運動エネルギー(KE)に変わると仮定すると、 $EE=KE$ より  $1/2 k x^2 = 1/2 m v_0^2$  と置ける。

ここで  $k$ :ゴムの弾性定数,  $x$ :ゴムの伸び,  $m$ ,  $v_0$ :弾の質量と初速度である。これより、 $v_0 = \sqrt{(k/m)x}$ となる。ここで、本実験の各測定値  $k = 1.3 \times 10^2 \text{ N/m}$ ,  $m = 0.41 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ,  $x = 15 \times 10^{-2} \text{ m}$ を代入すると初速度は  $v_0 = 84 \text{ m/s} \approx 300 \text{ km/h}$ と見積

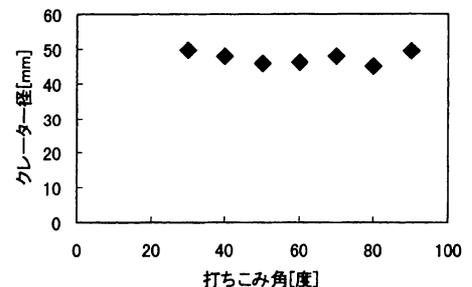
もられる。

これは速くても100 m/sオーダーで、クレータ実験としては極めて低速である。実際は空気抵抗やパチンコ自体に吸収されるエネルギーも大きいため、これより遅くなる。通常この種の実験では1~10 km/sに達する高速の初速度を弾に与えるのが普通のようなものである<sup>4)</sup>。これは本実験の速度より2~3桁大きい。したがって衝突の際に、実際のクレータでみられる、すさまじい衝撃波やそれによる融けた物質の出現等の再現もなされるようである。ただ、いずれにせよ、衝突する弾とクレータ径に比例関係があることは隕石説の傍証に都合がよい(後述)。

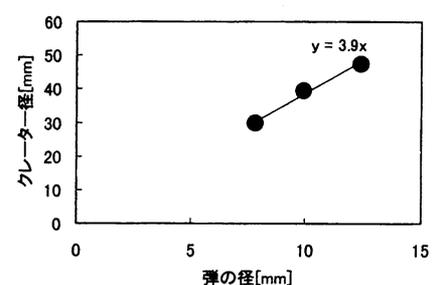
A. ベビーパウダー層厚 vs. クレータ径 (5回平均値)



B. 打ちこみ角 vs. クレータ径 (5回平均値)



C. 弾の径 vs. クレータ径 (5回平均値)



D. 運動エネルギーの1/3乗 vs. クレータ径 (4回平均値)

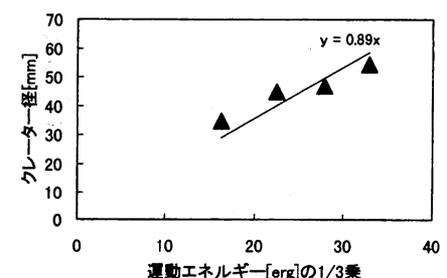


図4 クレータサイズと各パラメータの関係

④ 最後に弾の運動エネルギーとできたクレーターの直径の関係を見ておく．通常この種の実験や現実のクレーターではクレーター径が弾の運動エネルギーの1/3乗に比例することが知られている<sup>5)</sup>．本実験の弾の運動エネルギー（近似的にパチンコの弾性エネルギーに等しいとする）の1/3乗とクレーター径の関係を図4 Dに示す．比例関係に近い測定値が得られていることが確認できる．

### 3. 月面のクレーターの相似則

クレーターの形態を再現する実験を前章で行ったが，個々の形態と並んで，そのサイズ（直径）と個数の統計的性質は大変興味深い．次にそれを調べる．

#### (1) 月面地図

明瞭に写された月面写真か月面地図を用意する．ここでは The Times 発行の Atlas of the Moon<sup>6)</sup> を使用した．上記地図や写真を適当な濃度でコピーし，クレーターの直径が測りやすい作業図を作る(図5)．

#### (2) 物差し（直径ランク判定尺）

クレーターサイズ（直径）を個々に測定するのではなく，ランク分けを行う．等比数列（本稿では項比1.5を採用）の目盛を記した楔形を透明シートに作図し，直径を分類する物差しとする(図5参照)．

#### (3) 作業

この物差しを該当のクレーターに当て，丁度2本の直線に挟まれる位置に置くと，どのランクに入るかが決まる．作業図上のすべてのクレーターについて，その仕分けたランクを用紙に正の字を書いて集計していく．あらかじめ地図を幾つかのブロックに分けて，生徒で手分けして作業すると能率的である．小さいクレーターのランクの判別は難しいが，少々誤差は気にしない．集計が終われば，表計算ソフトにデータを記入し，その個数の対数と直径のランクを取ってグラフを書いてみる．直接，片対数用紙（直径ランクはすでに対数）にプロットしてもよい．

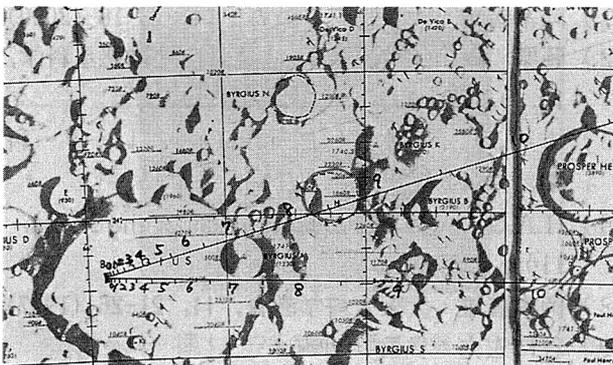


図5 作業用地図と直径ランク判定尺  
(図ではランク7に相当するクレーターを挟んでいる)

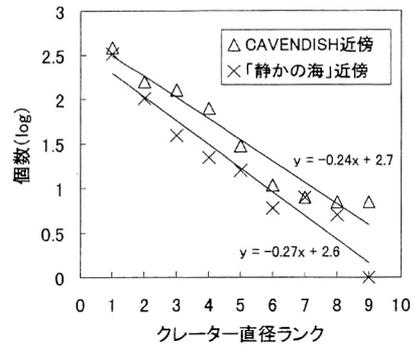


図6 クレーター径頻度分布（10×16°の範囲）

#### (4) 計測結果

筆者が行った計測の結果例を図6に示す（「静かの海」近傍と山岳地帯にあるCavendishクレーター近傍の10×16°の範囲）．両者とも，顕著な直線状の関係が見れる．昔から有名なクレーターのサイズ-頻度分布である．月面の縮尺や場所を変えてもこの関係が成り立つことがよく知られている<sup>7)</sup>．これは，以前に紹介した地球上の地震のサイズ-頻度分布<sup>8)</sup>と類似する．そこでも述べたが，このような両対数グラフで直線となるサイズ-頻度分布は「べき分布」と名付けられ，この性質を「フラクタル」とも呼ぶ．つまり月のクレーターは特有の大きさを持たず，自己相似の構造をしていることになる．これらは身の回りの様々な自然現象のみならず人間活動などの統計にも表れてくる興味ある性質である．この性質を確かめるため月面の地図や写真の場所とスケールを変えて，この測定を試してみるとよい．

### 4. クレーターの重なるの不思議

最後に，もう一つ昔から指摘されているクレーターの重なりに関する興味ある観測事実について考える．それは，月面では普通，小さなクレーターが大きなクレーターの縁に乗ることは多いが，その逆は極めて少ないというものである（図5の地図でもその傾向は見える）．もちろん，大きなクレーターができる時，その下にあった小さなクレーターが衝撃やクレーターの縁の堆積物等で消された可能性も大きい．しかし，月面に衝突する隕石の大きさが，時間と共に小さくなったという仮説も成り立つ．この説を検証する計算機シミュレーションを行った．

#### (1) 計算機シミュレーション

上記の観点から，パソコンの画面上に仮想のクレーターを作ることとする．計算論理は次のとおり．

- ① 画面上の1点をランダムに選ぶ．
- ② その点にクレーターに相当する円を描くが，その際，クレーターの半径は全体として「べき分布」

( $1/r^2$  に個数が比例) になるように乱数を用いて調整し、さらに描くときにその内部の円(以前に描かれた円)は消去する。

③ ①と②を規定回数繰り返す。

この論理に忠実に描いたものが、図7上である。大きなクレーターが小さなクレーターを隠す、重なりが多くできてしまう。これでは現実に合わないのので、次のような改良を行ってみる。

## (2) 改良論理

描く円の半径の最大値を時間経過と共に、指数関数に従い小さくしていく。それに伴い、べき分布をつくる際の関数は  $1/r^2$  から  $1/r$  に減らす変更を行った。この論理による N88BASIC でのプログラムを図8に、またその結果を図7下に示す。月面に多い重なり目の再現がなされた。月面写真と見比べてこの説の当否についても議論していただきたい。

## 5. 隕石起源説と火山起源説

本稿でまとめた実験や観察は隕石起源説に都合のよい事実の確認となった。特に、サイズ-頻度分布

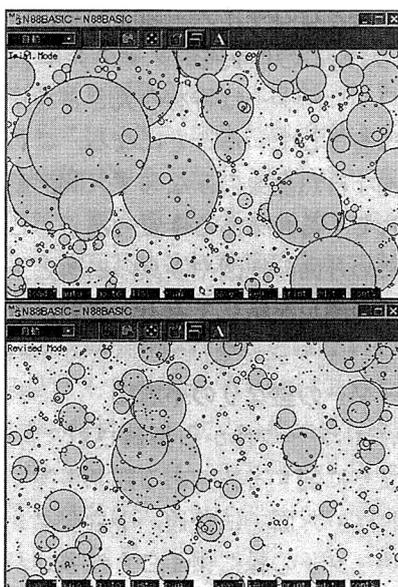


図7 数値シミュレーション (上: 試行 下: 改良)

```

100 RANDOMIZE(777)           '乱数初期化 (任意の整数)
110 SCREEN 3: CONSOLE ,,1: CLS 3 '画面初期化
120 K=1:RR=100               '数値初期化
130 X=RND*640: Y=RND*400     '画面上のランダムな位置
140 R=RR*RND                  'クレーター径 (ランダム)
150 IF RND<(1/R) THEN 160 ELSE 190 '「べき分布」生成
160 CIRCLE (X,Y),INT(R+1),6,,,F,1 'クレーター描画
170 K=K+1: IF K>1000 THEN END '規定回数
180 RR=RR*0.99                '最大径の減衰 (指数関数状)
190 GOTO 130

```

図8 改良シミュレーションプログラム

は隕石や小惑星のそれとも類似し、これと3章の③の事実を重ね合わせると、クレーター形成が隕石の衝突に由来することを強く示唆される。地球上の、例えば単生火山のサイズ-頻度分布はこのような傾向を取らず、ある特徴的な大きさに支配される。マグマが地上に顔を出すとき、地下の岩石を破るための条件があり、それが規制となって、火山体のサイズ-頻度分布を決めるらしい<sup>9)</sup>。しかし、クレーターの形成には未解明な部分も残り、今後の検証が待たれる。授業で両説に有利な事象を挙げて、ディベートしてみるのも面白いだろう。

## 6. おわりに

月のクレーターの再現実験と統計的性質を調べた。生徒実験や実習としてさらに洗練・改良していきたいと考えている。月のクレーターは写真やテレビなどで見慣れたように見えて、実は細かく調べると本稿のように興味あることが結構出てくる。月を見上げたことのない人はいないと思うが、では月の満ち欠けの絵を正確に描いてくださいという、間違っただけの絵を書きってしまう人は多い。いつも見慣れているため、かえって正確に認識できていない一例だと思う。本稿がいつも見慣れた月面地図や写真を再評価するきっかけになれば幸いである。さらに、実験や小望遠鏡で月面を観測する体験を通して、月を起点に火星や地球の表面との違いの意味をその起源から考える発展学習につなげていただければと考えている。

なお、大阪府教育センター小林英輔主任研究員からは、本稿をまとめるにあたり有益な助言をいただきました。また、走査型電子顕微鏡の操作には同センター江坂高志主任研究員の指導を得ました。感謝の意を表します。

## 〈文献〉

- 1) 岡本義雄: 大阪と科学教育, 14, 13-16 (2000)
- 2) 藤原 顕: 比較惑星学, 岩波講座地球惑星科学, 12, p.123 (1997)
- 3) 4) 5) 7) 水谷 仁 (1980): クレーター科学, 東京大学出版会, 168pp.
- 6) H.A.G.Lewis: The Time Atlas of the Moon, 110pp. (1969)
- 8) 岡本義雄: 大阪と科学教育, 11, 21-26 (1997)
- 9) 谷口宏充: 私信 (1999)