

月のクレーターの原因論の問題点 (1)

都 城 秋 穂*

1. まえがき

月面上のクレーター (crater, 凹孔, 火口) の成因については、これまでにいろいろな人によって、さまざまな議論が行なわれている。しかしその議論のなかには、珍説・奇説というべきものが少なくない。とて科学の名に値するようには見えないものが少なくない。そこで一般に、現在においては、クレーターについて語ることは空しいことであり、科学からの逸脱であるというような感じもするかもしれない。

しかしそれでは、クレーターについて語ることなく、沈黙をまもってすませられるかという、そうはゆかない。月は、地球や太陽系の成因を考えるときには、見のがすことのできない重要な材料を与えるものである。しかも月を論ずる場合には、いずれはクレーターの成因にふれることなしには、すませられない。そこでわれわれは、何とかして、クレーターの成因論を少しでも学問的に有意義なものにするように努力したい。

月のクレーターの成因についての従来の議論の空しさのなかには、地球上からの観測ではどうしても実証できないというような種類の、原理的な大きな困難からくる部分も多い。しかし、どうもそればかりからくるのではないのではなからうか。一部分は、従来の議論のやり方からくるのではなからうかと思われる。たとえば、クレーターの成因を論じた人の大部分は、それとは違った方面の仕事を彼の主たる仕事としていた。そのために、ちょっとした思いつきから、無責任に、クレーターを論ずるだけである。彼より前に行なわれた議論を十分に知ることなく、自分の意見の内容を十分に検討することもなく、ただ思いつくままにいてみるという調子のものが多かった。彼の説の参考となる地球上の現象を十分に検討することもなかった。議論が蓄積的でなく、無意味な繰返しが多かった。ただし最近十年間は、事情は急速によくなってきた。宇宙時代にはいって、月面の研究を主たる仕事にする有力な科学者が現われてきたので、議論のしかたもしいいに変って来たようである。

このたび、『天文月報』の編集部から若干の紙面を与えられたので、この機会に、議論を蓄積的にするための一つの準備として、論点の整理を行なってみた。つまり、クレーターの成因に関係ある諸問題について、どん

な議論が従来行なわれているかについての見取り図をつくることをはじめてみよう。

もちろん、私は月面学の専門家でもないし、最近の莫大な月面学の文献に通じているわけではない。ここに提供しようとするものは、極めて不十分な予備的なものにすぎない。誤りを含んでいるかもしれない。ただこれが将来のもっと完全な見取り図のための準備として役立てば幸である。

よく知られているように、クレーターの成因についての説には種々様々なものがあるが、大きく分けて、火山説的傾向の諸説と、イン石説的傾向の諸説となる。火山説的な傾向の諸説のなかでは、カルデラ (caldera) 説とマール (maar) 説とは今日でも多くの支持者をもっている。イン石説的傾向の諸説のなかでは、打撃 (percussion) 説と爆発 (explosion) 説とが最も代表的であろう。これらの諸説については、多くの読者はすでにいくらかの予備知識をもっておられることであろう。

2. クレーターの大きさ

月面上のクレーターには、直径 100 km 以上のものが数十個もあり、200 km 以上のものでも 5 個ある。地球上の火山の爆発火口は一般に直径 1 km 以下である。陥没カルデラにはもっと大きいものが多いが、最大のものでも屈斜路カルデラの 26×20 km とか、阿蘇カルデラの 25×17 km といった程度である。すなわち、地球上の火山の火口やカルデラは、月のクレーターよりも 1桁だけ小さい。Daly, Wegener, Dietz などは、このことから、月のクレーターは火山性の火口ではなくて、イン石孔だと考えた。

Shoemaker は、月のクレーターのなかで大きいものはイン石孔であるが、小さいクレーターのなかには火山性のマールとよく似た形をしていて、マールとみなしてもよいものもあると考えた。そういう小さいクレーターは、よく線上に連なって、列をなしている。たとえば、コペルニクスとエラトステネスとの中間の位置に列をなしているのは有名である。こういうマールらしいクレーターの大部分は、直径 1~2 km またはそれ以下で、地球上のマールとほぼ同じ程度の大きさである。そこで彼は、地球上と月面上の火山現象は、ほぼ同じ程度の大きさの火山体を生ずると考えた。月面上でよくドームとよばれる小さい丘を地球上の盾状火山にあたるものだと考えると、これらもほぼ同じ規模の物体である。

* 東大理

Akiho Miyashiro: Controversial problems on lunar craters (1).

しかしこれには、反対者もある。月面上では重力が小さいから、火山活動の割れ目は地球上におけるよりも地下の深いところでできはじめ、そのために大きい火口を生ずるだろうということを Jeffreys がのべている。

地球上のイン石孔のなかで、最も古くからよく知られていた最大のものは、アリゾナのイン石孔（直径 1 km あまり）である。そこで、これに比較すれば、月面のクレイターは大きさが 100 倍もあるから、クレイターはイン石孔ではありえないという、Escher などの主張もあった。しかし近年は、地球上にも大きいイン石孔がどんどん見つかったので、この議論は成立たない。南ドイツの Rieskessel というイン石孔は、直径が 29 km もある。近年カナダでたくさん見つかったイン石孔らしいものあとのなかでは、Manicouagan とよばれるものは直径 65 km もある。

3. クレイターの円さとイン石爆発説

一見したところ、月のクレイターには、円形または円形にごく近い長円のものが多いことは、多くの人の注意をひいた。しかしそのことは、火山説の人によっても、イン石説の人によっても、自分の説の根拠として引用された。

すなわち Daly は、地球上のカルデラには不規則な形のものが多いが、月のクレイターは円すぎるから、カルデラではなくてイン石孔だと考えた。これに対して Escher は、地球上のイン石孔には円いものと長円のものがあるが、月のクレイターはほとんどすべて円いからイン石孔ではなく、火山性カルデラであろうと書いた。

月のクレイターをイン石孔だと考える人は、それが円いということを説明する必要があると感じた。なぜならば、イン石衝突の打撃によってクレイターができたとする、イン石が地面に対して垂直に衝突したときには円形のあなができるとしても、斜に衝突したときには長い形のあなができそうに思われるからである。19 世紀におけるイン石説の最大の代表者であった Gilbert は、月のクレイターが円形であることを説明するために、イン石は月面にはほぼ垂直に落下したと考えた。そのように落下するためには、そのイン石は、任意のイン石ではありえない。昔、地球をとりまいて、ちょうど現在の土星の輪のような形に小さい天体の群が存在した。その天体の群が月面に落下してクレイターを生じたのだと考えた。

月のクレイターの巨大さと、その円形なことを同時に説明する仮説として、20 世紀のはじめから唱えられだし、最近まで極めて有力であったのは、イン石爆発説である。この説の出発点は Merrill までさかのぼれるということであるが、ことに Gifford や Spencer によって有名になり、Baldwin, Dietz, Urey などの有力な論客によって支持されて、1950 年代には一時は支配的な学

説とさえ見られた。イン石の飛行速度はきわめて大きいから、それからその運動のエネルギーを計算し、衝突の瞬間にそれが熱エネルギーに転化すると仮定すると、イン石は恐ろしい高温になって、気化するはずである。瞬間的な気化は、はげしいガス爆発となって現われる。この爆発によってクレイターが生じ、その形はイン石の飛行の方向とは無関係に円形になるだろうという説である。爆弾や砲弾の爆発孔は、その落下の角度とは無関係に円形をしているそうである。

ところが宇宙時代になって、弾丸を高速度で飛ばして、岩石に衝突させる実験が NASA でさかんに試みられるようになった。ガス銃によって、8 km/sec くらいの速さで弾丸が飛ばせるようになった。その実験によると、気化や液化は意外に少ない。弾丸の運動のエネルギーの大半は、ショック波になって逃げてゆくのだそうである。そこで、イン石爆発説は根拠を失ってきた。そこで最近では Shoemaker などは、イン石の打撃とショック波によってクレイターを説明しようとしている。

月のクレイターは、一見みんな円いようであるが、もっとよく見ると、円くないものが多いということを強調する人もある。Spurr や Firsoff は、大きいクレイターには多角形（ことに六角形）になる傾向があることを指摘した。それは、円形のクレイターができた後で、月がガスの放出によって縮んだために変形してできたのだと説明した。宮本正太郎も、多角形のクレイターがあることを強調し、その壁は、月面上を網目のように走っている断層にそう傾向があることを指摘した。

4. クレイターの底の高さ

月のクレイターでは、その底 (floor) の面はいつでも、クレイターのまわりの地域の一般的な地表面よりずっと低くなっている。地球上の火山のカルデラでは、その底の面は、カルデラの外の地域の地表面よりも高いこともあり、低いこともある。この点で、月のクレイターと地球のカルデラとが違ふことは、Baldwin によって強調されている。ただし、地球上のカルデラではいつも、その底の面はそのまわりの地域の地表面より高くなっているように誤解して、クレイターとカルデラの違いを過度に強調した論者もあった。

わが国のカルデラで、その底の面がそのまわりの地域の地表面より低くなっている例をあげれば次のごとくである（いずれも、海拔の高さを示す）：

	まわりの 地表面	カルデラ の 底	湖 水 面
十 和 田 湖	200 m	67 m	401 m
田 沢 湖	150 m	-175 m	250 m
屈斜路カルデラ	100 m	- 4 m	121 m

5. Schröter の法則

月のクレーターのはきはまわりの地域の地表面より低くなっているの、一種のくぼみをつくっている。クレーターの縁 (rim) は、まわりの地域の地表面よりも高く突出している。このくぼみの体積と、縁の体積とが、ほぼ同じ程度の大きさになることが多いという通則は、18世紀の末ごろに J. H. Schröter によってはじめて明言された。そこで今日、これをしばしば Schröter の法則 とよぶ。

この通則は、イン石衝突によって、くぼみの物質がはね飛ばされて、そのまわりに堆積してクレーターの縁をつくったのだと解釈すれば、直ちに理解できる。そこで、Dietz, Baldwin その他のイン石説の支持者によって、その説の根拠の一つとして引用されている。

しかし Gilbert は、もっと慎重であった。クレーターのなかには、Schröter の法則の成立つものもあるが、ことに大きいクレーターには、くぼみの体積のほうが縁の体積よりもずっと大きいものが多いことに注意した。そしてその説明として、くぼみの生成によって排除された物質のなかの一部分だけが縁をつくったのであって、残りの部分は、地下で流動して、もっと広くその地域全体を高めるように分布したのだらうとのべた。

クレーターのなかには、生成時代の古いものと新しいものがある、古いものは縁がくずれ、原形がかなり破壊されている。Baldwin (1963, p. 148) は、新しいクレーターだけを選びだし、そのくぼみの体積と縁の体積とを比較した。それによると、小さいクレーターでは、縁の体積のほうがずっと小さいが、クレーターが大きくなるにしたがって、二つのものの体積の比は1に近づく。最も大きいクレーターでは、Schröter の法則がよく成立っていることを見いだした。この説明として、Baldwin は、小さいクレーターでは、イン石衝突によってはね飛ばされた岩片のなかの大部分は、縁よりもっと遠方に広く散布されて、測定できなくなるのだと考えた。

6. クレーターの深さと直径の関係

クレーターの大きさと形との間に一定の傾向あるいは関係があるということは、多くの人によって注意されている。

H. Ebert は 1889 年に、クレーターの大きさと深さとの間の関係についてのべた。すなわち、小さいクレーターでは、その深さは直径の 1/10 前後のことが多い。クレーターが大きくなるにしたがって、深さも増すけれど、深さの増す割合は直径の増す割合よりも小さい。そこで、直径 100 km くらいのクレーターでは、深さは直径の 1/20 くらいにすぎない。直径 200 km を超える最大のクレーターでは、1/40 くらいになってしまう。このような関係のことを、**Ebert の法則**とよぶことがある。

Baldwin は、地球上の火薬の爆発孔と、イン石孔と、月のクレーターとについて、直径と深さとの関係を示す図表をつくると、それらを表わす点の多くは、ほぼ一つの曲線の上ののることを示した。その曲線を表わす数式として、1949 年には次のようなものを与えた：

$$D=0.1083d^2+0.6917d+0.75$$

ここで、 D =直径をフィートで表わした値の常用対数 (ただし直径は、縁の頂上から頂上まで測るものとする)。

d =深さをフィートで表わした値の常用対数 (ただし深さは、縁の頂上から底までのことである)。

1963 年には、月のクレーターのなかで比較的小さいものに対しては、

$$D=0.0256d^2+d+0.6300$$

という式を与えた。また、大きいものに対しては、たとえば、

$$D=0.4831d^2-1.9941d+5.4212$$

その他の式を与えている。このように、クレーターの大きさによって式が変わるのは、爆発の起る深さによって式が違ってくると関係していると考えているようである。

いずれにしても、地球上の爆発孔やイン石孔と、月のクレーターとが、同じなめらかな曲線の上ののる傾向のあることは、クレーターが爆発によってできたことを示すのだと解釈された。

なお Baldwin は、クレーターの直径と縁の高さの関係を表わす式や、クレーターの直径と形成のエネルギーの関係を表わす式などをも与えている。

7. クレーター内の同心円状段丘

コペルニクスやアルザッヘルをはじめ、かなり多くの大きいクレーターは、その縁の内側に何段もの同心円状の段丘をもっていて、クレーターの縁から順次に底に下がっているのが見られる。このような地形は、カルデラの内側に見られることがある。そこで Escher や久野久のような火山学者は、これを、月のクレーターがカルデラであることを示す有力な証拠だと考えた。

Gilbert のようなイン石説の支持者でも、昔この地形に気がつき、それがあつた種のカルデラの地形に似ていることには気がついている。しかし彼は、クレーターのその他の多くの性質を説明するために、カルデラ説をとらなかつたのである。イン石説の主張者の 1 人である Dietz は、イン石の衝突によって過熱状態の溶岩ができ、それがクレーターの縁の下部を溶して切りこんで、そのために上部が崩れて、こういう地形を生じたのだと説明した。

しかし、巨大なイン石孔の場合に、ふつうの崩れによ

ってこのような段丘状の地形ができて悪いという積極的な理由もなさそうである。

8. 中央丘

月のクレーターのかなかのかなり多くのものが中央に小さい丘をもっていることは、しばしば論じられた。多くの火山説の支持者は、このような中央丘 (central peak) はイン石の落下ではできるはずがないから、火山説の有力な根拠だと考えた。Firsoff は、中央丘はイン石説では説明できないのみならず、原形がよく保存されている中央丘の大部分のものの頂上には小さい火口らしい孔があるから、火山説の重要な根拠になるとのべている。

中央丘の頂上の小さい火口らしい孔は、望遠鏡の観測の限度すれすれのものらしく、Dietz はその存在を否定している。Baldwin は、そのようなものが時に存在したとしても、それはイン石が偶然にそこに落ちて生じたイン石孔なのだろうとのべた。

このような中央丘が、地球上の火山の中央火口丘と同じような性質をもっているかという点、そうではない。ことに、次にあげる二つの点において、クレーターの中央丘は火山の中央火口丘とははなはだしく異っている：

(1) クレーターの中央丘は、いつでもクレーターの中央にある。ところが地球上の火山の中央火口丘は、ちょうど中央ではなくて、かたよった位置にあることが多い。この違いは、Dietz も Baldwin も強調している。

(2) クレーターの中央丘の高さは、決してクレーターの縁の高さに達しないだけでなく、クレーターのまわりの地域の一般的な地表面の高さにさえも達しないのが普通である。地球上の火山では、中央火口丘の高さが縁の高さを越えることは、ごく普通である。ここに極めて著しい違いがある。この違いは、かつて Gilbert によって強調され、近年も Baldwin やその他の人によって強調されている。

この二つの著しい違いがなぜ起るかが説明されない限りは、中央丘を火山説の根拠にすることは十分の説得力をもっていない。

それではこんどは、中央丘はイン石の衝突でできるか否かという点、どうもはっきりしないのである。しかし、地球上でイン石の落下によってできた構造のなかで、南ドイツの Steinheim にあるイン石孔には、中央丘がある。このイン石孔は直径 2.5 km である。カナダのイン石孔のあとのなかでは、直径 30 km 以上のものは、中央丘をもっている。月面のクレーターのようには、直径 100 km もあるものがイン石の衝突によってできたとした場合に、どんなことが起るかは、まだわからないといったほうがよいであろう。中央丘ができないとは限らない。

Gilbert は、イン石が落下したときに、そのイン石の

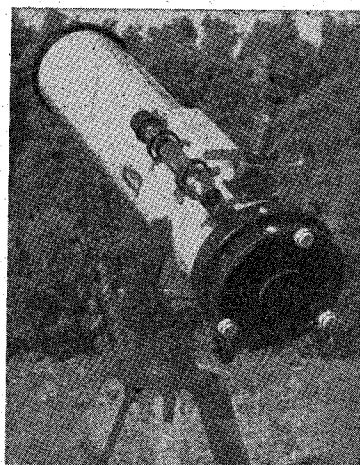
進行前面の部分ははげしく熱せられて融けても、背面の部分は融け残って、クレーターの中央に残って、中央丘になるかもしれないとのべている。また、クレーター内でいったん押しつけられた物質の一部が、中央へ向って流れ帰って、中央丘をつくるのかもしれないとのべている。Baldwin は、イン石の衝突によっていったん圧縮された岩石のハネ返り (rebound) によって中央丘ができるのだと考えた。この考えによると、中央丘ははげしく破砕された岩石でできていることになる。

月のクレーターのなかで、中央丘はどんなクレーターにあるかという問題についても、いろいろ論ぜられている。Gilbert は、あまり大きいクレーターにも、小さいクレーターにも中央丘はなくて、中位の大きさのものによくあるとのべている。それに反して、クレーターの形成の時期と結びつけようという考えもある。たとえば Kuiper は、あまり古いクレーターには中央丘はない。海の形成より少し前にできたクレーターには高い中央丘があるが、海の形成より後にできたクレーターには小さい中央丘があると考えた。なお Kuiper は、中央丘は溶岩のもり上ってできた丘だと解釈している。

(以下次号)



カンコー天体反射望遠鏡



二十種 C G 式 焦点距離二段切換
天体反射望遠鏡

- ★ 天体望遠鏡完成品各種
- ★ 高級自作用部品
- ★ 抛物面鏡、平面鏡、軸外し抛物面鏡
- ★ アルミニウム鍍金
- ★ 電源不要観光望遠鏡 (カタログ要 30 円切手)

関西光学研究所

京都市東山区山科竹鼻 TEL 京都 06 0057