

月の地質学

⑦

小森長生

23. 多角形クレーターの性質

月面のクレーターのなかで レイ・クレーターとならんでもう1つ特徴的なものは 多角形クレーター とくに六角形のクレーターである。今回は この種のクレーターについて論じてみることにしたい。

月面に多角形クレーターが存在することについてはすでに大分前から 多くの人びとが気がついていた。たとえば P. Puiseux (1908) は この問題について熱心に論じた人の一人であるし F. C. Lamach (1946) は 彼の作った月面図の中に ひじょうに多くの多角形クレーターの記載している。その他 K. Graff (1929) とか D. Alter (1956) O. Matoušek (1924) といった人たちが注目し 多角形クレーターは 月面のわれ目構造に関係があることをとらえた。

このように いく人もの人たちによって注目されてきた多角形クレーターとはどんなものか いくつかの実例をみることからはじめよう。

多角形クレーターとしてもっとも目につきやすいものは 月面の中央部近くにあるプトレメウス・クレーターであろう。よくみると プトレメウスの周壁はひじょうによくととのった六角形をしており クレーター底の平坦なこととあいまって その特徴がよくつかめるもの

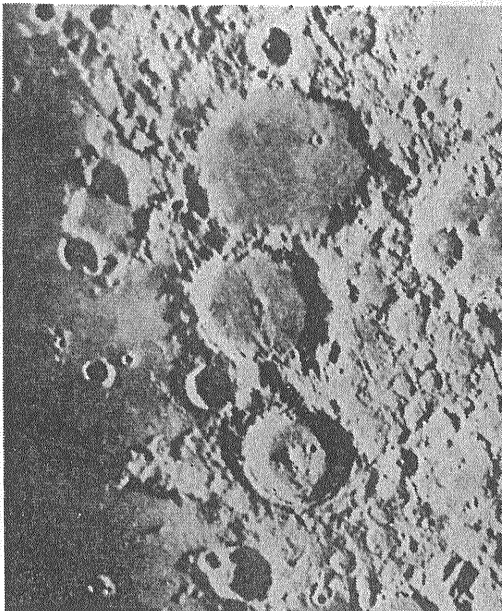
である。そして プトレメウスの周辺の 比較的大型のクレーターのなごめてみると 少なからず多角形をしていることに気づくであろう。すなわち アルフォンズ ヒッパルクス アルパテグニウス プールバッハ レギオモンタヌス ワルター デランドル などなどといったぐあいである。さらに 南極近くにあるクラビウス マギヌス ロンゴモンタヌスといった 大型の典型的なクラビウス型クレーターも 少なからず多角形をしている。これらは月面の周縁部にあるため ふだんは楕円形に見えるが これを球面に投影して 真上からみた形に直してみると 多角形をなしていることがよくわかるものがある (第2図参照)。

また クレーターの大型のものや サラソイドと同類とみなしてもよい 危難の海の多角形は有名である。これも 真上からみた形に直してみると まことによくととのった正六角形になる (第3図)。雨の海の縁にある有名な虹の入江も 半かけではあるが周壁の形は円弧ではなく 正六角形の一部の形をなしている。

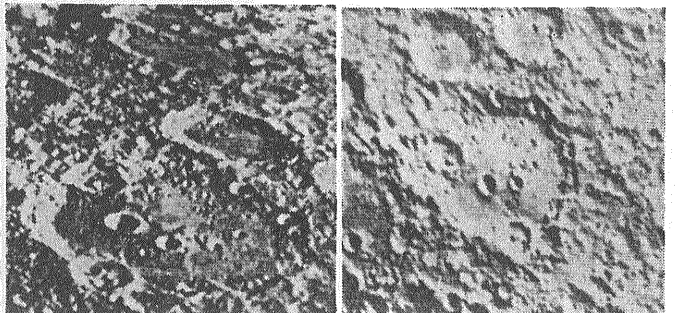
このように 多くのクレーター またはそれに類するものが多角形 しかもその多くは きれいな正六角形をなしていることは うたがう余地のない事実なのであるが この多角形クレーターの性質について つぎの2つの重要な点を指摘しておく必要がある。

まず第1に これら多角形クレーターは いずれも比較的大型で クラビウス型クレーターにぞくし その生成時代が ヒッパルクス代からプトレメウス代へかけての古い時代 (すなわち 海の形成以前の時代) だということである。

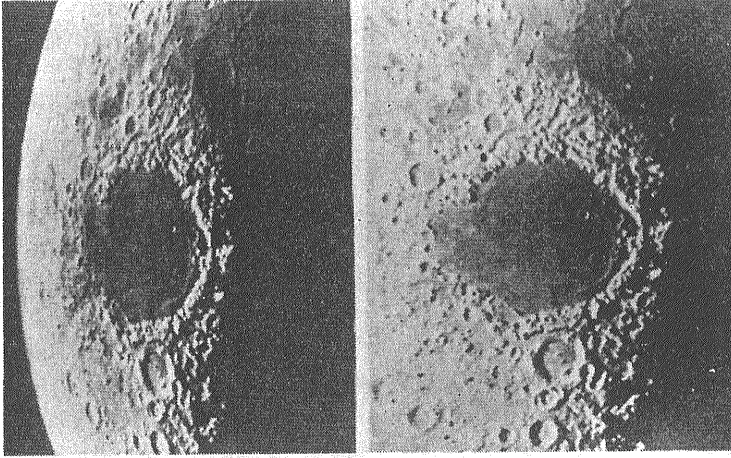
つぎは これら多角形クレーターの形 (構造) は 月



第1図 プトレメウス・クレーターとその周辺



第2図 クラビウス・クレーター (左) とそれを真上からみた形に投影しなおした写真 (右)



第3図 危難の海(左)とそれを真上からみた形に投影しなおした写真(右)

面の地質構造(とくにわれ目構造)と密接な関係をもっている ということである。

第1にあげた事実は 多角形クレーターの形成が 時代的に特有なものだ ということの意味しており これは 前回にのべた コペルニクス型のレイ・クレーターが やはりコペルニクス代を中心とした時代に生成した(つまり 時代的に特有のものである)という事実とあわせて 重要なことである。そして 海の形成の時代を境にして その前後の時代で クレーターの生成に大きなちがいがみられることになり このことは クレーターの進化を考えるうえで 重要な事実であると考えられる。

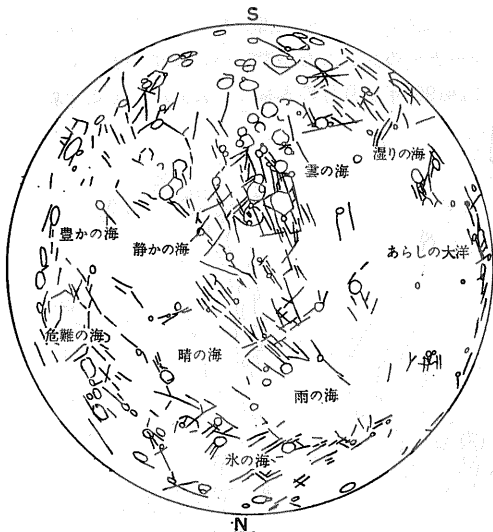
第2の クレーターの形が多角形なのは 月面の地質構造に支配されているからだ という事実も重要である。月面には リル(rille)とよばれる細長い溝状地形や

アルパイン峡谷のようなグラーベン状の谷地形 小クレーターの列 多くの断層やわれ目など いろいろの線状構造(lineament)がみられる。そして これらのリニアメントは 特定の方向性をもったものが多い。そのうちもっともけんちょなのは 北東-南西方向と 北西-南東方向のもので とくに後者はよくめだっている(南北方向のリニアメントは弱く 東西方向にはほとんどない)。この 北東-南西方向と北西-南東方向の交差する線状構造は とくに格子構造(grid system)とよばれ

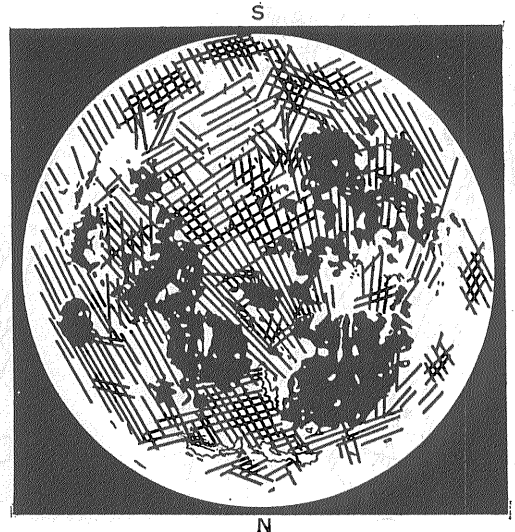
クレーターの形(外郭)はこのグリッド・システムに支配されていることが多いのである。そして このグリッド・システムの形成と 多角形クレーターの成因とが どう関係しあっているのかが 大きな問題となるのである。

話は少し横道にそれて申しわけないが 最近 このような月面の線状構造が関心をもたれるようになり 月の構造地質学(Selenotectonics)が発展しつつある。

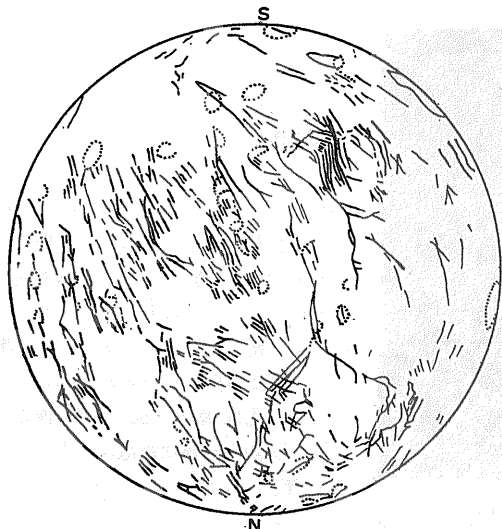
たとえば イギリスの G. Fielder などは この方面の研究にひじょうに熱心で グリッド・システムをいろいろ細かく分類しているし ソビエトの地質学者のなかでも この方面の問題にとりくむ人が増えてきた。たとえば Ю. А. ホダーク(Ходак)は ひじょうにくわしい月面の地質構造(線状構造)図を発表し 月面が網の目のようなグリッド・システムでおおわれているこ



第4図 月面のグリッド・システム① P. Moore(1967)によるもの



第5図 月面のグリッド・システム② G. Fielder(1960)によるもの

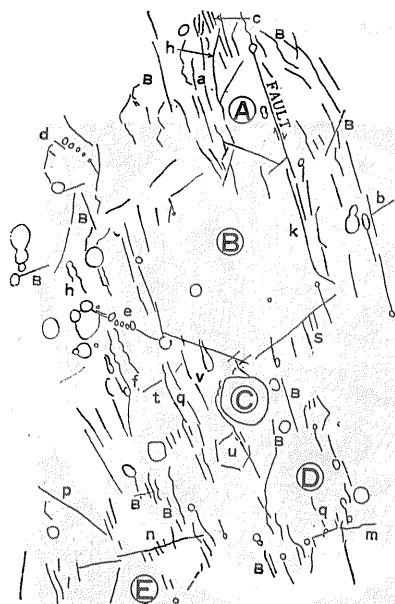


第6図 月面のグリッド・システム③ A. Khabakov (1949) によるもの

とを明らかにしている。ホダークの図をみると 多角形クレーターの形が グリッド・システムと深い関係にあることがよくわかるのである。ところで このような月面の地質構造と深い関係をもった多角形クレーターは どのようにして生まれたのであろうか、 つぎにその成因について考えてみることにしよう。

24. 多角形クレーターの成因

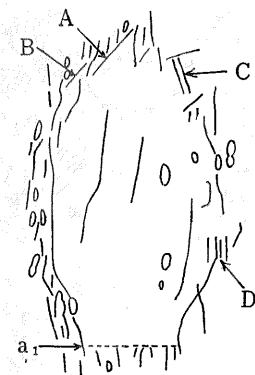
多角形クレーターの成因を考えるうえで 1つ注意を要することは 多角形クレーターが グリッド・システムの支配をうけて はじめから多角形の形態をもって生



第7図 グリッド・システムと多角形クレーターの関係
①アルフォンズから中央の入江にかけての地域
A: アルフォンズ B: プトレマウス
C: ハーシェル D: フランマリオン
E: リアウマー



第8図 グリッド・システムと多角形クレーターの関係
②ヒッパルクス・クレーターのばあい (矢印は Grid の主方向)



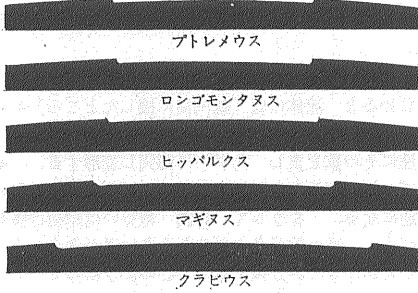
第9図 グリッド・システムと危険の海の多角形構造との関係
A~Dは谷状地形を示す

まれたのか それとも はじめは円形のクレーターとして生まれたものが のちにグリッド・システムの発達とともに多角形に変形したのか ということである。

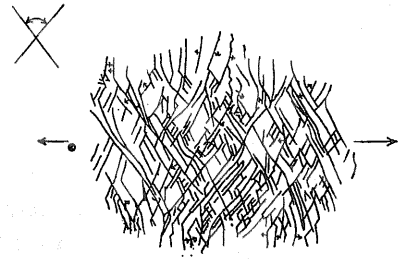
この問題については すでにいろいろの人が意見をのべている。とくに G. Fielder は 直径が20km 以下の小さいクレーターは グリッド・システムの影きょうをうけていないが 20km 以上の大きいクレーターはグリッド・システムの影きょうをうけてクレーターが変形し 多角形状をなしていると考えた。また クレーターの内部にも グリッド・システムのみとめられるものが多いとした。これらの事実から 彼は まず月面に直径が 20km 以上の大クレーターがつくれ (それは最初は円形であった) つぎにグリッド・システムが発達してクレーターが変形し 多角形クレーターが生まれ その後に 今も丸い小クレーターができたのだと考えた。

このような 大クレーターの形成 (はじめは円形) → グリッド・システムの影きょうによる多角形構造への変形 という考えかたをする人は ほかに何人もみられるが はたして多角形クレーターが 二次的な変形によって生まれたものなのであろうか。はじめから多角形の形をもって生まれたと考えてはいけなないのであろうか。筆者はまずこの点に 大きな疑問をいだくものである。そして この問題は この種のクレーター (主としてクラビウス型の) が 隕石の衝突によってできたものなのか (すなわち 外因的な成因によるものか) または 内因的な成因によってできたものなのか といった問題に 大きく関係してくると思われるものである。私は多角形クレーターは初生的なものであり 内因的な成因によって生まれたものであると 強く考える者の一人であるが つぎにその理由を少しのべてみたいと思う。

多角形クレーターの大部分がぞくする クラビウス型クレーターの大まかな特徴については すでにのべた (本誌1969年11月号の本稿4回目) が 重要な点をもう



第10図
代表的なクラビウス型クレーターの断面図
D. Alter (1956) による



第11図
クロス・ワイヤー上の粘土層に引ばりを与えたばあいのわれ目 矢印は引ばりの方向を示す

一度あげてみよう。すなわち この型のクレーターはその直径が100kmをこえる大型のものが多く またその直径の大きさにくらべれば 穴の深さはひじょうに浅いといつてよく P. Moore もいっているように “穴というより皿といったほうがよい” のである。そしてクレーターの底面は平坦で しかもほぼ月面の曲率にしたがってふくらんでおり 周壁の内側は急斜面であるが外側の傾斜は陸地の平面と区別がつかないくらいにゆるやかである。P. Moore の説明はたいへんわかりやすいので少々引用してみよう。

“プトレメウスのような ほぼ月面の中心部にある大きなクレーターでは 皿のような形がたいへんよくわかる。プトレメウスの直径は150kmもあるが 周壁は床の底にくらべて500mほど高いだけであり 外部の平原とくらべればもっと低いのである。このため一見おどろくべきことがおこる。プトレメウスのようなクレーターの中に立つと 外輪山の内部にいるような気がしない——周壁がまったく見えないのである。月は地球より小さいから 表面の曲率は地球より大きく クレーターの周壁は地平線のかなたにかくれてしまうから 観測者はなめらかな平原に立っているような気がするだろう。クラビウスについても同じことがいえる。クラビウスの直径は234kmあり 面積はスイスより広い。周壁は内部のいちばん深いところから測れば5,000mの高さがあるが この巨大な円形劇場の中に立てば 周壁はまったく見えないだろう。”

第10図には いくつかの代表的なクラビウス型クレーターの断面図が示してあるが 上にのべられたこととあわせて 形態（構造）の特徴がよくわかることと思う。

このような形態（構造）上の特徴は 何にくらべられるであろうか。クレーターの隕石成因論者は この型のクレーターも隕石衝突によってできたと考えているが 筆者は そのような考えにはひじょうに疑問を感じている。このような クレーター底がひじょうに平坦で 月面の曲率にしたがっているような構造は たとえばアリゾナのバリンジャー隕石孔のように ふつうの底のまるい隕石孔とは 明らかに形態的・構造的に異なっているし 隕石の衝撃による中心部のね返り構造もみられない。だいたい クラビウス型クレーターには 共通

した性質として中央丘はないのである。これらが 本質的にはサラソソイドや危難の海のような閉じた海と同じものであることとあいまって むしろ ある種の造構的陥没平原である可能性ははなはだ強いのである。

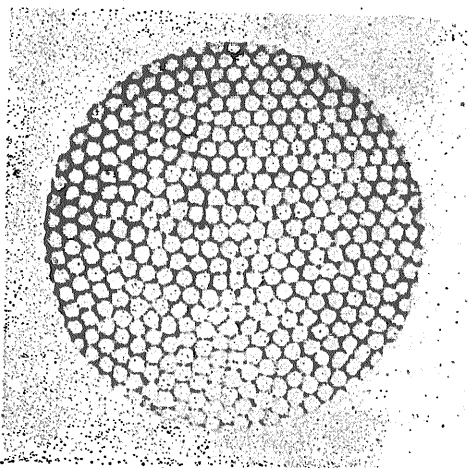
さらに これらのクレーターの周壁の多角形構造が けっして二次的な変形によるものではなく 初生的なものであることを示す証拠がある。それはたとえば プトレメウスとアルフォンズスの関係である。この両クレーターは 第1図にみられるように おたがいに周壁の一部を共有している。それはちょうど蜂の巣の構造のように 六角形の一辺を共有しており はじめからこのような形で しかも 両クレーターがおそらく同時に（または ひじょうに接近した時代に）できたと考えざるを得ないのである。このような例は ほかにもブルバツハとレギオモンタヌスをはじめ あちこちにみられるようである。月面のわれ目構造には たしかにクレーターの形成後に発達したことのわかる新しいものもみられるが 多角形クレーターの形成と機を一にして（というよりも むしろ多角形クレーターを生み出すような形で）発達したものも多いのである。

それでは 多角形クレーターが グリッド・システムを中心としたわれ目構造に どのように関連づけられて生まれたのであろうか。まず グリッド・システムのとくに NE—SW 方向と NW—SE 方向のわれ目は 月面（月の地殻）にある種の張力（変形のストレス）が生じた結果生まれたものではなからうかということである。たとえば 粘土のうすい層をワイヤー・クロスのようにのせ これを左右に引っぱると 第11図のようなわれ目模様を示すようになるが このわれ目は 月面のグリッド・システムのパターンとひじょうによく似ている。このような例を参考にして考えると 月面にはたらいいた引張りの力とは 何であつたろうか。一つの考えとしては 太古のむかしおそらく地球と月のあいだの距離がひじょうに接近していたころ 地球の強烈な潮汐力が月面に作用をおよぼしグリッド・システムを形成したので

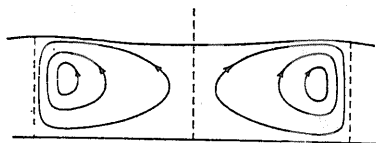
はなかるうか ということである。

ところが ただそれだけでは 多角形クレーターの形成を説明することはできない。多角形クレーターが閉じた造構の陥没平原であると考えられることから グリッド・システムの形成とともに それにかこまれた地域が そっくり あまり破かいしないで 陥没運動をおこしたと考えることができる。そしてそれは 月の地殻のごく表面の部分が固化し その下部は熔融状態にあって われ目の生成や陥没がきわめて容易におこる状態にあったことが推察されるのである。

ところで 上にのべたようなことが一般におこって クラビウス型の多角形クレーターが生まれたとしても なおかつ不思議なのは プレトメウスとか危難の海で代表される あまりにも形のよくととのった正六角形のクレーターが いくつもみられることである。いくら交差するグリッド・システムにかこまれてクレーターができたとしても こうもきれいな形になるものであろうか。そこで私は ひとつの大胆な推理をしてみることにしたい。じつは 多角形の網目状の構造が 熱対流によって生ずることを明らかにした有名な実験がある。それは H. ベナール(Bénard)が1900年にはじめておこなったもので ベナールの渦 とよばれているものである。彼は 厚さ8cm 直径20cm の鉄の円筒上に 深さ0.5~1mm ていどの鯨ろうやパラフィンの膜をはり 下から水蒸気で加熱した。このさい 上の膜は熱対流



第12図A. 上からみたベナールの渦



第12図B. ベナールの渦の横断面

のおこる流体層であり 鉄の円筒は流体を下面から熱する熱源の役目を果たしている。その結果 つぎのことが判明した。

- ① 熱しはじめると 流体の底(鉄円筒に接したところ)に 上昇の中心が不規則にできる。これが渦の中心である。渦は急速にその数をまし たがいに衝突し変形する。衝突するごとにほぼ鉛直な壁ができ 壁の両側で渦の回転の向きが逆になる。こうして 各渦 あるいは細胞は多角形に近づく。渦の数が多すぎると小さい渦がぎえ 少なすぎると大きいものが分裂する。このようにして 上からみて四角形から七角形にいたる不規則な細胞ができる。
- ② さらに時間がたつと 同じ大きさの正六角形の細胞ができる。流体の粘性が小さすぎると 外部からのじょう乱が大きくひびき また粘性が大きすぎると 細胞相互間の作用が小さくなり ともに正六角形は得られない。
- ③ 正六角形渦は大へん安定である。流体は六角形の中心で 上昇して周辺にむかい 周辺で急に下降する。流体表面の凹凸は ベナールの実験では1 μ 以下であったが それでも中心で低く 辺の頂点で最も高いことがわかった。
- ④ 温度分布は 中心で最も高く 頂点で最も低い。したがって温度を下げてゆくと 最初頂点が つぎに辺が 最後中心が凝結する(以上第12図a・b参照)。

以上のようなわけで 多角形細胞の構造(とくに六角形細胞)が熱対流によってできることがわかったが この原理を月面の多角形クレーターの生成に適用してみよう。

最近 地球のマントル対流ははなばなく脚光をあびているのに関連して 月の内部での対流現象もいろいろと議論されている。しかし ここでとりあげるのは そのような一般的な対流の議論とは少し異なっている。筆者は つぎのような可能性を一つ考えたいのである。すなわち

- ① 月のクラビウス型多角形クレーターの直径は100km から300km以内のものが多く。したがって このようなクレーターは 月面全体では1つ1つが小さな細胞に相当する(もともと サラソイドは300~500km 海は1,000km のオーダーであるから かなり大きな細胞も考えうる)。
- ② このような細胞が熱対流によって生ずるならば 月面下の比較的浅い層で(100kmくらいの深さまで) 熔融した物質が たくさんの対流渦をつくらねばならない。
- ③ そのためには 月の内部からの熱流が 月の表層部に近い部分にたまり この部分が熔融する時期があった(むしろ中心部は溶けなかった)と考えなければならぬ(第13図参照)。
- ④ その時期は 月の地質時代の少なくともヒッパルクス代か

ら海洋代にいたるまで 各時代ごとに 規模のちがいこそあれ いくつかの段階にわけて存在したと思われる。

以上のようなしだいである。このような考えは まことに大まかで 独断的なものであるがゆえに 心ある方からは一笑に付されるかもしれない。しかし 一応 1つの仮説として提出しておきたい。

じつは このことに関連して 月は中心部よりも外側のほうが溶けたと考えたほうが つごうがよいことを支持する事実があることはあるのである。

たとえば 天文学的な計算(慣性率の計算)から 月は内部より外側のほうが密度が高いということがいわれている。また 最近アポロ11号が持ち帰った月面岩石の研究から 月面の岩石は密度 $3.2\sim 3.4\text{g/cm}^3$ のかんらん岩質の岩石が多く これが月の平均密度(3.34g/cm^3)とほとんどちがわないか むしろ大きいことから月の表層部には かなり重い岩石が集まっているのではないかと いわれている。このことが事実だとするとなぜ月の内部には軽い岩石があり 外側に重い岩石が集まっているのかを うまく説明しなければならない。

そこで 一つの考えとしては 月をつくった原始物質が蛇紋岩のような水を含んだ塩基性の岩石であると考えるとき つごうがよいことになるのである。すなわち 月の外側だけが溶けたとき 水は逃散して より重いかんらん岩質の岩石になったと考えればよいのである*。

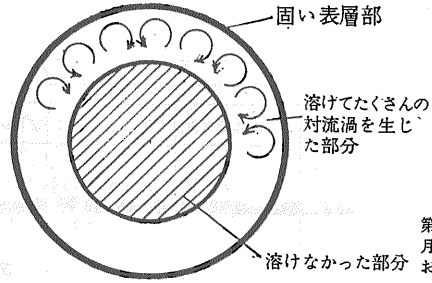
*アポロ11号が持ち帰った岩石を分析した結果では 水はまったく存在しないことがわかったという。この事実は重要であるが 水がはじめから(マグマの段階から)まったくなかったのか あるいは はじめは少しでもあったが 月面の特殊な環境に長いあいださらされた結果 完全になくなってしまったのかは まだ議論の余地のあるところである。今後の研究に期待したい。

以上 多角形クレーターの原因から少々話がずれてしまったが 多角形クレーターが内因的な成因をもつものである ということの論旨は わかっていただけたことと思う。

25. クレーターの進化

いままで いくつかのタイプのクレーターの原因について議論してきたが これらのまとめの意味もかねて いろいろなタイプのクレーターの生成が 時代とともにどう変化してきたかをながめてみることにしよう。

そこで ごく大ざっぱではあるが 月の各地質時代におけるクレーターの型の分布を図表にえがいてみた(第14図 地質時代の区分は A. V. Khabakov のものによ



第13図 月の内部の対流のおこりかた

る)。これをみると 各型のクレーターの形成にはかなり時代的な特徴があらわれていることがうかがわれる。ただし この図表はまことに大まかなものであって 試案の域を出ないものであることをおことわりしておきたい。

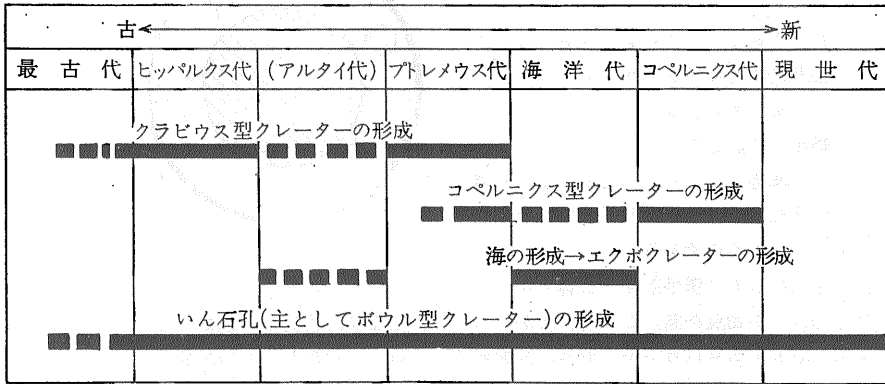
では この図表をもとにして 月面のクレーターの進化をたどってみることにしよう。

<第1の段階>クラビウス型のクレーターの形成を主とする時代(ヒッパルクス代~プトレメウス代)

月の地質時代の初期(主としてヒッパルクス代)には月の表層部に熱流がたまり かなり溶融のおこる部分があった。このようなところでの溶融層の対流運動や地球の強い潮汐力の結果発達したグリッド・システムの構造線に支配されて 大規模な陥没運動があいつぎ クラビウス型の多角形クレーターが多数生成した。そして このような作用は つぎのプトレメウス代へ引きつがれていった。

<第2の段階>クラビウス型クレーターとコペルニクス型クレーターの共存形成を主とする時代(プトレメウス代を中心とした時代)

第1の段階をすぎると クラビウス型クレーターのうちのやや規模の小さい プトレメウス・クレーターなどの形成と コペルニクス型クレーターの形成とが共存する時代となる。この時代には クラビウス型クレーターの形成に必要な 環状の造構の陥没運動がおこるいっぽう 火山作用もかなり発生し 火口やカルデラ状の地形がつくられた。たとえば 月面の中央近くで アルフォンズスの南にあるアルザッケルは プトレメウス代の 比較的古いクレーターであるが コペルニクス型の特徴をよくそなえていて 火山作用の結果できたことを物語っている。また アルフォンズスなどは プトレメウスとアルザッケルのちょうど中間型を示している。



第14図 月の地質時代における各種クレーターの時代表分図

<第3の段階>大環状地形である海の形成の時代（海洋代を中心とする時代）

月面のクレーターが形成されていく過程で 超大型の環状地形である海の形成という 特異な一時期がある。これは 基本的にはクラビウス型クレーターと同じく 造構的陥没運動によるものであるが その規模が雄大であることと 陥没したあとに大量の溶岩（あるいは碎屑流）があふれ出し そこをうめつくした点で ふつうのクレーターとは異なっている。海の中にみられるアルキメデス型クレーターや いわゆるまぼろしくレーターはこの時期に 既成のクレーターが溶岩流や碎屑流に埋もれてきたものと考えられる。なお Khabakovによると 海の形成は プトレメウス代に先立つアルタイ代にはじまるということであるが これについてはいろいろ問題が感ぜられるので ここではふれないでおく。

<第4の段階>クラビウス型クレーターの形成が影をひそめ コペルニクス型クレーターの形成が中心となる時代（コペルニクス代を中心とする時代）

この時期には コペルニクス型クレーターの形成がさかんになり それに付随してボウル型クレーター（内因的成因によるもの）も多くつくられた。月面の大規模な火山作用は このコペルニクス型クレーターの多数の形成をもって頂点にたっし このあと急速におとろえていったものと考えられる。

コペルニクス型クレーターの中でも 形の新鮮なものほどレイ（輝条）をもっているという事実は レイが火山活動のある種の末期的現象の産物であると考えこ

とはできないであろうか。

なお いままでふれていなかったが おそらく最古代から現代までを通じて 月自身の活動とは別に 隕石孔も多数形成されたことを 考えないわけにはいかないであろう。これらは 古いものはすでにクレーターの原形が失なわれているものも多いであろうが 比較的新しいものは 現代のランダムに分布するボウル型クレーターのように はっきり残されていると考えることができる。

さて いままでのでてきたように 月面のクレーターの形成には ある一定の規則的な歴史があることがわかった。すなわち ごく大まかにいえば クラビウス型クレーターからコペルニクス型クレーターにいたる進化である。このように 月面のクレーターの形成に一定の進化の歴史があり けっして偶然的な要素によってだけ形成の歴史が組立てられるものではない ということがいえるのは 月の歴史を解明していくうえで重要なことではないだろうか。

次回には 月面における火山活動の諸問題をまとめて述べる予定である。

（筆者は東京都立武蔵高校教諭）

参考文献（おもなもののみ示す）

G. Fielder (1961): Structure of the Moon's Surface, pp. 266, Pergamon Press.
 G. Fielder (1965): Lunar Geology pp. 184 Lutterworth Press
 P. ムーア 宮本・服部 訳 (1965): 月——形態と観察 pp. 346 地人書館。
 P. Moore, P. Cattermole (1967): The Craters of the Moon pp. 160 Lutterworth Press.
 Z. Kopal (1966): An Introduction to the Study of the Moon. pp. 464, D. Reidel Publishing Co.