

月の地質学

⑧

小森 長生

26. 月面における現在の火山活動

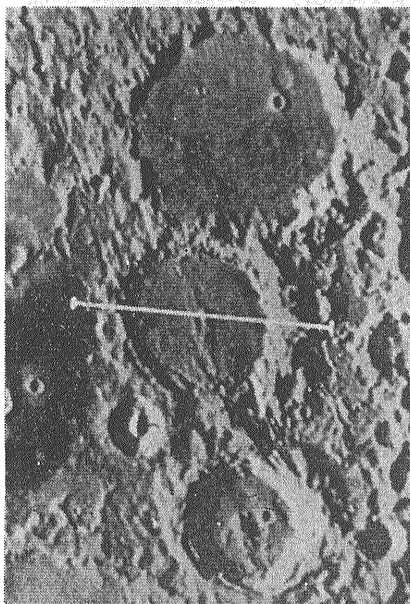
もういまから10年以上も前のことであるが 1958年11月3日 ソビエトの N. A. Kozyrev という天文学者が月面で火山が噴火するのを観測したというニュースが新聞紙上にをぎわしたことがあった。

そのころ 月面のクレーターの原因論はすでに隕石説が一般に有力で 火山説はかけをひそめた状態にあったので 多くの天文学者がこのニュースにおどろいたのはいうまでもない。しかし実をいうと このとき大部分の天文学者は この知らせをあまり真剣には受けとっていなかった。いわんや地質学者においてはほとんど無関心であった(今日とはちがって 当月月に関心をよせる地質学者はひじょうに少なく とくに日本ではほとんどいなかったのだから 無理もないであろう)。

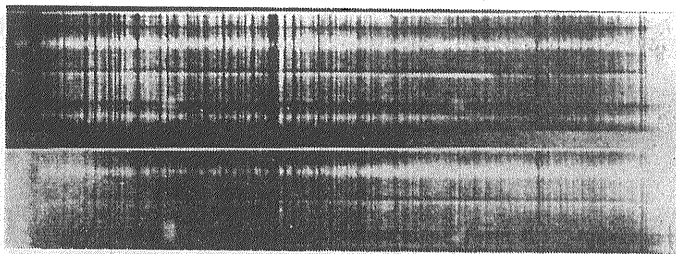
それは 一つには Kozyrev という人が 欧米ではほとんど知られていない天文学者だったことにもよっている(ソビエト国内ではすでに30年以上も前から、超巨星の研究などで知られてはいたが)。しかし 翌1959年 有名な天文雑誌「Sky and Telescope」1959年2月号に Kozyrev 自身の書いた論文が掲載されるにいたって これは看過できない事実であると認められるように

なってきた。Kozyrev の報告は 要約するとつぎのような内容のものであった。

「その晩 私は分光器のスリットをアルフォンズス・クレーターの中央丘にそって向け 3枚のスペクトル写真をとった。分光器の分散度は青いほうで1mmにつき23Å 乾板はコダックの103a-F。露出は10分から30分というところだった。1時(グリニッチ時間、以下同じ)から1枚目のスペクトル写真をとりはじめ スリットが正しく中央丘にくるように 私が望遠鏡をガイドしていたときである。突然その頂のあたりが急にぼやけて異常に赤っぽくなってみえた。1枚目の写真の露出を終わったあとは すぐ火星観測のプログラムが続いていたので 私がふたたびアルフォンズス・クレーターにスリットを向けて 2枚目のスペクトル写真をとりはじめたのは3時になっていた。おどろいたことには スリットには中央丘のあたりからの光しか入ってこなかったのに それは異常に明るく白っぽくみえた。露出をしているあいだじゅう 私はガイド望遠鏡から目をはなさなかったけれど 突然その明るさがふだんと同じにもどったので すぐに露出を止め つづいてスリットの位置を動かさないうまま 3時30分から40分まで 3枚目のスペクトル写真をとった(第1図 第2図参照)。1時にとった1枚目の写真は 波長の短い青のあたりで 頂のあたりは周囲にくらべてかなり光が弱まっていた。ふだんより光の散乱が多かったことを示している。2枚目の写真では青いほうでのこの吸収はとくに目だつてはいないけれども、こ

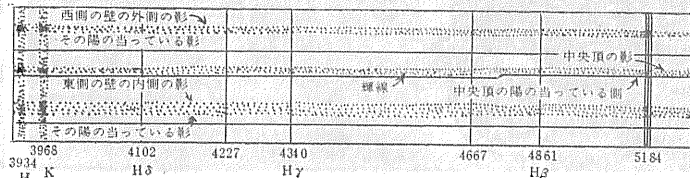


第1図 アルフォンズス・クレーターとその周辺の写真 白線が分光器のスリットの位置を示す



第2図 Kozyrev の撮影したアルフォンズス・クレーターのスペクトル写真。上側は3時から3時30分までの露出で 4737Å から短波長側にのびる強い輝線が特徴的。下側は3時30分から3時40分までの露出で 上側の写真の輝線はもうみられない。(下の説明図を参照)。

第2図の説明図



のクレーターへのふだんのスペクトル写真に重なって 分子の輝線帯の系列がたくさんうつつている。そして この直後にとった第3のスペクトルには 目に異常がなかったのと同様 にもふだんどちがった変化はみられない。これは アルフォonzス・クレーターの中央丘のあたりで 輝線スペクトルを発生するようなガスの噴出があったということであり また 観測した時間から考えて この異常な現象は2時間半より長くはないが 30分より短かいことはない といつてよいだろう

このような アルフォonzス・クレーターの中央丘にみられた異常現象について Kozyrev はこれは月の火山活動によるものだと つぎのように入っている。

「はじめに 火山灰のような微塵の噴出があった。これが1時半ごろ 肉眼で赤っぽくみえたものである。これにつづいて 分子の輝線スペクトル帯を生じるような熱いガスが噴出したが このガスは 月の表面まで流れ上ってきた溶岩から噴き出してきたものかもしれない。

スペクトルの中で 4737Å から波長の短かいほうへのびている輝線の帯は 青いほうへ向かって弱くなっているけれども そのなかには 炭素分子C₂の Swan 帯の系列がひじょうに強くあらわれている。4737Å のところは 炭素分子の振動帯の始まりだが 5165Å および5636Å から始まる Swan 帯の別の系列の輝線も 弱いながらみられることから 噴出ガス中に炭素分子があることは確かである。このような私の観測は 他に確かめられていないまま当分のあいだは唯一のものかもしれない。しかし いまも月の内部が活動し していまなお造山作用がおこなわれている可能性を考えなくてはならないことは明らかである。この異常なガス噴出の場所が ちょうどアルフォonzス・クレーターの中央丘と一致していたということは 偶然というにはあまりにみごと一致であるし 月の表面を埋めているクレーターの成因は 隕石などの衝突によるのではなくて 何か内部的なものに求めるべきだということを示しているのではなからうか

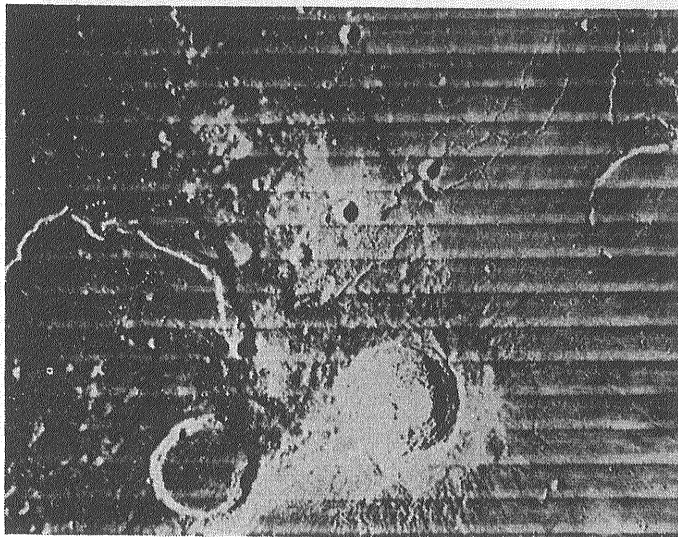
たいへん長くなったが Kozyrev の報告はざつと以上

のようなものである。

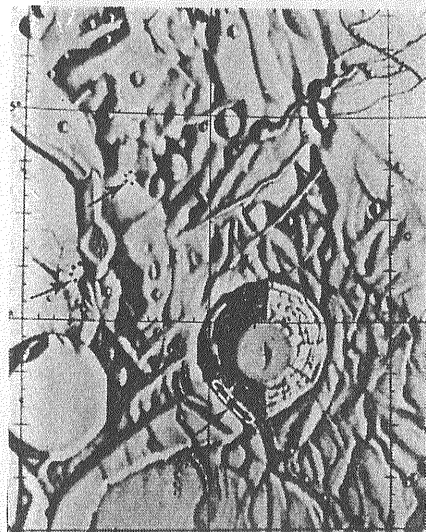
Kozyrev は このような観測結果から クレーターの成因も内因的なものだと考えるべきだといっているが この点は多少議論を要するとしても 観測事実そのものは貴重なものであり 尊重されなければならないであろう。ところで 月面の火山活動とおもわれる現象は Kozyrev のこの観測にかぎらず いままでにもたくさん知られているのである。Kozyrev の観測したアルフォonzス・クレーターも 実は彼のまえに 1956年10月26日 アメリカの D. Alter によって 同じような現象が観測されていた。しかし Alter は 火山噴火と考えることには消極的だったためあまり話題にものぼらなかった。

アルフォonzスの他に 異常現象の発見されているクレーターとして最も有名なものは アリスタルクス・クレーターである。アリスタルクス・クレーターは 月面で最も明るく輝やくクレーターとして有名であるばかりでなく もうだいふ以前から 多くの天文学者やアマチュア観測家によって 火山噴火とおぼしき現象が観察されている。先の Kozyrev も 1955年と1961年に アリスタルクスのスペクトル観測をおこなつて クレーターの中央付近から発しているらしい輝線スペクトルを記録し これは 月面に噴出した水素ガスにより発生したものであるといつた。

そして 近年最も注目を集めたのは 1963年10月29日 アメリカのローウェル天文台の J. A. Greenacre らによって発見された アリスタルクスとその付近の ルビー色にかがやく斑点である。彼は同日18時30分(グリニッチ時間では30日1時30分) 60cm屈折望遠鏡に400倍から1100倍のズームアイピースをつけて シュレター



第3図 アリスタルクス・クレーターとシュレターの谷付近の写真(ルナ・オービター5号撮影)



第4図 アリスタルクス・クレーターとその付近にガス噴出のあった位置を示す図(矢印の先の点線でかこまれた部分)

の谷付近の観測を始めた。18時50分になると 通称コブラの頭（シュレーターの谷の北部の幅広くなっている部分）の西南方にあるドーム状の地形の部分が 赤味をおびたオレンジ色におおわれているのに気がついた。ほとんど同時に もう一つ同じ色の小斑点が シュレーターの谷と交差している丘の頂上にも出現していることを発見した。約2分後には この2斑点はひじょうに明るくなり きらめきをみせるようになった。

この状態のまま18時55分を迎えると こんどはアリストタルクス・クレーターの内壁の南西部に 細長いピンク色の光斑が出現したが（このほうはきらめきをみせず また内壁の他の部分にこのようなものは一つも見あたらなかった。19時0分になると 2つの輝点のほうはルビーのような赤色に変わり 明るく輝きだしたが さらに5分後の19時5分には色があせはじめ 19時10分には消失してしまった。 いっぽう アリストタルクス内壁上のピンク色の斑点は19時15分に消失し 壁は平常の姿にもどってしまった。これらの一連の現象は 残念ながら写真にはとられなかった（第4図参照）。

なお ローウェル天文台では この現象の1カ月前の11月27日 ふたたび台長の J. S. Hall はじめ3人の天文学者が アリストタルクス内壁での発光現象を観測している。このときのルビー色の斑点は 前回のものよりも大きく 長さ19km 幅2.4 kmの帯状にみえたという。そして 17時30分に出現してから18時45分に消失するまで 1時間15分ものあいだつづいたのであった。

アリストタルクスの異常発光現象については 他にもいくつかの観測例があるが ごく最近の例としては 前記ソビエトの Kozyrev が 1969年4月1日観測したものが有名である。彼は同夜アリストタルクスに クリミア天体物理観測所の50インチ(127cm) 反射鏡をむけてスペクトル写真をとっていたが 18時30分と18時40分（いずれもグリニッチ時間）にとったスペクトル写真に ガス噴出による輝線が写っていた。この写真を解析したところ 明るい線はチッ素ガスとシアンガスとが 太陽の紫外線や放射線をうけて赤く光ったためのものだとわかった。そのガスは直径2 kmほどに広がり噴出したのは1気圧に換算して1千万ないし1億 m^3 ほどだと Kozyrev は計算している。

これらのガスのうち シアンガス(CN)₂*は有毒な物質であるため 当時月面着陸の準備をすすめていたアポロ11号の宇宙飛行士たちに 気をつけるようにと Kozyrev が警告を発したことは 記憶に新しい。

*通常地球上の火山ガス中には シアンガスは含まれていないので この観測にたいしては疑問視するむきもある。

以上に 最近観測された月面の現在の火山活動（ガス噴出を主とする活動）の例をあげた。

さて このような火山活動と思われる月面の異常現象は 実をいうと 何も Kozyrev に始まったことではなくかなり古くから認められているのである。古い記録では 1788年に Schröter がアルプス山脈の近くで認めた発光現象のようなものの記録があり それいらい実に多数ある。そのなかには アマチュア天文家たちによる不確かなものもかなり含まれているようではあるが しかしどうしても否定できない確かな観測結果が多くあることも事実である。このような火山現象の多くの観測結果を注意しながらみてみると 重要な2つの事実があることに気がつく。それはつぎのようなことである。

1つは これらの現象が 火山活動とはいっても 大量の火山灰や溶岩流を流し出すような火山活動ではけっしてない ということである。その大部分はガス噴出であり それも 何日間もつづいておこるようなものではなく たいていは数分～数時間ていどのものが多い。そして このような小規模のものであるから 月面の地形に変化をおこさせるようなことはほとんどない。

つぎに重要な事実は このような火山現象のみられる地域が コペルニクス ケプラー アリストタルクス チコ ラングレヌス ペタヴィウス アルフォンズス その他ほとんどが レイを伴ったコペルニクス型クレーターだということである。これは きわめて重要な事実のように思われる。レイ・クレーターについては 再三論じてきたように いろいろな事実から判断するとどうしても内因的な成因を考えなければならないのである。

とくに第6回目に述べたように 月面の熱点観測の結果 熱点域がレイ・クレーターに集中しているという事実は ガス噴出などがおこりやすいことと関係しているのではないだろうか とも思えるのである。このガス噴出の現象が 大古の火山活動のなごり（それはきわめてささやかななごりではあるが）としてみられる現象なのか または 月のかなり内部で 別の理由で発生したガスが 月面では最も新しくできたレイ・クレーター火山の火口をねらって上ってくるのかは よくわからないが おそらくそのいずれかであろう。このような事実から 現在の月面でおこっている火山活動というのは ごく限られた小規模なものであり 過去に クレーターをはじめ月面の諸地形をつくった火山活動とは まったく別個に考えなければならないものであると思われる。

それでは 月面では 過去にどのような火山活動がおこったのであろうか。つぎに 過去におこった火山活動の例をいくつかながめてみることにしよう。

27. 月面における過去の火山活動

月面において過去にどのような火山活動がおこったかを知るには まず火山活動でできたと思われる地形や構造を たんねんに探つてゆくことである。そしてそれはすでにクレーターの原因とも関連させて 前回までかなり述べたことであるが いままで書きもらしたこともあるし 重要ないくつかの事実をここでまとめておくことにしよう。過去におこった月面の火山活動として 重要なものが2つある。それは 1つはクレーターを形成した火山活動であり もう1つは海を形成した火山活動である。まず クレーターを形成した火山活動であるが いままでにものべてきたように コペルニクス型クレーターやクラビウス型クレーターの成因が どうしても内因的なものであると考えられるところから これらのクレーターをつくった火山活動のありさまを推定することができる。

コペルニクス型クレーターが 火山の火口そのものをあらわしているのか カルデラ地形の一種なのかは なお議論のあるところであろうが 筆者は 単なる火口そのものではなく カルデラと両方の性格をもった独特の形態(構造)と考えるべきではなからうかと思つている。その理由は たとえばつぎのような事実によつてゐる。

前にものべたように コペルニクス型クレーターの大きな特徴の1つは 内壁が階段状の段丘をなしていることである。この段丘は E. Shoemaker らアメリカの人たちの考えによると 内壁におこった地すべりの結果できたものだというのである。しかし これらの段丘は きわめて整然と同心円状に連なっており しいだいに内側の段が低くなってクレーター底面に達する。それは規則的に時間をおいて 段階的にクレーター底(ないしはクレーター内部の山体)が沈降しながらできたも

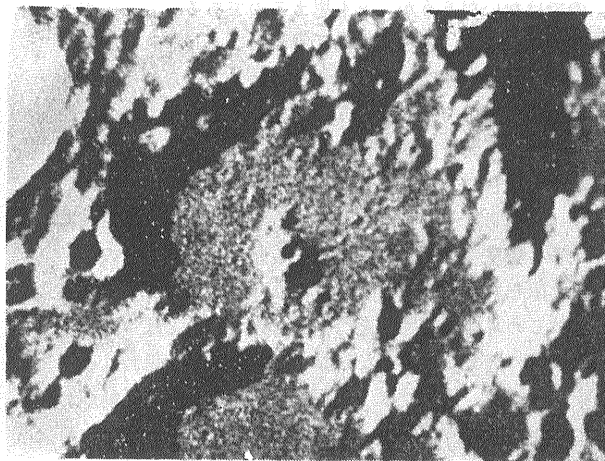
のとしか考えられない。とても 地すべりなどでできたというのではないと 筆者は考える。だいいち 地球上の隕石孔で(彼らはコペルニクス型クレーターを典型的な隕石孔と考えている) 内壁に同心円状段丘をもっている例は知られていないのである。

それならば このような地形が ほんとうに地球上の火山のカルデラと同じものなのであろうか。たしかに地形的特徴のほかにも 直径が100km前後のひじょうに大きいものが多いという事実は ただの火口と考えるよりは よりカルデラ的であり 地球上のカルデラ(それも大部分はクラカトア型カルデラ)と同じようなものと考えたほうがごうはよい。とくに中央丘をもっているものは 地球上の二重式火山とよく似ている。

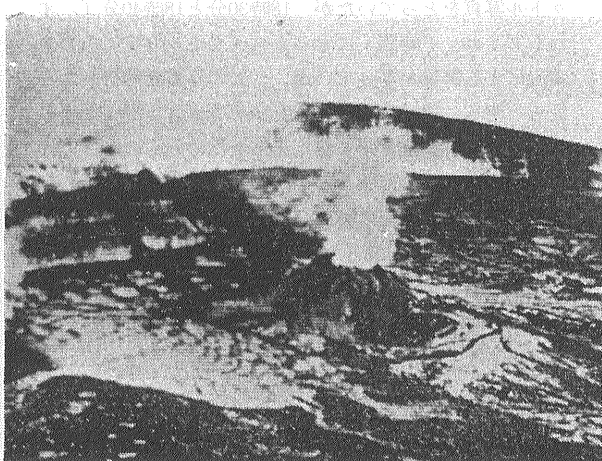
J. Green (1962) は 中央丘をもったコペルニクス型クレーターのうちの2・3の特徴のあるものを 地球上の火山と比較している。たとえば 第5図aは レギオモンタヌス・クレーターの写真であるが これは 周壁がくずれてはいるが 六角形に近い多角形構造をしており いかにもカルデラ的である。しかも中央丘があり(これも中心からすこしはずれた位置にある) その中央丘の頂上は きれいに穴があいている。これはどうみても火山(カルデラ内の中央火口丘)であろう(隕石が中央丘の頂上にうまく落ちたと考えられないこともないが そう考えることはかなり不自然であるし そういう確率もひじょうに低いであろう)。

このような形態は地球上にもみられるものであり bに示した写真とよく似ている。bは 1940年におけるハワイのモクアウェオウエオ(Mokuaweoweo)カルデラと その中の中央火口丘(cinder cone)の写真である。

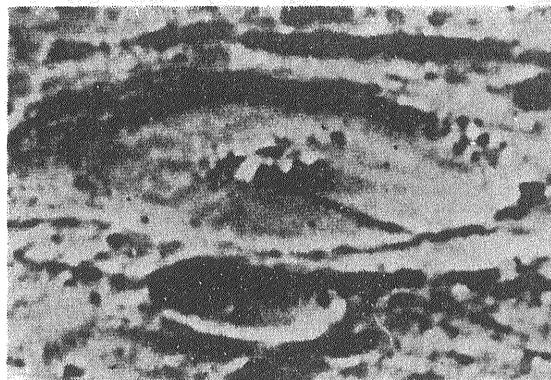
さらに 第6図aは ベタヴィウス・クレーターの写真である。これは 階段状の周壁と中央丘をもつ典



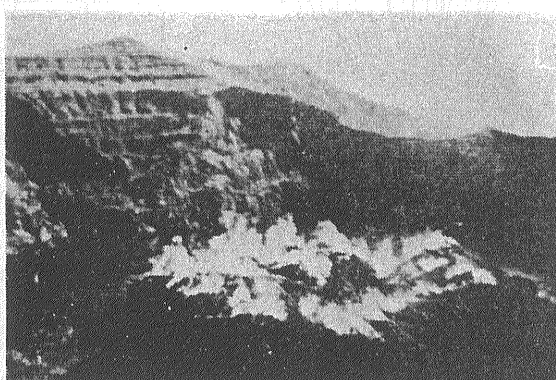
第5図(a) レギオモンタヌス・クレーターの写真 中央丘の頂の孔に注意



第5図(b) ハワイのモクアウェオウエオカルデラとその中央火口丘の写真(J. Green 1962による)



第6図(a) ペタヴィウス・クレーターの写真



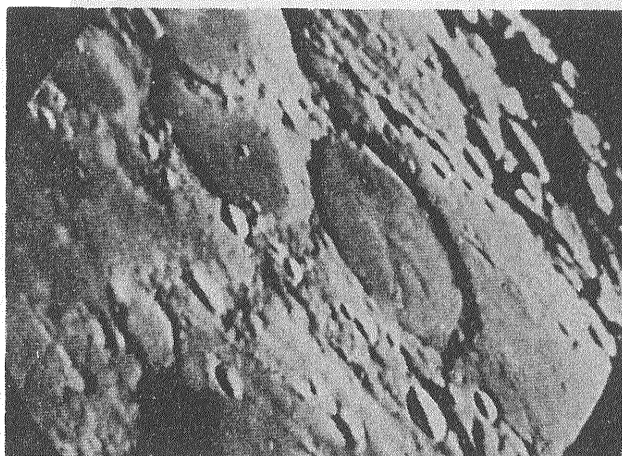
第6図(b) ジャワのアウォエカルデラとその中央火口丘の写真
(J. Green 1962による)

型的なコペルニクス型クレーターの1つであるが 中央丘の形が単純でなく 小丘の複合したもののようにみえる。そして これもbに示した写真とよく似ている。bは ジャワのアウォエ(Awoe)カルデラとその中央火口丘である。このような比較をみると たしかに両者の形態・構造がよく似ていることがわかる。ただしあとでも述べるが 月のクレーターは生成がひじょうに古いので 現在の地球上の火山と直接比較することには問題が感ぜられるが 火山地形という点からみれば 両方ともに共通する特徴をよく持っている。

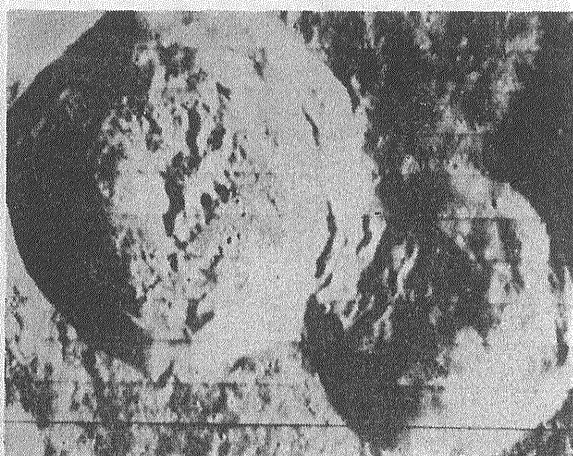
説明ができそうである。これは 第7図の写真にみられるように クレーターの底面がほとんど周壁と同じ高さで クレーターというよりも 円卓状の山といえるものである。これは 火口内にいっぱいになった溶岩湖があふれる寸前にそのまま固まってしまったとでも考えるよりほかないものであろう。

さて 以上にカルデラの特徴をあげたわけであるが こんどはこれを 火口そのものと考えたらどうであろうか。まえにものべたことであるが 内壁の同心円状段丘は 火口内にいっぱいになった溶岩湖の表面が 下に下っていったものとしても説明できる。また そのような例が 実さいに地球上の火山の火口でも知られている。そこで このような目でクレーターをながめてみると ワルゲンチンという名の奇妙なクレーターの

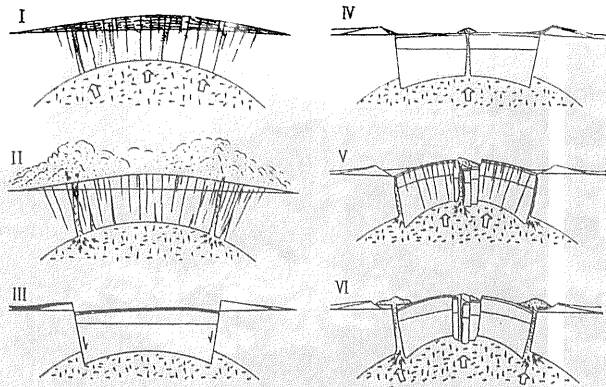
また 第8図は うら側にみられるめずらしい地形の例である。これは 大小2つのクレーターが 周壁の一部を共有しているが 大きいほうのクレーターから小さいほうのクレーターにむかって 溶岩が流れこんだような地形がみられる。このような地形は おもて側のどのクレーターにもみられなかったものなので その生成をめぐって 地すべり説だの山くずれ説だの いろいろな意見が出ている。筆者は 大きいほうのクレーターにいっぱいたまった溶岩湖の溶岩が 境目の壁をつきやぶって小さいほうのクレーターへ流れこんだあと 溶岩湖の表面が下ってしまったため 溶岩の流れこんだ形がそのまま残されたものと考えるが どうであろうか。また 前にも述べたように チコヤアリストアルクスのよ



第7図 ワルゲンチン・クレーターの写真



第8図 月のうら側にみられる奇妙なクレーターの写真
(ルナ・オービター1号撮影)



第9図 ヴァイアス型カルデラの形成断面図 (Smith, Bailey 1968のものを用いた荒牧重雄1969による)

うに クレーター底が一面溶岩でうずめられているようなものは かつての溶岩湖の化石化したものと考えても いかうさしつかえないであろう。

以上あげたような例にもとづいて考えると クレーターは火山の火口そのものと考えても 少しもおかしくないといえそうである。ただ 一つ問題となるのは クレーターの直径が 地球上の火山の火口などに比べて きわめて大きいことであるが これについての問題点は 次節でのべることにする。

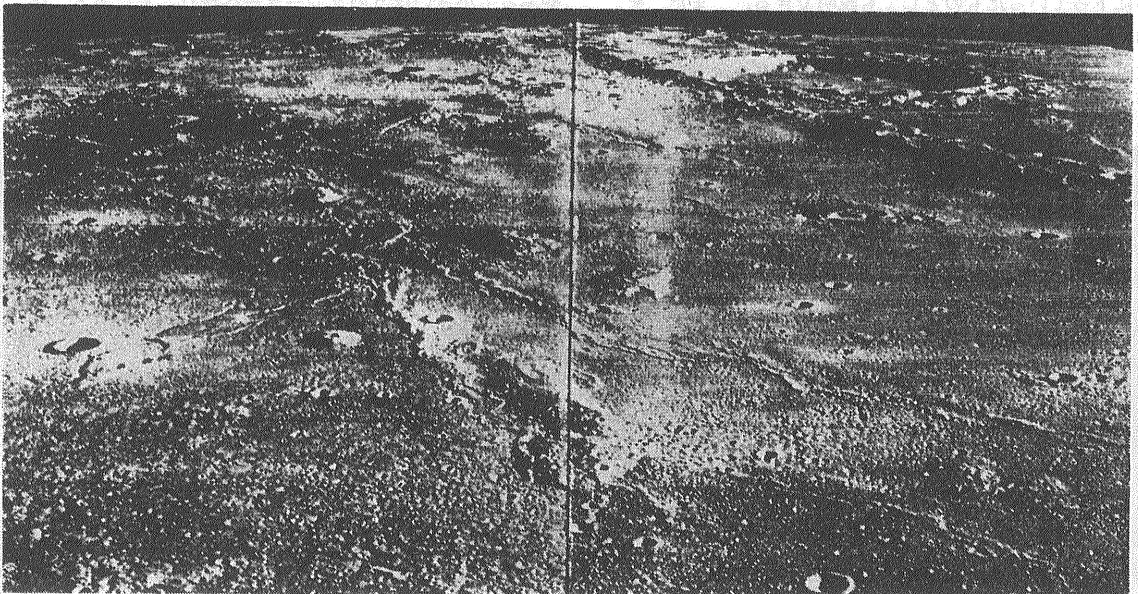
さて 以上は主としてコペルニクス型クレーターに関する火山活動の例をのべたのであるが もう1つの 内因的成因をもつと考えられるクラビウス型クレーターは どうであろうか。これは 前回にのべたように 月面の地質構造に支配されてきた造構的陥没平原 (一種の

Volcano-tectonic depression) であることは まちがいないであろう。このような構造のクレーターをつくる活動も 一種の火山活動とよんでよいであろう。

最近 地球上の火山のカルデラについて いろいろと新しい発見や見解がまとめられつつあるが その1つにヴァイアス (Valles) 型カルデラの発見がある。これについては 最近荒牧重雄氏のもとめられたものに詳述されているので それを参照していただきたいが ヴァイアス型カルデラというのは 一口にいて大量の火砕流の噴出のあと マグマ溜りの上に環状の割れ目が生じ それにそって 環状のブロックがほとんどそのまま沈

降する。したがって カルデラ底は平坦なままである。その後 カルデラ底の中央部が隆起して変形するが このような変形をのぞけば 環状の割れ目にそって沈降するあたりは クラビウス型クレーターの形成ときわめて似ているのではないかと 筆者は考える。今後月面のクレーターの形成についても このような機構が大いに研究されることを望むものである。

さて クレーターの形成に関連した火山活動の議論が長くなってしまったが もう1つの 海を形成した火山活動も重要である。月の海が 大規模な造構的陥没運動 (または 隕石論者によれば大隕石の衝突) によってできたほ地に 溶岩などがあふれてきて平坦な面を形成したものであることは すでによく知られている。このようなマグマの大溢流が 月の地史のある時期 (海



第10図 マリウス・クレーター付近のあらしの大洋の写真 (ルナ・オービター2号撮影)

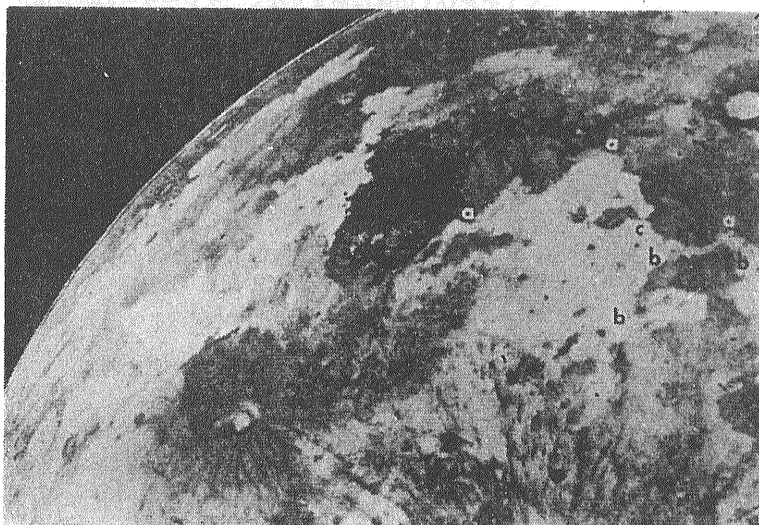
洋代またはプロセラム代)におこったということは特筆されるべきことである。

第10図は ルナ・オービター2号がとらえた あらしの大洋のマリウス・クレーター(上端)付近の光景である。この写真によってはじめてこの付近の海の地形がはっきりとわかった。とくにドームやしわがよく写っている。このうちしわは従来リンクル・リッジ(wrinkle ridge)とよばれ圧縮作用(一種の褶曲作用)によってもり上ったリッジだなどといわれてきた。しかしこの写真でみる限りこれはちょうど海岸に打ちよせるいそ波の波がしらがそのまま固まってしまったものようにみえる。おそらく大量のマグマがあふれ出したときいく重にも流れた溶岩流が途中でそのまま固まったものであろう。そこでこのようなものは溶岩流のフロント(化石フロント)とよんでおくべきものであろう。またドームは頂上に孔のあいたものも多くみられ明らかに溶岩のもり上った円頂丘のようなものであると思われる(なかには潜在円頂丘もあるかもしれない)。

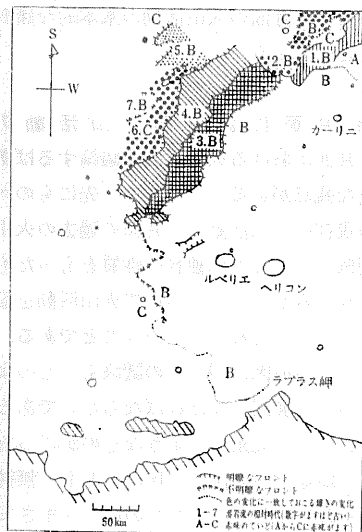
もっとも溶岩流のフロントについてはルナ・オービターによる写真がとられるまえに望遠鏡観測によってかなりくわしく調べられていた例がある。アリゾナ大学月・惑星研究所のE. A. Whitaker (1965)はマクドナルド天文台の82インチ反射鏡でとった月面の紫外線写真のネガと赤外線写真のポジを重ねあわせて第11図のような写真を得た。これを見ると一見平坦で同じ色に見える月面(とくに海の部分)がはっきりした境をもっていくつもの色に分かれていることがわか

る。これは物質の重なりがちがいによるとみられる。そしてR. Stromによってこの写真をもとに雨の海の地域(一部)について第12図のような見とり図が画かれた。この図の1から7までの数字で示した地域はしだいに下位のそれぞれ別の溶岩流を示しておりその境は溶岩流のフロントである。この図をもとにG. P. Kuiper (1965)はつぎのような結論を出した。すなわち海の地域は溶岩流あるいはそれらの積み重なりからできている。それらはそれぞれ固有の色をもっており古いもの(下位のもの)ほど赤色が強い。雨の海の溶岩流は厚さ20mから200mはありまたあるものは200kmもの長さにまでのびている。それらは地球上の玄武岩溶岩流とおなじようにterminal wall(すなわち溶岩流のフロント)をもっている。このように異なった溶岩流のあとがはっきりみとめられることから月面には1mmも宇宙塵のつもったところはない。

さて以上のような観察からすると月面の海の部分はほとんど固い溶岩流の表面がそのまま露出していてもよさそうな感じがする。しかし実さいはサーベイヤー1~7号の調査やアポロ11・12号の調査によって月面(海の面)はむしろ岩石片や細粉物質のまざった碎屑物の層で一面おおわれていることがわかってきたのである。それでこの事実といままでの観察事実とをどううまく組みあわせて説明するかが問題となってくる。1つの有力な考えとしては海の面はかなり多くの隕石がふりそそぎ表面がある深さまで破砕されたということである。この考えは目下広く受け入れ



第11図 雨の海付近の紫外線ネガ・赤外線ポジ合成写真 (E. A. Whitaker 1966による)



第12図 雨の海の一部の溶岩流の見とり図 (G. P. Kuiper 1965による)

られているようであるが 筆者には そのままでは納得できない面がある。たとえば 隕石の衝撃をそれほど多く受けているのだとしたら 海の面のおどろくほどの平坦さはどう説明したらよいだろうか。また Kuiper ののべたような いくつかの色と層位の異なる溶岩流 (この言葉は検討すべきであろう) や 溶岩流のフロントがそのまま新鮮な状態であらわれているのは どう説明したらよいのであろうか。さらに アポロ11号が持帰った岩石の中には 明らかに玄武岩質溶岩とわかるものの破片 (タイプAの岩石) とならんで 細粒でちみつまはんれい岩質岩石 (タイプBの岩石) が相当含まれていた。このはんれい岩質岩石は 月の地下のかかなりの深部からもたらされたものにちがいない。ある人は大隕石の衝突によって 月の深部の岩石がえぐり出されたのだらうといっているが そのような大規模な隕石の衝撃のあとが 平坦な海の面に存在するであろうか。

筆者は このような可能性よりも むしろつぎのように考える。すなわち 月の海をつくったマグマの溢流は 地球上でふつうにみられるような溶岩流のような形はあまりとらず むしろ 碎屑流のような形で 何度もくりかえしおこったのではなからうか。そのとき 深部の岩石もかなりとりこまれて上昇してきたにちがいない。塩基性のマグマが このような形態をとって噴出溢流したのは 月面の低重力 真空というような 地球上とは極度に異なった条件や環境が影さょうしているのではなからうか というわけである。この点にかんすることは次節でものべるし 今後の深い検討が必要となってくるであろう。

以上 月面における過去の火山活動を 例をあげて論じた。それではつぎに いままででてきた問題点を整理して 月面の火山活動の基本的な諸問題を考えてみることにしよう。

28. 月面における火山活動の諸問題

月面における火山活動を議論するばあいには 1つの重要な観点がある。それは 先にのべたように 月面の現在の火山活動と 月面の過去の火山活動とを一応別個に それぞれ独自の性質をもったものと考え そのようなみかたにもついで火山活動を論じていかなければならないだろう ということである。そして クレーターの成因についての議論も このようなみかたにもついで展開しなければならぬであろう ということである。従来このようなものがごっちゃにされ しかも 地球上の火山との比較なども 無神経に同列の観点からおこなわれていたために さまざまの誤ったみかた

がなされていた。例を2・3あげてみよう。

まず 先にのべたような 月面におけるいくつかの現在の火山活動のようすが観測されたことから 月面のクレーターはすべて やはりこうした火山活動でできたのだ と考えてしまうことである。Kozyrev がアルフォンズスのガス噴出を観測した当時 ずいぶんこのような議論が出たことがあった。これは一つには ジャーナリズムの無責任な解説にもよるが 多くの人のみかたがあいまいだったことは否定できない。現在観測されるガス噴出は 先にのべたように 火山活動*として はきわめてささやかなもので このような活動でクレーター (それも直径の大きなもの) ができるとは考えられない。

*したがって 現在のガス噴出現象に対しては『火山活動』ということばは使わないほうが適切とも思われる。

月面のクレーターや海をつくった火山活動は 前節の例でもみたように 現在のガス噴出とは質的に異なった大規模なものであり 現在のガス噴出から直接成因を論ずるべきものではないのである。

つぎに 現在の地球上の火山の形態・分布と 月面の火山活動・クレーターの成因などとの比較の問題である 従来 隕石論者たちはつぎのようなことをいっていた。地球上の火山の火口は 大きくてもせいぜい直径数100mから1~2km カルデラの大きいのでさえ20km前後である。ところが 月のクレーターは直径100km前後のものはザラにあり 直径200~300kmのものさえある。このように大きなものが火山活動でできるはずがない。また地球上の火山の火口は もり上った山体の頂上にあり 火口にくらべて山体の占める面積・容積のほうがはるかに大きい。それにくらべて月のクレーターは 長くすそをひく山体はあまりなく クレーターの壁自体が山体である。このような形は火山として説明しにくいなどである。このような議論はたしかに一理はある。しかしわれわれはここで つぎのことを十分考える必要があるのではなからうか。すなわち われわれが現在なまの火山活動や噴火口を観察することのできる地球上の火山は長い地質時代の時間からみれば たった (ノ) この200万年間にできた第四紀の火山がその大部分だということである。それに対して 月のクレーターはおそらく何億年も前にできたものであり* それが火山活動でできたものであるとすれば そのとき起こった火山活動もひじょうに古いものとなる。

*最近アポロ11号の持帰った岩石の年令測定によると 月の海の形成はひじょうに古く 40億年以上前ということになるらしい。したがって クレーターの形成時期も相当古いことが考えられる。

このような 時代的に極度にひらきのあるものを 直接比較してもよいものであろうか。ひと口に火山とか火山活動とかいっても それは時代(時間)とともに天体としての地球や月自身の発展(進化)に対応して形態や活動様式が変化してきたはずである。したがって地球上の火山活動自体も 過去の地質時代のそれぞれの時期に 時代に応じた特有の活動があったかもしれないし それによって 各地質時代特有の火山形態ができたかもしれない。何億年も前の 先地質時代のある時期には おそらく月面と同じような巨大なクレーターを形成するような火山活動があったかもしれない。地球上では 水と大気による浸食作用がはげしいため 古い地形はすべて失なわれてしまっているから 大古の地形を知るすべもない。しかし 上述したようなことを考えることはできるし またそれがひじょうに重要なことではないかと筆者は考える。

月と地球とは 物理的な諸条件や諸環境が異なるから 直接の比較は無理であるとしても 地球上では失なわれた大古(先地質時代)の地球のすがたを 月面地形に求めてヒントを得 地球の創生期の姿をえがき出すことはできるだろう。地球上の火山地形や火山活動を時代的な(すなわち歴史的な)目でとらえてゆく必要があることは 従来あまり考えられていなかったのであるが 過去の火山は現在(=第四紀)の火山とはちがうのだという いわば「古火山学」^{*}の立場で 古い火山をみてゆく必要が大いにありはしないであろうか。

*このことばはまだあまり一般的ではないが 今後重要な研究分野になってゆくであろう。

このような 古火山学的方法で地球と月の火山活動を検討し さらにそれにもとづいて 比較惑星学の方法で両者の活動・形態の相違や類似点を追求してゆくことによって 月面の火山活動とクレーターの成因の關係のなぞがとかれてゆくものと考えられる。

以上に 月面の火山活動を歴史的なみかたでとらえてゆくことの重要性をのべたわけであるが もう一つ それに劣らず重要なことがある。それは 月面の火山活動の特質を 地球上との物理的な条件のちがいを十分考慮して 追求してゆくべきことである。この点については すでにいく人かの考察があるので その2・3を紹介しよう。

まず 月面での火山活動を最も熱心に研究しているアメリカの J. Green の考えをのべてみよう(この人は大部分のアメリカの学者たちが クレーターの隕石説に固執している中で孤軍奮闘している貴重な存在である)。

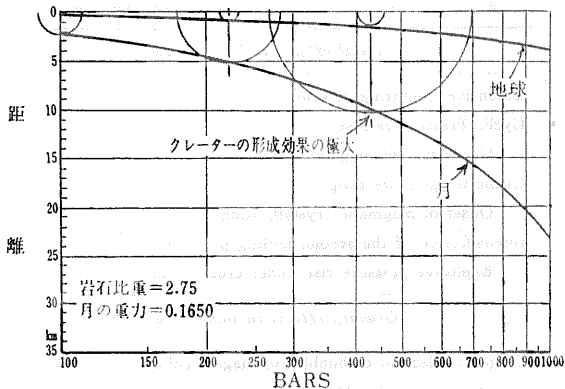
表. 月の火山活動を強めるファクター (J. Green 1962による)

<i>Tidal effects in lunar crust</i>	
Extensive fracturing of crust	
Cyclic Pressure release	
Generation of magma	
Cyclic temperature drop	
Onset of magmatic crystallization	
Intensification of the second boiling point effect	
Explosive pressure rise under crustal plates	
<i>Gravity effects in lunar crust</i>	
Deeper nucleation of bubbles in magma column	
Slower rise of bubbles	
Expansion of bubbles during rise	
Greater viscosity of magma column top	
Enhanced throw-out effect during eruption	
Rock froths	
Greater degree of subsidence in magma column after degassing	

彼は 月面のクレーターの大半が 内因的な成因(主として火山活動)でできたと考えており その証拠として たとえば クレーターに多角形のものが多いことや中央丘をもったものが多く その中央丘の特徴が 隕石孔の中にできるものなどとはちがって より火山的であることなどをあげている。この点は筆者の考えとかなり近いものである。彼は 月面での火山活動は 地球上よりもずっと大規模なものになると考えている。その理由としては 月では重力が地球上の6分の1であるから マグマの中の圧力は 地球と同じ深さのところでも6分の1となり 他の条件は同じでも 6倍近い深さのところまで すでに気泡が発生しうる。したがって 相当深いところからの火山噴出が可能だと考えるわけである。

さらに 月には大気が存在しないから マグマが表面に出ると急激に冷却され 粘性が大きくなり 爆発性の強い火山活動を生じることになる。このことは 月のクレーターの特徴のうちで いままで最も説明が困難であった点 すなわち 地球上の火口に比べて 直径も深さもずっと大きいことを説明するものであろう といっている。そして 上の表のように 月の火山活動を強めるファクターとして 月の地殻における潮汐効果(Tidal effect)と重力効果(Gravity effect)の2つの過程を示している。そこでその過程を Greenの議論にもとづいて少しくわしく紹介しておくことにしよう。

月の火山活動を強める要素として まず重力効果がある。月面の6分の1の重力のもとでは マグマ・コラムの中の気泡がより深いところで集まり よりゆっくり



水蒸気圧度	241°C	310°C	374.4°C	1200°C
圧力	34BARS	100BARS	222BARS	450BARS
地球	深さ 0.13km 体積 0.005km ³	深さ 0.38km 体積 0.11km ³	深さ 0.85km 体積 1.3km ³	深さ 1.67km 体積 9.7km ³
月	0.78km 1 km ³	2.3km 25km ³	5.0km 27.0km ³	10.1km 2150km ³

第13図 水蒸気圧によってもたらされるクレーターの深さと体積の関係を示す図 (J. Green 1962による)

上昇する。これらの気泡の膨張につれて、気泡にのせられて上昇するマグマ・コラムの上部は冷却されるであろう。気泡のゆっくりとした上昇によって促進させられたより高い粘性は、噴出のあいだじゅう放出を促進させられているマグマ・コラムの上部を粉碎してゆくだろう。大気のないことと重力の低いことは、放出をまた強めるだろう。これらの効果がいっしょになって、長い気泡にのせられたマグマ・コラムのガス放出のうち、マグマ・コラムの大きな沈降がおこるのである。

気泡の成長の度合に対する上昇の度合についての研究は、月の火山活動の過程を理解するのにきわめて重要である。Verhoogen が指摘しているように、もし気泡の膨張が上昇より急速であったら、両者あいまって溶岩(マグマ)のはげしい破かいをひきおこすであろう。

もし気泡の圧力が高かったら、爆発的なプリニー式噴火がつづいておこるであろうし、もし低かったら、プレー式の熱雲流を噴出するであろう。

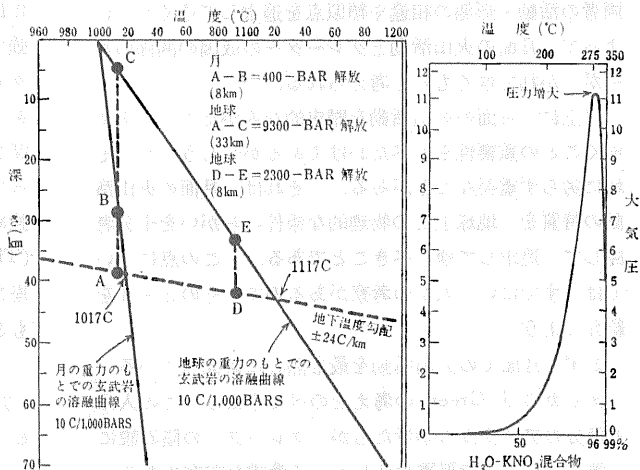
マール型の噴火も、クレーターを形成することができる。同じ水蒸気圧でも、月面上では地球上よりも大きなクレーターを作りうる。そのメカニズムはきわめて重要である。水の臨界温度 374.4°C において作り出される圧力は $2.1 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$ であり、地球上ではこの圧力によって、厚さ約 972m の岩石コラムを放出させるであろう。しかし月面では、より低い重力のため、この圧力では、厚さ 5800m 以上の岩石コラムを放出させる

であろう。

H. Williams (1954) によれば、いくつかの火山爆発は 455 パール (450 気圧) 以上の圧力をもっている。この圧力は 1200°C における飽和水蒸気圧にひとしい。水上 武 (1942) は、浅間火山の噴火において 212m/秒 の速度をもつ放出物の観察から 569 パールの圧力を計算している。しかし、たいののマグマの爆発は約 100~300 パール程度の圧力である。実さいのクレーターの容積比は、第 13 図に示されているような 200:1 というマキシマムな理論値よりは小さいが、それでもなお蒸気の単独爆発力は、クレーターの形成において、地球上よりも月面上で著しく大きな効果を示すものである。

第14図は、月面での火山活動を強めるメカニズムをよりくわしく示したものである。データの多くは H. S. Yoder (1952) から外挿されている。また R. J. Uffen (1959) による Yoder の仮説の拡張がここに適用されている。これらの考えによると、月面における地球の潮汐効果は、月の地殻の基底において、周期的な圧力の解放を生み出すであろう。

地球上では、玄武岩の溶融曲線の勾配はきわめてゆるやかであるが、月では重力が低いために、この勾配はぐっと急になる。そして、地下温度勾配との関係から、わりに少しの圧力の解放で溶融がおこりうるのである。たとえば第14図において、月では A から B に進むのに (約 8 km の上昇) 400 パールの圧力の解放を要するのみであるのに対し、地球では同じ距離を上昇するのに (D から E へ) 2300 パールもの圧力の解放を必要とするであろう。つまり、月では溶融曲線と地下温度勾配の関係のために、ごくわずかの圧力の解放で、火成作用がおこりうるのである。圧力の解放が、玄武岩の溶融曲線を 10°C 上昇させるのに十分であったと仮定すると、それは



第14図 月の火山活動を強める要素を示した図 (J. Green 1962による)

所定の岩石の体積の約3%を溶かすことができる(けい酸塩岩石を溶かすのに必要な熱量は約10cal/gで比熱は0.3とする)。溶融した玄武岩の体積増加は11.2%である。プトレメウス・クレーターの下によこたわる月の地殻の基底に1kmの厚さのplateを仮定すると11%の体積増加(±30km³)からみちびき出される玄武岩マグマはクレーター底にあふれ出すのに十分であったらうとGreenは計算している。そしてこの体積増加のメカニズムが海の起原を理解するのにひじょうに重要となるだろう。以上がGreenの議論のあらましである。

そしてGreenは結論としてつぎのようにまとめている。月の内部におこった脱流体作用が比較的冷却して剛性をおびてきた月の地殻の地域的な膨張と収縮をひきおこすきっかけとなったと考えられる。その結果生じた割れ目もようにそって内部から流体が脱出するようになった。月においては重力が低かったためマグマは地下深くで発泡しはじめ爆発性の強い火山活動をもたらした。地球上よりも大規模なクラカトア型カルデラ*を生じた。

*クラカトア型カルデラと限定することには問題があるがここではわしくはふれない。

脱ガス作用によって月の成長の歴史の初期に最も激しい火山作用が行なわれたと考えられる。その結果として分化作用によって生じた火口底の塩基性の物質中央火口丘群、カルデラ内の小火口群や隆起帯、放射状構造や縁辺火山群などの諸現象を生じた。おそらく玄武岩質の溶岩が噴出して海の部分が生じたが海の部分にもその後いくつかの火口が生じた。

さてアメリカのGreenに対してソビエトのB.B.コズロフ(Козлов) E. Д. スリヂー-コンドラチーフ(Сулиди-Кондратьев)もGreenとよく似たことをいっている。すなわち月のクレーターの巨大な寸法は月の重力が弱いことによって火山活動の強さが高まること、強力な地質構造作用が存在すること(これはとくに地球の引力による潮汐作用による)月の温度勾配が急激であることによって説明することが可能である。このことは逆に月では地下の熱い部分が表面に近かったことを証明しているとのべている。

とにかくいずれにしても月面での重力が地球上の6分の1であるということにははじまっていくつもあげることのできる地球上とは物理的にまったくちがった条件や環境が月面での火山活動の特性を生み出していることは否定できないものである。

さて以上で月面の火山活動に関する問題点をのべてきたわけであるが、そもそも月はかつてはげしい火山活動をもたらすほどほんとうに内部が熱くなったのであろうか。この問題をはっきりさせないと火山活動はおろかクレーターの内因論を論ずること自体も具体性のない空しいものになってしまう。H. C. Ureyはかつて(1962)「月は低温で形成され、それいらいその表面についてみても部分的に溶けたことはなさそうであるし、いわんや月全体が溶けたとは思えない」とさえいい切った*。

*アポロ11号が持帰った岩石の中に火成岩が多数みられたことから最近では彼も考えを改めているようである。

したがってここに月の熱史を解明することがひじょうに重要な仕事となってくる。そこで今回はこの問題に話をすすめていくことにしたいと思う。

(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)

- N. A. Kozyrev (1959): Observation of a Volcanic Process on the Moon, *Sky & Telescope* vol. 18, no. 2 (Feb. 1959) p. 184
- N. A. Kozyrev (1962): Spectroscopic Proofs for Existence of Volcanic Process on the Moon, *Moon—Symposium No. 14 of the IAU*, Academic Press, p. 263-271
- 佐伯恒夫 (1964): 月面アリストアルコス山の異常現象 *天界* vol. 45, no. 465 (1964.2) p. 42-47
- 赤羽徳英 (1966): 月の火山現象—Gassendi, *天界* vol. 47 no. 495 (1966.8) p. 199-203
- J. Green 荒牧訳 (1961): 月の火山と鉱物—月の脱流体作用とその意義— *科学誌* vol. 13, no. 4 (1961.3) p. 77-83
- J. Green (1962): The Geosciences applied to Lunar Exploration, *Moon—Symposium No. 14 of the IAU*, Academic Press, p. 169-271
- G. P. Kuiper (1965): Lunar Results from Rangers 7 to 9, *Sky & Telescope*, vol. 30, no. 5 (May 1965) p. 293-308
- E. A. Whitaker (1966): The Surface of the Moon, The Nature of the Lunar Surface, Johns Hopkins Press, p. 79-98
- B. B. Козлов, E. Д. Сулиди-Кондратьев (1964): *Лунная Геология, Природа*, 1964. 6. p.44-49
- 荒牧重雄 (1969): カルデラ学説に関するいくつかの問題 *火山* 第2集, vol. 14, no. 2, p. 55-76