

月の地質学

①

小森長生

1. はじめに——宇宙地質学の基礎としての月の地質学

月は地球の唯一の天然の衛星であり 地球にいちばん近いとなりの天体である。

さえた夜空にかがやく月の光は 太陽の光とはまたちがって 独特の風情がある。人類が古くから月についていろいろの空想をめぐらせてきたのも もっともなことだと思われる。その月が 現代の科学の進歩によって もうほんのま近い将来に 人間の手のとどく存在になってしまった。宇宙開発の進展は この10年のあいだに実に目ざましいものがあり ついに昨年暮れ アメリカの人間宇宙船アポロ8号は 月のまわりをまわって帰還するのに成功した。この成功で自信をつけたアメリカは 早ければ7月下旬頃 月面着陸を敢行するであろう。

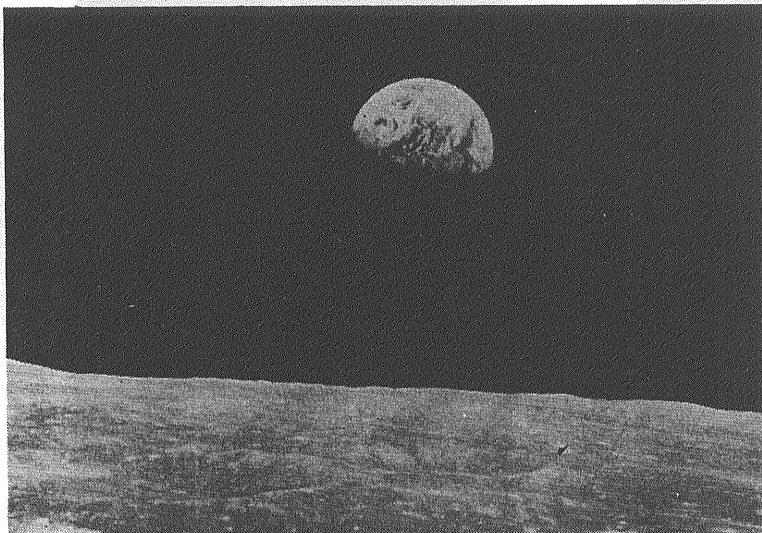
いっぽうソビエトも 今年1月早々 ソユーズ4号と5号の宇宙結合・宇宙乗りかえに成功し 本格的な宇宙ステーションの建設へ第一歩をふみ出した。したがって月へ人間を送るのも もうま近いことであろう。

アメリカは アポロ宇宙船を月へ着陸させると いろいろの科学観測を行なうことにしているが その中の1つの仕事として 月面岩石の採集がある。計画によると 20kgの岩石を 真空コンテナにつめて持帰ることになっており その研究のために 世界中の科学者が協

力する体制も すでにできあがっている。人間が 地球の外の天体である月の岩石を じかに調べるのでできる日が もうすぐせままっているわけである。まことにおどろくべき時代に生まれあわせたとはいへないであろう。

ところで 最近のように ロケットによる月の探査が さかんにすすめられるようになるまでは 月はおもに天文学者の対象であった。それは 遠くはなれた天体を調べるには 望遠鏡にたよるより他に方法はなかったのであるから やむをえないことであった。ところが 最近10年間の宇宙開発の進歩は 月や惑星の研究方法を 一変させてしまった。ロケットによって月に直接探査体を送りこみ 写真をとったり さまざまの科学観測をおこなうことによって 私たちが地球上から調べていたのではとうていわからないことが つぎつぎと明らかになってきたのである。まさに 人間の認識のレベルを 格段に高めることになったのである。こうした情勢の変化によって いままで月には無関心だった地質学者・地球物理学者・地球化学者たちが 月に強い関心をよせるようになり いまでは 月の実地研究は世界的な課題になってきている。

もとより月は 地質学者にとっては興味ある重要な存在のはずである。なぜかといえは 月は地球の衛星ではあるけれども 衛星にしてはかなり大きく 子供というよりも弟か妹のような存在である。したがって 地球と月の似た性質を いろいろと研究することによって地球についての知識がさらに深まってくる可能性がある。さらに 月には水も大気も存在しないので 地球上と同じような風化作用や浸食作用はおこらない。したがって月面で 何らかの活動で生成した地形や岩石は その後も ずっとほとんど元の姿のまま残っているはずである。月面のアバタ(クレーター)とよばれる穴ぼこや 海とよ



アポロ8号がとらえた月面と月の地平線上に浮かぶ地球のすがた

7.6m の大月面図は 望遠鏡による直視観測によって画かれたものとしては 最大にして最も詳細なものである。

このように 月面の研究は 20世紀の中頃までは 望遠鏡観測によって月面地形を分類・記載し 月面図を作るといふ仕事に主力がそそがれてきた。いわば月面の地理(地誌)的研究で 月理学(Selenography)という名でよばれてきた。しかし これまでの月理学は ウィルキンスの大月面図の発表で すでに完成の域に達したといわれ その後は 月面観測は専門の天文学者の手をはなれて だいにアマチュア天文家の趣味的な仕事になっていく傾向を生じ 学問的には月の研究は停滞することとなったのである。

ところが さきのまえがきでものべたように 10年ほど前から事情は急速に変わり 月の研究はふたたび新しい段階をむかえることになったのである。すなわち いままでのような単なる月面地形の分類・記載の仕事のみにとどまらず 天体としての月のいろいろな性質や月の内部構造 月の生成の問題などが中心的課題としてとりあげられるようになり 質的に深い問題が研究されるようになってきたのである。これにあわせて 月面の地図づくりも 再びまったく新しい方法でさかんになってきた。これは 近い将来における人間の月着陸にそなえて 実さいに月面着陸や月面調査などに十分役に立つ しっかりした地図をつくることの必要性が 本格的に考えられるようになってきたからである。

アメリカ空軍地図情報センター(ACIC)では 写真をもとにした100万分の1の月面地図を たくさん

区画に分けて作成・発行しているが これは従来の手書きの線画の地図とまったく異なり 写真をもとにした陰影つきの地形に 等高線まで記入した新しい形式のものである。この月面地図はまた 従来のものと異なって地球上の地図と同じように 北が上 南が下になっている。従来の月面図は 望遠鏡で見たときそのままの姿で画かれていたので 南北が逆になっていた。これは望遠鏡による観測のときは便利であるが 実さいの月面調査などには不便である。やはり自然のままに 北が上になっている地図のほうが使いやすいのである(第3図)。

このようにして 月面の新しい地図づくりは 主としてアメリカの手で目下急ピッチですすめられ おもて側のほとんどがカバーされるようになってきている。

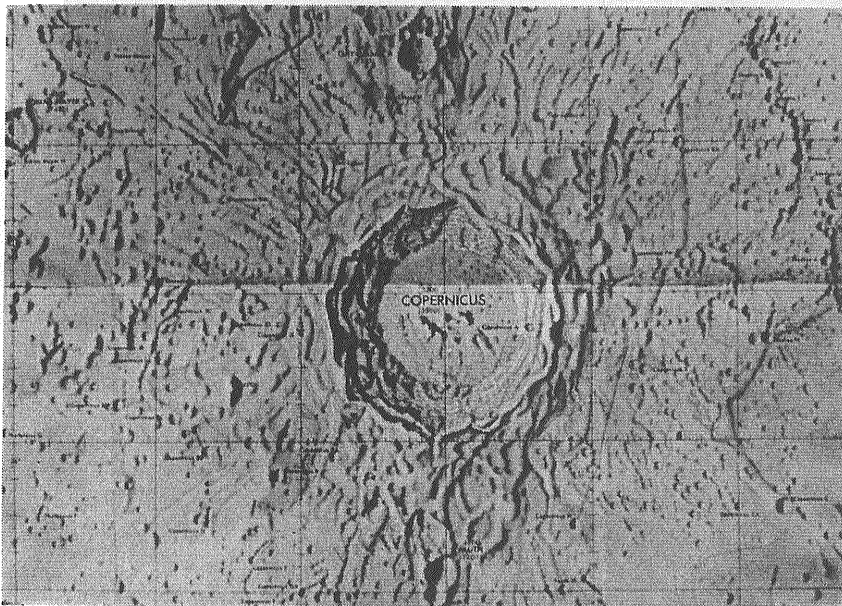
ところで 月面の地図づくりはおもて側だけに限ったものではない。1959年10月 ソビエトのルナ3号が史上初の月のうら側撮影に成功したとき その写真にもとづいて ソビエトの科学者によって最初の月のうら側地図がつくられた。この地図はかなり大まかで 不十分なものであったが その後 ソビエトのゾンド3号 アメリカのルナ・オービター1~5号によるうら側撮影がつづき うら側のほとんどが詳細に明らかにされた。これらの写真にもとづいて 最近アメリカとソビエトでは うら側のひじょうにくわしい地図が 経緯度目りまで入れてつくられている(第4図)。いずれ 月の全面のくわしい地図が完成する日も近いことであろう。

なお 月面の研究史の中で忘れてはならないものに

月面クレーターの成因論の論争史がある。これは これだけでゆうに一冊の書物に相当するだけの内容をもつものであるが ここでは余裕もないので とりあげるのはさしひかえておく。のちほど クレーターの成因についてくわしく論ずる予定なので そのときとりあげることにしたいと思う。

3. 月面の地質調査と地質図づくり

月面の新しい地図づくりがさかんになるにつれ



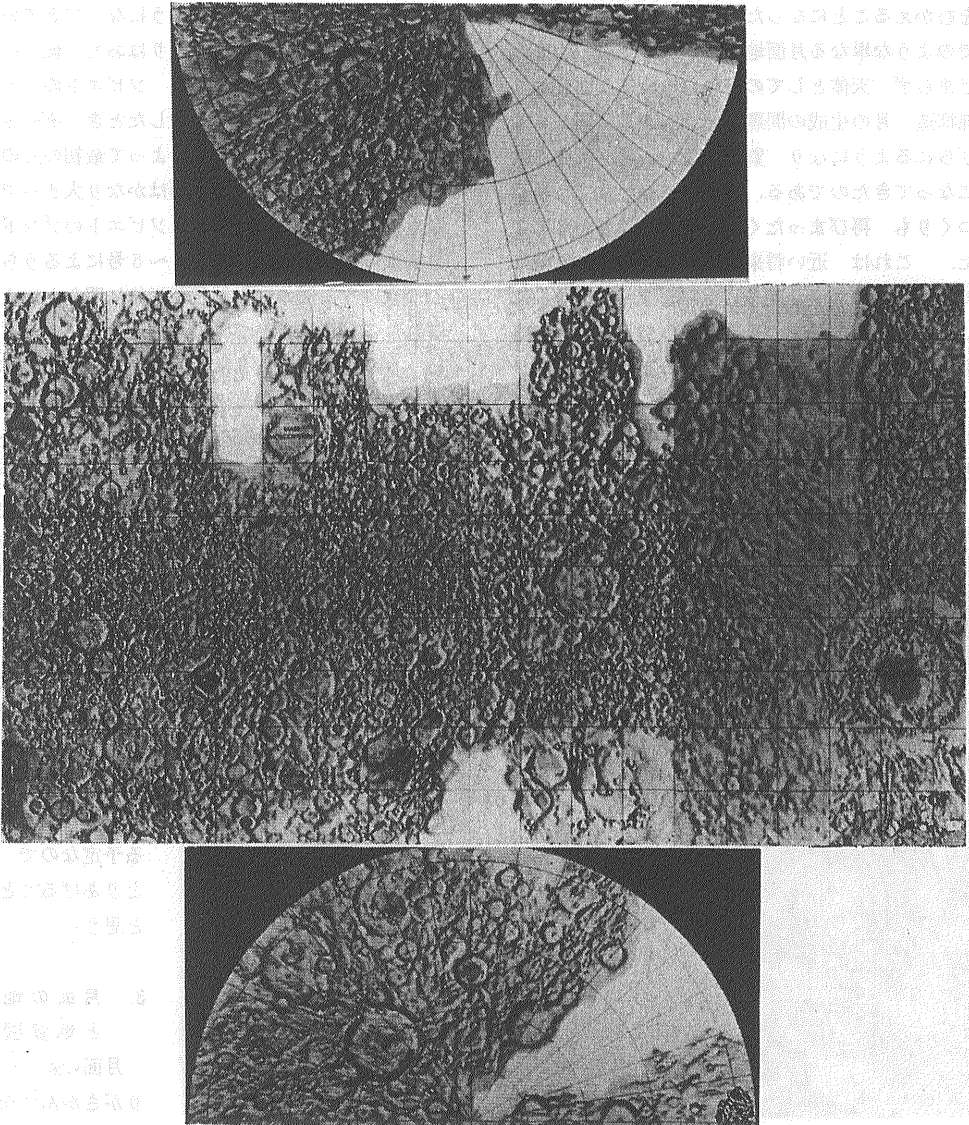
第3図 新しい月面の地図の一例
(アメリカ空軍地図情報センター製作の100万分の1地図のうち コペルニクス山付近のもの)

て 月面の地質調査と地質図づくりもおこなわれるようになってきた。とくに アメリカでは 1961年いらい アメリカ合衆国地質調査所に 宇宙地質部と称する部門が設けられ そこが中心になって 月面の地質図づくりにとりくんでいる。この地質図の基図には さきにのべた 100万分の1の月面地図が用いられている。

ここで「月面の地質調査、など」というと 「それはなんのことだ。人間はまだ月面に降りてもいないのに地質調査などやれるはずがないではないか」と 不審に思われる方が多いかもしれない。たしかに われわれがふつうに行なう地質調査は まずハンマーを手に山を歩き岩石の分布や性質をしらべて 地図や野帳に記録してゆくことから始まる。最近はもっと近代的な機械

による調査方法もたくさんあるが とにかく実物にじかに触れないことには話にならない。だから こういう実地の地質調査は 人間が月面に降り立つまで不可能であるのは いうまでもないことである。しかし 最近さかになってきた 航空機により上空から地表を観察して地質構造や岩質のちがいを読みとり 資源を発見する方法とか さらにそういうことを 航空写真を判読して 図にあらわす方法があることを思いだしていただきたい。

月面の地質調査にも まったく同じような方法があてはまるのである。月面を望遠鏡でたねんに観察したり 月面写真をくわしく調べていくと いろいろな地質



第4図 アメリカ航空宇宙局(NASA)製作の月のうら側地図(ルナ・オービター1~4号の写真とソ連のソンド3号)の写真をもとに作られたもの

構造や 地形の重なりぐあい 岩石の色のちがいがいなどがわかってくる。月面には現在 水や大気は全然ないといつてよいし いわんや植物などで表面がおおわれているといったことも全くないので むしろ地球などよりはるかにくわしく 地質の読みとりが可能であるともいえるであろう。このようなわけで 月面の岩石の名前そのものは直接わからなくても かなりの程度の地質調査は可能になってくるのである。

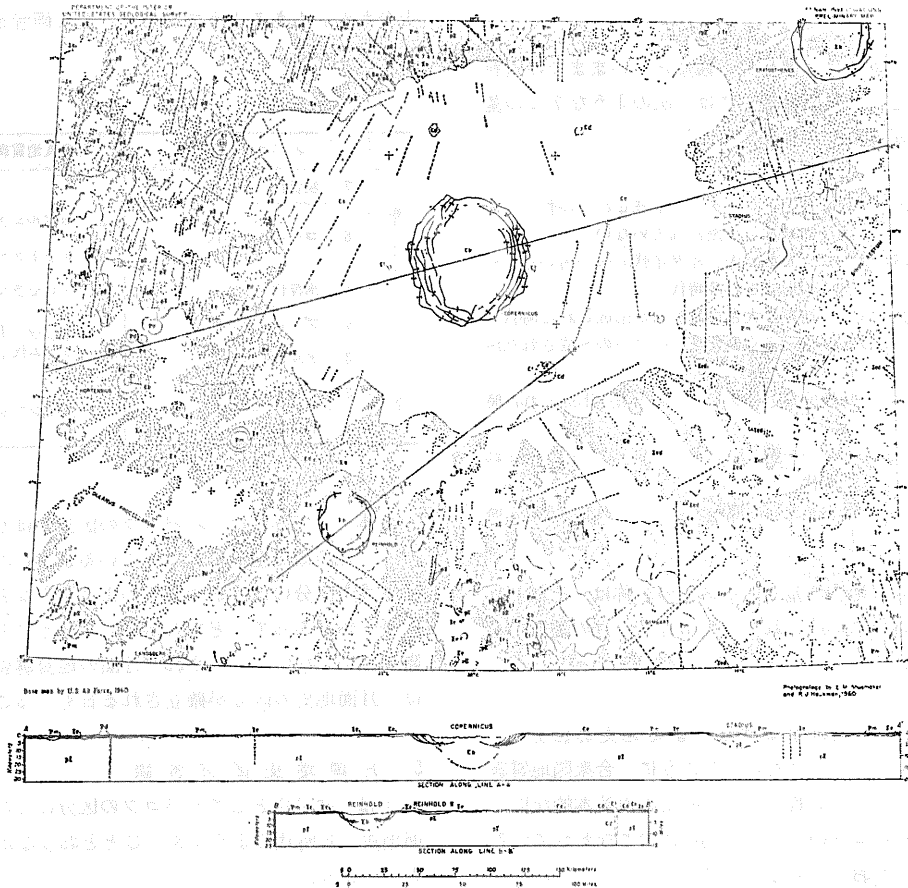
アメリカ合衆国地質調査所では 世界中の主要な天文台から集めた最良の月面写真をくわしく検討するいっぽう 各図幅の担当者を一定期間おもな天文台に派遣して月面のくわしい眼視観測をおこない 地質図つくりのための最良のデータを集めるようにしている。こうして現在 さきにのべた100万分の1の写真地図をもとにした地質図幅が着々と作成され すでに13葉が完成して印刷され 合衆国地質調査所から出版されている(第5図)。これらの地質図幅は 多色刷りのきれいなもので またかなり精密につくられたものである。地上からの観

察によって よくこれだけのものがつくられたと感心する。しかし 精密とはいえ それはあくまで相対的なものであって 相当大胆な解釈も多くなされている。とくに クレーターの色わけや 断面図などは すべて隕石成因説にもとづいて画かれており 異論をとなえる向きも多いかもしれない。

ところで これらの地質図の色わけは 月面物質の重なりぐあいや色の微妙なちがいをもとに 月面地形や物質の形成順序を組立てた上で それにもとづいて画かれたものである。では 月面地形の形成順序 いわば月面の地史は どのように組立てられているのであろうか。次にその点をくわしく述べてみよう。

4. 月面の地史とその区分

月面の地史の組立てをはじめて系統的にがっちりと研究したのは ソビエトの A.V. ハバコフ (Khabakov) で その最初の論文はすでに1949年に発表されている。アメリカが月面の地質図つくりを計画的に実施したのは1961年のことであるから それより10年以上前に ま



第5図 月の地質図の一例
(アメリカ合衆国地質調査所作成のコペルニクス図幅の一部)

まったく独立にこのような研究がなされていたのは、注目に値する（あとでふれる機会もあると思うが、ソビエトの月の研究には、ひじょうにユニークで注目すべきものが多いように思われる）。

もっとも 1944年から1949年にかけて「Geology Applied to Selenology」という4巻もの大著をものしたアメリカの地質学者 J.E. スパー (Spurr) も、そのほか大なる著書の中で、月面地形（とくにクレーター）の形成順を、いろいろと区分している。したがって、ハバコフよりもスパーのほうが先ではないか、といった異論もできるかもしれない。しかし、今日の知識からみれば、スパーの区分にはいろいろと問題が多く、とてもそのままでは容認できないものもある。また、スパー以前にも、月面地形の形成過程を研究した人は何人かいる。しかし、そのほとんどが、月の海の形成以前の地形と、以後の地形とに大分けているので、本格的な区分はなされていないのである。したがって、私はやはり月面の本格的な地史の組立ては、ハバコフにはじまるとみてよいと考える。

ハバコフによる地史の区分

A. V. ハバコフは、彼自身の観察と、いままでの資料の検討をもとに、月面の地史には、次のような7つの基本的な段階があることを提案した。

1. 最古代——最も古いクレーターの形成された時代で、わずかの断片しか残されていない
2. ヒッパルクス代（または先アルタイ代）——古いクレーターの形成された時代
3. アルタイ代——初期の大きな月の海が形成された時代
4. プトレメウス代——多くの大クレーターの形成された時代
5. 海洋代——比較的最近のクレーターと海の形成された時代
6. コペルニクス代——新しいレイ・クレーターの形成された時代
7. 現世代——最も新鮮な形態のクレーターの形成された時代

これらの月の地史の基本的な区分の名称は、それぞれの相当する時代に形成された、最も有名な月の地形の名前から選ばれている。

アメリカ合衆国地質調査所による地史の区分

アメリカでは、さきにものべたように、合衆国地質調査所の手によって、地質図つくりのための基本的な地史の区分が、ハバコフの区分とは別個におこなわれている。それはつぎのとおりである。

1. 先インブリウム代——最も古い地形がつけられた時代
2. インブリウム代——2分される
 - アペニン紀——アペニン山脈など古い山脈のできた時代
 - アルキメデス紀——海の形成の前のでき、海の物質でみたまされているアルキメデス・クレーターなどのできた時代
3. プロセララム代——海の形成された時代
4. エラトステネス代——海の形成のすぐあとの時代。エラトステネス・クレーターによって代表される。レイは失なわれている
5. コペルニクス代——最も新しいレイ・クレーターの形成された時代

地質図では、各々の時代の物質（岩石）を、さらに細かい地質系統に分けているが、ここではそれは省略しておく。

2つの地史の区分の比較

ハバコフの地史の区分も、アメリカの地史の区分も、お互いによく似ているのは、単なる偶然の一致といったものではなく、両者の区分の考え方や方法に、かなりの共通性があるためであろう。しかし、こまかい点では、大分ちがいもあるようである。次に両者を対比した表を示してみる。

	ハバコフの区分	USA地質調査所の区分
新 ↑ ↓ 古	7. 現世代	
	6. コペルニクス代	5. コペルニクス代
	5. 海洋代	4. エラトステネス代
	4. プトレメウス代	3. プロセララム代
	3. アルタイ代	2. インブ リウム代 { アルキメデス紀 アペニン紀
	2. ヒッパルクス代	
	1. 最古代	1. 先インブリウム代

全体としてみれば、ハバコフの区分のほうが、より細かく、月の地史全般にわたっているようにみえるが、アメリカの区分のほうが、つごうのよさそうなところもあり、一長一短があって、どちらがよいということは、今の段階ではいえない。いずれ、月面の地質調査が発展すれば、月面地史の区分が確立される日もくることであろう。

5. 月面地史区分各論

では、次に主としてハバコフの区分にしたがって、月面地史の各時代のようなすを、ひととおりながめてみることにしよう。

現 世 代

ハバコフの計算によると 月のおもて側（以下単に月面と記す）には 直径5~40kmのひじょうに新しいクレーターが517以上存在する。これらはいちばん新しい現世代にぞくするもので 最も保存状態の新鮮なものである。このクレーターの平均直径は5.6kmで比較的小さい。また 大部分は爆裂火口状の底のおわん形のもので 何の規則性もなくランダムに分布している。このようなクレーターは 隕石孔と考えるのが最も妥当である。しかし 小数のクレーターは列をなしていたり割れ目にそって並んでいたりする。月面中央にみられる有名なヒギヌスの割れ目などは その代表的なもので割れ目すなわち小クレーターの連鎖である。このようなものは内因的な成因を考えたほうがよいであろう。

クレーターの成因については のちほどくわしくとりあげたいと思うが 地史をのべるうえで関係してくることは最小限ふれることもあるので おことわりしておきたい

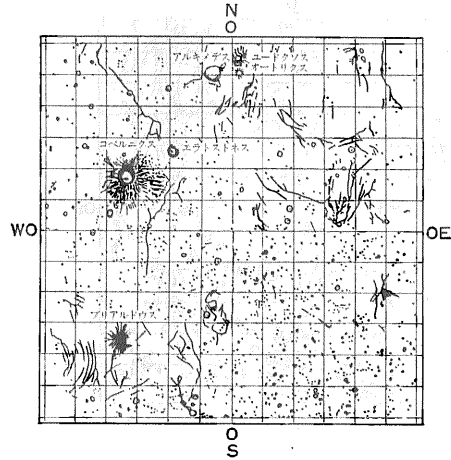
コペルニクス代

月面には コペルニクス・クレーターと同じころにつくられた すなわちコペルニクス代につくられたクレーターが4815以上存在する。これらは あらしの大洋や雨の海など 月の海の広大な陥没の終りごろから後につくられたもので 形や直径のいろいろ異なったものを含んでいる。レイ（輝条）構造をもつ大きなクレーターのほとんど（すなわち チコ コペルニクス ブリアルディス プロクルス ケプラー アリスタルクス など）は コペルニクス代の形成である。この時代のクレーターは 最も大きいもので直径55kmくらい おもなもの平均直径は約15.9kmである。また この時代のクレーターは しばしば新鮮な断層縁と密接な関係をもっており これにそって並んでいるものもある。

アメリカの区分では この時代をコペルニクス代（ハバコフのよりも狭義）とエラトステネス代に2分している。エラトステネス代の名のもとになったエラトステネス・クレーターは 形態や性質はコペルニクス・クレーターとよく似ており 本質的にはコペルニクス型のもので変わらないが レイを伴っていない。これは 生成時代がコペルニクスよりも古いために かつてはレイを伴っていたが 宇宙空間からやってくる諸種の放射線の照射によって 明るいレイの物質が暗黒化したためであるとの解釈がとられている。

海 洋 代

この時代には 月面の海のほとんどが形成された。海は ひじょうに大規模な環状の造構的陥没運動によ



第6図
現世代とコペルニクス代のクレーターと割れ目の分布図
(A.V. パコフによる)

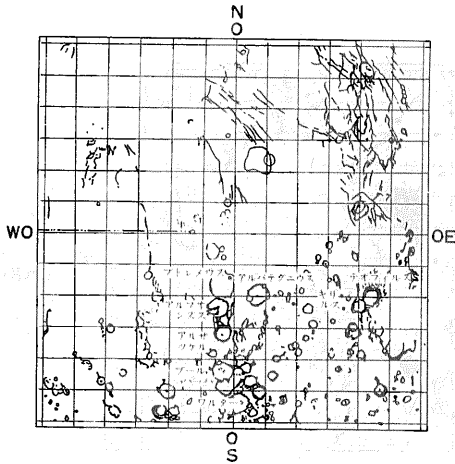
てその原形ができ さらに大量の溶岩流があふれ出して平原が形成されたものである。もっとも 海の形成にかんしては 一部の学者（とくにアメリカの E.シューメイカー (Shoemaker) 一派ら）のように 海は大隕石（ないしは小惑星）の衝突によってできた巨大な凹孔であることを 強く主張する向きもある。しかしいづれにせよ 何らかの原因で この時代にいくつかの環状盆地が生成し 溶岩でうずめられたことは 疑う余地のないところである。アメリカの G.カイパー (Kuiper) は 雨の海に厚さ20~200mの7種の溶岩流が認められることを 観測のうえから確かめているし 同じくアメリカの月探測器ルナ・オービターのとった海の写真にも溶岩流と認められるものが数多く写されている。

プトレメウス代

コペルニクス代や海洋代の形成物によっておおわれ保存の程度が中くらいの多くのクレーターや割れ目はこの時代にできたものと考えられる。ハバコフによると 次のようなクレーターがそうである。

- エンディミオン ポシドニウス クレオメデス マクロビウス リアウマー タランティウス カペラ イシドルス グッテンベルグ コロンボ テオフィルス キリルス カタリナ フラカストリウス ピッコロミニ ネアンダー アルバテグニウス プトレメウス アルフォンズス アルザツケル プールバッハ ワルター アリアセンシス ピタトゥス ハイゼル キース カンパヌス ヴィテロ ドッペルマイヤー マルセニウス ガッセンディ プラトー カッシニ ブルグ 他多数。

この時代のひじょうに多くのクレーターは 海の溶岩流の下にかくされている。フラカストリウス フラン



第7図 プトレメウス代のクレーターと割れ目の分布図
(A. V. ハバコフによる)

マリオン ゲーリケのように 部分的にかくされたものもあり ゴーストクレーター (いわゆるまぼろし火口) のように ほとんど埋もれてしまって 痕跡だけになったものもある。かつては海の地域にも 現在の古い陸の地域に残されているものによく似たクレーターが 多数あったにちがいないのである。

このことを考えに入れて推定してみると 月面には この時代のクレーターは総計9000はあることになる と ハバコフは考えている。この時代の最大のクレーターの直径は 150km (たとえばプトレメウス ワルター ロンゴモンタスなど) に達する。現在残されているクレーターの中では比較的直径の小さいものが多く 平均直径は31.8kmにすぎない。

アルタイ代

プトレメウス代に先立つアルタイ代には 海をつくる最初の陥没がおこった。つまり 海は2つの時代にかけて交互におこった造構的陥没運動によって形成されたことになる。ハバコフは この時代の古い陥没を original depression 海洋代のあとからおこった陥没を existing depression とよんで区別している。アメリカの区分では このアルタイ代の海の陥没は認めておらず 海の形成時代は1回だけ(プロセラルム代=海洋代)としている。ここが ハバコフの考えとアメリカの考えとの大きくちがうところである。

この時代の運動の痕跡はあまり残ってはいないが アルタイ断崖の付近ではかなりよく観察できる。アルタイ断崖は神酒の海をとりまくような形で存在しており 今の神酒の海は直径 380km くらいで 海洋代の陥没で生れたわけであるが 古い神酒の海の陥没はアルタイ断崖のふもとまでいたり 直径1100~1200kmに達したである

うとみられる。

ヒツバルクス代

月面には アルタイ代に先立ってできた古い地形の痕跡が いくつかの場所に残されている。いくつかの地域では プトレメウス代の大きなクレーターが 多くのより古いクレーターのうえにオーバーラップし 古いほうを破壊している。このばあい その古いほうのクレーターはつねにより大きく お互いの距離が近く ひどく変形され 古い起伏と溝によってこわされている。このよい例がヒツバルクス・クレーターで このようなクレーターのできた時代をヒツバルクス代とよぶゆえんである。ヒツバルクス・クレーターの床は 多くの溝によって横切られており これは付近の若いクレーターの床とはずいぶん異なっている。

この時代の最大のクレーターは 直径 238km に達する。しかし この時代のクレーターの大部分の直径はわりに小さく 平均直径28.9kmである。

この時代の地形の断片の残されているところは どれも多くのクレーターにおおわれた古い陸地である。そしてそれらの断片は かなり普遍的に分布しているようである。このことから 月面にはヒツバルクス代の古いクレーターは11,400以上はあったものと考えることができる。

最 古 代

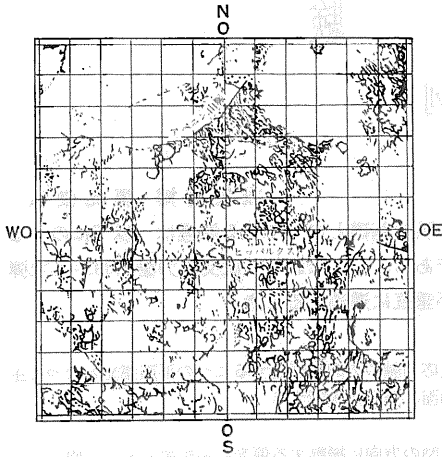
月面の地形の古いもので 一応明瞭に判別しうるものはヒツバルクス代のもまでである。しかし 古い山地の断片をくわしく見てゆくと ヒツバルクス代よりも前にできたと思われるものが見つかる。ハバコフはこれを 月の最古代の痕跡と考えている。この最古代の地形を具体的に復元することは 今のところひじょうにむづかしいであろう。

6. 月面の地史区分と地球の地史区分との対比

以上で 月面地史の区分をひと通りながめたわけであるが これらの区分はすべて 月面地形の重なりぐあいを調べて 地形の相対的な新旧をきめ それによって組立てたものであった。

そこで これらの区分された各時代は いろいろ (絶対年数で何万年または何億年くらい前) の時代で どのくらいの長さがあったのか ということが問題になる。そして当然 地球の地質年代の区分のどこに それぞれが相当するかということが問題になる。

これについては 確かなことはまだ何もわかっていないので ここで詳しくのべることはできない。しかし

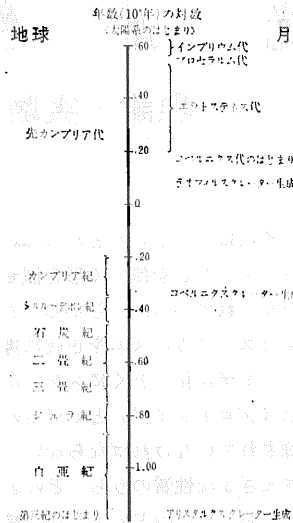


第8図
ヒッパルク
時代の古い
地形の分布
図
(A. V. ハ
バコフによ
る)

ハバコフは いろいろな観測事実や推測にもとづき さらに地球上の地質現象(とくに火山活動)の長さなどから考えて たたとえばコペルニクス代は おそらく250~500万年はつづいたであろうし 海洋代は比較的短かく 最小100万年くらいであったらうとのべている。すなわち コペルニクス代のコペルニクス・クレーターやその他の類似のクレーターは 火山起源のものとしても 地球上のいかなる火山よりもずっと大きなスケールをもっている。したがって コペルニクスのような大きな火山は 地球上の火山の規模や寿命などから考えると 数100万年の期間にわたって発達したにちがいないというのである(火山の規模が大きいほど寿命が長いということはいちがいにはいえないと思うが)。

月の海をつくった海洋代と さらにそれより古い時代の長さをきめることは もっとむずかしい。じつさい地球上のものと完全に比較できる現象はないのである。しかしわれわれは たたとえば海洋代を シベリア インド コロラドなどの大陸の台地玄武岩を形成した 古い塩基性溶岩の溢流現象と比較することはできる。地球上と月面上での膨大な溶岩の溢流の時期 すなわち深部からはこび出された熱の放出現象の時代は ある点で似かよったところがあるかもしれない それは比較的短かい時間であったかもしれない とハバコフはいつている。

また彼は 各時代の古さについては いちばん新しい現世代の地形でさえ 地球上の中生代よりは前に(すなわち約2億年以上前に)できたものであらうといっている。さらに 月のほとんどすべての地形は 月の全歴史のほんのわずかの限られた時代に 集中的につくられたもので その長さは1~2億年間ぐらいたとのべてい



第9図 地球と月の年代区分対比図
(Z. コパールによる)

な原因でできたことを かなり強く前提において議論をすすめたものである。しかし これは反対に 月面地形(とくにクレーター)が隕石の衝突でできたという仮説にもとづいて 全く別の立場から月面地史の長さを議論することもできる。すでにこのような試みはいくつかなされており とくに欧米の月面学者には このような立場で議論している人が多い。

たとえば イギリスの月面学者 Z. コパール(Kopal)は 各時代のクレーターの数と隕石の衝突密度の関係などをしらべて 月の地史の時代の古さを推定し 月面と地球の比較年代表を作成した。ひとつの参考としてそれをかかげておく(第9図)。

月のクロノロジーについては 他にもいろいろな問題があり その研究は今後にまつべきものがたくさんあると思われる。今後この方面の研究がすすめば 月と地球の関係だけでなく 火星や金星も含めた太陽系の諸天体の地史の相互の対比が可能になり 太陽系起源論(進化論)に貢献することになるであろう。惑星間対比(Interplanetary Correlation)にもとづく比較惑星学(Comparative Planetology)が発展するのはこれからであり その第一歩が月の地史の解明にあるわけである。

次回には 月面物質の構造や組成について 最近の月面探査体の新しい成果をもとにのべることにしたい。

(つづく)

(筆者は東京都立武蔵高校教諭)