

月の地質学

③

小 森 長 生

前回は 主としてソビエトのルナ9号・13号と アメリカのサーベイヤー1号・3号の軟着陸によって 月面物質の状態について どのようなことがわかったかをのべた。

今回は その後のサーベイヤー5・6・7号による 月面物質の化学分析の成果を中心に 月面物質の化学組成に関する問題を まとめて述べることにしたいと思う。

10. サーベイヤー5・6・7号の軟着陸

前回にものべたように いままで月面物質(岩石)の化学組成については 月面のアルベード(反射能)の観測と それと地球上の岩石の値との比較などから かなり大まかに推定されてきたにすぎなかった。やはり 確実に化学組成をしらべ どのような物質(岩石)であるかを知るには 実さいに着陸して 直接調べる以外に方法はないのである。

この 直接観測を行なうため まず無人の探査体で自動的に化学分析を行なうことが 以前から考えられていたが これはついに サーベイヤー5・6・7号の軟着陸で 実現することになったのである。

まず 1967年9月11日 サーベイヤー5号が月面の静かの海の南東部(北緯1.49° 東経23.29°)に軟着陸し

た(以下着陸地点については 前回の着陸地点を記入した月面図を参照のこと)。ここは 先に1号や3号が軟着陸したあらしの大洋とよく似た場所であった。5号は 静かの海の中の 直径9m 深さ1.5mのえくぼ型クレーター(第1図)。

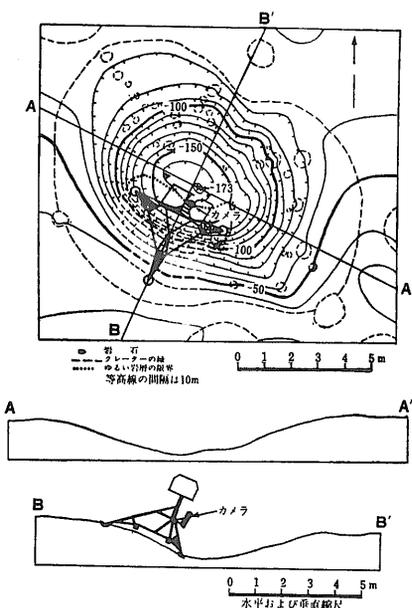
サーベイヤー5号は 1号や3号とよく似た構造と機能をもっているが 新たに2つの新しい観測装置がとりつけられた。1つは 月面物質の化学分析を行なうための アルファ線散乱法による分析装置であり もう1つは 月面物質中の鉄(磁鉄)分の存在量を調べるために 脚のパッドにつけられた棒磁石である。このうちとくに アルファ線散乱装置は 約82時間にわたってデータを集積し 月面物質の化学組成の値をはじめて送信することに成功したのである。

つづいて1967年11月10日には サーベイヤー6号が 月面のほぼ中央部の「中央の入江」とよばれる 海に似た暗い部分に軟着陸した(着陸地点は北緯0.49° 西経1.40°であった)。6号は5号とほとんど同じ構造をしており やはりアルファ線散乱装置によって月面物質の化学分析を行なった。

以上の5号と6号の2つの探査体(のみならず その前の1号・3号も)は いずれも月の赤道近くの 海とよばれる比較的平たんな地域に着陸したのであるが これは実は いずれもアポロ計画によるアポロ宇宙船の着陸予定地点にあたっていたところである。サーベイヤー計画のそもそもの目的は アポロ宇宙船の着陸地点の状況を より詳しく調べることにあったのである。

しかし サーベイヤー計画は 一応6号までで上記の目的をはたしたので のこった7号はアポロ計画とは全然関係なく 別の地域に着陸させられることになった。

すなわち 1968年1月9日 サーベイヤー7号は 月面の南方の陸の地域にある チコ・クレーターの縁から30km北方の地点に軟着陸した。この地域は典型的な陸とよばれる地域で 多くのクレーターが複雑に重なりあって 凹凸のはげしい地形をなしており 海とよばれる平たんな地域にくらべたら ひじょうに着陸のむずかしいところである。しかし アメリカ航空宇宙局の科学者たちがあえてこのような場所をえらんだわけは 陸の地域の岩石の表面の状態や化学組成が 海のぼあいとど



第1図 サーベイヤー5号の着陸地の地形とその断面図 (E. M. Shoemaker ら(1967)による)

うちがっているかを知るためであった。なぜならば陸の岩石は従来の観測では海の地域よりもアルペドーが高く比較的よく輝くので SiO_2 分のより多い酸性の岩石（たとえば花こう岩質または安山岩質のような）ではないかと考えられてきたからである。

7号は5・6号と同じようにアルファ線散乱装置によって陸の岩石の化学分析をおこなっただけでなく数千枚の写真も撮影して海の地域との表面状態の差異を明らかにすることにつとめた。

以上の3つの探査体の成功によって月面物質の化学組成についての知識がかなり明瞭になってきた。ではつぎにその分析の方法と結果について順にみてゆくことにしよう。

11. 月面物質化学分析の方法と装置

月面物質の化学組成を明らかにすることは月の地質学的研究において基本的に重要なことである。今回用いられたアルファ線散乱装置は月面のおもな元素の存在量を直接測定するためにとくに設計されたものでシカゴ大学のA・L・ターケビッチ (Turkevich) らによって開発された。

この装置はとくに宇宙船にとりつけるのに適したようにコンパクトにつくられしかも遠隔操作も簡単に行なえるようになってきている。それはキュリウム (Curium) 242 から放出されたアルファ粒子が月面の物質にあたってその物質の原子核から放出されるアルファ粒子のエネルギー・スペクトルと月面物質をつくるいくつかの軽元素とアルファ粒子の核反応によって得られるプロトンのエネルギー・スペクトルの測定がおこな

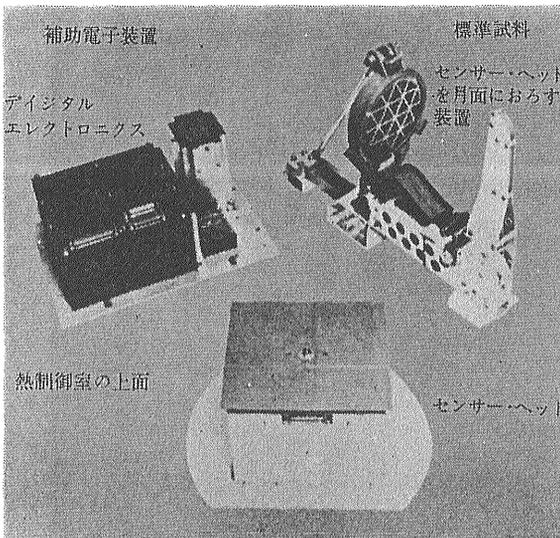
るようになってきている。これらのスペクトルは水素ヘリウムリチウム以外のサンプルの中のすべてのおもな元素の定量的情報を含んでいる。ただしこの方法は軽いほうの元素はたやすく区別することができるがより重いほうの元素はおおざっぱに区別することしかできないという欠点をもっている。

では次にこの装置の概要を紹介しよう。

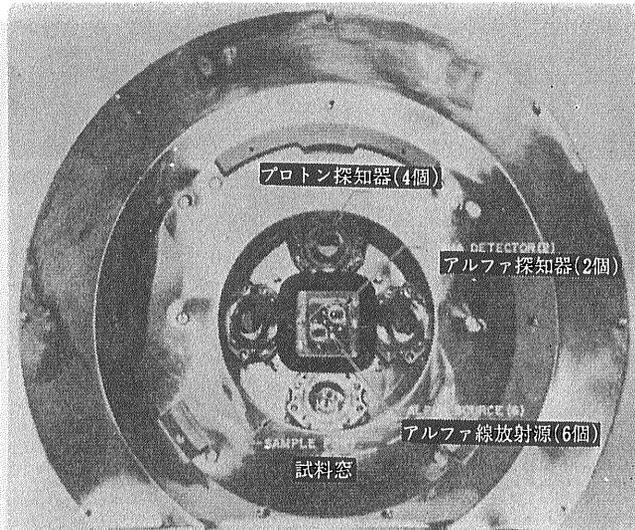
このアルファ線散乱装置は第2図に示したようにまず月面に直接おろすセンサー・ヘッド (sensor head) と宇宙船の熱制御室 (thermal compartment) にとりつけられてあるデジタル・エレクトロニクス・パッケージ (digital electronics package) がある。他に関連装置として補助電子装置 (electronic auxiliary) センサー・ヘッドを月面におろす機構 (deployment mechanism) 標準試料収納部 (standard sample assembly) などがある。この装置の重さは付属品などを合せて13kgである。

センサー・ヘッドは第2図にみられるように箱型で17.1cm×16.5cm×13.3cmの大きさがあり底部に直径30.5cmのつば型のプレートがつけられている。これは月面の軟かい場所におろした時あまり沈まないようにするためである。

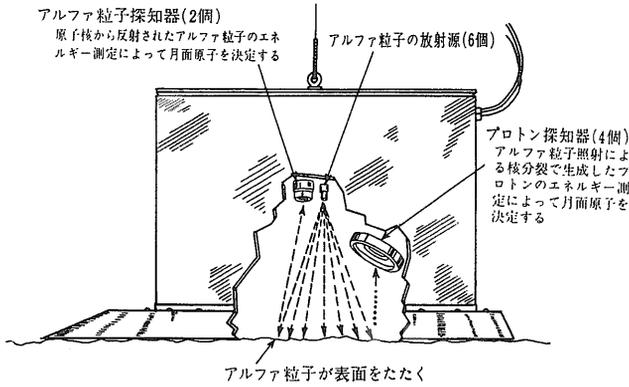
第3図はセンサー・ヘッドの底部の構造を示している。そこには直径10.8cmの穴 (sample port) がある。この穴の上方に7cm引こんだところに6つ1組のキュリウム242のアルファ粒子放出源 (Alpha source) がありアルファ粒子が穴から直進するよう照準されている。アルファ源のそばには2個のアルファ粒子探知器



第2図 アルファ線散乱装置の一覧



第3図 センサー・ヘッドの底部の構造

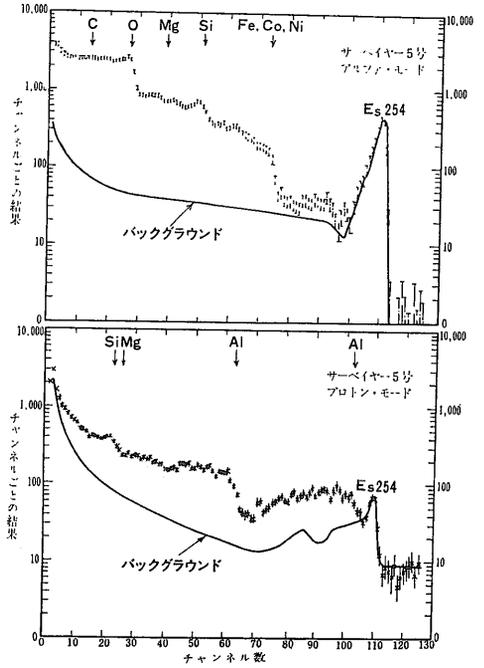


第4図 センサー・ヘッドの内部構造とその働きを示す模式図

(Alpha detector) (1つの断面積は 0.2cm^2) があり 月面からはねかえってくるアルファ粒子をとらえるように調節されてある。さらにそのまわりには 4個のプロトン探知器 (Proton detector) (1cm^2) がとりつけられている。これがセンサー・ヘッドの構造の概要である。

なお第4図は センサー・ヘッドの内部とアルファ粒子探知の様子を 模式的にえがいたものである。

センサー・ヘッドで探知されたアルファ粒子とプロトンのエネルギーは デジタル・エレクトロニクスによって信号に変えられ 地球に送信される。それによって アルファ粒子とプロトンのエネルギーのスペクトルが画かれる というぐあいである。



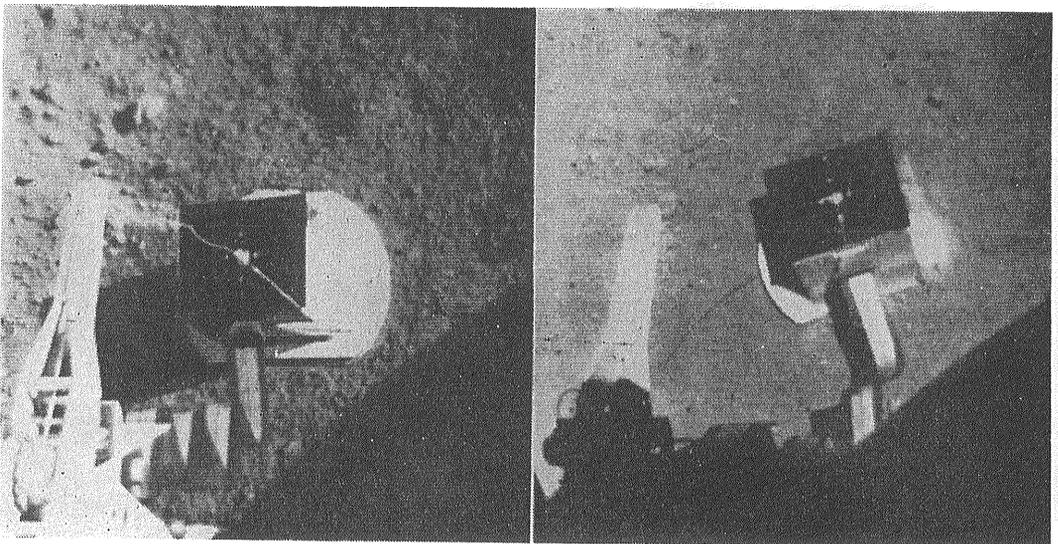
第6図 5号で得られたアルファ線のスペクトルとプロトンのスペクトル 実線は バックグラウンドのスペクトル

12. 月面物質化学分析の結果

さてそれでは 実さいにサーベイヤー5・6・7号でそれぞれ実施された分析の結果はどうだったであろうか。順をおってみてゆくことにしよう。

サーベイヤー5号による分析結果

サーベイヤー5号は静かの海に軟着陸すると 次の3



第5図 センサー・ヘッドを実さいに月面におろしたところ (5号)。左図はロケット噴射前 右図はロケット噴射後の表面の様子を示す

つの段階をおって化学分析の作業をすすめていった。

まず第1段階では アルファ線散乱装置は宇宙船にとりつけられたままの状態であらかじめ化学組成の知られた標準試料について分析をおこなった。その結果装置に異常はなく標準試料のスペクトルは宇宙船打上げ前に測定されたものとほぼよく一致していることが確かめられた。ついでセンサー・ヘッドは月面上約60cmの高さにつるされバックグラウンドの位置におかれた。この状態ではセンサー・ヘッドは宇宙線や太陽プロトン 考えうる表面の放射能などに一次的に感応するのに十分な高さであった。ここで約3時間にわたりバックグラウンド・スペクトルが測定された。

第3段階で装置ははじめて月面上におろされ月面の試料の最初のスペクトルが送信されてきたのである。送信ははじめ総計17時間分が得られたがその後宇宙船がエンジンをふかして移動したため以後は別の新しい位置でさらに測定をはじめ約65時間にわたる追加資料が得られた(第5図)。

第6図は月面の最初の位置で(すなわちエンジンをふかして移動する前に)900分にわたる測定の結果から得られたアルファ粒子とプロトンのスペクトルである。この図表の縦軸はチャンネル数(エネルギー)の関数としてプロットされた128チャンネル・アナライ

ザーのチャンネルについての測定カウント数である。

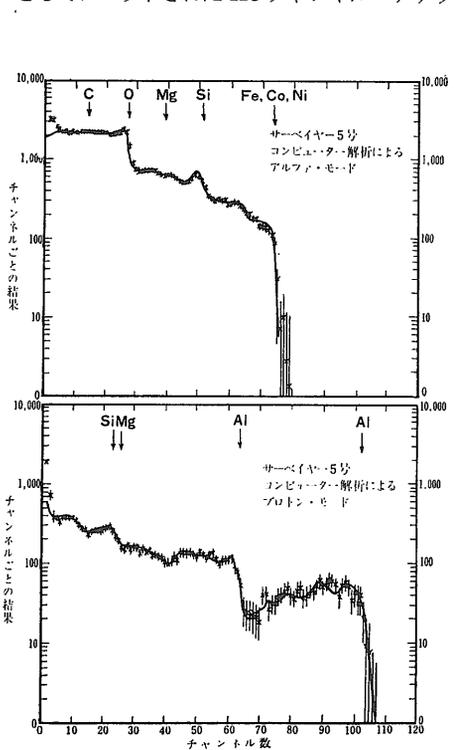
アルファ線スペクトルを定性的にみると矢印で示してあるように質量16(酸素)28(珪素)おそらく58(鉄 コバルト ニッケル)の核から散乱されるマキシマム・エネルギーに相当するエネルギーのところにはっきりした変異点があらわれている。さらにチャンネル73以上の低い反応は質量数65より重い元素が比較的少ないことを示している。同じくプロトンのスペクトルではチャンネル60上にアルミニウムからのプロトンの特性がよく表われている。

観測されたアルファ線とプロトンのスペクトルはさらにC O Na Mg Al Si ⁴⁰Ca*⁵⁶Fe*の8つの元素のスペクトルについてコンピューターで解析された。

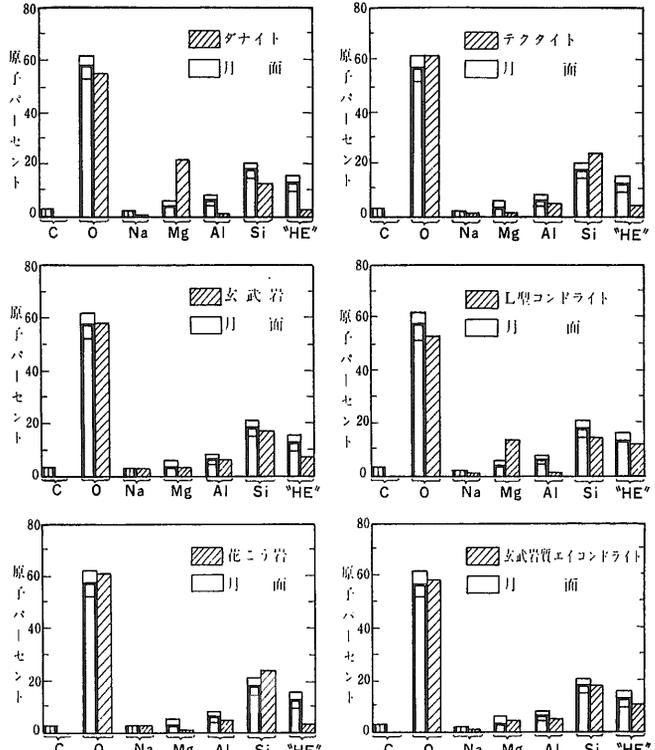
* ⁴⁰Caは質量数28<A<45の元素を示す
⁵⁶Feは質量数45<A<65の元素を示す

第7図は観測によるデータ(バックグラウンドと重元素の値は差し引いたもの)とコンピューターの計算結果がよく一致することを示している。

このようにして得られた月面の化学組成の結果を第1表に示す。表をみてすぐわかることは月面において最も多量に存在する元素は地球と同様に酸素であり原子パーセントの半分以上を占めている。次が珪素



第7図 5号で得られた実測データをコンピューターで解析したスペクトル 実線がコンピューター解析のもの



第8図 5号で得られた値をいろいろな岩石の平均化学組成と比較した図

第1表 サーベイヤー5号着陸地点の月面の化学組成

元 素	原 子 パ ー セ ン ト*
C	<3
O	58.0±5
Na	<2
Mg	3.0±3
Al	6.5±2
Si	18.5±3
28<A<65**	13.0±3
(Fe Co Ni)	>3
65<A	<0.5

* H Li He を除く これらの数は約100%になるよう直されている

** このグループは たとえば S K Ca Fe を含む

第2表 サーベイヤー6号着陸地点の月面の化学組成

元 素	原 子 パ ー セ ン ト*
C	<2
O	57±5
Na	<2
Mg	3±3
Al	6.5±2
Si	22±4
⁴⁴ Ca***	6±2
⁵⁴ Fe****	5±2

* ベリリウムより軽い元素を除く

** 質量数が約30~47のあいだの元素を示す
たとえば P S K Ca など

*** 質量数が約47~65のあいだの元素を示す
たとえば Fe Co Ni など

アルミニウムの順で マグネシウムの量はやや低い。
このような組成の物質は 地球上で得られる物質とよく
似た珪酸塩であることを示している。

そこで このような物質が いままで月面を構成する
と考えられてきた物質のどれに似ているかを 調べてみ
る必要がある。 第8図は 5号で得られた分析値を
ダナイト 玄武岩 花こう岩 テクタイト コンドライト
玄武岩質エイコンドライトの それぞれの平均化学
組成と比較したものである。 この比較をみると 最も
よく一致するのは 地球上の玄武岩の組成か または

玄武岩質エイコンドライトであるように思われる。 も
ちろんこの分析自身 ひじょうに不確定要素が多いので
即断は禁物であるが このあとにのべる6号・7号の分
析結果と比較しても 玄武岩質岩石であることは ほぼ
うたがう余地はない。

なお 詳細は省略するが さきにものべたように 5
号の脚のパッドには棒磁石がとりつけられていて 月面
物質中の鉄分(強磁性鉱物)の存在量がしらべられた。
これを 地球上の種々の物質について 同様の調査をし
たものとくらべてみると 玄武岩の粉末の付着状態と
ひじょうによく似ていることが明らかとなった。 この
ことから 月面物質が玄武岩の組成をもっていること
はほぼ確実であろう。

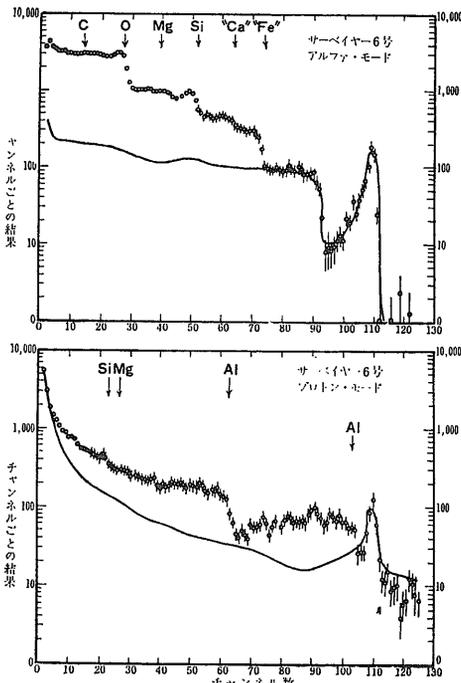
サーベイヤー6号による分析結果

サーベイヤー6号は中央の入江に軟着陸し 5号と同
じ装置と方法で 表面物質の化学分析をおこなった。

まず5号と同じように センサー・ヘッドが月面にお
ろされる前に 標準試料による分析と バックグラウン
ド・スペクトルの測定がおこなわれ 最後にセンサー・
ヘッドが月面におろされて 月面物質の分析をおこな
った。

測定は27時間におわたっておこなわれたが はじめの13
時間たらず(790分)のあいだに得られたデータによる
スペクトルを 第9図に示す。 さらに前と同じように
8つのおもな元素について コンピューターで解析した
スペクトルと 実測値のスペクトルとの比較を第10図に
示してある。 これもよく一致することを示している。

こうして得られた結果(分析値)は 第2表に原子パ
ーセントで示してある。 これは 前に得られた5号の
化学組成とほとんど一致している。 この結果はひじょ



第9図 6号で得られたアルファ線のスペクトルとプロトンのスペクトル 実線はバックグラウンドのスペクトル

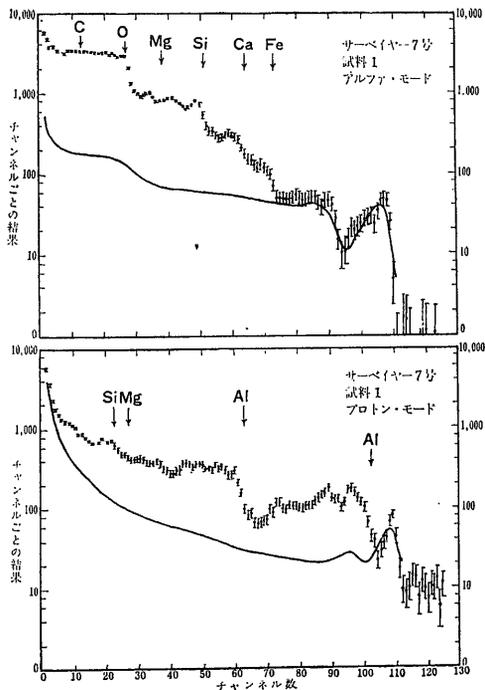
うに重要なことである。6号の着陸した中央の入江というところは海と同じような暗い平原であるからこうしてみると海とよばれているところはどこも同じような化学組成をもっているのではないかと考えられる。

この6号による化学組成を地球上の物質や隕石などの平均組成と比較したのが第11図である。これを見ると5号のときとまったく同じように月面物質は6号着陸地点では玄武岩か玄武岩質エイコンドライトにひじょうに近いことがわかるのである。

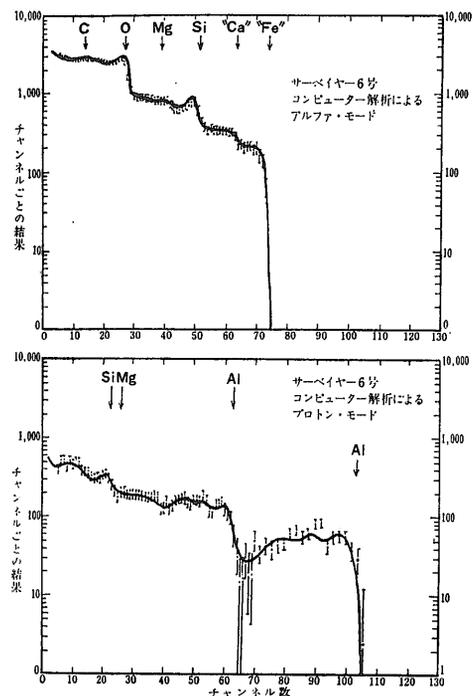
サーベイヤー7号による分析結果

さていままでのサーベイヤー5・6号がいずれも海の地域の物質を分析したのに対して7号はチョコ・クレーター近くの典型的な陸の上に着陸し陸の物質の分析をおこなった。分析の順序はいままで通りまず標準サンプルとバックグラウンドのスペクトルを測定してからセンサー・ヘッドが月面におろされ月面物質の分析をはじめた。この7号ではセンサー・ヘッドをいろいろと動かすことによって3ヵ所の地点の分析がおこなわれた。すなわち1つは乱されていない土の部分次は小さな岩石もう1つは乱された土の部分の3つについてである。

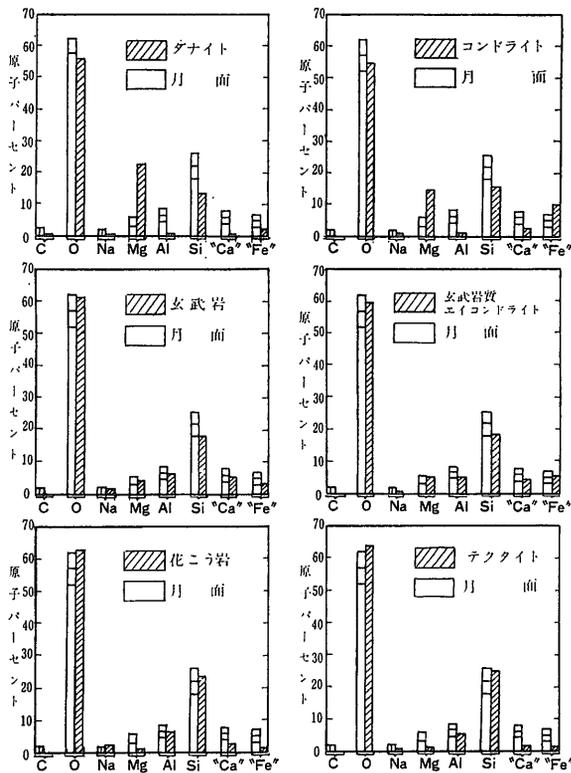
まず最初の乱されていない土の部分の分析であるがこれは約27.4時間にわたって測定がなされた。そのア



第12図 7号の第1試料で得られたアルファ線のスペクトルとプロトンのスペクトル 実線はバックグラウンドのスペクトル



第10図 6号で得られた実測データとコンピュータ解析した値の比較 実線がコンピュータ解析のスペクトル



第11図 6号で得られた値をいろいろな岩石の平均化学組成と比較した図

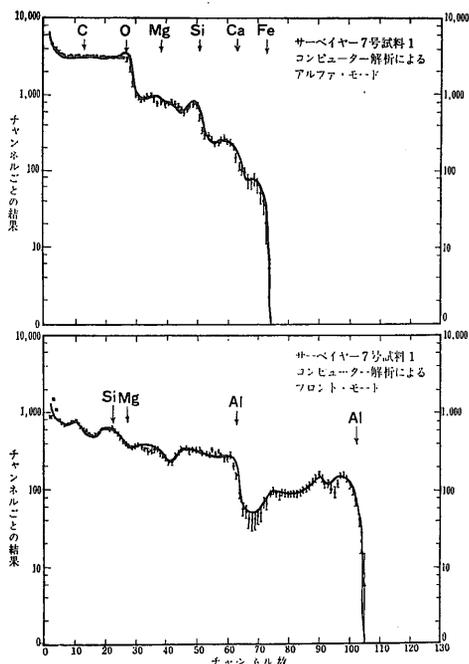
第3表 サーベイヤー7号着陸地点の月面の化学組成

元 素	原 子 パ ー セ ン ト*
C	<2
O	58±5
Na	<3
Mg	4±3
Al	8±3
Si	18±4
⁴⁰ Ca***	6±2
⁵⁶ Fe****	2±1

* ベリリウムより軽い元素を除く
 ** 質量数約30~47の元素を示す たとえば P S K Ca など
 *** 質量数約47~65の元素を示す たとえば Fe Co Ni など

ルファ線とプロトンのスペクトルを第12図に示した。このコンピューターによる解析結果の図は第13図のとおりである。このようにして得られた第1のサンプルの化学組成の結果を第3表に示す。この値をみて気をつくことはほとんど5号と6号のデータと変わらないが、鉄のグループの量だけが意外に少ないことである。これは何を意味するのであろうか。

第2の小岩石に対しての分析は 第1の場所のすぐ近くの岩石について約10時間おこなわれた。しかしこれ



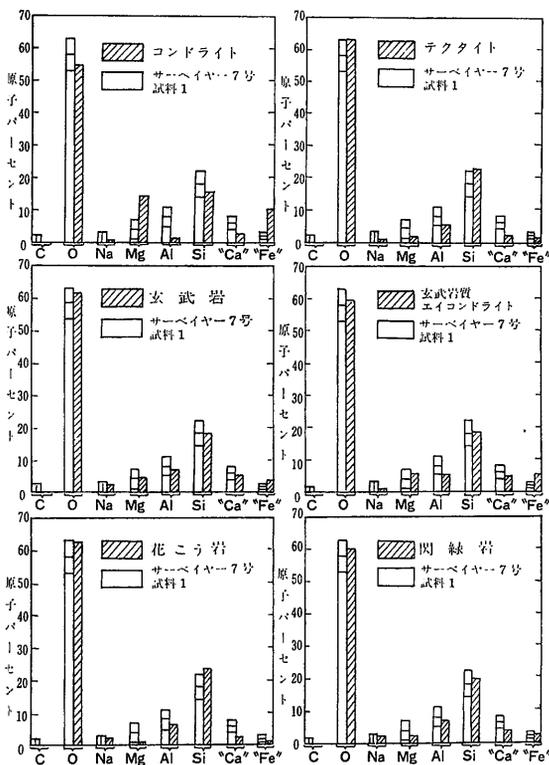
第13図 7号の第1試料の実測データをコンピューター解析したもの 実線がコンピューター解析のスペクトル

第4表 サーベイヤー5・6・7号の各分析値の比較 (いずれも原子パーセント)

元 素	5 号*	6 号*	7 号*
C	<3	<2	<2
O	58±5	57±5	58±5
Na	<2	<2	<3
Mg	3±3	3±3	4±3
Al	6.5±2	6.5±2	8±3
Si	18.5±3	22±4	18±4
⁴⁰ Ca***	} 13±3***	6±2	6±2
⁵⁶ Fe****		5±2	2±1

* いずれもベリリウムより軽い元素を除く
 ** 質量数約30~47の元素を示す たとえば P S K Ca など
 *** 質量数約47~65の元素を示す たとえば Cr Fe Co Ni など
 **** このばあいには⁴⁰Caと⁵⁶Feの両グループをあわせた値 ⁵⁶Feの下限は3%にあわせて

については 測定時の諸条件が整わなかったことなどで定性的なデータは得られたが 定量的な納得のいく値を得ることはできなかった。また 第3の乱されたサンプルについての分析は 約26.8時間にわたっておこなわれたが これは第1の試料の分析結果と ほとんど異なることはなかった。とくに 第1のサンプルに 鉄の含有量が少ないという特徴を 再確認することになった。



第14図 7号で得られた値を いろいろな岩石の平均化学組成と比較した図

第5表 いろいろな岩石の平均化学組成の比較(いずれも原子パーセント)

元 素	かんらん岩	台地玄武岩	花こう岩	インド・マラヤン テクタイト	玄武岩質 エイコンドライト	Lタイプ コンドライト
H	2.5	4.2	1.9	0.4	0.9	0.7
O	57.5	59.0	62.1	63.7	59.6	54.6
Na	0.4	1.8	2.3	1.0	0.6	0.8
Mg	18.7	3.6	0.5	1.1	5.5	14.4
Al	1.9	5.8	5.9	5.4	5.1	1.2
Si	15.0	17.1	23.8	25.1	18.2	15.5
P~Cu*	4.1	8.6	3.5	3.4	10.1	12.7
(Fe Co Ni)**	2.4	3.9	0.9	1.5	5.3	10.0

* 第4表の $^{40}\text{Ca} + ^{56}\text{Fe}$ にあたる。

(D. E. Gault ら(1967)による)

** 第4表の ^{56}Fe にあたる。

なお 前と同じように 第1のサンプルの分析値と地球上の岩石や隕石の平均分析値との比較の図表を 第14図にかかげる。これをみても 7号の着陸した陸地の値が 玄武岩や玄武岩質エイコンドライトにひじょうに近いことがわかるのである。

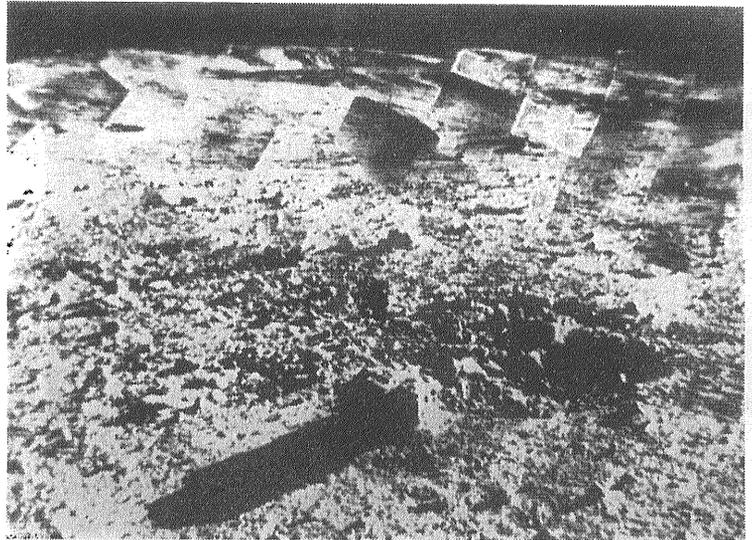
13. 化学分析の結果の解釈と問題点

以上みてきたように サーベイヤー5・6・7号が分析した月面物質の化学組成は 玄武岩質岩石のものを示すことは もはや疑う余地のないものとなった。一応参考までに いままでの3つの分析データをまとめて一らん表に示しておく(第4表)。これとあわせて 地球上の岩石や隕石に関係のあるものの平均化学組成の表も示しておく(第5表)。

月の岩石が玄武岩だということがわかったとしても 実は玄武岩にもいろいろ細かいちがいや種類がある。月の玄武岩は 地球上のどんなタイプの玄武岩に相当するのであろうか。この点については 久野久氏の詳しい考察があるので それを参照していただくようお願いしたい。簡単にいえば 同氏によれば 月の玄武岩はソレイアイト玄武岩またはその分化物である公算が大きく インドのデカン高原の玄武岩や 伊豆大島三原山の安永溶岩(1778年流出のもの)の組成に きわめてよく似ているということである。ところで それはそれでよいとして いちばん不思議で問題を感じるのは 海に着陸した5号と6号の分析結果と 陸に着陸した7号の分析結果が ほとんどちがわ

なかったことである。サーベイヤー5・6・7号の分析結果には不確定要素もたしかに多いから げんみつな議論には不向きなところもあるが いままでのべてきた少なくとも8つの成分の値については かなり信頼性があるものと思ってよいだろう。

従来 月面の海と陸の明るさ(輝き)のちがいは 岩質のちがいが(岩石の化学組成による種類のちがいが)だといわれてきた。すなわち たとえばアメリカの地質学者J・E・スパーなどは 海の暗いところは玄武岩のような塩基性岩 陸の明るいところは花こう岩(流紋岩)質の酸性岩であると考えて それらをルナベース(lunabase) ルナライト(lunarite)という名前までつけて呼んだ。そして このような岩質のちがいは 月の地殻構造の反映であるという人もあった。すなわち 地球の地殻構造を月にもあてはめて考えるならば 月の陸は



第15図 7号着陸地点から北方をのぞいた月面のような たくさんの岩石がころがっており ところどころに群をなしている

花こう岩質層のあらわれているところ 海はその下の玄武岩質層の露出しているところ というわけである。

もちろん 地球の地殻構造をそのまま機械的に 月のばあいにあてはめて議論することはまちがっていると思うけれども 月の陸がかなり白っぽく輝くことから この地域が玄武岩よりはより酸性の（たとえば安山岩のような）岩石からできていると考えるのは 最も考えやすいことである。

ところが いっぽうでは このような考え方はまったく逆の見方をしなければならないような観測事実があがってきて 事態は複雑になってきた。たとえば1966年4月 はじめて月をめぐる孫衛星となったソ連のルナ10号は 軌道めぐりながら 月面岩石のガンマ線強度をくわしく観測した。その結果によると 月の海の地域のガンマ線強度は玄武岩のそれに近いが 陸の地域のガンマ線強度はコンドライトのそれに近く けっして花こう岩のような酸性岩のもつ強い値ではない という結果を得たのである。この結果を信用すると 月の海の地域については問題はないとしても 陸の地域は超塩基性岩からなっている可能性が強くなり 従来いわれていたような考えとは大きくちがってくる。

実は 月の陸が超塩基性岩からできているという考えは いままでになかったわけではない。月が隕石状物質が集積してできたと考え 月の陸が海よりもおいたちが古いことなどを考えると 月の陸が 月の誕生いらいほとんど変らぬ状態でのこっている すなわち月の原始地殻の表面をあらわしている と考える人もいたのである。そこへもってきて こんどのサーベイヤー5・6

・7号の結果である。サーベイヤー7号の分析結果をもとにしてすべての月の陸を 海と同じ玄武岩質岩石の地域だとすれば 輝き方のちがいは 物質の化学組成のちがいよりもむしろ 表面構造（組織）のちがいに求めなければならなくなることも考えられる。もちろん サーベイヤー7号の観測はただ1点だけのものであり これをもって全体をおしはかることは危険である。今後多くの地点での正確な分析がなされてはじめて 陸の地域の物質の実体が明らかになるであろう。

月の陸と海の構成物質のちがいを明らかにすることは月の地殻構造 ひいては月の内部構造の解明とも関連して 月誕生と進化をさぐるうえに きわめて重要なことである。

本稿が掲載されるころには アポロ11号による月面岩石採集が実現して 各国の科学者による詳細な分析作業が始められていることだろう。今回採集される岩石は海の地域のものであるが いずれ陸の地域からも多く集められることを期待しよう。

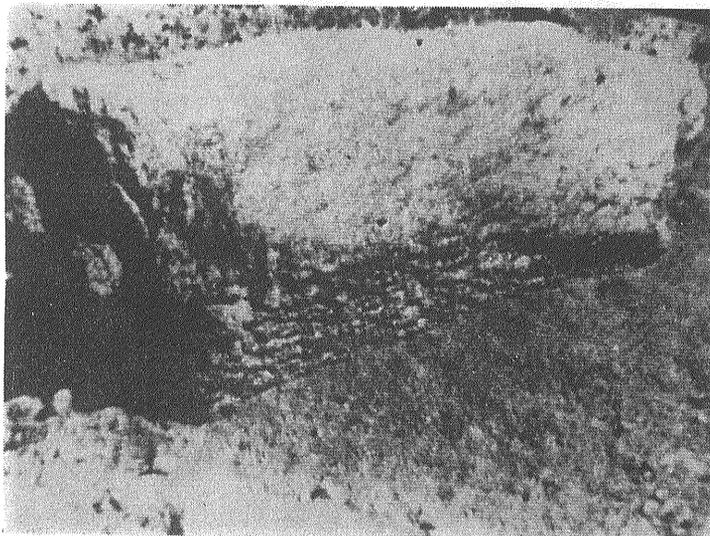
次回は 月面クレーターの成因にかんする諸問題の検討に入りたいと思う。

(つづく)

(筆者は 東京都立武蔵高校教諭)

参考文献

- Surveyor V—A Preliminary Report p. 1—160, NASA, 1967
 Surveyor VI—A Preliminary Report p. 1—163, NASA, 1968
 Surveyor VII—A Preliminary Report p. 1—301, NASA, 1968
 Surveyor V Reports Science 158, p. 631—652, 1967
 Vinogradov, A. P. et al.: Gamma investigation of the Moon and composition of luna rocks, Moon and Planets II, p. 77—90, 1968
 久野 久: 月の岩石 科学 38 6 p. 310—315 1968



第16図

7号着陸地点付近の岩石 多孔質のようみえ横に流理構造がある 大きさは長径30.6cm