

月面物質の年代と月の進化

入 山 淳*

1. はじめに

米国の有人月探査はアポロ 11号に始まり、17号で終了した。マーキュリー計画以来の月探査のための総費用は8兆円に達した。現在、アポロ計画による科学研究の成果は膨大な数の論文となって刊行されている。ヒューストンでの月科学会議の第4回までの論文集だけで、13000ページに達している。ソ連の無人月探査で月面物質を地球に持ち帰ったのはルナ16号と20号である。アポロ有人月探査と比較するとルナ無人月探査の1回の月探査の費用は1/20~1/50である。ルナ計画の研究成果も学術誌などで多数報告されている。このような文字通り5万とある大量の情報から本質的なことを言うのは容易でないが、有人月探査は一段落しているので月物質の研究の総括と議論を筆者なりにしてみたい。月探査はしばらくはソ連の無人機が頼りとなるであろうが、スペース・シアトルがはじまると、また、有人月着陸もありそうである。筆者は月面物質の年令の研究が月の生成と進化のナゾを解明するものだと考えているので、このことを主にしたい。月物質の年令の解析から推論できる月の進化のモデルも考えてみたい。

2. 月面探査と月物質の特徴

アポロ11号は1969年7月16日に打ち上げられ、静かの海に着陸した。2人の宇宙飛行士が人類史上始めて2時間24分、月面で行動した。月面には海と呼ばれる低くて平坦な場所と、海の面より相対的に高く起伏の大きい場所の陸とがある。海はアルベドが小さく黒い影模様となって見える。この影模様は古来、日本ではうさぎになぞらえてきた。陸はアルベドが大きく明るく輝いて見える。静かの海は32億年前の玄武岩の広大な溶岩流で埋められていることが確認された。玄武岩など月の海のサンプル22kgを持ち帰った。12号は同年11月14日に打ち上げられ、面積が地中海よりはるかに大きいあらしの大洋に着陸した。あらしの大洋もまた2億年前にマントルからふきだした黒色の玄武岩の広大な溶岩流で埋められていた。13号は1970年4月11日に打ち上げられたが、燃料電池が作動不能になり月着陸を中止して地球

にひきかえした。14号は1971年1月31日に打ち上げられ、雲の海の中のフラマウロ丘陵に着陸した。フラマウロ丘陵は39億年前の雨の海のベースンがイン石の衝突によってできたとき(インプリウム・インパクト)の放出物で形成されていることを確認した。採取岩石は角れき岩とか再結晶作用が目立った。15号は同年7月26日に打ち上げられ、雨の海の東南端のアペニン山脈のふもとのバドリー谷の近くの平地に着陸した。アペニン山脈の標高は4000m、バドリー谷は深さ400mである。月面車が登場して行動が点から線へ拡大した。淡色の斜長岩など月の高地のサンプルを採取した。年令40.5億年の創世紀の石と呼ばれる斜長岩を発見した。16号は1972年4月16日に打ち上げられ、本格的な山岳地帯のデカルト・ケイリー高地に着陸した。デカルト山脈は起伏の大きい不規則な地形をなし、ストーン山やスモークキー山などがある。ケイリー平原はなめらかな地形で、盆地を満たした堆積物からなっている。月面の携帯用磁力計は313γという強い磁場を観測した。火山岩は発見されず、変成作用や角れき岩作用をうけた斜長岩や斜長岩質はんれい岩などの月の山地物質を採取した。変成作用の年代は38.4~40.4億年であった。17号は同年12月7日に打ち上げられ、月の北東部の晴の海の端で、三つの大きな山塊と丘に囲まれたタウルス・リトロ谷に着陸し

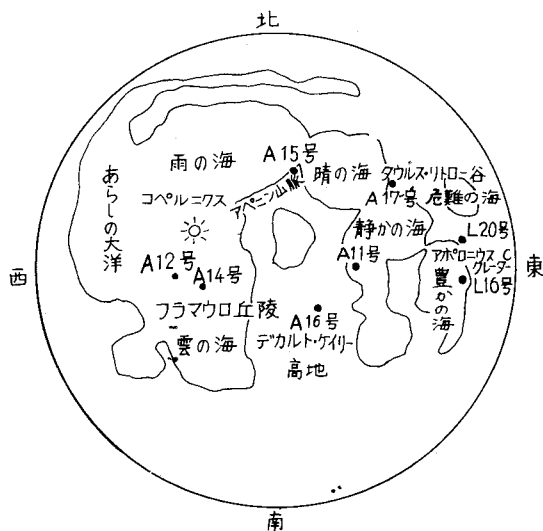


図1 月面図と宇宙船着陸地点

* 中部工業大学工学部自然科学系列

J. Iriyamay Lunar Evolution Inferred from Age-dating Data of Lunar Materials

表 1 アポロとルナ計画で採取した月面物質の特徴

宇宙船	着陸年月日	着陸地点	採取した石と土 (kg)	試料の特徴
A11号	69年7月20日	静かの海	21.7	玄武岩(高カリウム, 低カリウム). 暗色. 結晶質火成岩. 広範囲溶岩流
A12号	69年11月19日	あらしの大洋	34.4	玄武岩結晶質. 溶岩流. 磁場 38γ, 花こう岩質角れき岩 12013 (熱変成作用. 高地起源)
A14号	71年2月5日	フラマウロ丘陵	42.8	玄武岩 (高初生, 低初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). 角れき岩再結晶作用. 磁場 (A) 103γ (B) 43γ
A15号	71年7月30日	ハドリー・アベニン山地	77.4	斜長岩 15415 (創世紀の石), 再結晶作用. 玄武岩. 熱流量 30 ergs/cm ² ·s. 磁場 4γ
A16号	72年4月20日	デカルト・ケイラー高地	95.5	斜長岩. 淡色. はんれい岩質斜長岩 65015, 再結晶作用. 変成作用. 角れき岩. 磁場 121~313γ. イン石, Ni
A17号	72年12月11日	タウルス・ストリー谷	115	玄武岩. オレンジガラス. 斜長岩質はんれい岩 76055, 再結晶作用熱流量 P1: 28 ergs/cm ² ·s P2: 17~46 ergs/cm ² ·s
L16号	70年9月20日	豊かの海	0.101	玄武岩. 深さ 35 cm ドリル
L20号	72年2月21日	豊かの海と危難の海の間の山岳地帯アポロニウスCクレーター	0.052	斜長岩質ノーライト 22006. 斜長岩質はんれい岩 22007, 再結晶. 変成作用. 解れき岩

た. 37億年前に海部の玄武岩質の溶岩流がこの谷にあふれた. イン石の落下により 40 億年前に晴の海のベースンが形成された時 (セレニタティス・インパクト) に飛び散った物質と衝激でタウルス・リトロの地形がつけられた. オレンジ色をした石, 土やガラス, 玄武岩, 再結晶作用をうけた斜長岩質はんれい岩など 115 kg を持ち帰った.

一方, ルナ 16 号は 1970 年 9 月 12 日に打ち上げられ, 豊かの海に着陸した. 月面の深さ 35 cm まで電気ドリルで掘り月面物質 100 g を採取した. 豊かの海は 34 億年前の玄武岩の溶岩流で埋められていることを確認した. ルナ 20 号は 1972 年 2 月 14 日に打ち上げられ, 豊かの海と危難の海の間のアポロニウス山脈に着陸した. 深さ 35 cm まで掘り, 月物質 50 g を採取した. 39 億年前の変成作用を強く受けている斜長岩質ノーライトなどをもち帰った. 月面図と宇宙船の着陸地点は図 1 にまとめてある. 採取した月面物質の特徴を筆者がまとめたものが表 1 である.

3. 月面物質の年令からみた月面の火山活動とイン石落下

アポロ計画とルナ計画で採取した月物質の年令は大変に古いものであった. 月面では地球と違って着陸して手元にあった石が太陽系初期の太古の年令であったことは重要である. アポロ 17 号の宇宙飛行士がタウルス・リトロ谷で発見したオレンジ色の土とガラスは, 月面での最近の火山活動を示唆するのではないかと考えられた

が, この年令も非常に古く 37 億年であった. 以下, 月の石と土の年令からみた月の地学史について年代順に述べる. これは Papanastassion and Wasserburg, Turner 等, Luneke 等, Husain 等, Kirsten 等, その他の年代決定の結果を筆者が解析してまとめたものである.

月の年令は 46 億年である. モデル年令が 46 億年の月の石とか土が発見されている. 今から 46 億年前に, 宇宙のちり状物質が集積して月は誕生した. ちり状物質から月が生成される過程の最終段

階で集積エネルギーが多量に放出され月土層部 (深さ 0~400 km) は融解する. この段階で K·Rb·U·Th などに富んだ原始地殻の化学分化が生じる. 軽い斜長岩が上に移動して斜長岩や斜長岩質はんれい岩の原始地殻ができた. 重い鉄, マグネシウム鉱物 (かんらん石) は下に沈んでかんらん岩の層をつくった.

月の海

月の海は 32~40 億年前の年令をもつ広範囲の玄武岩質溶岩流でおおわれている. 海部の岩石は再結晶作用や破碎作用をうけていない. これは海部の火山岩が 46 億年前の原始分化作用に起因するのではなく, 放射性熱による二次的加熱で月内部の部分融解した産物であることを示している. イン石の衝突などでできた月の低地に, 32~40 億年前の期間に玄武岩質の溶岩がふきだした. 年代順で, 39.5~40 億年前に先・雨の海の地域に, 37~38 億年前に晴の海に, 35~38 億年前に静かの海, 34~35 億年前に豊かの海, 33~34 億年前に雨の海, 32~34 億年前にはあらしの大洋に溶岩があふれでて月の海を形成した. 雨の海の火山活動の年代は雨の海のへりに着陸したアポロ 15 号の採取岩石の年令から, 晴の海の火山活動の年代は晴の海のはずれに着陸したアポロ 17 号の採取岩石の年令から決めてある. 先・雨の海の火山活動の年代はアポロ 14 号がフラマウロ丘陵で採取した低初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ のクリーブ玄武岩の年令から決めてある.

40~46 億年前の期間には現在の月の海にあたる部分に火山活動はなかった. また, 32億年前以降, 現在まで月の海に火山活動はない. 40~46 億年の年令の月の火

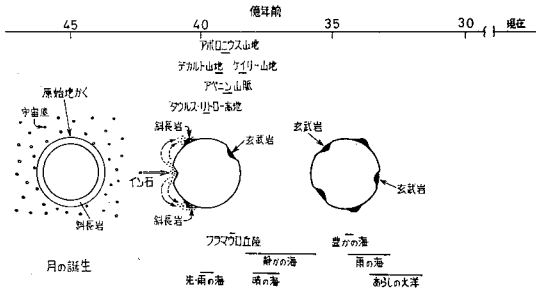


図 2 月の石と土の年代から推定した月面の火成活動の歴史

山岩がないことは、入山・島津や Reynolds の熱史の計算と一致する。上の熱史の理論値は月の生成の6~15億年後に U・Th・K などの内部放射能による二次加熱があり、月誕生後 0~6 億年までは月上層部の温度は最初の高温状態から低下していることを示している。月面の火山活動が汎月的規模で 32~40 億年前という太古にしかも 8 億年間という短期間で終了していることは月の地学史にとって重要である。

月の山

アポロ 15, 16, 17 号とルナ 20 号が月の山地に着陸した。これらの中で本格的な山岳地帯のアポロ 16 号のデカルト・ケイリー高地とルナ 20 号のアポロニウス山脈からの試料は、月の山岳の成因を知る上に特に重要である。他の着地点は高地とは言うものの海と陸の境界地域で海部の火山活動の影響をうけている。高地は斜長岩や斜長岩質はんれい岩からできている。デカルト・ケイリー高地は写真地質から火山性地形だと考えられていた。だが、アポロ 16 号は火山岩ではなく斜長岩質はんれい岩を持ち帰った。高地部の岩石はイン石衝突による変成作用を強くうけている。岩石は破碎していたり、角れき岩化作用、再結晶作用をうけている。イン石物質の存在もけんちょである。これらは、高地がイン石落下により広大なベースンが生成された時の放出物で形成されたことを示している。したがって、高地部の岩石の年代はイン石衝突年代またはベースン形成年代を示している。

月面には、38.4~40.5 億年前に大イン石が衝突した。月の高地の石の年代と写真地質学を総合すると、年代順で、大イン石の落下で 40.0 億年前にセレニタティス、39.0 億年前にクリシウムとネクタリス、38.8 億年前にインプリウム、38.4 億年前にオリエンターレの各ベースンが生成された。同時にその放出物で海の周りにタウルス・リトロウ (40.0 億年前)、アポロニウス (39.0 億年前)、デカルト (39.0 億年前)、アペニン (38.8 億年前)、フラマウロ (38.8 億年前)、ケイリー (38.4 億年

前) の各山地が形成された。火山活動で月の山地は形成されたのではなく、38.4~40.5 億年前のイン石の衝突により原始地殻の斜長岩を破碎・放出して山地が形成されたことは重要である。以上の月の地学史を筆者がまとめたものが図 2 である。

4. 月の進化の熱学的考察

月物質の年令からみた月の進化をまとめると、① 46 億年前に月が誕生した。この集積した直後に表層部は融解した。この時、斜長岩や斜長岩質はんれい岩からなる原始地殻が形成された。② 40~46 億年前の期間には月面に火山活動がなかった。③ 38.4~40.5 億年前に月面に大イン石が衝突して海のベースンを形成した。この時、原始地殻の斜長岩を破碎・放出して山地が形成された。④ 33~40 億年前に、海のベースンで活発な火山活動があって重い玄武岩質の溶岩が大量にあふれて海を形成した。⑤ 32 億年前以降、月面には火山活動はない。①—⑤ を熱学的に考察してみる。① の熱源は月の急速な生成による集積エネルギーの放出による初期加熱④の熱源は月内部に存在する U・Th・K などの放射性元素の放射能による。②は月集積エネルギーの集積による加熱が表層部だけで月形成後、6~14 億年後の内部放射能による二次加熱まで月上層部が大規模な火山活動を起すほどには高温でなかったことを示している。⑤の冷却は月のサイズが小さいので、地球とは違って対流と伝導により急速に冷却したことによる。

月の進化のナゾを解く重要な要素としては石の年令の

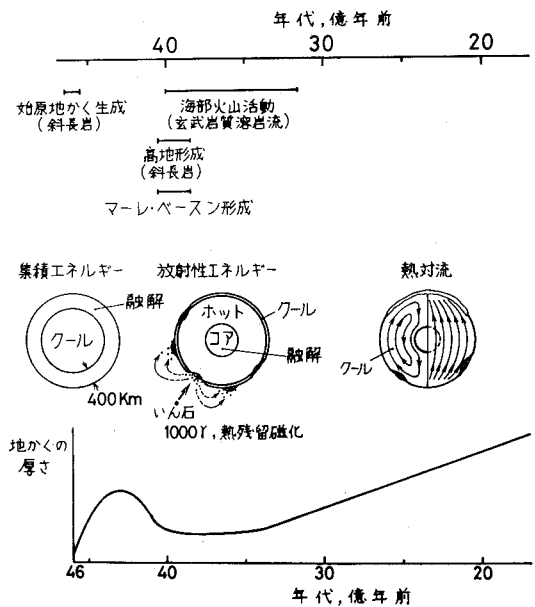


図 3 月の進化のモデル

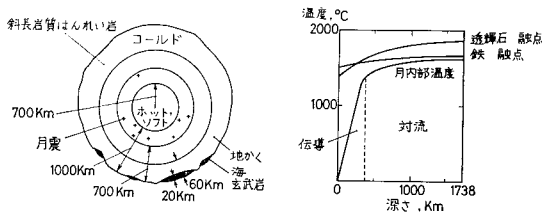


図4 月の現官の内部構造と内部温度

他に、月震と磁気がある。月震は地球と比較すると、その数とマグニチュードの両方において大変に低い。年間あたりの地震による全放出エネルギーは地球の 10^{-9} である。月物質の年齢と月震のデータは月が現在、非活動的であることを示している。だが、S波は1000 km以深では十分に伝播していない。これは月深部が融解していないまでも、hotでsoftなコアがあることを示している。アポロ計画では5~300γの月表面磁場が観測された。これは必要条件として、溶岩の結晶年代の32~40億年前に月内部にコア・ダイナモ作用があり、月面の岩石がその熱残留磁気を保持しているとする説明がつく。

以上から推論できる月内部の熱対流、固体地殻の厚さの時間的変化、月面の火成活動の歴史、コア・ダイナモ

作用(必要条件)などをとり入れた月の進化のモデルを提案する。これは図3と図4にまとめてある。図3で固体表層の部分は部分融解層の上に固体地殻が浮いているとしたときの地殻の厚さを示す。46億年前と32~40億年前では固体地殻の厚さはうすくマグマ層が表面近くにきており、容易に溶岩が月面にふきだすことを示している。図4で左の内部構造図は現在の状態を示している。下側が地球側を示している。右は月の現在の内部温度、伝導、対流の様子を图示してある。

月物質は我々に数多くのことを教えてくれた。月のみに産する鉱物も4種見つかっている。水を含んだ鉱物はほとんどない。だが、ナゾも多い。これらは月面の別の地域の本格的な山岳地帯、特に、月の裏側からの月物質の収集によってさらに解明されよう。

記事追加とお詫び

本誌68巻3号(1975年3月号)97頁、新刊紹介欄に欠落がありましたので、下記のように追加します。

97頁左15行目追加(東京図書、B6判、222頁、1,200円)

グラビヤ(78頁)説明中リック天文台をローエル天文台に訂正。

★★★★★★★★★★★★★★★★

— わが国唯一の天体観測雑誌 —

天文ガイド

毎月5日発売! 定価240円(〒32)



天文ファンの人たちに毎月の天文現象の案内や、ニュースの紹介をするとともに、望遠鏡の作り方、観測ガイド、天体写真の写し方など実用記事も掲載。また、読者の写した天体写真、星座写真等たくさん作品や望遠鏡の自作レポートも網羅。

誠文堂新光社 東京・神田錦町一―五 振替・東京六二九四

★★★★★★★★★★★★★★★★

天文に興味を持ちはじめた小学校上級生から中学校1年生ぐらゐの子供たちのための天文入門書

星空の12ヵ月

古畑正秋著/A4判/定価900円

12枚の毎月の星図を中心に、星座の話、星の明るさ、金星や火星の動き、流星、月のこと、天の川、変光星のことなど、はじめて星に心をうばわれた少年たちにはわかるようにやさしく説明してあります

■おもな内容—星座のさがしかた/星座の歴史/星座の表/星の明るさ/日出、日入の薄明/1月の空/冬のおもな星座/2月の空/星雲と星団/3月の空/金星のうごき/4月の空/春のおもな星座/5月の空/火星の動き/6月の空/7月の星座/その他