

月の地球物理学

永 田

武 (地球物理)

米国の NASA によるアポロ有人月探査計画も、アポロ 17 号の帰還を以て終了した。アポロ計画では月面の 6 箇所の地点から月表面の岩石試料を採集して地球へ持ち帰り、それら試料の地球化学的・鉱物学的・岩石学のおよび地球物理学的分析が広汎に行なわれ、また今なお行なわれつつある。アポロ計画では、月試料の採集のみを主目的としたのではなく宇宙飛行士が月面に滞在する間に種々の地球物理学的測量を行なった他、地球物理学の諸要素の観測所を設置した。これ等の観測所は今もなお生きている時々刻々観測データを地球上へ送って来ている。ここでは、後者の結果、特に月面観測所の常時観測の成果のうち面白そうな話題を紹介する。

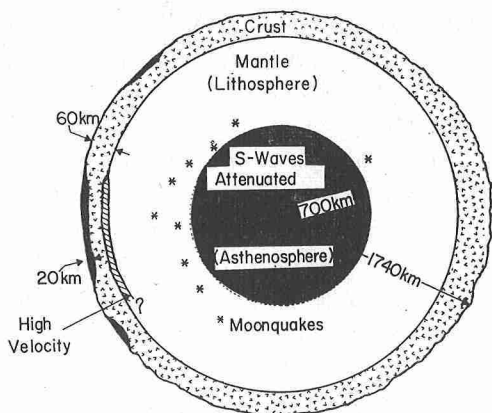
月面観測所のうちで最もよく整備されたと思われるのが月震 (月の地震) 観測所であって、アポロ 12 号着月点から 17 号着月点まで月面の地球側半球上 5 箇所の観測所が出来ている。何れの地点でも水平 2 成分と上下動成分の長周期地震計 (周期 1~3 秒) と上下動短周期地震計 (周期 1/15~1 秒) とを備えている。5 箇所で同一の月震を同時観測出来ると、月震の震源等についてかなり信頼度の高い測定が出来る。その結果、月震の震源は 800 km から 1000 km の深さに起る事が圧倒的に多く、700 km から 1200 km の深さの範囲以外には起っていない。この結果は、地震々源の深さ分布に比べて驚くべき事実である。よく知られているように、地球では深さ 100 km までの浅発地震の数が圧倒的に数多く、震源が深くなるほど数が減少し深さ 700 km 以上に震源のある地震は未だ観測されたことがない。つまり地球では平均半径 6370 km の表面近くの 1 割強の部分にのみ地震が起きているのに、月では平均 1740 km のちょうど中央部にのみ地震が起きていることになる。

さらに月震波形の分析結果から震源の分布は緯度・経度について一様に拡っているのではなく、今までに判ったところでは 41 箇所の特定の定った地点にのみ繰返して起っている。これ等の月震の巣は大部分月の地球側半球の内に在る。言い換えると月内部には歪が蓄積して不安定状態になっている箇所が 41 ある。一つ一つの月震の巣に注目して見ると、その巣が月震活動をつづけるのは 2~3 日間にすぎないが、同じ場所での月震活動は規則正しく 14 日の周期で繰返す。従って月震活動 (月震の起る頻度、または月震のマグニチュードをも考慮に入れて月震として出される全エネルギー量) も美事な 14

日周期を示す。この周期性は地球引力が月に及ぼす潮汐力が少なくとも月震発生のトリガー役を果たしている事を強く示唆している。

このような月震活動の特性を地震活動の特性と比べてみると、月の表面から中心点の半分までの外殻側は現在ではもうすっかり安定していて、わずかに深さ 700 km ~1100 km の辺りに歪がたまっていることになる。一頃考えられた火山活動などは到底予想さえ出来ない状態といえる。月面の地球反対側におきた隕石衝突による月震、またまれに地球と反対側月半球内部に起る月震が月面地球側に配置された月震観測所に到達した記録をみると、月面から約 1000 km 以上の深部を通過して来た月震波には S 波 (横波) がほとんどみられないし、P 波 (縦波) 速度もわずかながらもあきらかに減少している。この観測事実は、月の中心から半径約 700 km の中心部は、半熔融状態になっているのではないかとと思われる。もしそうだとすると、その部分の温度は約 1400°C 前後であろうと推定される。

地震観測所が設置されて以来数多くの月面起震が Lunar Module を落下させること等によって行なわれた。この場合落下物体の月面衝突位置がハッキリしているので人工月震の震央および発震時が正確に判っている。したがって各月震観測所では正確な走時曲線が求められた。このようにして得られた走時曲線の解析から月面から深さ約 150 km に至る内部までの月殻の P 波速度分布が推定されている。その結果によると月の海 (Mare) の場所では表面から深さ 1 km 程度までは P 波速度が 200 m/秒から 4 km/秒まで急激に上昇する。これは玄武岩細粒間の空隙が圧力によって急激に埋められるからである。さらに深さ 1 km から 20 km ~25 km までは P 波速度は 4 km/秒から 6 km/秒まで漸増する。これは玄武岩細粒がさらに圧縮される結果だと判定される。深さ約 20 km に不連続面があり、深さ 60 km までは P 波速度約 6.8 km/秒の一樣層が在る。月山岳地帯で基盤が露出している場所では同様の P 波速度を得ているので、この一樣相は Anorthositic gabbro からなる月殻であると判定出来る。深さ 60 km にさらに不連続層がありこれより下部 150 km の深さまでは P 波速度 7.7 km/秒の層が一樣につづいている。多分この部分が月のマントルに相当するのであろう。ただ場所によっては P 波速度 9.2 km/秒の高速層がマントル上部 10 km ほどの厚さを



第1図 月の内部構造

占めているところがあるようにも見える。

上記のように月震観測結果から得られた月の内部構造を模式的に集大成して表現したのが第1図である。図の内容は上述の解説にすべて含まれているから、それ以上の説明は必要としないであろう。

月内部物理の一つの鍵として、月面での熱流量の問題がある。アポロ15号および17号によって、月面で熱流量測定穴が設けられた。合計3箇所の測定点があるが、そのいずれにおいても熱流量 (Q) は約 3×10^{-6} watt/cm² である。この値は地球表面での熱流量の平均値約 6×10^{-6} watt/cm² の半分に当る。半径が1740kmしかない月にしては大きな熱流量だということで最初アポロ15号の結果が報告された時は測定値に疑いを抱いた人もいたほどであった。地球の大陸の場合には平均厚み25kmの花崗岩層とその下にある平均厚み約10kmの玄武岩層からの放射能熱出量を考えれば大陸地表での熱流量をまかなうことが出来る。ただ厚み平均5kmの玄武岩層のみが地殻を構成している大洋底でも、熱流量が約 6×10^{-6} watt/cm² あるので、どうしても少なくとも大洋底では地球マントル上部からの熱輸送も考えねばならなくなって、事情を複雑にしている。表面近くの地殻およびマントル上部が現在なお活動をつづけている地球と表面近くの半分以上の部分が死に絶えている月とでは大部事情が異なるらしい。

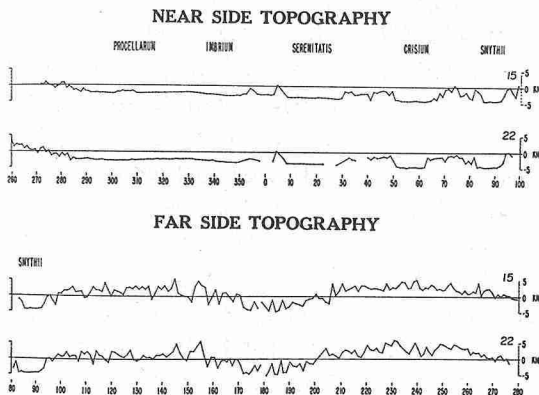
月殻を構成していると思われる月の Anorthositic Gabbro の熱出力 (q) 平均値を求めると $q = 4.3 \times 10^{-13}$ watt/cm³ となる。もしこの熱出力と月面の熱流量とが平衡していると仮定すると、月殻の厚みが65kmあれば足りることになる。この結果は第1図の地球内部構造図と矛盾しない。たとえ月玄武岩が月殻の一部を構成しているとしても月玄武岩の熱出力平均値は 2.6×10^{-13}

watt/cm³ に達するから、上述の月殻の厚みに対する推定値には大した影響はない。つまり、月のマントルは最早大した活動力は持たないと結論してよさそうである。

アポロ計画で地球の人間が月面上に下りたって科学的な測定・測量を行なったとしても、測定が覆いうる範囲は極めて限られたものである。もちろん着月点の選択は、既知のデータから地学的な見地からのキーポイントを選んではいるが、それでもなおその地点がどの程度月面の一般性を代表しているか判定するのは難しい。この欠点を補うのが月副衛星による月面の連続観測である。地形、月重力、月磁場等の測量はもちろん種々の物理量測定が行なわれたが、その結果のうちあまり周知されていない一、二を紹介したいと思う。

地球へ持参した月岩石の分析結果によると月山岳地帯を代表する (すなわち月殻構成岩石を代表する) Anorthositic Gabbro の中には Al₂O₃ が18~23%を占めているのに、玄武岩では、10%以下である。では月の裏側 (地球から見て月の反対側) の山岳地帯もやはり Anorthositic Gabbro が主成分であろうかという素朴な質問が先ずおきるであろう。空気層のない月の表面では太陽からのX線によって月面構成物質が Fluorescent X-ray を出す。この場合の K_α 放射の特性をみると Si は1.74 KeV, Al は1.49 KeV, Mg は1.28 KeV, Ca は3.70 KeV である。空気層のない月面上を高度70km~100kmのほぼ円軌道を書いて飛ぶ月副衛星からは、これ等の Fluorescent X-ray の強度を識別して測定する事が出来る。しかも月副衛星は月の裏側をも連続して判定することが出来る。

月面の写真 (裏側をもふくめて) と対比してみると、例外なく、月山岳地帯では Al/Si 比が大きく Mg/Si 比が小さい。これに対して、月の海地帯では反対に Al/Si



第2図 月赤道面に沿った月表面の地形。基線 (高度0 標高線) は半径1738kmの円と仮定してある。

比が小さく Mg/Si 比が大きい。もし量的な数字を示せば、月山岳地帯では $Al/Si=0.55\sim0.61$, $Mg/Si=0.20\sim0.21$, 月の海地帯では $Al/Si=0.36\sim0.45$, $Mg/Si=0.24\sim0.27$ である。したがって月山岳地帯は Anorthositic Gabbro を主成分とする月殻構成物が露出しており、月の海地帯では Basalt を主成分とする細粒が水平に堆積していると一般的に考えて宜しいようである。

第 2 図に他の月副衛星観測結果を示す。これは LASER による月面のほぼ赤道に沿っての地形測量の結果の一例である。月の表側、裏側それぞれについて二本の測定線の結果を示してあるのは、極めて近い軌道をもった別々の観測値を示したものである。一見して表側 (Near side) 月面には平坦な海が多くを占め、裏側 (Far side) はほとんど山岳におおわれている事実は明らかであろう。さらに重要な点は、月赤道面において、表側は平均面より低く、裏側は平均面より高いことであろう。すなわち、月赤道面の地形は地球側が凹み、裏側が凸に

なる形のゆがみをもっている。半径 1738 km の基準高度を標準として、月赤道面の高度 (h) は経度 (λ) に対して

$$h = -0.7 - 2.1 \cos(\lambda - 25^\circ) + 0.7 \cos 2(\lambda - 90^\circ) \quad (\text{km})$$

(軌道 15)

$$h = +0.1 - 2.9 \cos(\lambda - 25^\circ) + 1.2 \cos 2(\lambda - 50^\circ) \quad (\text{km})$$

(軌道 22)

で表わされる。少なくとも First Harmonic 項については両軌道の解析値が近似的一致をしていると言えるだろう。第 1 図はこの地形のゆがみをやや誇張して表現しているが、この図のように月の裏側で月殻の部分のみがふくらんでいるという解釈が確立している訳ではない。むしろこのような大きな形の変形があるのに月の外側部分は何故安定であるのか、という点がいま問題となっている。

月内部物理学について、今までに判った事はもっと数多い。然し、今回のお話はこの辺りで終らせていただきたい。