

履歴を考えた場合、月の年齢として 10^9 年となり地球の年齢 5×10^9 年に比してかなり若く計算される。別の可能性としては、放射性物質の分離がおこって比較的地表付近に集ったと解釈することによって、その年齢はほぼ地球の年齢にまですることもできる。

このように太陽風と月の進化の問題はある場合は物理的な因果関係において、ある場合は電磁流体力学的な測定手段として興味あるものの一つである。今後月面資料の解析とあいまわっているいろいろと論議されることであろう。

アポロ計画と月の地震

水谷 仁*

1969年7月21日、人類はついに月に着陸した。長い人類の歴史の中で、宇宙時代の夜明けというべき瞬間であった。このアポロ11号の成功は世界中の人々の耳目を月へ引き寄せたが、これはまた科学者にとっても同じであった。月の科学、惑星の科学の新しい段階がこの時に始まったといって過言ではない。特に月面で採集された岩石については、新聞、ラジオ、テレビで広くその成果が注目されているが、その岩石にまさるとも劣らぬ重要な情報を送ってくるはずである地震計の活躍に対してはそれほどでもない。しかし月面に設置された地震計は過去10年間におよび地震学者の汗と努力の結晶であり、これによって月の歴史、内部の構造に関するいくつかの謎が解かれる日も近い。本稿では月面に設置された地震計からどのようなことが解ってくるか、ということを中心に解説を試みた。

1. アポロ地震計の性能

まずアポロ11号が持って行き、オールドリン宇宙飛行士によって設置された地震計の性能について簡単にのべておこう。

アポロ地震計は総重量 11.5 kg、体積 $2 \times 10^4 \text{ cm}^3$ で3成分の長周期地震計、1成分の短周期地震計の他に、月面のゆっくりした変動を記録する3成分の歪計と温度計より成っている。電源は太陽電池で、地震計の温度を一定に保つためのヒーターには少量のプルトニウム238を燃料として使っている。これで1年間は地球に記録を送信してくるはずになっている。第1表にアポロ地震計の機能をまとめておいた。これをみてわかるように、この地震計によって潮汐による月面の運動から、隕石の衝突による衝撃までを記録できる。

2. 月には地震はあるか？

月の地震と言う言葉は多少奇妙な感じがしないでもない。月震と称すべきかもしれない。英語では earthquakes (地震) に対して moonquakes (月震) という単語がもはや成立したようであるので、それに合わせ月震という言葉も作り得る。しかしここではひとまず月も地球も区別せず地震という言葉にしておく。さて表題の疑問は月には地震はないが、月震はあるといった洒落ではない。もし月が死んでしまった静かな天体ならば、地震などというものが存在するかどうかかわからないからである。しかし大多数の科学者は月面には相当数の地震があると考えている。

月の地震の主な原因として2つのものが考えられる。ひとつは地球の地震と同じく、地下の岩石の一部が何らかの原因で破壊することによって生じるものであり、他のひとつは、月面に隕石(隕鉄)が衝突する時に生じるものである。前者は内的原因によるもの、後者は外的原因によるものといえる。地球では厚い大気のため隕石の落下も月にくらべてわずかで、後者によるものは極めて少ない。

さて内的原因によるものと称する地震は究極的に内部に蓄えられた熱エネルギーが機械的エネルギーに変わる

第1表 アポロ地震計の性能

名前	機能	探知できる 最小の信号	周期
LPZ	長周期地震動の垂直成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒
LPX	" 水平成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒以下
LPY	" 水平成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒以下
SPZ	短周期地震動の垂直成分	$0.1 \text{ m}\mu$	0.1秒
Z-FB	重力の変動	$8 \mu \text{ gal}$	∞
X-FB	月面の傾斜	$0.01''$	∞
Y-FB	月面の傾斜	$0.01''$	∞
TEMP	地震計の温度	0.02°C	

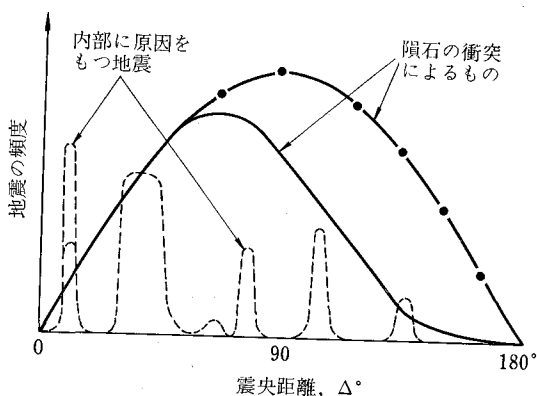
* 東京大学理学部地球物理学教室

H. Mizutani: Apollo Project and Moonquakes

ことによって生じたものである。したがってこの種の地震活動の目安としては、内部に蓄えられた熱エネルギーを使うことができる。マグナルド (1960 年) の計算によると、月には地球と同程度以上の地震活動が期待できる。プレス等 (1960 年) は月の地震活動が地球とほぼ同じ程度だと考えて、月全体にわたって観測されるような地震は 1 月に 10 個から 100 個も起きると推定した。月の体積は地球の体積の 2% しかないので月全体に伝わる程度の地震の規模も、地球にくらべて相当小さいものでよい。マグニチュード 6 程度の地震は月では大地震の部類に属することになる。また小さな地震の数はマグニチュード 1 つさがるにつれ、ほぼ 10 倍増すので、実際に記録される地震の数は今のべた数値の 100 倍以上になろう。

内的原因によるもの他に外的原因によるものも相当数あるはずである。ホーキンス (1959 年) の推定によると地球の大気には重さ 40 kg 以上の隕石が 1 日に平均 3.3 個も飛び込んでくるという。月全体にわたってその振動が記録されるような隕石の落下ほどの程度の頻度で起こるであろうか。隕石の月面への入射速度が 25 km/秒だと仮定すると、重さが 3000 トン位の隕石が入射すればよく、この時に生じるクレーターの大きさはボールドウィン (1949 年) によれば数百メートルであろう。このような大きさの隕石は 20 年に 1 度位の頻度で月面に衝突すると考えられる。これより小さな隕石はもっと沢山落下するはずでアポロ地震計程度の感度の地震計では 1 年に 100~200 個の隕石の衝突が記録されるはずである。

月の地震には上で述べたように 2 つの種類がある。地震の記録を見てこの 2 つが区別されるであろうか。隕石



第 1 図 地震の頻度と震央距離の関係をしめす模式図

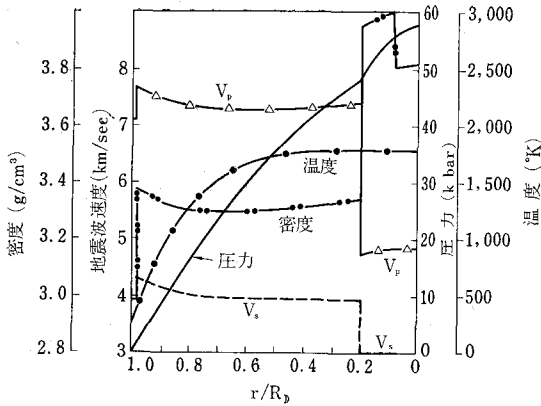
実線および一点鎖線は隕石の衝突による地震についてのもの。一点鎖線は地震波が伝播の途中で吸収をうけることを考慮していないもの。実線は吸収を考慮したもの。点線は地球の地震と同じ原因によると考えられるもの。分布は線スペクトル的なことに注目せよ。

の衝突による衝撃が、地上核爆発実験の時と同じようなものであれば、これは内部に原因をもつ通常地震とは記録された地震波の形から区別がつけられる。しかし隕石の衝突による衝撃が地下核爆発によるものと同じであれば、これは通常地震と区別をつけることがむずかしい。しかしこのような場合でも地震の頻度と地震の起きた場所 (震央) の関係を統計にしてみれば、両者の活動度を分離して考える事ができる。というのは隕石の落下は月面上どこでも同様であると考えられるのに対し、内部に原因をもつ地震の分布は極わめて片寄った分布をもっているにちがいないと考えられるからである。例えば地震の頻度と震央距離の関係を図示すると第 1 図のようなものが得られる。第 1 図の実線は隕石によるものの分布を表わし、点線は内的原因による地震の分布を表わしたものである。前者は $\sin \Delta$ に近い形に、後者は線スペクトル的な分布になる。このようにすれば 2 つの種類地震の各々の活動度を別々に知る事ができる。さらに内的原因による地震の震央の位置と月面上のいろいろの地形との対応を考える事も面白い問題を提供するのである。これらの対応がつけられれば月の地質活動についても新しい資料が得られることになる。

3. 地震による月の内部構造の研究

地球の内部構造が地震波を使うことによって明らかにされてきたと同様に、月面におかれた地震計は月の内部構造についての極わめて有力な情報を与える。ただしばらくの間は月面には 1 台、あるいは運がよくてたかだか数台の地震計しか設置されないで、現在の地球上の地震学が手にしうるような詳しい情報を得ることはできない。しかしたとえ 1 台の地震計でも記録の質さえ良ければ以下にのべるようにかなりのことが分ってくるであろう。

まず月の内部構造について現在どの位のことがわかっているか簡単にとりまとめておこう。月の質量と半径はよくわかっており、 $M_p = 7.343 \times 10^{25}$ g, $r_p = 1738$ km で、重さは地球の約 83 分の 1、半径は 0.272 倍である。これから計算した平均密度は 3.34 g/cm³ で地球のマントルの上層部の密度に近い。月の表面の岩石はサーベイア 5 号~7 号の化学組成の結果により玄武岩に近いものと考えられ、密度は $3.0 \sim 3.1$ g/cm³ 程度と考えられる。月の内部の構造はこれらの条件と、岩石、鉱物の状態方程式、月全体の慣性モーメントを考慮して、いろいろのモデルについて計算できる。中村とレイサム (1969 年) による計算の 1 例を第 2 図にしめた。これはコアの半径が 348 km、地殻に相当する軽い岩石でできた部分の層が 20 km の厚さである場合のものである。これによれば中心部での圧力は約 58 万気圧、温度が 1800°K 位



第2図 月の内部構造

地殻の厚さ 20 km, コアの半径 348 km とした場合のモデル計算の結果. V_p は縦波速度, V_s は横波速度をしめす. マントル内でこれが単調に減少していることに注目せよ.

になる. 慣性モーメントの不確定さのため, この種の計算では月に鉄でできたコアがあるかどうかはよくわからない. 月の半径の 0.3 倍程度の大きさのコアまでは十分考えられる範囲にある. 第2図によると月のマントルに相当する部分でも玄武岩の融点を越えた温度分布をもつ. この種の定常状態の計算や, 非定常の熱伝導方程式を解く熱史の計算の非常に多くのモデルの計算が, いずれも第2図程度の温度分布をしめすことは, 月の歴史の一時期にかなり大規模な火山活動があったことをしめすものではないだろうか.

さてこのような月の内部構造に関する様々の推定も近い将来, 地震計の記録がその妥当性を判定することになる. まず月にコアがあるかどうかは2つの方法によって判別されるだろう. そのひとつは長周期地震計か歪計に記録されると考えられる月の自由振動の周期の測定からである. 竹内ら (1961年) の計算によると, 月の伸び縮み型の基本モードの自由振動の周期はコアがなければ 14.7 分位であるが, 半径が 350 km のコアがあれば 15.2 分となり, 半径 520 km のコアがあれば 16.5 分という風に自由振動の周期が長くなる. したがって月の自由振動の周期がわかればコアの半径の大体の値がわかることになる. もう1つの方法は実体波を使う方法である. もしコアがあれば液体であるコアと固体であるマントルの境界で地震波が反射してくるはずで, それとおぼしき波の相の発見により, コアの存在が確認されることになる.

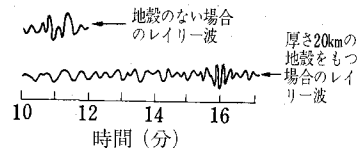
月に地球の場合と同じような地殻があるかどうか月の歴史を考える上で重要な要素になる. 月の地殻の存在, および存在するとすればその厚さについての情報も実体波および表面波の2つの研究から独立に推定しうる. 実体波による研究は, 地殻とマントルの境界で屈折あるい

は反射された波の相をみつるけことである. このような波がみつれば, その到達時間などから地殻の厚さを求めることができる. 表面波を使う時は, 表面波の波群の継続時間が第1の目安を与える. 例として地殻がないとした場合と, 20 km の厚さの地殻がある場合の表面波 (レイリー波) の理論的な波形を第3図にしめた. これをみてもわかるように, 地殻のない場合の表面波の波群はみじかく, 地殻のある場合の表面波の波群は長い間つづく. このような波の形の相違から地殻のある, なしが直観的に判定できる. また表面波の場合は, 震源 (震央) と地震計を通る大円のうち劣弧を通ってくるものと, 優弧を通ってくるもの. さらにもうひとまわり回わってくるものなど, 伝播距離のことなる波群が1つの地震計で得られるので, これから表面波の速度を求めることができる. 表面波の波群をフーリエ解析すれば各波長毎の速度 (分散曲線) を求めることもできる. 長い波長の波は深い部分の, 短い波長の波は浅い部分の構造を反映しているの, これから内部の構造を求めることも可能である.

月の大まかな構造の研究と同時に, 月の地震記録を整理して, 実体波 (縦波と横波), 表面波の走時曲線 (震央までの距離と震源から地震計まで到達するに要する時間の関係をしめすグラフ) を作る事が重要である. これらは月の構造を詳しく研究するのに必須のものであるからである. 1台の地震計では震源の位置, 地震の起きた時刻を求めるために, 内部の構造を仮定しなくてはならないというジレンマにおちいるが, ロケットを指定した位置, 指定した時刻に月面にぶつけるなどのような事をして人工的な地震を作るとか, 数台の地震計を同時に働かせるようになればこの作業も進むであろう. この作業が進めば月の内部の地震波速度の分布がわかり, またこれをもとにして密度分布, 圧力分布などもわかってくるであろう.

4. 月の地震学のかかえた困難さ

今までは月面に設置された地震計の記録をどのように処理すれば月についての情報が得られるか, ということ



第3図 レイリー波の理論波形 震央距離 90° の位置の波形をしめす. 地殻のある場合はレイリー波が長くつづく.

も予想される. そのひとつは, 月の内部の地震波速度が地球の場合とちがって, 内部にいけばいくほど速度が遅くなる層がかなり広範囲に

存在するらしい（例えば第2図をみよ）という予想にもとづくものである。もしこのようなことが本当であれば地震波線は内部にもぐりこむ傾向になり、地震波の伝播経路は複雑なものになる。したがって解析の方法も極わめて難しくなる。第2の困難は、月が水平方向にも一様でないかもしれないという予想にもとづくものである。もしマスコンなどと称しているような重い物質が所々にうまっているような構造では月の内部の構造は深さだけの関数としては表わせなくて、水平方向の変化を考えた3次元的な取り扱いを必要とするかもしれない。しかしこのような困難が存在するという事が判明すれば、それだけ月の科学も実証的になってきたことになるわけで、悲観するには及ばないことかもしれない。

5. 月地震学のその後

アポロ計画が終わるまでには11号を含め、4回の軟着陸が行なわれるが、そのいずれにも地震計が持っていられる。地震計の寿命はほぼ1年間とされているので、旨く行けば2台以上の地震計が同時に働らくということもありうる。またこの間に一度はサターン4型ロケットの使い切ったものを月面に衝突させて人工地震の役目を

果させることも計画されている。このようにして、アポロ計画の終わりまでには、月には地震があるか、あるいはもう月は死んでしまった静かな天体なのか、月にはコアがあるか、地殻はあるか、火山活動はあるか、などの疑問に答を出すことができるようになる。

アポロの後、地震学者はさらに地震計を改良し、長寿命で、周波数帯域の広い地震計の製作を試み、また月面にさらに多くの地震計を設置するように努力するであろう。

〔付記〕

8月中旬に受けたMITにいる金森博士の手紙によると、プレスは月地震計の記録を見た結果から月には厚さ20km程度の地殻があること、月の地震活動（内部に原因をもつもの）は地球にくらべて弱いと述べたこととであった。8月31日付の新聞のニュースでは月地震計は地球にデータを送信しなくなってしまったとのことである。まことに残念なことである。さらに9月2日付の新聞によると、今までの記録はすべて地震計自体の雑音であったとの事。そうだとすれば、プレスの述べた結果も疑わしく、アポロ11号の設置した地震計から有意義な結果を得ることも難しいかもしれない。

マスコンとレーザ反射鏡

古 在 由 秀*

マスコンという言葉がマスコミにも使われだしてから半年もたった。マスコミがMass Communicationの略であると同じように、マスコンはMass Concentrationの略で英語でもこう略されている。

マスコンはアメリカのルナー・オービターという、月のまわりをまわった5つのロケットのドップラー観測から見つかった、月面で重力の異常に強い部分のことである。ルナー・オービターの軌道面の月の赤道面に対する傾斜角は 21° から 85° で、使われたデータは226個の軌道にのった2万個の観測であり、観測点は月面の北極から南極までで、また $\pm 100^\circ$ の経度の範囲をカバーしているが、月の裏側でのデータは得られていない。このデータは、それぞれ一分間の観測の平均として求められたもので、ルナー・オービターの秒速は2kmであるから、120km(4°)ごとに一つずつデータが求まったこととなる。

この速度の観測から加速度が計算できる。こうして軌道上の2万個の点で加速度が求まったのであるが、太陽や惑星による摂動の補正をすれば、これらの加速度は各点における月の重力の強さを表わすことになる。

このようにして重力を測るのは、地球上で重力計を使って各地の重力を計るのと原理的に同じことであるが、地球の場合は海があったり、陸でも重力の測定が行なわれていない場所が多い。

ルナー・オービターのドップラー観測は非常に安定な周波数の電波を使って行なわれているので、速度を0.1mm/secという、驚くべき精度までよみとれる。また軌道の高さは一定ではないので、ある種の仮定の下に、加速度を月面上150kmのものに換算する。こうして150kmの高さでの月による加速度をmgalを単位として月面図にかきこむことができるのである。実際には、月の重力そのものではなく、月が球対称の質量分布をしていると仮定した重力場からの差を示すことが多く、これがいわ

* 東京天文台

Y. Kozai: Mascons and the Laser Ranging Retro-Reflector