

論文内容の要旨

論文題目

A Study on the Heat Flow of the Moon:

Detailed analysis of the Apollo dataset and implications for the lunar heat flow value

(月熱流量に関する研究：アポロデータの詳細解析と熱流量値の推定)

氏名 齋藤靖之

月は地球以外で唯一、観測プローブを用いた熱流量観測が直接行われた天体である。天体の表面熱流量は、天体内部の発熱量を推定するための観測量なので、天体内部を探るために不可欠な観測量である。熱流量値 q は、熱伝導率 k と深さ方向の温度勾配 dT/dz で、次のように表される。

$$q = -\kappa \frac{dT}{dz} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

ただし T は温度、 z は深さである。熱流量値の単位は W/m^2 なので、単位時間、単位面積あたりの熱通過量を表す。表面熱流量の平均値は、天体内部から宇宙空間への熱放射量となる。現在の月は地震学、測地学的知見(e.g.[1])から中心から半径約 300 km を除き、ほぼ熱的に定常状態にあるので、月内部の発熱源は放射性元素によるものと仮定できる。放射性元素として U、Th そして K が、月内部の主要な発熱源となる。U、Th は難揮発性元素であるため、惑星の形成時からその量は放射壊変を除いて変化しないと考えられる。また U、Th、K は全て親石元素かつ不適合元素である。したがってこの 3 つの元素は、月の進化の過程で類似した挙動をとると考えられ、その存在比はほぼ不変と仮定できる。実際、アポロリターンサンプルの解析の結果、ほとんどの岩石で Th/U 比、K/U 比は一定の値となることがわかった(e.g.[2])。U、Th そして K の個々の発熱量は既知なので、月内部の総発熱量から各元素のバルク存在度を推定できる。そこで本研究では熱流量観測値から U のバルク存在度を推定し、地球や隕石の U 存在度と比較することで月の材料物質に

ついて議論を行う。

月熱流量観測はアポロ 15 号、17 号ミッションによって実施され、それぞれの観測地点で 2 箇所、計 4 箇所測定された。観測はアポロ 15 号が 1971 年 7 月から、17 号が 1972 年 12 月から開始され、ともに 1977 年 9 月 30 日までの約 6 年間実施された[3]。観測は長さ 1.02 m のプローブを用い、上下端を含めて 4 点の深さでの温度履歴を測定した。アポロ 17 号 probe1 の観測結果を図 1 に示す。図 1 に示した温度履歴は、次のような 3 つの特徴を持つことが分かる。それは全ての温度履歴は少なくとも 1 つの極小値を持っていること、一回極小を持ったあとに数年間温度が上昇し続けていること、観測開始時と比較して観測終了時のセンサ間の温度差が約 3 分の 1 に小さくなっていることであり、これらの特徴は、全ての観測データで共通してみられる。

アポロ熱流量観測の主任研究者だった Langseth は、1974 年末までの観測データを用いて、月熱流量観測値をアポロ 15 号地点では 21 mW/m^2 、アポロ 17 号地点では 16 mW/m^2 と推定し、月の全球平均値を 18 mW/m^2 と決定した[2]。

ところが 1977 年まで観測が行われているにもかかわらず[3]、1975 年以降のデータは解析されていなかった。そこで本研究で 1975 年以降の観測データを探索した結果、1976 年 3 月以降 1977 年 9 月までの観測データの発掘、入手に成功した。このデータはバイナリのテレメトリデータで、センサ回路中の電圧を記録したものである。従って電圧値から温度に変換する必要がある。しかしその変換係数の値を見出すことが出来なかった。そこで全てのセンサで、温度と抵抗値の関係が同一であることを仮定して温度に変換した。その結果も図 1 に示した(1976 年以降のデータ)。1974 年末までの観測データは米国 NSSDC (National Space Science Data Center) から入手できる。このデータは既に温度に変換されたものだった。

この新しく追加されたデータを含め、数年間にわたる温度上昇の要因を探り、熱流量値を推定することを試みた。図 1 から、月レゴリス中における温度履歴は (1)一旦極小を持ち、その後上昇に転じる(2)その極小の位置は深さ方向に遅れをもって伝播している(3)温度上昇は少なくとも 5 年間継続して上昇し続けている、という特徴を見出すことが出来る。これらの特徴は、全ての観測データで共通している。温度履歴がこの 3 つの特徴を全て満たすには、月面からの継続した熱入力が必要不可欠であるが、Langseth らは、この温度上昇は定常に至る過程であると主張した。本研究で定常過程を再現する数値実験を試みた結果、長くて 2 ヶ月でほぼ平衡に至ることが分かった。従ってこの温度上昇は、何らかの要因によってセンサに熱入力があった結果であると考えられる。

温度上昇の原因として、大きく 2 つに分けて考察を行った。それは観測機器に由来するものと、それ以外のものである。観測機器に由来する要因として(a)回路の経年劣化(b)ケーブルあるいは

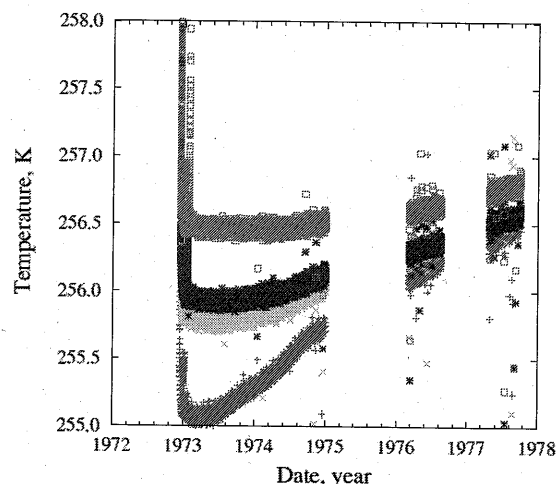


図 1: アポロ 17 号プローブ 1 で得られた 5 年間の温度履歴。1976 年以降のデータが新たに入手されたデータである。4 本のデータはそれぞれ 130cm(赤)、177cm(緑)、186cm(青)、233cm(ピンク)の深さで取得されたものである。

bore-stem を通って月面からレゴリス内部へ熱伝達(c)センサ自身の発熱の3つがもっとも影響を与えらると思われる。そこでこれらの影響を精査したが、これら3つの要因が観測結果に影響を与えるほど大きいとは考えにくいことが分かった。そこで数年間の温度上昇を説明するために観測機器以外に由来する要因を調べた。5年以上の長期間、温度変動を引き起こす可能性のある現象として太陽活動の変化、そして月の運動による太陽位相角や太陽との距離の変化が考えられる。太陽の11年周期の活動変動は0.2%程度で、月面温度の変化は1 K以下である。図1に示した観測結果はそれ以上の温度上昇を示しているため、太陽活動によるものでないといえる。また月は18.6年周期の歳差運動を行っており、太陽位相角をその周期で変化させ、月面温度を約5 K変化させる。しかしこの変化は1年周期の振幅を18.6年で変化させるもので、長期間での平均値を変化させるものではない。

一方で観測地点付近は起伏に囲まれた場所である。地形の存在によって日の出、日の入りの時刻が変化するために、日照時間が少なくとも10時間、地形がない場合と比べて短くなる。歳差運動によって日の出、日の入りの場所が変わるが、地形が変化しているため歳差運動の周期で日の出、日の入り時刻に変化が現れる。これが日照時間の変化となり、1月期の平均温度を変化させる。観測データから日照時間と1月期の平均温度の関係を調べたところ、よい相関関係にあることを見出した。5年間の観測中、データが欠落している期間が2回あるので断定することは難しいが、積極的に否定する要因もない。地形による日照時間の変化が表面温度の変動を引き起こし、regolith 内部を伝播して、probe で観測されたと考えられる。

観測機器が展開された地点における、周囲の様子が宇宙飛行士によって撮影されている。この写真から、地形はほぼ直線で近似できる変化をしているために、日照時間の変動は正弦曲線で近似できると考えられる。これによる変化がregolith 中を伝播したと考えられるので、図1に示した各深さで取得された温度履歴を正弦曲線で近似し、その中心値を求めた。この中心値が各深さでの平衡温度となり、平衡温度から温度勾配を計算すると0.323 K/mとなる。また1年、そして18.6年の周期変動を用いた懐石から、熱伝導率は14 mW/m/Kと推定された。18.6年周期に対し、観測期間は5年と短く、不確定な要素が大きいといえることなどから、本研究では年周期変動から推定された値を採用した。求めた温度勾配と熱伝導率を用いて熱流量値を計算すると、4.7 mW/m²となる。さらにこれが月での全球平均値であると仮定すると、月のバルクU存在度は12 ppbと推定される。地球(20ppb; e.g.[4])の値と比較すると、約半分の値である。これは月と地球の構成物質が異なる可能性を示すものであり、月は地球よりも難揮発性元素に富むという、従来の考え方にそぐわない。

アポロ以後、lunar prospector や clementine による月の全球探査が行われた。その結果、アポロ熱流量観測は、全球的にみてもThが集中しているPKT (Procellarum KREEP Terrain) と呼ばれる地域で観測されたことが明らかになった[5]。全球平均値を推定するためには、月内部での発熱元素の分布を推定する必要がある。しかし前述の全球探査の結果や、最近見つかった、月裏側の高地地殻やPKTの外側の海が起源と考えられる月隕石の分析結果[7]から、PKTほどKREEPが濃集している領域が、月内部にあるとは考えにくい。したがって月内部の発熱量は小さく、月全球の熱流量平均値は、PKT内部で観測された本研究による値より低くなることを示唆している。さ

らに熱流量観測値は直下の地下構造の影響を受け、本来観測されるだろう値より高い値が観測されている可能性が指摘されている。以上の議論から、月全球の熱流量平均値は下方修正され、バルク U 存在度も小さくなる。したがって月が難揮発性元素に富む天体[8]とは考えにくい。また Al や Ca は、U と同様、難揮発性元素であり、厚い地殻の存在は、月は地球よりも難揮発性元素に富むとする大きな根拠となっていた。ところが近年の月震データの再解析結果から、月地殻は従来想定されていた厚さ(60km)の半分程度という結果が得られている(e.g. [9])。これは月地殻に多く含まれている Al や Ca のバルク存在度の推定値を下方修正されることを意味し、本研究結果と調和的である。したがって月と地球の難揮発性元素存在度は異なり、その材料物質も異なる可能性が高いと考えられる。

- [1] Nakamura, Y., Farside deep moonquakes and deep interior of the Moon, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 110, E1, E01001, 2005
- [2] Papike, J. J., G. Ryder, and C. K. Shearer., Lunar samples, in *Planetary Materials*, edited by J. J. Papike, pp.5143—5161, Mineral. Soc. Of Am., Washington, D. C., 1998.
- [3] Bates, J. R., W. W. Lauderdale and H. Kernaghan. *ALSEP Termination Report*. NASA Reference Langseth M. G., S. J. Keihm and K. Peters. Revised lunar heat-flow values. In *Proc. of 7th Lunar Sci. Conf.*, Vol.7, pp. 3143--3171, 1976.
- [4] Mason, B., *Cosmochemistry, Part 1, Meteorites*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap, 132. 1979
- [5] Prettyman, T. H., W. C. Feldman, D. J. Lawrence, G. W. McKinney, A. B. Binder, R. C. Elphic, O. M. Gasnault, S. Maurice, and K. R. Moore. Library Least Squares Analysis of Lunar Prospector Gamma Ray Spectra. In *Proc. Lunar and Planet. Inst. Conf. Abs.*, p. 2012, 2002.
- [6] Haskin, L. A. The Imbrium impact event and the thorium distribution at the lunar highlands surface, *J. Geophys. Res.*, 103(E1), pp. 1679—1689, 1998.
- [7] Arai, T., H. Takeda, A. Yamaguchi, and H. Takeda, A new model of lunar crust and origins of asymmetric composition of Feldspathic Highland Terrane, *Earth, Planet. and Space* (in press).
- [8] Taylor, S. R., Geochemical considerations, In *Origin of the Moon*, Proc. of the Conf., Kona, HI, Lunar and Planetary Institute, p. 125-143., 1986.
- [9] Lognonnè, P., J. Gagnepain-Beyneix, and H. Chenet. A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon. *Earth and Planet. Sci. Lett.* Vol. 211, pp. 27-44. 2003.