

## 「平成18年度最優秀発表賞受賞論文」

# 未解析だったアポロ熱流量観測データ

齋藤 靖之<sup>1,2</sup>, 田中 智<sup>2</sup>, 滝田 隼<sup>1,2</sup>, 宝来 帰一<sup>2</sup>, アクセル ハゲルマン<sup>3</sup>

(要旨) 熱流量観測は、惑星内部を「直接」観測することのできる数少ない方法のうちのひとつである。地球での熱流量観測は、2万を超える観測点で実施されている。しかし地球以外で直接、熱流量観測が実施された天体は月だけであり、しかもアポロ15号、17号着陸地点の2点のみである。したがって月の内部構造や進化、起源についての議論を行うために、この限られた月熱流量観測の結果を十分に吟味する必要がある。そのような貴重なデータの一部が、未解析であることが最近になって明らかになった[1]。この未解析期間のデータを既に解析されていた期間のデータと合わせ解析した結果、月の熱流量観測値がこれまで広く信じられてきた値の約1/4に修正された。これは、これまでに組み立てられてきた月の熱史、起源論を最初から考え直す必要があることを示唆している。

## 1. アポロミッションと熱流量観測

### 1.1 天体の表面熱流量とその観測意義

熱流量とは、天体表面から大気や宇宙空間へ逃げる単位面積、単位時間あたりの熱量で、

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

と表される。ここで $q$ は熱流量、 $\kappa$ は熱伝導率、 $T$ は温度、 $z$ は深さで $dT/dz$ は深さ方向の温度勾配である。マイナスがついているのは、熱流は温度の高いところから低いところへ流れるため、温度勾配の値が負になるからである。熱流量を観測するということは、天体内部の総発熱量を観測していることと、ほぼ同じ意味を持つ。したがって熱流量の観測値が天体の進化や起源を探るために、不可欠な観測量であることは想像に難くない。

一般に $U$ 、 $Th$ などの放射性元素による発熱が、惑

星内部の主要な発熱源である(惑星によっては集積エネルギーの解放や潮汐加熱が重要であることもある)。そのため熱流量観測は、 $U$ や $Th$ のバルク存在度を推定するための、直接の観測量となる。さらに $U$ と $Th$ は発熱性放射性元素であると同時に、難揮発性元素でもあるので、天体形成時からその総量は(放射壊変をのぞいて)ほぼ不変であると仮定できる。つまり $U$ や $Th$ のバルク存在度を推定することは、天体の起源物質を探ることに直結する。以上のことから、天体の表面熱流量は、その天体の起源物質を推定するために直接の情報をもつと言える。したがって月表面熱流量値を正確に決めることは、月の進化や起源はもちろんのこと、他の惑星(特に地球!)の内部構造や起源を議論する上でも重要である。

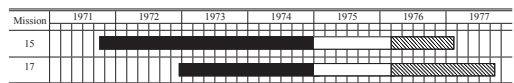


図1: アポロ熱流量観測期間とデータアーカイブの保存状況。1976年3月1日から1977年9月30日までの期間(斜線の期間)のデータが新しくアーカイブされた。図中の黒く塗りつぶされた期間のデータはNSSDCで公開されている。白抜きの期間のデータは現在も検索中である。

1. 東京大学大学院 地球惑星科学専攻  
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部  
3. Open University, Planetary and Space Sciences Research Institute

## 1.2 アポロ熱流量測定実験

月の表面熱流量測定実験（Heat Flow Experiment, 以下HFE）はアポロミッションでのALSEP（Apollo Lunar Science Experiments Package）の一部としてアポロ15号，17号ミッションによって実施された。観測地点はそれぞれHadley-Rille (21.6N, 3.7E), Taurus-Littrow (20.2N, 30.8E) で，観測期間はそれぞれ1971年7月31日から1977年1月16日まで，1972年12月14日から1977年9月30日までである[2]。アポロHFEでは，月レゴリスの熱伝導率と深さ方向の温度勾配を独立に測定した。測定された月の熱流量値はアポロ15号で $31 \text{ mW/m}^2$  [3]，17号着陸地点付近で $28 \text{ mW/m}^2$  [4]と報告された。しかしこれらの結果は，観測開始から2ヶ月以下の期間で決められた値であった。

アポロHFEのP.I. (Principal Investigator) だったLangsethらは，観測開始から1974年までの約3年半の観測データを用いて，熱伝導率と温度勾配測定の方の値を再検討した。その結果，月レゴリスの熱伝導率は30-50%，温度勾配は5%程度の修正が行われ，熱流量観測値はアポロ15号着陸地点付近で $21 \text{ mW/m}^2$ ，17号着陸地点付近で $16 \text{ mW/m}^2$ と報告し，さらに月全球での平均値は $18 \text{ mW/m}^2$ と結論付けた[5]。今でもこれらの値は，月の熱流量観測値として広く受け入れられている。

アポロHFE観測データの保存状況について，図1に示す。ALSEP Termination Report[2]によれば，アポロHFE実施期間は1977年9月30日までと明記されている。しかしながらLangsethらはなぜか1975年以降のデータ解析を行わなかった。その後，1975年以降に取得されたHFEデータは，世に知られることなく忘れ去られ，Langsethも1997年にこの世を去った[6]。Langsethと親交のあった何人かの方に，直接この理由を尋ねてみた。しかし明確な回答は得られず，“もう十分と思ったのではないか？”という憶測しか得られなかった。しかしだからといって，Langsethらの解析に全く問題点がなかったわけではない。

## 2. Langsethの解析結果とその問題点

アポロ17号プローブ1で得られたデータを図2に示す。このデータは現在，NSSDC (National Space Science Data Center) [7]から誰でも入手できる。この約3年半の観測データから，Langsethは温度勾配と熱伝導率を推定し，熱流量値を決めた。このデータは次に述べるような，3つの特徴を有する。

- (a) 観測初期の急激な冷却期間を除き，一貫してセンサー間の温度差が減少し続けている。
- (b) 各深さでの温度履歴に極小値を持つ
- (c) 温度プロファイル中の極小値は，浅いところに設置されたセンサーから深いところのセンサーへ時間遅れをもって伝播している。

これらの特徴は，アポロ15号で取得されたデータを含め，全てのHFEによる観測結果で確認できる特徴である。また，アポロ17号のプローブ1，2で得られた温度履歴データで，同じ深さでは極小がほぼ同時に現れることは興味深い。

Langsethらは温度上昇についてのみ言及し，それは熱平衡状態へ至る過程であると結論付けた。また平衡状態に至るには，最も深いところにあるセンサ

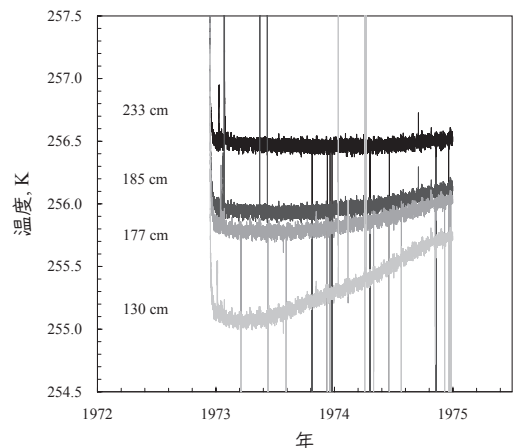


図2：アポロ17号プローブ1で観測された月レゴリス中の温度変化。図で示した4つのデータは，上から深さ233cm，185cm，177cm，130cmで計測されたもの。

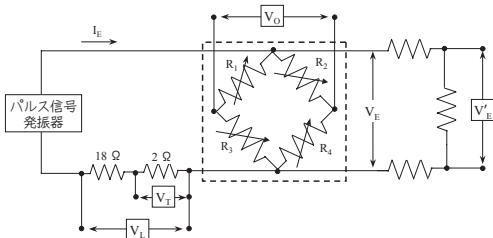


図3：簡略したアポロ HFE 回路 [10]。太い点線で囲んだ部分がプローブ部分である。I は電流、V は電圧、R は抵抗を表す。四角で囲まれた4つの電圧値がテレメトリデータとして地球に送られる。R<sub>1</sub> から R<sub>4</sub> は白金抵抗温度計で、この抵抗値の測定により温度が決定される。なお R<sub>1</sub> と R<sub>4</sub>、R<sub>2</sub> と R<sub>3</sub> は同じ深さで温度測定を行っている。

一で、5-7年かかるという見解を示した[5]。最終的に、Langsethらは熱伝導率と温度勾配を次のようにして求めた。

彼らは3年半の時系列データの周波数解析を行い、年周期変動に対応する振幅を求め、表面温度の年周期変動に対応する振幅の減衰率から熱拡散率を推定した。そして地上での密度と定圧比熱[8]の測定結果を踏まえて、熱伝導率を決定した。また温度勾配はレゴリスを半無限媒質と仮定し、観測初期の冷却の度合いから平衡温度を推定した。

しかしLangsethらの温度勾配の推定方法には、少なくとも3つの疑問が残る。まず温度上昇が熱平衡状態への過程であるとする根拠が十分に示されていないこと、またそうであれば（レゴリスを半無限媒質と仮定できるので）誤差関数で説明されるべきであるができないこと、温度プロファイルが極小値をもち、深さ方向の時間遅れが説明できないことである。特に観測された3年半の間に、センサー間の温度差が約半分になっているにもかかわらず、観測初期のデータしか解析に使っていない点は注意すべき点である。

### 3. 未解析データの入手と仮定事項

ここでは詳細は省くが、1976年3月以降の未解析データは、宇宙科学研究本部（JAXA/ISAS）の中に

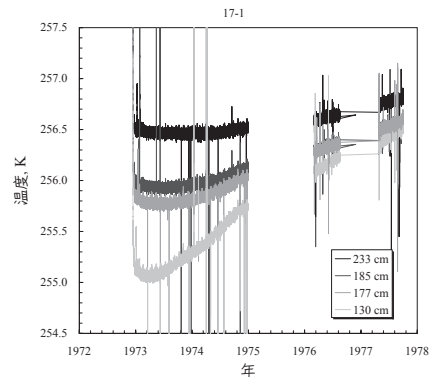


図4：アポロ17号プローブ1で得られた観測結果。新しく得られたデータ（1976年3月以降）。1976年7月15日から1977年3月24日までは Lunar Surface Profiling Experiment が実施されたため、この期間に HFE は実施されていない[9]。

あった<sup>1</sup>。ただしこのデータは、バイナリのテレメトリデータである。そして記録されているのは回路内のある場所の電圧値であり、温度ではない。したがって電圧から温度に変換するための変換式が必要となる。数多くの文献に目を通した結果、変換式は明らかになったが、式中の定数が不明であった。ただ幸いなことに、回路図とHFEについて詳細に書かれた文書を手に入れることが出来た[10]。図3にその簡単な回路図を示す。ここで重要な点は、このHFEのセンサー部分に Wheatstoneブリッジ回路が利用されていることである。ブリッジ回路が使われていることから、かなり厳密な較正が施されたことを期待できる。そこで電圧値から温度に変換する際に、次の3つの仮定を行った。1点目はR<sub>1</sub>からR<sub>4</sub>の各白金抵抗センサーは、すべて同じ特性（ある基準温度に対する抵抗値と、温度変化に伴って抵抗値が変化する際の係数の値）を仮定したことである。2点目は

$$V_E = z \times V'_E \quad (2)$$

で表される  $z$  の値を仮定したことである。テレメトリデータには、ブリッジ回路の入力電圧である  $V_E$  ではなく、 $V'_E$  が記録されている。図3で示したように、 $V_E$

\*1. 著者の所属する研究室で保管されていた。なぜなら水谷仁（当時）宇宙科学研究本部教授（現在 Newton 編集長）が、全 ALSEP データのアーカイブを行ったテキサス大学の中村吉雄教授に協力したため、宇宙研にも Exabyte Tape に記録されたコピーが送られたからである [9]。

の値は3つの抵抗を用いて小さな値に分割されるが、これらの抵抗値が不明である。この(2)式中の減衰係数を $z$ 値と呼ぶ[10]。 $z$ 値は出力される温度に対して、オフセットのような働きをするが、未知数は $z$ 値だけであるので、すでに公開されている1974年までのデータに合うように、 $z$ 値を推定した。3点目は、同じ深さで測定を行っている $R_1$ と $R_4$ 、 $R_2$ と $R_3$ は、同じ抵抗値をもつと仮定したことである。

新しく得られたデータを含め、現在までに得られた全ての観測結果(アポロ17, プローブ1)を図4に示す。ここで1974年の終わりから1976年3月まで14ヶ月のギャップがある。そのためこの温度上昇が、なぜ起きているか明らかにしななければ、外挿することができない。図4に示した1976年以降のデータは、5.3節で述べる方法によって $z$ 値を推定し、温度に変換されたものである。

## 4. なぜレゴリスの温度は上昇し続けているか？

前章で述べた方法によって、1976年3月以降の温度プロファイルが得られた。ここで驚くべきことは、観測開始から5年経過後もまだ温度上昇が継続している点である。この理由が明らかにしなければ、正しい $z$ 値を推定することが出来ない。

### 4.1 観測機器そのものの異常

最初に疑うべき要因は、回路の経年変化(劣化)の影響である。そこでHFE回路を精査した。アポロHFEでは測定のため、電圧印加をパルス状かつ電位差の正負を入れ替えて測定するratio measurement techniqueが採用されている。この方法によって、経年変化(劣化)によって変化すると考えられるoffset, gainの値はそもそもテレメトリデータの中に反映されない。またアポロ15号, 17号の観測でそれぞれアンブとマルチプレクサーが1つだけ使用されており、しかもこのアンブは高いインピーダンスを持つ。このことは回路に異常が起これば、全てのセンサーで得られた

データが”同時”かつ”同様”に異常を示すはずであること、そして回路に起因する変化はテレメトリデータにほとんど影響を与えないことを意味する。しかし各深さでの温度上昇が一樣ではなく、温度プロファイル中に極小値が現れるタイミングも異なっている。したがって数年にわたる温度上昇は、観測機器(回路)そのものの変化ではなく、センサーが本来の温度を記録した結果であると考えられる。

### 4.2 観測機器の存在による影響

次に考えられる要因は、プローブ(ケーブル)あるいはプローブが挿入された空孔壁面を支えるbore-stemによって、月面から熱輸送が行われていることと、センサー自身の発熱による温度上昇である。プローブ内部には信号伝播のために、厚く断熱材に覆われた金属(マンガニン)線が存在する。マンガニン線の熱伝導率は、レゴリスよりもはるかに高い(約10 W/m/K)ので伝熱線ともなる可能性がある。しかしその線径が細いこと、各センサー間での極小値の位相遅れがマンガニン線のような高い熱伝導率をもつものでは説明が付けられないため、ケーブルから伝熱していると考えにくい。またbore-stemはエポキシ樹脂で作られており、レゴリスの熱伝導率と同程度(約0.1 W/m/K)であることから、bore-stemも表面からの熱輸送を行っていたとは考えにくい。いずれにしる深さ30cm以深では、レゴリス温度は深さとともに上昇し、深さ2mで約256 Kに達している。この温度は月面の(平均)表面温度(約210 K)よりも高い。したがって表面からレゴリスの内部へ一方向に、有意な熱輸送があったとは考えにくい。

温度を計測しているセンサーは抵抗温度計なので、電圧がかかれば発熱する。しかし流れる電流量が十分小さく、その発熱量は $0.1\mu\text{W}$ である。さらに1回の測定シーケンス2.4秒の間に、パルス電圧の印加はわずか2.6ミリ秒で、十分な冷却時間が設けられている。この程度の発熱量では、周辺のレゴリスを数度も上げるほどの熱量にならない。以上の議論により、観測機

器が存在していることによって、温度上昇が起こる可能性は低いといえる。

### 4.3 太陽輻射量の変化

残る可能性は、月面が受ける太陽輻射量が増加する可能性である。もしこれが起きているならば、月面温度の変化がレゴリス内部に伝播して温度が上昇したと考えられる。

そこで5年以上の変動周期を持つ現象として、約11年の周期を持つ太陽活動の変化による要因の検討を行った。1978年以降の太陽輻射量の観測結果が、NGDC (National Geophysical Data Center) で公開されている[11]。しかしどの観測結果も太陽輻射量の変化は最大でも0.2%以下で、月面の温度を数Kも変化させる可能性はほとんどない。

さらにJPLから提供されている天文暦DE405[12]を用いて太陽-月間・地球-月間の距離の変動、そして月の歳差運動(自転軸のふらつき)について精査した。その結果、5年以上の周期で、月面温度を十分な大きさで変化させる変動として、18.6年周期の歳差運動が有意であることを見出した。その様子を図5に示す。この変化は月の季節変化に相当し、18.6年周期で太陽高度の変化をもたらす。その結果18.6年周期で月面温度が変化し(数K)、これがレゴリス中へ伝播することによって、数年間にわたる温度上昇を引き起こしていると考えられる。変動周期が長い場合、表面温度の

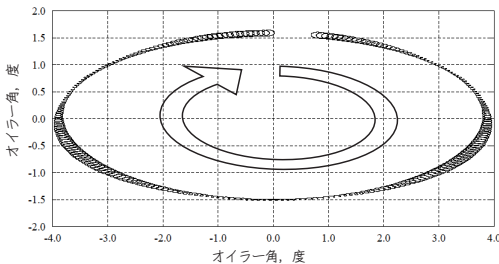


図5：1960年から1978年までの月自転軸方向の変化。中心の(0,0)は黄道面に対して垂直な方向を意味する。18.6年周期の歳差運動に加えて、1ヶ月周期の強制振動が顕著である。交転月(27.212日周期)と近点月(27.555日周期)の成分が重なっているため、6年周期のうなりも見える。

変化がわずかであってもほとんど減衰せずにレゴリス内部へ伝播する。月面に置かれているALSEP Central StationやPSE (Passive Seismic Experiment) の機器ボックス中に温度計が付けられており、ともに1971年から1977年まで継続して得られている[2]。この結果によると、観測開始から月面温度は上昇し続けており、(データは1977年までだが)1978年ごろに極大値を持つような温度プロファイルが得られている。これは18.6年の歳差運動による温度変動の予測と一致する。

18.6年の歳差運動でレゴリス中の温度変動が引き起こされているならば、振幅の減衰率と極小値の位相遅れが次の式によって予測できる。

$$\Delta T(z,t) = Ae^{-z\sqrt{\omega/2\lambda}} \cos(\omega t - z\sqrt{\omega/2\lambda}) \quad (2)$$

ここでAは月面での温度変動、zは深さ、 $\omega$ は周期、 $\lambda$ は熱拡散率、tは時間である。図6にその結果を示す。振幅減衰率と位相遅れの両方について、良く説明できている。以上の議論より、月レゴリスの温度が数年間上昇し続けた理由は、月の歳差運動であるといえる。

ただプローブ2の振幅減衰率の計算結果が、プローブ1と比較して小さい。これについてLangsethは、プローブ2の近くに大きな岩石が存在し、温度場が乱されたためと説明しているが、これを裏付ける証拠は何一つなく、我々も納得のいく説明が出来ていない。しかし両プローブで極小値が現れるタイミングがほぼ同

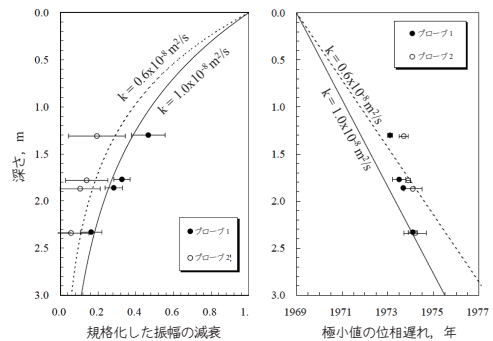


図6：アポロ17号プローブ1と2の観測結果における温度変動の振幅減衰率と位相遅れ。破線と実線は理論曲線で、熱拡散率によって一意に決まる。ここで熱拡散率は、年周期変動から推定された値の、誤差を含む上限値と下限値での結果を用いた。

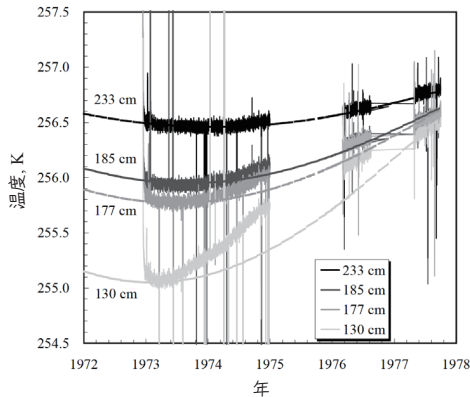


図7：正弦曲線でフィッティングされたアポロ17号プローブ1の全観測データ。最も浅い130cmでの観測結果を除けば、観測結果を良く説明できている。

時であることを、うまく説明することができる。

また位相遅れの結果について、もっとも浅い(130 cm)ところに設置されているセンサーの結果が、大きく外れている。これはbore-stem内部の輻射によって温度が上昇させられていると考えられる。しかしわずかに1 Kの変化を定量的に評価することも難しい。

歳差運動によって温度が変動しているならば、この温度変動は正弦曲線でフィッティングができる。この際の正弦曲線の中心値が、各深さでの平衡温度であるといえる。したがって、この各深さでの平衡温度を用いて、深さ方向の温度勾配を決定できる。このようにして温度変化の原因が明らかになったので、正弦曲線を用いることで1974年までのデータを外挿できる。そこで最も温度変動が安定している、アポロ17号プローブ2、234cmでの温度プロファイルを用いてz値を決定した。得られたz値は183.39であった。

## 5. 下方修正された月熱流量値と月材料物質の推定

本研究によって新しく得られた月レゴリス中の温度勾配は、プローブ1、2ともに約0.3 K/mである。図8に、アポロ17号着陸地点での温度勾配の観測結果を、Langseth et al. (1976) [5]の結果と共に示す。本研究によって新しく求められた温度勾配は、Langsethの

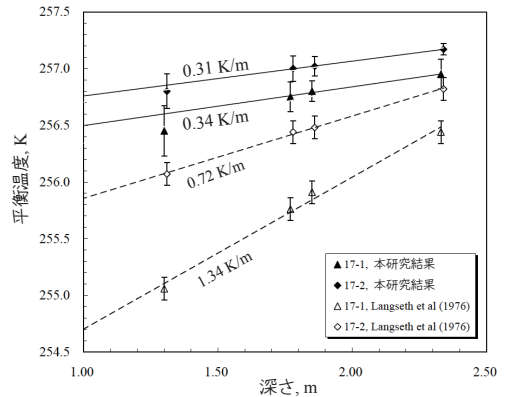


図8：修正されたレゴリス中の深さ方向の温度勾配。全ての直線は、最も浅いところのセンサーの結果を除いて、最小二乗法によって決定した。

結果と比較して次の2つの特徴を持つ。1点目は温度勾配の値が、プローブ1とプローブ2でほぼ一致する点である。2点目は、正しい結果であるとLangsethが主張したプローブ1の結果と比較して、値が1/4になることである。これは月熱流量値も1/4となることを意味する。

月レゴリスの熱伝導率を12 mW/m/Kと仮定すると[5]、アポロ17号着陸地点付近での熱流量観測値は3.7 mW/m<sup>2</sup>となる。この値は(当然であるが)Langsethによる値の1/4の値である。これは推定される月内部の総発熱量も、1/4になることを意味する。

Langsethらは月が熱的に定常であること、放射性元素が月内部で一様であることを仮定し、月内部のバルクU存在度を46 ppbと推定した[5]。一方で本研究によって、月内部のバルクU存在度は9.5 ppbと推定される。この値も月が熱的に定常であることを仮定しているため、月バルクのU存在度の上限値であると考えられる。この結果は地球のシリケート部分(地殻+マントル; 20 ppb) [13-14]や普通コンドライト(16 ppb) [15]と比較して約半分の値であり、月の材料物質は、地球や普通コンドライトとは、異なるものから出来た可能性を示唆する。

## 6. まとめと今後の課題

本研究の結論として、月熱流量値が大幅に下方修正

され、月の材料物質は地球と異なるという結果を得た。しかしこれは最終的な結論ではない、それはレゴリスの熱伝導率の再検討を行っていないからである。1.1節で述べたように、熱流量値は温度勾配と熱伝導率の積で表される。つまり熱伝導率は、熱流量値の決定に際して、温度勾配と同等の重みを持っている。したがってその再評価なしに、熱流量値が決定されたと結論付けることはできない。また、JPL DE405を用いた、アポロHFEの観測結果の数値再現実験も試みたが出来ていない。これは月レゴリスが深さ方向に大きく変化しているためであると考えられる[16-17]。後者を完璧させることは難しい。しかしLangsethが正しくない結果だと結論付けたヒータ印加によるその場実験データの再解析、実際に（擬似）レゴリスの熱伝導率測定実験を実施することを含め、レゴリスの熱伝導率を精度良く決定することが、今後の課題であると考えている。

## 謝 辞

未解析だったアポロデータの発掘に際して、テキサス大学の中村吉雄教授と東京工業大学の小林直樹氏に大変お世話になりました。この場を借りて感謝の意を申し上げます。また有益なコメントを下さった査読の高木様（愛知東邦大学）にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 斎藤他, 2006, JGU予稿集, #P232-P008
- [2] Bates, J. R. et al., 1979, NASA RP-1036
- [3] Langseth, M. G. et al., 1972, NASA SP-289, 11-1
- [4] Langseth, M. G. et al., 1973, NASA SP-330, 9-1
- [5] Langseth, M. G. et al., 1976, Proc. of Lunar Sci. Conf. 3, 3143
- [6] <http://www.hq.nasa.gov/alsj/langseth.html>
- [7] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>
- [8] Carrier, W. D. et al., 1974, The Moon 14, 263
- [9] Nakamura, Y., 1992, UITG Tech. Rep. 118
- [10] Lauderdale, W.W. and Eichelman, W.F., 1974, NASA TM X-58131
- [11] <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarirradiance.html#sorce>
- [12] <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>
- [13] Ringwood, A. E., 1979, Springer-Verlag New York, Inc.
- [14] Taylor, S. R., 1982, Planet. Sci.
- [15] Mason, B., 1979, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.,
- [16] Keihm et al., 1973, Lunar Sci. Conf. 3, 2503
- [17] Horai, K, 1981, Phys. of Earth and Planet. Interior 27, 60