

月惑星熱流量の精密観測手法に関する検討と測定プローブの基礎開発 Investigation for the precise measurement method of lunar and planetary heat flow and development of heat flow probe

堀川 大和^{1*}, 田中 智², 坂谷 尚哉³, 滝田 隼¹, 小川 和律²

Yamato Horikawa^{1*}, Satoshi Tanaka², Naoya Sakatani³, Jun Takita¹, Kazunori Ogawa²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 総合研究大学院大学

¹The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³The Graduate University for Advanced Studies

月惑星における地殻熱流量を精密に観測することは、天体内部の温度分布や熱進化、材料物質に制約を与える上で重要である。地球以外の天体で直接、熱流量観測が実施されたのは月におけるアポロ15号、17号着陸地点の2地点のみである。将来の月惑星探査における地球物理学的観測を一度のミッションで複数地点で行うために、宇宙科学研究所においてペネトレータが開発された。これには熱流量観測システムが搭載されているが耐衝撃性を重視した設計の結果、熱流量計が構体表面上、もしくは内部に搭載されているため、レゴリスと貫入プローブの熱伝導率の違いによるプローブ周りのレゴリス温度場の変化に影響されやすく、熱流量を10%以下の高精度で決定するのは困難である。

そこで本研究では、熱流量計を入れた細いプローブを貫入プローブの側面から伸展させることで、貫入による熱擾乱の影響が少ない位置で熱流量値を目標とする10%より高い精度で計測できる装置を検討した。本発表では、熱伝導率と温度勾配の測定原理や、ペネトレータ熱数学モデルに基づいた数値シミュレーションから、熱流量プローブの熱流量決定精度を推定した。さらに熱流量プローブを試作し、その性能試験に基づいて熱伝導率測定精度を求め、両者の比較検討を行った結果を報告する。

数値シミュレーションではペネトレータの熱数学モデル、周囲のレゴリスの熱物性を適切に設定し、熱流量プローブを温度勾配精度が最も高いプローブの先端部分と、熱伝導率精度が最も高いプローブの中心部分に配置するモデルを構築した。プローブを設置して十分時間が経過した定常状態における熱流量精度は、月レゴリスで約2.4%、火星レゴリスで約1.9%を得た。構体からの適切な距離を設定することは伸展プローブ材料の種類・長さ・直径を制約する。

熱伝導率測定精度を評価するために、ステンレス管にヒーターと温度センサーを挿入したセンサー（ニードルプローブ）を試作した。通常ではプローブの中心（中央）位置を測定するが、温度勾配測定はペネトレータ構体からできるだけ離して配置したいことを考慮して端点を含む複数の測温点を持つ熱流量プローブを製作した。また、センサーの全長は搭載性の観点から10cmとした。また、比較の為に線加熱法によるプローブを複数点実施した。大気圧と真空下でのガラスビーズの熱伝導率測定実験を行った結果、大気圧ではプローブの測温点を中心～中心から3cmの位置に配置すれば、目標とする熱伝導率測定精度（5%程度）を達成できることが分かった。プローブの中心に測温点を配置したとき、熱伝導率測定精度は最高値となる1.8%と求められた。一方、真空下では、熱流量プローブでの熱伝導率測定値と、比較測定のための線加熱法で測定した熱伝導率（0.0022W/m/K）とを比較すると、測温点の位置がプローブ中心から1-3cmの範囲で約35-84%の相対誤差が生じた。したがって月などの真空環境における熱伝導率測定精度は、熱伝導率の測定原理から求めた理論値と異なる傾向を示し、またリファレンスとした測定結果からも大きく異なる結果となった。

この差異が生じた原因を調べるために、測定物質（ガラスビーズ）を除去した状態、つまり空気中での温度上昇プロファイルを測定し、真空下において生じた相対誤差がプローブ由来の要因かガラスビーズ由来の要因かを調べた。その結果、期待したよりも温度上昇プロファイルはばらつくことが明らかになり、センサーの製造のばらつきの原因が示唆された。今後、真空下における熱流量プローブの測定精度を決めるために、この誤差要因を定量的に考察する必要がある。

キーワード: 熱流量, 月, 惑星, レゴリス

Keywords: heat flow, moon, planet, regolith