

概要

太陽系は、ガスの集積や塵の衝突合体を経て微惑星が形成され、これらが衝突を重ねることで原始惑星へと成長し、現在の太陽系に至ったと考えられている。一方、惑星や衛星サイズまで成長せずに現在まで残存している小惑星は、太陽系初期の情報を保持している可能性が高く、太陽系形成史を理解する上で重要な研究対象である。特に、小惑星は大気をもたず、外的環境の影響を直接受けるため、表層における物理的プロセスが天体の進化履歴を反映していると考えられる。このような観点から、天体表層に存在する岩石（ボルダー）が砂礫化し、レゴリスを形成するプロセスを理解することは、天体表層の物理的風化および進化を把握する上で不可欠である。

天体の特徴付ける物理パラメータのうち、本研究ではその中でもナノインデンテーション法によって評価可能な弾性・塑性および粘性パラメータに着目する。小惑星表面の岩石は、日周に伴う急激な温度変化によって生じる熱疲労破壊により崩壊すると考えられてきた。しかし、従来の純弾性体モデルが予測する岩石の寿命（約1万年）と、小惑星リュウグウなどの観測事実が示唆する数百万年規模の生存期間との間には、2桁以上の時間的乖離が存在する。この不整合を理解するためには、これまで試料サイズや脆弱性といった実験的制約により十分に考慮されてこなかった時間依存の変形特性、すなわち粘性の影響を定量的に評価することが重要である。このような特性を評価するためには、隕石やリターンサンプルのような微小かつ不均質な試料に対しても適用可能な力学評価手法が求められる。

本研究では、始原的な炭素質コンドライトであり、C型小惑星リュウグウとの関連が議論されている Tagish Lake 隕石および Tarda 隕石を対象に、ナノインデンテーション法を用いて微小領域における弾性・塑性および粘性特性を評価する。

さらに、得られた力学パラメータに基づいて小惑星表面における熱応力緩和プロセスを再検討し、従来の純弾性モデルに基づく破壊予測の妥当性を検証することを目的とする。

まず、隕石マトリクスのような不均質かつ脆弱な試料に対し、微小領域における力学応答を安定して評価するため、測定条件を最適化した。次いでクリープ試験を実施し、先行研究において適用実績のある4要素 Burgers モデルを用いた解析により、硬度やヤング率に加え、定常クリープ粘性係数を算出した。

その結果、炭素質コンドライトの粘性係数は $10^{11} \sim 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ オーダーと推定され、地球上の代表的な岩石である玄武岩と比較して、2桁以上低い値を示す傾向が認められた。また、算出された Maxwell 緩和時間は約15分程度であり、小惑星リュウグウの自転周期と比較して十分に短い時間スケールであることが明らかとなった。これらの結果は、温度変化により発生した熱応力が、次の熱サイクルを迎える前に粘性流動によって有意に緩和され得ることを定量的に示唆している。

本研究で得られた粘弾性パラメータに基づく評価モデル（Viscoelastic Evolution and Relaxation Model：VERM）は、脆弱な物質が過酷な熱環境下において長期間維持され得る物理的要因を理解する枠組みを与えるものであり、従来の理論と観測の間に存在していた不整合の解釈に寄与する。

本研究で得られた炭素質隕石の粘弾性パラメータは、小惑星などの微小天体における表層物質の力学的振る舞いを理解する第一歩となる。小惑星表層物質の理解に資する粘弾性特性に関する実データを提供することで、表層における熱疲労破壊や表面更新過程の理解の深化に貢献するものである。