

## 学位申請論文公開講演会

日時：2026 年 1 月 29 日(木) 15:00~

申請者：別所 秀将 (R 研)

場所：理学館 506 号室(原則として対面でおこないます)

題目：ジャミング転移点近傍における非線形力学応答

### 主論文の要旨

粉体やコロイドなど、熱揺らぎが無視できる大きさの粒子を容器に充填すると、ある密度 $\phi_j$ を超えたところで系全体が剛性を獲得し流動できなくなる。この現象はジャミング転移と呼ばれている。粒子配置がランダムなままであるにもかかわらず、弾性率や圧力、振動特性など様々な物理量が臨界的な挙動を示すため、統計力学の重要な研究対象となっている。

特に $\phi_j$ 近傍の系の力学応答は単純な弾性体と大きく異なる。通常の固体の応力は剪断歪みに比例し、かつその時間緩和は指数的である。しかし $\phi_j$ 近傍では、周期剪断歪みに対する応力緩和に指数緩和では記述できない異常な粘弾性が観測される。また、歪みに対する力学応答が非線形となるソフトニング現象も発見された。しかし、これまで異常粘弾性は主に線形応答領域で、ソフトニングは準静的歪み領域でのみ研究されてきた。本研究の目的は、時間依存しかつ大きな歪みに対する力学応答を数値的に解析することで、 $\phi_j$ 近傍における上記の2つの力学異常を統一的に理解することである。

まず、大振幅の周期振動歪みに対する力学応答を数値計算により、系統的に解析した。その結果、 $\phi_j$ より高密度側では、異常粘弾性とソフトニングを単純に重ね合わせたスケールリング則で説明できることを示した。しかし、 $\phi_j$ 直上でこのスケールリング則は破れ、さらに低密度側には新たな非線形緩和領域が現れることを見出した。これは低密度側で既に知られていた吸収状態転移という非平衡相転移へのクロスオーバを示唆している。

次に、剪断歪みを突然印加した後の過渡応答を、様々な大きさの歪みに対して解析した。歪みが小さければ、過渡応答と周期剪断応答は等価であるが、歪みが大きい非線形領域では両者は異なることが予想される。しかし数値計算の結果、過渡緩和の関数形は歪みの大きさに強く依存しないことが分かった。そこで、過渡応答の長時間極限における粒子配置に対して線形近似のもと基準振動解析を行い、緩和関数の理論的再現を試みたが、歪みが大きい場合における緩和を再現できなかった。これは緩和の振る舞いが見かけ上類似しているにもかかわらず、線形領域と非線形領域でその機構が異なることを示している。

さらに、一定の剪断速度で歪みを印加し続けたときの力学応答の数値計算を行った。その結果、剪断速度が小さい準静的領域は、有限剪断速度の力学応答曲線に、剪断速度の増加とともに置き換わり、最終的には消失することが明らかとなった。

以上、本研究では、ジャミング転移点近傍における複雑な非平衡・非線形力学応答の多様な振る舞いを、複数のプロトコルによる大規模数値計算を通して明らかにした。これらの解析により、時間発展に現れる異常粘弾性、非線形応答としてのソフトニング、そして、非平衡相転移の代表的な現象である吸収状態転移に見られる臨界性が、ジャミング転移点の近傍で密接に関連して出現し、これらを統一的に理解できる可能性を示した。