

審査の結果の要旨

氏名 森田 佳士之

本論文は自律振動ゲルの三次元でマイクロな動態を明らかにするために、デジタルホログラフィック顕微鏡 (DHM)による三次元マイクロ変位計測システムを開発し、ゲル内部の運動と化学反応による色彩変化を同時計測する手法の開発を行ったものである。

BZ 反応は反応系内の物質濃度が周期的に振動する反応である。温度応答性を示す N-isopropylacrylamide (NIPAAm)ゲルとカップリングすることで、外部刺激に頼ることなく自律的に振動する自律振動ゲルの運動計測に着目した。より複雑な変形や移動を実現するためには化学反応による濃度変化と運動との関係をより明確にすることが重要であり、数 μm スケールの膨潤・収縮とその伝播を三次元で定量的な計測することの必要性を示した。

本論文では DHM による粒子検出アルゴリズムを新たに開発し、三次元でマイクロスケールの変位を高速で計測可能なシステムを構築する。さらに変位に加えて色彩情報を同時取得することで、自律振動ゲルの化学反応による色伝播と膨潤収縮による膨潤波との関係を明らかにした。

第 1 章は序論であり、背景、目的、構成を述べた。自律振動ゲルの特性を明らかにするためには、マイクロで三次元な計測が必要であることを示した。マイクロスケールでの三次元手法を複数紹介し、計測対象である BZ ゲル計測における DHM の優位性を示した。BZ ゲル計測における本論文の位置づけを明らかにした。

第 2 章では計測装置である DHM の概要と原理を示し、変位計測のための粒子検出手法について説明した。DHM は三次元マイクロ光場を二次元ホログラフイに記録した後、計算機内で三次元像を再生する。計測領域内にトレーサ粒子を分散させ、その再生像から粒子を検出し、追跡ができれば三次元変位を計測する。再生像から粒子位置を検出する手法は複数提案されているが、粒子像が奥行き方向に伸びてしまうため、粒子の奥行き方向の検出精度が低下してしまう問題を示した。本章では粒子検出精度向上のための位相像を用いた、新アルゴリズムを提案した。「二次元理論波面テンプレートマッチング」による粒子検

出と「三次元実波面テンプレートマッチング」による粒子追跡とを組み合わせる手法を詳細に説明した。

第 3 章では提案した粒子検出・追跡アルゴリズムの精度検証を実施した。テンプレートマッチングによる粒子検出において、複数のマッチング関数を比較し、粒子検出において最適な関数を選定した。理論波面より得られた二次元テンプレートによる粒子検出率と濃度との関連性を示し、粒子濃度上昇とともに誤検出が増加することを明らかにした。流体中のトレーサ粒子を撮影し、提案手法を含めた複数の粒子検出手法との比較を実施し、精度を評価した。その結果粒子追跡に関しては、実再生位相像をテンプレートとして用いた三次元テンプレートマッチングの精度が高く、従来手法である **focusing function** 法と比較しても精度を向上させることができた。

第 4 章では開発した **DHM** の粒子検出システムとカラーカメラとを組み合わせることにより、自律振動ゲルの **BZ** 反応による三次元変形と化学反応との関連性を計測、検証した。シート型の自律振動ゲル表面に粒子を付着させ、蠕動運動による粒子運動を追跡した。ゲル表面は波の伝播とともに、三次元的に周期的に振動を繰り返し、同心円状に伝播することが初めて計測された。さらに、ゲル内に粒子を分散させる手法を開発し、ゲル内部の運動の可視化計測手法を確立した。ゲル内部に分散させた粒子を追跡することで、ゲル内部のマイクロスケールで三次元な運動を明らかにした。粒子間の距離変化から局所領域の膨潤・収縮運動を算出し、マクロな運動の可視化に成功した。化学反応に伴う色変化と膨潤収縮に伴う膨潤波との関連性を調査し、化学反応と周期が等しく伝播していることを明らかにすることができた。

第 5 章では本論文のまとめと結論を述べている。本論文では **DHM** による粒子追跡から三次元変形計測システムを開発した。他の粒子追跡による計測システムと比較して、計測領域、計測速度、検出密度の点で優れている。また、**DHM** による他の粒子検出アルゴリズムと比較しても奥行方向の精度が向上したシステムの構築に成功した。本システムはゲル変形計測に適用したが、流体や他のソフトマテリアルの計測にも適用可能である。

これまで計測が困難であった自律振動ゲルのメソスケールでの変形計測に成功した。その結果、局所の膨潤収縮伝播からマクロな三次元蠕動運動を可視化し、三次元で複雑な運動が明らかになった。本論文の計測結果はゲルの特性を明らかにする上で重要であり、さらなる展開が期待でき意義が高いと判断できる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。