

論文の内容の要旨

論文題目 自律振動ポリマーの三次元マイクロ挙動計測のための
 デジタルホログラフィック顕微鏡の開発

氏名 森田 佳士之

サブマイクロメートルからサブミリメートルスケールのマイクロロボットは実現すれば、様々な分野への応用が期待できる。しかしながら、微小な空間にユニットを格納させ自律的に制御するためには課題が多い。独立した駆動機能を持たせるためには従来の剛構造では複雑な機構が必要になるうえ自由度も少なくなる。より柔軟な運動を実現させるためにやわらかい素材、ソフトマテリアルが注目されている。ソフトマテリアルの中でも、溶媒の吸収・排出による膨潤収縮と形状維持を両立する高分子ゲルは様々な刺激、電場や pH, イオン濃度, 光, 化学物質などの環境変化に対して応答することからアクチュエータとして研究が進められてきた。その柔軟性を生かして人工筋肉などのアクチュエータやマイクロロボットへの応用が期待されている。

本研究では化学反応に応じて膨潤・収縮を繰り返す高分子ゲル, 自律振動ゲルに着目する。このゲルは金属触媒であるルテニウムトリスビピリジン錯体と共重合させることによりゲル内部で Belousov-Zhabotinsky(BZ)反応が起きる。非平衡で周期的な BZ 反応の化学振動により金属触媒の酸化還元反応が生じ、それに伴って周囲の溶媒を吐出・吸収することで膨潤収縮を周期的に繰り返す。制御装置や外部刺激なしに独立した系内で生じる自律的な運動は極めて特異的である。この自律振動ゲルはある一定以上の大きさを持つと、酸化還元反応の波が伝播し色変化と同時に膨潤収縮が生じ、ゲル全体が蠕動運動することが観察され

ている。しかしながら膨潤・収縮によるゲルの運動変位は数マイクロメートルスケールかつ三次元的でこれまで直接的な計測ができていなかった。また化学変化と、それに対する力学応答による膨潤収縮との関連性も不明であった。自律的な運動のメカニズムが明らかになればこれまでの機構では再現できなかった複雑な制御が可能なマイクロソフトデバイスとしての活用へ前進する。

本研究では三次元でマイクロメートルスケールな変形が計測可能なデジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)システムを開発した。さらに自律振動ゲルの蠕動運動における化学反応とそれに伴う力学応答による膨潤収縮との関連性を明らかにするために、DHM とカラーカメラを組み合わせたシステムを構築して変形と色変化を同時計測した。

1)自律振動ゲル計測のためのデジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)による三次元変形計測システムの開発

DHM は計測領域の光の伝播を単一カメラで干渉縞として 1 枚の画像に記録し、計算機により干渉画像から計測領域の光場を三次元で再生できる技術である。物体の変形を計測するためにマイクロトレーサ粒子を混入させ、粒子の位置を三次元で追跡することで三次元変形を計測する。DHM で粒子像を記録し三次元位置を検出・追跡する手法は複数開発・検証されてきたが、粒子像が奥行方向に伸長することから奥行方向の精度が面内方向と比べて落ちる問題点があった。そこで新しい粒子検出・追跡手法として、再生位相像を用いたテンプレートマッチング法を開発した。本手法では「理論的に算出された二次元粒子位相像による粒子検出」と「実際の再生三次元粒子位相像による粒子追跡」を組み合わせることで、奥行方向の偶然誤差をサブマイクロメートルオーダーに抑え、focusing function を用いた従来手法よりも精度を二倍以上向上させることができた。これはマイクロ自律振動ゲル変形の計測には十分な精度である。数百 fps のフレームレート、奥行 430 μm の領域での計測が可能なシステムの構築に成功した。

2)DHM による自律振動ゲルの三次元運動計測

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 反応による色彩変化とそれに伴う力学応答による三次元変形とを同時計測するシステムを構築し、両者の関連性を計測、検証した。柱状の数百 μm 辺の自律振動ゲル中および表面に 2 μm の粒子を分散させ、膨潤・収縮による蠕動運動を粒子追跡により明らかにした。

ゲルは化学波の伝播とともに、周期的に三次元な全体的な振動を繰り返すことが初めて計測された。数 μm -十数 μm の微小なスケールで伝播方向に支配的に動いた。部分的にはゲル表層部と中心部では振動変位や位相が異なることが明らかになった。ゲルの全体的な運動は局所領域の膨潤収縮に加えて周囲領域の運動の影響を大きく受けることが判明した。粒子の振動位相および彩度変化から、化学波および、それに伴う膨潤領域の伝播速度を算出した。その結果力学波、化学波ともに 30-60 $\mu\text{m}/\text{s}$ で伝播し、伝播の方向は一致した。

微小域内の膨潤収縮を導出した。酸化と膨潤とのタイミングは一致し、化学波とそれに伴う力学応答による膨潤収縮が同位相で周期的に繰り返されることが今回の計測で明らかになった。微小領域の膨潤収縮を捉えることに成功した。

本研究では 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 DHM 以外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、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サブミリメートルスケールの自律振動ゲルの変形計測に成功した。その結果、ゲル全体が三次元で蠕動運動しており、局所の膨潤収縮から単純な形状であるが複雑な動きをしていることが明らかになった。今回の計測により、開発した DHM による変形計測システムがゲルのダイナミクスを三次元かつマイクロスケールで計測できることを示した。今後計測を深めることで現象の理解にとどまらず、多様で選択的な駆動機構として自律振動ゲルの活用への可能性が示された。