

## 審査の結果の要旨

氏名 宮廻 裕樹

DNA分子や脂質膜に代表されるソフトマターが自己組織的につくる秩序構造は、生体材料や半導体リソグラフィなど様々な分野へ応用されている。しかしながら、自己組織化のみに基づくボトムアップ型の製造プロセスでは、所望の構造を設計し再現性高く実現するためには誘導法と設計論にまだ課題が存在する。この課題を解決するため、本論文は、ソフトマターの秩序構造の動的な誘導を実現する電場の時空間パターン生成システムを提案したものである。さらに、生体内における重要なソフトマターである脂質膜がつくる秩序構造の誘導へ応用することで、提案手法による秩序構造の誘導可能性と適用範囲について検証を行っている。

第1章「Introduction」では、ソフトマターやその操作・製造技術についての先行研究を述べている。また、自己組織化構造の動的な誘導や計測の必要性があることを述べ、本論文の目的であるソフトマターの誘導自己組織化の意義を説明している。秩序構造の操作に必要な要求性能について既存の操作手法と比較しながら議論し、ソフトマターの空間サイズや緩和時間を考慮すると操作範囲や空間解像度に関してカバーされていない領域があることを示した。これらの課題を解決するための方法として、本論文で提案する荷電粒子線によるバーチャル電極が有効であることを述べ、既存手法に対する本論文での提案手法の位置づけを明らかにしている。

第2章「Virtual Electrode System for Soft Materials Based on Charged Particle Beams」では、はじめに時空間的に電場を制御するバーチャル電極生成法についての原理と既存研究を述べ、本論文で用いる荷電粒子線によるバーチャル電極生成法が操作範囲や空間解像度において既存手法と比較しても優れていることを示した。次に、荷電粒子線を用いたバーチャル電極生成法の物理的な実現として、本論文で用いた倒立電子線描画装置によるバーチャル電極ディスプレイについて説明している。電子線により照射点付近で生じる現象において、静電的、化学的および熱的作用の影響について論じている。熱的作用においては、蛍光色素の温度感受性を利用した実験および熱輸送に関する数値シミュレーションを用いて、温度上昇が少ないため対象に対する影響の主要因とはならないことを明らかにした。

第3章から第5章では、第2章で導入した電子線によるバーチャル電極ディスプレイ

の物理化学的特性を明らかにすることを目的としている。第3章「Physical Model and Design of Virtual Cathode in an Electrolyte Solution」では、バーチャル電極のまわりで生じる電場、イオン遮蔽および電気化学反応についての物理モデルを提案し、その基本解を導出している。さらに導出した基本解を用いることで、所望のパターンの電場やイオン濃度分布を実現でき、バーチャル電極の配置の設計問題が制約つき最小二乗法に帰着されることを明らかにした。また、電極の設計の容易さの観点から点電荷として考えられる電子線によるバーチャル電極ディスプレイが有用であることを述べている。

第4章「Electrokinetic Transport Control in Nanofluidics Using a Virtual Cathode Display」では、バーチャル電極による電場に付随して生じる界面動電現象に着目し、電気泳動や電気浸透流などの輸送現象が制御できることを明らかにしている。また、これらを利用してナノ粒子の2次元パターニングやDNA分子構造の操作へ応用できることを示した。

第5章「Surface Reactions of a Virtual Cathode and Their Applications to Patterning Molecules」では、バーチャル電極によって生じる電場と電子線の散乱電子によって糖分子やポリマーの堆積および細胞膜と類似の構造を持つMPCポリマーの剥離などの界面化学反応を制御できることを明らかにしている。またモンテカルロシミュレーションによる電子の飛程分布と実際の分子の堆積・剥離量から、堆積・剥離現象は電場および散乱電子の運動エネルギーに依存することを考察している。

第6章「Electromechanical Control of Lipid Membrane Morphology and Domains」では、第3章から第5章で得られた知見をもとに、脂質膜ドメインや膜形態など脂質分子が自己組織的につくる秩序構造の操作を実現している。はじめに、本章で対象としている自己展開膜についての背景と物理モデルを述べ、電場による応力で膜分子が操作可能であることを示している。次に、バーチャル電極ディスプレイを用いて平面脂質膜の膜ドメインのパターニングや展開速度、膜の曲率の制御が可能であることを実験により示した。展開膜の前縁の曲率制御について、実験と数値シミュレーションとの比較をしながら、膜の曲率変化をもたらす駆動力についての考察を行っている。この章で示されたのは、任意形状の膜パターニングや相分離構造の誘導などといった本研究の目的である自己組織化の動的な誘導を実現し、様々なパターン生成を実演していることである。

第7章「Conclusion」では、本論文の結果のまとめと今後の課題について述べている。

以上をまとめると、本論文ではソフトマターの誘導自己組織化を実現するために必要な要件を提案し、これを電場の時空間パターン生成システムとして実現した。また、このシステムの物理化学的特性の解明と脂質膜の誘導自己組織化への応用を示した。これ

はトップダウン的な分子操作と自己組織化によるボトムアップ的な秩序構造の生成プロセスを統合する新規なソフトマターの秩序構造制御法であり、ソフトマターによる材料創成や実作動環境下におけるソフトマターの物性計測などへの応用が考えられる点において、ソフトマターの研究分野への貢献があると考えられる。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。