

審査の結果の要旨

氏名 久米 大将

本論文は、「定在波照明によるコヒーレント結像型長作動距離超解像顕微法の提案」と題するものであり、多様な機能性表面微細構造を長作動距離にてコヒーレント結像下で回折限界を越えた分解能で計測する手法の提案を目指したものである。

本論文は、全 5 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景を整理し、研究目的が示されている。多様な機能性表面微細構造の開発の進展に伴う、製造過程での構造欠陥検査（インライン計測）などの微細構造のサブミクロン分解能での計測の必要性ならびに、実現にむけた問題点が整理された後、関連研究を紹介し、光学的計測法として構造化照明顕微法（SIM）に着目する理由及び従来 SIM の基本的な理論と限界が示されている。それを踏まえ長作動距離対物レンズを用いたコヒーレント結像系超解像顕微法の開発を目指す目的と光学計測における本研究の対象領域が示され、論文の構造が示されている。

第 2 章「振幅応答コヒーレント SIM」では、最終目標である位相分布計測を含む超解像顕微法構築に先立ち、照明光の位相に応じた光学応答を返すが照明光に対して位相変化を起こさない試料である振幅応答試料を適用対象として新たに振幅応答 SIM が構築されている。従来 SIM の適用が困難なコヒーレント結像系において、従来遮断されていた試料の空間周波数が、定在波照明により顕微光学系の遮断周波数帯域内にシフトする効果を明確に定式化し提案手法が持つ帯域特性の機能を明らかにした。照明光に対して位相遅れのない散乱光を発する振幅応答試料を対象として、参照光を介在させたコヒーレント結像下の変調周波数復元方程式を新たに導出し、画像に潜在的に含まれる超解像情報の抽出を可能にした。さらに提案手法の解像特性を、数値解析により従来 SIM と標準光学顕微法と比較しつつ議論している。提案振幅応答 SIM は、本研究の目的に適った低 NA 領域において標準光学顕微法及び非蛍光条件下の従来 SIM を凌ぐ分解能を持つことが示されている。数値計算結像シミュレーションによる光学応答を用いて、提案手法の理論の妥当性が示され、マイクロ流体デバイスの微細構造を模した試料の振幅分布の再構成と評価を通じて提案手法の実践的な適用可能性が示された。

第 3 章「複素振幅応答コヒーレント SIM」では、照明光に対して位相遅れを生じる複素振幅応答試料を対象に、第 2 章で構築した振幅応答 SIM を拡張し、試料の振幅分布と位相分布を回折限界を超える分解能で復元する手法の構築と理論の検証を行っている。複素数の振幅分布で表現される試料からの散乱光が結像面に形成する、任意の位相を含む結像分布に埋もれた超解像情報を復元するために、参照光の介在を利用し第 2 章とは異なる変調周波数復元の方程式が新規に導出されている。数値計算シミュレーションによる試料分布の再構成を通じて、理論的な妥当性が示されている。さらに分解能の側面に関わる振幅分布の回復結果の評価を通して提案手法の解像特性を明らかにし、提案手法が超解像での定量位相計測性を有していることを明らかにしている。従来の標準光学顕微法では捉えることのできない、振幅分布が一様であるような微細な位相変動構造に対して提案手法を適用した数値解析を行い、回折限界を超越したサブミクロンの微細位相変動周期構造を提案手法により可視化できることを示している。加えてサブミクロンにとどまらない次世代、次々世代を見据えたサブ 100 ナノメートルスケールの周期を有する超微細光学機能構造における位相異常値を、提案手法が検知可能であることがその原理に基づいて議論されている。

第 4 章「実証実験のための検討」では、実験に即した理論面の検討がなされた後、実験装置の設計及び構築がなされ、シリコン基板上の 500 nm ラインアンドスペース標準試料を対象に提案振幅応答 SIM を適用した解像実験を行っている。試料の周期構造の復元に成功し、この基礎実験により提案振幅応答 SIM と提案複素振幅応答 SIM に共通する理論の根幹であるコヒーレント結像下の周波数偏移効果が確認され、実証実験のための課題も明らかにされた。

以上のように、本研究は、多様な機能性微細表面構造の計測のための、長作動距離対物レンズを用いたコヒーレント結像下の超解像顕微法を提案することができたと認められる。

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。