

# ダイナミックレンジ拡大デジタルホログラフィ

Dynamic range expanded digital holography

東大理<sup>1</sup>, JST さきがけ<sup>2</sup>

○戸田 圭一郎<sup>1</sup>, 玉光 未侑<sup>1</sup>, 井手口 拓郎<sup>1,2</sup>

The Univ. of Tokyo<sup>1</sup>, PRESTO<sup>2</sup>,

○Keiichiro Toda<sup>1</sup>, Miu Tamamitsu<sup>1</sup>, Takuro Ideguchi<sup>1,2</sup>

E-mail: toda@gono.phys.s.u-tokyo.ac.jp

定量位相イメージング(QPI)は、透明な試料の形態を非標識かつ定量的に解析できる技術として、生命科学を代表とする幅広い分野で使用されている[1]。近年では、細胞内の大まかな構造の可視化だけではなく、微小な位相変化を見ることによって細胞内で起こるナノスケールの構造変化の追跡や、フォトサーマル効果を介した分子分布の同定などにも使われている。しかし、既存技術におけるショットノイズ限界の検出感度は 10 mrad 程度であり、例えば、タンパク質一分子やナノ粒子などに由来する微小な位相シフトを検出するには不足する。

検出感度を上げるには、試料に由来する散乱光をより多く撮像素子で検出する必要があるが、既存技術では非散乱光による撮像素子の飽和がそれを妨げている。弱位相物体を観察する場合は、暗視野顕微鏡の原理で非散乱光を選択的に取り除くことによって撮像素子の飽和を防ぎ、試料に入射する光を増やすことで検出感度を上昇できる。つまり、暗視野下の散乱光強度は位相シフト量に伴い大きくなるため、検出系のダイナミックレンジの上限を視野内に存在する最大位相シフト量にまで下げることができる。しかし、細胞のように試料が数 rad 程度の大きな位相構造を持つ場合は、ダイナミックレンジをわずかしかな下げられないため、劇的な感度上昇を達成できない。

我々は、大小それぞれの位相分布を個別に計測することで、積算せずに大幅にダイナミックレンジを拡大する手法、すなわち、位相キャンセリング暗視野デジタルホログラフィ法を提案及び実証した。一度目の測定では、既存の QPI を用いて大きな位相分布を計測する。得られた位相分布を、波面制御技術でキャンセルする。二度目の測定では、残った微小な位相分布のみを計測するが、暗視野型の QPI を行うことでサンプルに入射する光を増やし、高感度計測を実現する。最後に、波面制御に使った位相分布と暗視野 QPI の結果を元に、ダイナミックレンジを拡大した位相分布画像を計算する。今回は、QPI として off-axis デジタルホログラフィを採用した。この手法を用いて、従来の off-axis デジタルホログラフィに比べて約 7 倍のダイナミックレンジ拡大を実現するとともに、赤外フォトサーマル位相イメージング[2]における有用性を実証した。

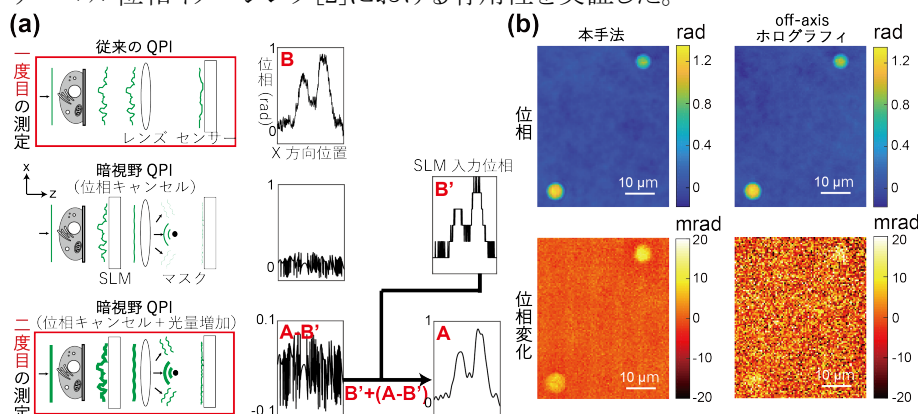


図 1. 位相キャンセリング暗視野デジタルホログラフィ (a) 原理。SLM: 空間光変調器。(b) 赤外フォトサーマル位相イメージングにおけるダイナミックレンジ拡大。上: シリカビーズの定量位相画像。下: シリカの O-Si-O 伸縮振動に共鳴する赤外光を照射した場合の赤外吸収フォトサーマル効果による位相変化画像。(左は本手法、右は off-axis ホログラフィで取得した画像)。

[1] Y. Park et. al, *Nat. Photonics* **12**, 578-589 (2018). [2] M. Tamamitsu et al, arXiv: 1912.04049 (2019).