

令和元年6月24日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2018

課題番号：26287066

研究課題名（和文）電子ビーム波動関数の操作による革新的ビーム制御技術の創成

研究課題名（英文）Creation of an innovative beam control technology by operating upon electron beam wavefunctions

研究代表者

内田 正哉（Uchida, Masaya）

埼玉工業大学・付置研究所・教授

研究者番号：80462662

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目標は、電子ビームの波動関数（位相）を操作することにより従来の電子ビームにはない特性をもつ電子ビームを生成し、その制御技術を確立することであった。本研究では、円環スリットをもちいて電子ベッセルビームの生成に世界で初めて成功した。生成した電子ベッセルビームが、非回折性や自己修復性等の従来の電子ビームにはない特性をもつことも実験的に明らかにした。その特性ゆえ、「新規電子顕微鏡」「原子操作」等のための新規プローブとなることが期待される。さらに、本研究で示した電子ビーム用光学素子の開発を含めた革新的ビーム制御技術により、今後、様々な特性をもつ新規電子ビームが生成されることも期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は従来の電子ビームにない特性をもつ電子ビーム、すなわち電子ベッセルビームをスリットをもちいて世界で初めて実現したことにある。そのユニークなビーム特性を生かしての製品や研究が今後大いに期待される。さらに本研究で開発した電子ビーム波動関数を操作して行うビーム制御技術、超微細加工技術をもちいる電子ビーム用光学素子等の作製方法は、今後の後発研究の役に立つと思われる。

研究成果の概要（英文）：The final target of this study was the creation of a new type of electron beams and an innovative beam control technology by operating the phase of electron beam wavefunctions. In this study we generated an electron Bessel beam using a nanofabricated annular slit for the first time. We experimentally revealed the nonspreading and self-healing properties of the electron Bessel beam, which can be used for a new electron microscopy and an atomic manipulation technique. Our presented technique can be also used to generate a new type of electron beams.

研究分野：ビーム物理

キーワード：電子ビーム 量子ビーム 電子顕微鏡 波動関数 位相 軌道角運動量 位相特異点 微細加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者（内田）らは、2010年、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」を世界で初めて生成した（Nature, 2010）。従来、材料分析や研究に利用されてきた電子ビームは、軌道角運動量をもたない「平面波」であった。内田らは位相板をもちいて、平面波の位相形状をらせん状にし、電子ビームに軌道角運動量を付与することを実現した（図1）。この発見を契機に、軌道角運動量をもつ電子ボルテックスビームの研究が世界中で急速に進められ、続々と研究成果が報告されていた。たとえば、EUのグループにより、軌道角運動量をもつ電子ビームと電子損失分光法（EELS）を組み合わせた新しい磁気 EELS の手法が報告され [J. Verbeeke et al. Nature (2010)]、軌道角運動量をもつ電子ビームの有用性・将来性が実証され始めていた。本研究代表者らのグループも、大きな軌道角運動量 ($90\hbar$) をもつ電子ビームの生成や電子ビームの軌道角運動量測定法の提案および開発など、重要な貢献をしてきた。「軌道角運動量をもつ電子ビーム」研究のポイントは電子ビームの波動関数（位相）を操作し、位相形状を変えたことにある。電子ビーム波動関数の位相形状を様々にすることで、従来にないユニークな特性をもつ革新的電子ビームを生成できるものと考えた。

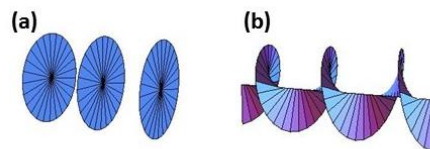


図1：(a) 平面波波面，(b) 軌道角運動量を与えるビーム波面。

2. 研究の目的

本研究代表者らにより、2010年、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」が世界で初めて生成された（Nature, 2010）。軌道角運動量をもつ電子ビームは、電子ビームの波動関数（位相）を物質の内部ポテンシャルを利用した位相板をもちいて操作し、等位相面をらせん状にすることで生成された。光の分野では、らせん状ビーム以外にもベッセルビームやエアリービームなど、様々な伝播モード（あるいは位相形状）をもつビームが研究・利用されている。これらのビームは、平面波やガウスビームではみられない、非回折性、自己修復性、湾曲性などの特異な性質を示す。電子ビームの場合、「平面波」以外の研究・利用はほとんどなく、新しい伝播モードをもつ電子ビームに関する研究が急務である。さらに、これらの新規ビームは、軌道角運動量や位相特異点のほか、スピン角運動量とも密接な関係があることが明らかにされつつある。すなわち、電子ビームの場合、軌道角運動量のみならず、電子スピン（偏極）をも制御した電子ベクトルボルテックスビームへと拡張をすることが期待できる。本研究課題では、電子ビームの新しい伝播モードである軌道角運動量をもつ電子ボルテックスビームの研究を進展させ、新しい伝播モードをもつ電子ビームの生成を、電子ビームの波動関数（位相およびスピン）を操作することにより行なうことを目的とした。本研究での電子ビーム用光学素子の開発を含めた革新的ビーム制御技術により、ベッセルビーム、エアリービームなど特異な性質をもつビームが「物性を探る」「超高感度イメージング」「量子力学研究」のための新規プローブとして使えるようになることが期待される。さらに、電子スピン（偏極）の自由度も制御した電子ベクトルボルテックスビームの研究も行なうことも目指す。これらの電子ビームは、固体中電子と相互作用することから、新たな物性測定法開発への展開も多いに期待される。

3. 研究の方法

本研究では、波動関数の位相を操作する方法を確立するため、新しい伝播モードをもつ電子ビームについて検討し、実現を行なった。中でも、ベッセルビーム、新規ベッセル様ビームを生成し、その特性をビーム伝播や位相特異点、軌道角運動量の観点から調べた。具体的研究方法は以下のとおりである。

3-1. 光学素子の設計および作製

(a) スリットによる波動関数の操作：まず電子ベッセルビームの生成を目指した。ベッセルビームは、非回折性、自己修復性に加え、異なる波数ベクトルを重ねあわせたビームであることから、回折限界を超える超解像性をもたらす可能性がある。本研究では円環スリットをもちいて電子ベッセルビームの生成を試みた（図2, 3）。光学素子の設計には、開発を行なった波動伝播シミュレーションも併用して進めた。ナノサイズの円環スリットは集束イオンビーム（FIB）をもちいたナノ加工技術によって作製した。作製した円環スリットを透過型電子顕微鏡に搭載し、2次元検出器（CCD）をもちいて電子ビーム特性の評価を行った。さらに、円環スリットから生成される電子ベッセルビームは軌道角運動量をもたない電子ビームであるが、軌道角運動量をもつ電子ベッセルビームを生成するため、多角形スリットの作製も行った。

- (b) 磁場による波動関数の操作に向けて：磁場により、波動関数の位相操作を行なうことを目指し、磁性体からなるナノサイズの針をFIBをもちいて作製した。磁性体ナノ針はモノポール型磁場分布を生成することが予想されるが、これを電子線ホログラフィーによって評価した。

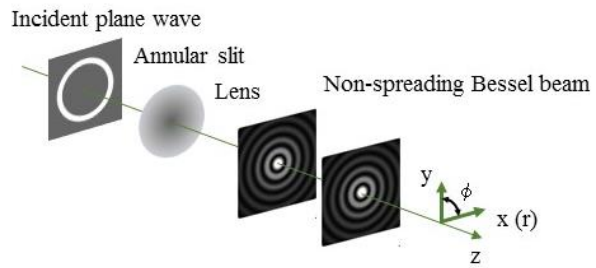


図2：実験配置図。スリット後のレンズを調節することで電子ビームの伝播特性を調べる。

3-2. 電子ビーム特性評価

- (a) ビーム伝播による評価：電子ビームが伝播する際の強度および位相分布を調べることで、ビーム特性を評価した。特に、ベッセルビームはビームの非回折性、自己修復性をもつことが予想されたことからこれを重点的に調べた。また、軌道角運動量、位相特異点の観点からも調べた。ビームの位相分布は電子回折イメージング法により得た。
- (b) 物質との相互作用による評価：新規ビームは軌道角運動量をもち、ミクロおよびマクロなレベルで物質と相互作用することが予想された。実験的にこれら相互作用、ビーム特性を調べた。これにはわれわれが開発中の軌道角運動量検出器も併用し研究を行った（論文投稿中）。

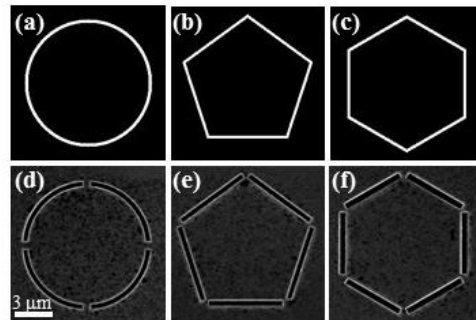


図3：(a-c) 設計パターンと(d-f) FIBナノ加工によって作製したスリットのSIM像。左から順に、円環、5角形、6角形スリットの場合。

4. 研究成果

(1) 世界で初めての円環スリットによる電子ベッセルビームの生成

(Saitoh et al. J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 043501 (2016). 等)

作製した円環スリットを電子顕微鏡に搭載し、生成ビームの特性を調べた。伝播の様子等から、円環スリットを用いて生成した電子ベッセルビームが非回折性（図4）、自己修復性を有することを世界で初めて明らかにした。これらの成果は国際誌論文として纏められた。本研究は国内外から多くの反響があり、多々引用され続けている。

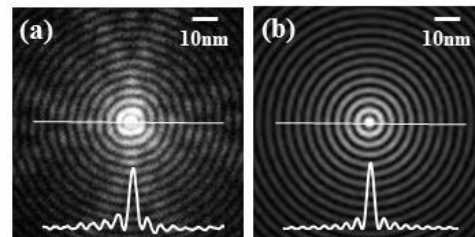


図4：円環スリットから生成される電子ベッセルビーム。(a) シミュレーション像、(b) 実験像。ビーム径が伝播によって広がりにくい非回折性を示す。

(2) 世界で初めての軌道角運動量をもつ電子ベッセル様ビームの生成

(Nambu et al. Microscopy **66**, 295 (2017). 等)

軌道角運動量（位相特異点）をもつ電子ベッセルビームを作製するため、当初の計画にはなかった多角形スリットを考案した。多角形スリットの作製を行ない、円環スリットの場合と同様な実験を行った。生成した電子ビームは円環スリットから生成される電子ベッセルビームと同様の非回折性を有しており、さらにビーム中に位相特異点を有することを見出した（図5）。位相特異点を検出するための位相分布像は電子回折イメージング（EDI: Electron Diffractive Imaging）法によって得た。EDI法は回折像と実像の1セットに対し、フーリエ位相反復を行うことで位相分布を得る方法である。この位相抽出法の長所は電子線が集束するような回折点の位相分布でも得ることができることである。また、本研究での多角形スリットによるベッセル様ビームの生成は、我々の知る限り光学分野でも報告のない初めてのことである。これらの成果は国際誌論文として纏められた。

(3) 磁性体ナノ針の作製

モノポール型磁場により電子ビームの位相を操作するため、FIB による磁性体ナノ針の作製を行った。作製したナノ針に対し、電子線ホログラフィーによる位相分布測定を行った (図6)。本研究により磁場による位相操作実現に向けた基礎的な知見が得られた。これらの成果の一部は論文として纏められた (投稿中)。

(4) まとめと今後の課題

本研究において、電子ビームの波動関数の位相を操作することで、電子ベッセルビームを生成することに成功した。さらに軌道角運動量をもつ新規電子ベッセル様ビームの生成も行った。本研究の重要な点は従来ビームとは異なる新規電子ビームを生成しただけでなく、その革新的制御技術を実験的に示した点である。当初目標にあった新規電子ビームと物質との相互作用を含む応用研究は未だ半ばであるが、開発中の軌道角運動量検出器によって結実するものと考えている。また本研究課題では実現までには至らなかった電子スピン (偏極) の自由度も制御した電子ベクトルポルテックスビームの研究は重要な研究テーマであることに相違なく、引き続き研究を行っていく予定である。

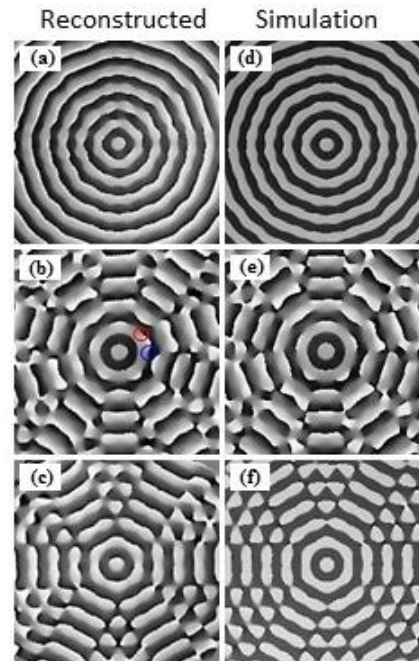


図5 : (a-c) EDI 法に得た位相像と (d-f) シミュレーションによって得た位相像. 上から順に、円環、5 角形、6 角形スリットの場合.

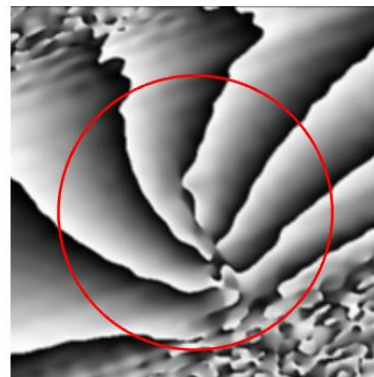


図6 : 電子線ホログラフィーによって得たナノ磁性針のつくる位相分布. 位相分布がらせん状になっていることから、電子ビームに軌道角運動量を付加することができる.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4件)

1. H. Nambu, Y. Noguchi, K. Saitoh, and M. Uchida, “Nearly nondiffracting electron lattice beams generated by polygonal slits”, *Microscopy* (査読有), **66**, 295 (2017). (DOI: 10.1093/jmicro/dfx020)
2. R. Negishi, K. Sekiguchi, Y. Totsuka, and M. Uchida, “Determining parastichy numbers using discrete Fourier transforms”, *Forma* (査読有), **32**, 19 (2017). (DOI: 10.5047/forma.2017.003)
3. K. Saitoh, K. Hirakawa, H. Nambu, N. Tanaka, and M. Uchida, “Generation of Electron Bessel Beams with Nondiffractive Spreading by a Nanofabricated Annular Slit”, *J. Phys. Soc. Jpn.* (査読有), **85**, 043501 (2016). (DOI: 10.7566/JPSJ.85.043501)
4. H. Nambu, K. Saitoh, and M. Uchida, “Electron Diffractive Imaging using Fork-Shaped Grating Masks”, *AMTC Letters* (査読有), **5**, 248 (2016). (DOI: 10.1002/9783527808465.EMC2016.6060)

[学会発表] (計 9件)

1. Y. Noguchi, K. Saitoh, and M. Uchida, “Measuring the orbital angular momentum spectrum of electron beams using a Damman vortex grating”, 19TH INTERNATIONAL MICROSCOPY CONGRESS (Sydney), (2018).
2. 齋藤 晃, 野口 雄紀, 内田 正哉, 「2次元ダンマン渦渦回折格子をもちいた軌道角運動量測定」, 日本顕微鏡学会第74回学術講演会(久留米市), (2018).
3. 齋藤 晃, 野口 雄紀, 南部 裕紀, 内田 正哉, “非回折性をもつ電子ボルテックスビームの生成”, 日本顕微鏡学会 第73回学術講演会, 札幌コンベンションセンター(札幌市), (2017).
4. 野口 雄紀, 齋藤 晃, 内田 正哉, “ダンマン渦回折格子をもちいた軌道角運動量の測定”, 日本顕微鏡学会 第73回学術講演会, 札幌コンベンションセンター(札幌市), (2017).
5. 野口 雄紀, 齋藤 晃, 内田 正哉, “ダンマン渦回折格子をもちいた軌道角運動量の測定”, 日本物理学会 2017年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス(盛岡市), (2017).
6. H. Nambu, K. Saitoh, and M. Uchida, “Electron Diffractive Imaging using Fork-Shaped Grating Masks”, The 5th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations, Nagoya, Japan (2016).
7. K. Saitoh, H. Nambu, and M. Uchida, “Electron Diffractive Imaging using Fork-Shaped Grating Masks”, The 16th European Microscopy Congress, Lyon, France (2016).
8. 齋藤 晃, 南部 裕紀, 内田 正哉, “フォーク型回折格子をもちいた収束電子らせん波の形成”, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス(宮城県), (2016).
9. 南部 裕紀, 齋藤 晃, 内田 正哉, “フォーク型回折格子をもちいた回折顕微鏡法の位相回復精度の研究”, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス(宮城県), (2016).

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：齋藤 晃

ローマ字氏名：Koh Saitoh

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：未来材料・システム研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：50292280

研究分担者氏名：下条 雅幸

ローマ字氏名：Masayuki Shimojo

所属研究機関名：芝浦工業大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：00242313

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：平川 和馬

ローマ字氏名：Kazuma Hirakawa

研究協力者氏名：南部 裕紀

ローマ字氏名：Hiroki Nambu

研究協力者氏名：野口 雄紀

ローマ字氏名：Yuuki Noguchi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。