

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02629

研究課題名（和文）原子分解能走査型電子顕微鏡を目指したレーザー一定在波による革新的収差補正装置の実現

研究課題名（英文）Research on aberration corrector using laser standing wave toward realization of atomic resolution scanning electron microscopy

研究代表者

上杉 祐貴（Uesugi, Yuuki）

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：60780682

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：円対称なレーザー一定在波を使った電子ビームの球面収差補正に関する研究を行った。数値計算により強く集光したベクトル光ビームが負の球面収差をもつ電子レンズとして作用することを示した。また、レンズ特性の詳細を幾何光学にもとづいて解析した。当初は光共振器を用いた連続動作の実証実験系を構想していたが、研究中にパルス動作する電子レンズ系の重要性を認識するに至った。そこでパルス動作の実験系の開発に取り組んだ。研究期間中に原理実証まで至らなかったが、先行する国外グループと差別化された独自の実験系を構築できた。関連する研究として、新規パルスレーザー蓄積装置とビーム成形を駆使したレーザー加工技術を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子顕微鏡技術とレーザー技術の融合は当該分野における最先端の研究テーマである。本研究において、レーザーで電子顕微鏡用のレンズを実現できること、およびそれが球面収差補正に利用できる特異な性質を有することを世界に先駆けて示すことができた。本研究期間中に欧州のグループがレーザーによる電子レンズ作用の実証に初めて成功し、本研究者がそれに追従する状況である。レーザーを駆使した新しい電子顕微鏡の要素技術が期待通りの性能を示せば、今後四半世紀の間に、原子分解能をもつ顕微鏡装置が世界中の研究室で手軽に利用できるようになると期待される。

研究成果の概要（英文）：A study of spherical aberration correction of electron beams using a circularly symmetric laser standing wave has been conducted. Numerical calculations demonstrated that a tightly focused vector light beam acts as an electron lens with negative spherical aberration. The details of the lens properties were analyzed based on geometrical optics. Although the original plan was to develop an experimental system with continuous operation using an optical enhancement cavity, the importance of an electron lens system with pulsed operation was recognized during the study. Thus, the development of an experimental system for pulsed operation was carried out. Even though the demonstration of the electron lens was not achieved, a unique experimental system differentiated from those of preceding research groups was constructed.

研究分野：光工学

キーワード：電子レンズ 球面収差補正 ポンデロモータィブポテンシャル Kapitza-Dirac効果 ベクトル光ビーム
電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

光と自由電子の相互作用はトムソン断面積程度の小さな反応過程であり、従来これを利用する応用技術はほとんど存在しなかった。しかし Kapitza-Dirac 効果 (KD 効果) [P. L. Kapitza, P. A. M. Dirac, Proc. Camb. Philos. Soc. 29, 297 (1933)] として知られるレーザー一定在波によるコヒーレントな誘導散乱過程を利用すると、卓上規模のレーザー光源で達成可能な数 GW/cm^2 のレーザーパワー密度で、エネルギー数 10 keV の電子線を位相変調できる。レーザー一定在波の強度分布を適切に設計することで、空間中に自由な形状の相互作用ポテンシャルを形成することが可能であり、つまり、電子線に対して自由な形状の屈折率分布をつくりだすことができる。KD 効果によるコヒーレントな電子散乱現象が実証されたのは 2001 年と 2002 年に行われた Freimund と Batelaan らによる一連の検証実験による [D. L. Freimund et al., Nature 413, 142 (2001), Phys. Rev. Lett. 89, 283602 (2002)]。彼らの実験において、レーザー一定在波は電子線に対して位相回折格子として機能し、電子ビームの回折縞やブラッグ回折が観測された (図 1)。その後、光共振器中に蓄積したレーザー一定在波を位相差電子顕微鏡の位相板に利用する技術が、米国カリフォルニア大の Muller らによって報告されている [O. Schwartz, Muller et al., Nat. Methods 16, 1016 (2019)]。

このような背景のもと、本研究者らはレーザー一定在波による屈折率分布を電子顕微鏡用の電子レンズ、および収差補正に応用するアイデアを着想した。電子顕微鏡の発明以来用いられてきた電極板や磁束コイルによる電界・磁界レンズでは、空間中に自由な屈折率分布を設計することが困難であり、特に、回転軸対称な構造のレンズでは原理的にデフォーカス作用を発生できないことが知られている [O. Scherzer, Zeitschrift für Physik, 101, 593 (1936)]。これは、軸対称なレンズ系のみでは負の球面収差を発生できず、電子顕微鏡装置の球面収差をゼロに補正できないことを意味する。KD 効果による電子ビームの位相変調技術は、従来の電界・磁界を使用する手法とは異なる原理で電子光学素子を実現する手法を与える。そこで、レーザー一定在波をレンズ作用発生用の位相光学素子として利用することにより、従来の電界・磁界レンズでは実現し得ない特性を示すことが可能であるか、理論的および実験的に検証する必要がある。これまで、KD 効果は電子線に対してレーザー一定在波が直交する場合しか仮定されてこなかった。レーザー光軸と電子ビーム軸が同軸上に配置する場合 (自由電子が光に平行に入射して散乱する場合) に、電子ビームがどのような位相変調を受けるか、理論的にも実験的にも詳細に検討されたことがなく基礎物理学的な問いが残されていた。

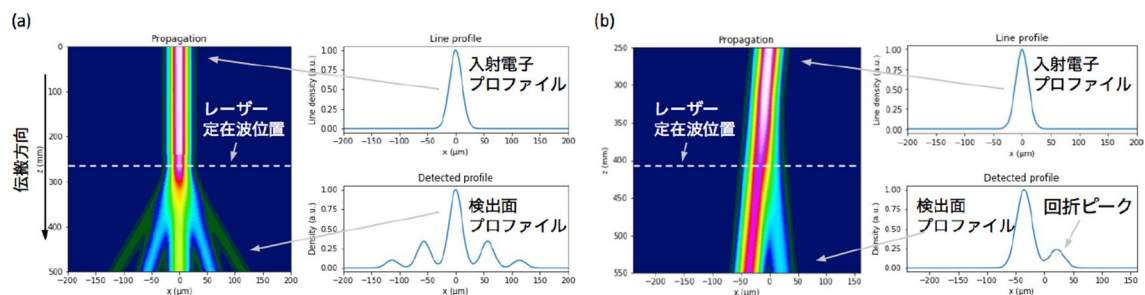


図 1. 本研究者による Freimund, Batelaan らの KD 効果検証実験の数値再現。(a) 2001 年の複スリット回折実験結果の再現。(b) 2002 年のブラッグ回折実験結果の再現。

2. 研究の目的

(1) 本研究に先立ち、電子線を 1 次元方向に集束/発散する効果について、KD 効果の数値計算により検討を行った。図 2 に伝搬計算の結果を示す。レーザー一定在波の強度分布の谷に電子が入射する場合、電子線がフォーカスされ、峰に入射する場合はデフォーカスされる様子が確認できる。本研究ではこの現象を発展させ、電子ビーム軸に円対称に分布した光一定在波を使い、電子線を円対称に集束/発散する電子レンズの検討と実証を目的とする。

(2) 図 2a, b に対応するレーザー強度分布は、電子線とビーム軸を共通にするドーナツ状 (または多重円環状) の断面プロファイルを持った光ビームになる。簡単な数値計算による検討の結果、そのような光ビームは電子線に対して、フォーカス波面に加えて負の球面収差波面を付与することが予想された。現在、電子顕微鏡の球面収差補正は 6 極子や 4-8 極子電磁石による複雑で高価な装置でのみ実現しており、特に、多くの研究室や製造ラインの現場で使用されている低加速電圧で動作する走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM, 加速電圧 $1 \sim 30 \text{ kV}$) には、費用対効果の観点から球面収差補正が適用されることはない。ドーナツ状レーザーを利用した収差補正装置が実現すれば、装置の大幅な小型・簡素化が見込まれ、これまでフラッグシップの電子顕微鏡装置しか得られなかった原子分解能のプローブーム径を、汎用の SEM でも実現できる可能性がある。本研究において、レーザーを使った球面収差補正技術の理論的な検討を行う。収差補正作用が見込まれる場合には、その実験的検証に取り組むことを目的とする。

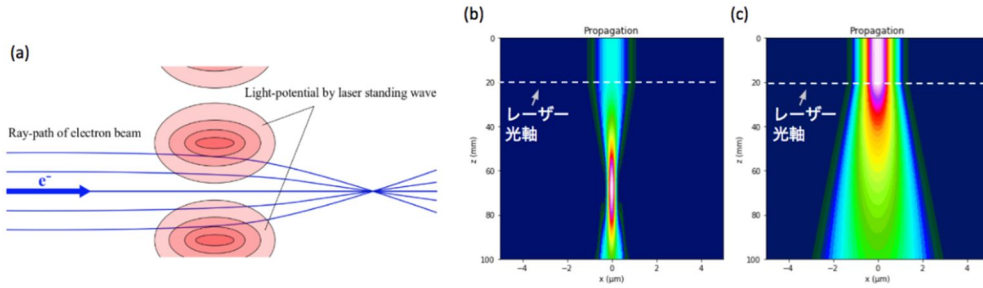


図 2. (a) レーザー定在波と入射電子の位置関係を示す概念図。赤い濃淡がレーザー強度の分布を表す。(b) 電子が強度分布の谷に入射する場合の結果。(c) 電子が強度分布の峰に入射する場合の結果。それぞれレーザー定在波は縦軸 20 mm の位置に配置されている。

3. 研究の方法

(1) 電子線と共通のビーム軸を有した円対称な光定在波による KD 効果、および光場が電子線に与える位相変調作用については、これまで詳細な研究が報告されていなかった。そこで、本研究においてその詳細を調査した。ビーム軸に垂直な面内で定在波を成すほど強く集光された光場は、それを記述する電磁場の解析的な解が存在しないため、ベクトル回折積分に基づく数値計算を実行する必要がある。自由電子に与えるポンドロモーティブ力を、計算により得た電磁場から導出し、その力場中を進む電子の運動・起動を計算して、レンズ作用および球面収差を数値シミュレーションにより評価した。一方で、電子顕微鏡などの設計に用いるためには、より実用的な解析的表現によるレンズ特性の把握が必要である。そこで、Laguerre-Gaussian モードや Bessel モードなどの解析的なビーム形状を有するレーザーが作る屈折率分布が、電子線に対してどのような特性のレンズとして振る舞うか、幾何光学に基づいた検討を行った。

(2) 本研究で提案するレーザーを使った電子レンズ作用、および球面収差補正の可能性について、実験的な検証に取り組んだ。当初の研究提案計画では、光共振器にレーザー定在波を蓄積し、その中心に電子線を通わせる図 3 に示す実験系を想定した。レーザーを光共振器に蓄積することで、KD 効果の発生に必要な数 10 kW のレーザーパワーを連続 (CW) レーザーで得ることができる。これは、入射する電子線が CW ビームである一般的な電子顕微鏡の構成によく合致したシステムである。しかし、技術協力のために行った電子顕微鏡メーカーとの議論から、パルス動作する電子顕微鏡装置の将来的な重要性を認識するに至り、パルスレーザーを駆使した実験系を新たに考案してその開発に着手した。光共振器を用いる場合、レーザーの集光径が数 10 μm に制限される。また、電子線透過用の穴を空けた光共振器にレーザー光を蓄積する技術を一から実証する必要がある。対して、パルスレーザーを使う場合、時間的に圧縮されたレーザーピークパワーを利用できるため、レーザーを光共振器に蓄積する必要がない。また、高い開口数 (Numerical Aperture: NA) をもつ光学レンズ素子を用いることで、レーザー集光径を 1 μm 程度にまで小さくすることができる。これにより、電子位相変調に必要な光場のパワー密度を容易に達成できる。図 4 にこの実験系の概念図を示す。本研究において、実験系の各要素、紫外レーザー照射によりパルス動作する電子銃、光学系を組み込んだ真空容器、電子銃駆動用の紫外パル

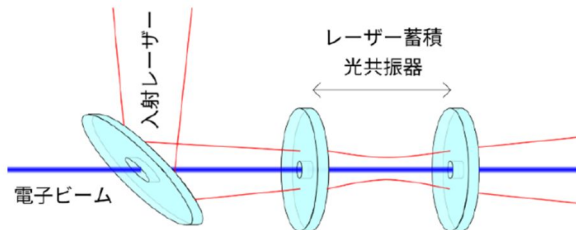


図 3. レーザー定在波を光共振器に蓄積して利用する CW 動作の実験系。レーザーパワーを 2 枚の鏡からなる光共振器に蓄積して 1 万倍程度に増強する。共振器鏡と 45 度入射鏡は、それぞれ電子線を通わせるために貫通穴を有する。

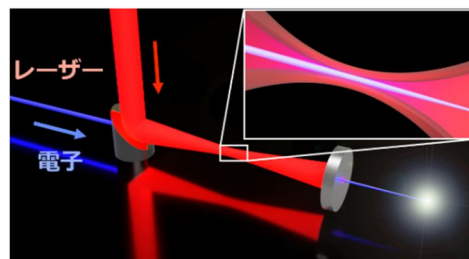


図 4. パルスレーザーを利用する実験系の概念図。電子に位相変調作用を与えるのに十分なピークパワーを有するため、レーザーは電子線に対して後ろから (または対向して) 入射するだけで良い。図では放物ミラーを使ってレーザーを集光する場合を示している。

スレーザーと電子レンズ形成用の近赤外パルスレーザの開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 光場をつかった電子レンズ作用の検討を数値計算により実施した。直線上の光定在波を使った過去の KD 効果の研究を参考に、光場を円対称に形成するという思想のもと、高 NA で径偏光 (Radial polarization, R-pol) と方位偏光 (Azimuth polarization, A-pol) の光ビームを集光する系を考案した。ベクトル回折積分法により計算した波長 $1 \mu\text{m}$ の光の電場と磁場分布から、KD 効果を古典的に導出して光場中におけるエネルギー 1keV の電子の軌道計算を行った。その結果、電子線が R-pol の場合に発散作用を、A-pol の場合に集束作用を受けることを示した。また、集束作用の際に球面収差が負になることが示された (図 5)。本成果を論文にまとめ学術誌に投稿したところ、査読者から有益なフィードバックを得ることができた。この過程で、KD 効果がプラズマ物理の分野で知られるポンデロモーティブ力と本質的に等価であるとの結論を得た。これにより、レーザを使った電子位相素子の設計が著しく簡素化できるようになった。

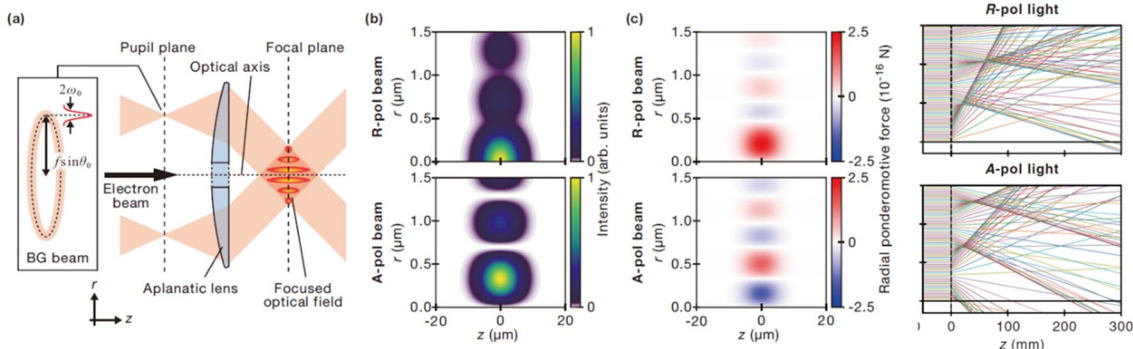


図 5. (a) Bessel-Gaussian モードの R/A-pol 光ビームを使った電子レンズの概念図。(b) NA0.9 のレンズで集光した R/A-pol 光ビームの強度分布。(c) 発生するポンデロモーティブ力の場合。(右図) 光ビームの集光面に垂直に入射する電子の軌道計算の結果。いずれも Y. Uesugi et al. Phys. Rev. Applied 16, L011002 (2021)より引用。

(2) 上記の成果・考察から、電子の運動速度が非相対論的な場合には、電子に与える位相変調作用を考える際に光場の電場/磁場分布を求めめる必要がなく、ただ強度分布に比例係数を掛けた屈折率が実現するとの結論を得た。これをもとに、電子レンズの諸特性を幾何光学の手法で解析的に表すことができるとの着想を得た。屈折率媒質の形状として、Laguerre-Gaussian モード、Bessel-Gaussian モード、および伝搬方向の分布を指定しない Bessel モードの光場を採用し検討を行った。そのような形状の屈折率媒質は、光学においても電子光学においても存在しないため、最小作用の原理から定式化を試みた。その結果、いくつかの近似条件のもと、焦点距離や球面収差係数などのレンズ特性を、僅かなパラメータで決定可能な簡素な表式を得ることができた。得られた表式をもとに、実際の電子顕微鏡装置を想定した $+1 \text{nm}$ の 3 次球面収差を有する電子光学系を考え、そこにポンデロモーティブレンズ (レーザによる電子レンズ) を配置して球面収差補正の検討を行った。その結果、いくつかの近似のもとで得られた表式が、電子光学設計に十分に有用であることを、近似を用いない電子軌道計算の結果とともに示すことができた (図 6)。

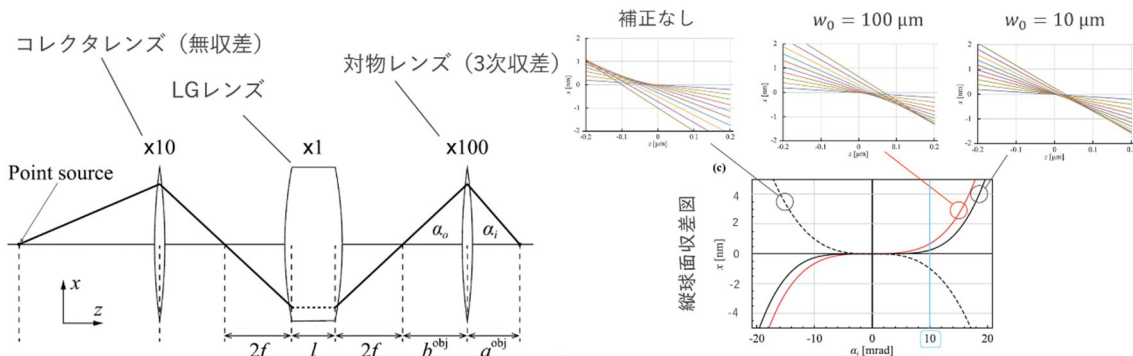


図 6. (左) 電子顕微鏡を想定した電子光学系の概要。Laguerre-Gaussian 光ビームで形成したポンデロモーティブレンズを LG レンズと記した。(右) LG レンズによる球面収差補正の影響を比較した様子。元図は Y. Uesugi et al., J. Opt. 24, 054013 (2022)より引用。

(3) パルス動作する実証実験系を構築するために、はじめに電子銃の特性把握に取り組んだ。SEM に利用されるショットキー型の電界放出 (Field Emission: FE) 陰極は、直径数 100nm のチップ先端に電界が集中し、空間コヒーレンスの良い電子を高輝度に発生することができる素子である。発生する電子の特性を精度良く理解するために、表面電荷法による計算コードを開

発しシミュレーションを行った(図7)。これにより、実験系の電子源(入射電子波)の性質を特定することができた。

次に真空容器の設計・開発に取り組んだ。レーザーを集光してポンドロモティブレンズを形成するために、電子ビーム透過用の貫通穴をもった高NA(0.6)集光レンズと45度反射鏡を設計し、シグマ光機社に作製を依頼した。これらの光学装置は、真空容器内の3軸直動自動ステージに搭載され、位置制御する。水平方向の制御には高い位置精度と制御分解能を有するピエゾモーターステージを採用した。垂直方向の制御には、1 kg程度の重量物を動かすことができるよう、分解能の高いステップモーター型ステージを採用した。いずれもFE電子銃の動作に必要な超高真空($\sim 10^{-7}$ Pa)で使用できる性能のものを採用した。真空容器に精密な光学素子や自動ステージを収める都合、ベーキング温度をなるべく低くしたい要求があった。そこで、真空容器の材質にアルミ材を選んだ。電子線の検出にはマイクロチャンネルプレートを搭載した蛍光板による二次元検出器を採用した。図8に真空容器の外観を示す。

研究実施期間中に発生した世界的な物流混乱の影響で、真空容器の作製が想定を超える高額になった。そこで、パルスレーザーを自作することにした。図9にレーザー系の構成図を示す。中心波長1060 nm、繰り返し10 MHzのフェムト秒モード同期パルスレーザーを作製し、チャープ・ファイバー型ブラッグ回折格子(Chierped Fiber Bragg Grating: CFBG)でパルス伸長した後に、ダブルクラッドファイバによる光増幅器で10 Wにまでパワー増強する。その後、回折格子対を使ってパルス圧縮し、非線形光学素子を使って1060 nm 530 nm 265 nmと、電子銃駆動用の紫外パルスレーザーを発生する。紫外レーザーに変換されなかった1060 nmの近赤外レーザーを径/方位偏光変換素子をつかってベクトル光ビームに変換し、真空容器内の集光レンズに導く。目標とするレーザーパワーは、紫外レーザーについて5~50 mW、近赤外レーザーについては5 W以上である。また、要求パルス幅はそれぞれ1 ps以下である。ポンドロモティブレンズが1 keVの電子線に対して数mmの焦点距離を与えるのに必要なレーザーのピークパワーは、(2)で求めた標式から、レーザーを10 μm 以下に集光した場合1 MW以下と求まり、上記のレーザー性能で十分に満たすことができる。開発したモード同期発振器と光増幅器を図10および図11に示す。残念ながら、本研究期間の間に目標のパルスレーザーを開発することはできなかった。現在そのボトルネックとなっているのは、回折格子対によるパルス圧縮部である。これまで使用していたパルス波形の測定器(オートコリレータ)が性能劣化しており、圧縮がうまくいかない原因を解明できていないのが最大の問題である。今後、オートコリレータを新調して、パルス圧縮がうまく行えない原因を調査する予定である。

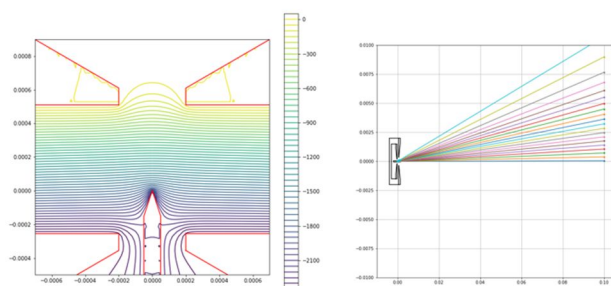


図7. (左) 表面電荷法により計算したFE陰極近傍の等電位線。(右) FE陰極と引き出し電極からなる電子銃から放出された電子の軌跡。

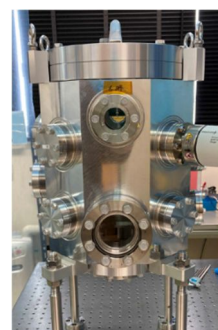


図8. 真空容器の概観。

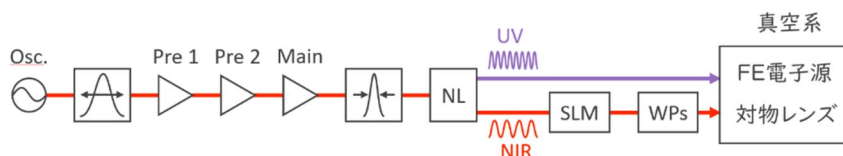


図9. パルスレーザー光学系の構成図。Osc.: レーザー発振器、Pre: 光前置増幅器、Main: 光主増幅器、NL: 非線形光学素子、SLM: 空間光変調器、WPs: 偏光変換素子。

(4) 本研究の当初案では、光共振器にレーザーを蓄積してパワー増強する手法を構想していた。この課題に関連して、ファイバーレーザーと光蓄積共振器を一体化した外部制御を必要としないフェムト秒レーザー蓄積装置を、早稲田大、広島大、高エネ研の研究者に本研究者を加えた研究グループで取り組み、その実証に成功した[Y. Koshiba et al., Opt. Express 30, 43888 (2022); DOI: 10.1364/oe.472917]。また、本研究では、レーザーの偏光分布や空間形状を自在に制御し高NAの対物レンズで集光する技術が求められる。この光学技術をレーザー加工に応用することで関連する成果を得ることができた[Y. Kozawa et al., Bio. Opt. Express 13, 1702 (2022); DOI: 10.1364/boe.449329, Y. Uesugi et al., Appl. Phys. A 129, 101 (2023); DOI: 10.1007/s00339-022-06361-8]。これらの実験で得られたノウハウは、ポンドロモティブレンズの実証実験における装置調整や光学系の評価・考察に際しても、重要な技術的知見を提供すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Uesugi Yuuki, Kozawa Yuichi, Sato Shunichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Electron Round Lenses with Negative Spherical Aberration by a Tightly Focused Cylindrically Polarized Light Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 L011002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevapplied.16.L011002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kozawa Yuichi, Nakamura Tomoya, Uesugi Yuuki, Sato Shunichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Wavefront engineered light needle microscopy for axially resolved rapid volumetric imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biomedical Optics Express	6. 最初と最後の頁 1702 ~ 1702
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/boe.449329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Uesugi Yuuki, Kozawa Yuichi, Sato Shunichi	4. 巻 24
2. 論文標題 Properties of electron lenses produced by ponderomotive potential with Bessel and Laguerre-Gaussian beams	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 054013 ~ 054013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2040-8986/ac6524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Koshiba Yuya, Otsuka Seiya, Yamashita Koki, Fukushima Chikara, Araki Sakae, Aryshev Alexander, Omori Tsunehiko, Popov Konstantin, Takahashi Tohru, Terunuma Nobuhiro, Uesugi Yuuki, Urakawa Junji, Washio Masakazu	4. 巻 30
2. 論文標題 Harmonically mode-locked laser pulse accumulation in a self-resonating optical cavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 43888 ~ 43888
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/oe.472917	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Uesugi Yuuki, Miwa Taito, Kadoguchi Naohiro, Kozawa Yuichi, Sato Shunichi	4. 巻 129
2. 論文標題 Multi-beam ultrafast laser processing of free-standing nanofilms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-022-06361-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uesugi Yuuki, Kozawa Yuichi, Sato Shunichi	4. 巻 arXiv:2103.16406
2. 論文標題 Electron round lenses with negative spherical aberration by a tightly focused cylindrically polarized light beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uesugi Yuuki, Kozawa Yuichi, Sato Shunichi	4. 巻 arXiv:2201.08523
2. 論文標題 Properties of electron lenses produced by ponderomotive potential with Bessel and Laguerre-Gaussian beams	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 上杉祐貴, 小澤祐市, 佐藤俊一
2. 発表標題 光ビームで実現する電子ラウンドレンズのレンズ特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 2022年3月26日 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuuki Uesugi, Taito Miwa, Naohiro Kadoguchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Koh Saito
2. 発表標題 Toward the realization of innovative optical elements based on nanofilms and laser light in the field of electron microscopy and matter wave optics
3. 学会等名 ICMaSS2021 2021年11月4日 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上杉祐貴, 小澤祐市, 佐藤俊一
2. 発表標題 強く集光したベクトルビームによる電子レンズ作用の検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 2021年9月13日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上杉祐貴, 小澤祐市, 佐藤俊一
2. 発表標題 集束レーザー光を使った低速電子線向け電子レンズの提案
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会 2021年8月9日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuuki Uesugi
2. 発表標題 Development of self-resonating enhancement cavity operating in single-longitudinal-mode
3. 学会等名 CLEO 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上杉 祐貴
2. 発表標題 Kapitza-Dirac効果による電子レンズ作用の検討
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上杉 祐貴
2. 発表標題 超短パルスレーザーによる電子ビーム変調技術の検討
3. 学会等名 電子光学設計技術分科会第7回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上杉祐貴, 小澤祐市, 佐藤俊一
2. 発表標題 収束レーザー光による電子レンズの検討
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上杉祐貴
2. 発表標題 ポンデロモータティブ電子レンズのレンズ特性
3. 学会等名 電子光学設計技術分科会第9回研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上杉祐貴
2. 発表標題 構造化レーザービームでつくる第三の電子レンズ
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第47回関東支部講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 電子ビーム変調装置及び電子ビーム変調方法	発明者 上杉祐貴，佐藤俊一，小澤祐市	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/007352	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 電子ビーム変調装置及び電子ビーム変調方法	発明者 上杉祐貴，小澤祐市，佐藤俊一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-056381	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------