

研究終了報告書

「光子－電子誘導非線形散乱による新規光学技術の創出」

研究期間：2020年10月～2024年3月

研究者：上杉 祐貴

1. 研究のねらい

光科学の分野では、光と物質の非線形相互作用について古くから深く研究が進められており、数多くの重要な成果が我々の社会生活に還元されている。イオンと電子の複合系であるプラズマとの相互作用に関しても、チャープパルス増幅(CPA)技術の発明に続くアト秒科学の誕生など、この四半世紀の間に多くの進展があった。一方で、素粒子である電子との非線形相互作用については、第一原理的な理解が十分に進んでいるものの、実用的な応用展開はほとんど見られない。1つの電子と2つ以上の光子が関与する非線形 Compton 散乱を利用することで、様々な電子光学作用が生じることが指摘されているものの、原理実証が確立した例すら少ないのが現状であった。

本研究では、電子と光定在波中の光子との誘導散乱過程である Kapitza-Dirac 効果(KD効果)、および、関連するボンデロモーティブポテンシャルを駆使した新しい電子光学作用の実証と、電子顕微鏡装置への応用を目指した。直線状の光定在波を用いた電子位相素子の実証が2019年に報告されていたが、本研究ではこれを発展させ、回転対称な光定在波を使って、電子線を収束/発散する電子レンズとして応用することを着想した。加えて、事業開始前の検討により、回転対称な光定在波が負の球面収差を発生することを発見した。この特性を利用することで、高性能の電子顕微鏡装置に欠かせない球面収差補正を実現する新手法を着想した。本研究期間中に、電子レンズおよび球面収差補正を電子光学装置へ適用するための、理論体系を整備することを目指した。また、これらの現象を世界に先駆けて実験的に実証することを目指した。

上記の電子レンズおよび球面収差補正作用は、ボンデロモーティブポテンシャルを使って電子波面を空間位相変調することにより実現する。これは、従来の静電場・磁場を用いた電子光学素子でも原理的には実行可能な作用である。一方で、電子のエネルギー分散やスピン偏極といったパラメータは、電子顕微鏡法において未だ自由に制御・操作する技術が存在しない。本研究では、電子と光の非線形相互作用を駆使して、これらのパラメータを制御・操作可能な新しい電子光学素子を提案し、電子顕微鏡法および関連技術に新機軸を与えることも目標とした。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の目標を大別すると次の2項目になる。

A. 回転対称な光定在波による電子レンズ・球面収差補正作用の検証・実証

B. 空間位相変調以外の電子線操作・制御技術の検討

さらに項目Aの内容は以下の小項目に区分される。

I. 電子光学装置へ適用するための理論体系の整備

II. 原理実証のための装置開発と実験的検証

III. 社会実装を目指した研究体制の構築

このうち小項目 II には以下の開発要素が内包される。

- a. 使用する電子源の検討
- b. 真空装置の設計・開発
- c. レーザー光源の開発
- d. レーザー光の変換・成形技術の確立
- e. レーザー光-電子線衝突系の確立

項目 A-I の実施成果として、円環状光ビームを使って発生する電子レンズ作用を幾何光学にもとづき解析し、諸レンズ特性を簡素な表現に整理した。この電子レンズを「ポンドロモータイプレンズ」と名付けた。また、透過電子顕微鏡の結像系にポンドロモータイプレンズを適用することで、3 次球面収差を補正できることを示した。項目 A-II については、要素 c のレーザー光源開発が難航したため、当初計画を変更し、他研究者から借り受けたレーザー光源を使用して開発を継続した。結果として、d までの開発要素を研究期間中に達成することができた。項目 A-III では、本研究期間中に電子顕微鏡装置の製造企業と秘密保持契約を締結することができた。項目 B に関しては、本研究期間中に具体的な成果は創出できなかったが、今後の研究テーマとなり得る新しい電子光学要素の着想を得ることができた。

(2) 詳細

A. 回転対称な光定在波による電子レンズ・球面収差補正作用の検証・実証

I. 電子光学装置へ適用するための理論体系の整備 [研究成果 5.1.1, 5.1.2, 5.3.4, 5.3.5]

光定在波や集光されたレーザースポットなど、強度分布が急な勾配をもつ光場に自由電子が入射すると、KD 効果やポンドロモータイプ力が生じる。いずれも、ポンドロモータイプポテンシャルと呼ばれる、ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ の 2 乗に比例する時間平均された実行相互作用ポテンシャルで、現象を理解することができる。電子光学では、相互作用ポテンシャルが電子の位相変調を与える屈折率媒質として機能するから、結局、自由空間中に形成される光場の強度分布形状を解析することで、電子波に与える波面変調作用を理解できる。本研究では、電子線と同軸に配置された集光ビームがどのような光学効果を引き起こすか、数値計算や幾何光学を使って検討を行った。

まず、強く集光された回転対称な光場中の電子の運動を数値シミュレーションし、電子レンズ作用や負の球面収差が得られることを論文(研究成果 5.1.1)において示した。次に、典型的な円環状ビームである Laguerre-Gaussian (LG) ビームと Bessel ビームを対象に、発生する電子レンズ作用の詳細な特性解明に取り組んだ。ポンドロモータイプポテンシャルは電子が非相対論的な場合にスカラーポテンシャルになる。この場合についての検討結果を研究成果 5.1.2 にまとめた。また、相対論的な場合でも、光場が電子の進行方向に垂直な偏光成分しか持たないとき、電子質量に補正が入るのみで、ポテンシャルの形状は前記の場合と同じになる。その内容については研究成果 5.3.4 にまとめた。

解析の結果、ポンデロモーティブレンズの厚さを無視する薄レンズ近似のもとで、各次数の LG/Bessel ビームに対する、焦点距離および球面収差係数を導出する公式を導出することができた。得られた公式は、電子の運動エネルギー、光ビームの強度、波長、集光ウエスト半径、および電子レンズ系の設計で決まる物面/像面距離の、わずか5つのパラメータを含む簡単な表現であった。薄レンズ近似から導いた公式の妥当性と適用限界を調査するため、近似を用いない電子軌道計算の結果と比較・評価を行なった。また、実際の透過電子顕微鏡の結像レンズ系を模したモデルを考え、電子対物レンズの3次球面収差を補正するパラメータを決定し、ポンデロモーティブレンズを球面収差補正に適用できることを数値的に初めて示すことができた(図1)。得られた結果は特定の光場分布によるものであるが、任意形状の光ビームの成形する際の指針として利用が期待できる。

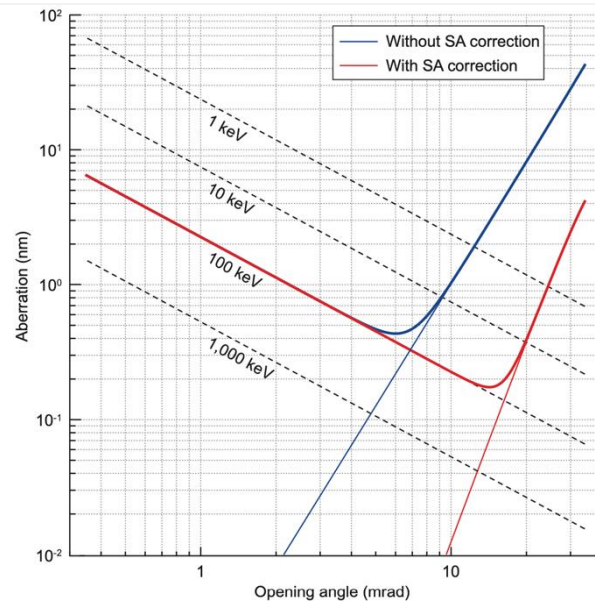


図 1. ポンデロモーティブレンズを使った球面収差補正の計算結果。研究成果 5.3.4 より引用。

II. 原理実証のための装置開発と実験的検証

a. 使用する電子源の検討

実用されている電子顕微鏡用の電子源にはいくつかのタイプがあるが、本研究では、入手性が良く空間コヒーレンスの高いショットキー型の電界放出チップ(FET)陰極を採用した。また、電子の発生には紫外パルスレーザー光の照射による光励起法を採用した。ポンデロモーティブレンズを形成する光場も、紫外パルスとタイミング同期した近赤外パルスレーザー光を用いることで、高い瞬時光パワーをレンズ作用に利用することが可能である。これにより、現実的な出力のレーザー光源で実証実験を行うことが可能である。その後、FET から放出される電子の角度拡がりなどの情報を得るために、電子軌道のシミュレーションコードを開発した。

b. 真空装置の設計・開発

開発したシミュレーションコードをもとに、レンズ作用の実証実験系の設計・開発を行なった。装置構成は、光励起のためのスリットを備えた FET 電子銃、レーザー集光用の反射型対物レンズと直角ミラー、それらを搭載する3軸直動精密ステージ、電子線プロファイル観察用のマイクロチャンネルプレート(MCP)付き蛍光スクリーン、および超高真空を実現する排気系から成

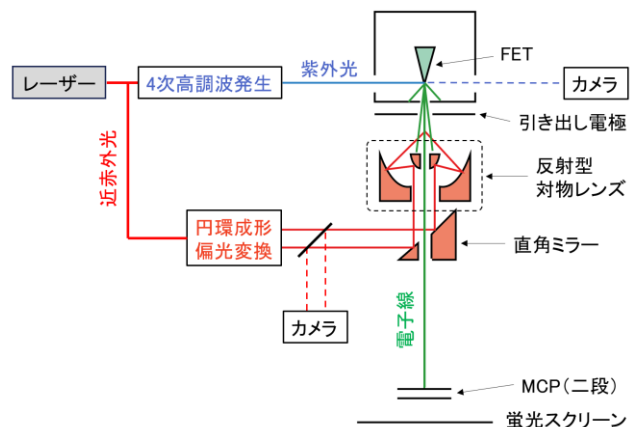


図 2. 開発したポンデロモーティブレンズ実証実験系の概念図。

る(図 2)。電子銃は電子引き出し用の電極を有するのみで、ビーム収束用の電子レンズは備えていない。引き出し電極直後にポンデロモータティブレンズを形成し、これをコレクタレンズとして機能させることを計画した。レンズから MCP までの間にビーム偏向器などは備えておらず、反射型対物レンズと直角ミラーに設けた電子ビームの透過穴が、ビームコリメーション用のピンホールとして機能することを期待した。

開発した装置は、反射型対物レンズおよび直動ステージの耐温度を考慮し、低いベーク温度で超高真空を達成できるアルミ製の真空容器を採用した。世界的な物流の混乱により、装置の価格・納期が当初の想定を大幅に超過したが、無事に研究室に導入できた。真空度は最終的に 4×10^{-7} Pa 未満に達し、FET 電子銃の運転基準値を十分に満たすことができた。

c. レーザー光源の開発 [研究成果 5.1.3]

ポンデロモータティブレンズの形成と FET の光励起のために、波長 $1 \mu\text{m}$ 帯、パルス幅 $< 1 \text{ ps}$ 、繰り返し $\sim 10 \text{ MHz}$ 、出力 10 W 級のファイバー型パルスレーザー光源の開発を行った。本研究者は、別の研究テーマでファイバー型モード同期レーザーをベースとした光学装置の開発を実施しており、本開発要素とノウハウを共有することで作業を促進できると考えた。偏波保持ファイバーの接続が可能な融着器を導入し、モード同期発振器と CPA 系の開発を実施したが、 100 ps 程度まで伸長した光パルスを 1 ps 未満に再圧縮することができなかった。この原因が、モード同期発振器から出力されるシード光の品質にあることを突き止め、改良したモード同期発振器を開発した。しかし、この段階で計画していた研究期間を超過していたため、レーザー光源の開発を断念することにした。一方で、技術ノウハウを共有した別研究テーマの開発は順調に進み、本研究の関連成果として研究成果 5.1.3 を得ることができた。

d. レーザー光の変換・成形技術の確立 [研究成果 5.1.4, 5.3.3]

レーザー光源開発を断念した代わりに、実験の要求値を満たす市販品のレーザー光源(波長 1040 nm 、パルス幅 250 fs 、繰り返し 10 MHz 、出力 5 W)を、所属研究室において借り受けて研究を継続した。まず、FET の光励起に必要な紫外光を、波長 1040 nm の近赤外レーザー光の第 4 次高調波発生によって生成した(波長 260 nm)。その光パワーは、 4.6 W の入力近赤外光パワーのとき最大で $\sim 120 \text{ mW}$ を発生した。生成した紫外光をコリメートした後に、焦点距離 175 mm のレンズで集光し、真空容器内の FET の先端に照射した。その様子を観察するために、紫外光の透過側に結像系を構築して、FET に照射される紫外光のスポット位置を測定できるようにした(図 3a)。

紫外光の変換に利用されなかった最大 $\sim 3.8 \text{ W}$ の近赤外光は、空間光変調器(SLM)と分割型

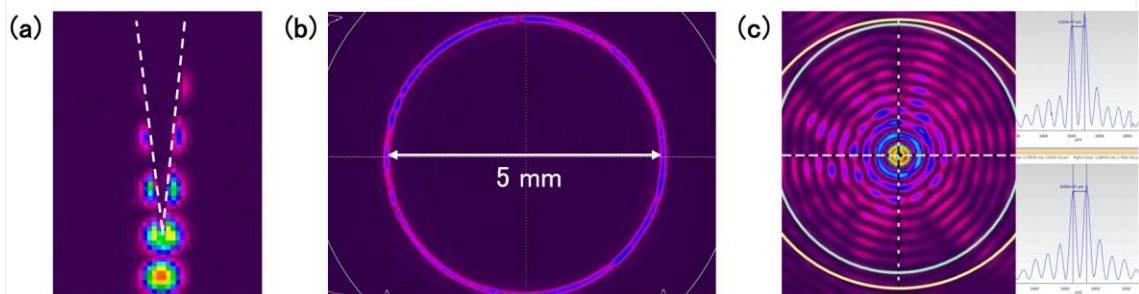


図 3. (a) FET に集光した紫外光のスポットを観察した様子。複数の取得画像を 1 枚に合成して表示している。白の点線で示したものが FET。(b) 近赤外光を円環状に整形して得られたビームプロファイルの例。(c) 反射型対物レンズで集光した近赤外光のプロファイル(80 倍に拡大結像したもの)。サブプロットは縦/横方向のラインプロファイル。

液晶波長板によるビーム変換光学系を用いて、その強度分布と偏光分布を操作した。結果、直線偏光状態のガウシアン形状の近赤外光を、直径 2 から 5 mm の任意の大きさの、径偏光または方位偏光の円環状ビームに成形することができた(図 3b)。このビームを、真空容器に収めたものと同型の反射型対物レンズに入射し、焦点プロファイルを観察した(図 3c)。プロファイルの取得には倍率 80 倍の拡大レンズ系を用いた。反射型対物レンズには副鏡を支えるための 3 本の柱が存在するため、それが遮蔽物となり、一般にレンズ特性の劣化を招く。また、本研究で使用する対物レンズは、電子ビーム透過のために副鏡に穴あけ加工が施されており、鏡面歪みの影響が危惧された。しかし、得られた結果は円対称性の良い集光プロファイルを示しており、実用上問題のないことが確認できた。

本研究者は、別の研究テーマでも SLM を用いたビーム成形や、径/方位偏光ビームを用いた光学実験を実施している。本研究の開発要素とノウハウを共有することで、それらの研究課題でも関連成果を得ることができた(研究成果 5.1.4)。

e. レーザー光-電子線衝突系の確立

FET から放出される電子ビームと、ポンデロモータイブレンズを形成する近赤外光は、ともに最短で半値全幅 250 fs のパルス状の時間構造を有する。そのため、レンズ作用を生じる相互作用点において、電子パルスと光パルスを時空間的に一致させなければならない。250 fs の時間幅を大気中の光学距離に換算すると 75 μm であるが、これは一般的なマイクロメーター付き直動ステージで調整できる遅延量である。よって、パルス時間同期の操作系については、市販の高精度直動ステージを用いることで構築することができた。一方で、2 つのパルスをビーム軸に垂直な面内で一致させる空間同期については、残念ながら本研究期間のうちに最適な調整手法を確立することができなかった。真空容器内において、反射型対物レンズで集光した近赤外光のプロファイルを観察する手段がなかったこと、および、直角ミラーの角度を調整する機構の欠如が、主な要因であった。また、FET を紫外光で励起して生成した電子ビームの測定結果からも、実験系の改善点がいくつか判明した。反射型対物レンズと直角ミラーに設けた直径 1.5 mm の電子ビーム透過用の穴は、ピンホールとしての作用を期待するには直径が大きすぎた。また、FET の励起に使用した紫外光の波長が短すぎたために、散乱光が真空容器内の金属面を叩いて光電子を放出し、蛍光スクリーン上に大きな背景ノイズを発生させた。今後、真空容器内に収めた反射型対物レンズと直角ミラーの設計を見直すとともに、光学素子マウントに調整機構をもたせ、紫外光の生成を第 3 次高調波発生による波長 347 nm に切り替えるなど、実験系の改修に取り組む計画である。

III. 社会実装を目指した研究体制の構築

本研究期間中に、電子顕微鏡装置を製造する企業と秘密保持契約を締結することができた。残念ながら、研究期間中に発生した世界的な感染症の流行により、交流の大半はオンラインによる打ち合わせに留まったが、本研究期間以降の長期的な研究戦略について議論を行うことができた。今後、研究者側からは新技術のシーズと具体的なアプリケーションの提案を行うこと、企業側からは実験装置開発のための企業・技術者ネットワークの紹介と支援を提供し、協力関係を深めていく方針である。

B. 空間位相変調以外の電子線操作・制御技術の検討

当初の研究計画では、本研究において高次の KD 効果を実証するための実験系の確立を目指すとして記載した。具体的には、基本波と倍波から成るビート場と自由電子との、スピン相互作用

を含む非線形散乱過程である Tow-color Kapitza-Dirac 効果(二色 KD 効果)の、学理追求を志向したものである。しかしながら、本研究期間中に、より社会実装に役立つ革新技术の創出を目指すように志向を転換し、その結果、空間位相変調以外の電子線操作・制御技術を検討するようになった。そして、ポンデロモーティブポテンシャルの偏光依存な相対論的效果を利用する新技术を着想するに至った。いずれも本研究期間中に具体的な成果は創出できなかったが、本事業終了後に開始予定の JST 創発的研究支援事業において、これらの研究テーマに取り組む予定である。

3. 今後の展開

本研究では、ポンデロモーティブポテンシャルを用いた電子線の波面変調技術、特に電子レンズ系への適用を志向した要素の開発に取り組んだ。本研究期間において、原理検証実験に向けた装置設計の要点や、技術的な課題の洗い出しを行うことができた。真空容器外のレーザー光学系については、必要な要素・技術を得ることに成功したので、今後は真空容器内の素子設計と改修に励む予定である。また、本研究中に開発した FET 電子銃やポンデロモーティブポテンシャル、および電子軌道計算のシミュレーションコード(図 4)を駆使することで、研究期間の終了間際に、レーザー集光場を FET 電子銃の加速電界内に形成する、イメージン型のポンデロモーティブレンズを着想することができた。また、開発中の実験装置を使って、その現実可能性を検討することができた。今後、本構成の詳細な研究を進める予定である。

本研究期間中に生じた環境の変化として、2022 年秋に、ポンデロモーティブレンズの実証を欧州の研究グループに先行された。これにより、今後ポンデロモーティブレンズの研究の要点は、球面収差補正技術の可否に移ることが予想される。球面収差補正の検証には、電子光学装置に高い性能が要求されるため、実験装置の開発には一層の努力が必要になる。こうした状況に鑑みて、今後、電子顕微鏡や電子光学装置を扱う研究者や、中小規模の企業との交流を促進し、自身の知識・技術向上とともに、研究・開発体制の構築を進める予定である。

上記に加えて、研究成果の項目 B で示した、ポンデロモーティブポテンシャルの相対論的效果を駆使する技術、および、二色 KD 効果の基礎研究を進めることも重要であり、これらに取り組む予定である。欧米では、ポンデロモーティブポテンシャルを使って電子の波面変調を施す手法は、すでに既知の技術として認知されているといえ、これを利用した新しい電子顕微鏡法の開発が始まっている。一方で、レーザーと電子光学装置の融合技術の秘める可能性を最大

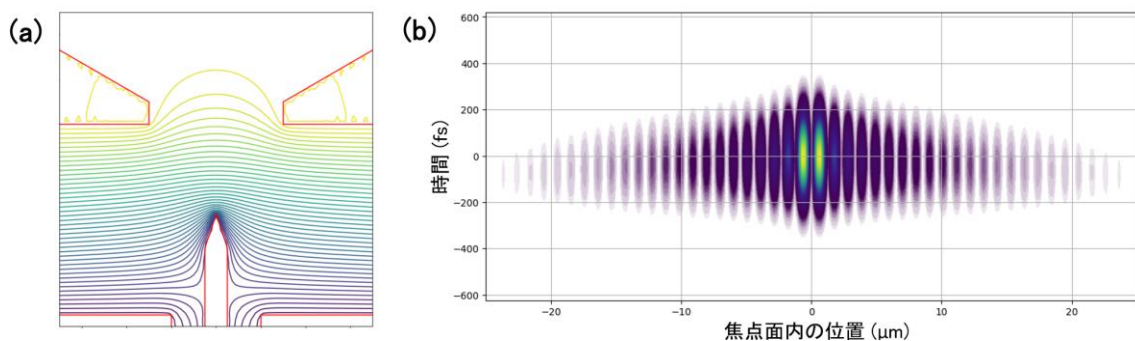


図 4. 数値計算によるシミュレーション結果の例。(a) FET 近傍の等電位線を計算した結果。(b) パルスレーザー光を集光して生成した、焦点面におけるポンデロモーティブポテンシャル。縦軸は時間、横軸は焦点面内における 1 軸方向を示す。

限に発揮するには、電子波面の空間位相変調技術だけでは不十分であり、電子エネルギー分散やスピン偏極を制御・操作する、真に革新的な電子光学技術の創出が必要である。本研究で得た知識や知見、人的ネットワークを駆使して、今後この究極の目標に挑んでいく予定である。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

研究目標のうち、項目 A-I については、ポンデロモーティブレンズの特性に関して十分な検討を行うことができた。学術誌への論文投稿と、それに関するプレスリリース、および電子光学分野の専門誌への寄稿を通じて、プレゼンスも確保することができた。A-II の項目に関しては、計画していた実験装置の構築は全て完了したものの、本研究期間において電子線とレーザー光の衝突実験を実現するには至らなかった。また、研究期間中に競合する研究グループが現れて、本研究課題の初実証の機会を逃したことは悔やまれる。一方で、実験原理や開発方針に誤りはなく、正しく策定できていたことが確認できたといえる。項目 A-III については、本研究期間のあいだに電子顕微鏡製造企業と秘密保持契約を締結し、情報共有を行うことができた。本研究の終了後も継続して交流する予定であり、実験装置の開発・改修に際して一層の支援が期待できる。項目 B に関しては、本研究期間中に具体的な成果をあげることはできなかった。しかし、レーザーと電子光学の新しい融合技術に繋がる、重要な着想と方針を得ることができた。本研究終了後に、JST 創発的研究支援事業において、これらのテーマを継続して研究する予定である。

研究の進め方

目標に掲げた原理検証実験 A-II が達成できなかったことは、研究の進め方に課題があったことを意味している。結果からみれば、レーザー光源を自身で開発せずに購入しておけば、研究時間に余裕が生じ、真空装置の改修に着手できていた可能性があった。世界的な感染症拡大の影響で物流が混乱し、真空装置の価格や納期が予定を大幅に超過したことも、少なからず実験の遅れに影響している。本研究課題では、理論計算や数値計算による検証、実験系の設計、真空・電子光学系の開発、レーザー系の開発と、複数の研究項目が存在した。これらを単独で処理するには、自身の経験が不十分であったと感じている。今後は、余裕のある研究計画の立案に、実験を遂行する人員の確保など、研究活動の遂行にあたっての適切な体制作りが重要であることを学んだ。本事業で得られた経験を糧に、引き続き本研究テーマの展開のために邁進したい。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究によって、ポンデロモーティブレンズの電子レンズとしての基礎特性を明確に示すことができた。今後、電子光学装置の設計者は、ポンデロモーティブレンズを取り入れた電子レンズ系を容易に設計できるようになるから、レーザー光学と電子顕微鏡技術の融合が大いに促進されると期待される。電子レンズ作用以外の応用に目を向けると、かねてよりレーザー技術を電子顕微鏡法に取り入れることに熱心であった欧州や米国では、ポンデロモーティブポテンシャルを電子位相板に応用する電子顕微鏡法の研究が始動している。今後 10 年程度で、従来の顕微法とは一線を画すインパクトのある成果が創出されるのではないかと予想される。一方で国内では、レーザー光学と電子顕微鏡技術の融合は顕著に実施されていないものの、両分野とも国際的に高い技術水準にある。産学連携で一つ核となるプロジェクトが始動すれば、強力な研究開発体制が構築できると確信している。本研究テーマは、電子顕微鏡法のみならず、電子線リソグラフィや収束

イオンビーム装置などの周辺分野にも、広く応用可能性のある技術であることから、潜在的に社会・経済に与える波及効果は大きいといえる。

当初計画では想定されていなかった展開やそれによる成果、及び研究者としての飛躍につながるような成果

研究当初は、KD 効果の古典的解釈として、定在電磁場中の自由電子の運動を考え解析していた。この手続きでは、電子の運動方向を決めるのに光定在波の偏光方向が重要であった。回転対称な光定在波を扱う場合には、2 つの直交する偏光状態として径偏光と方位偏光を指定し、数値計算による評価を実行していた。その後、光定在波による電子波面変調作用の本質がポンデロモータイプポテンシャルにあると考え、光ビームの強度分布のみを議論の対象とするようになった。しかし、ポンデロモータイプポテンシャルの電子光学素子への応用を深く追求する中で、関連する先行研究において省かれてきた相対論的効果を、むしろ積極的に利用する新しい着想を得ることができた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:5件

1. Yuuki Uesugi, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, Electron round lenses with negative spherical aberration by a tightly focused cylindrically polarized light beam, *Physical Review Applied* **16**, L011002 (2021).

強く集光された径/方位偏光による光場が、KD 効果およびポンデロモータイプ力を介して、自由電子の軌跡をどのように曲げるか、数値シミュレーションコードを開発して評価した論文。回転対称な構造の光ビームを電子線と同軸に配置することによって、凹凸レンズ作用や、正負の球面収差が生じ得ることを、世界にさがかけて示すことができた。

2. Yuuki Uesugi, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, Properties of electron lenses produced by ponderomotive potential with Bessel and Laguerre–Gaussian beams, *Journal of Optics* **24**, 054013 (2022), *Emerging Leaders 2022*.

円環状のプロファイルをもつ典型的な光ビームに対して、ポンデロモータイプレnzを形成した際のレンズ特性を幾何光学に基づいて解析した論文。薄レンズ近似などを適用することで、レンズの焦点距離と球面収差係数を少数のパラメータで表現できる簡素な公式を導くことができた。また、電子プローブ系の3次球面収差補正を現実的なレーザー光のパラメータで設計できることを示した。本論文は *Journal of Optics* 誌の新進気鋭の若手研究者を表彰する特集号「*Emerging Leaders 2022*」に受理・掲載された。

3. Yuya Koshiba, Seiya Otsuka, Koki Yamashita, Chikara Fukushima, Sakae araki, Alexander Aryshev, Tsunehiko Omori, Konstantin Popov, Tohru Takahashi, Nobuhiro Terunuma, Yuuki Uesugi, Junji Urakawa, and Masakazu Washio, Harmonically mode-locked laser pulse accumulation in a self-resonating optical cavity, *Optics Express* **30**, 43888 (2022).

ファイバー型レーザー発振器と光蓄積共振器を一体にした独自構成の光学装置を開発した研究内容の論文。系にモード同期機構を導入し、ハーモニックモード同期を発生させて、レーザーパルスを外部的フィードバック制御なしに光共振器に蓄積する新しい手法を実証した。

4. Yuuki Uesugi, Taito Miwa, Naohiro Kadoguchi, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, Multi-beam ultrafast laser processing of free-standing nanofilms, *Applied Physics A* **129**, 101 (2023).

超短パルスレーザーを使ったナノ薄膜の干渉パターンニング加工に関する論文。回折光学素子を使ってレーザー光を複数本のビーム束に分歧し、それを厚さ 10 nm の窒化シリコン膜に集光し二次元干渉パターンを形成することで、直径 200-100 nm の多点穴あけをシングルショットで実施することができた。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:0 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 上杉祐貴, “ポンドロモーティブ電子レンズのレンズ特性”, 電子光学設計技術分科会第 9 回研究会, オンライン, 2023 年 2 月 14 日 [招待講演].
2. 上杉祐貴, “構造化レーザービームでつくる第三の電子レンズ”, 日本顕微鏡学会第 47 回関東支部講演会, オンライン, 2023 年 3 月 7 日 [招待講演].
3. 上杉祐貴, “超短パルスレーザーを駆使した極限ナノ薄膜加工技術”, 第 32 回トーキン科学技術賞 トーキン財団奨励賞, トーキン科学技術振興財団, 2022 年 3 月 8 日 [受賞].
4. Yuuki Uesugi, The properties of ponderomotive lenses, *Advances in Imaging and Electron Physics* **228**, pp. 1-41, Elsevier B.V. (2023) [依頼執筆].
5. 上杉祐貴, “光がつくる電子のレンズ-原子ひとつまで分解する電子顕微鏡の実現に向けた新技術を提案”, 東北大学・JST, 2022 年 4 月 11 日 [プレスリリース].