



令和4年4月11日

東北大学多元物質科学研究所
科学技術振興機構(JST)

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

【発表のポイント】

- 光ビームが電子顕微鏡の探針として用いる電子ビームを絞りこむ「光場電子レンズ」として機能することを幾何光学^{*1}にもとづいて示した
- このレンズが電場や磁場を用いる従来のレンズでは実現できない「負の球面収差^{*2}」を発生することを示した
- 光場電子レンズを用いることで将来的に原子分解性能をもった電子顕微鏡を広く普及できると期待される

【概要】

電子顕微鏡は、ウイルスなどの微小物、半導体デバイスの微細構造、さらには物質の原子配列をも可視化できる観察ツールです。こうした高い分解能を達成するには、探針となる電子ビームを、原子ひとつの大きさに匹敵する0.1 nm (1 nm = 10億分の1 m) 以下にまで絞りこむ必要があります。東北大学 多元物質科学研究所の上杉祐貴助教らの研究グループは、これまで電場や磁場で構成されていた、電子ビーム集束用のレンズを、レーザーなどの強力な光ビームによる「光場」で実現する、新しい手法を提案しました。

この「光場電子レンズ」に対して、幾何光学にもとづいた理論的な解析により、焦点距離や球面収差を導くための重要な基礎となる公式を整備しました。これにより、誰でも容易に光場電子レンズを設計することが可能になります。また、光場電子レンズが従来のレンズでは実現できない「負」の球面収差を発生し、極小の電子ビームサイズを得るのに必要な、収差補正器としても利用できることを示しました。構造が複雑で高価な従来の磁場を用いる収差補正装置を光場電子レンズで置き換えることで、高分解能の電子顕微鏡装置を広く普及できると期待されます。

本成果は、英国時間の4月7日（木）付で、英国物理学会（Institute of Physics: IOP）の出版部門が提供する学術雑誌「Journal of Optics」誌において、新進気鋭の若手研究者を特集する「Emerging Leaders Collection」に掲載されました。

【詳細な説明】

電子顕微鏡は、可視光よりもはるかに小さなサイズに絞りこむことができる「電子」のビームを利用した観察ツールです。可視光のビームで到達できるビームサイズがおよそ 200 nm であるのに対して、最高性能の電子顕微鏡では、0.1 nm 以下にまで電子ビームを絞りこみます。この電子ビームを探針として用いることで、物質を構成する原子ひとつひとつの形状を画像化することが可能です。しかし、そのような極小のビームサイズを実現するには、電子レンズ装置で生じる「正」の球面収差を、収差補正器を使って適切に補正しなければなりません。これまでに開発された全ての電子顕微鏡では、電極板で発生する電場、または磁石の磁場を利用して、電子レンズ装置および収差補正器を構成していました。特に収差補正器は、非常に複雑で精密な構造をしており、その結果、最高性能の電子顕微鏡は 1 台あたり数～十億円という非常に高価な装置になり、ごく一部の研究者・企業しか利用できないという課題がありました。

東北大学 多元物質科学研究所の上杉祐貴助教らの研究グループは、レーザーなどの強力な光ビームによる「光場」を利用した、新しい原理にもとづく電子レンズ装置を考案しました。光場中を進む電子は、光強度の高い領域から弾かれる向きに、ポンドロモーティブ力^{*3}を受けます。この力は、光ビームが対向して定在波を成す場合や、強く集光される場合に、特に大きくなります。研究グループは、光軸上で強度がゼロであるような、ドーナツ状の強度分布をもつ光ビームを集光し、電子ビームと同軸に配置する構成を提案しました(図1)。これにより、ドーナツ形状の中央付近を通過する電子ビームは、ビーム軸方向に集束する向きに、光場から力を受けます。つまり、電子ビームに対して、光場がレンズとして機能します。

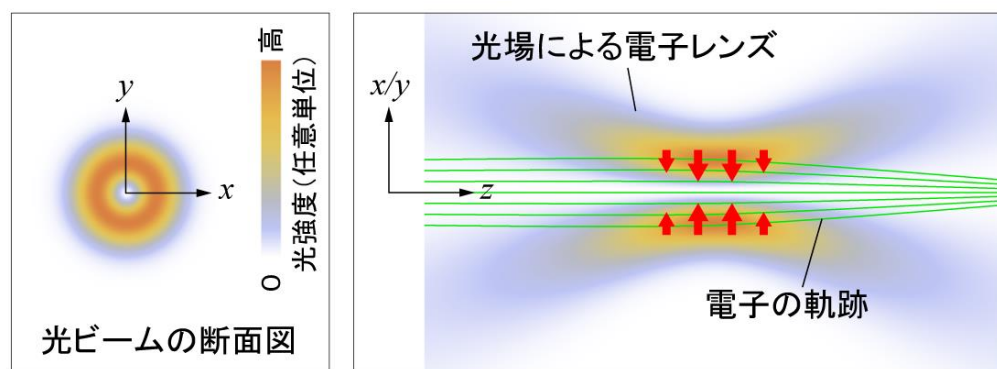


図 1. z 軸方向 (左図では手前側から奥側) に進む電子ビームと同軸上に、ドーナツ状の強度分布をもつ光ビームを集光すると、ビーム軸方向に集束する向き (右図において赤い矢印で示す向き) に、電子は光場からポンドロモーティブ力を受ける。この結果、電子ビームに対して光場がレンズとして機能する。

研究グループは、この「光場電子レンズ」の性質を明らかにするために、ベッセルビームおよびラゲールガウシアンビームと呼ばれる、2種類の典型的なドーナツ状光ビームを対象に、幾何光学にもとづいた解析を行いました。その結果、光場電子レンズの厚さを無視するなど、いくつかの近似を適用することで、焦点距離と球面収差係数を導くための簡素な公式を得ることに成功しました。また得られた公式から、光場電子レンズが、従来の電子レンズでは原理的に生じ得ない、「負」の球面収差を発生できることが示されました。

その後、研究グループは、1 nm の3次球面収差係数を有する典型的な電子レンズ装置に対して、先に導いた公式をもとに、球面収差を補正するような光場電子レンズの設計を行いました。電子軌道計算による評価の結果、焦点において、半径1 nmであった電子ビームサイズを、0.3 nmに縮小できることが示されました（図2）。この光場電子レンズを実現するのに必要な光ビームの出力を算出したところ、太さが10 μm のラゲールガウシアンビームを用いる場合、287 kWの光パワーが要求されることがわかりました。市販のフェムト秒レーザー光源^{*4}では、10 MWを超えるピーク出力を提供することができるため、光場電子レンズによる収差補正器は、現代のレーザー技術レベルでも実現可能であることがわかりました。本技術を、現在用いられている磁場を利用した収差補正器と比較すると、導入コストの点で大きな優位性があると期待されます。

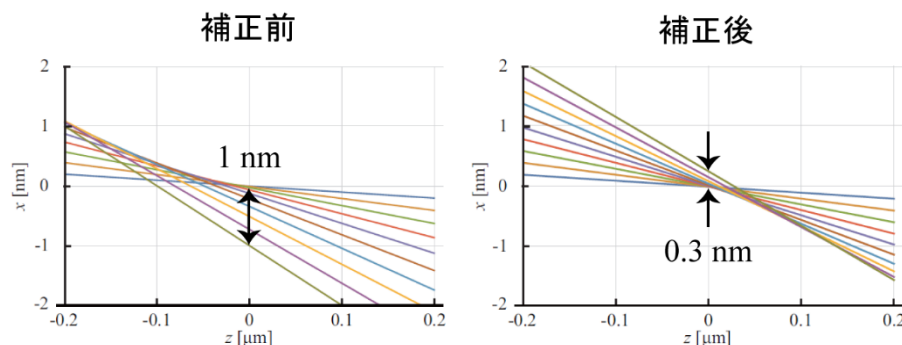


図2.典型的な電子レンズ装置が生じる「正」の球面収差を、公式をもとに設計した光場電子レンズで補正した結果。各線は、焦点（横軸 $z=0$ の位置）の近傍における電子の軌跡を示す。縦軸は電子ビームの半径方向の位置を示す。左図：補正前の計算結果。右図：補正後の計算結果。

最高性能の電子顕微鏡に迫る0.1 nm以下の電子ビームサイズを実現するには、今回検討した対物レンズの3次球面収差に加えて、5次以上の高次球面収差も補正する必要があります。また、色収差^{*5}など、球面収差以外の影響も考慮しなければなりません。こうした複雑な装置設計においては、設計の指針となるパラメーターを迅速に決定できる、簡素な公式が欠かせません。本研究の成果によって、光場電子レンズを備えた高分解能の電子顕微鏡を開発するための、基盤を確立することができたといえます。

高分解能の電子顕微鏡の導入コストを大幅に低減することができれば、最先端の量子材料研究、および量子産業の発展を大いに促進することができると期待されます。また、普及価格帯の電子顕微鏡の性能向上にも貢献が期待され、ウイルスなどの微小物を観察する医学・生命学の分野や、微細化が進む先端半導体産業へも大きな貢献が見込まれます。今後、光場電子レンズを用いた次世代電子顕微鏡の実用化へ向けて、検討を進めていく予定です。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業さきがけ「光子－電子誘導非線形散乱による新規光学技術の創出（JPMJPR2004）」、科学研究費補助金「基盤研究B（20H02629）」による支援を受けて行われました。

【論文情報】

タイトル：Properties of electron lenses produced by ponderomotive potential with Bessel and Laguerre-Gaussian beams

著者：Yuuki Uesugi, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato

掲載誌：Journal of Optics

DOI：10.1088/2040-8986/ac6524

【用語説明】

※1. 幾何光学

カメラレンズや天体望遠鏡などの設計のほか、電子顕微鏡レンズの設計にも用いられる光学理論の体系。

※2. 球面収差

理想的なレンズから射出された光線（または電子軌跡）は、光軸上の焦点位置にすべて集束する。しかし、現実には光線の集束角に応じてずれが生じ、これを球面収差という。従来の電子顕微鏡用のレンズでは、集束角が大きいほど、電子は焦点位置よりも近い位置で光軸と交差する「正」の球面収差が生じる。また、球面収差は収束角の奇数乗に比例する成分で構成され、対応する係数をそれぞれ3次、5次…、の球面収差係数と呼ぶ。

※3. ポンデロモーティブ力

光のように高速で振動する電磁場中において電子にはたらく力。特殊相対論による補正を無視できる場合、ポンデロモーティブ力は、電磁場強度の低い領域に電子を集めるように作用する。

※4. フェムト秒レーザー光源

光の持続時間が10～数100フェムト秒（1フェムト秒 = 1000兆分の1秒）であるような、非常に短いパルス状のレーザー光を発生する装置。

※5. 色収差

光の波長（または電子のエネルギー）に応じて、理想的なレンズによる集束作用からずれを生じるとき、これを色収差という。

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学多元物質科学研究所

助教 上杉 祐貴(うえすぎ ゆうき)

電話:022-217-5146

E-mail:uesugi [at] tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学多元物質科学研究所 広報情報室

電話:022-217-5198

E-mail:press.tagen [at] grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

電話:03-5214-8404

E-mail:jstkoho [at] jst.go.jp

(JST 事業に関すること)

科学技術振興機構 戦略研究推進部

グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子(しまばやし ゆうこ)

電話:03-3512-3526

E-mail:presto [at] jst.go.jp