

## 電子ビーム中に生成した2つの渦の伝播ダイナミクス

コーヒーをかき回して、クリームを入れるとききれいなうずまき模様がみられる。何度か試すと、偶然、複数のうずまき模様が現れるときがある。流体の場合、渦どうしは相互作用し合い、たとえば台風における「藤原の効果」のように、互いの渦の運動に影響を及ぼし合う。量子力学にしたがう電子や原子も渦を作ることが知られており、たとえば超伝導や超流動にみられる量子化された磁束や渦運動は量子渦と呼ばれる。電子の渦は、その波動関数中に位相特異点が形成されるなど、波動関数のトポロジーの観点からも大変興味深い。2010年、自由空間を伝播する電子波による渦、すなわち電子渦ビームが実験的に実現された<sup>1)</sup>。平面波のようなトポロジカル欠陥を含まない進行波以外の伝播モードが、電子でも確かめられたことになる。このビームは渦の回転軸が伝播方向に平行であり、波面（等位相面）がらせん状であること（図1(a)）、渦の中心が位相特異点であること、軌道角運動量をもつことなど通常の平面波にはない特徴を有する。これらの特徴から、磁場・磁性体との相互作用や物質へのトルク移送などが期待され、世界的に大きな注目を集めている<sup>2,3,4,5)</sup>。

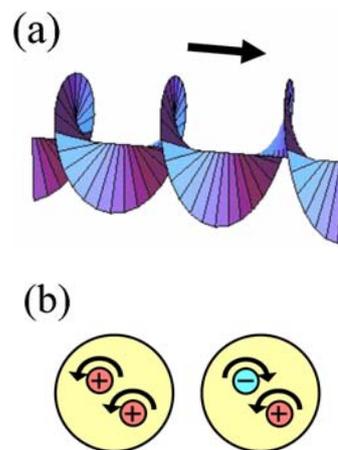


図1 (a)渦波の波面の模式図。(b)本研究で生成する2つの渦を含む電子ビームの模式図。

複数の電子渦が近接した場合、渦どうしはどのような相互作用を示すであろうか？名古屋大学エコトピア科学研究所および埼玉工業

大学先端科学研究所のグループは、電子ビーム中に2つの渦を生成し、ビームの伝播過程における2つの渦の運動の様子を観察した（図1(b)）結果、伝播にともない2つの渦がビームの中心のまわりを公転運動することを実験的に明らかにした。さらに2つの渦の回転の向きが同じ場合および異なる場合で、その公転運動の向きが異なることを見出した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2013年7月号に掲載された。

研究グループは、図2に示すようなフォーク型回折格子を作製し、回折ビームに2つの渦を含む電子ビームを生成するようにした。図2(a)の回折格子では回転の向きが同じ2つの渦(+1, +1)が生成され、図2(b)の回折格子では回転の向きが異なる2つの渦(+1, -1)が生成される。収束イオンビーム装置

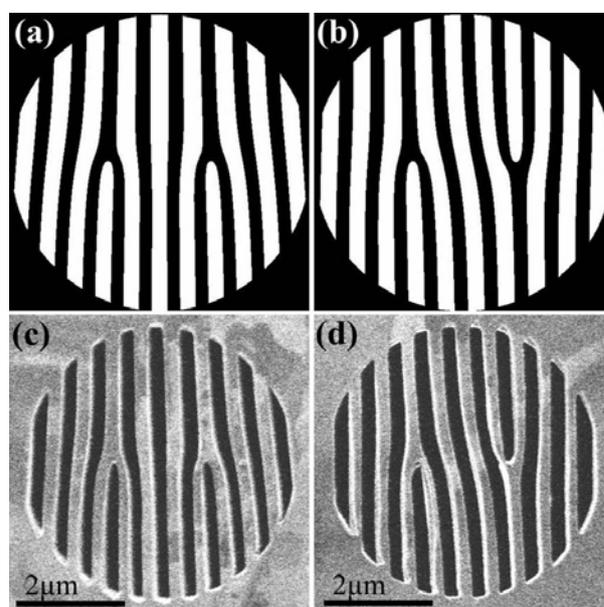


図2 2つの渦を含む電子ビームを生成するフォーク型回折格子。(a), (b) (+1, +1)および(+1, -1)の渦を含む波動場をもちいて計算したホログラムを2値化したもの。(c), (d) FIB をもちいて作製したマスク(+1, +1)および(+1, -1)のSIM像。

(FIB) をもちいて厚さ $2\mu\text{m}$ の白金箔に切削加工を行い、電子線用の回折格子マスクとした。マスク径は $5\mu\text{m}$ であり、Y型に分岐した部分(図中の矢印)の間隔は $1.7\mu\text{m}$ とした。電子渦ペアの伝播時の振る舞いを調べるため、これらのマスクを電界放出型電子銃を搭載した透過型電子顕微鏡装置に導入した。電子線の加速電圧を $120\text{ kV}$ とし、電子顕微鏡の結像レンズ系のフォーカス条件を変化させることにより、マスクを通過した電子が遠方場で形成する強度分布の変化を観察した。

図3(a)は、回転の向きが等しい電子渦(+1, +1)のペアが自由空間を伝播する際のビーム断面の強度分布の変化である。各図の左下の値はマスクの回折面からのデフォーカス量 $df$ を表す。マスクの回折面に対応する $df=0\text{ mm}$ の位置の近傍において、一次の回折ビームの中に矢印で示す2つの暗点がみられる。この暗点は2つの電子渦の各中心にある位相特異点である。注目すべきは、伝播する過程で電子渦のペアがその中点のまわりを同じ回転の向きで公転運動している点である。 $df=0\text{ mm}$ の位置を回転角の原点とすると、 $-90^\circ$  から $+90^\circ$  まで回転する様子が観察されている。

一方、互いに逆符号のトポロジカル数(+1, -1)の渦を含む場合、同符号の場合と全く異なる振る舞いを示した。回折格子マスクを通過後に回折ビーム中に形成された電子渦のペアは、回折面近傍で明瞭にみられなくなり、焦点を過ぎたところで再び現れた。この振る舞いは、トポロジカル数が互いに逆符号の電子渦が、ビーム中心の周りを逆向きに公転し、重なり合ったところで打ち消し合い、さらに伝播とともにさらに公転し、再び出現したものと考えられる。

電子渦のペアの回転は、回折格子マスクから生成されるすべての回折ビームにおいてみられた。回転の様子はFresnel伝播シミュレーション(図3(b)および3(c))で非常によく再現され、その回転角はGouy位相から予想されるものとよい一致を示した。すなわち、電子ビーム中の渦は隣接する渦からの影響を受けず、通常の電子波と同様に伝播することが判明した。今回の実験は、ナノアンペアオーダーの電流量で行ったが、そのような条件では電子間の相互作用(Boersch効果)は無視できる。電流量を上昇させてビーム中の電子間の反発等の相互作用が顕著になるような条件にした場合に電子渦どうしの相互作用がどのように現れるか、興味をもたれる。本研究により、渦の回転運動をとおして電子波の位相を観察できることが分かった。この現象は、物質を通過した電子

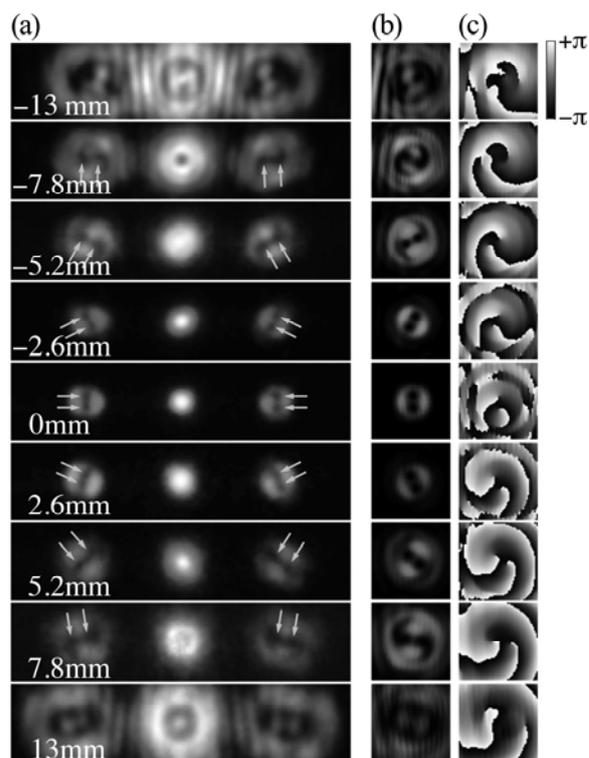


図3 2つの渦を含む電子ビームの伝播過程の実験結果(a)および Fresnel 伝播シミュレーションの振幅(b)および位相(c)。(a)の左下の数字は回折面からのデフォーカス量を表す。

の位相変化の検出に応用できる可能性を示唆している。

- 1) M. Uchida and A. Tonomura: Nature **464** (2010) 737.
- 2) J. Verbeeck, H. Tian, and P. Schattschneider: Nature **467** (2010) 301.
- 3) C. Greenshields, R. L. Stamps, and S. Franke-Arnold: New J. Phys. **14** (2012) 103040. □
- 4) K. Y. Bliokh, P. Schattschneider, J. Verbeeck, and F. Nori: Phys. Rev. X **2** (2012) 041011.
- 5) J. Verbeeck, H. Tian, G. Van Tendeloo: Adv. Mater. **25** (2013) 1114.

原論文

[Propagation Dynamics of Electron Vortex Pairs](#)

[Yuya Hasegawa, Koh Saitoh, Nobuo Tanaka, and Masaya Uchida: J. Phys. Soc. Jpn. \*\*82\*\* \(2013\) 073402.](#)

問合せ先：齋藤 晃（名古屋大学エコトピア科学研究所）

内田 正哉（埼玉工業大学先端科学研究所）