



報道機関 各位

平成26年5月13日  
国立大学法人東北大学 多元物質科学研究所  
独立行政法人理化学研究所

電子の蓄積とその集団的運動の可視化に世界に先駆けて成功  
— 電子の動きに伴う電場の乱れを先端計測法で検出・追跡 —

東北大学多元物質科学研究所の進藤大輔教授（理化学研究所創発物性科学研究センターチームリーダー）と赤瀬善太郎助教、理化学研究所の会沢真二テクニカルスタッフらの研究グループは、帯電した絶縁体試料表面近傍で電子が次第に蓄積する様子を、電子線ホログラフィーにより電場の乱れとして検出すると共に、その電子集団の移動の様子を可視化することに世界に先駆けて成功しました。

本研究成果は、米国の顕微鏡に関する専門誌である *Microscopy and Microanalysis* のオンライン版（5月12日付け：日本時間5月13日）に掲載されました（D. Shindo, S. Aizawa, Z. Akase, T. Tanigaki, Y. Murakami and H.S. Park, “Electron Holographic Visualization of Collective Motion of Electrons through Electric Field Variation”）。

<研究成果の概要>

私達の生活は、電子の様々な動きや流れを利用することで成り立っています。しかし、私達は通常、このことを光や音、熱などの発生を通して間接的に把握しているに過ぎません。この生活に欠かせない多様な電子の振る舞いを直接観察することは、身の回りの様々な電気現象の機構を解明する上で、また先端デバイスの高機能化を実現する上でも、重要な研究課題でした。

電磁場を可視化できる電子線ホログラフィーを用いて電子の運動を追跡できないか実験を繰り返す中、東北大学多元物質科学研究所の進藤大輔教授（理化学研究所創発物性科学研究センターチームリーダー）と赤瀬善太郎助教、理化学研究所の会沢真二テクニカルスタッフらの研究グループは、今回絶縁体で複雑な形態をもつ生体試料の帯電効果を利用することで、電子が次第に蓄積する様子や複雑な電場の中で電子が集団的に運動する様子を電場の乱れを通して直接観察することにはじめて成功しました。

## <研究内容の説明>

### 1. 研究の背景

突然の停電が社会生活の大混乱を招くことから分かるように、私達の日常生活は、電子の流れ（電流）無くしては成り立ちません。この生活に密着した電子の様々な動きや流れを、私達は通常、光や音、さらに熱などの発生を通して間接的に把握しています。この生活に欠かせない電子の多様な振る舞いを直接観察することは、身の回りの様々な電気現象の機構を解明する上で、また先端デバイスの高機能化を実現する上でも、重要な研究課題でした。一方、電子は身近に存在する最も代表的な素粒子の一つであり、トンネル効果や超伝導などの不思議な量子現象を発現します。この素粒子の動きを直接観察することは、基礎科学の立場からも、興味深く重要な研究課題でした。

電子は、マイナスの電荷と磁気モーメントをもち、その周囲に電場と磁場（電磁場）を形成しています。電磁場をナノメートル（1メートルの10億分の1）スケールで可視化できる電子線ホログラフィーを用いて電子の運動を追跡できないか実験を繰り返す中、東北大学多元物質科学研究所の進藤大輔教授（理化学研究所創発物性科学研究センターチームリーダー）と赤瀬善太郎助教、理化学研究所の会沢真二テクニカルスタッフらの研究グループは、今回絶縁体で複雑な形態をもつ生体試料の帯電効果を利用することで、その試料表面近傍で電子が次第に蓄積すると共に、複雑な電場の中で電子が集団的に運動する様子を電場の乱れを通して直接観察することにはじめて成功しました。

### 2. 研究成果

図1は、山梨大学の野伸一教授のグループより提供を受けたネズミの坐骨神経の微細線維（青い線状の部分）周辺の、電子線ホログラフィーの振幅再生像と呼ばれる電子顕微鏡写真です。電子線ホログラフィーでは、電子の波動性を利用し、試料を通過した波と試料外の真空領域を通過した波を干渉させてホログラムと呼ばれる干渉縞を撮影します。この干渉縞には、試料周辺の電磁場の情報が記録されており、コンピュータを用いた位相再生処理により、電磁場の分布を可視化できます。ここで、電子が動いている場合、この動きにより電場が乱されます。ホログラムから振幅再生と呼ばれる処理をすると電場の乱れた領域を特定することができることを研究グループはこれまで見出しており、それが図1の赤い領域に対応します。

一般的に、この生体の微細線維のような絶縁体に高エネルギーの電子を入射させると、試料からは低エネルギーの2次電子が放出され、結果として試料は正に帯電することが知られています。電子線照射初期の上段の写真(a)では、電子の動きに伴う電場の乱れに対応する赤い部分がそれほど目立たないのに対して、中段(b)と下段(c)の電子線照射を継続した写真では、赤い部分がそれぞれ左側と右側の枝の上部に（矢印）明瞭に観察されます。これは、一旦試料から放出された2次電子が、電子線照射量の増大と共に次第に強く帯電した試料に引きつけられ、枝に囲まれ領域に徐々に蓄積し、集団的に移動する様子を捉えたものです。下記<観察された現象の補足説明>参照。

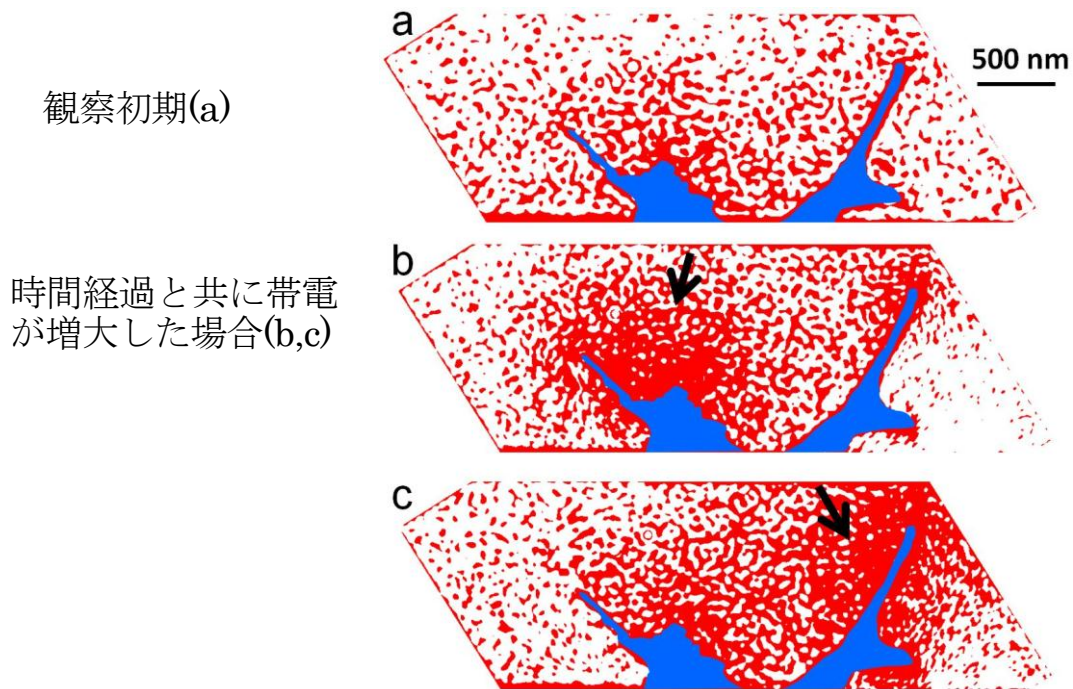


図1 ネズミの坐骨神経の微細線維（青）周辺の振幅再生像（赤と白で二値化）。時間経過と共に電子の動きに伴う電場の乱れが生じた赤色部が枝に囲まれた領域内の矢印の部分に明瞭に観察されます。

### 3. 今後の展望

電子線ホログラフィーの振幅再生法を駆使することにより、電子の動きに伴う電場の乱れが検出できました。この振幅再生像を連続撮影することにより、絶縁体試料表面近傍に電子が蓄積する様子とその電子の集団的な運動を可視化できました。これらの成果を踏まえ、今回確立した観察法を用いて、今後は様々な電子の流れの観察にも適用し、身の回りの複雑な電気現象の機構解明や先端バイスの高機能化への応用展開が期待されます。

#### <付記事項>

本研究は、科学研究費・基盤研究（A）課題名「電場の可視化と2次電子検出による帯電現象の解明」（課題番号 25249093）（代表者：進藤大輔、支援担当機関：(独)日本学術振興会）の助成を受けたものです。また、最先端研究支援プログラム（FIRST）課題名「原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用」（中心研究者：故外村彰日立製作所フェロー、中心研究者代行：長我部信行日立中央研究所所長、支援担当機関：(独)科学技術振興機構）の支援を受けました。

#### <発表予定>

本研究成果は、米国の顕微鏡に関する専門誌である *Microscopy and Microanalysis* のオンライン版（5月12日付け：日本時間5月13日）に掲載されました（D. Shindo, S. Aizawa, Z. Akase, T. Tanigaki, Y. Murakami and H.S. Park, “Electron Holographic Visualization of Collective Motion of Electrons through Electric Field Variation”）。この論文には補足資料が付されており、電子が集団的に運動する様子を捉えた位相再生と振幅再生の動画が見られます。また、本研究内容は、8月に米国顕微鏡学会主催の顕微鏡法に関する国際会議の招待講演の中でも報告されます。

### <観察された現象の補足説明>

電子線ホログラフィーで観察された電子の集団的運動は、帯電した試料から放出される2次電子の軌道のシミュレーションを通して理解されます。図2は、そのシミュレーションの結果を示しています。まず、電子線ホログラフィーの位相再生による電場解析より、図1のbとcでの試料の電位は15ボルト程度と見積もられました。これを基に試料周辺の電位分布が図中に等高線として示されています。ここで、微細線維の左側の枝から2次電子が放出される場合を考えてみます。2次電子のエネルギーが低く、3エレクトロンボルトの場合(No.1とNo.2)には、枝の両側に放出された電子は、正に帯電した試料表面にすぐに引き戻されることがわかります。一方、2次電子のエネルギーが、比較的高い10エレクトロンボルトの場合には、左側に放出された電子(No.3の赤の軌道)は、試料から離れ図の下方に飛び去り、枝部には戻って来ません。これに対し、右側に放出された電子(No.4の緑の軌道)は、正に帯電した試料の右側の枝に引き寄せられることが分かります。絶縁体の試料表面には、多かれ少なかれ低エネルギーで放出された電子などがすでに存在しており、試料表面に近づいた電子は、距離の2乗の逆数に比例したクーロン斥力により、試料表面の電子に押し戻されます。しかし、試料からの距離が増大すると、試料全体としては正に帯電している試料からのクーロン力は再び引力となり試料に引き寄せられます。つまり、電子は試料から離れずその表面近傍を漂うこととなります。一方、右側の枝でも同様のことが起こるわけで、結局比較的高いエネルギーの2次電子は、二つの枝に挟まれた領域を漂い、次第に蓄積し、試料の電位の僅かな変化や電子間の相互作用を通して、集団でこの領域を運動しているものと理解できます。(山火事に例えると、斜面を火(電子)が覆っている場合、大きな炎(電子の集団)は、地形や風向き(電場)によりゆっくりと移動(集団運動)することに対応するでしょう。)

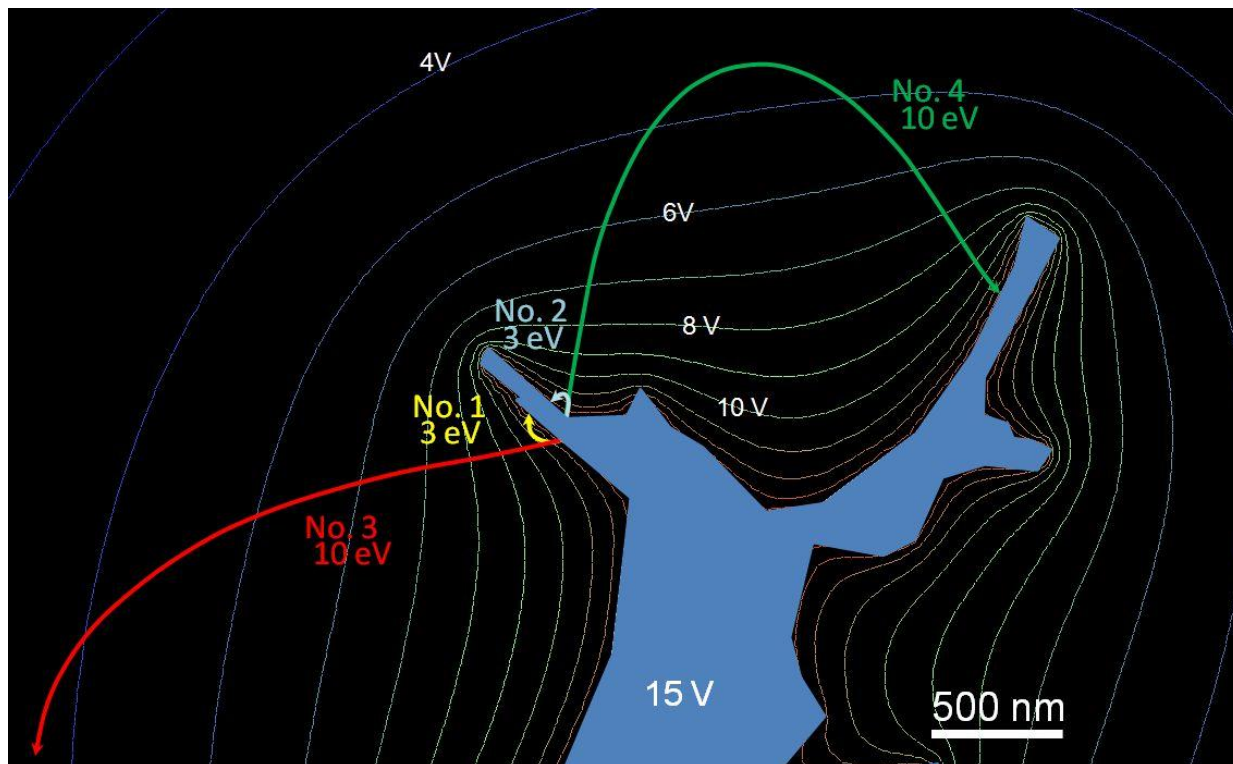


図2 微細線維の左の枝から放出された2次電子の軌道のシミュレーション。試料を飛び出す際の初期の運動エネルギーはNo.1とNo.2では3 eV, No.3とNo.4では10 eVと仮定しています。(eVはエレクトロンボルトと呼ばれるエネルギーの単位)

<言葉の説明>

1) 電子線ホログラフィー

電子の波動性を利用し、物体を通過した波と真空中を通過した波を重ね合わせた干渉縞（ホログラムと呼ばれる）を撮影し、フーリエ変換を用いた演算処理により、物質内外の電磁場の分布をナノメートル（1メートルの10億分の1）スケールで画像化できる最先端の電子顕微鏡法。

2) 2次電子

高エネルギー電子線などを試料に入射させると、入射した電子のエネルギーの一部が試料に与えられ、試料から比較的エネルギーの低い電子（50 エレクトロンボルト以下）が放出されます。この際放出される電子を2次電子と呼びます。

3) 位相再生

電子線ホログラフィーで、電子波を干渉させて得られるホログラムからフーリエ変換を用いた演算処理を施すことにより、干渉縞に記録された電磁場の情報を抽出し画像化する操作を指します。

4) 振幅再生

電子線ホログラフィーにおいて、位相再生がホログラムから電磁場の情報を抽出し画像化する操作を指すのに対し、振幅再生は、電子の動きに伴い電場が乱れる場合のように、ホログラムの撮影のための露出時間内に電磁場が乱れた領域を抽出し画像化する操作を指します。

<報道担当・問い合わせ先>

(問い合わせ先)

国立大学法人東北大学多元物質科学研究所  
教授 進藤 大輔 (シンドウ ダイスケ)  
※本研究の責任著者

TEL: 022-217-5170

E-mail: shindo@tagen.tohoku.ac.jp

助教 赤瀬 善太郎 (アカセ ゼンタロウ)

TEL: 022-217-5169

E-mail: akase@tagen.tohoku.ac.jp

独立行政法人理化学研究所創発物性科学研究センター  
テクニカルスタッフ I 会沢 真二 (アイザワ シンジ)  
TEL: 049-296-7240  
E-mail: saizawa@riken.jp

(報道担当)

国立大学法人東北大学多元物質科学研究所 総務課総務係  
TEL : 022-217-5204 FAX : 022-217-5211

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当  
TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715