

## シャープペンシル芯の先端を高品位電子ビーム発生源として応用

シャープペンシル芯の破断面をグラファイト化処理することで、軸方向に配向したグラフェンエッジを簡便に作製でき、そこから高品位な電子ビームが得られることを示しました。グラフェンの尖った形状により、弱い電界で、また、極高真空環境を必要とせずに安定した放出電流が得られました。

グラフェンやカーボンナノチューブなどを用いた尖った形状のナノ炭素材料は、高品位の電子ビームの発生源（電界放出電子源）としての応用が期待されています。しかし、そのために必要な、ナノ炭素材料の配向や配置の制御が困難なことから、実用的な電子源への応用ははまだ十分に開拓されていません。

本研究では、市販のシャープペンシル芯が、適度にグラファイトフレーク（黒鉛粉）を含有しており、それらがもともと軸方向に配向している点に着目しました。シャープペンシル芯の破断面を、超高真空中での高温加熱により完全にグラファイト化し、適度な密度で破断面に対して垂直配向したグラフェンのエッジを露出させました。そこからの電界放出電子の分布を観察したところ、「ドラゴンフライパターン」と呼ばれる、グラフェンエッジからの電子放出に特徴的なパターンが観察されました。また、その放射電流のエネルギースペクトルから理論計算を行い、グラフェンの特徴的な電子状態が反映されていることが示されました。さらに、グラフェンの先鋭的な形状や化学的安定性を反映して、低い電界強度、また極高真空環境ではない比較的マイルドな条件下においても、安定して電子放出できることが分かりました。

本研究結果は、ありふれた材料から簡便に、有用なナノ材料であるグラフェンエッジが得られること、またそれが高性能な電界電子放出材料として利用可能であることを示しました。このような材料は、次世代電子顕微鏡等の要素技術としての利用が期待されます。

### 研究代表者

筑波大学数理物質系

山田 洋一 教授

## 研究の背景

グラフェンやカーボンナノチューブなどの「ナノ炭素材料」と呼ばれる物質群は、細く、薄い形状や高い化学的安定性、耐熱性などの優れた特徴により、高性能な電子ビーム源である電界電子放出<sup>注1)</sup>材料としても期待されています。このような応用には、これらの材料を電子の放出方向に揃える垂直配向や、ナノ炭素材料同士の間隔を適度に広く配置する低密度配置などの制御により、ナノ炭素材料の独自の形状の長所を活かすことが必要です。しかし、ナノ炭素材料の配向や配置の制御は困難であり、実用的な電界電子放出源への応用例は少ないのが現状です。

## 研究内容と成果

本研究では、市販のシャープペンシル芯が、適度にグラファイトフレーク（黒鉛粉）を含有しており、それらがもともと軸方向に配向している点に着目しました。そこでシャープペンシル芯の破断面を超高真空中で加熱し、不純物を除去してグラファイトフレークを純粋化することにより、破断面に対して適度な密度で垂直配向したグラフェンのエッジを露出させることに成功しました（参考図 a）。

このように準備したシャープペンシル破断面からの放出電子分布を電界放射顕微鏡（FEM）<sup>注2)</sup>で観察すると、線状パターンが重なった特徴的な電子放射パターンが見られました（参考図 b）。これはドラゴンフライパターンと呼ばれ、グラフェンエッジからの放出電流の特徴的なパターンとして知られているものです。さらに、その放射電流のエネルギースペクトルを取得し、理論計算を行なったところ、グラフェンの特徴的な $\pi$ 電子の電子状態が反映されていることが分かりました。これらのことから、シャープペンシル芯先端のグラフェンエッジから電子放出が起きていることが確かめられました。

このグラフェンは、非常に薄い形状であるため、電界が集中しやすいことから、通常の電界電子放出よりも十分低い印加電圧で電子放出が実現するという、低電界電子放出（LMF）<sup>注3)</sup>の特徴を示しました。さらに、グラフェンの化学的安定性を反映して、放射電流の変動は0.7%と実用レベルにあり、また極高真空環境でなくても（ $10^{-4}$ Pa程度）、安定な電界電子放出を実現しました。また、シャープペンシル芯の破断面には凹凸があり多数のグラフェンエッジが存在するため、全体として多くの放射電流を得ることができ、電流密度の総量は実用的な平面型電子源並みの $1.1 \text{ A/cm}^2$ に達しました。通常、電界電子放出には、高電圧印加や極高真空環境（ $10^{-9}$ Pa未満）などの厳しい条件が必要とされますが、本研究結果は、これを緩和できる可能性を示唆しています。

## 今後の展開

今回の結果は、ありふれた材料を工夫して用いることで、先端ナノ材料である垂直配向グラフェンエッジが得られ、またそれが高性能な次世代電界電子放出材料として利用可能であることを示しました。垂直配向グラフェンエッジは電子放出材料以外にも、電極材料や触媒材料など、多方面の利用が考えられます。また本研究結果は、今後、筑波大学と株式会社日立ハイテクが実施する「日立ハイテクアドバンストSEM 特別共同研究事業」における、電子顕微鏡の基盤技術の深化研究に役立てていく予定です。

## 参考図

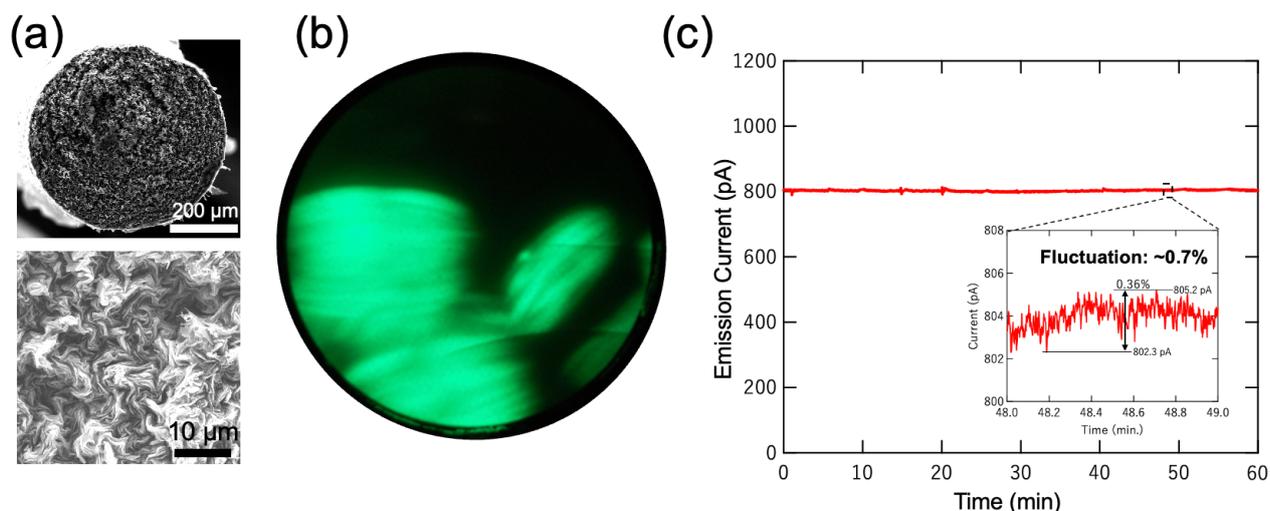


図 本研究の実験結果の概要図

(a) 本研究の試料である、炭化処理したシャープペンシル芯断面の走査電子顕微鏡像。下は拡大図。垂直配向したグラファイトフレークの概形を示す。(b) 炭化処理したシャープペンシル芯の電界放射パターン。グラフェンエッジに特徴的な、線状パターンが重なった「ドラゴンフライパターン」が見られる。(c) 炭化処理したシャープペンシル芯からの電界放射電流の安定性。変動率 0.7% 程度の安定した電流放出が見られている。

## 用語解説

注1) 電界電子放出 (Field emission)

非常に強い電界 (1 V/nm 程度) を物質の表面にかけることで、電子が物質の中から外へ放出される現象。この強電界を得るため、先の尖った針状の構造先端に生じる電界集中を利用する。この現象は、高性能電子顕微鏡の電子ビーム源などに利用されている。通常、電界電子放出には、強電界とともに、超高真空 ( $10^{-6}$  Pa 未満、 $10^{-9}$  Pa 以上) や極高真空 ( $10^{-9}$  Pa 未満) と呼ばれる非常に低い圧力の動作環境が必要となる。

注2) 電界放射顕微鏡 (Field emission microscope, FEM)

先端の尖った金属針に高電圧をかけて電界電子放出した電子の分布を、蛍光スクリーン上で観察する装置。FEM 像には針先の表面構造や原子の配列が反映され、非常に高い倍率での観察が可能。

注3) 低電界電界放出 (Low-macroscopic field emission, LMF)

通常の電界電子放出よりも低いマクロ電界 ( $\sim 1$  V/ $\mu$ m 程度) で電子を放出する現象で、消費電力が少ない電子源デバイスへの応用が期待されている次世代の電子放出技術。材料の先端構造の極端な尖鋭化や、グラフェンやカーボンナノチューブなどの低仕事関数・高アスペクト比材料を用いることで可能になる。

## 研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト (24K01564, 23K04516, 23K13807) の一環として実施されました。

## 掲載論文

- 【題 名】 Field Emission from Vertically Aligned Graphene Edges at the Apex of the Pencil Lead.  
(シャープペンシル芯先端の垂直配向グラフェンエッジからの電界電子放出)
- 【著者名】 T. Igari, R. Tsuruta, Y. Nishiyama, M. Adachi, T. Myojin, k. Asanagi, M. Sasaki, N. Kobayashi,  
Y. Yamada
- 【掲載誌】 *Scientific Reports*
- 【掲載日】 2025年7月28日
- 【DOI】 10.1038/s41598-025-11895-x

## 問い合わせ先

### 【研究に関すること】

山田 洋一 (やまだ よういち)

筑波大学 数理物質系 教授

URL: <https://www.bk.tsukuba.ac.jp/~surflab/>

### 【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)