

デジタルレンズ電子顕微鏡の研究開発

育成研究：JSTイノベーションプラザ・サテライト北海道 平成20年度採択課題
「デジタルレンズ電子顕微鏡の研究開発」

代表研究者：北海道大学 大学院工学研究院
教授 郷原 一寿

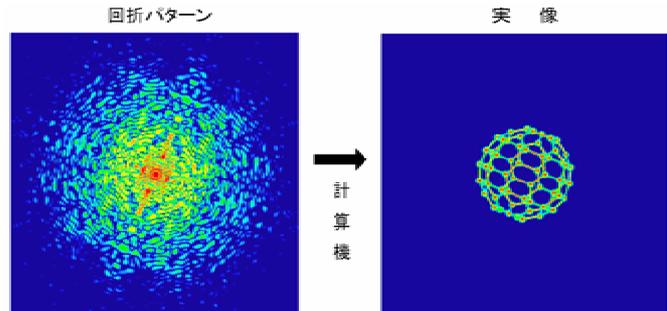


■ 研究概要

本研究では、デジタルレンズ電子顕微鏡の「原理検証機」による高分解能イメージングの実証を目的とした。研究の結果、カーボンナノチューブ試料に対して、加速電圧10~30kVで、分解能0.34nmを達成し、さらに炭素原子一つ一つを識別できる、分解能0.12nmのイメージングに成功した。これはド・ブROI波長の18倍の分解能であり、従来の高分解能電子顕微鏡を凌ぐ性能を示したものである。

■ 研究内容、研究成果

回折イメージングとは、右図に示すように、実験によって計測された回折パターンを元に計算機による数値計算によって実像を得るイメージング手法であり、物理的なレンズの機能をデジタル計算によって実現する“デジタルレンズ”と言える。この手法に基づく電子顕微鏡をデジタルレンズ電子顕微鏡と呼ぶ。



デジタルレンズ電子顕微鏡の原理

この電子顕微鏡は、結像のためのレンズを必要とせず、周期的な構造の試料でなくとも原子スケールのイメージングが可能であることが大きな特徴である。これによって、加速電圧を高くすることなく高分解能なイメージングが実現できることから、バイオマテリアル、ソフトマターなどの軽元素物質で構成される試料に対して、入射電子によるダメージが低減できること、装置構成を単純化できることなどの実用的、経済的な効果が期待できる。

本研究では、北大-日立包括連携によって製作した、SEM(走査電子顕微鏡)をベースとした低加速電圧で動作する「原理検証機」を用いて、下記に示す目標を達成することを目的とした。

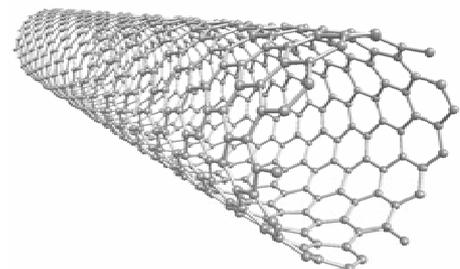
加速電圧：10~30kV

試料：MWCNT(マルチウォールカーボンナノチューブ)

対象：MWCNTの幅・中空サイズ・Wall間隔の3種類を示すイメージング

分解能：0.34nm(Wall間隔)

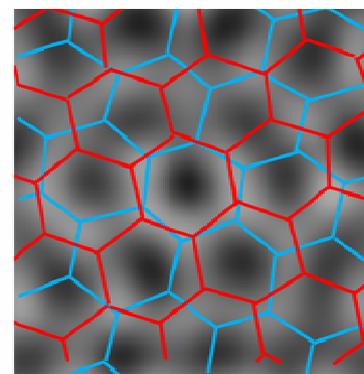
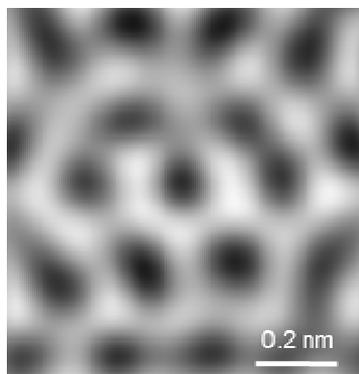
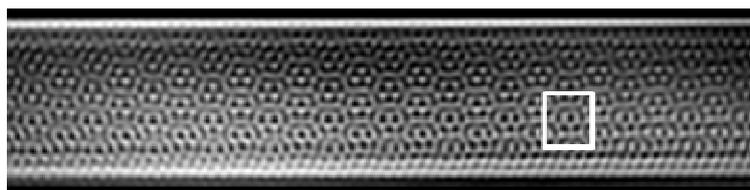
研究成果として、4層のマルチウォールカーボンナノチューブを試料として、空間分解能0.34nmを、10kVの低い加速電圧で実現し、所期の目的を達成した。さらに、右図に示す単層のシングルカーボンナノチューブを試料として、30kVの加速電圧で炭素原子一つ一つを識別できることを示し、分解能0.12nmを達成した。これはド・ブROI波長の18倍の分解能であり、従来の高分解能電子顕微鏡を凌ぐ性能を示したものである。



シングルカーボンナノチューブ

右図（上）は、加速電圧 30 kV の回折パターンを元に得られたイメージの例である。全体は細長いロッド状の形をしており、その中に、コントラストの異なる微細な構造が多数観察される。白枠の領域を一部拡大したものが左下の図である。解析の結果、この構造は、右下に示したようにシングルカーボンナノチューブの上下の炭素 6 員環ネットワークを 2 つ重ねたものであることが明らかとなった。

さらに、一連の実験結果を詳細に解析した結果、シングルカーボンナノチューブの炭素原子一つ一つを単独で識別できる 0.12nm の分解能で、原子の重なりを反映したコントラストを持つイメージングが可能であることが実証された。このことは、電子回折イメージングが、軽元素物質に対して、元素の識別（Chemical Analysis）を可能とするイメージング手法であることを示している。



シングルカーボンナノチューブの高分解能イメージング

■ 今後の展開、将来の展望

（１）今後の展開

本研究によって、「原理検証機」による高分解能イメージングの実証が行われた。本手法を実用化する上では、様々な試料への適用が可能となることが重要である。そのためには、まず照射光学系の干渉性向上、さらに計算機処理速度の向上、信頼性の向上、使い勝手の向上が実用化には重要であると考へ、それらへの対策を検討する。そして、本研究成果をもとに、3次元で原子が識別できる分解能を持つ実用機に向けて、試作、検証実験を進めつつ新たな計測技術として完成度を高める。

（２）将来の展望

当初のターゲットとした、バイオマテリアル、ソフトマターなどに加え、近年産業的ニーズとして、ナノカーボン、ボロン、リチウムなど軽元素材料の利用拡大が見られる。ナノカーボン材料は Li イオン電池や燃料電池の電極材としての応用が盛んに研究されており、また、シリコンに変わる半導体材料としても注目されている。さらにタッチパネルの電極としても、その応用に関心が集まっている。これらの材料は、高分解能なイメージングを行う際に、ビーム照射によるダメージを受けやすいことが大きな問題となっている。低ダメージで高分解能なイメージング技術として開発してきた本手法、即ち回折イメージングを基本とした低加速電圧でのデジタルレンズ電子顕微鏡は、これらの応用拡大に伴い、今後重要性がさらに大きく増すものと考えられる。

■ 研究体制

◆ 代表研究者

北海道大学 大学院工学研究院 教授 郷原 一寿

◆ 研究者

内田 努（北海道大学） 永山昌史（北海道大学） 前原洋祐（北海道大学）

◆ 共同研究機関

株式会社日立製作所

■ 研究期間

平成 20 年 4 月 ~ 平成 23 年 3 月