

## 特集にあたって

齋藤 晃

Koh Saitoh

名古屋大学未来材料・システム研究所

キーワード：超高速電子顕微鏡，超高速電子回折，パルス電子線，超高速現象

「透過電子顕微鏡の特徴は？」と聞かれれば、多くの人はその空間分解能の高さを挙げるであろう。現にこれまで透過電子顕微鏡の装置開発の力点は空間分解能の向上に置かれ、今日の球面収差補正技術の目覚ましい進展がなされた。最新機の空間分解能は 50 pm に達し、また 0.1 nm 分解能での原子配列観察が日常的に行われている状況である。エネルギー分解能についても材料の化学分析および電子状態分析に対する高いニーズから電子銃およびモノクロメーター、スペクトロメーター等の高度化が精力的に為され、現在ではエネルギー分解能 50 meV を切る EELS スペクトルが市販機で取得できる状況である。

このように空間分解能およびエネルギー分解能が目覚ましい向上を遂げるなか、時間分解能の向上は、現在の電子顕微鏡開発の課題のひとつと言えるだろう。近年ナノ加工技術を駆使したさまざまな試料ホルダーや環境セルが開発され、気体・液体との化学反応、光応答、電気的・磁氣的応答、応力応答等が電子顕微鏡内で実現できるようになっているが、このような反応や応答の瞬間を捉える電子顕微鏡技術の確立は単なる学術的意義に留まらず、材料科学の幅広い研究分野におけるブレークスルーを与えよう。パルス電子顕微鏡はこの瞬間をナノメートルオーダーの空間分解能で捉えることのできるほぼ唯一の手法と言ってもよいであろう。

瞬間を捉える顕微法は、ストロボ法とシングルショット法の2種類に大別される。前者では繰り返し起こる現象に対してその周期に同期させた撮影を繰り返し、それらを積算する。このため対象は可逆過程に限られる。後者では文字通り単一の電子パルスのみでデータ取得を完了する。不可逆過程でも観察可能となるが、シングルパルス中の電子数の制限から時間分解能はストロボ法より低い。現在のところ、ストロボ法およびシングルショット法で実現している時間分解能はそれぞれ 100 fs および 10 ns である。また、回折図形を取得するか像を取得するかにより超高速電子回折 (Ultrafast electron diffraction; UED) か超高速電子顕微鏡 (Ultrafast electron microscopy; UEM) に大別される。透過電子顕微鏡の高い空間分解能を最大限に生かせる手法は、シングルショット法をもちいた UEM であろう。

シングルショット UEM の装置開発の歴史は、ベルリン工科大の Bostanjoglo のグループに始まる<sup>1)</sup>。彼らは、Zr コートした W や Re 等の金属にパルスレーザーを照射してパルス電子線を発生し、電子線パルスと結像レンズ系による偏向を同期して CCD カメラ上の別の位置に連続的に像を記録する装置を開発した。この装置により金属や半導体試料の融解過程が

空間分解能約 200 nm, 時間分解能約 10 ns で観察されている。

Bostanjoglo の装置開発から 30 年以上が経過し、現在では北米、欧州、日本において複数のグループが超高速電子顕微鏡装置の開発を進めている。なかでも、米国カリフォルニア工科大学の A. Zewail のグループ、パシフィックノースウェスト国立研究所の N. Browning のグループが大きな成果を上げており、世界をリードしている。

日本でも複数の研究グループによりそれぞれ大変ユニークな特徴をもつ UEM および UED 装置が開発され、成果を上げている。今回の特集では、それらのなかから 5 つの装置を選ばせていただき、各装置開発の現状についてご紹介いただいた。

まず、半導体フォトカソードをもちいたスピン偏極パルス TEM の開発について栗原先生に解説いただいた。空間分解能、時間分解能およびコヒーレンスの高さ、スピンを利用した磁気イメージングへの応用など、今後の発展が大いに期待できる装置と言える。楊先生と永谷先生には高周波 (Radio frequency; RF) 加速の原理をもちいた電子銃や加速管を搭載したパルス電子顕微鏡装置の開発についてご紹介いただいた。大型加速器にも使われるこの電子加速技術は、コンパクトながら MeV 級のフェムト秒パルス電子線が生成できるため、高い時間分解能を実現するために極めて重要な技術である。阪部先生にはレーザー加速電子という極めてユニークな電子をもちいたパルス電子回折についてご紹介いただいた。従来の電子顕微鏡のように高電圧を印加した加速管で電子を加速するのではなく、固体薄膜に高強度パルスレーザーを照射し、固体薄膜から放出される電子をレーザーの電場で加速する。虻川先生にはストリーク法をもちいた RHEED 装置の開発について解説いただいた。シリコン表面の超構造がレーザー照射により乱れ、再構成する過程が捉えられている。

超高速電子顕微鏡の装置開発の現状は、既に商品化されたパルス電子顕微鏡装置があるものの、まだ各研究者が試行錯誤しながら開発を進めている段階である。逆に言えば、自由な発想で研究を進められる余地がまだ沢山残されている。この特集記事が多くの研究者の目に触れ、超高速電子顕微鏡の開発に携わろうとする新しい研究者の参入を促すものになれば幸いである。

## 文 献

- 1) Bostanjoglo, O.: in Hawkes, P.W. (Ed.), *Advances in Imaging and Electron Physics*, Vol. 121, Academic, New York (2002), p.1, およびその参考文献