

特集にあたって

Introduction to Electron Phase Imaging

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：位相，電子線ホログラフィー，微分位相コントラスト法，ホローコーン STEM，強度輸送方程式

窓ガラスを通して向こうの景色が見える。窓ガラスがきれいに清掃されていると、窓ガラスの存在に気付かない時さえある。景色を眺める人にとってガラスが透明なのは大変ありがたい話であるが、光を使ってガラス内部の詳細な構造を顕微鏡観察しようという人にとっては深刻な問題である。

同様の問題は、透過電子顕微鏡で薄片試料を観察する場合にも生じる。特に軽元素からなるグラフェン等の単原子層試料は高速の電子線にとってほぼ透明であり、吸収によるコントラストはほとんど現れない。試料内部および外部の電場や磁場に至ってはそれ自身による吸収が完全にゼロであり、単に電子線の強度を計測するだけでは、それらを見ることができない。

この問題を解決するひとつの方法が、光や電子の「位相」の利用である。位置 x ，時刻 t での光や電子の波を表す関数 $\psi(x, t)$ を

$$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

のように表した場合、位相は $kx - \omega t$ の部分である。 A は波の振幅、 k は波数 (= 波長の逆数)、 ω は振動数である。電子線の強度は振幅 A の絶対値の 2 乗 $|A|^2$ である。軽元素からなる薄片試料を通過しても A の値はほとんど減少しないためコントラストが現れない。一方、波数は原子の静電ポテンシャルや電場磁場により変化するため、位相は変化する。問題は、このような位相のみが変化する物体、すなわち位相物体をどうやって見るか? である。

位相物体を観察する最も古典的なテクニックは、焦点を「わざと」ずらす方法である。電子顕微鏡を使われる方なら、コントラストがあまりつかない試料でも焦点をずらせば見やすくなることを経験的に知っているであろう。高分解能 TEM 法で原子配列を観察する際は、対物レンズの球面収差の影響を考慮してディフォーカス量を調整し、個々の原子による位相変化を強度変化に変換させる。

シェルツァーによりこのディフォーカス条件が提案されてからおよそ 60 年が経過し、収差補正技術、装置の電氣的・機械的安定度の向上、検出器の進展も相まって、位相イメージング法の深化が進んでいる。電子の波としての性質を最大限に活用する手法であるため、位相の揃った (コヒーレントな) 単色性の高い電子波の生成が重要であり、最近の安定な冷陰極電界放出型電子銃の進展は位相イメージングにおいて最も重要な要素技術と言える。

本特集では、電子波の位相を利用して試料の構造や物理情報を可視化する手法の現状を紹介する。日本では、位相を利用したイメージングの研究が比較的多くなされ、本学会での発表件数も多く、研究者の関心が高い分野といえる。今回、紙面の都合上、電子線ホログラフィー、微分位相コントラスト (DPC) 走査透過電子顕微鏡 (STEM) 法、ホローコーン STEM 法および強度輸送方程式 (TIE) をもちいる方法の 4 つの研究に絞らせていただいた。

電子線ホログラフィーについては、日本では AB 効果の検証、ダブルバイプリズム法、位相シフト法の開発や磁性体、半導体 pn 接合、電池材料等への応用研究が精力的な研究がなされている。最近では、故外村氏が生前に目標として掲げた $2\pi/1000\text{rad}$ を超える位相計測精度が実現されており、高分解能ホログラフィーの新たな展開が期待される。本特集では、電場印加その場観察による電池材料の解析の最新状況を平山氏に解説いただいた。

DPC-STEM 法は磁性体の磁区構造の観察法として古くから研究されているが、最近では収差補正技術と組み合わせた原子分解能での応用が注目されている。原子分解能の DPC-STEM 像が何を表すものか、関氏にその結像原理について丁寧に解説いただいた。

最近の STEM 法では、タイコグラフィーに代表されるように、検出面上にピクセル検出器を置いて回折図形中の強度分布の詳細な変化を利用する手法が注目されており、世界中で精力的な研究がなされている。石田氏には、通常の収束ビームの代わりにホローコーンビームをもちいた STEM 法によるユニークな位相イメージング法を紹介していただいた。

空間を伝播する波の位相と強度の関係 (強度輸送方程式 (TIE)) を利用して、強度分布の変化だけから位相情報をもとめることができる。大島氏に最近の収差補正技術と併せて原子分解能の TIE 解析を行った例について、解析における注意点も含めて丁寧にご紹介いただいた。

コヒーレントな波の利用は、SPring-8 の SACLA に代表されるように放射光の分野でもその重要性が認識されている。プローブの波動性を利用したユニバーサルな手法の開発という観点から、異なるプローブを利用する研究者間の積極的な情報交換も重要であろう。本特集記事が多くの方の目に触れ、位相イメージング利用者の拡大や新しい材料への応用のきっかけになれば幸いである。