

## 特集にあたって

原 田 研

日立製作所中央研究所

キーワード：電子線ホログラフィー，電子波，干渉計測法，物質科学，電磁場

電子線ホログラフィーは電子波干渉計測法の代表として、『もの』だけでなく『場』そのものを観察ターゲットとして取り扱える技術であり、アハラノフ・ボーム効果の検証など、光学顕微鏡には無かった応用研究の展開分野、すなわち『電磁場』の直接観察などを電子顕微鏡に与えた<sup>1)</sup>。この電子線ホログラフィーを特集として取り挙げるにあたり、まず技術的側面から本手法を概観しておきたい。

電子線ホログラフィーを実施するに際しては以下の4項目が研究対象、あるいは技術的な必須項目となる。

- (1) 可干渉な電子線源の確保
- (2) 電子線を干渉させるための光学系の構築
- (3) 干渉顕微鏡像から位相情報を抽出する技術の確立
- (4) 研究対象への展開と目的に沿った付加装置の開発

(1) は干渉現象を利用するために何よりも先ず重要となる技術である。これは電界放出形電子銃の実用化<sup>2)</sup>により完成し、現在の電界放出形電子顕微鏡では、試料面上で数 $\mu\text{m}$ の可干渉領域を得ることはそれほど困難ではなくなっている。

(2) は古くは電子線バイプリズムの発明<sup>3)</sup>と2光束電子線ホログラフィーの実現<sup>4)</sup>、そして、最近の複数のバイプリズムを用いた干渉光学系の構築<sup>5)</sup>により高い自由度で実施可能となっている。(3)での位相像の再生方法は、光学ベンチでの処理作業をそのまま数値演算処理に反映させたフーリエ変換法<sup>6)</sup>が主流を占めているが、位相シフト法<sup>7)</sup>など、より技術的に高度な手法も利用可能になってきている。そして(4)は、直接的には電子波干渉計測法による観察ターゲットに関する課題であり、先述のアハラノフ・ボーム効果の検証や超伝導磁束量子の観察<sup>8)</sup>がこれにあたる。例えば磁場印加装置<sup>9)</sup>などの付加装置は、干渉法とは別個の応用技術であるが、観察対象の物性を電子顕微鏡内で発現させるために不可欠の技術となっている。

上記項目(1)から(3)は、既に電子顕微鏡メーカー、或いは他の関連技術メーカーより市販されるに至っており、電子線ホログラフィーそのものが既に完成の域に達した技術であることを示している。そこで本特集にあたっては電子線ホログラフィー技術の応用研究の新展開を見据えるべく、新機能材料を取り扱う物質科学への応用研究にテーマを絞った。

投稿いただいた内容は、平山司氏(ファインセラミックスセンター)による「半導体pn接合におけるキャリア密度分布の観察」、市川聡氏(大阪大学)による「触媒反応と内部電位の触媒粒子径依存性の観察」、丹司敬義氏(名古屋大学)による「燃料電池の性能向上を目的とした固体イオン伝導体

と金属界面におけるイオン挙動の観察」、戸川欣彦氏(大阪府立大学)による「スピン流による磁壁移動と磁区生成(反転)の動的観察」、そして、村上恭和氏(東北大学)による「磁性体中の磁気相転移の直接観察」である。いずれも燃料電池などにおける化学反応/触媒反応観察への布石、あるいはスピントロニクス素子/GMR素子など次世代デバイスの機能観察を見据えたものであり、「電位」または「磁化」の直接測定を介した物質科学への応用研究として本特集の目的に適ったものであると思う。電子波干渉の分野の方々だけでなく、多くの読者の方々に興味を持っていただけるものであれば幸甚である。

なお、本特集は電子線ホログラフィーを位相計測手法の主要技術と位置付け、若干のローレンツ法<sup>10)</sup>を含むものとなっている。上記以外の電子波の位相計測手法としては、3次元フーリエフィルタ法<sup>11)</sup>、フォーカスの異なる複数枚の画像の差分を用いた強度輸送方程式による解法<sup>12)</sup>、位相板を用いた位相差顕微鏡法<sup>13)</sup>などがある。そしてこれら手法を用いた応用研究として、強相関電子系物質での相分離状態や強磁性金属状態での磁区構造観察<sup>14)</sup>やヘリカル磁性体での2次元スカーミオン格子の実空間観察<sup>15)</sup>など、近年注目を集める研究も実施されていることを明記しておきたい。

本特集の企画・取りまとめにあたっては村上恭和氏(東北大学)にご助言をいただきました。ここに付して感謝します。

## 文 献

- 1) Tonomura, A.: *Electron Holography*, 2nd ed., Springer, Heidelberg (1999)
- 2) Tonomura, A. et al.: *J. Electron Microsc.*, 28, 1 (1979)
- 3) Möllenstedt, G. and Düker, H.: *Naturwissenschaften*, 42, 41 (1955)
- 4) Tomita, H. et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 9, 719 (1970)
- 5) Harada, K. et al.: *Appl. Phys. Lett.*, 84, 3229 (2004)
- 6) Takeda, M. and Ru, Q.S.: *Appl. Opt.*, 24, 3068 (1985)
- 7) Ru, Q.: in Proc. Int. Workshop on Electron Holography, Knoxville, TN, Elsevier, Amsterdam, 65 (1995)
- 8) Harada, K. et al.: *Nature*, 360, 51 (1992)
- 9) Harada, K. et al.: *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 6, 29 (2008)
- 10) 原田 研：電子顕微鏡, 35, 62 (2000)
- 11) 川崎忠寛, 木村吉秀, 高井義造, 生田 孝：顕微鏡, 39, 207 (2004)
- 12) 石塚和夫：顕微鏡, 40, 188 (2005)
- 13) 永山國昭：電子顕微鏡, 38, 29 (2003)
- 14) Mori, S. et al.: *Phys. Rev.*, B67, 12403 (2003)
- 15) Xu, X.Z. et al.: *Nature*, 465, 901 (2010)