

Title	実時間能動型画像処理電子顕微鏡法に関する研究
Author(s)	宇津呂, 英俊
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/42339">https://hdl.handle.net/11094/42339</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	宇津呂 英 俊
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 16167 号
学位授与年月日	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科物質・生命工学専攻
学位論文名	実時間能動型画像処理電子顕微鏡法に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 高井 義造  (副査) 教授 横山 正明 教授 梅野 正隆

### 論文内容の要旨

透過型電子顕微鏡は物質の微細構造を直接観察できる装置であり、材料物性や医学・生物学の分野において必要不可欠なものになっているが、いくつかの光学的問題点を抱えている。まず磁界型電子レンズには大きな球面収差が残存しており、また電子線に対する理想的な位相板が存在しないため位相像を直接観察することができない。さらに電子線の干渉性が低く、電子線のエネルギー広がり起因する色収差が電子光学系の情報限界を決定している。本論文ではこれらの問題を解決するため、球面収差補正された位相像を実時間で観察できる、実時間能動型画像処理電子顕微鏡法に関する研究についてまとめている。以下に、本論文の要旨をまとめる。

第1章では本研究の背景について概説し、研究の目的と意義を明確にしている。

第2章では透過型電子顕微鏡の構造と残収差について論じ、従来の収差除去法と本研究で提案する実時間能動型画像処理法とを比較した上で、本研究の位置付けを明らかにしている。

第3章では、コヒーレント照明下における透過型電子顕微鏡の3次元結像特性を論じ、第4章以下で展開する球面収差補正ならびに位相像再生の理論的根拠を明確にしている。

第4章では実時間能動型画像処理電子顕微鏡法の原理を3次元結像特性に基づいて論じ、その特徴を詳細に示している。

第5章では冷陰極電界放出型電子銃を搭載した透過型電子顕微鏡(HF-2000F)をベースモデルとして、実時間能動型画像処理電子顕微鏡を開発し、実用化した結果について述べている。またアモルファス試料を用いた原理確認実験を行い、情報限界は通常よりやや低下しているものの球面収差補正と振幅・位相像再生処理が同時に実現されていることを実証している。さらに応用例として金原子挙動の実時間観察を行い、従来は観察の難しかった結晶表面での原子の挙動を明瞭に観察することに成功したことを述べている。

第6章では実用上の問題点となる処理制限要因として、加速電圧変化に伴う明るさ変化や像回転・倍率変化、電子光学軸調整、加速電圧変調範囲や電子線の部分的コヒーレンス、散乱波同士の干渉による非線形結像成分の影響について実験的ならびに理論的に評価し、対処法を提案している。

第7章では垂直照明を前提としていた実時間能動型画像処理電子顕微鏡法をホローコーン照明下に拡張し、色収差により制限されている情報限界を超える空間分解能が得られることを光学顕微鏡を用いて原理確認している。またホローコーン照明下における実時間能動型画像処理電子顕微鏡の結像特性を評価し、処理制限要因を明らかにして今後

の開発に指針を与えている。

最後に本研究を総括し、今後の展望について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

透過型電子顕微鏡が抱える光学的問題点に対しては様々な角度から研究が行われており、これまでに、多極子レンズに代表される収差補正レンズ、電子線ホログラフィー、光学条件を変えた複数の画像から計算機により像再生する方法などが提案されている。しかしそのいずれも技術的課題がいくつか残されており広く実用化されるには至っていない。

本研究は、能動型画像処理という独自のアプローチにより、電子光学系に能動的な変調を加えることで、球面収差補正された位相像を実時間で観察できる実時間能動型画像処理電子顕微鏡法の実用化と機能拡張を行ったものである。電子光学系の大きな利点は、磁界型や静電型の光学系を電氣的に制御することにより光学パラメータの正確な高速変調が可能であるという点である。このことを積極的に活用し、電子光学系を改造せずに球面収差補正された位相像を実時間で観察できる結像方式を実現した点が本研究の特色であると言える。本研究の主な成果は、以下の通りである。

- (1)コヒーレント照明下における透過型電子顕微鏡の3次元結像特性を議論し、実時間能動型画像処理電子顕微鏡法の理論的背景を明確にしている。
- (2)加速電圧に高速・高精度な変調を加えることにより観察像の焦点位置に関する重み付き積分を実時間で行う能動型画像処理方式を実用化し、冷陰極電界放大型電子銃を搭載した透過型電子顕微鏡(HF-2000F)をベースとして実時間能動型画像処理電子顕微鏡を開発している。さらに、電子エネルギー損失分光により加速電圧が正確に変調されていることを確認し、アモルファス薄膜試料を用いた検証実験により像再生処理が正確に行われていることを示している。応用例としては金原子挙動の実時間観察を行い、結晶表面での原子の挙動を明瞭に観察することに成功している。
- (3)実時間能動型画像処理電子顕微鏡を実用化する上で問題点となる様々な処理制限要因を評価した上で対処法を提案し、適用限界を明確にしている。
- (4)加速電圧に変調を加える際に電子光学軸の軸ずれが及ぼす影響やその測定法について述べ、特に重要となる電圧中心軸合わせに関しては焦点深度拡大を用いた新しい高精度軸合わせ法を提案している。
- (5)垂直照明を前提としていた実時間能動型画像処理電子顕微鏡法を、一定の傾斜角で全方位から照明するホローコーン照明に拡張し、色収差により制限されている情報限界を超える空間分解能が得られることを光学顕微鏡を用いて原理確認している。また実際に実時間能動型画像処理電子顕微鏡においてホローコーン照明を行い、結像特性や処理制限要因を明らかにしている。

以上のように本論文は、電子光学系に能動的な変調を加えることにより球面収差補正された位相像を実時間で観察できるこれまでに類を見ない実時間能動型画像処理電子顕微鏡法の開発とその応用研究について述べたものである。これらの成果は応用物理学、特に電子顕微鏡学の今後の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士論文として価値があるものと認める。