

Title	電子線マルチプローブを用いた走査電子顕微鏡の高性能化に関する研究
Author(s)	圓山, 百代
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/91942">https://doi.org/10.18910/91942</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 圓 山 百 代 )

論文題名

電子線マルチプローブを用いた走査電子顕微鏡の高性能化に関する研究

## 論文内容の要旨

本論文は、複数本の電子プローブを同時形成する電子線マルチプローブ技術を走査電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscopy)に適用した電子線マルチプローブSEMの実現に向けた研究成果をまとめたものであり、以下に示す全6章で構成した。

第1章では研究の背景と目的について述べた。近年のIT技術の進展を支えるナノテクノロジー分野においては、デバイスの数mmの範囲に渡る画像データを短時間に取得する必要性が増加している。また医学生物学分野における生体組織観察や、材料科学分野における三次元観察技術においても同様の需要が急速に増しており、顕微鏡画像を高分解能かつ高速で取得する技術の開発が急務となっている。電子線マルチプローブ走査電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscopy)は電子線プローブの本数分に反比例して大面積の撮像時間を短縮することが可能であり、上記の需要に応え得る顕微鏡技術の候補として期待を集めている。本学位論文研究では、電子線マルチプローブSEMの原理検証と、電子線マルチプローブの本数を増加させるために必要となる照明電子光学系及び信号電子光学系の課題解決に取り組んだ。

第2章では、電子線マルチプローブSEMの原理とその実現に向けた取り組みについて述べた。電子線マルチプローブSEMでは、各SEM画像を独立に取得するため、各電子線プローブに対応した検出器を配列させる。電子線マルチプローブSEM像を取得するためには、試料上にフォーカスした全ての電子線プローブで同時に試料上の異なる領域をスキャンし、電子線プローブが照射された各領域から放出された、各電子線プローブと対応する複数の電子群、すなわちマルチ信号電子群を検出器上で混在せずに同時取得する必要がある。この課題を解決するための電子線マルチプローブSEMの電子光学系を提案し、試作、評価した結果を示した。評価結果にもとづき、照明電子光学系においては光軸から離れた位置を通過する軸外ビームで形成されるSEM像の分解能の改善、信号電子光学系においてはマルチ信号電子群の分離度向上が重要な課題であることを示した。

第3章では、電子線マルチプローブSEMにおける照明電子光学系の光軸から離れた位置を通過する軸外ビームで形成されるSEM像の分解能の改善のための取り組みについて述べた。本取り組みでは、デコンボリューション技術を応用した画像処理を検討し、SEM像の形成に用いる点拡がり関数(PSF: Point Spread Function)を別のPSFに変換する手法(PSF変換法)を開発した。本手法の有効性を確認するため、通常のコリメータではなく輪帯形状の絞りをを用いた輪帯照明SEM像への適用による検証を行った。輪帯照明SEMでは、通常のコリメータと比較して焦点深度が向上するが、その一方で分解能が劣化することが課題であった。輪帯照明SEMの画像を通常のコリメータ相当に変換するPSF変換法を適用し、得られた画像の評価を行った結果、通常のコリメータと同程度まで分解能が改善されることが確認できた。

第4章では、電子線マルチプローブSEMの信号電子光学系における各信号電子群の空間的分離度の向上に必要な技術の取り組みについて述べた。照明電子光学系と干渉しない位置に検出器を設置可能とするため、試料から発生する信号電子を大角度偏向するExB偏向器を用いた信号電子光学系が実用化されているが、電子線マルチプローブSEM観察においてはExB偏向器の収差によってマルチ信号電子群の分離度が低下する。この問題に対し、電極と磁極の組み合わせで構成し、静電場と静磁場を直交させたExB偏向器を逆向きに2段組み合わせることにより、1段目で発生する収差を2段目で相殺させる光学系を考案した。有限差分法による電磁場計算とその内部を通過する電子の軌道追跡計算に基づくシミュレーションを行った結果、1段目で発生する収差は、2段目との間に2段の4-f光学系を設置することにより、設置前の1/10以下に低減できることが確認された。

第5章では、PSF変換法の電子線マルチプローブSEM像への適用による分解能改善と、2段のExB偏向器の電子線マルチプローブSEMへの適用による分離度の向上を検討した。この結果、電子線マルチプローブSEMの電子線マルチプローブを841本配列可能であることを示し、電子線プローブ1本のSEMに対して2桁の速度の向上が見込まれた。

第6章では、以上の取り組み内容の結論を総括し、今後の課題と展望について示した。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 圓 山 百 代 )		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	(教授) 山崎 順
	副 査	(教授) 森 伸也
	副 査	(教授) 片山竜二
	副 査	(教授) 西 竜治 (福井工業大学)
	副 査	(教授) 小島一信
	副 査	(教授) 尾崎雅則
	副 査	(教授) 近藤正彦
	副 査	(教授) 森 勇介
	副 査	(教授) 片山光浩
	副 査	(教授) 廣瀬哲也
	副 査	(教授) 丸山美帆子
	副 査	(教授) 大岩 顕
	副 査	(教授) 斗内政吉
	副 査	(教授) 山本和久
副 査	(教授) 余語覚文	

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、プローブ電子線を複数本とする電子線マルチプローブを走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy、以下 SEM と略す) に適用した電子線マルチプローブ SEM に関する研究成果をまとめたものであり、以下の全 6 章で構成されている。

第 1 章では研究の背景と目的について述べている。近年の IT 技術の進展を支えるナノテクノロジー分野およびインフォマティクスが盛んとなってきた材料およびバイオ分野において、試料の大量の画像データを短時間に取得する必要性が増加しており、顕微鏡画像を高分解能かつ高速で取得する技術の開発が重要となっている。電子線マルチプローブ SEM は電子線プローブの本数分に反比例して撮像時間を短縮することが可能であると考えられ、上記の課題に応え得る新たな顕微鏡技術の候補として電子線マルチプローブ SEM の実現とその高性能化として本研究の位置づけを行っている。

第 2 章では、電子線マルチプローブ SEM の原理とその実現に向けた取組について述べている。電子線マルチプローブ SEM では、各 SEM 画像を独立に取得するため、各電子線プローブに対応した検出器を配列させている。電子線マルチプローブ SEM 像を取得するためには、試料表面にフォーカスした全ての電子線プローブで同時に試料表面における異なる領域をスキャンし、電子線プローブが照射された各領域から放出された複数の電子群、すなわちマルチ信号電子群を検出器上で混在せずに同時取得する必要がある。これを実現する電子線マルチプローブ SEM の電子光学系を提案し、試作、評価した結果を示している。

第 3 章では、電子線マルチプローブ SEM における照明電子光学系の光軸から離れた位置を通過する軸外電子線で形成される SEM 像の分解能を改善するための取組について述べている。本取組では、デコンボリューション技術を応用した画像処理を検討し、SEM 像の形成に用いる点拡がり関数 (Point Spread Function: PSF) を別の PSF に変換する手法 (PSF 変換法) を開発している。本手法の有効性を確認するため、通常の円形開口ではなく輪帯形状の絞りを用いた輪帯照明 SEM 像への適用による検証を行っている。輪帯照明 SEM では、通常の SEM と比較して焦点深度が向上するが、その一方で分解能が劣化することが課題である。輪帯照明 SEM の画像を通常の SEM 画像相当に変換する PSF 変換法を適用し、得られた画像の評価を行った結果、通常の SEM と同程度まで分解能が改善されることを明らかにしている。

第 4 章では、マルチ信号電子群の分離度の向上について説明している。マルチ信号電子群の分離度は信号電子光学系の収差の大きさに依存し、軌道を照明電子光学系から大きく分離する大角度偏向 ExB 偏向器によって発生する収差が支配的であることを示している。そこで発生する収差を軽減するため、ExB 偏向器 2 段と 4-f 光学系を組み合わせた大

角度偏向 ExB 偏向器を新たに提案しシミュレーションによる検証を行っている。その結果、偏向による収差を十分抑え分離度を向上できることを示している。

第5章では、第2～4章にて検討、議論した内容を元に、電子線マルチプローブ SEM の高性能化について考察している。電子線マルチプローブ SEM においては観察時間の短縮すなわち高速化が重要であり、電子線マルチプローブの本数を100本以上にすることが可能で100倍の高速化を達成できる見込みを得ている。

第6章では、各章の結論を総括し、今後の課題と展望について述べている。

以上のように本論文は、電子線マルチプローブ SEM の試作および詳細なシミュレーションによる検討から、照明電子光学系の分解能向上方法ならびに信号電子光学系の収差補正偏向光学系を提案し、大幅な高速化と高分解能を両立する走査電子顕微鏡の高性能化の実現可能性を示した学術的に意義のある内容を含んでいる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。