The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

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	https://doi.org/10.18910/91942
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

博士学位論文

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

圓 山　百 代

２０２３年１月

大阪大学大学院工学研究科

内 容 梗 概

本論文は、著者が 2004 年から現在までに株式会社日立製作所中央研究所在職中に行ってきた電子線を用いた撮像装置の開発に関わる研究のうち、電子線マルチプローブ走査電子顕微鏡の開発と輪帯照明を用いた走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscopy: SEM)の分解能向上に関する取組、および、2015 年から大阪大学大学院工学研究科における ExB 偏向器による大角度偏向時の収差抑制技術に関する取組についてまとめたもので、全体は 6 章から構成されている。以下にその概要について章ごとに説明する。

第1章　序論

本研究の背景と目的について述べる。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である。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、上記の需要に応え得る顕微鏡技術の候補として期待される。本研究は電子線マルチプローブ SEM の実現とその高性能化に必要な技術を議論するものである。

第2章　電子線マルチプローブ SEM の光学系の提案とその原理検証

本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る。電子線マルチプローブ SEM では、各 SEM 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、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た。

第3章　照明電子光学系における分解能向上に関する検討

本章では、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)を開発した。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た。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った。輪帯照明 SEM の画像を通常の SEM 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が確認できた。

第4章　信号電子光学系における信号電子群分離度向上に関する検討

本章では、マルチ信号電子群の分離度の向上に取り組んだ内容について説明する。マルチ信号電子群の分離度は信号電子光学系のうち、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 偏向器によって劣化する。そこで、本章では、大角度偏向 ExB 偏向器光学系の収差の抑制に関して取り組んだ。

第5章　電子線マルチプローブ SEM 高性能化に関する議論

本章では、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 の高性能化を検討する。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 本以上とすることを目標とする。

第6章　結論

第 1~5 章までに検討した内容をまとめ、残された課題について議論し、結論づける。

目次

第 1 章　序　論 1
1.1　本研究の背景 1
1.2　SEM の高速化と一括結像式顕微鏡の問題 3
1.3　電子線マルチプローブ SEM 5
1.4　大角度偏向 ExB 偏向器 7
1.5　本研究の目的と課題 8
1.6　本論文の構成 9
第 2 章　電子線マルチプローブ SEM の提案とその原理検証 13
2.1　緒　言 13
2.2　電子線マルチプローブ SEM の光学系提案 13
2.3　電子線マルチプローブ SEM 原理検証機の試作と原理検証 16
2.4　電子線マルチプローブ SEM 像の取得 27
2.5　結　言 30
第 3 章　照明電子光学系における分解能向上に関する検討 31
3.1　緒　言 31
3.2　輪帯照明 SEM 32
3.3　PSF 変換法の開発 35
3.4　PSF 変換シミュレーション 39
3.5　結　言 46
第 4 章　信号電子光学系における信号電子群分離度向上に関する検討 47
4.1　緒　言 47
4.2　低収差 ExB 偏向器光学系の提案 47
4.3　軌道追跡計算の方法 54
4.4　詳細な計算条件の検討 58
4.5　ExB 偏向器光学系の計算結果 61
4.6　ExB 偏向器光学系を信号電子角度弁別に適用する場合の実装例 66
4.7　結　言 72
第 5 章　電子線マルチプローブ SEM 光学系の高性能化に関する議論 75
5.1　緒　言 75
5.2　電子線マルチプローブ SEM 照明電子光学系への PSF 変換の適用 75
5.3　電子線マルチプローブ SEM の電子線プローブ本数に関する議論 84
5.4　結　言 84
第 6 章　結　論 87
謝辞 91
参考文献 93
関連発表 101

第1章 序　論

1.1 本研究の背景

近年の人工知能やモノのインターネットの急速な発展に伴い、それらを駆使する自動運転技術や、それぞれの演算で使用されるクラウドおよびエッジコンピューティング技術の重要性が増し、これら全てを支える半導体デバイスの供給ニーズは日々高まる一方である[1]。さらに、新型コロナウイルス感染症の流行はリモートワークおよび巣ごもり需要を拡大し、PC やタブレット、ゲーム機等の高性能化が急速に進んだことで、停滞しつつあった先端半導体デバイスの微細化を強力に後押ししている。半導体デバイス製造を支える計測や検査の重要性は必然的に高まり、高分解能、かつ、高速に半導体デバイスの画像を取得することが必要となってきた。たとえば、極端紫外線リソグラフィ工程においては半導体デバイスのサイズを小さくすることで確率的に発生する Stochastic 欠陥が増加し、量産時の歩留まりに大きな影響を与える可能性があることが問題となっている[2]。この Stochastic 欠陥のサイズはナノメートルオーダであるため、光を用いた観察では分解能が不足し、走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)などの電子顕微鏡による観察が必要である[3]。

一方、バイオ分野および材料開発分野においては、従来行われてきた研究者の経験と直感に基づく開発手法が限界を迎えつつあり、近年ではその打破のため、大量のデータを用いた統計や情報学を活用することで従来の探索範囲を超えた開発を進めるインフォマティクスと呼ばれる技術が登場した[4][5]。データの一部として各種試料の高分解能画像が大量に必要であり、これらの分野においても広視野にわたっての高分解能かつ高速な撮像ニーズが増加している。たとえば、バイオ分野のコネクトミクスにおいては、軸索と樹状突起により接続される神経細胞の 3 次元構造の可視化が注目を集めており、この構造の断面像を高さを変えて連続的に電子顕微鏡観察し、3 次元再構築するという取組がある[6]。この代表的な手法としては、Focused Ion Beam SEM (FIB-SEM)、Serial Block-Face SEM (SBF-SEM)、及びアレイトモグラフィの 3 つが挙げられる。このうち、FIB-

SEM 及び SBF-SEM は、それぞれ集束イオンビーム及びダイヤモンドナイフを用いて試料表面を薄く削って除去しながら試料表面の SEM 観察を行うものである[7][8]。3 つ目のアレイトモグラフィは、ダイヤモンドナイフによりバルク状の試料を 100 nm 以下の薄片に切り出し回収して試料片とするウルトラミクロトーム法を自動化した超薄連続切片自動回収装置を用いて連続切片をテープ上に回収して作製された試料を顕微鏡で観察するものである[9]。アレイトモグラフィにおいても高分解能が要求される場合には SEM が用いられる。

SEM は、汎用性が高く分解能がナノメートルオーダであることに加え、試料の前処理や操作法が比較的容易な顕微鏡であるため、様々な分野において活用される。SEM では細く絞った電子線プローブを試料表面に照射し、試料と電子の相互作用の結果後方散乱される反射電子や、非弾性散乱過程を経て放出される 2 次電子、あるいは試料表面近傍の電位分布により反射されるミラー電子などを信号電子として検出する。電子線プローブを 2 次元状にスキャンし、試料表面におけるプローブ位置と同期させて信号電子量をプロットすることで試料表面の情報を画像化する。

ここで、SEM において十分な信号雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)で撮像するためには、SEM 像を構成する各画素における信号電子数を十分多くする必要がある。これらの値は SEM の電子光学条件や検出条件などの複合的な要因で決定されるが、典型的な値として、プローブ電流を 100 pA、電子線照射により発生する信号電子の放出効率を 1、画像形成のために 1 画素あたりに必要な電子数を 30 とすると、電気素量 1.602×10^{-19} C を使用して 1 画素あたりのプローブ滞在時間は 4.81×10^{-8} 秒と求められる。この条件を使用して半導体デバイスの 1 チップの全面を観察する場合、面積 30 mm×30 mm、画素サイズ 3 nm と仮定すると観察に要する時間は約 56 日である。また、アレイトモグラフィの例として、文献[10]には 16384×16384 画素で約 2000 枚の断面像を取得したという記述があり、上記の条件で観察した場合に要する時間は約 7 時間である。

このように、上述のような広い面積の観察では SEM の観察時間は非常に長く、観察の高速化が重要である。

1.2 SEM の高速化と一括結像式顕微鏡の問題

SEM 像の SNR は各画素の電子数によって決まる。したがって、一定の SNR を保ったまま高速に観察するためには原理的にはプローブ電流の増加が有効であるが、以下の理由により現実的ではない。

プローブ電流を大きくするためには、単位面積あたり、また、単位立体角あたりに含まれる電流量を増加させればよい。SEM のプローブ電流は光軸上における分布が一様な電流を使用する。ここで、単位面積、単位立体角あたりの電流量を平均輝度と呼ぶ。収差の発生やクーロン効果などの影響がなく、理想的な条件下においては輝度は電子のエネルギーに比例するため、エネルギーによらず不変量とするため、平均輝度を電子のエネルギーで除算したものをエネルギー規格化輝度と呼ぶ。プローブ電流Iはエネルギー規格化輝度βを用いて次式で表現される。

$$I = \beta\phi\pi^2\alpha^2r^2 \tag{1-1}$$

ここで、αは開き角、rは電子源半径、ϕは電子のエネルギーである。レンズ収差や電子同士の相互作用の影響を考えない理想的な条件下においては輝度は光軸に沿って不変であり、(1-1)式はレンズによる電子源像の拡大あるいは縮小が実施された後でも成立することから、試料表面への電子源の投影像、すなわち試料表面上に収束した電子線プローブのサイズと試料表面における開き角により議論することが可能である。なお、電子線プローブのサイズと開き角は、照明電子光学系に適用する絞りによる電流の制限と、電子光学系の倍率の両方によって決まる。SEM の分解能は、電子線プローブのサイズ、電子の試料内部への侵入と散乱による拡がり、および、検出器で取得する信号電子の角度やエネルギーの値によって決定される。このうち試料内部での拡がりは試料の種類に依存し、また、信号電子の角度やエネルギーは試料の材料や表面形態に依存するため、ここでは分解能単独の観点で検討が可能である電子線プローブの試料表面における拡がり、すなわち点拡がり関数(Point Spread Function: PSF)の拡がりのサイズに着目する。PSF は電子線の試料表面での開き角や光軸からの離軸距離などによって決まる各種収差と試料表面への電子源の投影像のサイズによって表される。PSF のサイズを小さくするためには、開き角を最適な値にするとともに、電子源

像サイズが軸上収差と同等、あるいはそれよりも十分に小さくなるように縮小率を高くする。

SEM の分解能を決定する試料表面におけるプローブ直径δは、詳細に求める場合には PSF を求めることにより算出するが、幾何収差等の複数の要因が独立であると仮定し、各項の二乗和平均により、以下のように近似的に表すことができる。

$$\delta = \sqrt{(2r_{\mathrm{s}})^2 + \left(\frac{1}{2}C_{\mathrm{ss}}{\alpha_{\mathrm{s}}}^3\right)^2 + \left(C_{\mathrm{cs}}\frac{\Delta\phi}{\phi_{\mathrm{s}}}\alpha_{\mathrm{s}}\right)^2 + \left(\frac{1.2}{\sin(\alpha_{\mathrm{s}})}\lambda\right)^2} \tag{1-2}$$

ここで、下付き文字の s は試料表面における値であることを表す。第 1 項は電子源径、第 2 項は球面収差、第 3 項は色収差、第 4 項は回折収差をそれぞれ表し、C_{ss}およびC_{cs}は試料表面定義の光学系の球面および色収差係数、$\Delta\phi$はエネルギーの拡がりである。また、λはエネルギーから求められる電子線の波長である。SEM で用いられる数十 keV 以下のエネルギーの場合は相対論補正は不要であり、ϕの単位を eV として$\lambda = 1.226/\sqrt{\phi}$ [nm]となる。

(1-1)式において、エネルギー規格化輝度βは電子源の種類や電子銃の構造によって決まり、容易に大きくすることはできず、また、試料上に到達する電子のエネルギーϕは、SEM 像から得たい情報によって選択するため、プローブ電流の観点のみから自由に変化させることはできない。このため、プローブ電流を大きくするためにはα_{s}またはr_{s}を大きくする必要があるが、これにより(1-2)式の第 1 項～第 3 項が全て増大する。第 4 項のみ、α_{s}の影響で小さくなるが、プローブ電流を大きく取る場合、電子源の電子放出面近傍におけるクーロン相互作用の影響で$\Delta\phi$が増大するため、第 3 項が支配的となる。また、過度に電流を増加させると、電子源の電子放出面近傍以外でもクーロン相互作用が無視できなくなり、r_{s}や$\Delta\phi$の更なる増加が起こる可能性がある。このように、1 本の電子線プローブを用いた SEM では高速化と高分解能がトレードオフとなる。

高分解能、かつ高速な観察技術の候補として、試料に対し集束した電子線プローブを照射する代わりに視野全体に電子線を照射する、一括結像式の顕微鏡[11]-[14]を検討する。一括結像式の顕微鏡では、試料表面に面積状の電子線を照射し、面積状に出射した信号電子を使用して、複数段のレンズで構成される拡大

投影光学系で試料像をカメラ上に拡大投影する。一括結像式の顕微鏡における分解能は、SEM とは異なり、投影光学系の収差で決まる。文献[11]-[13]では信号電子として 2 次電子を使用することで SEM 同様に表面構造を得る技術が提案されているが、2 次電子は試料表面に対して 0～90 度の全方向に出射し、さらにエネルギー分布が広いため、全ての 2 次電子を検出する場合には収差の影響で分解能が著しく劣化する。文献[12]には分解能 100 nm を実現する構成として信号電子を 1 %に制限したという記述があることから、必要な露光時間が 2 桁長くなると予想され、2 次電子を信号電子とする一括結像式顕微鏡では検出可能な信号電子量が少なく、高速化に適さないと考えられる。

また、文献[14]には、信号電子として、電子線を試料に到達させず、試料直上で反射させるミラー電子を用いた例が示されている。照射電子は面積状の電子線の各位置において試料に対し垂直に入射するように軌道が調整されるため、ミラー電子は試料近傍の電位勾配に従って微小な角度変化のみを受けてほぼ垂直に反射される。また、ミラー電子のエネルギーは照射電子線のエネルギーと同一である。このことから、ミラー電子結像方式ではレンズの収差による分解能劣化は問題とならないと考えられる。しかしながら、ミラー電子像は試料像そのものではなく、試料から微小に離れた位置における電位勾配を反映したものであるため、試料表面形態から乖離したものとなり、微小構造の観察が難しい。以上のように、一括結像式の顕微鏡は高分解能、かつ、高速な観察技術として容易には適用できない。

1.3 電子線マルチプローブ SEM

高分解能化と高速化の両立は電子線露光装置においても同様に解消すべきトレードオフであり、描画用の電子線を 1 本から複数本に増加させることで分解能を維持しつつ高速化する取組が進められてきた[15]-[20]。この技術を SEM に応用したものが電子線マルチプローブ SEM である。電子線マルチプローブ SEM では、試料表面に複数本の電子線を集束させて照射し、それぞれに対応する SEM 像を形成する[21]-[24]。すなわち、各電子線プローブの照射位置から発生する信

号電子の集合で、出射角やエネルギーの分布を持つものをクロストークがない状態で電子線プローブに対応する複数の検出器でそれぞれ検出することが重要である。本論文ではこの信号電子の集合を信号電子群と表記する。ここで、照明電子光学系と干渉しない位置に検出器を設置するため、信号電子の軌道を照明電子光学系から分離するためのビームセパレータが必要である。なお、後述するように、本研究においてはビームセパレータとして、静電場と静磁場を直交させた偏向器である ExB 偏向器を使用する。以上のように、電子線マルチプローブ SEM では複数の視野情報を同時に取得することが可能となる。各電子線プローブあたりの電流量を小さくできるため開き角と試料表面における電子源像の投影倍率を大きくする必要がなく、前節で述べた 1 本の電子線プローブ SEM における問題が生じない。さらに、近年では大視野で高分解能な SEM 像取得のニーズが増加している[25][26]。1 本の電子線プローブ SEM で視野サイズを大きく取ると、スキャン時の偏向量が大きく、偏向収差の影響により視野の外側で分解能劣化が生じる[27]。これに対し、電子線マルチプローブ SEM により総合で同じ視野サイズの SEM 像を取得する場合、スキャン偏向量の全てを各電子線プローブ間で配分するため大きくする必要がなくなり、上記の問題は生じない。したがって電子線マルチプローブ SEM では SEM と同等の分解能で電子線プローブの本数分だけ観察速度を向上できる。

電子線マルチプローブ SEM に関する研究動向を以下に示す。まず、先行研究として、2010 年に Delft 工科大から SEM をベースマシンとして電子線マルチプローブを形成する取組についての発表がなされている[28][29]。この取組では、単一の電子源から放出された電子線を 196 本の電子線プローブに分割し、試料位置に配置したイットリウム・アルミニウム・ガーネットスクリーンに到達した電子を光に変換して CCD カメラで撮影している。この後、2016 年には上記の検出構成を進化させ、スクリーンの直上に配置した薄片試料を透過した電子線を検出する装置について発表されている[30]。2019 年の発表では、2 次電子や反射電子を信号電子とする場合には隣接する信号同士がクロストークを生じることを問題として挙げている[31]。

2012 年から 2014 年にかけて本論文に関わる著者の発表がなされており、その

内容は、電子線マルチプローブ SEM の信号検出系を含む電子光学系に関するものである。

その後、Carl Zeiss 社からは 2014 年にコネクトミクス向けの 61 本の電子線プローブを使用する電子線マルチプローブ SEM について発表されている[32]。また、同装置を半導体デバイス観察に適用した事例について 2017 年に発表されている[33]。これらの取組では電子線マルチプローブを六角形状に配列させており、各電子線プローブの光軸からの距離を短く保ちつつ本数を増加させる工夫がなされている。隣接信号同士のクロストークが 1 %以下であるという記載があるが、具体的な施策については説明されていない。ビームセパレータには磁場セクターを使用している。

Hermes Microvision, Inc.からは 2018 年および 2019 年に半導体デバイス用の電子線マルチプローブ SEM について発表がなされている[34][35]。発表された構成では電子線マルチプローブは 9 本であり、MEMS 技術を応用した電子線プローブごとの非点補正器を配置することで、各電子線プローブごとの画質のばらつきを抑制する取組について発表されている。

1.4 大角度偏向 ExB 偏向器

電子線マルチプローブ SEM では照明電子光学系と干渉しない位置に検出器を設置するため、Through the lens (TTL)検出方式を使用する。TTL 検出方式においては、対物レンズより上側に検出器を配置し、信号電子を対物レンズ通過後に検出する[36]。TTL 検出方式では信号電子の軌道を照明電子光学系から分離するビームセパレータが配置される。

TTL 検出方式では、多くの場合において、高分解能像を取るために対物レンズから試料までの作用距離を短く取り、さらに、試料から対物レンズの間に電子線プローブに対する減速電場を適用する[37][38][39]。この電場は信号電子に対しては加速電場として機能するため、例えば初期エネルギーが 10 eV 以下の低速な 2 次電子であっても、対物レンズ通過後には電子線プローブと同等まで加速される。

TTL 検出方式におけるビームセパレータとして、多くの場合、ExB 偏向器が適用される[36][40]。ExB 偏向器は静電場と静磁場を直交させた Wien Filter[41]を応用した偏向器である。ExB 偏向器をビームセパレータとして使用する場合、電子線プローブに対しては静電場と静磁場による偏向が打ち消しあう Wien 条件をとる。静磁場が電子に与えるローレンツ力は、電子の速度ベクトルと磁場の外積で表現されることから、電子線プローブと逆方向に進行する信号電子に対する静磁場による力は静電場による力と同方向となり、結果として、各偏向器の約 2 倍の偏向作用を受ける。このようにして、信号電子の軌道は照明電子光学系から分離される。

ExB 偏向器による信号電子の偏向角度を大きくすると、検出器の実装上の空間的な制約が排除され、電子線プローブに影響を与えない電子光学素子や 2 次元アレイ状の検出器などの配置が可能となる。一般的な SEM においては、TTL 検出方式を適用する場合であっても、信号電子の軌道を照明電子光学系から微小に分離するだけでよく、ExB 偏向器による信号電子の偏向角度はそれほど大きくない。これに対し、電子線マルチプローブ SEM では軌道を分離した先にレンズなどの電子光学要素を配置する必要があるため、偏向角度を 45 度の大角度偏向とする。大角度偏向では電子に対して作用する ExB 偏向器内の電磁場や電子の走行距離が ExB 偏向器内の通過位置に依存するため、ExB 偏向器通過後の軌道が理想状態からずれ、ExB 偏向器通過前と比較して各信号電子群の拡がりが増大し、これが信号間のクロストークの原因となると考えられる。

1.5 本研究の目的と課題

電子線マルチプローブ SEM の高性能化においては観察時間の短縮、すなわち高速化が重要である。第 1.1 節で試算した撮像時間より、観察速度を電子線プローブ 1 本の SEM と比較して 2 桁向上することで実用に耐え得る範囲に入ると考えらえる。そこで、本研究では電子線マルチプローブの本数を 100 本以上とすることを目標とする。

本研究の課題は以下に示す 3 項目である。

(1) 原理検証の完遂

電子線マルチプローブ SEM では、試料表面に複数本の電子線を集束させて照射し、それぞれに対応する SEM 像を形成する必要がある。これを実現する電子光学系の実証評価が必要である。

(2) 電子線プローブごとの分解能ばらつき

電子線マルチプローブ SEM では対物レンズや偏向器などは全電子線プローブで共通である。電子線プローブごとに対物レンズ内における光軸からの距離が異なるため、外側の電子線プローブほど軸外収差の影響が大きく、光軸上の電子線プローブと比較してその SEM 像の分解能が劣化する。この解決が必要である。

(3) 信号電子群同士のクロストーク

第 1.4 節で述べたように、ExB 偏向器による大角度偏向が原因で各信号電子群の拡がりが増大し、これが信号間のクロストークの原因となる。信号電子群同士を互いに分離した状態とできれば信号間のクロストークが解消される。この取組が必要である。

1.6 本論文の構成

以上の研究成果をまとめた本論文の構成を図 1.1 に示す。第 2～4 章は第 1.5 節で示した 3 つの課題についての取組に対応する。

まず、本章に続く第 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、評価した結果について説明する。

第 3 章では、照明電子光学系における軸外電子線プローブによる SEM 像の分解能向上方法を検討する。具体的には画像処理方法を提案する。提案手法の評価用の題材として輪帯照明 SEM の画像[42]を使用し、その分解能改善効果について議論する。

第 4 章では、信号電子群の分離度の向上に取り組んだ内容について説明する。

信号電子群の分離度は大角度偏向 ExB 偏向器によって劣化するため、本章では収差を抑制した大角度偏向 ExB 偏向器光学系を提案する。

第 5 章では、第 2～4 章にて議論した内容を元に、適用可能な電子線マルチプローブ SEM の電子線プローブの本数について議論する。

最後に、第 6 章で第 1~5 章までに検討した内容をまとめ、残された課題について議論し結論づける。

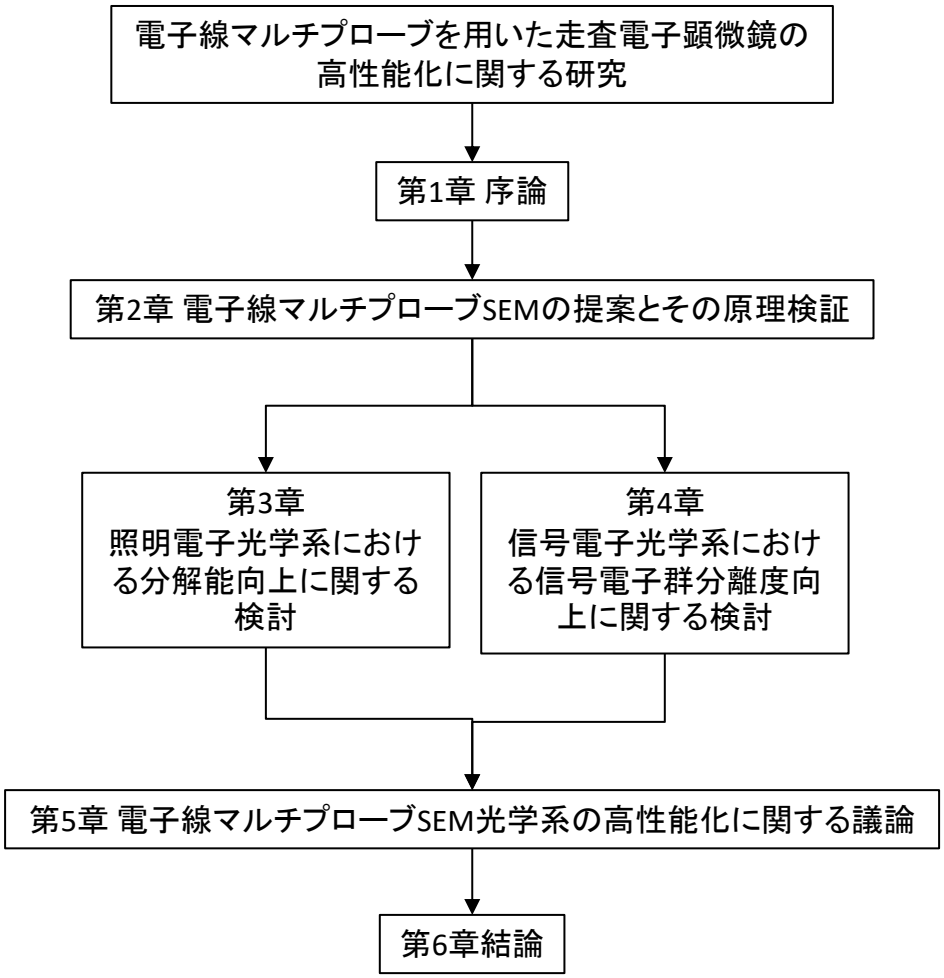


図1.1 本論文の構成を示すブロックダイヤグラム。

第2章 電子線マルチプローブ SEM の提案と その原理検証

2.1 緒　言

本章では、電子線マルチプローブ SEM の電子光学系を提案する。複数本の電子線プローブを形成し、それぞれに対応する信号電子群をクロストークがない状態で各電子線プローブに対応するアレイ状の検出器に導く構成について検討する。さらに、提案した電子光学系を持つ装置を試作し、その基本的な性能の評価を行い、考察する。

2.2 電子線マルチプローブ SEM の光学系提案

電子線マルチプローブ SEM の電子光学系の概略図を図 2.1 に示す。図中には、電子線マルチプローブ、信号電子群の数を 4 つとして示した。本電子光学系は、電子線マルチプローブを発生させて試料表面に一括照明するための照明電子光学系と、電子線マルチプローブの試料到達位置から発生する信号電子を検出するための信号電子光学系の 2 つから構成されている。

電子線マルチプローブ SEM においては、電子線マルチプローブに対応する複数の信号電子群を各電子線プローブに対応する検出器に導く。このため、信号電子光学系をビームセパレータを用いて照明電子光学系から大きく分離し、それぞれを独立に制御する方針とした。ビームセパレータとしては、ExB 偏向器を使用した。ExB 偏向器は静電場と静磁場を直交させた Wien Filter[41]を応用した偏向器である。照明電子光学系では SEM 像を高分解能で取得することを優先して電子光学軸を直線状とし、信号電子光学系では信号電子の進行方向を大きく曲げられるように ExB 偏向器を制御する。なお、対物レンズと ExB 偏向器の間にはスキャン偏向器が配置されており、これらの 3 つは照明電子光学系と検出電子光学系に共通する構成要素である。なお、図 2.1 においては説明のために電子線プローブと信号電子を横方向に拡大して図示したため、信号電子の一部が ExB

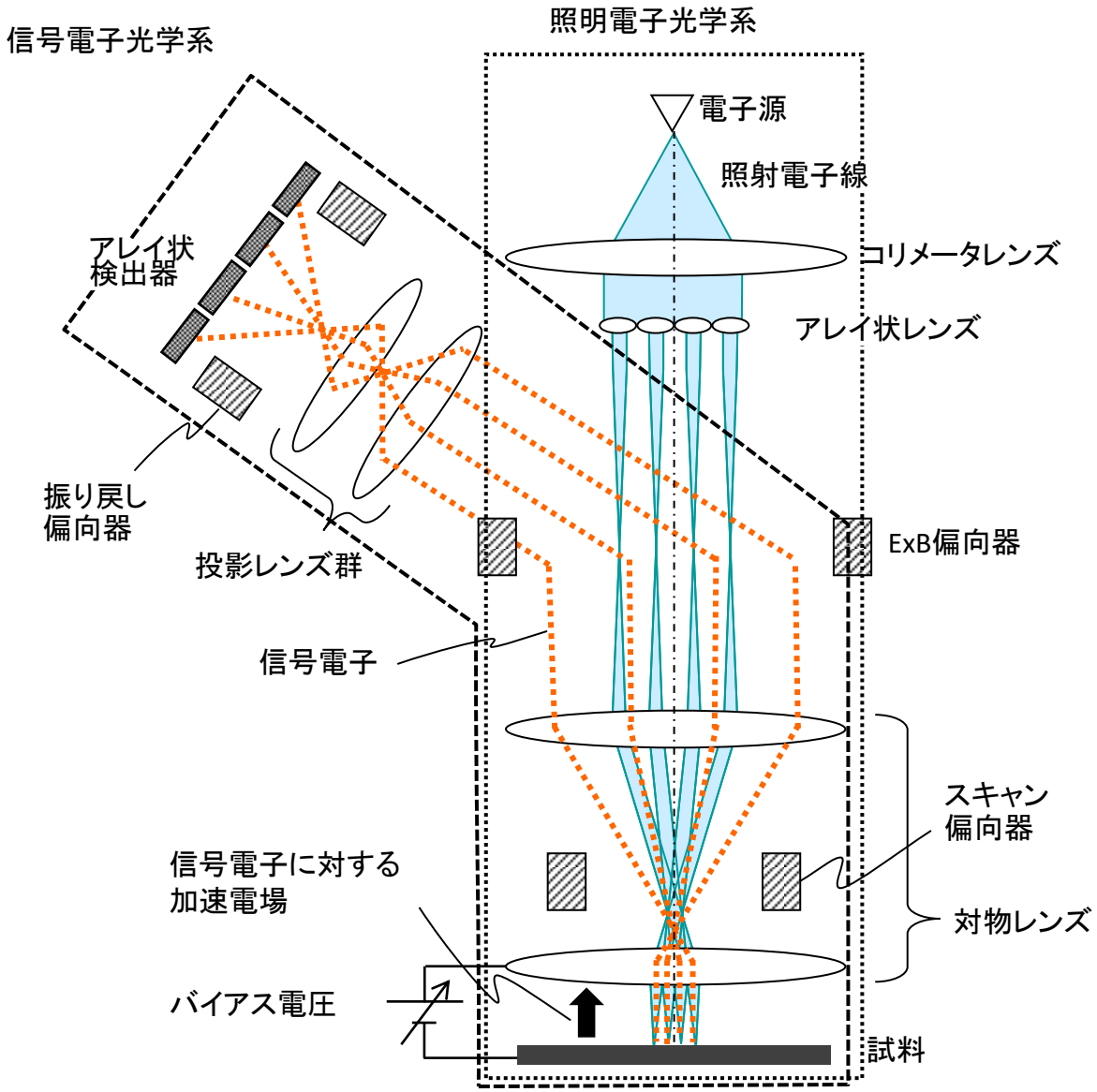


図2.1　電子線マルチプローブSEM電子光学系概略図[43]。
照明電子光学系と信号電子光学系で構成される。アレイ状レンズにより電子線マルチプローブを形成し、4つの信号電子群はExB偏向器で大角度偏向を受け、アレイ状検出器に到達する。また、信号電子がアレイ状検出器上をスキャンすることを避けるために振り戻し偏向器が配置されている。

偏向器に衝突するように図示されているが、実際にはこれらの素子と比較して軌道の拡がりは十分に小さいため、衝突は起こらないように制御される。

照明電子光学系は、基本的に、電子線マルチプローブ式リソグラフィ装置の構成[15]を踏襲して設計した。単一の電子源から放出された照射電子線をコリメータレンズにより平行に整えてアレイ状レンズに入射させる。アレイ状レンズは、MEMS プロセスにより、単一基板上に複数の開口を設けたものを多段にスタッキングすることで作製した。これにより、電子線は複数に分割されたうえで個別集束し、アレイ状の電子源像が形成される。対物レンズは 2 枚 1 組であり、両側テレセントリックの縮小光学系となるように制御する。これによって、全電子線プローブを試料に対して垂直に入射させると共に、試料表面でクロスオーバを結ぶことが可能となる。また、本光学系においては、スキャン偏向器は全電子線プローブに対し共通の構成要素であり、スキャン偏向器によって全電子線プローブが同じ方向に同じ量だけ偏向される。

また、前述のように、信号電子の軌道と電子線プローブの軌道を分離するためのビームセパレータとして ExB 偏向器を用いる。ExB 偏向器は、その偏向角度が大きくなると偏向収差が大きくなり、分解能が劣化する。これを避けるため、本提案光学系においては、電子線マルチプローブ形成部による電子線プローブの電子源像の位置に ExB 偏向器を配置する。

次に、信号電子光学系では、各電子線マルチプローブが試料表面に到達した地点から発生した複数の信号電子線を同時に検出する。各信号電子群は電子線マルチプローブに対応させて個別に検出する必要があるため、アレイ状レンズと対応する形に配列されたアレイ状検出器を用いる。ここで、対物レンズより上側の電子光学系全体には試料に対して高いバイアス電圧を印加する。この電位差は信号電子に対して加速電場として働き、この結果、信号電子は対物レンズ通過後は初期エネルギーよりも高いエネルギーで進行する。

信号電子は、対物レンズを通過した後にビームセパレータである ExB 偏向器を通過し大角度に偏向される。これにより信号電子光学系の光軸は照明電子光学系の光軸から分離される。ExB 偏向器と検出器の間には投影レンズ群を配置する。投影レンズ群は、各信号電子群をアレイ状検出器の各素子に到達させるよ

う、倍率とフォーカスの 2 つを制御するために 2 枚以上のレンズで構成する。

電子線プローブがスキャン偏向器によって偏向されるとき、信号電子群も同時に偏向される。この影響による各信号電子群の検出器上の到達位置の変動を避けるため、提案する構成では振り戻し偏向器を導入する。振り戻し偏向器の効果を示す概念図を図 2.2 に示す。図 2.2(a)と(b)はそれぞれ振り戻し偏向を行わない場合と行う場合であり、簡単のため、複数の信号電子群のうち一つのみ示した。振り戻し偏向がない場合、信号電子はスキャン偏向器によって偏向され、検出器の上をスキャンする。該当の信号電子群に対応する検出器より外側まで偏向された場合、その信号は失われ、対応する視野の画素が欠ける。特に、隣接する信号電子群に対応する検出器に入射する場合、隣接する電子線マルチプローブの SEM 像がゴースト信号として重畳される。これらの影響を避けるために、スキャン偏向器と同期して振り戻し偏向器を制御し、信号電子群がこれら 2 つの偏向器によって受ける偏向量を相殺させる。この結果、信号電子群が検出器上で偏向される面積が減少し、信号電子群が対応する検出器に留まるようになる。以上のように信号電子光学系を構成することにより、複数の信号電子群を対応する各検出器によって検出できるようにした。

以上のように提案した電子線マルチプローブ SEM 光学系を設計した。次節ではこれを元に原理検証機を試作し、評価した結果について示す。

2.3 電子線マルチプローブ SEM 原理検証機の試作と原理検証

前節で提案した光学系の評価を行うため、電子線マルチプローブ 4 本の電子光学鏡筒を持つ原理検証機を試作した。図 2.3 に電子線マルチプローブ SEM 原理検証機の写真を示す。照明電子光学系の 4 本の電子線プローブのエネルギーは 10 keV とし、信号電子のエネルギーは信号電子に対する加速電場を変えることで 10 keV 以下で可変とした。なお、信号電子として 2 次電子を検出対象とした。

まず、本装置を使用して照明電子光学系の性能を評価した。信号電子の影響を排除して評価を行うため、走査透過電子検出法[44]を適用した。走査透過電子検

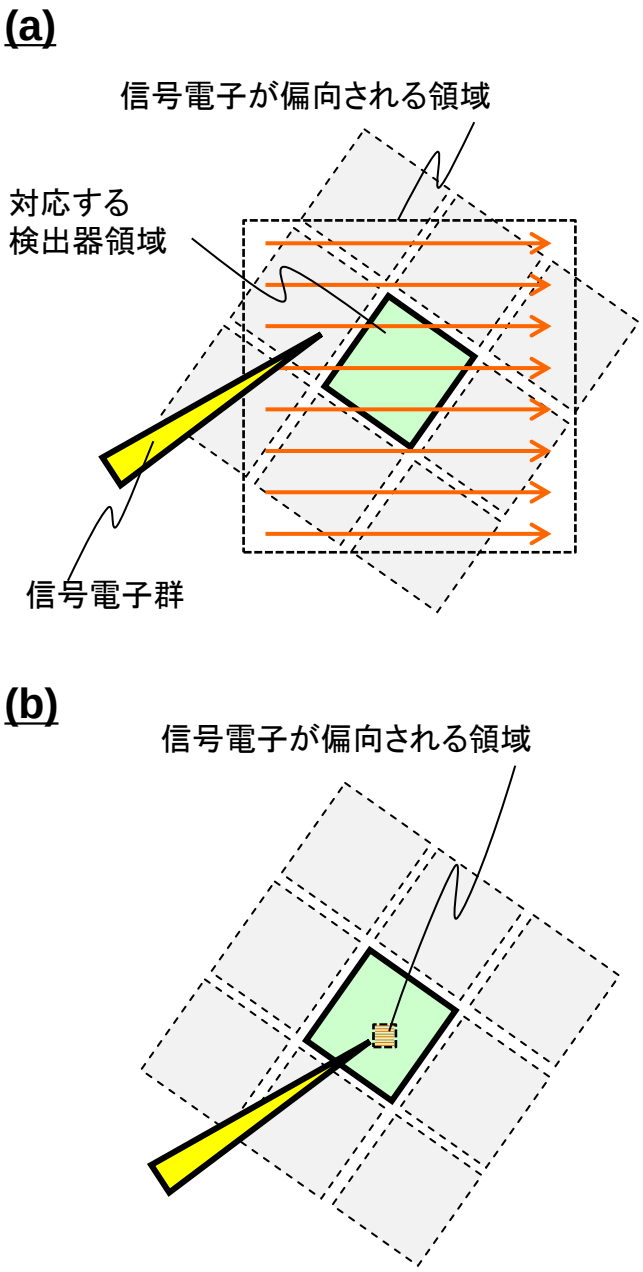


図2.2　振り戻し偏向器の効果を示す概念図[43]。
(a)振り戻し偏向を行わない場合、(b)振り戻し偏向を行う場合。
(a)においては信号電子がスキャン偏向器によって対応する検出器より外側まで偏向されて信号が失われ対応する視野の画素が欠ける。
(b)振り戻し偏向器により偏向量を相殺し、信号電子群が検出器上で偏向される面積が減少し、対応する検出器に留まる。

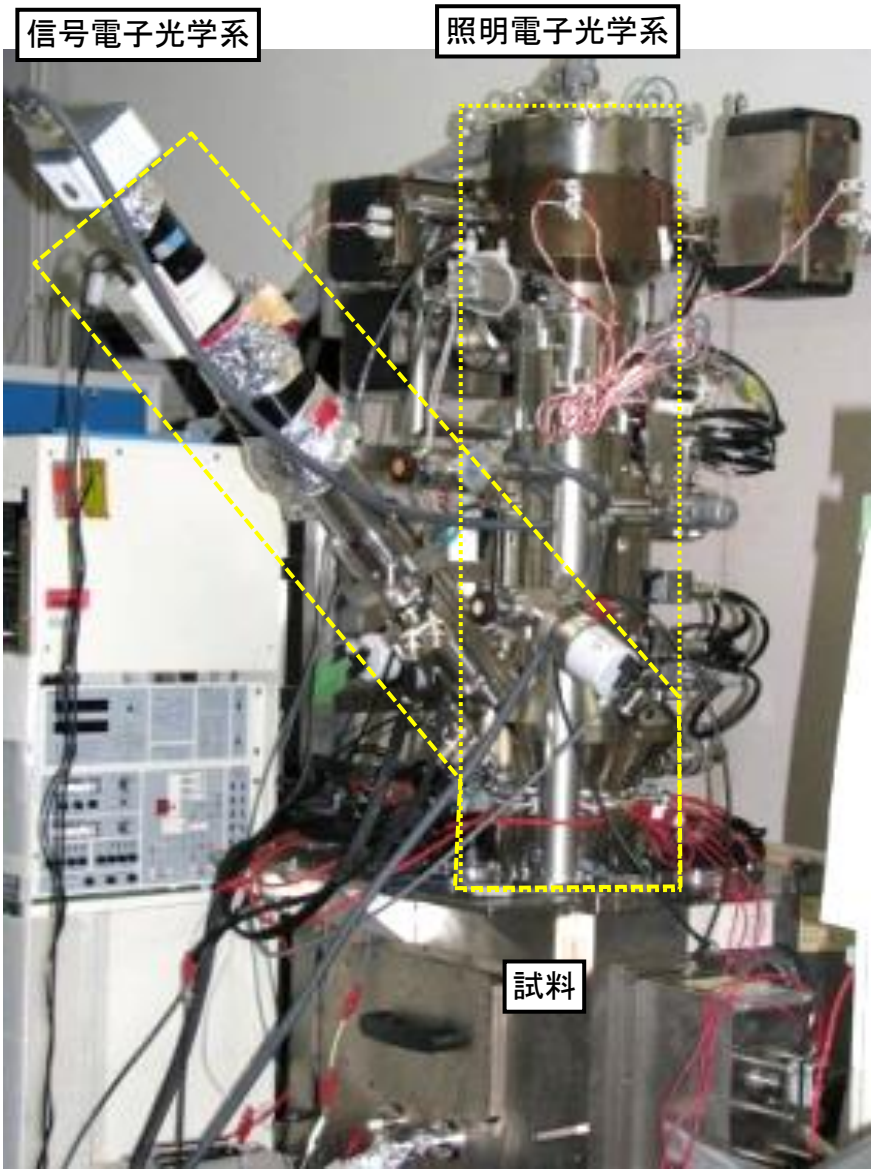


図2.3 電子線マルチプローブSEM原理検証機[43]。
照明電子光学系の電子線プローブは4本である。電子線プローブのエネルギーは10 keV、信号電子のエネルギーは信号電子に対する加速電場により可変とした。信号電子として2次電子を検出対象とした。

出法では、試料に形成された開口部を通過して検出器に到達した電子を直接検出するため、信号電子を検出せず、電子線プローブ単体での評価が可能である。図 2.4 に試料ステージ上に構築した実験構成の模式図と、この評価により得られた結果を併せて示す。図 2.4(a)に示すように、試料ステージ上に透過検出器を設置し、その上に試料として微小開口を持つシリコン薄膜を置き、4 本の電子線プローブをスキャン偏向器でスキャンして透過検出器で検出した。図 2.4(b)、および(c)は形成された走査透過電子像と、それに付随するサンプルパターンマップであり、図中の A~D は 4 本の電子線プローブを識別する記号である。図 2.4(b)には十字マークが 4 回出現しており、4 本の電子線プローブが同時に試料にフォーカスされた状態でスキャンされたことが確認できる。また、図 2.4(b)における視野内の各十字位置を図 2.4(c)に示したものが A~D の四角枠で囲った範囲である。この結果から 4 本の電子線プローブの間隔は 125 μm、視野のサイズは 250 μm であったことがわかる。

続いて信号電子光学系の評価を行った。複数の信号電子群が互いに分離した状態で検出器に到達することを確認するため、前節で説明したアレイ状検出器の位置にシンチレータとカメラを組み合わせたユニットを配置し、検出器面上における複数の信号電子群の分布を確認した。本実験では、簡単のため、スキャン偏向器と振り戻し偏向器は共に不使用とした。

まず、信号電子のエネルギーを 3 keV とした。このとき、信号電子群の拡がりが大きく、シンチレーター上で分離して観測できなかった。そこで、照明電子光学系に配置した可動絞りにより、4 本の電子線プローブから 1 本のみを選択してずつ観測した。図 2.5 に隣接する 2 本の電子線プローブをそれぞれ選択した場合のシンチレータ写真を示す。図中の明るい部分が各信号電子群が分布する部分に相当し、互いの信号の中心位置を×で示した。図 2.6 は図 2.5 中の破線部のラインプロファイルである。この図には、後述するシミュレーション結果も併記した。図 2.5、2.6 に示すように、隣接する信号電子群が重なった領域に電子が存在しており、これらはいずれの電子群に属するかを判断できない。そこで、重なり領域以外に存在する電子数の比率を分離効率Sと定義し、複数の信号電子群を分離検出するための基準指標とする。

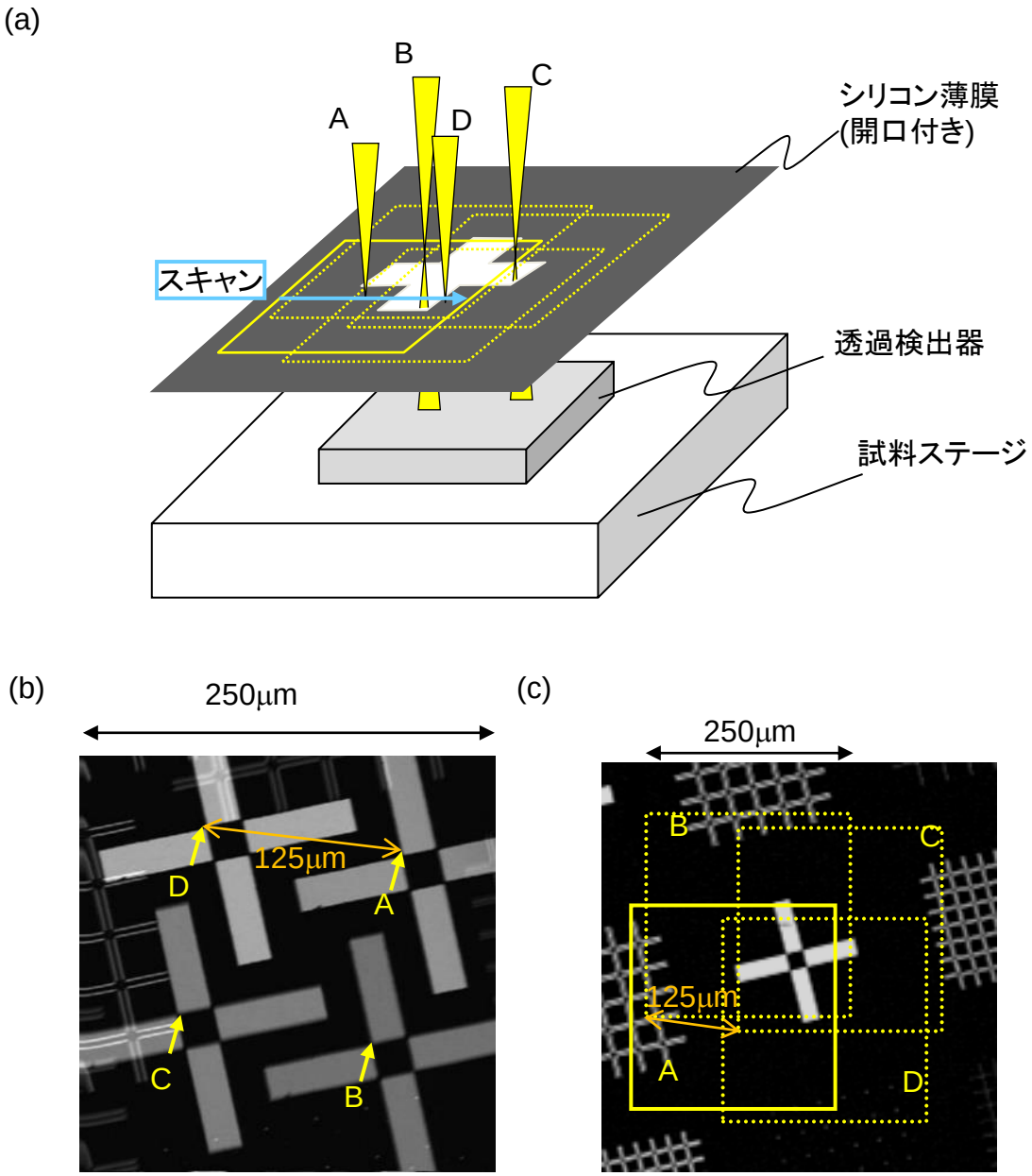
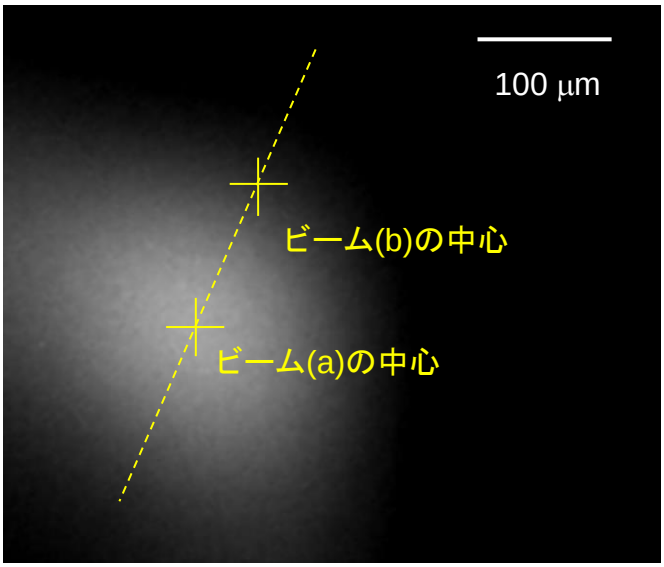


図2.4　照明電子光学系評価用の実験構成及び評価結果[43]。
(a) 透過検出器による実験構成、(b) 取得された透過像、
(c) 試料パターンマップと4本の電子線プローブのスキャン範囲。

(a)



(b)

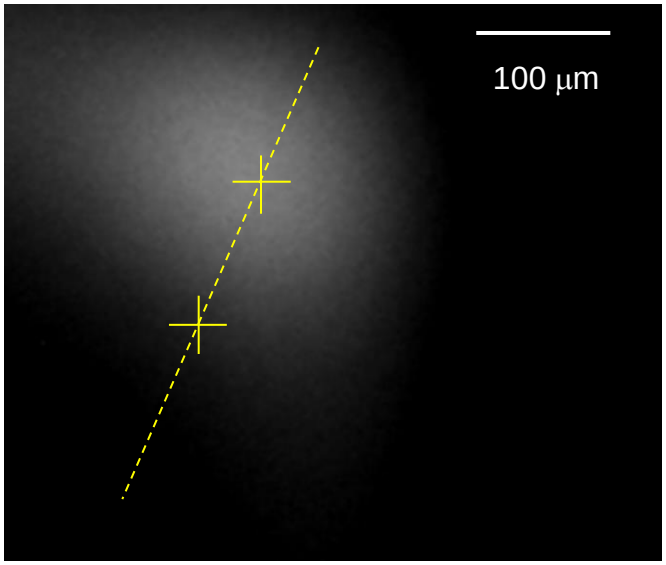


図2.5 シンチレータ上の信号電子群分布(エネルギー3 keV)[43]。(a)、(b)は可動絞りで隣接する電子線プローブを1本ずつ選択したときの結果である。

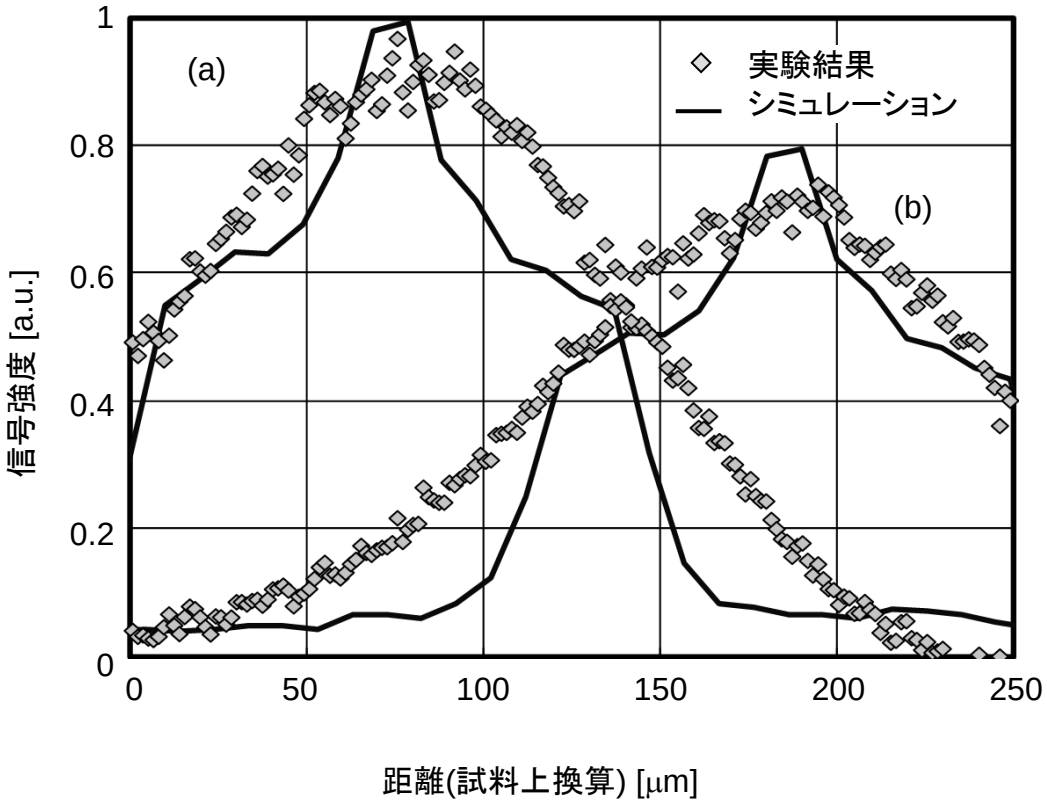


図2.6 隣接信号電子群のラインプロファイル(エネルギー3 keV)[43]。
(a)、(b)は図2.5における各信号電子群に対応する。

$$S = \frac{n_{\mathrm{total}} - n_{\mathrm{overlap}}}{n_{\mathrm{total}}} \tag{2-1}$$

n_{total}はシンチレータ上の信号電子の総数、n_{overlap}は重なり領域に存在する信号電子の数をそれぞれ表す。これらの実験結果より、エネルギー3 keV の場合は分離効率は 20 %程度であった。

ここで、本研究で信号電子に用いた 2 次電子は、エネルギーの拡がりや角度分布が電子線プローブと比較して非常に広い[45]-[47]。信号電子群の拡がりは、電子線プローブと同様に複数の収差の二乗和平均で考えることができる。(1-2)式においてα_{s}および$\Delta\phi$が非常に大きいと考えられることから、球面収差や色収差が大きくなることが分かる。上述の通り、信号電子群同士の間隔と同程度の拡がりを生じる場合、隣接する信号電子群の信号が干渉する。これを避けるためには、信号電子光学系で生じる収差を検出面における信号電子群間隔より小さくする必要がある。この信号電子光学系の収差を抑制するため、信号電子に対する加速電場を制御する。加速電場の効果について以下に説明する。信号電子光学系の角度倍率M_{a}は、試料表面における信号電子のエネルギーをϕ_{o}、検出面でのエネルギーをϕ_{i}とすると、倍率Mを用いて次式で表される[48]。

$$M_{\mathrm{a}} = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{\phi_{\mathrm{o}}}{\phi_{\mathrm{i}}}} \tag{2-2}$$

(2-2)式より、検出器に到達する信号電子の角度は試料表面における角度α_{o}に角度倍率M_{a}を乗じることにより導出できる。信号電子光学系の検出面定義の球面収差係数をC_{s}、色収差係数をC_{c}とすると、球面収差D_{sp}、色収差D_{ch}はそれぞれ次のように表現できる。

$$D_{\mathrm{sp}} = C_{\mathrm{s}}\left(\frac{\sqrt{\phi_{\mathrm{o}}}\alpha_{\mathrm{o}}}{M}\right)^{3}\phi_{\mathrm{i}}^{-\frac{3}{2}} \tag{2-3}$$

$$D_{\mathrm{ch}} = C_{\mathrm{c}}\left(\frac{\sqrt{\phi}\alpha_{\mathrm{o}}}{M}\Delta\phi\right)\phi_{\mathrm{i}}^{-\frac{3}{2}} \tag{2-4}$$

ΔEは 2 次電子のエネルギー拡がりを表す。(2-3)、(2-4)式はいずれも$\phi_{\mathrm{i}}^{-\frac{3}{2}}$に比例する。このことから、$\phi_{\mathrm{i}}$を高くすることにより、信号電子群の拡がりを低減することができる。

この効果について確認するため、信号電子のエネルギーを 3 keV から 9 keV に

増加させて実験を行った。図 2.7 に、エネルギー9 keV において 4 本の電子線マルチプローブに対応する信号電子群を同時に観察したシンチレータ写真を示す。図に示すように、4 つの明るい領域がよく分離されて観察された。図 2.7 中に破線で示した隣接信号電子群 A と B の分布プロファイルを取得した結果を図 2.8 に示す。図には後述するシミュレーション結果も併記した。図 2.7 および 2.8 より、エネルギーを 3 keV から 9 keV に増加させることで分離効率は 99 %に向上することが確認できた。この確認のため、シンチレータ上の拡がり分布を求めるモンテカルロシミュレーションを行った。計算の範囲は試料から検出器までの信号電子光学系とし、試料面の中心から放出される電子の出射角度およびエネルギーの分布を仮定して乱数発生により 30000 条件を作成した。これを初期条件として軌道追跡計算を行い、それぞれの検出器面上における面内到達位置を元に電子分布を求めた。光学系のフィールド計算および軌道追跡計算には Munro's Electron Beam Software Ltd.製の回転対称電磁場用の有限要素法プログラムパッケージ THE SOFEM FAMILY を用いた。なお、計算を簡易とするために ExB 偏向器の計算は省略した。2 次電子である信号電子の放出角度分布は Lambert の余弦則[45]に従うと仮定した。信号電子のエネルギーϕ_{SE}の分布は、文献[47]にて次式に従うと示されている。

$$d(\phi_{\mathrm{SE}}) = \frac{1}{\phi}\frac{\phi_{\mathrm{SE}}}{(\phi_{\mathrm{SE}}+W)^4} \tag{2-7}$$

Wは試料の仕事関数、ϕは電子線プローブの入射エネルギーである。(2-7)式を元にϕの影響がなくなるように分布を正規化し、また、試料に使用したシリコンの仕事関数を 4 eV としてWに適用した。信号電子のエネルギーが 3 keV と 9 keV の場合における結果を各実験のラインプロファイルと合わせて図 2.6 と図 2.8 に示した。シミュレーション結果は実験結果とよく一致しており、エネルギー9 keV における分布の拡がりは 3 keV の約 1/4 であった。また、いずれの分布も球面収差において特徴的な肩を持つ分布形状を示した。(2-5)、(2-6)式より、9 keV における収差は 3 keV における収差の 1/5 程度となることが予想されたが、この値は実験やシミュレーション結果よりもわずかに小さい。この差の原因は、信号電子に対する加速電場が静電レンズ場として働き、収差係数をわずかに変化させて

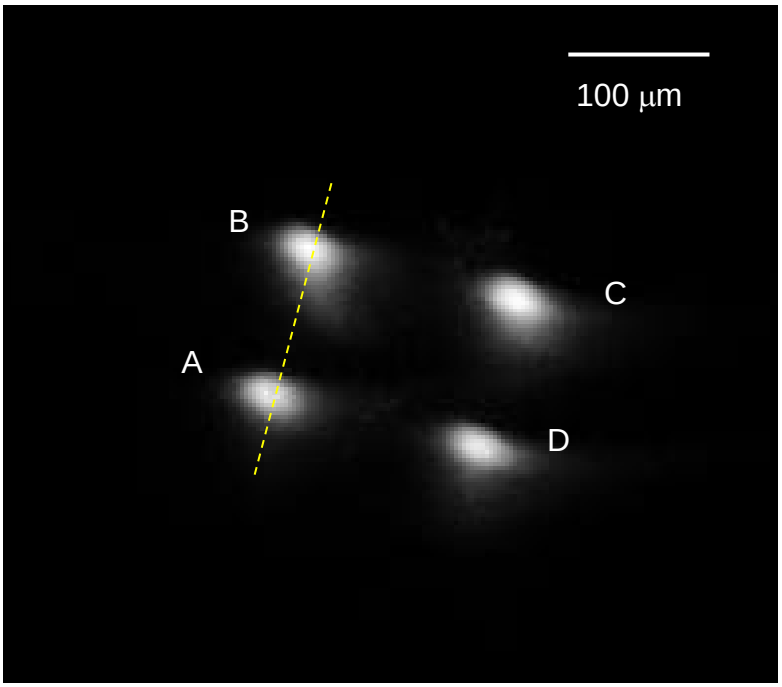


図2.7 シンチレータ上の信号電子群分布(エネルギー9 keV)[43]。
4つの明るい領域がよく分離されて観察された。

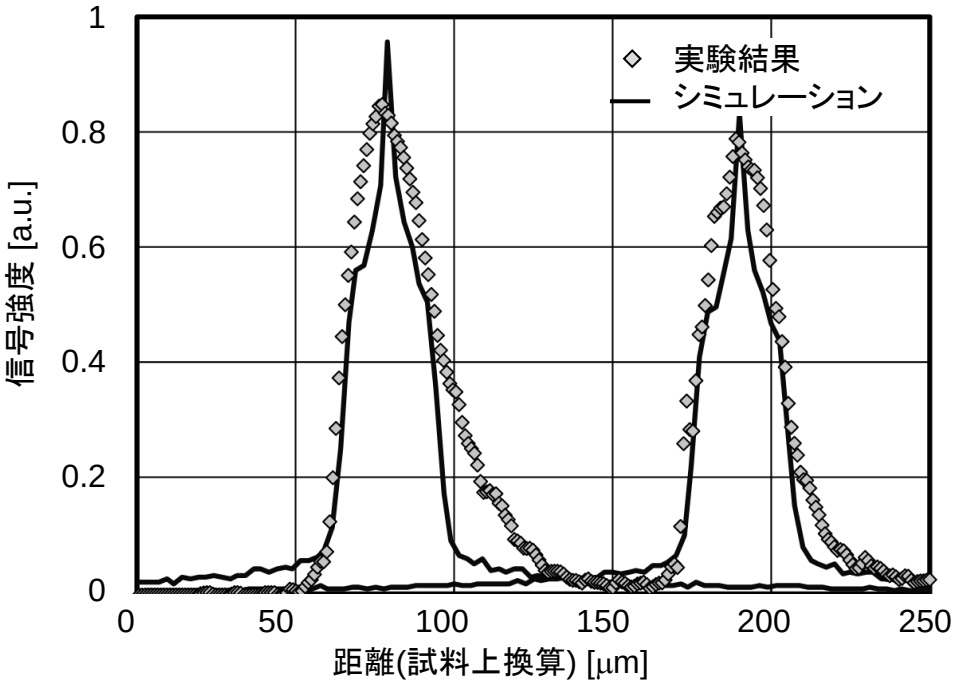


図2.8 隣接信号電子群のラインプロファイル(エネルギー9 keV)[43]。図2.7の破線に沿う結果を示す。エネルギーを9 keVとすることで分離効率は99 %に向上した。

いるためと推測される。

以上の結果から、複数の信号電子群の分離効率を向上するためには、信号電子に対する加速電場が重要な要素であることがわかった。

2.4 電子線マルチプローブ SEM 像の取得

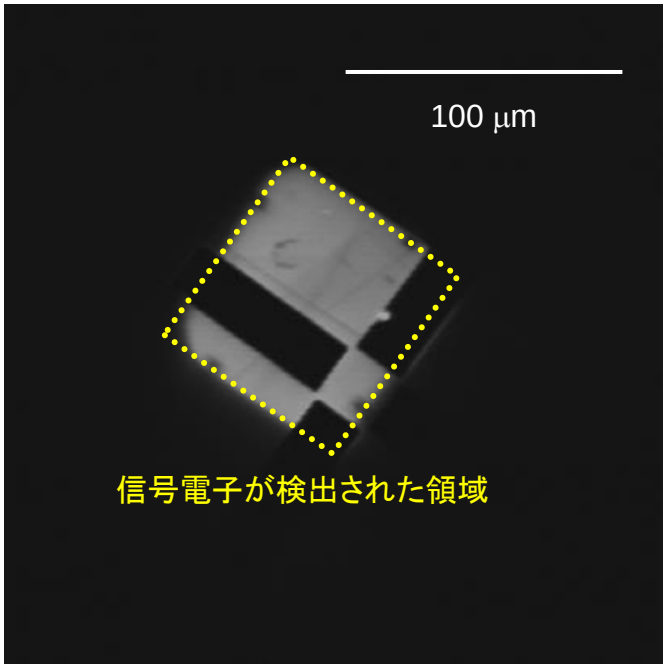
検出器をシンチレータユニットから 3 mm×3mm の半導体検出器をアレイ状に配列した検出器に置き換え、SEM 像を取得する実験を行った。信号電子のエネルギーは 9 keV とした。

電子線マルチプローブ SEM 像の取得に先立ち、振り戻し偏向器の調整を行った。実験は照明電子光学系に配置した可動絞りを使用して 4 本のうち 1 本の電子線を選択した状態で対応する検出器により SEM 像を取得し、その視野の欠けが小さくなるように振り戻し偏向器の偏向量と方向を調整した。振り戻し偏向がない場合と、振り戻し偏向の調整が完了した後の SEM 像を図 2.9 に示す。振り戻し偏向なしの画像では、信号電子群がスキャン偏向器によって検出器の外側まで偏向されており、限られた領域でのみ信号が検出されている。一方、振り戻し偏向の調整が完了した後の画像では、信号電子群が対応する検出器によって視野の全領域で検出されることが確認できた。この結果は、信号電子群の偏向エラーが振り戻し偏向器によって正しく除去されていることを示す。

振り戻し偏向器を使用して 4 本の電子線で SEM 像を取得した結果を図 2.10 に示す。図には試料パターンを併せて示した。図に示す通り、4 本の電子線マルチプローブによる SEM 像がクロストークなしで同時に取得できていることがわかる。複数の信号電子群が干渉せずに検出されていることから、信号電子光学系の全要素が正しく動作していることが確認できた。

以上より、電子線マルチプローブ SEM の原理検証を完了した。

(a)



(b)

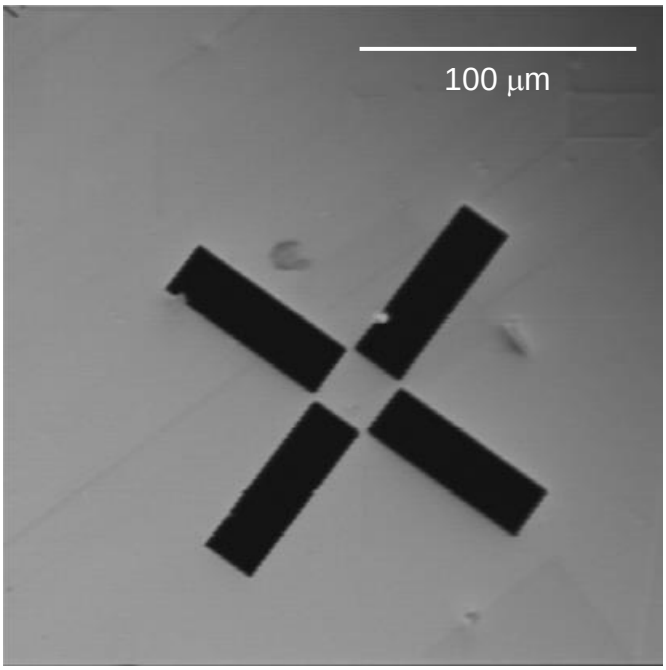


図2.9　1本の照射電子線によるSEM像取得結果[43]。
(a) 振り戻し偏向なしの場合、(b) 振り戻し偏向の調整が完了している場合。
(a)では信号電子群がスキャン偏向器によって検出器の外側まで偏向され、限られた領域でのみ信号が検出されているのに対し、(b)では信号電子群が対応する検出器によって視野の全領域で検出されている。

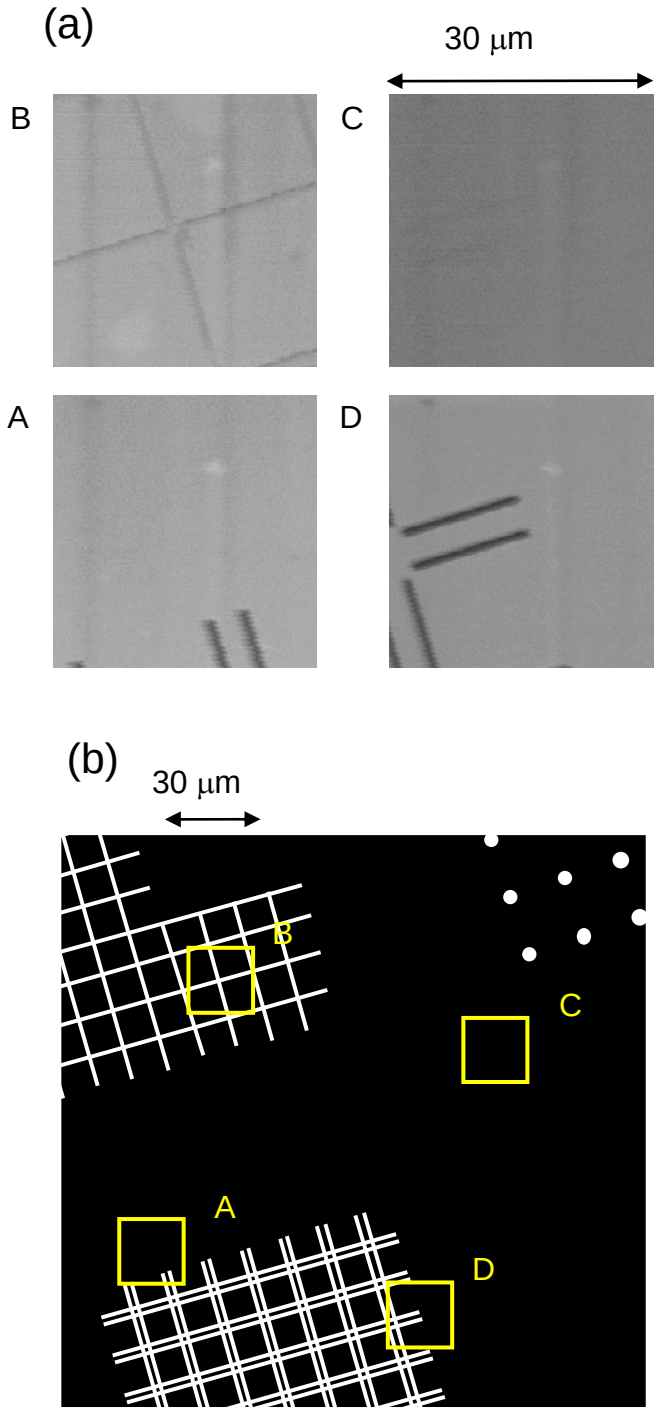


図2.10 振り戻し偏向器を使用してSEM像を取得した結果[43]。
(a) 4本の電子線による電子線マルチプローブSEM像と (b)対応する試料パターン をそれぞれ示す。4本の電子線マルチプローブによるSEM像がクロストークなしで同時に取得できている。

2.5 結　言

本章においては、複数の電子線を試料に同時照明し、それぞれの SEM 像を形成する電子線マルチプローブ SEM の光学系を提案した。本光学系では、照明電子光学系と信号電子光学系を独立に制御し、複数の信号電子群を個別に検出するように設計した。信号電子群同士のクロストークの回避のため、振り戻し偏向器を配置した。原理検証においては 4 本の電子線プローブを形成し、クロストークのない電子線マルチプローブ SEM 像を取得した。シミュレーションと実験により信号電子群の分離効率を確認した結果、エネルギーが 9 keV のとき分離効率 99 %を達成した。この結果は光学系を構成する全要素が想定通りに動作していることを証明する。以上から、電子線マルチプローブ SEM の原理検証を完了した。

第3章 照明電子光学系における
分解能向上に関する検討

3.1 緒　言

第 2 章で説明したように、電子線マルチプローブ SEM では対物レンズが共通要素であり、電子線プローブごとに対物レンズを通過する位置が異なる。このため、電子線マルチプローブ SEM の照明電子光学系では、対物レンズの軸外収差の影響により、電子線マルチプローブの対物レンズの通過位置に応じて分解能に差が生じることが課題である。本章では、この課題を解決するため、取得された電子線マルチプローブ SEM 像に画像処理を施すことで分解能を均一化する手法について検討する。

画像の分解能を回復する手段として、画像からボケ関数をデコンボリューションする手法[49]-[51]がある。SEM におけるボケ関数は電子線プローブの PSF である。得られた SEM 像から PSF を推定してそれをデコンボリューションすれば電子線プローブが光学系から受けた収差等の影響を除去することが可能であるが、SEM における PSF の拡がり寸法は nm オーダーでありナイフエッジ法等で直接測定することは難しい。また、SEM 像はその形成に試料表面付近での電子散乱過程により、例えば試料表面のエッジ部などで信号が多くなるなど、試料表面形態を直接取得するわけではないため、試料形態が既知であってもその SEM 像から PSF のみ取り出すことは困難である。このことから、SEM 像にデコンボリューションを施す場合には APEX 法[50]などを用いたブラインドデコンボリューションを適用することが一般的である。しかしながら、ブラインドデコンボリューションでは予測された PSF が正しいことを担保できない。

本章では実際に取得した SEM 像を元に画像の分解能を回復することを目的とした PSF 変換法と呼ぶデコンボリューション応用技術を開発し、この手法を輪帯照明 SEM の分解能回復を題材として適用するシミュレーションを行う。

3.2 輪帯照明 SEM

SEM はナノメートルオーダの分解能で簡易に画像が取得できる有用な装置であるため、様々な分野において活用されている。SEM の分解能をより高くするために電子光学系の収差を低減する取組が多く行われているが[52]-[60]、電子光学系の収差のうち、回折収差は電子線の波動性に起因するものであり補正できない[61]。回折収差は SEM の電子線プローブの開き角を大きくすることで抑制できる。この結果、SEM を高分解能化するためには開き角を大きくする必要が生じ、SEM においても焦点深度が小さくなり、光学顕微鏡や光学式露光装置と共通する課題となった[62][63]。

輪帯照明は光学式露光装置において画像の解像度と焦点深度を向上させる方法として知られている[64][65]。これを光学から電子光学へのアナロジーとし、輪帯照明を SEM に適用することで焦点深度を向上させる研究が発表されている[42][66]-[69]。輪帯照明 SEM の原理を波動光学を用いて説明する[42]。図 3.1 に標準的な SEM と輪帯照明 SEM の角度制限絞りの模式図を示す。標準的な SEM では絞り形状は円形開口であるのに対し、輪帯照明 SEM では電子線プローブ中心部を円盤状に遮蔽された輪帯絞りを用いる。円形開口を通過した波は、波動ベクトルの方向が異なる多数の平面波の組み合わせであると考えられ、これが伝搬して像面にフォーカスすると微細な PSF が得られる。しかし、これらの平面波はデフォーカスすると位相がずれるため、光軸に沿う電子の強度分布はすぐに減衰する。この減衰の度合いによって焦点深度が決まる。円形開口径が大きいほど PSF の拡がりは小さく、焦点深度は短くなる。一方で、輪帯絞りは電子線プローブ中心部、すなわち光軸上の電子波が制限される。このため、光軸上のどの位置であっても光軸に対しほぼ同じ角度で入射する波のみが伝搬する。同一角度の波は光軸のどの位置でも位相が揃うことから、光軸に沿う電子の強度分布は細長く、一定である区間の長いものとなる。すなわち、輪帯照明 SEM では標準的な SEM よりも焦点深度が向上する。

図 3.2 にシミュレーションにより求めた標準的な SEM および輪帯照明 SEM の PSF、および、それらをボケ関数として計算した SEM 像を示す。SEM 像におけるパターンの大きさは、PSF によるボケが視認できるように選んだ。図より、

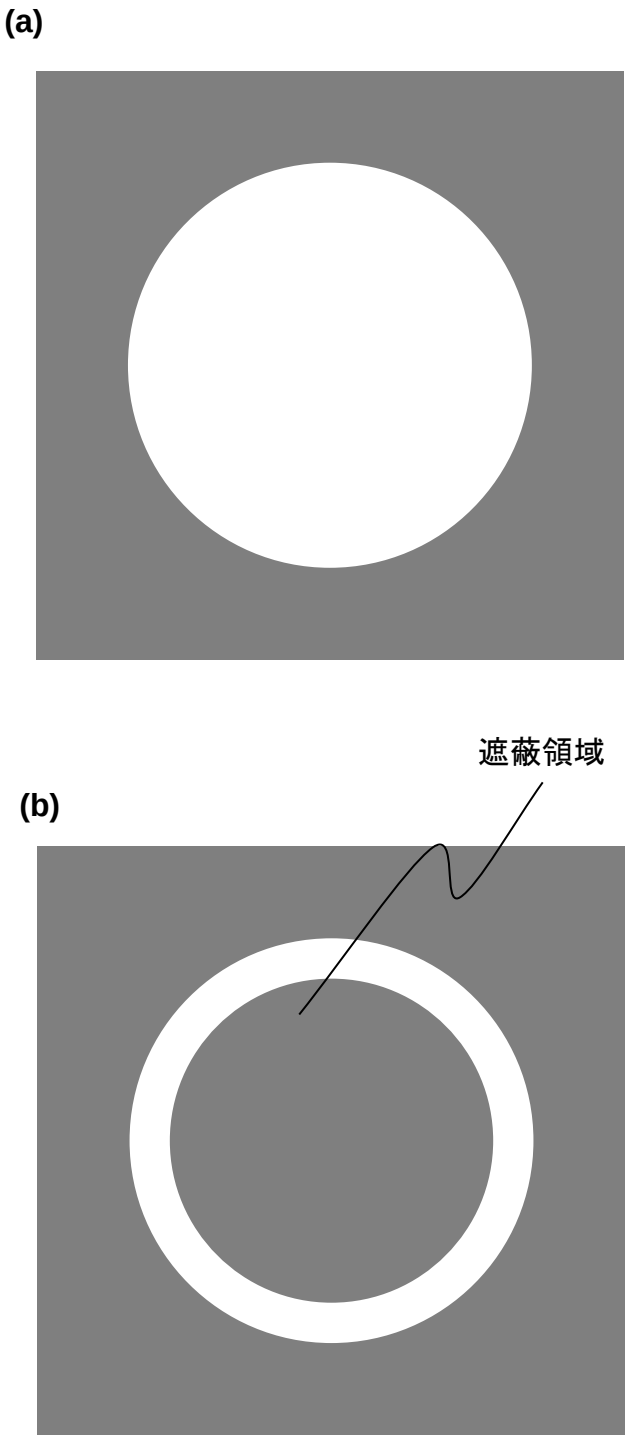


図3.1　SEMにおける角度制限絞りの模式図[70]。
(a) 標準的なSEM(円形開口)、(b) 輪帯照明SEM。
輪帯照明SEMでは電子線プローブ中心部を円盤状に
遮蔽される。

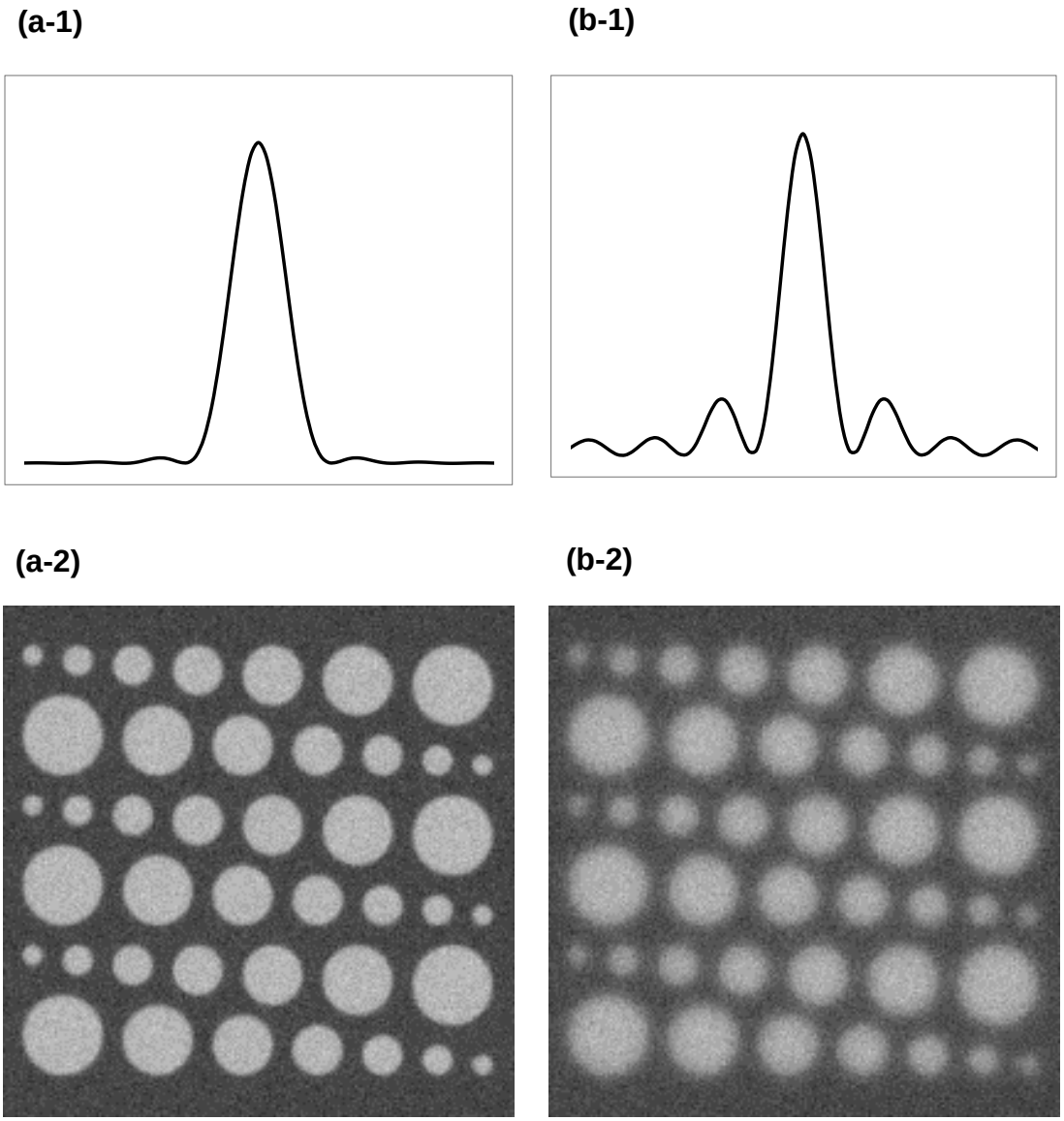


図3.2　シミュレーションによるSEM像へのPSFの影響の検証[70]。
(1) PSFの模式図 及び (2) 対応するSEM像のシミュレーション、
(a) 標準的なSEM 及び (b) 輪帯照明SEM に対応する。
輪帯照明SEMのPSFは標準的なSEMに比べ高いサイドローブを有し、これが原因で輪帯照明SEM像の分解能劣化が生じる。

輪帯照明 SEM の PSF は標準的な SEM に比べ高いサイドローブを有し、これが原因で輪帯照明 SEM 像の分解能劣化が生じる。この分解能劣化が解消できれば、輪帯照明 SEM を用いて分解能と焦点深度の両立が可能となる。

3.3 PSF 変換法の開発

輪帯照明 SEM の分解能劣化を回復するため、PSF 変換法と呼ばれる画像処理方法を開発した。本手法は、SEM 像を形成する PSF を高分解能な SEM 像を形成する PSF に変換するものである。SEM 像はある PSF を有する電子線プローブが試料表面をスキャンすることで形成される。信号処理の観点で表現すると、ボケのない条件で取得される理想的な試料像にフィルタ関数として PSF をコンボリューションしたものとなる。PSF はフーリエ平面における電子線波面の分布である瞳関数 P のパワースペクトルとして表される[71]。

$$\mathrm{PSF}(x, y) = \left|\mathrm{FT}\big(P(u, v)\big)\right|^2 \tag{3-1}$$

FT は 2 次元フーリエ変換、(x, y)は電子線波長で規格化した電子線位置、(u, v)は空間周波数をそれぞれ表す。フーリエ平面における電子線の振幅と位相遅れをそれぞれ$A(u, v)$および$\chi(u, v)$とすると、$P(u, v)$は次式のように表される。

$$P(u, v) = A(u, v)\exp\big(i\ \chi(u, v)\big) \tag{3-2}$$

ここで$A(u, v)$は絞りの開口形状で決まり、電子線が開き角制限絞りを通過する場合は 1、通過しない場合は 0 の 2 値関数である。SEM 像$I(x, y)$は、以下に示すように試料像$S(x, y)$と PSF のコンボリューションによって得られる。

$$I(x, y) = S(x, y) \otimes \mathrm{PSF}(x, y) \tag{3-3}$$

したがって、理想的な条件においては PSF が既知の場合は、取得した SEM 像から PSF をデコンボリューションすることで試料像が求められる。

$$S(x,y) = \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(I(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF}(x,y)\big)}\right) \tag{3-4}$$

次に、光学伝達関数について検討する。光学伝達関数は PSF をフーリエ変換したものであり、その絶対値である Modulation Transfer Function(MTF)は次式で表

現される。

$$\mathrm{MTF}(u,v)=\left|\mathrm{FT}\left(\mathrm{PSF}(x,y)\right)\right| \tag{3-5}$$

MTF は空間周波数に関する関数であり、PSF により試料像情報が伝達できる各周波数ゲインを表す。すなわち、試料情報をどれだけ SEM 像に転送できるかの指標値である。

簡単のため、回折収差以外の幾何収差および色収差のない条件の MTF を計算した。このとき、PSF と MTF は(3-2)式の A、すなわち開口部の形状のみで計算できる。図 3.3 に結果を示す。図中の系列は、(a)輪帯照明 SEM、(b)標準的な SEM、(c)ボケ関数なしの MTF である。空間周波数は開き角や加速電圧に依存しない無次元量とするため、得られた結果をλ/αで除算することで規格化した。これを規格化空間周波数とする。λは電子線の波長、αは開き角である。収差を含まない場合は規格化空間周波数 2 において MTF は 0 となる。ここで、デコンボリューションは SEM 像を形成している PSF を画像から除去する手法であるため、図 3.3(c)の MTF がデコンボリューション後の MTF に相当する。すなわち、ボケ関数なしの場合の PSF はデルタ関数であり、デコンボリューションを施すことは実空間においては PSF をデルタ関数に変換することに相当する。これは周波数空間において MTF がボケ関数なしの値に一致するように各周波数成分を増幅させることに相当する。

ここで、SEM のプローブ電流は非常に小さいため、画像の SNR が低く、SEM 像には無視できないレベルのノイズが付加される[72]-[75]。ノイズのうち最も多いものはホワイトノイズと呼ばれる全周波数成分を含むものである。デコンボリューション実行時にはノイズ成分も増幅されるため、デコンボリューション後の画像にはアーチファクトが発生する。図 3.3 より、輪帯照明 SEM や標準的な SEM の MTF は高周波数側ほど小さく、ボケ関数なしとの差が大きい。すなわち、デコンボリューションにより高周波数側のノイズが強調される。

上述のとおり、デコンボリューションは PSF をデルタ関数に変換することに相当する。本研究で開発した PSF 変換法は、デコンボリューションにおいて PSF を置き換える関数をデルタ関数ではなく、標準的な SEM の PSF のような別の関数に変換する手法である。図 3.3 より、輪帯照明 SEM と標準的な SEM の MTF

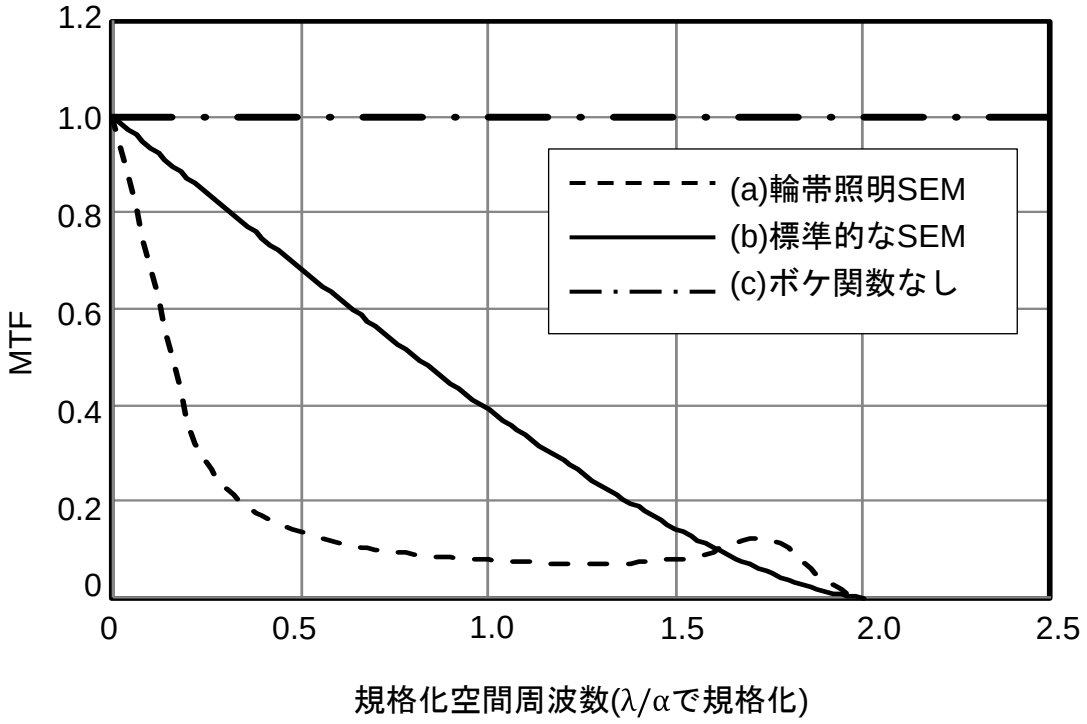


図3.3 SEMの電子線プローブのMTF[70]。
横軸である規格化空間周波数は開き角や加速電圧に依存せず無次元量となるようにλ/αで規格化している。ボケ関数なしはデルタ関数に相当し、デコンボリューションを施すことはMTFがボケ関数なしの値に一致するように各周波数成分を増幅させることに相当する。

は全周波数領域でそれほど大きな差はない。このことから、PSF 変換では上述のデコンボリューションの際に問題となるノイズの増幅の影響を小さく抑えることが可能となる。本手法では変換後の分解能は標準的な SEM と同等レベルであり向上の余地が残るが、本研究では輪帯照明 SEM の焦点深度を維持したまま標準的な SEM と同等レベルまで復元できれば十分であり、完全なボケ関数の除去は過剰であった。

PSF 変換により得られる SEM 像をS_2、PSF 変換先の任意の PSF を$\mathrm{PSF_o}$とするとき、PSF 変換は次式で表すことができる。

$$
\begin{aligned}
S_2(x,y) &= S(x,y) \otimes \mathrm{PSF_o}(x,y) \\
&= \mathrm{FT}^{-1}\left(\mathrm{FT}\big(S(x,y)\big) \times \mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF_o}(x,y)\big)\right) \\
&= \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(I(x,y)\big) \times \mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF_o}(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF}(x,y)\big)}\right) \\
&= I(x,y) \otimes \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF_o}(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF}(x,y)\big)}\right) \\
&= I(x,y) \otimes f(x,y)
\end{aligned}
\tag{3-6}
$$

$f(x,y)$を PSF 変換関数と呼ぶ。PSF 変換関数は PSF 同士のデコンボリューションであり、(3.3)式を用いて以下のように式変形できる。

$$
\begin{aligned}
f(x,y) &= \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF_o}(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(\mathrm{PSF}(x,y)\big)}\right) \\
&= \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(S(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(I(x,y)\big)}\frac{\mathrm{FT}\big(I_\mathrm{o}(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(S(x,y)\big)}\right) \\
&= \mathrm{FT}^{-1}\left(\frac{\mathrm{FT}\big(I_\mathrm{o}(x,y)\big)}{\mathrm{FT}\big(I(x,y)\big)}\right)
\end{aligned}
\tag{3-7}
$$

(3-7)式より、試料が同一である場合にはPSFと$\mathrm{PSF_o}$の 2 条件で取得した SEM 像同士のデコンボリューションは試料像の条件が消去され PSF 同士のデコンボリューションと一致することがわかる。これは、PSF 変換前後の PSF が共に未知であっても、同一視野の SEM 像があれば PSF 変換関数が求められることを意味する。なお、本章の取組では標準的な SEM の PSF を $\mathrm{PSF_o}$とし、変換後の MTF として図 3.3 に示す標準的な SEM 像のものとする。

3.4 PSF 変換シミュレーション

PSF 変換法の有効性を検証するために、(3-1)-(3-6)式を用いて SEM 像の形成シミュレーションを行った。シミュレーションでは、SEM 像のノイズ対コントラスト雑音比(Contrast to Noise Ratio: CNR)を変化させた複数の条件について計算した。ここで、SEM 像が視認できる場合にはそのヒストグラムにはピークとなる階調値が 2 種類以上含まれる。このうち最大と最小のピーク値の差分をコントラストと呼び、CNR はコントラストをノイズの階調値の幅で除算したものである。シミュレーションでは、焦点深度を同時に確認するため、デフォーカス量を変化させた条件についても計算を行った。PSF 変換先のPSF_oには全ての計算条件について標準的な SEM におけるジャストフォーカス条件の PSF を適用した。

シミュレーションの手順は以下の通りである。

(1) 簡単のため、幾何および色収差がない条件を想定し、複数のデフォーカス量における標準的な SEM および輪帯照明 SEM の PSF を作成した。両者の絞りの外径は同一とし、輪帯絞りの遮蔽部の径は開口径の 80 %とした。

(2) シミュレーション用の試料像として、2 つの階調値を持つ画像を 5 種類用意した。これらは図 3.4 に示すようにコントラストが互いに異なる。

(3) (1)で求めた PSF と(2)で用意した試料像をコンボリューションし、$\sigma = 12$ のガウスノイズを加えることで 256×256 画素、8 bit の初期シミュレーション SEM 像を計算した。この結果、図 3.4(a)~(e)の画像の CNR はそれぞれ 5、7、10、12、16 となる。

(4) (3)の初期シミュレーション SEM 像に対し、(1)で予め作成したPSF_oを使用して PSF 変換を適用して PSF 変換像を形成した。

シミュレーションにより得られた各種画像のうち、ジャストフォーカス条件で CNR＝10 のときの結果を図 3.5 に示す。図 3.5(d)のデコンボリューションで処理した SEM 像は、画像処理を行わない場合に比べ、ノイズが大きくなっていることがわかる。これに対し、PSF 変換法ではノイズを増幅させずに画像の分解能が向上できている。そこで、PSF 変換法における CNR の依存性を評価した。図 3.6 は、各画像の設定 CNR に対して画像処理後の値をプロットしたものである。全ての条件で画像処理後の CNR は処理前の値に対して線形の依存性を示し、

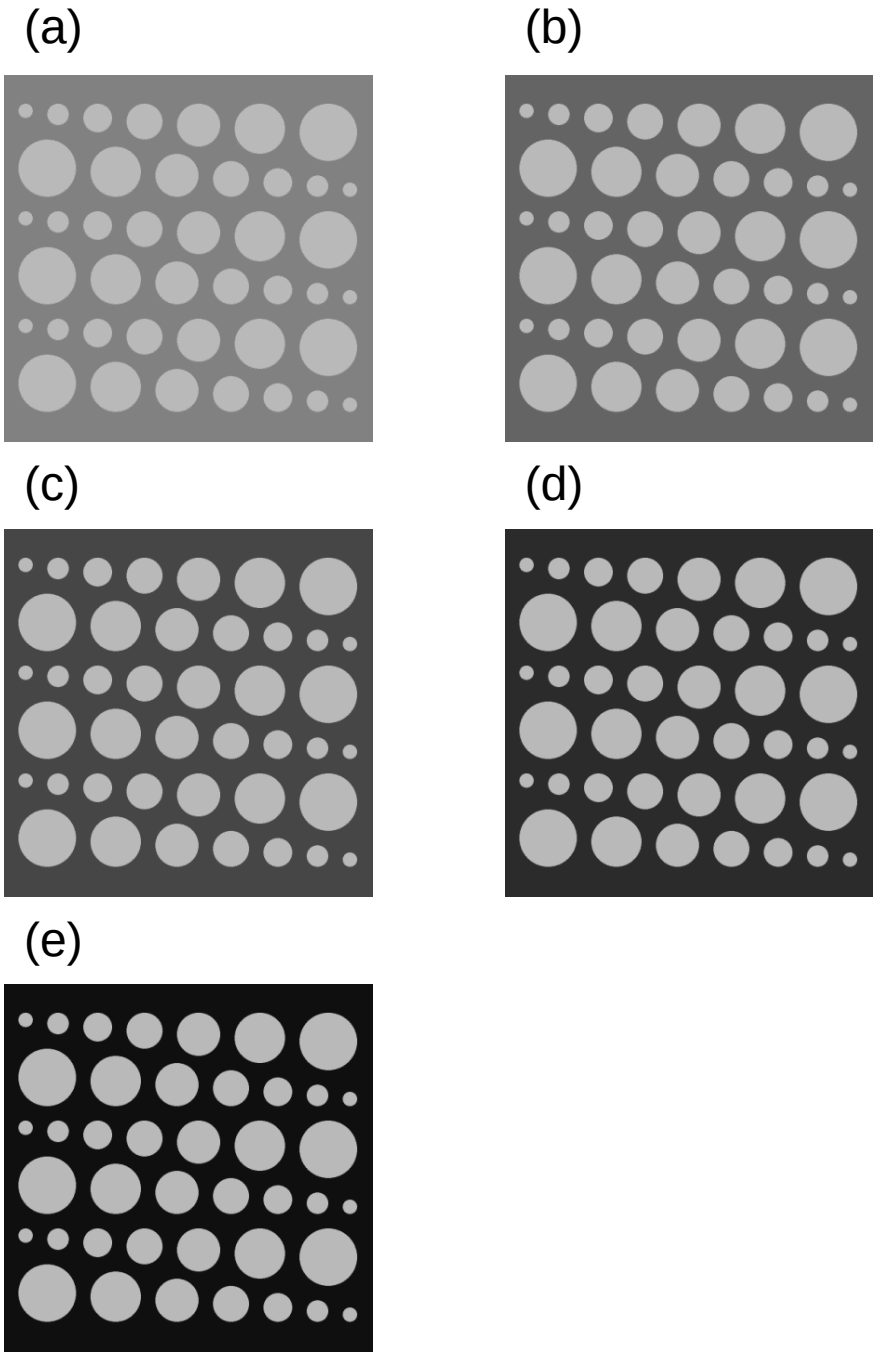


図3.4 シミュレーション用の試料像[70]。
(a)~(e)は2つの階調値を持つ画像であり、その階調値の平均を揃えたものである。シミュレーションによりCNRはそれぞれ5、7、10、12、16に設定される。

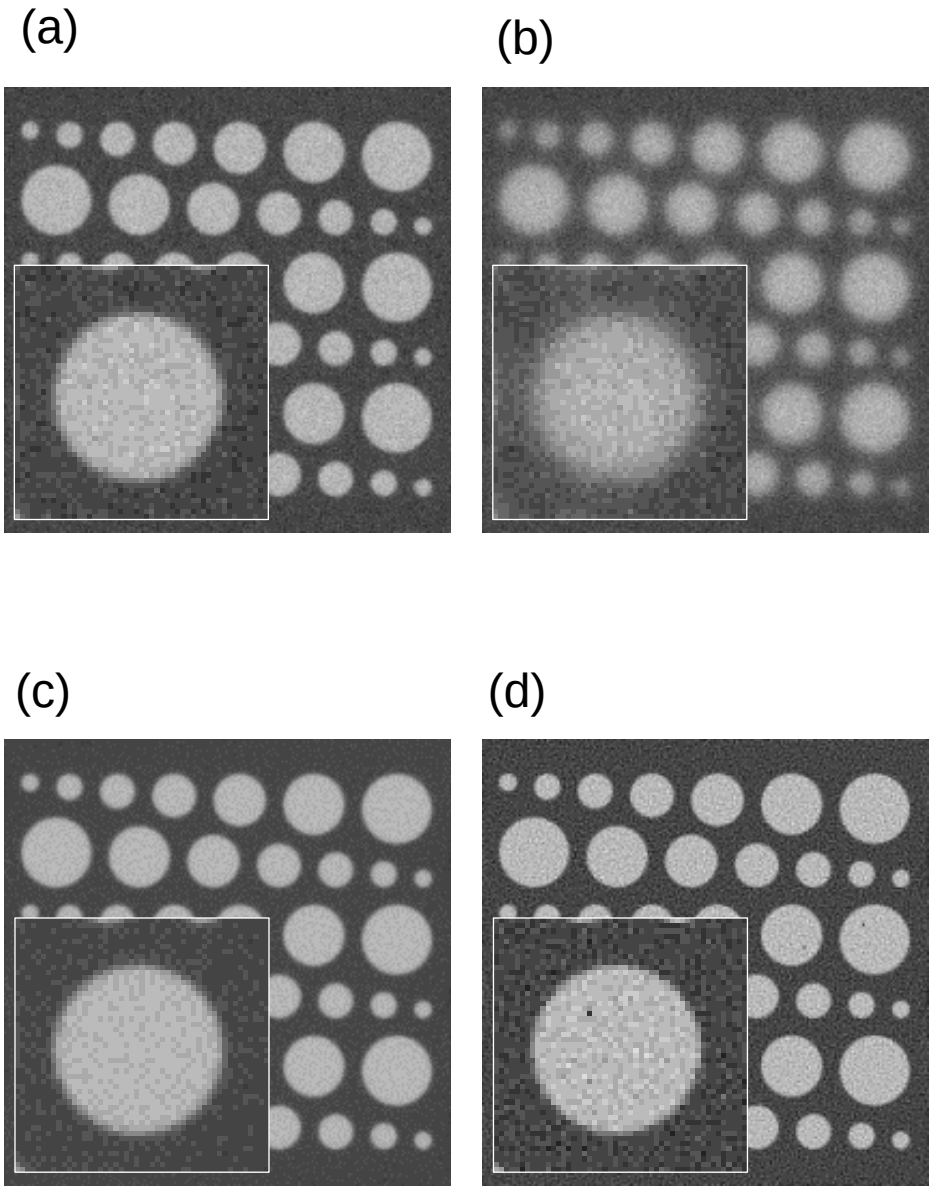


図3.5 シミュレーションSEM像の例[70]。
(a) 標準的なSEM像、(b) 輪帯照明SEM像、(c) 輪帯照明SEM像にPSF変換を適用した結果、(d) 輪帯照明SEM像にデコンボリューションを適用した結果をそれぞれ示す。挿入図はそれぞれの拡大図を示す。

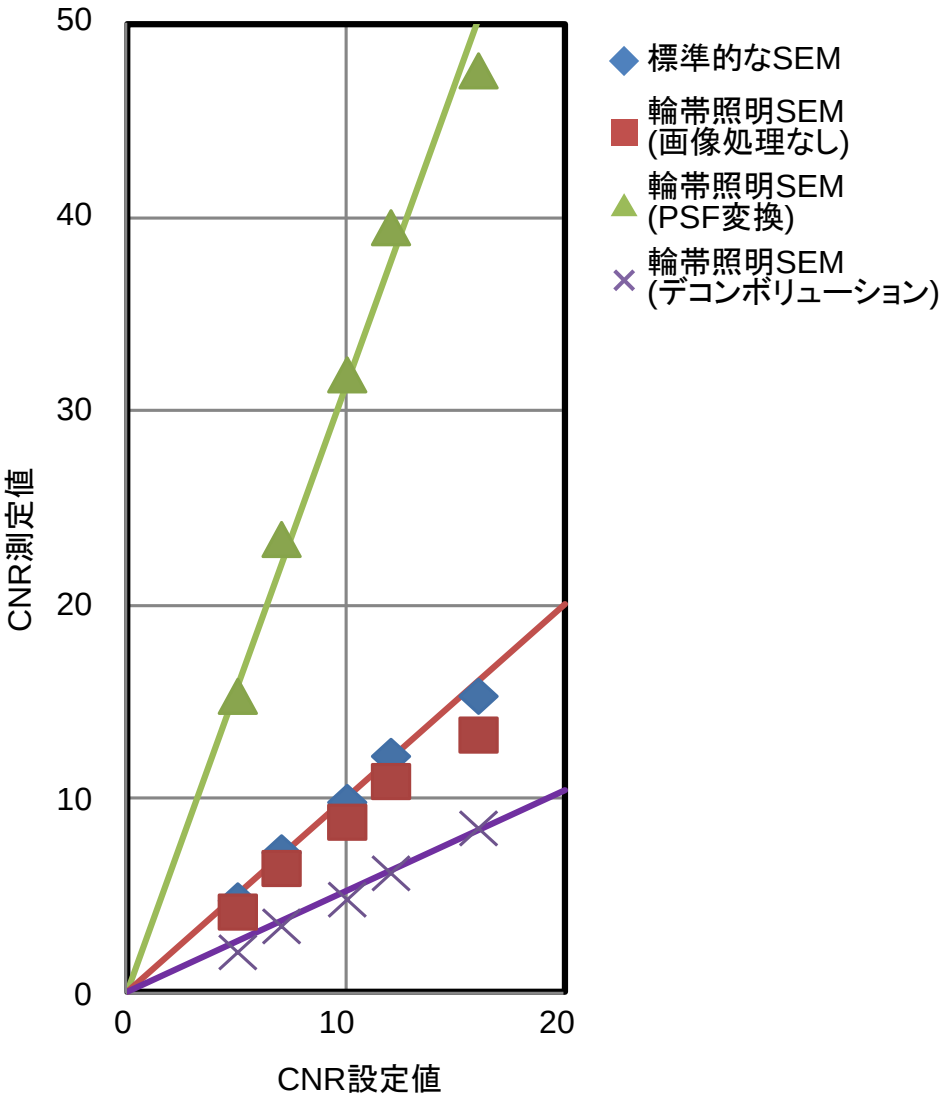


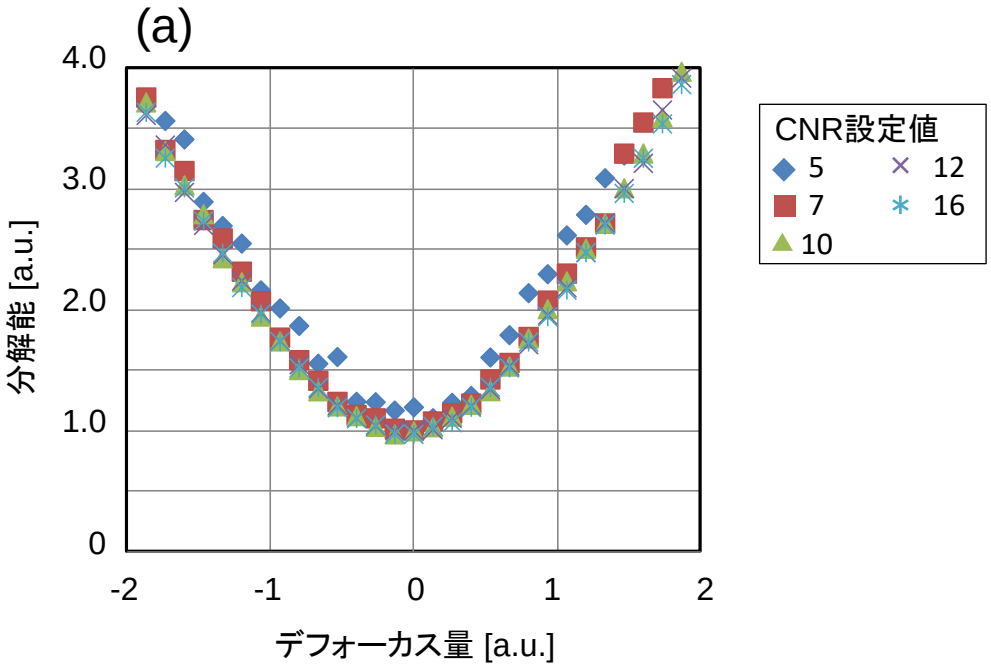
図3.6 設定したCNRに対する計算結果[70]。
画像処理後のCNRは処理前の値に対して線形の依存性を示した。プロットの傾きはデコンボリューションでは画像処理なしの0.5倍に減少したのに対してPSF変換法では3倍に増加した。

プロットの傾きは、デコンボリューションは画像処理なしの 0.5 倍に減少したのに対し、PSF 変換法は 3 倍に増加した。この結果から、PSF 変換法はノイズの増幅を抑えるだけでなく、ノイズの低減にも有効であることがわかる。

PSF 変換法がノイズを低減する理由について考察する。(3-6)式より、PSF 変換後の画像は試料画像のフーリエ変換に標準的な SEM 条件の MTF を乗じたものである。図 3.3 において、標準的な SEM においては規格化空間周波数 2 で 0 に落ちる減少関数であることから、カットオフ周波数 2 のローパスフィルタを機能させることに相当する。これにより、ノイズの高周波成分が除去されて CNR 値が設定値より改善されたものと考えられる。

最後に、焦点深度についての確認のため、標準的な SEM 条件および PSF 変換後のシミュレーションにより得られた各画像の分解能を求めた。分解能は標準的な SEM のジャストフォーカス像の分解能で規格化した。デフォーカス距離は、デフォーカス距離を 1 としたとき、標準照明下での画像分解能が 2 となるように正規化した。画像の分解能の測定は、ボケ関数をガウス分布と仮定してフィッティングする Derivative 法[76][77]を用い、得られた標準偏差σを使用して$\sqrt{2}\sigma$を分解能として測定した。デフォーカス量に対して分解能をプロットした結果を図 3.7 に示す。図より、PSF 変換後の結果はジャストフォーカスにおける分解能が標準的な SEM と同等であることに加え、デフォーカスによる分解能の劣化が大幅に改善したことが確認できる。分解能が 10 %低下するデフォーカス距離を焦点深度とする場合、焦点深度は標準的な SEM と比べて 4 倍に向上する。

本手法は実験によっても確認を行い、著者共著にて報告済である[78]。図 3.8 に段差試料の画像をフォーカス固定で高分解能で取得した結果を示す。



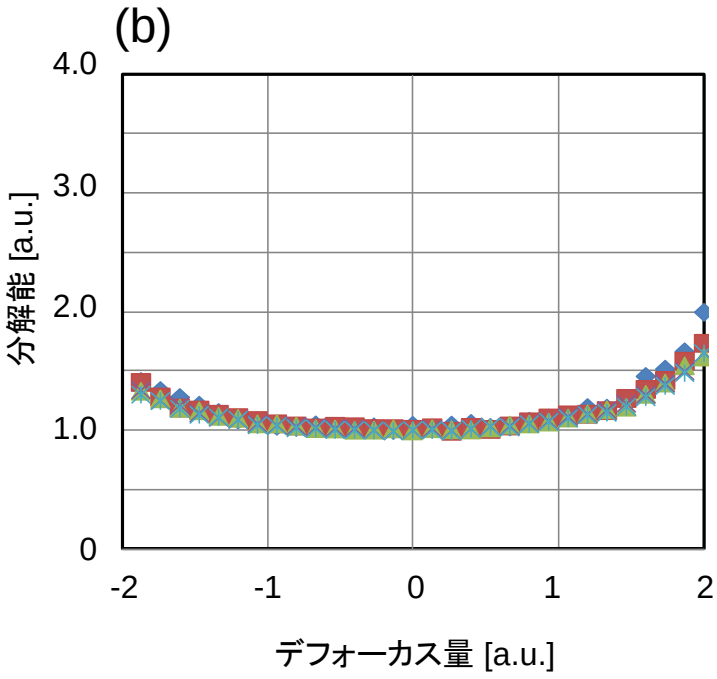


図3.7 シミュレーション像の分解能と焦点距離の関係[70]。(a) 標準的なSEM条件、(b)輪帯照明SEM像にPSF変換を施した条件の結果をそれぞれ示す。輪帯照明SEMの焦点深度は標準的なSEMと比べて4倍に向上する。

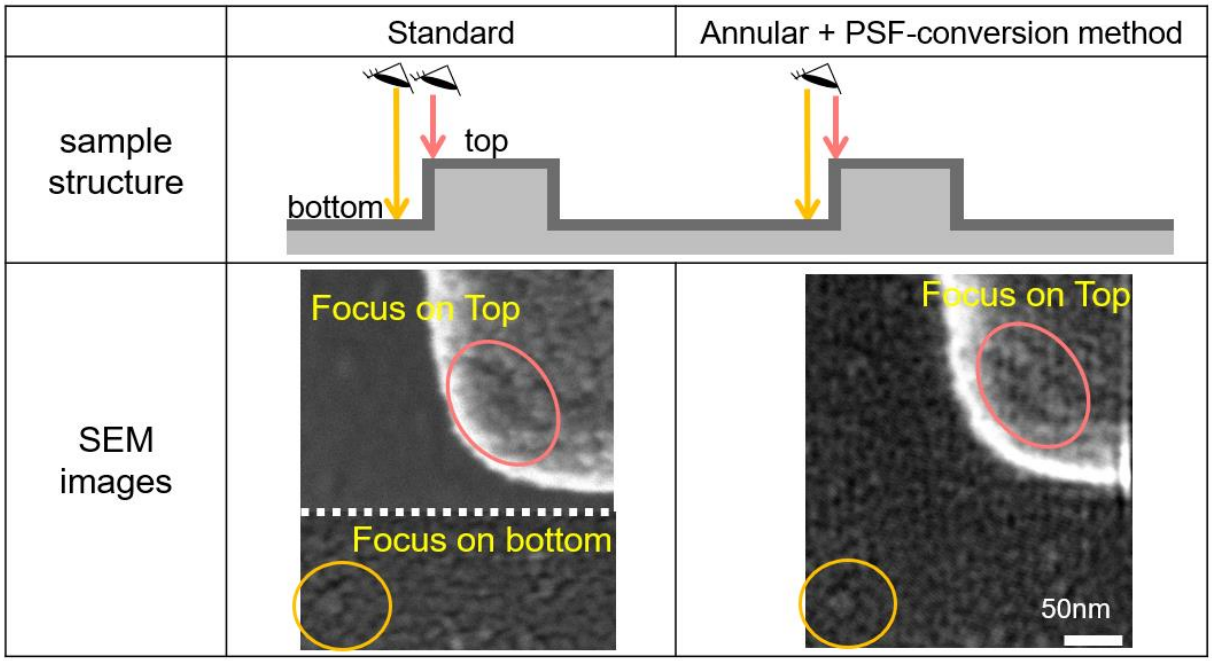


図3.8 段差試料を輪帯照明SEM条件(PSF変換)で観察した結果[78]。通常のSEMにおいてはtop及びbottomにそれぞれフォーカスを合わせないとパターンが視認できないところ、輪帯照明SEMで取得した像にPSF変換を施した結果ではフォーカス固定において、topとbottomを同時に高分解能で視認することができている。

3.5 結　言

輪帯照明 SEM における分解能回復を題材として、取得した SEM 像の PSF を標準的な SEM 像の PSF に変換する PSF 変換法を開発した。本手法は完全なボケ関数の除去ではなく変換後の分解能には向上の余地が残るが、変換先の SEM 像の分解能が用途に対し十分高分解能である場合には問題なく使用できる。また、PSF 変換関数は PSF 同士をデコンボリューションしたもので表され、これは 2 つの PSF の条件で取得された同一視野の SEM 像同士のデコンボリューションと等しい。このことから、PSF が未知であっても SEM 像を元に PSF 変換を実施することが可能である。

PSF 変換法の有効性を検証するために、輪帯照明 SEM の像形成シミュレーションを行った。この結果、PSF 変換によって各画像の分解能は PSF 変換先の標準的な SEM 像分解能まで改善し、また、CNR が改善する結果が得られた。これは､PSF 変換法における MTF の変化がデコンボリューションと比較して小さく、ローパスフィルタとして作用したためであると考えられる。シミュレーションにより、標準的な SEM 像と同様の分解能で焦点深度が 4 倍となることがわかった。なお、本手法は実験でも確認済である。

ここで、照明電子光学系における電子線マルチプローブ間の分解能の変動を解決するために本章で開発した PSF 変換法の適用を検討する。電子線マルチプローブ SEM の分解能は中心電子線プローブによるものほど高く、外側の電子線プローブほど劣化する。そこで、電子線マルチプローブ SEM の外側の電子線プローブを中心電子線プローブの PSF に変換することで、課題である分解能の変動を解決できると考えられる。本項目については第 5 章にて考察する。

第4章 信号電子光学系における
信号電子群分離度向上に関する検討

4.1 緒　言

電子線マルチプローブ SEM では信号電子の軌道を分離した先にレンズなどの電子光学要素を配置するため、偏向角度を 45 度の大角度偏向とする。このとき、ExB 偏向器内の電磁場や電子の走行距離が ExB 偏向器内の通過位置に依存するため、各信号電子群の拡がりは増大し、これが信号間のクロストークの原因となる。第 2 章の図 2.7 にて示したように、検出器面上の 4 つの信号電子群は長方形状に歪んだ配列となり、さらに、全電子線プローブ共通で右下から左上の方向に尾引きが見られる。これは信号電子光学系にのみ見られる非対称な収差によるものであるため、ExB 偏向器による影響であると考えられる。

本章ではこの課題を解決する新たな ExB 偏向器光学系を提案し、その効果について議論する。

4.2 低収差 ExB 偏向器光学系の提案

図 4.1 に提案する ExB 偏向器光学系の概略構成を示す。図では ExB 偏向器光学系以外の対物レンズなどの光学系素子は省略している。TTL 検出方式と電子線プローブに対する減速電場の適用を仮定するため、光学系全体には試料に対し正のバイアス電圧が印加される。本論文ではバイアス電圧を 500 V と設定する。この結果、試料と光学系では電子のエネルギーに 500 eV の差が発生する。電子線プローブのエネルギーは、例えば、光学系で 1500 eV、試料で 1000 eV となる。信号電子についても同様であり、試料放出直後は 10 eV 以下のエネルギーであったものが 500 eV まで加速されて光学系中を進行する。ExB 偏向器による偏向角度は、ExB 偏向器後段に配置する電子光学要素の実装を簡単とするために 45 度の大角度とする。1 段目の ExB 偏向器で発生する収差を 2 段目で相殺するために ExB 偏向器を 2 段とし、また、2 段の ExB 偏向器間に軌道を制御する

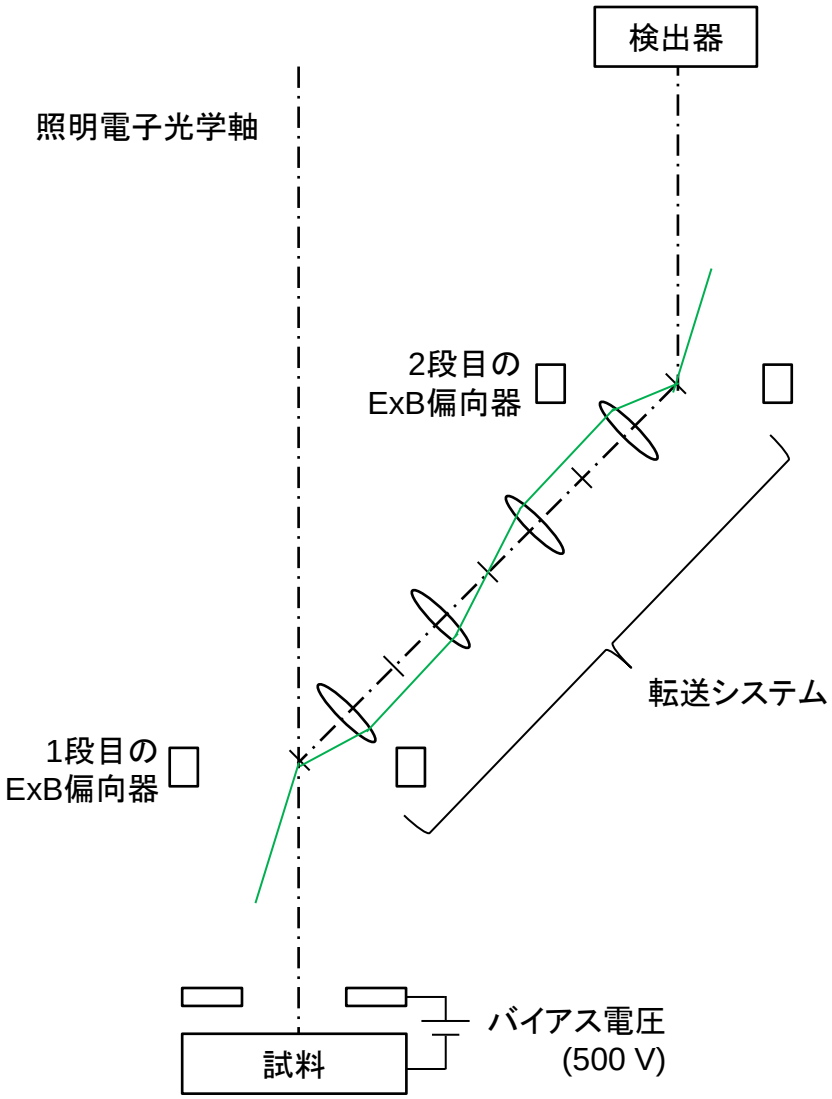


図4.1 提案するExB偏向器光学系[79]。
光学系全体には試料に対し正のバイアス電圧(500V)が印加され、試料放出直後に10 eV以下のエネルギーであった信号電子が500 eVまで加速されて光学系中を進行する。1段目のExB偏向器で発生する収差を2段目で相殺するためにExB偏向器を2段とし、また、2段のExB偏向器間に軌道を制御するための4つのレンズで構成される転送システムを配置する。緑色で示す線は信号電子の一例である。

ための 4 つのレンズで構成される転送システムを配置する。図中の緑色で示す線は信号電子の一例である。なお、本図では ExB 偏向器の位置で軌道が折り曲がるように示したが、実際には滑らかに偏向作用を受ける。ExB 偏向器内で信号電子線が偏向される様子を図 4.2 に示す。電場と磁場はそれぞれ-x 方向と+y 方向に発生し、信号電子は ExB 偏向器に向かって+z 方向に移動する。図中に示される面はそれぞれ(a) xz 面(y = 0)、(b) yz 面(x = 0)である。静電ポテンシャルは x 方向に反対称で y 方向に対称であり、磁気スカラーポテンシャルは x 方向に対称、y 方向に反対称であるため、図 4.2(a)および(b)に示す面においては、磁気スカラーポテンシャル、静電ポテンシャルはそれぞれ 0 となる。図 4.2(a)では磁場は紙面垂直方向に発生し、電場および磁場が電子線に作用する力は紙面内の方向にのみ発生する。信号電子は逐次的に偏向されて偏向器内での位置が変化し、それに伴い作用する場が変化していく。これは信号電子の通過位置が偏向方向を基準としてどの程度内側、あるいは外側を通過するかに依存し、この内外の軌道の違いが収差の要因となる。このため、提案する構成では、1 段目の ExB 偏向器で内/外側を通過した信号電子が 2 段目では外/内側をそれぞれ通過するように軌道を途中で反転させる。これにより、1 段目で発生した収差を 2 段目で打ち消すことが可能となる。2 段目の ExB 偏向器による偏向方向を 1 段目と逆向きにとる。2 段通過させることによって ExB 偏向器 1 段あたりの偏向角度がキャンセルされ、最終的な光軸は照明電子光学系の光軸と平行となる。

次に、2 段の ExB 偏向器間に配置する転送システムについて説明する。ExB 偏向器はエネルギーアナライザやモノクロメータの用途で使われる[41]ことから示唆されるように偏向色収差が大きいため、本研究では偏向色収差の相殺を主たるターゲットとした。なお、本論文においては、エネルギーが異なる電子が像面に到達する際に理想条件からずれる、そのずれ量を偏向色収差として定義する。図 4.3 は ExB 偏向器 2 段による偏向色収差の相殺を説明する図である。簡単のため ExB 偏向器内の電場および磁場が偏向区間内で均一であると仮定し、また、光軸上を進行する電子について議論する。ExB 偏向器の偏向角度θは静電偏向および電磁偏向により与えられた偏向角度の和で表現される。静電偏向、電

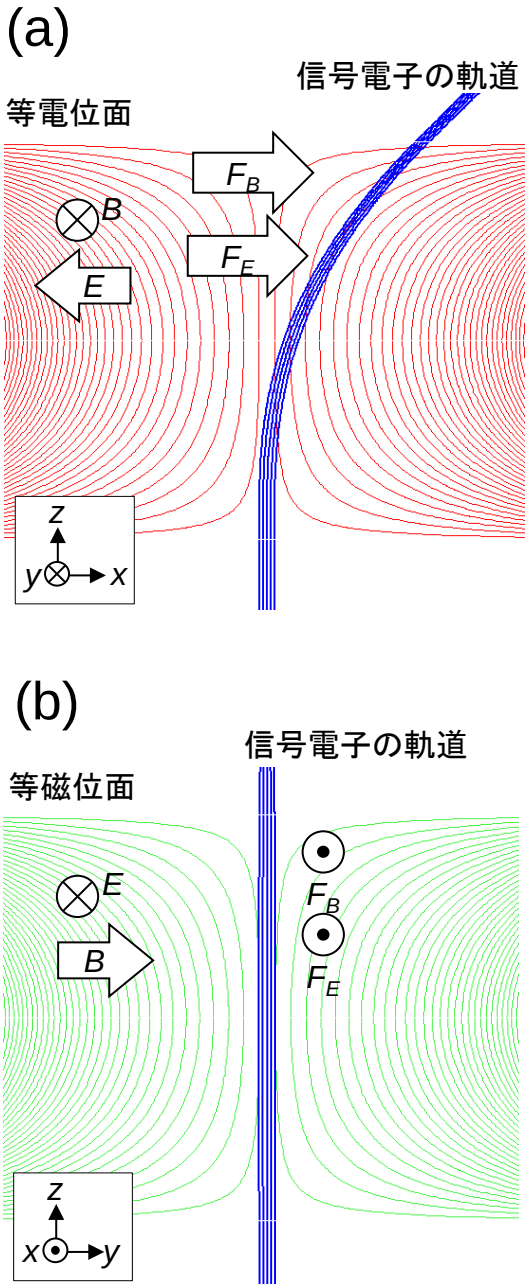


図4.2 1段目のExB偏向器内を通過する信号電子の例[79]。
電場と磁場はそれぞれ-*x*方向と+*y*方向に発生し、信号電子はExB偏向器に向かって+*z*方向に移動する。(a)xz 面 (y = 0) と (b) yz 面 (x = 0) における等電位面及び等磁位面の分布をそれぞれ示した。静電ポテンシャルは*x*方向に反対称で*y*方向に対称であり、磁気スカラーポテンシャルは*x*方向に対称、*y*方向に反対称である。

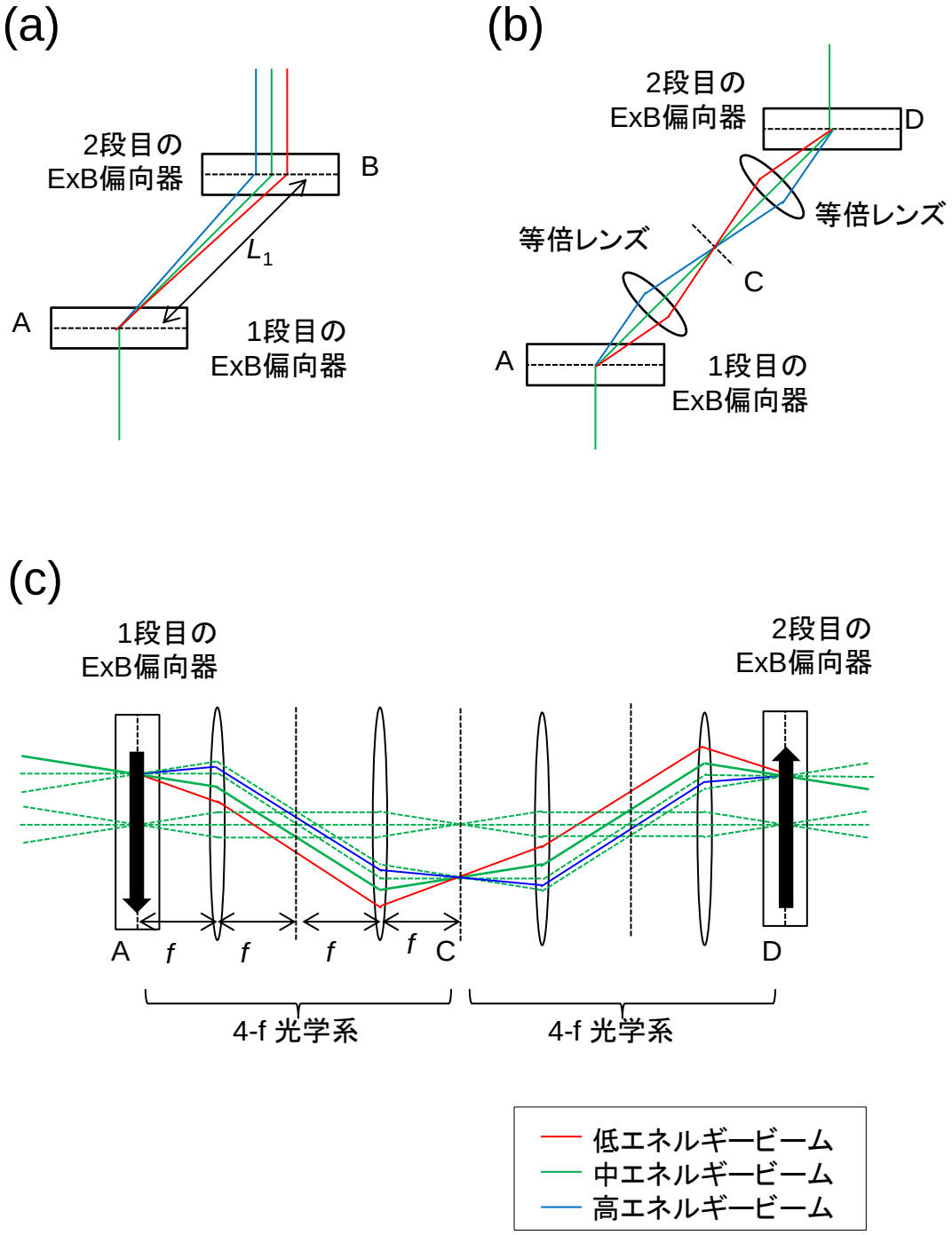


図4.3 ExB偏向器2段による偏向色収差の相殺の説明図[79]。
(a)転送システムなしの場合、(b)転送システムが2つの等倍レンズで構成されている場合、(c)転送システムが2つの4-f光学系で構成されている場合をそれぞれ示す。面A, B, C, D はそれぞれ、偏向色収差の開始面、A からドリフト間隔L_1だけ離れた面、第1像面、第2像面である。

磁偏向による偏向角度は電子のエネルギーに対してそれぞれ-1 乗、および-1/2 乗に比例する[48]。照明電子に対して Wien 条件が成立することから ExB 偏向器による偏向角度θは次式で表される。

$$\theta = k\left(\frac{1}{\Phi_{\mathrm{s}}} + \frac{1}{\sqrt{\Phi_{\mathrm{s}}\Phi_{\mathrm{i}}}}\right) \tag{4-1}$$

kは ExB 偏向器の強度によって決まる定数、Φ_{s}およびΦ_{i}は ExB 偏向器に入射する信号電子および照明電子のエネルギーである。(4-1)式より信号電子のエネルギーの変化量$\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{s}}$に関する偏向角度の変化量$\mathrm{d}\theta$は次式となる。

$$\mathrm{d}\theta = -k\left(\frac{1}{{\Phi_{\mathrm{s}}}^2} + \frac{1}{2\sqrt{\Phi_{\mathrm{i}}}{\Phi_{\mathrm{s}}}^{\frac{3}{2}}}\right)\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{s}} \tag{4-2}$$

(4-2)式より、エネルギーが高いほど ExB 偏向器による偏向角度は小さくなり、図 4.3 の地点 A を支点としてエネルギーの異なる軌道が分散する。なお、図 4.3 においては図 4.1 と同様に光軸方向の ExB 偏向器の場が分布することを省略し、軌道が一点で折れ曲がって偏向されるように図示したが、実際には図 4.2 のように、ExB 偏向器の場は光軸方向に分布しているため、電子は滑らかに偏向作用を受ける。ExB 偏向器内でエネルギーが異なる電子の軌道が分散する様子の一例を図 4.4 に示す。各エネルギーの信号電子は電磁場が存在する領域で逐次的に偏向されて偏向器内での位置が変化し、ExB 偏向器の出口において最終的な位置と角度となり、それ以降は等速直線運動を行う。各直線を ExB 偏向器側にトレースバックするとある一点に集束し、あたかもこの位置から各電子が出射したかのように見える。この位置を仮想偏向色収差発生位置と定義する。図 4.3 においては地点 A が仮想偏向色収差発生位置である。ここで、図 4.3(a)に示すように ExB 偏向器を単純に 2 段並べた場合、距離L_1のドリフト区間を経て、2 段目の偏向器により 1 段目と逆方向に偏向作用が与えられる。このとき、最終的な信号電子の角度の差および位置の差は地点 B 通過後の値となる。すなわち、偏向色収差は次式で表現される。

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\theta_{\mathrm{B}} &= \mathrm{d}\theta - \mathrm{d}\theta = 0 \\ \mathrm{d}x_{\mathrm{B}} &= L_1\,\mathrm{d}\theta \end{aligned} \tag{4-3}$$

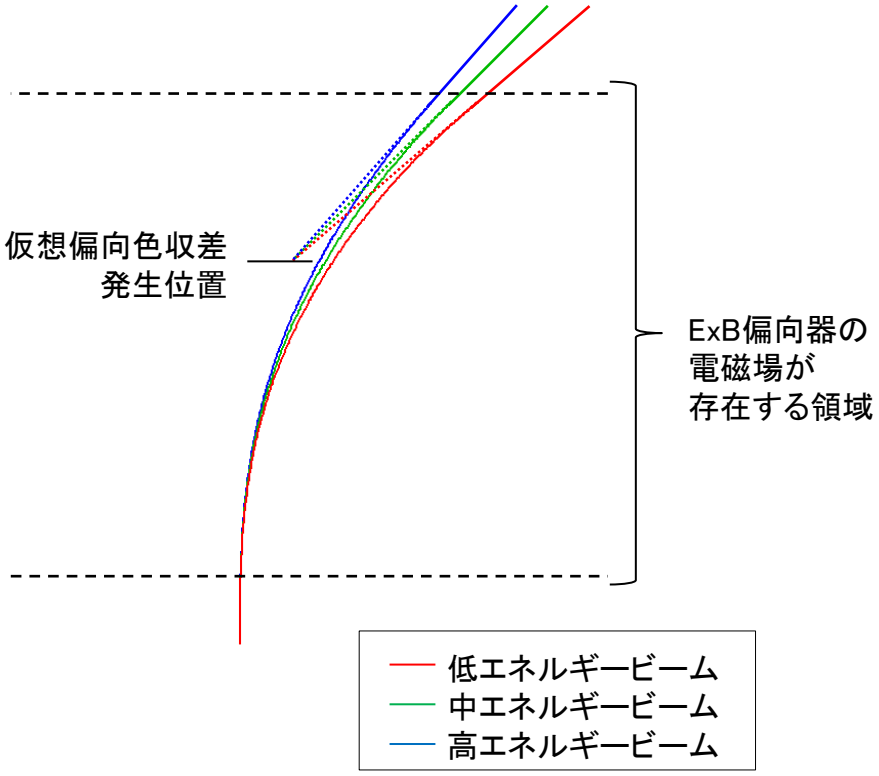


図4.4 仮想偏向色収差発生位置の説明図。
ExB偏向器内でエネルギーが異なる電子の軌道が分散する様子の一例を示す。各エネルギーの信号電子は電磁場が存在する領域で逐次的に偏向されて最終的な位置と角度となり、それ以降は等速直線運動を行う。各直線をExB偏向器側にトレースバックするとある一点に集束し、あたかもこの位置から各電子が出射したかのように見える。この位置を仮想偏向色収差発生位置と定義する。

下付き文字はその角度および位置となった地点を示す。(4-3)式のとおり、この構成では角度のみが相殺され偏向色収差は残存する。そこで、この偏向色収差を相殺するために等倍投影の光学系を 2 段接続する。図 4.3(b)はこの説明のため 2 段のレンズを配置している。1 段のレンズによる倍率および角度倍率は共に-1 となることから、1 つ目の像面である地点 C においては次式が成立する。

$$\mathrm{d}\theta_{\mathrm{C}} = -\mathrm{d}\theta$$
$$\mathrm{d}x_{\mathrm{C}} = 0 \tag{4-4}$$

この位置に ExB 偏向器を入れた場合、位置のずれに関する影響は抑制できるが、角度に関しては、2 段目の ExB 偏向器による偏向角$-\mathrm{d}\theta$分が(4-4)式に加算されるため相殺されない。これに対し、レンズを 2 段とし、2 つめの像面である地点 D においては、地点 A からの倍率および角度倍率が共に 1 倍となり、次式に示すように角度と位置の両方が相殺される。

$$\mathrm{d}\theta_{\mathrm{D}} = \mathrm{d}\theta - \mathrm{d}\theta = 0$$
$$\mathrm{d}x_{\mathrm{D}} = 0 \tag{4-5}$$

図 4.3(b)の考え方を軸外軌道に拡張するため、4-f 光学系[80]を適用したものが図 4.3(c)である。簡単のため ExB 偏向器による偏向による軌道の曲げは省略し、各 ExB 偏向器における偏向方向は矢印にて示した。4-f 光学系は同一の 2 枚のレンズを焦点距離の 2 倍だけ離して配置し、物面を前段レンズの前焦点面にとることで軸上軌道の対称性と軸外軌道の反対称性を形成する。さらに、4-f 光学系を 2 段組み合わせることで、軸上軌道と軸外軌道の両方に反対称性を導入し、倍率および角度倍率を共に 1 倍とする。これにより、より多くの収差を打ち消すことができる。

4.3 軌道追跡計算の方法

提案した ExB 偏向器光学系の効果を確認するため、電子線の軌道を計算して全系通過後の最終像面における拡がりを求めた。シミュレーション方法の概念図を図 4.5 に示す。

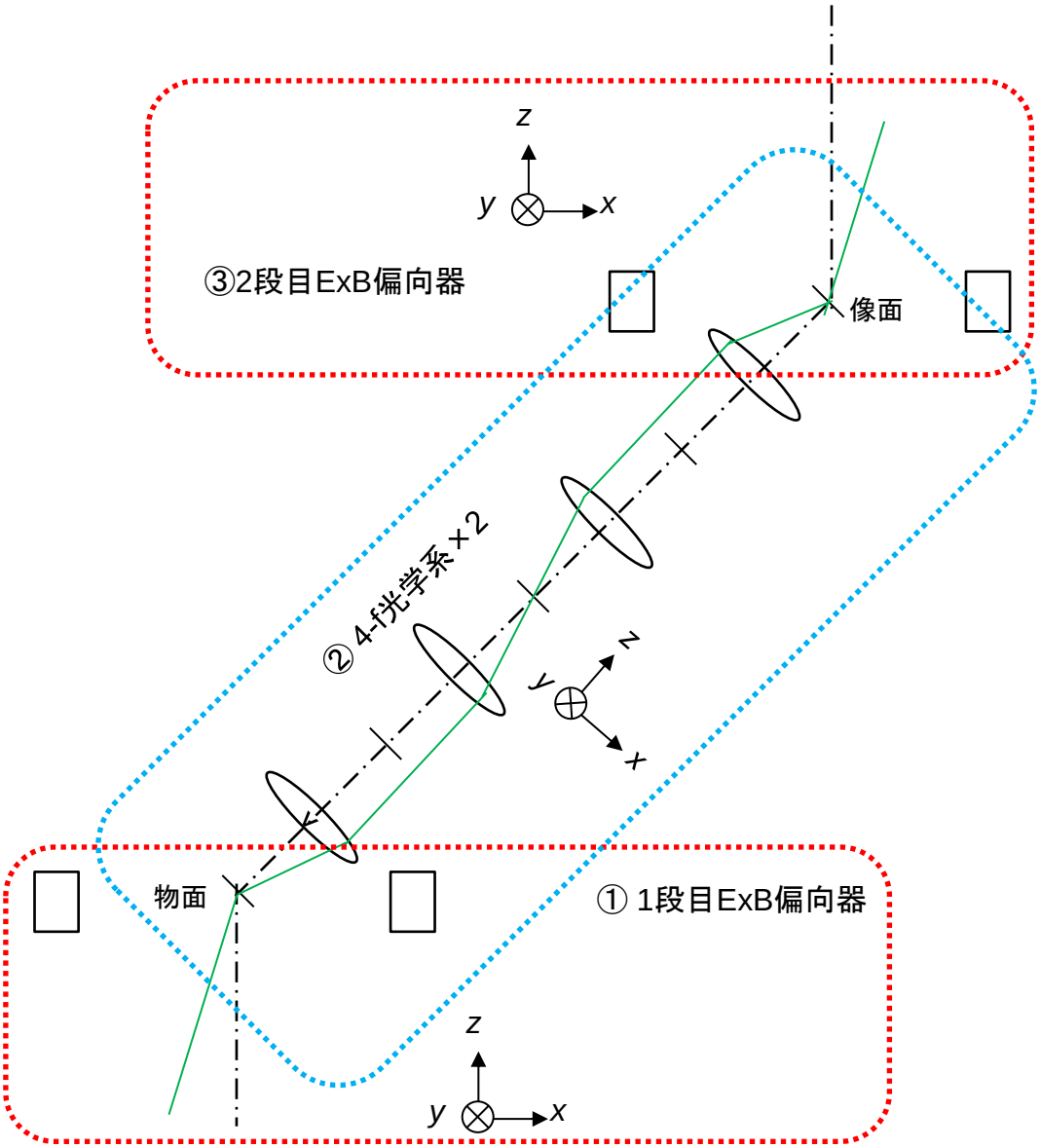


図4.5 ExB偏向器光学系のシミュレーションの説明図。
計算は図中点線で囲われた①~③の三段階に分けて行った。
座標系は*xyz*を右手系で取り、+zを光軸、+xを大角度偏向の方向と定め、計算全体の初期条件で光軸を進行し、かつ、エネルギーが中央値であるものの軌道を光軸とみなした。

計算は、

①1 段目の ExB 偏向器

②4-f 光学系 2 段(転送システム)

③2 段目の ExB 偏向器

の 3 つに分けて実施した。座標系は *xyz* を右手系で取り、+*z* を光軸、+*x* を大角度偏向の方向と定義した。ExB 偏向器では偏向に伴って電子の軌道が光軸から大きく離れていくため、計算全体の初期条件において光軸上を進行し、かつ、エネルギーが中央値であるものの軌道の進行方向を光軸、すなわち *z* 軸とみなした。ただし、計算の過程において曲線光軸をとることが難しいため、①~③の各段における座標系は図 4.5 に記載した各条件で固定とし、次段に移行する際に *y* 軸を固定して *xz* 平面を回転させる座標変換を施した。

上記のうち、①および③の ExB 偏向器は Munro's Electron Beam Software Ltd. 製のソフトウェアパッケージである THE 3D FAMILY を使用した。本ソフトウェアは、有限差分法を使用して 3 次元の電磁場を求め、荷電粒子の軌道を計算するものである。計算①および③に使用した ExB 偏向器の電磁場分布を図 4.6 に示す。図 4.6(c)はエネルギー500 eV の電子線プローブについて Wien 条件を満たす場合の光軸上の *x* 方向の偏向電場および *y* 方向の偏向磁場分布である。

また、②の 4-f 光学系 2 段に関しては、光学系を構成する 4 枚のレンズが理想的な薄肉レンズであるとして、近軸軌道の行列表示[48]により計算した。焦点距離 *f* の薄肉レンズを通過させる場合の行列は次の形となる。

$$\begin{pmatrix} x_{\mathrm{o}} \\ x'_{\mathrm{o}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\mathrm{i}} \\ x'_{\mathrm{i}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_{\mathrm{o}} \\ y'_{\mathrm{o}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{\mathrm{i}} \\ y'_{\mathrm{i}} \end{pmatrix} \tag{4-6}$$

x', *y'*は *x* および *y* の *z* に関する 1 次微分を示す。下付き文字 i および o は薄肉レンズへの input および output を意味する。(4-6)式では *x*, *y* に関する *f* を正の共通の値としたが、片方を同一絶対値の負値とすることで理想的な薄肉 4 極子の計算式となる。

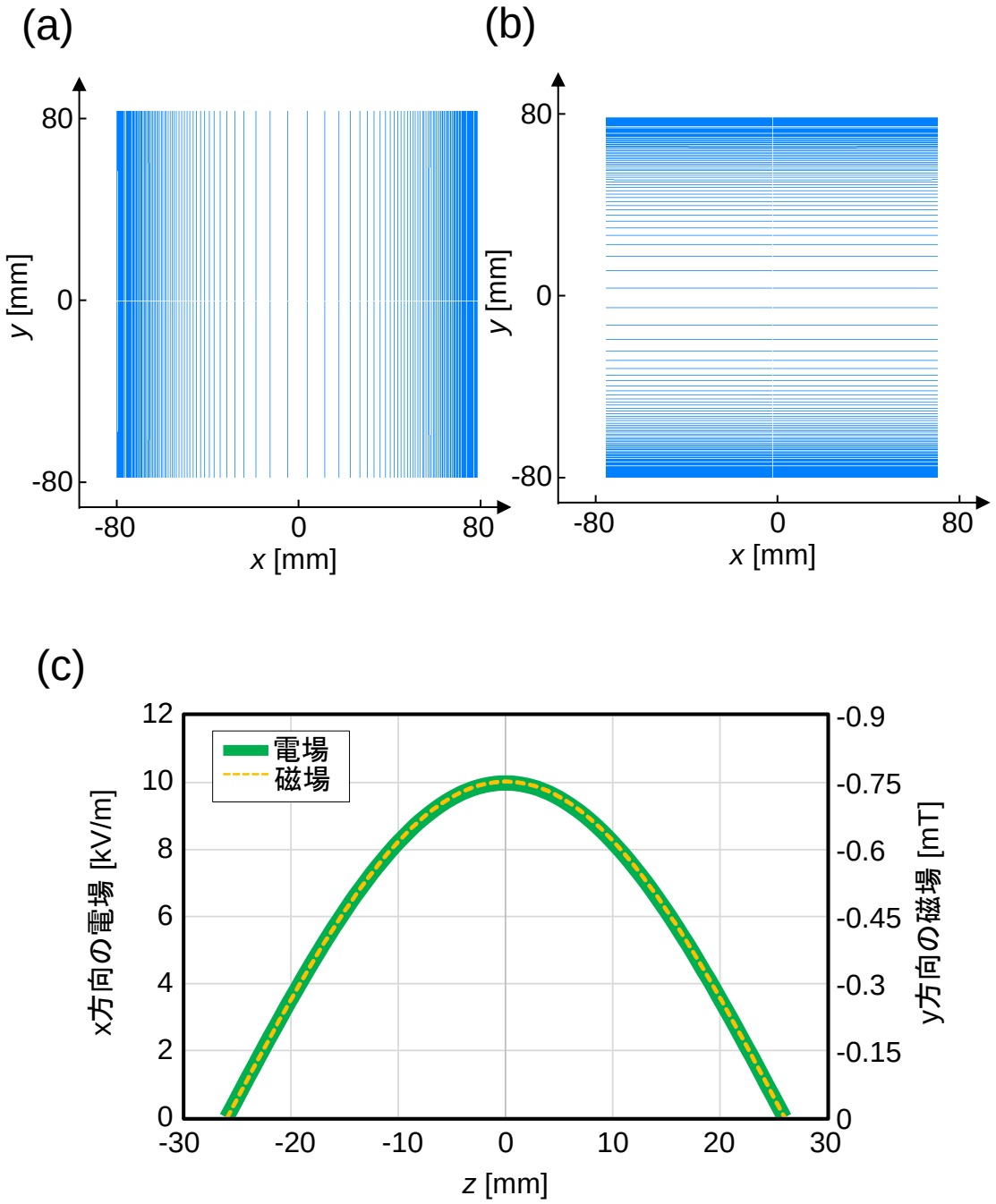


図4.6 シミュレーションに使用したExB偏向器内の電磁場分布[79]。ExB偏向器のz方向中間位置における(a) 静電等電位線と(b) 磁気スカラー等電位線、および、(c) 500 eVの電子線プローブがWien条件を満たす場合の軸上電場、磁場分布をそれぞれ示す。

次に、①~③の各段から次段への計算の移行方法について説明する。図 4.7 は①から②への移行方法を示す説明図である。①~③の各段における軌道計算の終了条件は、電子線の軌道が電磁場が存在する範囲の外側に脱出することとした。電磁場が存在しない領域においては電子は等速直線運動を行うため、計算によって求められた電子は、軌道の最終点よりも手前側であれば直線上の任意の点から出射したものとみなすことが可能である。そこで、軌道計算の最終点の条件をもとに、次段より十分手前側の z 位置まで軌道をトレースバックし、更に座標変換を施すことで次段の初期条件を決定した。②から③への移行方法も同様である。具体的には、軌道計算の最終点から 100 mm の距離をトレースバックさせることとした。なお、本計算においては、③の 2 段目の ExB 偏向器の途中で像面を形成し ExB 偏向器内の軌道計算の後段は発散するため、軌道計算結果の最終条件をトレースバックし、クロスオーバを形成する位置を仮想像面として求めることととした。

以上のシミュレーションフローを図 4.8 にまとめる。

4.4 詳細な計算条件の検討

軌道追跡計算の初期条件を表 4.1 に示す。軸上と軸外の両方の影響を検討するため、光軸に対し平行な軌道を 5×5 の格子状に配列し、それらを中心に各方位に角度を持たせる条件とした。また、これらの全軌道について中心のエネルギーを 500 eV とし、そこにエネルギー幅±0.5 eV を加えた。

表4.1 軌道追跡計算の初期条件

項目		値
位置 [μm]	x	0, ±25, ±50
	y	0, ±25, ±50
光軸に対する角度 [mrad]		0, 0.5, 1
方位角 [deg]		0 ~ 330 (ピッチ30)
加速エネルギー [eV]		499.5, 500, 500.5

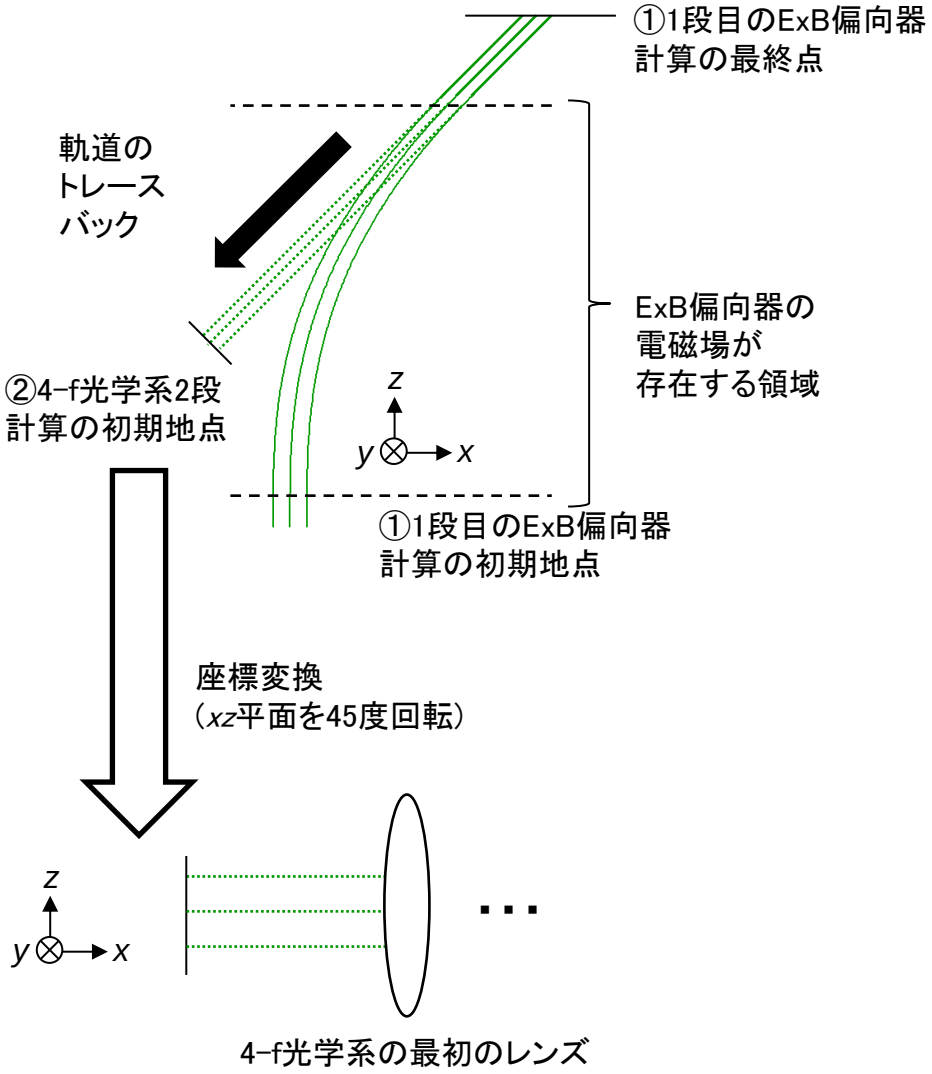


図4.7　①1段目のExB偏向器光学系から②4-f光学系への計算の移行方法に関する説明図。
格段の軌道計算は電磁場が存在する範囲の外側に脱出する地点まで行った。電磁場が存在しない領域においては電子は等速直線運動を行うため、電子線軌道の最終条件をもとに、次段より十分手前側のz位置まで軌道をトレースバックし、更に座標変換を施すことで次段の初期条件を決定した。

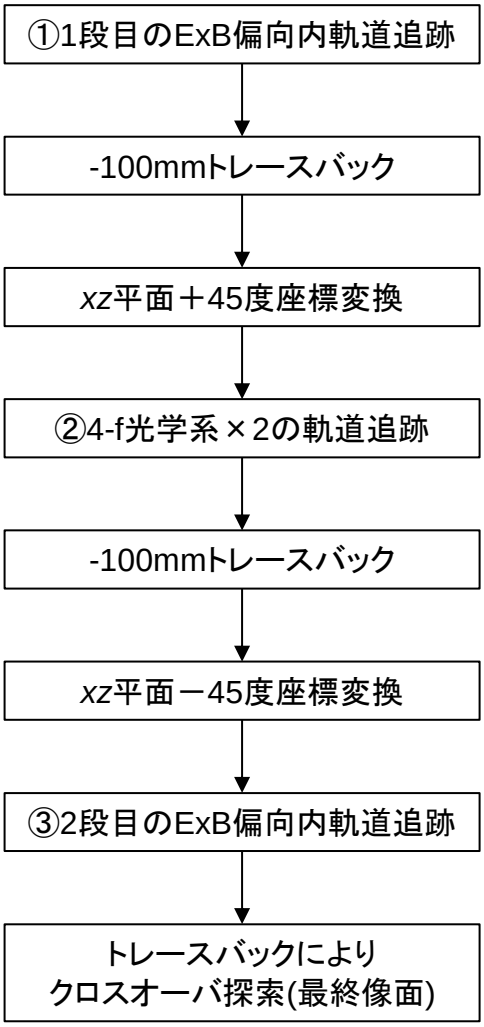


図4.8 シミュレーションフロー

ここで、角度を持つ電子線のクロスオーバ位置は、図 4.5 に示すように ExB 偏向器光学系の物面であり、1 段目の ExB 偏向器による仮想偏向色収差発生位置、すなわち図 4.3 における地点 A とする。まず、この仮想偏向色収差発生位置を求めるために表 4.1 の初期条件から開き角を持たない 5×5 の平行な電子線の ExB 偏向器内の軌道追跡計算を行い、z 位置をトレースバックして *xy* 断面を取得した。代表的な 3 点の結果を図 4.9 に示す。図 4.9 より、(b)の *z* 位置では面内のいずれの位置においても偏向色収差が消失し、ここを境界としてより小さい *z* 位置の(a)、および、より大きい *z* 位置の(c)においては、高エネルギー電子と低エネルギー電子の位置が入れ替わることが確認できる。これは、離軸距離によらず(b)に示す *z* 位置が仮想偏向色収差発生位置となることを示す。したがって、この面をシミュレーションの物面として適用することとした。

次に、上記の位置に物面、すなわちクロスオーバ面を形成するように光軸上の電子線の軌道追跡を行った結果を図 4.10 に示す。図には、計算後のクロスオーバ面に対し(a) アンダー、(b) ジャスト、および(c) オーバーフォーカス条件における拡がりを示した。アンダーフォーカスで *y*、オーバーフォーカスで *x* 方向にラインフォーカスを形成したことから、ジャストフォーカスにおける拡がりの主要因は非点であることがわかる。そこで、図 4.7 に示した 4-f 光学系の最初のレンズの代わりに理想的な薄肉 4 極子レンズを作用させて非点補正を行った。その結果を図 4.10(d)に示す。図 4.10(b)と(d)を比較すると、拡がりは小さくなったが、偏向色収差が現れた。これは、ExB 偏向器 1 段のみを通過させた状態においてはエネルギーごとに偏向角が異なった状態であり、4 極子レンズ位置に突入する際の角度の差による非点と色収差の複合収差が発生したためと考えられる。このことから、非点補正位置は 2 段の ExB 偏向器を通過させ、偏向色収差を角度、位置共にキャンセルした後に行うのが適切であると考えられる。

4.5 ExB 偏向器光学系の計算結果

以上の検討をもとに、表 4.1 の全条件の軌道を計算し、ExB 偏向器光学系の仮想像面における拡がりを求めた結果を図 4.11 に示す。図 4.11(a)は ExB 偏向器 1

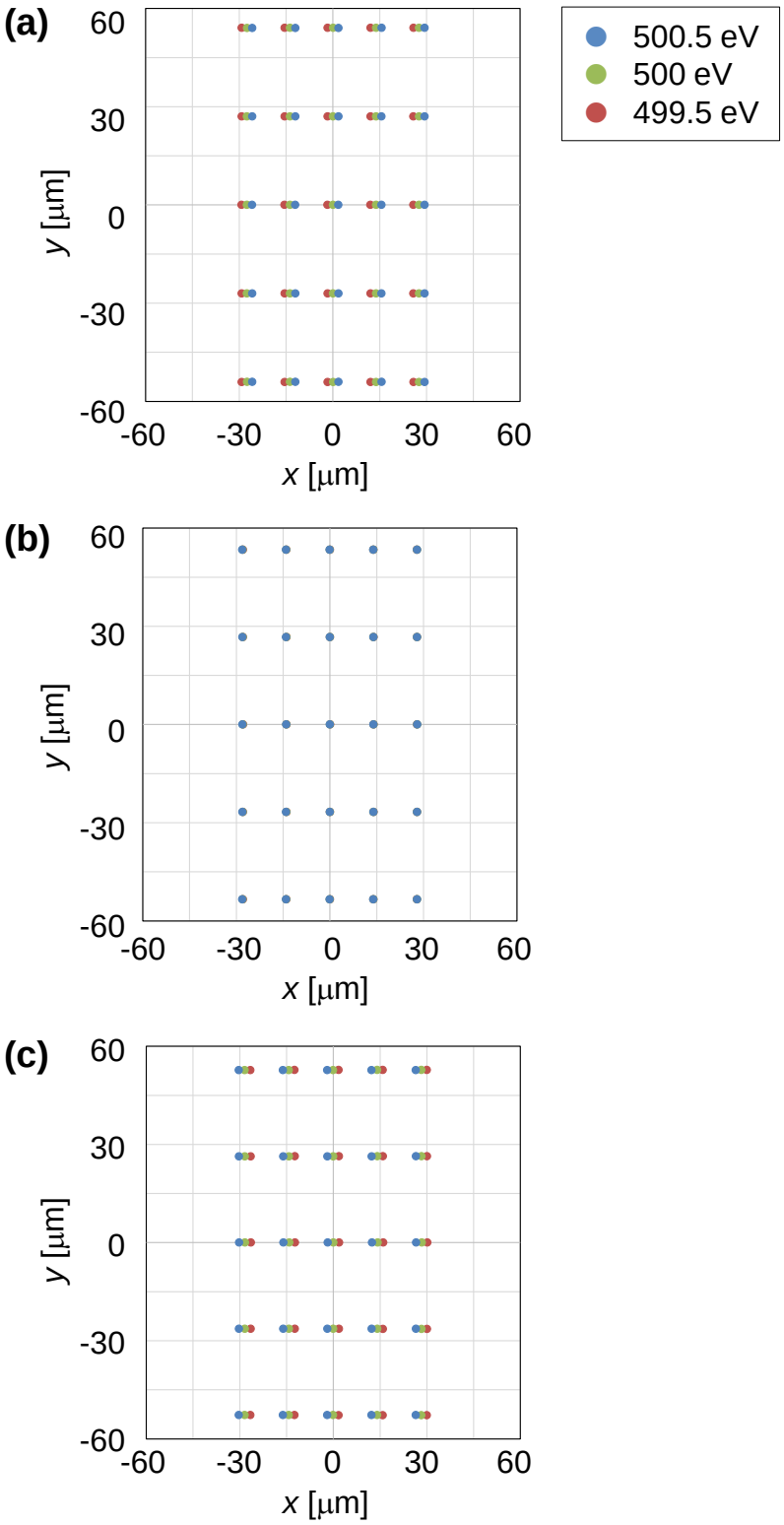


図4.9 5×5平行ビームExB偏向器内軌道追跡計算結果(*xy*面内)[79]。(a)から(c)の順に*z*位置は増加する。(b)において偏向色収差が消失し、この平面を境界として高エネルギー・低エネルギー電子の位置が入れ替わる。

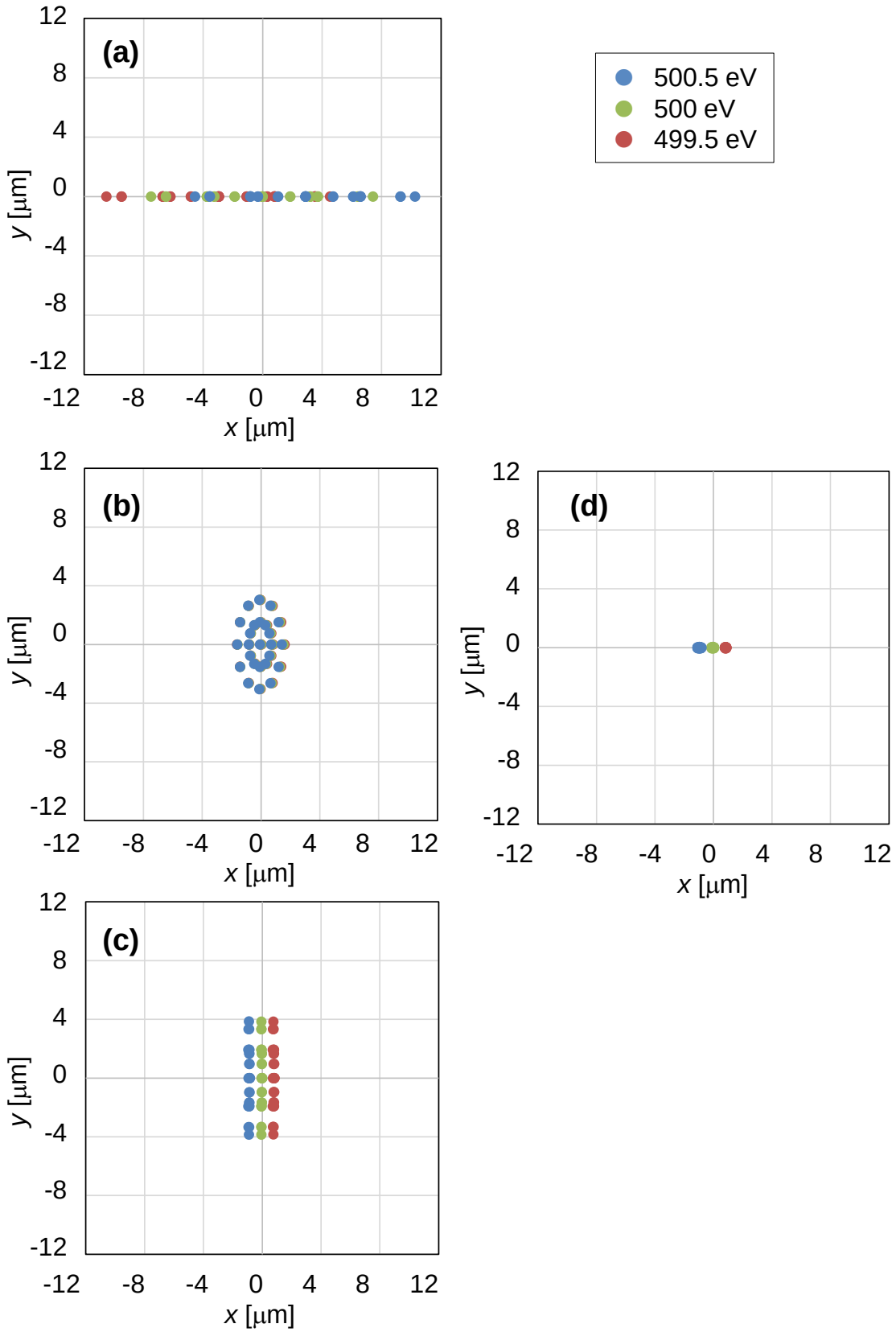


図4.10 光軸上電子の1段目ExB偏向器内の軌道追跡シミュレーション結果[79]。
各グラフは*xy*面内の電子の分布を表し、(a), (b), (c)はそれぞれ、アンダーフォーカス、ジャストフォーカス、オーバーフォーカスの結果を示している。(a)と(c)は非点収差によりラインフォーカスしている。また、(d)は非点収差を補正した結果である。

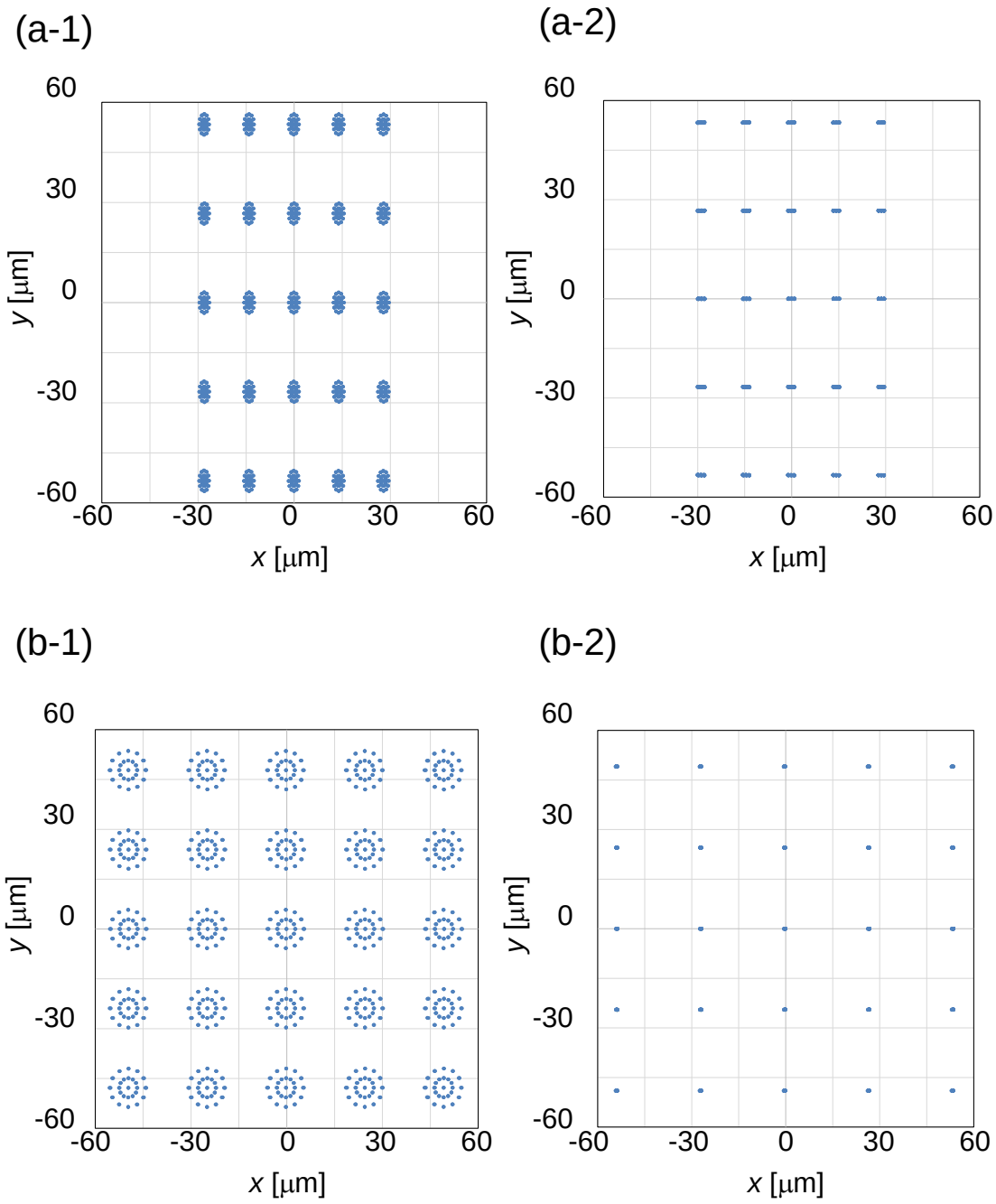


図4.11 ExB偏向器光学系の仮想像面におけるビーム拡がり[79]。
(a) と (b) はそれぞれ、1段目のExB偏向器のみ、及び、ExB偏向器光学系全体の結果である。また、(1)は非点収差補正なし、(2)は非点収差補正ありの結果をそれぞれ示している。

段のみ通過させた場合、(b)は ExB 偏向器を 2 段通過させた場合について掲載し、さらに、(1)に結果に非点補正を施していない場合、(2)に結果に非点補正を施した場合とし、合計 4 種類の場合について示した。なお、(a-2)、(b-2)の計算結果は、仮想像面位置から+100 mm の位置に理想的な薄肉 4 極子レンズを作用させることで非点補正を施した。図 4.11(a)と(b)を比較すると、(a)で 5×5 の格子状配列が偏向方向である x 方向に圧縮されているのに対し、(b)では正方配列状に補正された。非点補正なし条件における拡がりは(a-1)より(b-1)の方が大きいが、全光学系通過後に非点補正を加えた(b-2)の条件では、(a-2)で見られた x 方向の偏向色収差を抑制することができている。なお、図 4.11(a-1)における拡がりが 7 μm 程度であったのに対し図 4.11(b-2)では 0.5 μm 程度であり、提案した光学系を適用することで収差を 1 / 10 以下に低減することが確認された。

ここで、図 4.11(b-2)では、非点補正を加えたことで、格子状配列における x 方向の間隔が y 方向に対して最大で 1.09 倍まで広がった。これは非点補正に使用した 4 極子が軸外軌道に影響を与える位置に配置されたためである。もしこのずれが問題となる場合は、4 極子を軸外軌道集束位置に配置する、あるいは、配置する 4 極子を 2 段とすることなどで回避可能である。

なお、本研究においては、図 4.2 および 4.4 に示したように電場、磁場のフィールド端部におけるフリンジ場の影響が小さくなるようにデザインした。これは、フリンジ場による収差の影響を抑制するためである。実際の構造においてフリンジ場の影響が大きくなった場合には追加の収差成分による分解能劣化の影響を考慮する必要がある。

以上より、本研究で提案した ExB 偏向器光学系は大角度偏向器光学系の収差を抑制可能であることが示された。

4.6 ExB 偏向器光学系を信号電子角度弁別に適用する場合の実装例

本研究で提案した ExB 偏向器光学系は、大角度偏向による収差を抑制し、信号電子光学系を高分解能とすることができる。これにより、試料面の投影像を 2 次元アレイ状の検出器上に投影結像させる場合、信号電子の試料表面における出射位置を高分解能に弁別可能となる。本研究における主目的である電子線マルチプローブ SEM のマルチ信号電子群のクロストーク低減のほかに、たとえば、一括結像式の顕微鏡[11]-[14]、[81]の高分解能化や、信号電子の試料表面からの出射角度の分布面である回折面を検出器上に投影結像させる場合には、信号電子の放出角度を高分解能に弁別できる。

ここで、SEM の信号電子はその放出エネルギーや放出角度が試料の材料や表面形態に依存する[45][82][83]。例えば文献[84][85]に示される検出器は複数個の検出領域に分割されており、それぞれ異なる信号を取得できる構成となっている。文献[83]では後方散乱電子の低テイクオフ角側、高テイクオフ角側の選択により、コントラストがそれぞれ結晶方位と合金相のコントラストが優位となる SEM 像が取得されていることについて示している。このように、信号を弁別することで、材料や表面の構造情報を抽出することができる。

そこで、本章では提案した ExB 偏向器光学系を信号電子の角度弁別に適用する場合の実装例を検討する。なお、以下の検討においては、対物レンズを含む回転対称光学系で発生する収差の影響は考慮しないため、その影響による分解能劣化については別途考慮する必要がある。

図 4.12 に信号電子の高分解能な角度弁別を行う SEM の構成例を示す。目標とする角度分解能を 1 度とし、放出角 80 度までの取得を想定する。本構成においては TTL 検出方式と電子線プローブに対する減速電場を適用する。試料から放出された信号電子は対物レンズと 4-f 光学系を通過し、本研究で提案した ExB 偏向器光学系により照明電子光学系から分離され、その後段の拡大光学系を経て 2 次元検出器アレイに到達する。信号電子の放出角度を弁別するため、検出器上には試料像ではなくその回折面の像が拡大投影される。すなわち、対物レンズの後焦点面を ExB 偏向器光学系の物面として取り扱う。

信号電子が出射する試料表面を対物レンズの前焦点面にとるとき、対物レン

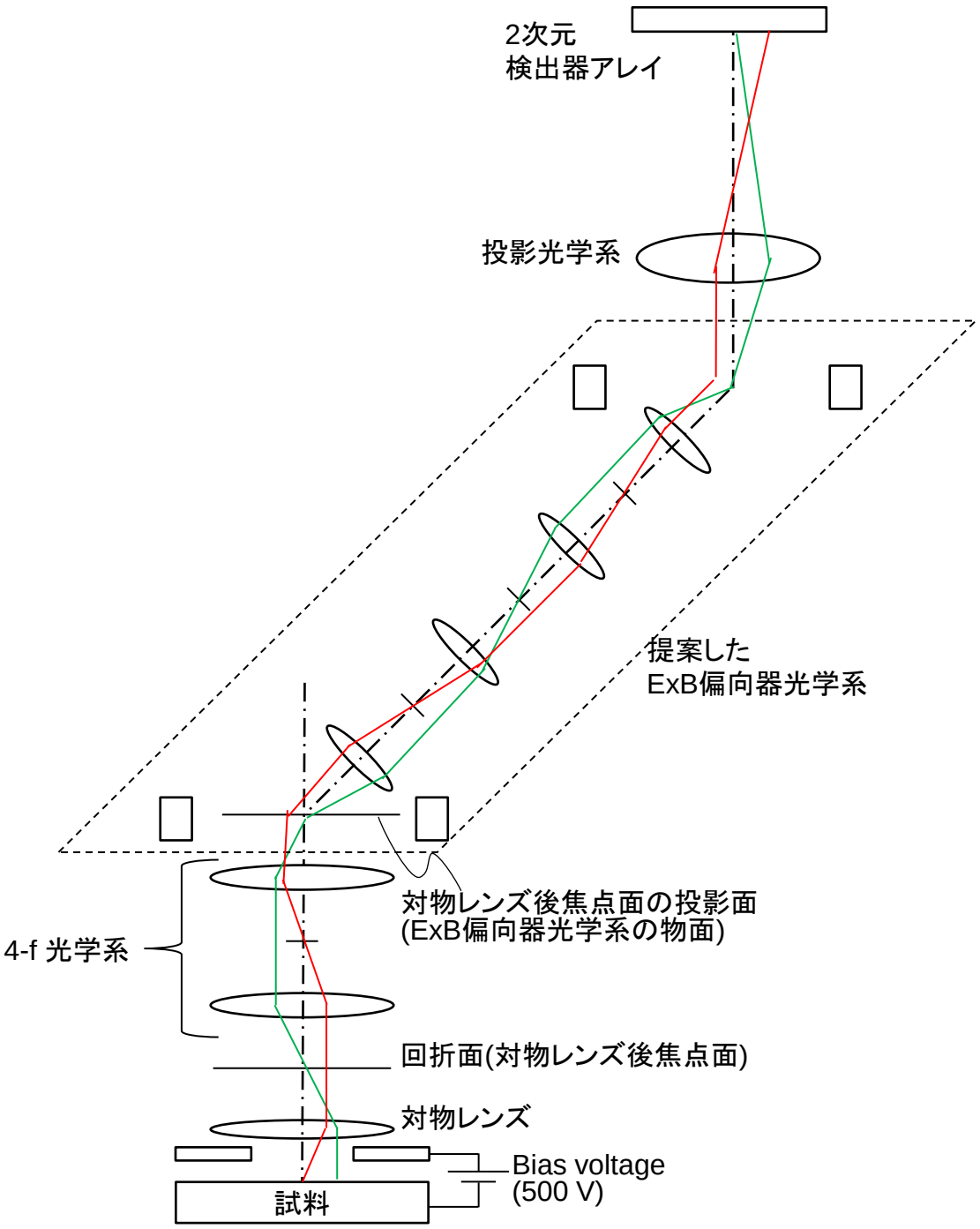


図4.12 提案したExB偏向器により信号電子の角度弁別を行うSEMの構成例[79]。

ズの後段では試料の中心から出射した信号電子は試料出射角度に応じた離軸距離で光軸と平行に進行する。また、試料表面での出射位置に応じて回折面における角度が決定される。つまり、焦点距離をパラメータとして試料表面における位置および出射角を回折面における情報に変換することができる。図 4.13 に対物レンズ近傍における信号電子の軌道を模式的に示した図を示す。簡単のため、対物レンズが焦点距離fの理想的な薄肉レンズであるとして説明する。図 4.13(a)に示すように、エネルギーの変化がない場合には、前焦点面から同一角度で出射した電子は後焦点面において一点に集束する。また、前焦点面上の同一位置から出射した電子は後焦点面において同一角度となる。このことから、前焦点面を角度α_sで出射した電子線、および、離軸r_sで出射した電子線について、後焦点面においてそれぞれ次の条件を満たす。

$$r_\mathrm{d} = f \tan \alpha_\mathrm{s}$$
$$\tan \alpha_\mathrm{d} = r_\mathrm{s}/f \tag{4-7}$$

r_dおよびα_dそれぞれ後焦点面における離軸距離および角度である。

次に、電子線プローブに対する減速電場の影響、すなわちエネルギー変化の影響を考慮する。対物レンズの手前側で信号電子線のエネルギーがϕ_0からϕ_sに変化した場合を想定する。図 4.10(b)は信号電子のエネルギーの変化がある場合の信号電子の軌道の模式図である。面 S を境界にして電子のエネルギーが変化するため、面 S に垂直な方向に電場が発生し、電子の速度は面 S の接線方向は維持され、法線方向に変化する。そのため、エネルギー変化に伴い、電子線の角度はα_0からα_sに変化する。電子線の角度が変化するという事実から、エネルギーの変化は電子線がレンズを通過したことに相当するととらえることができる。ここで、角度倍率M_a、すなわち、レンズを通過する前に対する通過後の角度比は、倍率Mを用いて以下のように表される[48]。

$$M_\mathrm{a} = \frac{\tan \alpha_\mathrm{s}}{\tan \alpha_0} = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{\phi_0}{\phi_\mathrm{s}}} \tag{4-8}$$

エネルギー変化の影響により倍率Mが変化しないと仮定すると、以下が成立する。

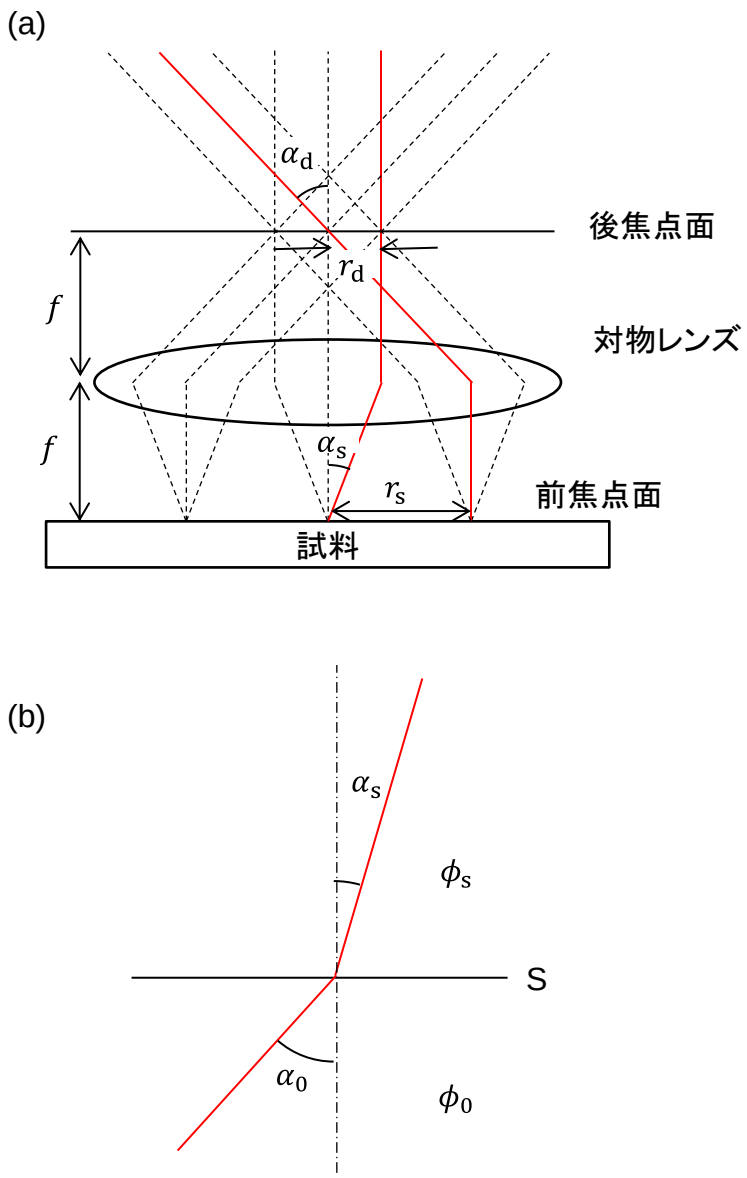


図4.13　対物レンズ近傍における信号電子軌道の模式図[79]。(a)エネルギーが変化せず信号電子が放出される試料面が対物レンズの前焦点面である場合を示す。(b)表面Sを境界としてエネルギーが変化する場合を示す。

$$r_{\mathrm{s}} = r_0$$

$$\frac{\tan\alpha_{\mathrm{s}}}{\tan\alpha_0} = \sqrt{\frac{\phi_0}{\phi_{\mathrm{s}}}} \tag{4-9}$$

(4-7)、(4-8)式より、対物レンズ後焦点面、すなわち信号電子光学系物面における離軸距離r_{d}および角度α_{d}は, 試料表面における離軸距離r_0および角度α_0を用いて以下のように表現できる。

$$r_{\mathrm{d}} = f\sqrt{\frac{\phi_0}{\phi_{\mathrm{s}}}}\tan\alpha_0$$

$$\tan\alpha_{\mathrm{d}} = r_0/f \tag{4-10}$$

図 4.12 に示すように、対物レンズ後段の 4-f 光学系は対物レンズの後焦点面を物面とした等倍像を1段目のExB偏向器の仮想偏向色収差発生位置に転送する。この転送された面が ExB 偏向器光学系の物面となる。この転送された面における電子線軌道の角度や位置は対物レンズ後側焦点面における値と同値となるため、前節までに検討した ExB 偏向器光学系の角度および離軸距離を(4-9)式におけるr_{d}およびα_{d}として取り扱うことができる。

以上の議論をもとに、本光学系における角度弁別分解能について検討した。信号電子として 2 次電子を想定してϕ_0= 2 eV、α_0 = 0～80 deg とし、また、照明電子光学系の分解能を半径 100 nm、すなわちr_0 = 0~100 nm と仮定した。焦点距離fは 5 mm とした。ExB 偏向器光学系内の加速電圧をϕ_{s} = 500 eV とし、エネルギー幅±2 eV を加味した。これらの値を(4-10)式を用いて ExB 偏向器光学系のシミュレーションの初期条件に変換した。また、α_0が 1 度変化したときのr_{d}の差Δr_{d}も(4-10)式から求めた。試料出射角α_0の電子の拡がりがΔr_{d}よりも小さいときに角度分解能 1 度が達成される。そこでΔr_{d}を角度分解能を 1 度とした場合に許容される拡がり量として定義した。これらの値を用いて前節までと同じ計算方法により信号電子の軌道を計算することで、試料表面における角度α_0に応じた像面位置における拡がり量を求めた。ExB 偏向器の場の対称性を考慮し、対物レンズ後焦点面における信号電子線の出射方向を±x 方向および+y 方向の 3 種類とした。その結果を図 4.14 に示す。図中には、試料表面における出射角に対す

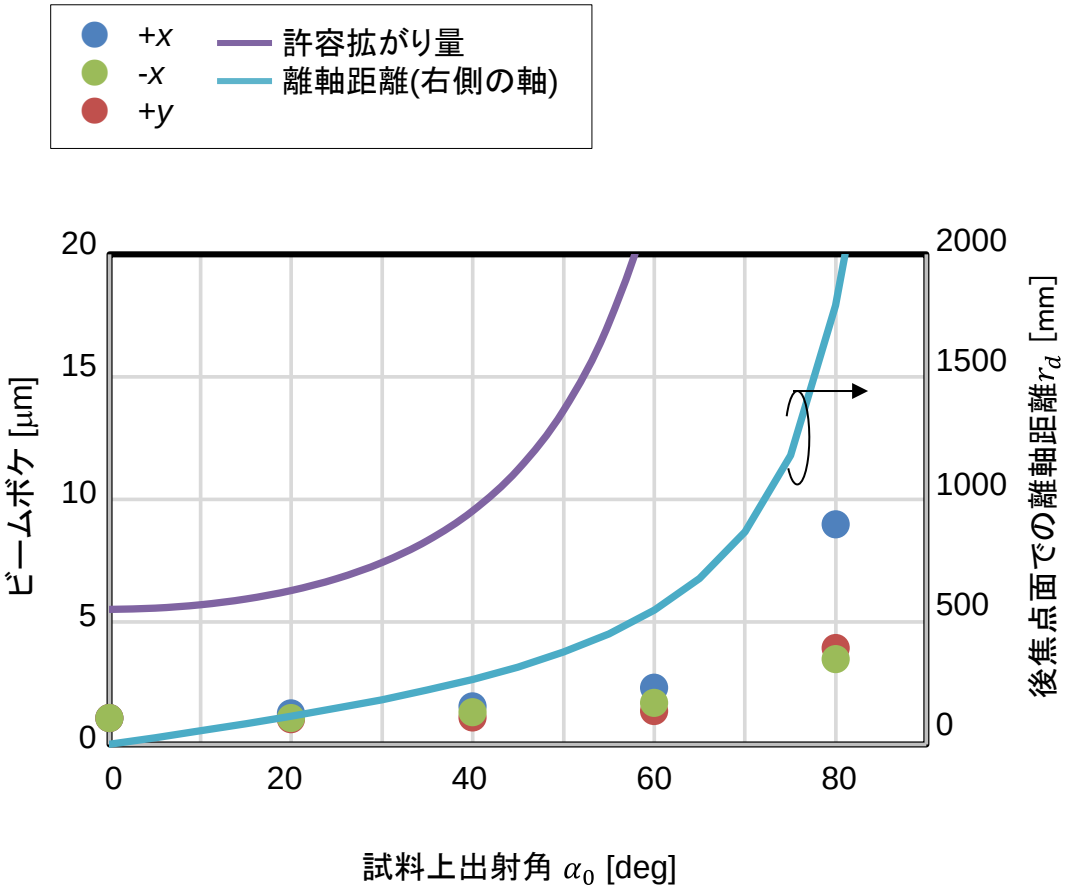


図4.14 試料出射角α_0に対する電子の拡がり[79]。
対物レンズ後焦点面における離軸距離 r_d と許容される
拡がり量Δr_dを併せて示す。

る対物レンズ後焦点面のにおける離軸距離r_{d}と、許容される拡がり量Δr_{d}を併せてプロットした。図 4.14 より、提案した光学系では、放出角度 80 度以下の全ての領域で拡がり量は許容値以下となり、ExB 偏向器光学系による収差は角度分解能 1 度を阻害しないことが確認できた。

最後に、実装上、ExB 偏向器光学系後段の拡大光学系では検出器のピクセルサイズが角度分解能以下となる倍率で回折面を 2 次元検出器アレイに投影する。検出器の一例として市販のイメージセンサを想定し、画素サイズを 10 μm、ピクセル数を 4000×4000 と仮定する。この光学系では試料放出角 80 度は対物レンズ後焦点面では約半径 2 mm 程度に対応するため、投影光学系を 10 倍とする。このとき、ピクセルサイズは対物レンズ後焦点面において 1 μm 相当に対応し、この値は、図 4.14 より対物レンズの後ろ焦点面の全領域において角度分解能以下であり、ピクセルサイズによる分解能の阻害は発生しない。

以上より、提案した ExB 偏向器光学系を応用した構成により、高分解能な角度弁別検出が可能となる見込みが得られた。

4.7 結　言

本章では、大角度偏向時に発生する収差を相殺する ExB 偏向器光学系を提案した。提案した光学系は、2 段の ExB 偏向器とその間に配置する 2 段の 4-f 光学系による転送システムから構成され、1 段目の ExB 偏向器で発生した収差が 2 段目の ExB 偏向器で相殺されるように、転送システムにより電子線の軌道の反対称性を形成する構成となっている。

提案した光学系の効果を電子線の軌道追跡計算により確認した結果、ExB 偏向器 1 段のみを通過させた場合と比較して、収差が 1 / 10 以下に低減されることを確認した。

さらに、提案した ExB 偏向器光学系を信号電子の角度弁別に適用する場合の実装例について検討し、試料からの放出角 80 度の範囲を角度分解能 1 度で分解できる見込みを得た。

以上より、ExB 偏向器の大角度偏向による収差を受けることにより信号電子

群の拡がりの増大を解決できる見込みが得られた。本章にて提案・検討した ExB 偏向器光学系を電子線マルチプローブ SEM の信号電子光学系に適用することで、信号電子の弁別分解能を向上することが可能であると考えられる。

第5章 電子線マルチプローブ SEM 光学系の高性能化に関する議論

5.1 緒　言

第 2～4 章において、電子線マルチプローブ SEM の照明電子光学系と信号電子光学系のそれぞれに関する課題について述べた。本章ではこれらを解決することで電子線マルチプローブ SEM を高性能化する可能性について考察する。

照明電子光学系の課題は、離軸した電子線プローブによる SEM 像が光軸上を通過した電子線プローブによる SEM 像と比べて分解能が劣化するというものである。これに対し、第 3 章では SEM 像を形成する PSF を低分解能のものから高分解能のものに変換する PSF 変換法を開発した。この PSF 変換法を電子線マルチプローブ SEM に適用することで離軸した電子線の SEM 像の高分解能化を試みる。

また、信号電子光学系の課題は、信号電子群が ExB 偏向器を通過する際に大角度偏向されることによって生じる非対称収差である。これに対し、第 4 章では、ビームセパレータとして使用する ExB 偏向器の後段にもう 1 段 ExB 偏向器を追加し、軌道の対称性を考慮することで発生する収差を互いに相殺する構成を提案した。この ExB 偏向器光学系を電子線マルチプローブ SEM の信号電子光学系に適用することで信号電子群の分離効率の向上を試みる。

上記の 2 つの課題について検討を行い、電子線マルチプローブ SEM で使用可能な電子線プローブの本数について議論する。

5.2 電子線マルチプローブ SEM 照明電子光学系への PSF 変換の適用

本研究における電子線マルチプローブ SEM では対物レンズが共通要素であり、電子線プローブごとに対物レンズを通過する位置が異なる。このため、電子線マルチプローブを光軸の外側に増加させる場合、外側の電子線による SEM 像は対

物レンズの軸外収差の影響を受け、光軸に近い電子線による SEM 像と比べて分解能が劣化する。図 5.1 に、電子線マルチプローブ SEM の照明電子光学系の主要な収差を離軸距離に対してプロットした結果を示す。図に示すように、軸外距離が大きくなるほど各軸外収差は増大し SEM 像の分解能が劣化することがわかる。ここで、軸外収差のうち像面湾曲および非点収差は、離軸距離に対応するフォーカスおよび非点の変動であるので、例えば電子線マルチプローブ形成部に電子線プローブごとに異なるフォーカスおよび非点補正を与えらる機構を設ければ補正が可能である。このため、図中の総合収差には像面湾曲および非点収差を加えていない。また、この総合収差は、(2-2)式の考え方に従い、各収差が独立であると仮定して二乗和平均により求めた。図より、特に軸外収差(軸外色収差とコマ収差)の影響が強く、離軸距離が大きい領域ではほぼ線形で分解能が劣化することがわかる。

この課題を解決するため、第 3 章で示した PSF 変換法を適用する。PSF 変換法は、分解能の低い SEM 像を形成する PSF から分解能の高い SEM 像を形成する PSF に変換するものである。この分解能の高い像を形成する PSF として、光軸を通過し、軸外収差の影響を受けない電子線プローブの PSF を選び、それ以外の離軸しており軸外収差を含む電子線プローブの PSF に対し PSF 変換法を適用することで、全電子線プローブの分解能を光軸上の電子線プローブと同等に向上することを狙う。

本章では、シミュレーションを行うことにより分解能の向上を確認した。シミュレーションの手順は以下のとおりである。

①離軸距離 0 ~ 200μm における条件で PSF を計算
②各離軸電子線プローブを中心電子線プローブに変換する PSF 変換関数を演算
③各 PSF を試料像とコンボリューションして SEM 像を生成
④②と③を用いて PSF 変換を実施

シミュレーションの条件は、試料到達エネルギーを 1000 eV、エネルギー分布を標準偏差 0.3 eV のガウス分布、試料表面における開き角を 10 mrad とした。

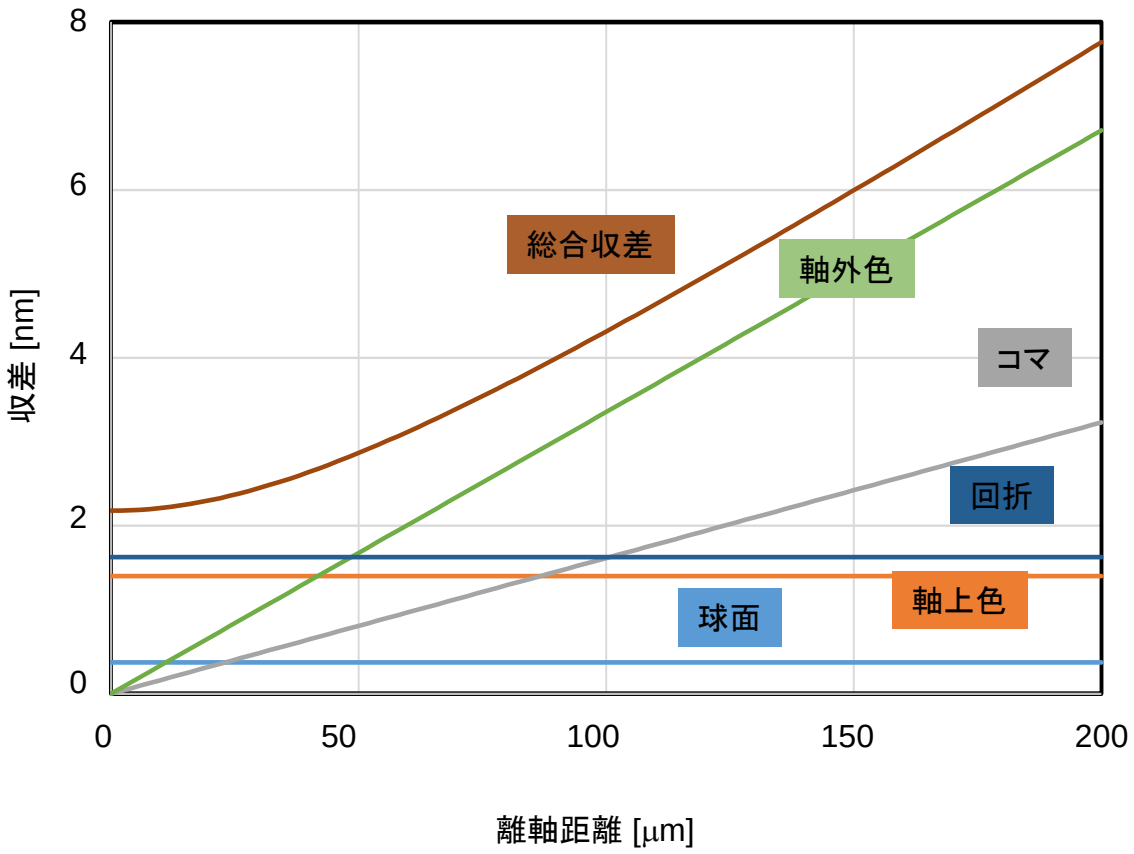


図5.1 電子線マルチプローブSEMの照明電子光学系の主要な収差。
軸外距離が大きくなるほど各軸外収差は増大しSEM像の分解能が劣化する。像面湾曲および非点収差は補正が可能であるため、総合収差には加えていない。総合収差は各収差が独立であると仮定して二乗和平均により求めた。
特に軸外収差(軸外色収差とコマ収差)の影響が強く、離軸距離が大きい領域ではほぼ線形で分解能が劣化する。

シミュレーションにより得られた PSF、SEM 像、および PSF 変換像のうち、代表的な離軸距離の結果を図 5.2 に示す。離軸が大きくなるにつれて PSF は縦方向(離軸の方向)に拡がり、その結果 SEM 像も同じ方向にボケているが、これに対し、PSF 変換後の画像は計算した全領域でボケが改善していることが分かる。シミュレーションにより得られた各画像の分解能を Derivative 法[76][77]により測定した結果を図 5.3 に示す。図より、分解能は離軸距離が増えてもほぼ光軸上での値から変化せず一定になっていることがわかる。ただし、離軸距離を 100 μm を超えたあたりから値のばらつきが現れ始める。

この値のばらつきに関して考察するため、図 5.2 におけるビーム拡がり方向の MTF を求めた。図 5.4 にその結果を示す。図 3.3 と同様に、横軸である規格化空間周波数は電子線の波長λと開き角αを用いてλ/αで除算することにより規格化し、開き角及び加速電圧に依存しない無次元量である。図より、MTF は規格化空間周波数の増加に伴い減衰し、離軸距離が大きいほどその減衰が急激となる。SEM 像のノイズを無視すれば、MTF が正値の範囲において原理的には PSF 変換による分解能回復が可能であるが、実際の SEM 像には無視できない量のノイズが含まれるため、離軸距離に応じ分解能回復能力に差が生じる。ここで、SEM 像に含まれるノイズがホワイトノイズであると仮定すると、各画素の値はノイズがないときの真の値を基準とし、SNR によって決まる変動幅以内のランダム値だけ加算される。これを SEM 像内の各位置に対する関数 N で表すとき、SEM 像 I は(3-3)式及び(3-5)式を拡張し、試料像 S および MTF を用いて次式で表現される。

$$I = \mathrm{FT}^{-1}(\mathrm{FT}(S) \times \mathrm{MTF}) + N \tag{5-1}$$

第 1 項は信号成分、第 2 項はノイズ成分であり、これらはフーリエ空間においても分離して表現することができる。また、ノイズに空間周波数依存性がないことからフーリエ空間においては一定値となる。(5-1)式の両辺をフーリエ変換して次式を得る。

$$\mathrm{FT}(I) = \mathrm{FT}(S) \times \mathrm{MTF} + n \tag{5-2}$$

ただしnは SEM 像の SNR によって決まる一定値である。試料像 S の空間周波数

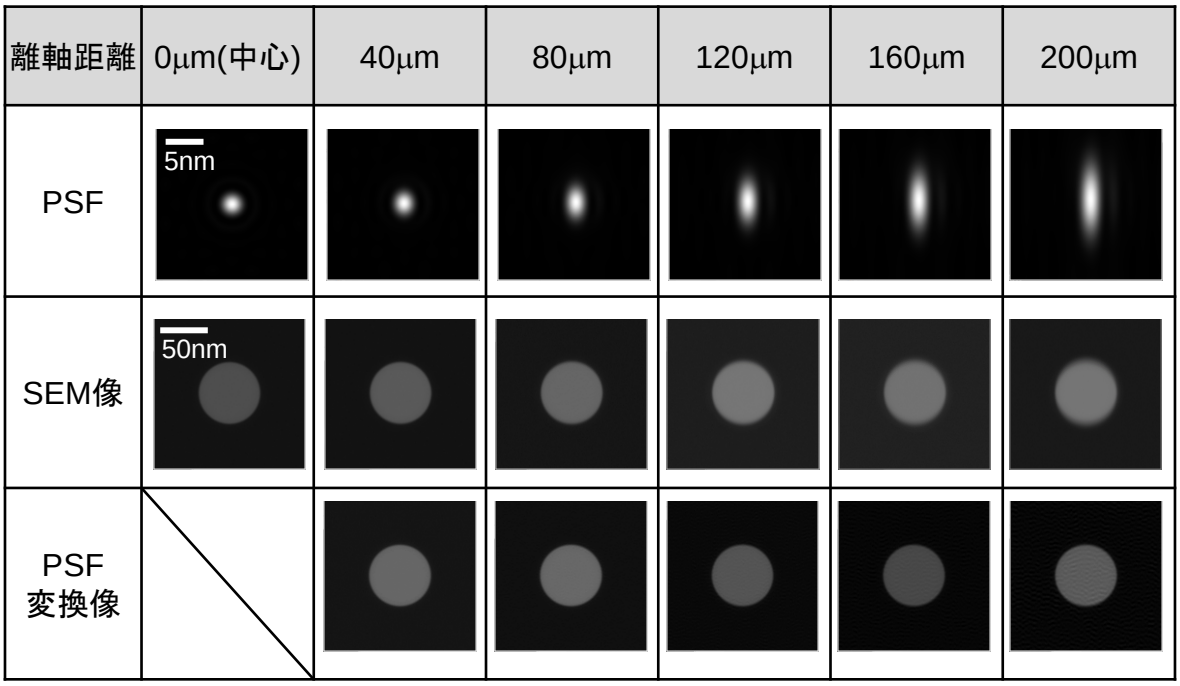


図5.2 電子線マルチプローブSEMの離軸距離ごとのPSF、SEM像、及びPSF変換像のシミュレーション結果。
試料到達エネルギーを1000 eV、エネルギー分布を標準偏差0.3 eVのガウス分布、試料表面における開き角を10 mradとした。離軸が大きくなるにつれてPSFは縦方向(離軸の方向)に拡がり、その結果SEM像も同じ方向にボケている。これに対し、PSF変換後の画像は計算した全領域でボケが改善している。

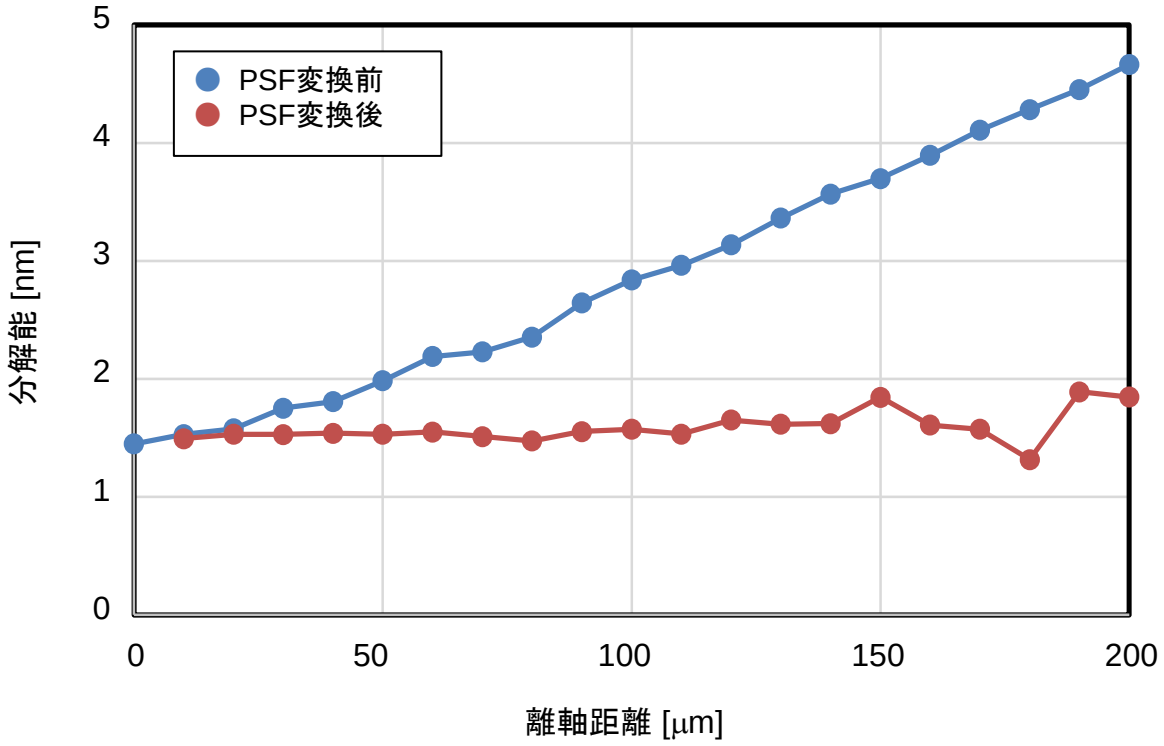


図5.3 PSF変換による分解能回復結果。
シミュレーションにより得られた各画像の分解能をDerivative法により測定した。PSF変換前の分解能が離軸距離に応じて劣化しているのに対し、PSF変換後では離軸距離が増えてもほぼ光軸上での値から変化せず一定になっていることがわかる。ただし、離軸距離が100 μmを超えたあたりから値のばらつきが現れ始める。

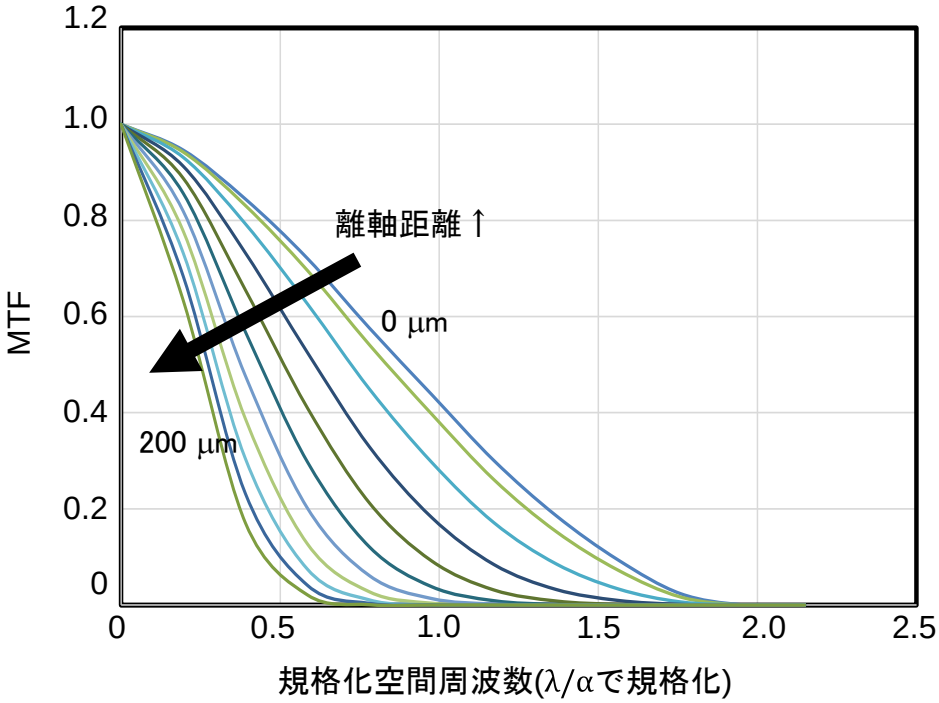


図5.4 離軸距離に応じた電子線プローブのMTF。
横軸である規格化空間周波数は開き角や加速電圧に依存せず無次元量となるようにλ/αで規格化している。規格化空間周波数が高くなるほどMTFが減衰し、この減衰は離軸距離が大きいほど急激となる。

成分は実際には観察する試料に依存するが、ここでは試料依存性を排除するためフーリエ空間において一定であるとする。(5-2)式の第 2 項のノイズ成分が一定値であるのに対し、第 1 項の信号成分は MTF により空間周波数の増加に伴い減衰する周波数依存性を持つことから、高周波数側ではノイズ成分のほうが信号成分よりも大きくなる。これにより、信号とノイズの分離が難しくなり試料の情報が失われるため、PSF 変換などの画像処理を施してもその空間周波数における試料の情報は回復しない。

十分に SEM 像のパターンが視認できる程度のノイズ量として SNR = 10 を仮定するとき、試料像 S が持つ各空間周波数の情報はノイズの 10 倍と考えられる。MTF が直流成分の 10 %となる空間周波数を境界として、それ以上の空間周波数領域では試料の情報が失われる。図 5.4 から各離軸距離における MTF が 10 %となる規格化空間周波数を求め、プロットした。この結果を図 5.5 に示す。図 5.5 より、離軸距離 0、すなわち光軸上の結果に対して 100 μm の結果は規格化空間周波数が約 1/2 まで減少している。この差が図 5.3 における PSF 変換時の分解能の値のばらつきの原因であると考えられる。図 5.2 の PSF 変換画像においても同程度の離軸距離から画像内に縞状のアーティファクトが徐々に大きくなっていることからも、中心電子線プローブとの MTF の差が大きくなったことにより PSF 変換の精度が徐々に劣化したと考えられる。

本章においては、劣化が起こらなかった離軸距離 100 μm までを使用可能範囲であると結論づける。

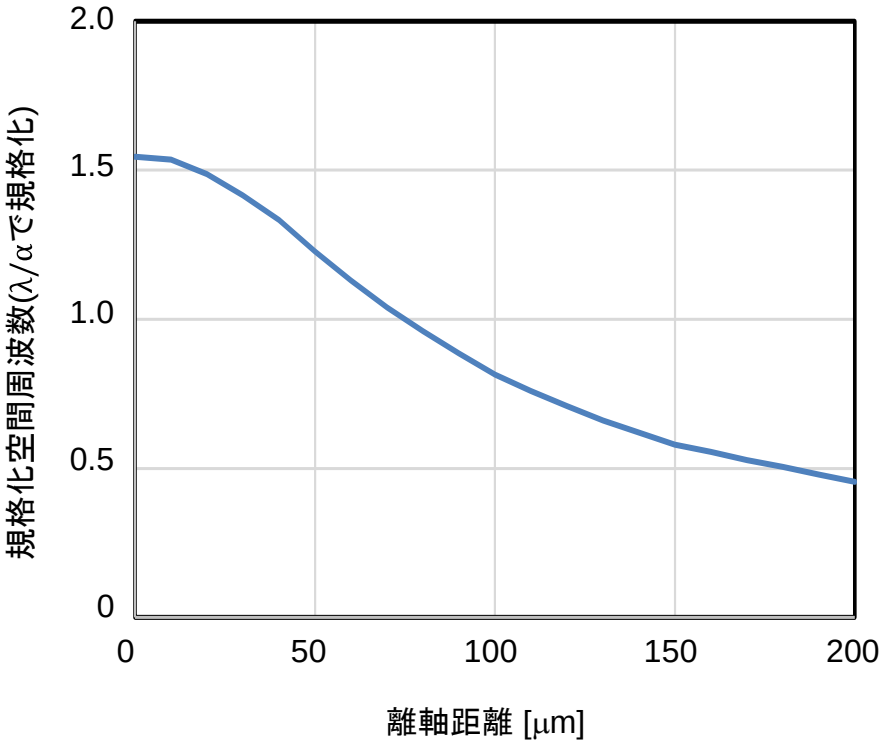


図5.5 MTFが直流成分の10%となる規格化空間周波数。離軸距離に応じて減少し、離軸距離100 μmで光軸上の結果の1/2程度となる。図5.3におけるPSF変換時の分解能の値のばらつきの原因であると考えられる。これは図5.2においてPSF変換画像の画像内に見られる縞状のアーティファクトが顕著となる離軸距離と概ね一致する。

5.3 電子線マルチプローブ SEM の電子線プローブ本数に関する議論

信号電子光学系に対する課題については、第 4 章の議論より、ExB 偏向器で発生する非対称収差は相殺されたものと考える。この場合、信号電子の拡がりは信号電子光学系で発生する軸上収差項が支配的になり、その値は試料表面換算で約 5 μm である。したがって、電子線マルチプローブの間隔の最短距離は 5 μm となる。

前節における検討結果より、電子線マルチプローブ SEM の最大離軸距離は 100 μm である。電子線を格子状に正方配列する場合、最も遠い点は正方形の頂点の位置である。配置可能な第 1 象限の頂点の座標は(70.71 μm, 70.71 μm)となる。電子線プローブ間隔を 5 μm とする場合、実際の電子線配列は上記よりも内側の 2.5 μm の倍数(偶数本の場合は 2.5 μm シフトした位置。奇数本の場合は 5 μm の倍数)となる。

以上より、電子線マルチプローブは 140 μm×140 μm 内に 29×29=841 本配列可能であり、目標の 1 本の電子線プローブ SEM に対して 100 倍、すなわち電子線マルチプローブ本数 100 本以上を十分達成できる見込みが得られた。

5.4 結　言

本章では、第 2～4 章において述べた電子線マルチプローブ SEM の照明電子光学系と信号電子光学系のそれぞれに関する課題を解決することで電子線マルチプローブ SEM を高性能化する可能性について考察した。

電子線マルチプローブ SEM の離軸距離に応じた PSF および SEM 像を形成するシミュレーションを行った。全離軸距離の SEM 像に対して中心電子線プローブの PSF を使用して PSF 変換を行った結果、全条件で中心電子線プローブ相当の分解能に向上することを確認した。ただし、離軸距離が 100 μm 以上では PSF 変換後の画像にアーチファクトが現れ、分解能評価時のエラーの原因となった。このことから、利用可能な最大離軸距離を 100 μm と定めた。

信号電子光学系に対する課題については、ExB 偏向器で発生する非対称収差は相殺され、信号電子光学系で発生する軸上収差項が支配的になると判断した。

この値は試料表面換算で約 5 μm であり、電子線マルチプローブ間隔の最短距離は 5 μm となった。

以上より、電子線マルチプローブは 140 μm×140 μm 内に 29×29=841 本配列可能であり、目標の 1 本の電子線プローブ SEM に対して 100 倍の速度、すなわち電子線マルチプローブ本数 100 本以上を達成できる見込みが得られた。

第6章 結　論

本論文では、ナノテクノロジー分野において高分解能かつ高速に画像データを取得することを目的とし、電子線マルチプローブ SEM についての検討を進めた。電子線マルチプローブ SEM では SEM の電子線プローブを複数本とすることで、広い領域の画像を撮像するために必要な時間を電子線プローブの本数分だけ短縮することが可能となる。以下、得られた成果をまとめる。

電子線マルチプローブ SEM の光学系の提案(第 2 章)

1. 複数の電子線を試料に同時照射し、それぞれの SEM 像を形成する電子線マルチプローブ SEM の光学系を提案した。
2. 本光学系では、照明電子光学系と信号電子光学系を独立に制御し、複数の信号電子群を個別に検出するように設計した。
3. 信号電子群同士のクロストークを回避するため、振り戻し偏向器を配置した。
4. 原理検証においては 4 本の電子線マルチプローブを形成し、クロストークのない電子線マルチプローブ SEM 像を取得した。
5. シミュレーションと実験により信号電子群の分離効率を確認した結果、エネルギーが 9 keV のとき分離効率 99 %を達成した。この結果は光学系を構成する全要素が想定通りに動作していることを証明する。

以上の結果より、電子線マルチプローブ SEM の原理検証を完了した。

照明電子光学系における分解能向上に関する検討(第 3 章)

1. 低分解能 SEM 像の PSF を標準的な SEM 像の PSF に変換する PSF 変換法を開発した。
2. PSF 変換関数は PSF 同士のデコンボリューションであり、これは同一視野の SEM 像同士のデコンボリューションと等しい。このことから、PSF が未知であっても SEM 像を元に PSF 変換を実施することが可能である。
3. PSF 変換の題材として輪帯照明 SEM を適用した。像形成および PSF 変換

シミュレーションの結果、各画像の分解能は標準的な SEM 像と同等まで改善し、そのときの焦点深度は 4 倍に向上した。本手法は実験でも確認済である。

以上の結果より、PSF 変換法による分解能向上は有効であることが検証され、本手法を電子線マルチプローブ SEM の軸外電子線プローブによる SEM 像に適用できる見込みが得られた。

信号電子光学系における信号電子群分離度向上に関する検討 (第 4 章)

1. 大角度偏向時に発生する収差を相殺する ExB 偏向器光学系を提案した。本光学系は 2 段の ExB 偏向器と 2 段の 4-f 光学系による転送システムから構成され、1 段目の ExB 偏向器で発生した収差が 2 段目の ExB 偏向器で相殺されるように転送システムを通じ、軌道が反対称となるようにした。
2. 提案した光学系の効果を電子の軌道追跡計算により確認した結果、ExB 偏向器 1 段のみを通過させた場合と比較して、収差が 1 / 10 以下に低減されることを確認した。
3. 一例として、提案した ExB 偏向器光学系を信号電子の角度弁別に適用する場合の実装例について検討し、試料放出角 80 度の範囲を角度分解能 1 度で分解できる見込みを得た。

以上の結果より、電子線マルチプローブ SEM の信号電子光学系に本 ExB 偏向器光学系を使用することで、信号電子群が ExB 偏向器の大角度偏向によって生じる収差を抑制し、信号電子群の分離効率が向上できる見込みが得られた。

電子線マルチプローブ SEM 高性能化に関する議論(第 5 章)

1. 第 2～4 章で述べた電子線マルチプローブ SEM の課題を解決することで電子線マルチプローブ SEM を高性能化する可能性について考察した。
2. 電子線マルチプローブの離軸距離に応じて SEM 像を形成し、その PSF を中心電子線プローブの PSF に変換する PSF 変換を行うシミュレーション

を行った結果、全条件で中心電子線プローブ相当の分解能に向上することを確認した。

3. 離軸距離 100 μm 以上では PSF 変換後の画像にアーチファクトが現れ、分解能評価時のエラーの原因となった。このことから、利用可能な最大離軸距離を 100 本と定めた。
4. 第 4 章で提案した光学系により ExB 偏向器の非対称収差は相殺され、信号電子群の拡がりは軸上収差項が支配的になると判断した。この値は試料表面換算で約 5 μm であり、電子線マルチプローブ間隔の最短距離は 5 μm となった。
5. 電子線マルチプローブは 140 μm×140 μm 内に 29×29=841 本配列可能であることを示した。

以上の結果より、本研究の目標である、1 本の電子線プローブ SEM に対し速度を 100 倍とすること、すなわち電子線マルチプローブ本数 100 本以上を達成できる見込みが得られた。

今後の課題

本論文により電子線マルチプローブ SEM の電子光学系の基礎検討は完了した。今後は電子線マルチプローブ SEM の実装に向けた取組が必要となる。今後の課題を以下に列挙する。

・電子源の高輝度・大電流化の検討

・電子線プローブの本数に対応するアレイ状検出器の開発

・全電子線マルチプローブの形成及び調整方法の確立

・アレイ状検出器と信号電子群の配列の位置調整方法の確立

謝辞

本研究の遂行にあたり、大阪大学超高圧電子顕微鏡センター西竜治 特任教授(現福井工業大学教授)より懇切なるご指導ご鞭撻および温かい励ましを多数賜りました。ここに深く感謝の意を表します。また、同センター山﨑順 教授、ならびに、伊藤博之 招へい教授(筑波大学数理物理系物理工学域所属)より数多くのご指導、ご鞭撻を賜りましたことに深く感謝の意を表します。

本論文の執筆にあたり、大阪大学大学院工学研究科 森伸也教授より多くのご指導とご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は著者が株式会社日立製作所中央研究所において進めてきた研究と、大阪大学大学院工学研究科で取り組んだ研究をまとめたものです。本研究に着手する機会をいただきました同研究所ナノプロセス研究部 田中 潤一 元部長(現株式会社日立ハイテク)、根岸 信幸 元部長(現日立製作所計測イノベーションセンタ)、栗原 優 部長に深く感謝いたします。

株式会社日立製作所中央研究所 谷本 明佳氏、榊原 慎氏、ならびに株式会社日立ハイテク 二宮 拓氏、太田 洋也氏、川野 源氏、谷本 憲史氏、安部 悠介氏、および、故 野副真理氏には、研究の推進にあたり多くのご議論やご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

現帝京大学浜田 宏一教授には、日立製作所在職中に画像処理に関し多大なるご助言とご教示を頂きました。ここに感謝いたします。

また、株式会社日立製作所中央研究所 木村 愛美氏、三羽 貴文氏、木澤 駿氏、田中 駿也氏、森本 剛史氏には、論文執筆にあたり、たくさんのご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

ここには書ききれないほど多くの方から多大なるご協力をいただきました。皆様に感謝いたします。

最後に、本研究の遂行ならびに執筆にあたり温かい支援をしてくれた家族に感謝いたします。

参考文献

[1] 経済産業省 半導体デジタル産業戦略検討会議 「4. 半導体・デジタル産業戦略」半導体戦略(概略) 2021 年 6 月 https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital.html

[2] P. D. Bisschop (2018) Stochastic printing failures in extreme ultraviolet lithography, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 17, 4, 041011.

[3] S. Kang, K. Maruyama, Y. Yamazaki, D. D. Simone, P. R. Delgadillo, et al. (2021) Massive e-beam metrology and inspection for analysis of EUV stochastic defect, Proc. SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV; 11611, 1161129.

[4] 経済産業省産業構造審議会 商務流通情報分科会 バイオ小委員会 報告書「バイオテクノロジーが拓く『第五次産業革命』」2021 年 2 月 https://www.meti.go.jp/shingikai/index_report.html

[5] 伊藤 聡 (2019) 日本のマテリアルズインフォマティクス研究, 人工知能 34, 3, 325-329.

[6] N. Ohno et al. (2015) Three-dimensional volume imaging with electron microscopy toward connectome, Microscopy, 64, 1 17–26.

[7] K. J. Hayworth et al. (2015) Ultrastructurally smooth thick partitioning and volume stitching for large-scale connectomics, Kenneth J Hayworth Nature Methods, 12, 319–322.

[8] 大野伸彦 (2014) SBF-SEM による生体内 3 次元微細構造観察の試料作製とその応用, 顕微鏡, 49, 3.

[9] R. Schalek, N. Kasthuri N, K. Hayworth, D. Berger, J. Tapia, J. Morgan, et al. (2011) Development of high-throughput, high-resolution 3D reconstruction of large-volume biological tissue using automated tape collection ultramicrotomy and scanning electron microscopy, Microsc. Microanal. 17, 966–967.

[10] V. Baena, R. L. Schalek, J. W. Lichtman, M. Terasaki (2019) Chapter 3- Serial-

section electron microscopy using Automated Tape-Collecting Ultramicrotome (ATUM), Methods Cell Biol. 152 41–67.

[11] T. Satake, et al. (2005) Electron beam inspection system for semiconductor wafer based on projection electron microscopy: II, Proc. SPIE, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX, 5752, 1219-1226.

[12] M. Miyoshi, et al. (2001) Electron beam inspection system based on the projection imaging electron microscope, J. Vac. Sci. Technol. B, 19, 6, 2852-2855.

[13] T. Hirano, et al. (2010) Development of EB inspection system EBeyeM for EUV mask, Proc.SPIE, 7828 78232C.

[14] T. Shimakura et al. (2008) Mirror electron microscope for inspecting nanometer-sized defects in magnetic media, Microelec. Eng. 85, 8, 1811–1814.

[15] O. Kamimura et al. (2008) Dynamic blanking control of single column multi-electron-beam system, Physics Procedia 1 545-552.

[16] M. Muraki et al. (2000) New concept for high-throughput multielectron beam direct write system, J. Vac. Sci. Technol. B 18, 6, 3061-3066.

[17] P. C. Post et al. (2011) Parallel electron-beam-induced deposition using a multi-beam scanning electron microscope, J. Vac. Sci. Technol. B, 29,6, 06F310.

[18] M. McCord et al. (2010) High-current electron optical design for reflective electron beam lithography direct write lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, 28, 6, C6C1.

[19] C. van den Berg et al. (2011) Scanning exposures with a MAPPER multibeam system, Proc. SPIE Alternative Lithographic Technologies III, 7970, 79700D.

[20] E. Platzgummer et al. (2011) eMET POC: realization of a proof-of-concept 50 keV electron multibeam mask exposure tool, Proc. SPIE, Photomask Technology 2011, 8166, 816622.

[21] M. Nakasuji, S. Yoshikawa, T. Satake, N. Noji (2005) Feasibility Study of Multiple-Beam Scanning Electron Microscopy for Defect Inspection, Jpn. J. Appl. Phys., 44, 1, 5570-5574.

[22] H. M. P. van Himbergen, M. D. Nijkerk, P. W. H. de Jager, T. C. Hosman, P. Kruit (2007) High throughput defect detection with multiple parallel electron beam, J. Vac. Sci. Technol. B, 25, 6, 2521-2525.

[23] S. Tanimoto, D.S. Pickard, C. Kenney, R. F. W. Pease (2008) Secondary electron detection for distributed axis electron beam systems, Microelectronic Engineering 85, 8, 1786-1791.

[24] T. Ichimura, Y. Ren, P. Kruit (2014) A large current scanning electron microscope with MEMS-based multi-beam optics, Microelectronic Engineering, 113, 109-113.

[25] Su-Eon Jin et al (2010) Multiscale observation of biological interactions of nanocarriers: From nano to macro, Microscopy Research and Technique, 73, 9, 2010, 813–823.

[26] Y. Tanaka et al. (2011) Development of a pattern to measure multiscale deformation and strain distribution via in situ FE-SEM observations, Nanotechnology, 22, 115704.

[27] E. Munro (1975) Design and optimization of magnetic lenses and deflection systems for electron beams, J. Vac. Sci. Technol., 12, 6, 1146-1150.

[28] A. Mohammadi-Gheidari et al. (2010) Multibeam scanning electron microscope: Experimental results, J. Vac. Sci. Technol. B, 28, 6, C6G5-C6G10.

[29] A. Mohammadi-Gheidari, P. Kruit (2011) Electron optics of multi-beam scanning electron microscope, Nucl. Instrum. Method Phys. Res. A, 645, 1, 60–67.

[30] Y. Ren, P. Kruit (2016) Transmission electron imaging in the Delft multibeam scanning electron microscope 1, J. Vac. Sci. Technol. B, 34, 6, 06KF02.

[31] P. Kruit, W. Zuidema (2019) A Dedicated Multi-Beam SEM for Transmission Imaging of Thin Samples, Microsc. Microanal., 25 (Suppl 2), 1034-1035.

[32] A.L. Eberle et al. (2015) High-resolution, high-throughput imaging with a multibeam scanning electron microscope, J. Microscopy, 259, 2, 114–120.

[33] J. T. Neumann et al. (2017) High-throughput multi-beam SEM: quantitative analysis of imaging capabilities at IMEC-N10 logic node, Proc SPIE, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI, 10145, 101451S.

[34] E. Ma et al. (2018), Multiple beam technology development and application for defect inspection on EUV wafer/mask, Proc. SPIE, Photomask Technology 2018, 10810, 1081014.

[35] E. Ma et al. (2019), Multiple beam inspection (MBI) for 7nm node and beyond: technologies and applications, Proc. SPIE, Advanced Lithography, Metrology,

Inspection, and Process Control for Microlithography XXXIII; 10959, 10959-114.

[36] A. Takafuji, M. Nozoe, and H. Shinada (2000) Development of a secondary-electron detection system for high-speed high-sensitivity inspection SEM imaging, Microelec. Eng. 53, 1-4, 649-652.

[37] Y. Ose, M. Ezumi, and H. Todokoro (1999) Improved CD-SEM optics with retarding and boosting electric fields, Proc. SPIE, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIII, 3677, 930.

[38] A. D. Brodie and W. D. Meisburger (1992) Conceptual models for understanding and minimizing Coulomb interactions, Microelec. Eng. 17, 1-4, 399-403.

[39] I. Müllerová and M. Lenc (1992) Some approaches to low-voltage scanning electron microscopy, Ultramicroscopy 41, 4, 399-410.

[40] M. Sato, H. Todokoro, and K. Kageyama (1993) Snorkel-type conical objective lens with E cross B field for detecting secondary electrons, Proc. SPIE 2014, 17-23.

[41] K. Tsuno and D. Ioanoviciu (2013) Chapter 6: Application of Wien Filters to Electrons. In: Advances in Imaging and Electron Physics 176, pp. 177-212, (Academic Press, Amsterdam).

[42] T. Ishitani, M. Sato, H. Todokoro (2001) Beam characteristics for various sizes of annular aperture on scanning electron microscope, Ultramicroscopy, **88**, 151.

[43] M. Enyama, M. Sakakibara, S. Tanimoto, H. Ohta (2014) Optical system for a multiple-beam scanning electron microscope, J. Vac. Sci. Technol. B, 32, 5, 051801.

[44] O. Kamimura et al. (2007) Optical properties of a multibeam column with a single-electron source, J. Vac. Sci. Technol. B, 25, 1, 140-146.

[45] L. Reimer (1998) Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis 2nd Ed., Springer Series in Optical Sciences 45 (Springer, Berlin).

[46] H. Seiler (1983) Secondary electron emission in the SEM, J. Appl. Phys. 54 R1-R18.

[47] M. S. Chung, T. E. Everhart (1974) simple calculation of energy distribution or low-energy secondary electrons emitted from metals under electron bombardment,

J. Appl. Phys., 45, 707-709.

[48] 裏克己(2005) ナノ電子光学, 共立出版社, 東京.

[49] F. Yano, S. Nomura (1993) Deconvolution of scanning electron microscopy images, Scanning 15, 19.

[50] A. S. Carasso, D. S. Bright, and A. E. Vladár (2002) APEX method and real-time blind deconvolution of scanning electron microscope imagery, Opt. Eng. 41, 2499.

[51] D. C. Joy (2002) SMART – a program to measure SEM resolution and imaging performance, J. Microsc., 208, 24.

[52] R. S. Paden, W. C. Nixon (1968) Retarding field scanning electron microscopy, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1, 1073.

[53] T. Nagatani, S. Saito, M. Sato, and M. Yamada (1987) Development of an ultra high resolutiom scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system, Scanning microscopy, 1, 3, 901.

[54] J. Frosien, E. Plies, and K. Anger (1989) Compound magnetic and electrostatic lenses for low-voltage applications, J. Vac. Sci. Technol. B, 7, 6, 1874.

[55] G. F. Rempfer (1990) A theoretical study of the hyperbolic electron mirror as a correcting element for spherical and chromatic aberration in electron optics, J. Appl. Phys. 67, 6027.

[56] J. Zach and M. Haider (1995) Aberration correction in a low voltage SEM by a multipole corrector, Nucl. Instr. Meth. Phys., A 363, 1-2, 316.

[57] G. Schönhense and H. Spiecker (2002) Correction of chromatic and spherical aberration in electron microscopy utilizing the time structure of pulsed excitation sources, J. Vac. Sci. Technol. B 20, 2526.

[58] H. H. Rose (2008) Optics of high-performance electron microscopes, Sci. Technol. Adv. Mater. 9, 014107.

[59] A. Takaoka, R. Nishi, and H. Ito (2015) Low-aberration optics for large-angle beam with unit core lenses, Optik 126, 1666.

[60] S. Hoque, H. Ito, R. Nishi, A. Takaoka, and E. Munro (2016) Spherical aberration correction with threefold symmetric line currents, Ultramicroscopy 161, 74.

[61] M. Born and E. Wolf (1999) Principles of Optic, (Cambridge University Press,

Cambridge, 1999) 7th ed.

[62] S. Okazaki (1991) Resolution limits of optical lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, 9, 6, 2829.

[63] Burn Jeng Lin (2000) New λ/NA scaling equations for resolution and depth-of-focus, Proc. of SPIE, 4000, 579.

[64] K. Kamon, T. Miyamoto, Y. Myoi, H. Nagata, M. Tanaka, and K. Horie (1991) Photolithography System Using Annular Illumination, Jpn. J. Appl. Phys., 30, 11B, 3021.

[65] H. Fukuda and R. Yamanaka (1992) A New Pupil Filter for Annular Illumination in Optical Lithography, Jpn. J. Appl. Phys. 31, 4126.

[66] T. Matsutani, M. Taya, T. Ikuta, T. Fujimura, H. Inui, T. Tanaka, I. Shimizu, Y. Kimura, Y. Takai, T. Kawasaki, and M. Ichihashi (2008) Evaluation of annular pupil for scanning transmission electron microscope formed by focused ion beam technique, Vacuum 83, 1, 201.

[67] T. Kawasaki, T. Matsutani, T. Ikuta, M. Ichihashi, and T. Tanji (2010) Simulation of a hollow cone-shaped probe in aberration-corrected STEM for high-resolution tomography, Ultramicroscopy, 110, 10, 1332.

[68] T. Matsutani, T. Yasumoto, T. Tanaka, T. Kawasaki, M. Ichihashi, and T. Ikuta (2012) Development of electron optical system using annular pupils for scanning transmission electron microscope by focused ion beam, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 272, 145.

[69] A. M. Blackburn (2014) presented at 9th Int. Conf. Charged Particle Optics, 31 August-5 September 2014. Brno.

[70] M. Enyama, K. Hamada, M. Fukuda, H. Kazumi, (2016) Method of improving image sharpness for annular-illumination scanning electron microscopes, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 6S1, 06GD02.

[71] M. Haider, S. Uhlemann, and J. Zach (2000) Upper limits for the residual aberrations of a high-resolution aberration-corrected STEM, Ultramicroscopy 81, 3-4, 163.

[72] C. W. Oatley (1981) Detectors for the scanning electron microscope, J. Phys. E 14, 971.

[73] K. S. Sim, J. T. L. Thong, and J. C. H. Phang (2004) Effect of shot noise and secondary emission noise in scanning electron microscope images, Scanning 26, 36.

[74] L. Frank (2005) Noise in secondary electron emission: the low yield case, J. Electron Microsc. 54, 4, 361.

[75] F. Timischl et al. (2012) A Statistical Model of Signal in Scanning Electron Microscopy, Scanning 34, 137.

[76] S. E. Reichenbach, S. K. Park, and R. Narayanswamy (1991). Characterizing digital image acquisition devices, Opt. Eng. 30, 170.

[77] 佐藤貢 (2013) 走査電子顕微鏡 (SEM) の像シャープネス評価法, 精密工学会誌, 79, 1009.

[78] M. Kimura et al. (2018) Experimental Demonstration of Large Depth of Focus Using Annular Illumination Scanning Electron Microscope, 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference Sapporo, Japan.

[79] M. Enyama, R. Nishi, H. Ito, J. Yamasaki (2023) Low Aberration ExB Deflector Optics for Scanning Electron Microscopy, Microscopy (accepted).

[80] H. Rose (2012) Geometrical Charged-Particles Optics 2nd Edition, Springer Series in Optical Sciences 142 (Springer, Berlin).

[81] H. Murata et al. (2010) In-Situ, Real Time Observation of Operating Condition of Multi Emitters in Pulse Mode, e-J. Surf. Sci. Nanotech. 8, 266-271.

[82] T. Aoyama et al. (2011) Selective Backscattered Electron Imaging of Material and Channeling Contrast in Microstructures of Scale on Low Carbon Steel Controlled by Accelerating Voltage and Take-off Angle, ISIJ International 51, 9, 1487-1491.

[83] T. S. Krasienapibal et al. (2019) Fast Evaluation of Microstructure-Property Relation in Duplex Alloys Using SEM Images, MRS Advances 4, 19, 1101-1107.

[84] T. Otsuka et al. (2014) SEM Images Obtained with an Energy and Takeoff Angle Selective Detector, e-J. Surf. Sci. Nanotech. 12, 279-282.

[85] I. Müllerová, I. Konvalina, and L. Frank (2007) Acquisition of the Angular Distribution of Backscattered Electrons at Low Energies, Mat. Trans. 48, 5, 940-943.

関連発表

学術論文

1. Momoyo Enyama, Makoto Sakakibara, Sayaka Tanimoto, and Hiroya Ohta (2014) Optical system for a multiple-beam scanning electron microscope, J. Vac. Sci. Technol. B, 32, 5, 051801.
2. Momoyo Enyama, Koichi Hamada, Muneyuki Fukuda, and Hideyuki Kazumi, (2016) Method of improving image sharpness for annular-illumination scanning electron microscopes, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 6S1, 06GD02.
3. Momoyo Enyama, Ryuji Nishi, Hiroyuki Ito, and Jun Yamasaki (2023) Low Aberration ExB Deflector Optics for Scanning Electron Microscopy, Microscopy (accepted).

国際学会

1. Momoyo Enyama, Makoto Sakakibara, Sayaka Tanimoto, and Hiroya Ohta (2012) Separate Collection of Multiple Secondary-electron Signals of Multiple-beam Scanning Electron Microscope, 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, P169-068, 2012.
2. Momoyo Enyama, Koichi Hamada, Muneyuki Fukuda, and Hideyuki Kazumi (2015) Method of Improving Image Sharpness for Annular-Illumination Scanning Electron Microscopes, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 12A-6-3.

国内学会

圓山百代, 榊原 慎, 谷本 明佳, 太田 洋也 (2012) マルチビーム走査電子顕微鏡の電子光学系の提案, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12a-C12 3.

特許

1. 特許第 6470654 号: 荷電粒子線装置, 発明者: 圓山百代 福田宗行 数見秀之 浜田宏一 谷本明佳.
2. 特開 2022-109925 号: 電子ビーム観察装置、電子ビーム観察システム、電子ビーム観察装置における画像補正方法及び画像補正のための補正係数算出方法, 発明者: 浜田宏一 木村愛美 圓山百代 弓場竜 榊原慎 酒井計 山口聡 瀬戸口勝美 白井真純 高杉容徳.
3. 特許第 7150993 号: 荷電粒子線装置, 発明者: 圓山百代 榊原慎 川野源 太田洋也.