

EOS津野
 Contact to:
 tsuno6@hotmail.com

ここでは収差補正法のいろいろについて解説します。普通は、式の展開をフォローして 勉強するのですが、私の方法は、式の解き方を覚えても実際の設計に役立たないことが多いので、シミュレーションで大体の理解を得て、次は自分でいろいろ考えることによって理解を深めて行くことの二つの方法で問題を解決していくものです。

- 第1章・電子レンズの球面収差と色収差
- 第2章・シェルツァーの前提
- 第3章・4-8極子による球面収差Cs補正
- 第4章・4極子による色収差Cc補正
 - .4.1・電場・磁場4極子による色収差Cc補正
 - .4.2・リターディング法電場4極子による色収差Cc補正
- 第5章・Hexapoleによる球面収差Cs補正
- 第6章・Mirrorによる球面収差Cs、色収差Cc補正
- 第7章・Wien Correctorによる球面収差Cs色収差Cc補正

第1章・いろいろな収差補正法

球面収差は図1-1に示すように、物体の一点から出たビームがレンズで収束した時に完全に一点に集まらずにある広がりを持つことを言います。この時、図に示すように、大きな角度で出たビームが小さな角度で出たビームよりも早く収束するとき正の球面収差と言います。

光のレンズと電子のレンズの違い

ところで、光に対する軸対称なレンズには、凸レンズも凹レンズもあります。でも、電子には凸レンズしかありません。このことはよく知られています。しかし、どうして電子のレンズでは凹レンズが作れないのかという理由はあまり考えられていません。当たり前のこととして受け入れられているようです。正確に言うと、軸対称な場を用いた電子レンズには、最終的に凸レンズとなる条件のもとで、負の球面収差を作る条件がないと言わなければなりません。軸対称とは回転対称とも言いますが、ガラスのレンズでよく見かけられるように丸いレンズのことで、電子レンズでも凹レンズはありますが、後で示すように、電子は直接目で見ることが出来ないために、どうしても凸レンズ出ないと役に立たないのです。電子レンズで負の球面収差を持つ凸レンズがない理由は、光のレンズは透明であるため光がレンズの中を通ることが出来るのに対して、電子レンズは電子に対して不透明なのでその通り道に穴を開けなければならないことによると言うことができます。

光のミラーと電子ミラーの共通性

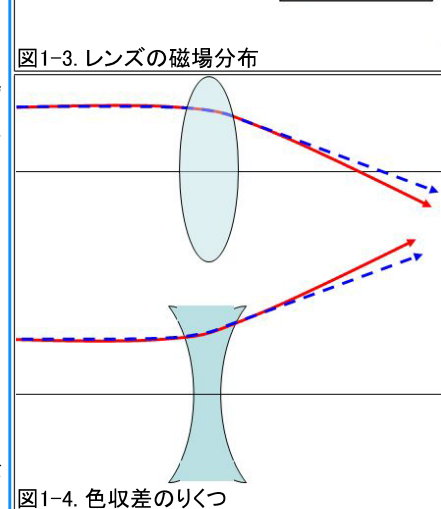
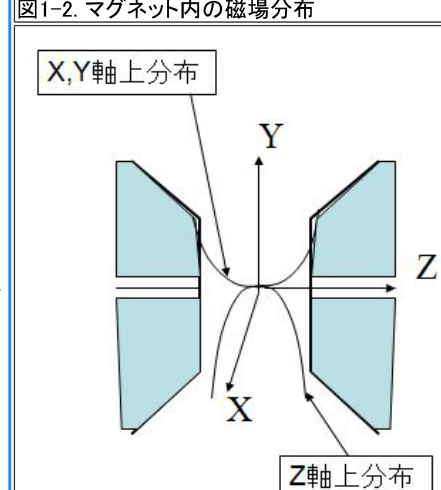
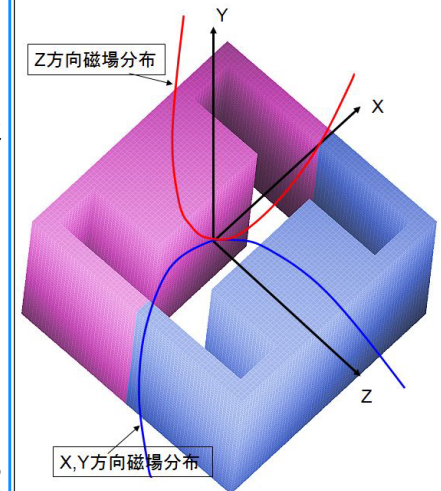
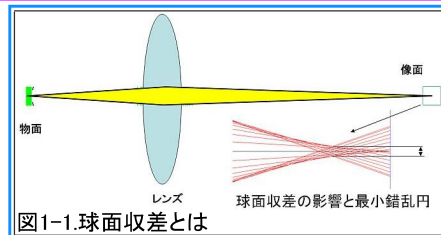
このことは、鏡について考えてみるとうなずけます。鏡は光を反射しますから、透明ではありません。実は、電子に対しても鏡の作用をするものがあります。電子に対する鏡の場合も鏡は光を反射しますから鏡に穴もあけなくても使うことができます。そして、光に対して鏡が負の球面収差の場合も正の球面収差の場合も収束できるのと同じように、電子のミラーも負の球面収差の条件でビームを収束させることが出来ます。このように考えると、電子に対する軸対称な場を持つレンズが負の球面収差を持つ凸レンズになれない理由が電子レンズが透明でないことによるのだという考えがますます本当らしく見えてきます。

電磁石の場の分布

ここで、普通の物理の実験などで使われている電磁石の磁場分布を見てみましょう。というのは、電子に対して使うレンズで最も一般的なのが電磁石だからです。ですから、電磁石を知ることが電子レンズを知るためには必要なのです。磁場は、磁極から磁極へ向かう方向であるZ軸では、磁極表面の場が最も強く、磁極の中心に向かうにつれて弱くなります。これは直感的に理解できますね。一方、磁極の面に沿った方向、すなわちX,Y方向では、ギャップ中心の磁場が最も強く、中心から離れるにつれて弱くなります。これは、感覚的にはわかりませんが、Laplace方程式からの要請で、Z方向の分布とX,Y方向への分布はいつも逆になっています。この辺は、電磁気学の本に、式で書いて説明してあります。

レンズの場の分布

しかしながら、電子を通すためにいったんポールピースに穴を開けると、事情は一変します。もはや中心軸上で場は最大ではなくなるのです。なぜなら、穴のために磁極や電極は中心軸上には存在しないからです。場の強さは中心軸上でもっとも弱く、軸から離れるにつれて強くなります。それでは次に、磁場の強さとレンズ作用の関係について考えてみましょう。中心軸付近は磁場の強さが弱いので、そこを通るビームに対するレンズ作用は弱くなります。一方、穴の周辺は中心部より磁場が強いので、周辺を通るビームに対するレンズ作用は強くなります。したがって、周辺のビームの方が中心よりも早く収束します。この状態が正の収差係数と定義されています。この考え方が正しいとすると、穴のないレンズが存在すれば、負の収差をもつことが期待されます。ミラーは、片側(ミラーの面)でこのことが実現していますので、負の収差を作る事が出来るわけですね。





いろいろな高さの電子について描いたものを収差図形と呼びます。

電子ビームはこの図の場合最初にZX面でフォーカスし、YZ面では広がっています。つまり、ZX面では凸レンズですが、YZ面ではビームが発散していますから凹レンズになっているのです。4極子というのはこのようにある方向で凸レンズとして働くとこれと直交する方向では凹レンズになるという性質があります。このほかに、円筒レンズというものがあり、その場合は、ZX面で凸レンズ、あるいは凹レンズ作用をしても、ZY面ではなんのレンズ作用も持たないという性質があります。ガラスのレンズでは、円筒レンズは見たことがあるかもしれませんが、4極子レンズに相当するものは光のレンズではあまり見かけないかもしれません。

4個の4極子のちょうど中間で電子ビームはいったん丸くなります。そして次の3番目の4極子のところで、今度はZY面内でフォーカスし、ZX面内で発散します。両方向のビームは、4番目の4極子によって形を整えられて、再び丸いビームとなって外に出ていきます。

ここまでの過程では何も負の収差の補正はやっていません。これは負の収差作りのための土台を準備しただけなのです。次に、負の球面収差をどのようにして作るのかをお話します。

8極子というのは、左の図のように、8本の極が中心を向いた構造をしています。ここに書いたものは8つの極に電圧をかけて8極子電場を作る方法で作ったものですが、コイルに電流を流して磁場の8極子を作ることもできます。電場の場合で考えてみますと、プラス極の隣はマイナス極になります。ちょうど向かい側の極はいつも同じ極です。これが8極子の特徴になります。

さて、プラス電極が向き合った極に入ってきた電子と、マイナス極が向き合った位置に入ってきた電子を見てみましょう。電子の電荷はマイナスですから、プラスの極には引っ張られて電子は外側に振られます。前に見たように、電極の近くに行くほど電場は強く、中心軸の近くほど電場は弱くなりますから、入ってきた電子のうち中心付近に入ってきたビームは少ししか曲げられず、外側に入ってきた電子はたくさん曲げられます。外側に曲げられたビームを中心軸まで外挿してみますと、外側のビームが内側のビームより前の方で軸に交わることがわかります。

一方、両側がマイナスの極について考えてみますと、電子はマイナスの電荷をもっていますから負の電極から離れようとして、このため収束作用が働き、フォーカスしますが、ここでも、光軸から離れた電極に近いビームは強い場の影響を受けて、強いレンズ作用を受け、中心に近いビームは、弱い電場のため、弱いレンズ作用を受けて、外側のビームよりも後でフォーカスします。

つまり、プラス極が向かい合ったところでは、凹レンズ、マイナス極が向かい合ったところでは凸レンズとなります。ということで、8極子を使えば、円周方向に凸レンズと凹レンズが4回ずつ繰り返すこととなります。このことが最初の図でZY面ではフォーカスしており、ZX面では広がったビームを作っていたり、またその逆になったりしている基本軌道を必要とする理由です。

4-8極子によるCs補正

球面収差というのは軸対称な収差です。しかし、8極子の作る収差は軸対称ではないので、球面収差を直接には作りません。軸対称でない場合の球面収差に対応する収差は開口収差と言います。開口というのはアパーチャーによって角度を制限することを意味しています。

この非軸対称レンズの開口収差はどう書き表されるのでしょうか。開き角 x 、 y 方向にそれぞれ α 、 β としたとき

$$\Delta X(Zix) = CA30 \alpha^3 + CA12 \alpha \beta^2$$

$$\Delta Y(Ziy) = CA21 \alpha^2 \beta + CA03 \beta^3$$

CA30, CA12, CA21, CA03という4つの開口収差があります。この4個の収差の大きさを一致させればそれをCsとみなすことが出来るわけです。これらの4つの値のうち、CA12とCA21は入射ビームの角度が同じければ同じ値となるので、独立な開口収差は3個になります。

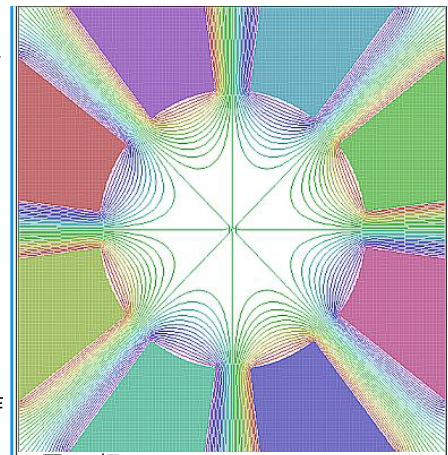
Scherzerの提案による8極子Cs補正

最初の図に示したような4つの4極子が作る軌道の上に置いた8極子を使って球面収差を補正する方法をScherzerが提案していました。その概要は、

Y軸とビームの交差位置で α^3 項を補正、
X軸との交差位置で β^3 項補正、
Stigmatic条件($Zix=Ziy$, $Mx=My$)で、 $CA12=CA21$ となるので、
ビームとX、Y軸との距離が等しい位置で $\alpha \beta^2$ と、 $\alpha^2 \beta$ 項を補正。

というものでした。このCs補正法は、その後の8極子によるCs補正の基本原則となり、いまでもこの方法によって補正が行われています。ただ、上では4つの4極子を用いた軌道を示しましたが、ここまで行き着くには数十年の歳月を要したので、最初は、円筒レンズなども用いられていました。

球面収差補正が4極子ではできずに8極子を使わなければならない理由は、斜め方向の開口収差、CA12、CA21が4極子では作れないことによるものです。8極子を使って初めて、斜め方向にも極を持ち、そちらの方向の収差が作れるわけです。



3-図2. 8極子。

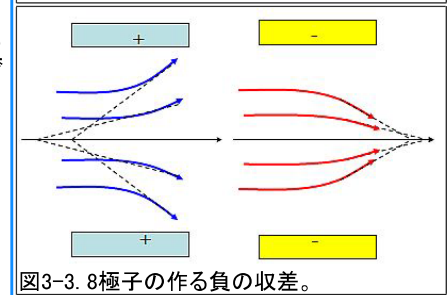


図3-3. 8極子の作る負の収差。

4-8極子を用いたCs, Cc補正の歴史

4極子8極子を使ったCs補正の歴史は次のように描くことができます。

1947 O. Scherzer 円筒レンズと8極子レンズによるCs補正
 1953 R. Seeliger, O. Scherzer 円筒レンズ+8極子+Round Lens+8極子+円筒レンズ+8極子
 1956 G.D. Archard 4-8極子
 1964 J.H. Deltrap, 4-8極子
 1972 M.G.R. Thomson 4-8極子
 1974-77 V.D.Beck, A.V. Crewe, 4-8極子実験
 1979 H. Kooops 4-8極子, TEM
 1983 岡山 4極子+開口電極
 1995 J. Zach, M. Haider 4-8極子実験成功
 1999 O.L. Krivanek 7段4-8極STEMによるCs補正成功

最初はもちろんシュルツァーによる提案ですが、それを実際に実験したのは Seeligerでした。シュルツァーの提案は実は4極子を使うものではなく、円筒レンズを使うというものでした。円筒レンズは、XあるいはY方向だけにレンズ作用を持っており、それと直交する方向にはレンズ作用のないものです。実際には、レンズ作用がないものは作れず、レンズ作用の大きさにX,Y方向で大きな違いが出る、つまり大きな非点をもったレンズが作られたわけです。

最初はドイツでしたが、次に、現われたのは英国はケンブリッジの人たちでした。この伝統のうちにKrivanekのSTEM用補正装置として、商用機にまで搭載されることになるわけですが、その実現までには長い空白期間がありました。

現在の装置につながる4-8極子のもとを作ったのが、このCambridgeのDeltrap でした。彼の論文を見ていくと、Seeligerの装置から次第に変化していく途中の過程を見ることができます。よく、文科系の仕事では原典に当たることの重要性が説かれますが、科学の仕事では、特に原著論文に当たる必要性というのは叫ばれません。ただ、どうしてこういう形になったのかなといった疑問に答えてくれる一つの方法が 原著論文の図をざっと見てみることもかもしれません。もう一つ、装置に関する解説は装置を良く知っているメーカーの人が書いている場合は少ないという事情もあります。装置の詳しいことは、原著論文にしか書いてないというのが本当のところでは、実は、新しい装置を作ろうとしたときに一番参考になるのは、ドイツで書かれた博士論文なのです。雑誌に発表される論文には概要しか書いてませんが、博士論文には詳しい図が載っています。

話がそれてしまいました。Deltrapに戻りましょう。次のステップは、アメリカにわたります。Creweという人は、電子顕微鏡をやっている人たち、特に、装置作りをしている人たちにとっては偉大な人の一人です。彼は、電界放射型の電子銃を作り、STEMという走査透過型の電子顕微鏡の分解能をうんと高めた人として知られています。

Creweは、STEMの分解能をさらに上げるために、収差補正に入って行きました。実際に装置を作ったのがBeckです。しかし、Creweは、やがて4-8極子による補正をやめ、後でお話する、6極子を用いたCs補正に方針転換をします。

その後のKooopsは、Csだけでなく、Cc補正の方法にも立ち入りました。日本の岡山も、その上司の川勝とともに、70年代に4-8極Cs補正の理論と実験をやっています。かれは、8極子の作成精度がその当時実験的成功を妨げる元になっているとして、独自の4極子+ラウンドレンズの組み合わせで8極子場を発生させるという独特の方法を考案し、1990年には実験的成功を報告しています。しかし、実際に商業生産された収差補正装置は、その4年後にドイツで発表されたものを採用してしまいました。1994年にドイツのZachが4-8極子をSEMに応用し実際にSEMの分解能向上を果たしたというニュースがドイツの国内学会で発表されました。このニュースを聞きつけて、たまたま日本で開催された荷電粒子光学(CPO)の国際会議にZachを招待したことが、その後の収差補正装置がブームになる端緒を開きました。その後Krivanekによって開発された4-8極子によるCs補正がSTEMに搭載されて、広く販売されるようになりました。

コンタクト・質問は、[こちらまで](mailto:tsuno6@hotmail.com)♪EOS津野”tsuno6@hotmail.com”

**EOS津野の
電子光学講座**
tsuno6@hotmail.com

SEMなどの加速電圧の低い装置では、分解能の 実質的な向上には、球面収差補正よりも色収差補正が重要です。最終段レンズは、凸レンズでなければならないというシュルツァーの定理から、凹レンズを付け加えただけでは、色収差補正ができません。凸レンズと凹レンズの組み合わせで、凹レンズの作る負の色収差に凸レンズの作る正の色収差を加えて、実像を作るとともに収差は凹レンズの作る負の色収差の方が大きいと言う状況を作らなければならないという点で大きな山がありました。

第4章・4極子による色収差係数Cc補正

色収差は、レンズ作用がエネルギーの高いビームに対してよりもエネルギーの低いビームに強く働くことで生じます。左の図で青の点線は赤の実線よりも高いエネルギーの場合を表しています。エネルギーの弱いビームである赤線の方が強いレンズ作用を受けて早く収束し、中心線(光軸)と交わっています。この場合を正の軸上色収差Ccがあるといえます。

上の定義に従うと、上の図のような凸レンズ(収束場)は正の色収差、左の図のような凹レンズ(発散場)は負の色収差を作ることになります。というのも、両直線を延長して光軸と交わる点を求めると、赤の方が先(右)に来るからです。

色収差補正を行うためには凹レンズを準備しなければなりません。しかし、前に説明したシュルツァーの前提の中に、レンズの物面も像面も実空間になければならないという決まりがありました。このことから、凹レンズ単独では収差補正の条件を満たされないということになります。凹レンズによって負の色収差を作っても、それは虚像を作るだけだからです。

本当の意味で負の色収差を作るためには、凸レンズと凹レンズを組み合わせた上で凸レンズの作る正の収差を凹レンズが作る負の収差が上回るようにしなければなりません。しかし、普通のレンズでは左の図に示したように、やっぱり正の収差が勝ってしまいます。どうすれば左のようなレンズ配置でありながら負の収差が正の収差を上回ることができるでしょうか。

それは、球面収差Cs補正のときと同じ4段の4極子を用いることによって実現で

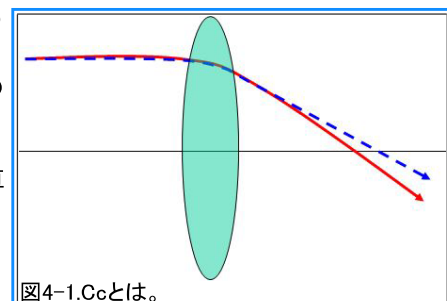


図4-1.Ccとは。

きたのでした。もう一度、四段の4極子が作る基本軌道を見てみましょう。

XZ面の電子の軌道と、YZ面の電子の軌道が違う振る舞いをしています。4極子はX方向が凸レンズの時、Y方向は凹レンズになります。この厄介な性質も、それを四段組み合わせてやれば、最終的に丸いビームに戻してやる事ができます。真ん中の段に、所々の位置における収差図形を示してあります。

電子ビームはこの図の場合最初にZX面でフォーカスし、YZ面では広がっています。つまり、ZX面では凸レンズですが、ZY面ではビームが発散していますから凹レンズになっているのです。

4個の4極子のちょうど中間で電子ビームはいったん丸くなります。そして次の3番目の4極子のところで、今度はZY面内でフォーカスし、ZX面内で発散します。両方向のビームは、4番目の4極子によって形を整えられて、再び丸いビームとなって外に出ていきます。

ここまでの過程では何も負の収差作りはやっていません。これは負の収差作りのための土台を準備しただけなのです。次に、負の色収差をどのようにして作るのかをお話します。

4極子の作る負の色収差

さて、4極子は、一方で凹レンズ作用をさせると他方で凸レンズ作用をしてしまうので、上の基本軌道に示したように、X方向の軌道が最大になったところで、Y方向の軌道を光軸を通してX方向にだけ4極子の効果が効くような基本軌道が必要だったわけです。ここまでは、8極子を使ったCs補正と同じ考えです。しかし、この基本軌道を見てわかるように、軌道が最大値を示しているところでは、レンズ作用は凸レンズになっています。つまり、ここではせっかく色収差を作っても、それは正の色収差になってしまいます。しかし、この位置で凹レンズを置けば、ビームはさらに発散してしまうだけで、基本軌道から逸脱してしまします。

この点が色収差補正の難しいところで、色収差を作る4極子は、フォーカス作用も持っているため、収差の生成とフォーカスが混ざってしまうのです。これに対して、球面収差Csの補正のときには、収差と、フォーカスが独立にコントロールできたためにわかりやすかったわけです。

4極子によるCc補正の2つの方法

四段の4極子の2, 3番目の4極子は収束場ですが、ここに同時に負の色収差を持つ発散場を作り、これを収束場のもつ正の色収差より大きな値にすることが必要になります。このような方法は、実は2つ提案され、いずれの方法も実験的な成功をおさめています。

a. 電場4極子と磁場4極子を組み合わせ、収差の大きい電場を発散、磁場を収束に使い、全体としては収束だが、電場の大きな負の収差を残すことで負の収差を作ります。

b. 4極子全体を電場で作り、リターディングレンズ作用を持たせ、2,3番目の4極子のそれぞれを3段構成とし、両側を正の収差を作る収束場、真中に負の収差を作る発散場を置き、リターディングをかけることで、発散場のレンズを弱い場の中に置くことで大きな収差を作らせることができます。

コンタクト・質問は、[こちら](mailto:tsuno6@hotmail.com)まで♪EOS津野"tsuno6@hotmail.com"

<p>EOS津野の電子光学講座 tsuno6@hotmail.com</p>	<p>一般的に電場レンズの方が磁場レンズより大きな収差を持ちます。これを利用して、電場4極子と磁場4極子を重畳させ、レンズ作用としては、磁場の方を強くして収束レンズとしながらも、発散レンズ作用を行わせる電場レンズの負の色収差が収差としては残るようにしたのが電場磁場重畳型の色収差補正です。Koopsのアイデアから20年の後にZachが実験的な成功を収めました。そして、商品化まで再び10年の歳月を要しました。市場からは一般のSEMつまり汎用SEMではあまり人気がありませんが、半導体検査用のCD-SEMでは数台/年程度の割で需要が出ているようです。ただ、水面下では、ほとんどのSEMメーカーは必死でその技術の取得と自分たちの販売しているSEMへの搭載を狙っています。透過電子顕微鏡TEMでは、Cs補正が一段落し、色収差補正がホットな段階となっています。</p>
---	--

第4-1章・電場磁場重畳4極子による色収差係数Cc補正

1. Cc補正のための基本軌道には4個の4極子を用いる。
2. 最初の4極子でx方向とy方向の軌道を分ける。
3. 2個目の4極子はx方向収差を作るが、y方向は光軸付近で収差は生じない。
4. 3個目の4極子はy方向収差を作るが、x方向は光軸付近で収差は生じない。
5. 4個目の4極子で2つの軌道を一致させる。
6. 2,3個目の4極子は、凸レンズなので、発生する色収差は正である。
7. 負の色収差を作るには、反対向きのレンズ作用を行わせる必要がある。
8. 電場4極子を第2,3の4極子に重畳する。発散レンズの色収差は負。
9. 磁場4極子で発散レンズ重畳で乱れたフォーカスを調整。この色収差は、凸レンズなので正である。
10. 電場4極子の電圧を逆向きに加えて、フォーカスを戻すように調節する。このとき、電場4極子が作る色収差は負になる。

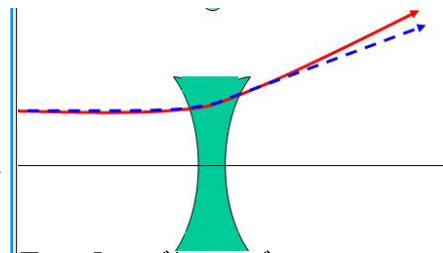


図4-2. 凸レンズと凹レンズ。

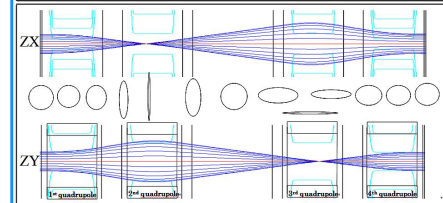


図4-3. 4-8極子の軌道。

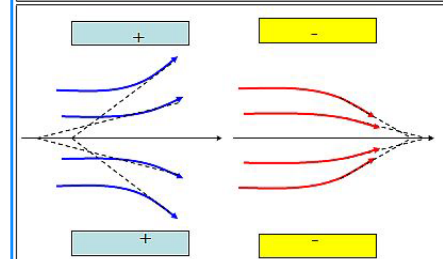


図4-4. 8極子の作る負の収差。

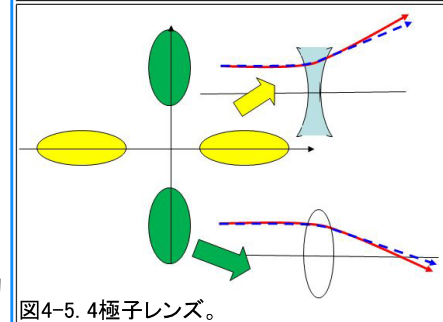


図4-5. 4極子レンズ。

11. 電場4極子の作る色収差は、磁場4極子の作る色収差の倍あるので、差し引き、電場4極子の作る負の色収差が残る。SEMを補正対象としているため、中心面对称を放棄した系になっている。Roseが進めているTeam projectでは、再び中心面对称を入れた系に戻っているが、Koopsの系に比べてずっと複雑になっているのは、対象がTEMではなく、Lithography装置を想定していたために像面湾曲や非点収差にも配慮したためである。Zachが実験的成功を収めるために、最初はより簡単な系で実験した方が良いと判断したことが、中心面对称を放棄した理由と考えると納得できる。

Koopsの5段磁場4極+2段電場4極子は、30kVのTEMに搭載され、Ccを1.5mmから0.1mmに減少させたと報告されています。これは、1978年のことで、Zachの実験的成功が1995年であったことからその20年も前のことです。収差補正はドイツやイギリスばかりではなく日本でも行われていました。岡山によるCs補正の成功は1990年でした。しかし、これも注目を集めなかったことと合わせ、時代がまだそれを要求していなかったことと、商品化の動きがなかったこと、国家プロジェクトが立ち上がっていなかったことなど原因はいくつか考えられます。しかし、Koopsの方法は、ZachがSEMで成功した方法に4極子を一段増やして、TEMでも使えるよう軸外収差にも配慮した対称な電子軌道を取る系が採用されていたのです。

1979 H. Koops 4-8極子, TEM

1995 J. Zach, M. Haider 4-8極子実験成功

文献 J. Zach, Design of a high-resolution low-voltage scanning electron microscope, Optik, 83 (1989) 30-40. J. Zach and M. Haider, Correction of spherical and chromatic aberration in a low voltage SEM, Optik, 98 (1995) 112-118. W. Turnbull, Direct spherical and chromatic aberration correction for charged particle optical systems, J. Vac. Sci. Technol. B22 (2004)3560-3564

コンタクト・質問は、[こちらまで](mailto:tsuno6@hotmail.com)♪EOS津野"tsuno6@hotmail.com"

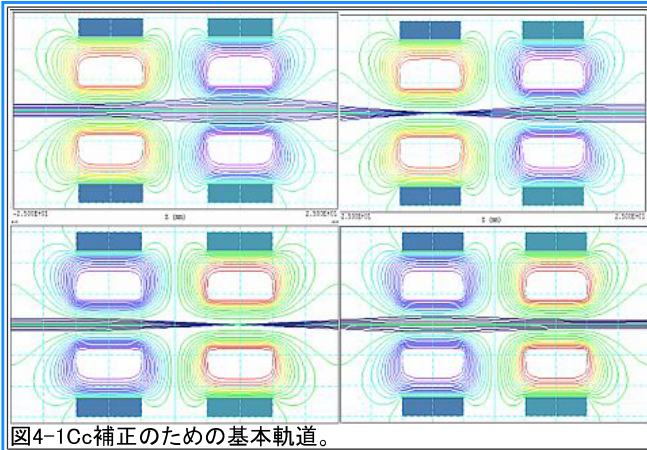


図4-1Cc補正のための基本軌道。

**EOS津野の
電子光学講座**
tsuno6@hotmail.com

Cc補正は低加速電圧のSEMやイオン装置などで重要と考えられています。高加速電圧のTEMでは、Cs補正が軌道に乗ってきたために、Cc補正の重要性が増しています。Cc補正は凸レンズと凹レンズを組み合わせて、凹レンズの作る色収差を凸レンズのそれより大きくする工夫が必要です。これを行うのに電場レンズと磁場レンズを組み合わせることは有効でしたが、電場だけを使って行うこともできます。それはリターディングと言って、ビームの加速電圧を変化させる方法です。

第4-2章・リターディング法電場4極子による色収差係数Cc補正

磁場を使わない収差補正装置への要求

磁場を使うことによる不都合があります。

1. イオンビームの場合に磁場の値が大きくなってしまいます。
2. 検査装置などではヒステリシスの影響による再現性のなさを嫌う場合があります。

そこで、磁場を使わない全静電型収差補正器はFIB, 低加速電圧SEMに便利と考えられています。

さて、色収差補正を行うには、最終的に実像を作る系で負の色収差を作らなければなりません。凸レンズの間に凹レンズを挟む系を軸対称から外れた系で作る必要があります。(軸対称系はScheizerの法則から色収差は正)しかも、凹レンズの作る色収差を両側の凸レンズの色収差よりも大きくしなければなりません。

この要求を満たすために、再び、4組の4極子を使って負の色収差を作ります。

最初の4極子でx方向とy方向の軌道を分けます。

次の4極子ではx方向で収差を作りますが、y方向の軌道は光軸付近を通し、収差を作らせないようにします。

3個目の4極子には、y方向の収差を作りますが、x方向の軌道は光軸付近で収差を生じさせません。

最後の4極子で2つの軌道を一致させます。

ここで、磁場・電場重畳型4極子の場合と異なるのは、2~3番目の4極子は一個ではなく、左の図に示したような3個組のペアとなり、前後の4極子と真ん中の4極子に全体として加える電圧を変えて、電子の速度を変えてやります。

つまり、低電圧下で作られる色収差は高電圧下で作られるそれより大きいので、凹レンズを低電圧下に持ってくるわけです。減速・加速レンズと電場4極子を重畳させます。文献 C. Wei β backer, H. Rose, Electrostatic correction of the chromatic and of the spherical aberration of charged-particle lenses (part I), J. Electron Microsc. 50 (2001) 383-390, (part II), J. Electron Microsc. 51 (2002) 45-51.

この文献では、軸外収差をなくすための対称な軌道を作る方法が述べられています。

D. Maas, S. Henstra, M. Krijn, S. Mentink, Electrostatic aberration in low voltage SEM, Proc. SPIE vol. 4510 (2001) 205-217.

この文献では、上の方式と大きく異なる方式が述べられています。こちらは、Archardの基本系に戻り、それを出発点として、別の基本軌道が採用されています。ここでは、倍率色収差の影響を受けない新しい補正装置が提案されています。

この倍率色収差の原因は、コレクター c_1 , c_2 の補正に使っていない方の軌道での収束作用に起因していると考えられています。この収差を除くために、単極及び4極子を何段か用いて軌道を何回か振動させています。しかし、非補正面で強いフォーカス作用を受けることは変わらないので、この面で、軌道を反対称となるようにし、結局何もフォーカス作用を受けずに出てくるように工夫しています。

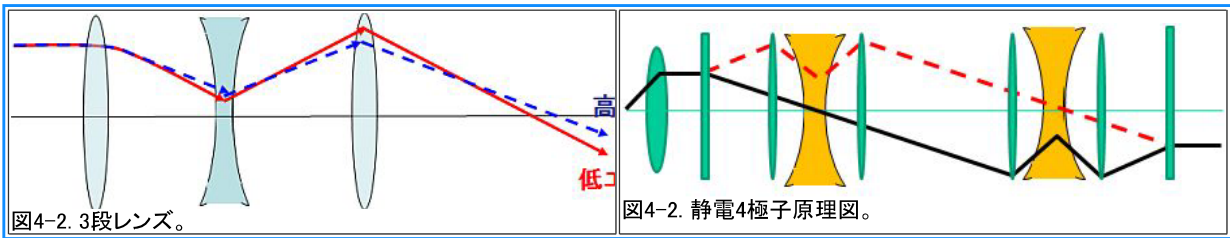


図4-2. 3段レンズ。

図4-2. 静電4極子原理図。

コンタクト・質問は、[こちら](#)まで♪EOS津野"tsuno6@hotmail.com"