



Hitotsubashi University
Institute of Innovation Research



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

サイエンス・イノベーションとしてのウィーン フィルタ¹

2013年3月26日

一橋大学イノベーション研究センター 津野勝重

¹本論文は、科研費基盤Sプロジェクト「産学官連携によるイノベーション過程の研究」の成果の一部として作成された。作成に際しては、同プロジェクトの主査である中馬宏之教授に大変お世話になった。特に、ウィーンフィルタの歴史を調べるための文献調査に際しては、ご配慮頂いた同センターの米元みや助手の協力が不可欠であった。また、ウィーンフィルタのビームセパレータへの応用に関しては、日立の CD-SEM を調べておられた中馬先生 (<http://pubs.iir.hit-u.ac.jp/admin/ja/pdfs/show/1589> 参照) の協力なしにはここまで深くは調べる事が出来なかった。また、ドイツ・チュービンゲン大学の Professor Dr. Elich Plies からも教わる事が多かったことを記して感謝の意を表したい。

サイエンス・イノベーションとしてのウィーン フィルタ

一橋大学イノベーション研究センター

津野勝重

tsuno@iir.hit-u.ac.jp

1. はじめに

ウィーンフィルタはイオンや電子線装置に取り付けて、質量分析やエネルギー分析をする装置であると一般には認識されている。質量分析の分野では質量によってイオンの種別を分離するに先立ってビームの速度を一定の範囲に制限するための速度フィルタとして用いられ、あるいはそれ自身で真空の漏れ探しのためのリークデテクターなど簡単な質量分析器としても利用された。一方、電子線の分野では、高エネルギー分解能の得られる分析装置として登場したが、最近では電子ビームの進む方向を振り分けるビームセパレータ、電子の持つ磁氣的性質であるスピンの向きを回転させるスピン回転器など幅広い応用に広がりを見せている。

私が初めてウィーンフィルタの製作に取り組んだのは 1986 年のことである。ウィーンフィルタを電子顕微鏡上に取り付けて微小領域での高分解能エネルギー分析装置を開発する仕事であった。これは、東北大学の田中通義先生と私の勤め先であった日本電子株式会社が共同で行うことを取り決め、私がおその担当者となったことから始まったものである。

以来、色々なウィーンフィルタ製作をして今日まで来たが、この最初からずっと疑問に思ってきたことがあった。それは、ウィーンフィルタはドイツの有名なノーベル賞物理学者 Wilhelm Wien が²1898 年に発明したものであるということを知っていたが、この 1898 年という年は、電子発見の 1897 年の翌年でもあり、X 線の発見はわずか 3 年前の 1895 年、質量分析装置は 1910 年、電子レンズの理論が明らかになったのは 1926 年、電子顕微鏡の発明は 1931 年ということを考えると、なぜイオンや電子のエネルギー(速度)を分析できる装置が、1898 年と言うその他の装置と比べて飛びぬけて早い時期に発明されたのかという疑問であった。

ウィーンフィルタ発明からすでに 110 年を超える歳月が流れているが、この度、初期のウィーンフィルタに関する文献調査をさせていただいて分かったことは、ウィーンフィルタは、その発明から今日までの半分の歳月を空費したと言っても過言ではないということだ

²以後、Wien その人を指すときは Wien と欧文で記し、装置を意味するときはウィーンフィルタとカタカナで記すことにする。

ある。1960年代までの60年間の使い道は、質量分析装置の前段階に速度フィルタとして取り付けられるといった程度の利用が高々数件、他の場合と一緒に理論が数件発表されていたに過ぎない。ウィーンフィルタはその発明から60年を経てようやく同じドイツの著名な電子線物理学者である Boersch によって花開いたのである。早すぎた発明と長い空白、技術は周辺の技術が出そろって初めて出番が来ると言うことであろうか。この点は電子レンズの収差補正にも当てはまる。負の収差を示すレンズの条件が1936年、収差補正方法の提案が1947年になされていたものの、実験的な成功はそれから約半世紀を経た1994年であった。収差補正の場合は理論と実験的成功の間の時間であるが、ウィーンフィルタの場合は、実験で使われた最初の発明から本格的利用までの歳月である。

私はウィーンフィルタを使ったエネルギーアナライザ製作の後、1990年からLEEMという低加速電圧の反射型電子顕微鏡の製作に取り組んだ。この装置にはビームセパレータと呼ばれる入射ビームと反射ビームの進む方向を振り分ける装置が必要であった。欧米で作られていたLEEM装置では、ほとんどセクター磁石と呼ばれる磁場を利用したビームセパレータが用いられていた。しかし、私が作るように言われたLEEMにはウィーンフィルタをビームセパレータとして使うように最初から指示されていた。丁度この時代、日立製作所では測長SEMの検出系の一部としてウィーンフィルタが使われ始めていた。今では、世界の中でウィーンフィルタをSEMとLEEMのビームセパレータとして使っているのは日本だけである。

私は日本電子を退職後個人事業として、電子光学のコンサルティング、機器の光学シミュレーション、その光学系の設計などを行う事業を始めた。そこで今日までに依頼が入る半分かそれ以上がウィーンフィルタを含む装置であった。これは単に得意分野に依頼が集中し、他の装置は他の人に行くだけのこともかもしれない。利用の仕方も上で述べたモノクロメータ・アナライザとビームセパレータの他にスピン回転器が含まれている。ウィーンフィルタは発明から110年を経て、ようやくその時代を迎えつつあると言うことであることを願っている。

この度、Wien フィルタについての歴史を含めた技術の発展を調査する機会を与えられたのを機に、長年の疑問に対する答えを見つけないかと思っている。

2. ウィーンフィルタの発明とその前後

およそ百数十年前、すでにカソードレイと呼ばれた電子線の存在が知られていた。この頃、真空はガラス管の中の空気をポンプで引いて作られていた。この真空にしたガラス管の中に電極を二本入れ、その電極の間に高い電圧をかけると電極間に雷のようなものが走って

輝くことが知られていた³。これがカソードレイと呼ばれた電子線である。カソードレイオッシログラフという言葉があったので、オッシロスコープのように電子回路の状態を調べるのに使われていたのかもしれない。そこまではいかずに、単に真空中を走る稲妻のようなカソードレイの性質を調べていただけかもしれない。カソードレイはやがて電子線と呼ばれるようになる。イオンの場合はカナルレイと呼ばれていた。カソードレイは、負の電荷を帯び、カナルレイは正の電荷を帯びていた。

イギリスのケンブリッジ大学にキャベンディッシュ研究所と言う物理学の研究所がある。ここに J.J.Thomson がいた⁴。J.J.Thomson は 1897 年に電子を発見したことで知られている。電子の流れであるカソードレイはこの年より前から知られていたにも拘らず、なぜ Thomson が電子の発見者と考えられているかという理由は、次のとおりである。Thomson は電子の軌道が観測できるようにウィルソンの霧箱を用意し、電場をかけて電子の進む方向を曲げ、次に磁場をかけてまたビームを曲げ、両者の比較から電子の電荷 e と、質量 m の比率 e/m の測定に初めて成功した [Thomson 1897] からである。実は Thomson はこれよりもっと込み入った別の方法で電子の e/m を測定し、最も軽い元素である水素について Faraday が測定していた値よりも 2000 倍も軽い値を測定していた。彼はその実験結果を確認するためにもう一度別の装置で実験を行ったのである。これによって電子には電荷ばかりでなく質量もあることが分かった⁵。カソードレイが粒子の集まりであり、光とは違うということが明らかとなった⁶。

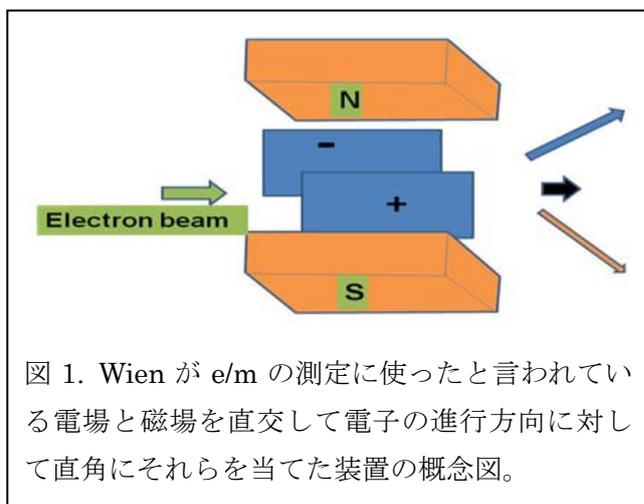


図 1. Wien が e/m の測定に使ったと言われている電場と磁場を直交して電子の進行方向に対して直角にそれらを当てた装置の概念図。

電子の発見は、1897 年であったが、それに先立つ二年前、1895 年に Röntgen が X 線の発見をしている。こちらは名実ともに発見であり、X 線は発見されるや多くの人が注目し、色々な応用が試みられた。Wien も自分の物理学の研究者としてのスタートとして、X 線の研究を選び、X-線を発生させるための道具としてのカソードレイ発生装置を

³初期の頃は、管の中に鳥などを入れておくとすぐに死んでしまうことも知られていた。ガラス管はその後真空装置、電子線装置の真空容器として 40 年位前まで盛んに使われており、大学や会社の研究所では専任のガラス職人を抱えていたものである。

⁴ 1997 年には電子発見 100 年のお祝いがキャベンディッシュ研究所近くのチャーチルカレッジで開催された。

⁵電子が波でもあることの証明はまだまだ何十年も後のことである。

⁶ただ、エレクトロン(電子)と言う名前は、トムソンの命名ではなく、トムソンは別の名前を付けたが、それは一般には広まらず、別の人の付けたエレクトロンと言う名前が広まった。

作った。X線は、物質に電子線をあてることによって作られる。これは今でも変わらない。

Wien は発生させたカソードレイに電場と磁場を直角方向から当てる装置を 1897 年に作り (図 1 参照)、1898 年に Thomson と同じ、 e/m の比を測定した論文を発表した [Wien 1898]。Thomson に遅れること一年であったが、Wien の装置は、電子の進行方向(これを Z 方向とする)に直交して電場(この方向を X とする)と磁場(この方向を Y とする)をそれぞれ加えた。Wien の方法が Thomson の測定に比べてエレガントだったのは、Wien は、電場と磁場を同時に直交してかけ、電子が真っ直ぐに進むように値を調節したことにあった。こうすることで e/m が電場と磁場の比率からすぐに求まった。Thomson がそれぞれの場を別々に加えて、どれだけ曲がったかを測定したのに比べて、ずっと精度の高い測定の出来る方法であった。電子の発見者としての栄誉と、ノーベル物理学賞(1906 年)は Thomson の物になったわけであるが、Wien は別の研究で 1911 年にノーベル賞を受賞している。物質が熱せられる時に発生する光の色、波長の研究である⁷。Thomson がイギリスの物理学研究のトップを極めたのに対し、Wien がドイツの物理学の頂点を極めた人であるという点は変わらない。ただ、Thomson が電子の人で Wien はイオンの人という分類も当たらない。Thomson は、イオンの質量を測定する質量分析装置でもそれを初めて使った人としても考えられている。電子だけでなく、水素原子と水素分子についても同じような測定をし、アイソトープと言う概念も掴んでいたと言われる。

この e/m の測定に Wien が使った装置がやがてウィーンフィルタと言う名前と呼ばれるようになる装置であり、Wien が電場と磁場を調節してカソードレイを直進させた条件がウィーン条件と呼ばれている。しかし、Wien 自身は、その後の物理学研究の生涯の中で二度とウィーンフィルタを使うことはなかった。また、Wien がなくなったのは 1928 年であったが、ウィーンフィルタの名前が文献に登場するのは 1930 年代に入ってからなので、彼はその生涯において再びこの装置に出会うことはなかった。Wien の研究は、イオンから離れたわけではない。彼の研究の中心はあくまでもイオンにあった。Wien の生涯と彼のイオンビーム研究の軌跡についてはその後 1998 年のウィーンフィルタ発明 100 年の記念の年にブラジルの電子顕微鏡学会で行われた記念行事に彼の一族の人が講演した記録が残されており、その時の論文はインターネット上で公開されているので、Wien の生涯に関心ある方は参照されたい。 [Wien K. 1999]。

こうして、Wien 自身のことを調べることで、ウィーンフィルタが原子の質量の違いの測定や、原子又は電子の速度やエネルギーの違いを測定するための装置として発明されたのではなく、1890 年代に盛んに研究されていたカソードレイが質量を持つと言うことを示すた

⁷鉄が熱せられると赤から黄色、ついには白く色が変わっていくそのスペクトルの変化に対するものである。

めに使われたと言うことで、それがなぜ質量分析装置も、エネルギー分析装置もまだほかになかった時代に発明されたかは理解された。

3. 質量分析の補助装置としての初期のウィーンフィルタ

Wien の発明から 30 年間、ウィーンフィルタの利用に関する論文は見当たらない。最初のウィーンフィルタの実験報告は、アメリカはフランクリン研究所の Bainbridge から 1932 年に出ている。この論文は実験結果の報告で、装置の詳しい説明はその翌年、1933 年に *Journal of the Franklin Institute* に述べられている(図 2 参照) [Bainbridge 1932, 1933]。この装置は質量分析装置(Mass)として使われた。質量分析装置は 1910 年代に発明されたが、1930 年代に盛んに使われるようになった背景として、アイソトープの発見がある。

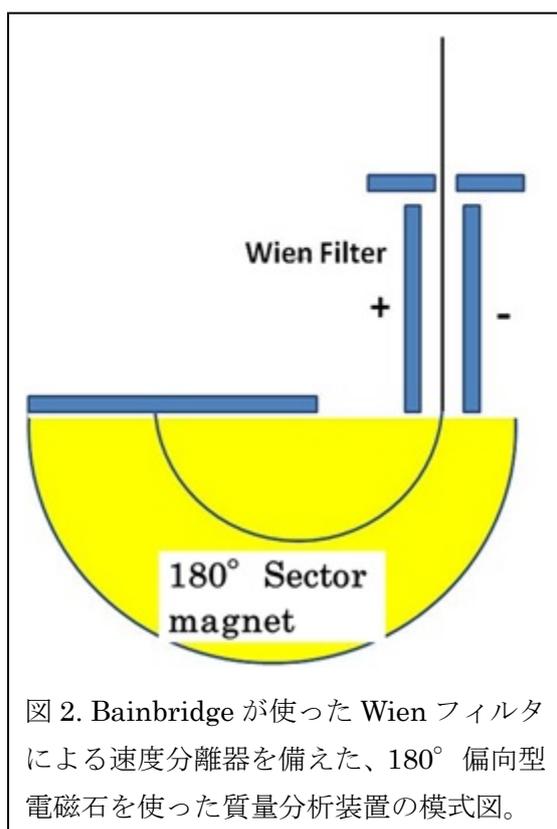


図 2. Bainbridge が使った Wien フィルタによる速度分離器を備えた、180° 偏向型電磁石を使った質量分析装置の模式図。

化学的方法では分離できない物質でありながら、質量と言う物理的性質の異なるものがあると言うことは 1906 年に見つかったが、周期律表の同じ場所を占めるこのような元素をアイソトープと呼ぶようになったのは 1913 年のことである。アイソトープは最初ラジオアクティブと言われる放射性元素で見出され、放射性同位元素と呼ばれた。Aston という、質量分析装置の元祖のように考えられている人がアイソトープは、放射性元素に限らず、たいていの元素にあるということを示した。このように元素の質量を測定することが、アイソトープの発見に不可欠であった。1930 年代は、まさに色々な物質に対してのアイソトープ研究の時代であり、丁度このころ発展しつつあった質量分析装置の質量分解能がアイソトープを分離することが出来るレベルにあったわけである。

質量の色々混じった物質から特定の質量の元素を分解して測定するための質量分析装置としては、イオンを一様磁場の中で 180° 回転させる電磁石が使われていた。正確な測定には、測定器に試料が入る前に測定されるイオンの速度を一定にしておかなければならない。そこで、この電磁石の前にイオンの速度を一定範囲に制限するための速度分離装置が付けられた。Aston の装置では、これは電場偏向器であったが、Bainbridge は、この速度分離器

としてウィーン フィルタを使った (図 2 参照)。

ウィーンフィルタは速度フィルタとも呼ばれているように、速度の違いでビームを分離できる装置である。エネルギーフィルタとして使える理由は、速度とエネルギーが比例関係にあるためである。ところが、Bainbridge の論文には、ウィーン フィルタという言葉も、Wien の論文の引用もなく、その後のアメリカの他の人たちの論文でもそれらの引用がない。恐らく、Bainbridge は、Wien とは独立にウィーンフィルタの発明をしたのではないかと思われる。ただ、Bainbridge が速度フィルタとして使った ExB フィルタがウィーンフィルタであると言うことは、論文内の記述から明らかで、ビームの直進条件(ウィーン条件)も示されている。

所が、事情はそれほど単純ではなかった。質量分析装置に使用する電場磁場重畳場(ExB)には別の流れがあった。127° 偏向型の静電フィルタに垂直に静磁場を印加すると、イオンビームのフォーカスがシャープになると言うことで、直交電場・磁場(ExB)をイオン分析装置に使う論文が同じ 1930 年代に多く見受けられるようになった。この ExB 型フィルタは、電子ビームを直進させるわけではなく、従って直進条件であるウィーン条件も出てこない。ウィーンフィルタではない。最初の論文は、1929 年の Physical Review 誌に出た論文で、Path of charged particles in electric and magnetic field というタイトルであった [Bartky と Dempster 1929]。オーストリーの Bondy and Popper[1933]、同じく Shaw(シカゴ)[1933 年、1938]、Bleakney and Hipple Jr. (プリンストン)[1938]などの論文がある。しかし、この方式はやがて質量分析装置としては消えてしまう。しかし、それらの装置はしばらくの間、ウィーンフィルタの文献として引用されている。ただ、90° 偏向電磁石に 90° 偏向円筒電極を重畳する装置は、スピン回転器として現在利用されている [Nagai et. al. 2011]⁸。

一方で、Bainbridge に始まるウィーンフィルタは例えば Jordan(イリノイ)[1940, 1941]の論文 The mass differences of the fundamental doublets used in the determination of the isotopic weights C¹² and N¹⁴、など数は少ないもののアイソトープと関連した測定にわずかなではあるが用いられていた。

アメリカとは異なり、ドイツでは 1934 年に二つの論文が出ている。一つは Henneberg の Annalen der Physik の論文[1934]で、「速度と質量分析のための重畳場」と言うタイトルで、場の重ね合わせを行った装置についての速度フィルタ、質量フィルタの

⁸ あとで示すように、スピン回転器は、ウィーンフィルタの応用としても使われているが、ビームを 90° 曲げた方が便利な場合もあり、その時電場と磁場を重畳した ExB 90° 回転器が使われている。

理論で、最後に Wien の方法という言葉が出ている。もう一つは Herzog[1934]の「円筒レンズとプリズムについてのイオンと電子光学」と言うタイトルのこれも理論であるが、電場や磁場の色々の場合の質量や速度フィルタのことが述べられている。その中で一章を割いて、特別の場合として **Wiensche Geschwindigkeitsfilter** ウィーン速度フィルタ、括弧して補正光学系と題されている。この論文の中で、先ほど紹介した Bainbridge の論文が引用されている。しかし、Wien の論文の引用はない。つまり、1930 年代において、ドイツでは電場と磁場を重畳した速度フィルタがウィーンフィルタと呼ばれていたわけであるが、Wien 自身の論文は引用されていないこと、アメリカで使われていた速度フィルタは逆にドイツでは引用されている。しかし、ドイツでは、ウィーンフィルタが実験に使われることはなかった。電場・磁場フィルタの解析があって、その続きとして両方を重ね合わせたり、つなぎ合わせたりした場合も理論的な解析の対象となり、重ね合わせて、さらに電場と磁場によるビームの偏向をキャンセルした特別の場合がウィーンフィルタと呼ばれていたということになる。1940 年代 50 年代は、重畳場を用いると質量分析のビームのフォーカス特性が良くなるという論文はアメリカで出続けるが、逆にウィーンフィルタを使った装置の論文は見当たらない。

こうしてみると、ウィーンフィルタは 1930 年代にアメリカで再発見され、質量分析装置の付属の速度フィルタとしてわずかに使用されただけであることが分かる。ビームの直進を行わない **ExB** フィルタはかなり分解能の高い質量分析装置として利用されており、後の文献では、それらもウィーンフィルタの一種として引用されている場合もあったということである。ここで興味深いことは、ウィーンフィルタまたは **ExB** フィルタを質量分析装置に付けて用いる実験が 1930 年代にドイツでは行われていない、少なくとも論文発表はなされていないことである。Herzog の論文に Bainbridge のウィーンフィルタ利用の論文が引用されていることからして、ドイツでアメリカでのウィーンフィルタ利用の実績は知られていた。

もう一つの疑問は、Herzog の論文で 1934 年にはすでに少なくともドイツでは電場・磁場重畳の装置がウィーンフィルタと言う名前と呼ばれていたことである。1898 年から 1934 年までの間にどのようにしてウィーンフィルタと言う名前が使われるようになっていったかについては、文献の検索では一切何も浮かび上がってこなかった。これは文献調査の限界を示しているのかもしれない。これを明らかにするためには、多分、学会講演会の予稿集の調査が必要ではないかと思われる。学会予稿集は図書館では収集しておらず、著名な研究室で 100 年以上継続している場所の調査が必要であり、もちろんドイツ語が自由に扱えることも条件になるので到底筆者の力の及ぶところではない。この点については、ドイツの著名な電子光学研究者である Plies 氏が学会でウィーンフィルタの歴史について講演しておられた[Plies 2011]ので、ウィーンフィルタはどのようないきさつでそう呼ばれるよ

うになったのかと質問したところ、そのような疑問は持ったことがなかったので調べたことはなかったが、これから調べて見たいと言う返事であったので、彼の調査に期待する他はない。

4. Boersch 以降(1960年代から)のウィーンフィルタの展開

ウィーンフィルタがその威力を発揮する使い方をされるのは 1960 年代に入ってからで、Boersch, Gaiger[1962, 64, 66]らによって、電子による高分解能エネルギーアナライザとして登場した。この Boersch らの装置こそがウィーンフィルタの電子への最初の利用である。この装置なくしてウィーンフィルタのその後の展開はなかったと言って良い。ウィーンフィルタの収差理論も 70 年代に入ってから研究が始まっている。e/m の測定と言う別の目的で発明されたウィーンフィルタは、半世紀の時間を待ってようやく機が熟したと考えられる。

Boersch らの装置が発表になると、1960 年代、70 年代を通じて、沢山のウィーンフィルタ関連の実験・理論[Ioanoviciu 1973]の論文が出るようになった。これ以降、ウィーンフィルタを使った装置はウィーンフィルタと呼ばれ、Wien の論文も引用されることが多くなった。

ところで、ウィーンフィルタにはレンズ作用が伴うが、一様磁場と一様電場のレンズ作用は、電場方向(X 方向)のみで、このようなレンズのことを円筒レンズと言う。初期の Boersch らの装置は、フィルタの前または後ろに磁場方向(Y 方向)にレンズ作用をする円筒レンズを置いてフィルタの X 方向への円筒レンズ作用と組み合わせ、丸い形のビーム(非点なし結像)を得る装置であった。やがて、ウィーンフィルタに 4 極子場を組み合わせることによって非点なし結像をさせることが出来ることが明らかとなり、一様電場磁場に電場または磁場の 4 極子場を加えた装置が使われるようになった[Andersen 1967, Legler 1963]。このように一様場と 4 極場を組み合わせたウィーンフィルタは *inhomogeneous field Wien filter* と呼ばれ、一様場を使った一方向フォーカスのウィーンフィルタと区別されるようになった。しかし、このネーミングは誤解を招きやすい呼び方で、不均一場と言うのは一般的には場の均一性が崩される場合を指し、その原因は 6 極場が一様場に加わることによって生ずるものである。

レンズの収束作用が向きによって異なる場合を非点と言う⁹。非点なし結像と言うのは、このような非点がなく、あらゆる方向に同じ強さの収束をすることを意味する。ただこれは、焦点があった場所だけで実現すれば良く、途中では方向によって違うレンズ作用であってもかまわない。常に方向に寄らず同じレンズ作用をする場合をラウンドレンズと言う。この場合は、物面(観察している対象のことを言う)から像面(フォーカスした面)までのレンズ

⁹人の目の場合も同じ現象があり、乱視と呼ばれている。

作用が方向に寄らず一定になる。

ウィーンフィルタでは、一様場の生成と非点なしフォーカスのための 4 極場の生成がまず関心事項であり、続いて、二回フォーカスをさせることによって、収差と分散をキャンセルさせることが分かってからは、二回フォーカスの実現法などが問題になった[Andersen & Le Poole 1970]。また、エネルギー分解能を大きくするために、フィルタ内でだけ電子の速度を落とす、リターディングのテクニックが使用されていた。Boersch らの装置では、このリターディング法によって高いエネルギー分解能が実現している。最後に、ウィーンフィルタのウィーンフィルタであるゆえんである、ビームの直進条件がフィルタの入口と出口(これをフリンジと呼んでいる)で、満たされなくなることにに対する対応策が重要な問題点として認識されたのは最近のことである。ウィーンフィルタは電場と磁場を重畳し両者の間にウィーン条件と呼ばれる $E_1 = vB_1$ の関係を全ての電子の通り道で満たすことによって電子を直進させる。ここで、 E_1 , B_1 は電場と磁場の一様成分で、 v は電子の速度である。ところが、電極の形と磁場を作るための電磁石の形は普通同じではない。このため、中心付近ではウィーン条件が成り立っていても、フリンジと呼ばれる入口と出口ではウィーン条件が満たされなくなるのが普通であった。

ウィーンフィルタが長い間うまく使えなかった原因は、この問題点、フリンジ場でのウィーン条件維持が技術的に難しかったにもかかわらず、これが問題であるという認識が長い間なかったことが上げられる。最も高度な光学機器として使われても良かったウィーンフィルタが長い間簡単な光学機器としての利用しかされてこなかった原因がここにある。つまり、ウィーンフィルタはビームが直進すると言う便利な光学機器のはずでありながら、実際に作って実験すると、ビームがなかなか出て来ない奇妙な光学機器であり、その原因がなかなかつかめないものであった。そして、理論は理論でウィーン条件が全体で満足されていると言う前提で作られていた。実際の装置では、例えビームが最終的に出てきたとしても、ウィーン条件が狂っているものを補正してビームを出しているので、理論が完全には成り立たない状態にあったことも、ウィーンフィルタの発展を阻害してきた大きな原因と今では考えることができる。

この点こそが後で示す、ウィーンフィルタの SEM 検出器のビームセパレータへの応用で、磁場イメージング SEM への応用はうまく行ったものの、リターディング SEM への応用で多くの問題点が出てきており、多くの研究発表や特許出願がなされている理由でもある。

以下では、ウィーンフィルタの色々な応用分野について述べる。ただ、ウィーンフィルタは、電子線のみならず、質量分析装置や核物理装置にも応用されているが、著者の専門は

電子線であり、それらの二分野には知らないことが多いので、以下の応用は電子線に限ることとする。

5. ウィーンフィルタのモノクロメータ・アナライザへの応用

ウィーンフィルタを使ったミリボルトのエネルギー分析の出来る電子線分析装置は、ドイツの Boersch らが 1962 年に開発した装置であるが、1980 年代に至るまで色々な工夫を凝らして、改良が加えられており、最後は Essig によるものである [Essig 1981, 1986]。電子顕微鏡に Boersch らのモノクロメータ、アナライザを搭載した装置は、1971 に発表されている [Curtis, Silcox 1971]

5.1. 東北大学・田中のウィーンフィルタ式高分解能エネルギーアナライザ

私は京都の電子顕微鏡国際会議にやってきた Essig に学会期間中をほとんど一緒に過ごし、詳しく彼らの装置について聞くことが出来、それが結局は Boersch らの装置を次につなげることになったと今では思っている。

Boersch らの作った高エネルギー分解能ウィーンフィルタ装置をまねた装置を電子顕微鏡上に順次作り上げた。まず電子顕微鏡にアナライザと呼ばれる試料を透過してきた電子線の試料によるエネルギーロスを測定する装置を取り付け 1991 年に東北大学に設置した。続いてモノクロメータと呼ばれる装置を作り、これを電子銃の下に取り付けた。これは、電子銃から出てくる電子ビームがあらかじめ持っているエネルギーの幅を制限し、狭いエネルギー幅の電子線のみを試料にあててやるための装置である。これらのエネルギーアナライザとモノクロメータにウィーンフィルタを用いた。Boersch らの装置は、電子顕微鏡の機能は持たなかったのであるが、我々はこのように段階を追って電子顕微鏡の機能を付け加えた装置に発展させたわけである [Terauchi et al 1990]。

このような装置全体の段階的な改造の他、ウィーンフィルタ自身の形状にも工夫が施され、分解能の向上を助けた。最終的に到達したエネルギー分解能は、12meV で、これは Boersch らの値には及ばなかったものの、同一水準の分解能を達成し、その後長い間、透過型の稼働している装置としての世界最高のエネルギー分解能を保持していた [Terauchi et. al. 1999]。

しかしながら、この装置は、あまりにも複雑で、オペレーションのスキルも高度なものを要求され、製作もリスクが大きかったことから、後に続く装置がなかった。この装置を見た多くの人にとって、自分たちも同じような仕事をするのをあきらめるに十分な装置だ

ったとも言える。このような状況の中、オランダのデルフト工科大学の **Kruit** は、大学院の学生であった **Mook** をこの装置が設置してある東北大学にしばらく派遣し、装置を詳細に調べた挙句、新しい装置のアイデアを発表した。その意味では、ドイツで初めて作られた装置は、日本を経てオランダで花咲いたということが出来る。

5.2. Mook & Kruit のフリンジ・フィールド・モノクロメータ

Mook と **Kruit** の発表したモノクロメータ [**Mook & Kruit 1997**] は、電子銃内にウィーンフィルタを設置するというものであった。**Boersch** の装置と、東北大の装置では、電子銃で加速された電子ビームをモノクロメータに入る直前で減速していた。これが一つには、装置を大掛かりなものにする原因となっていた。電子銃の中では、電子ビームは、最初数ボルト以下で物質中から真空中に放出され、それを所定の加速電圧まで加速している。電子銃というのは、いったん電極で **5kV** 程度の電圧をかけて陰極から電子を引っ張り出す。そのあとで陽極との間で所定の加速電圧、例えば **100kV** などに加速している。彼らのモノクロメータは、ウィーンフィルタをこの **5kV** に加速する引き出し電極の後ろに入れて、**100kV** にまで加速する前にモノクロメータを入れたのである。陽極との間で加速される時にはすでにエネルギー選別が行われているわけである。こうすることによって、いったん加速した電子を再び減速して使い、もう一度加速して試料にあてるという無駄なことをする必要がなくなった。

これ以降の全てのモノクロメータは、この電子銃内モノクロメータとなった。この方向性は、装置の小型化という意味では優れた考えであったが、装置オペレーションの困難さを解消するという意味では解決に半分だけ近づいたに過ぎなかった。この当時、東北大のモノクロメータのオペレーションが大変であったのはリターディングが大きいせいであると考えられており、その対策として電子銃内モノクロメータが考案されたのであるが、前に述べたように、オペレーションの大変さは電極と磁極の形状の違いによるフリンジでのウィーン条件の不一致にもその半分の原因があった。

この電子銃内モノクロメータ [**Mook, Kruit 1999**] に対する **Kruit** の考え方は次のようなものであった。まず、分散はビームサイズより大きければ良いというのが第一点である。フィールドエミッション方式の電子銃から出てくるビームサイズは数十ナノメータと言われている。**Kruit** の考えからすると、モノクロメータのエネルギー分散も収差がなければ、数十ナノメータで良いことになる。ただ、問題はスリットの幅も数十ナノメータにしなければならぬことである。分散が数十ナノメータで良ければフィルタのレンズ作用はごく小さくて良いので、収差が発生する以前に止めることが出来る。結局、ナノメータスリットさえ作れば、このような非常に弱励磁のフィルタはモノクロメータとして魅力的だと言

うことになる。数十ナノメートルサイズのスリットを作ることはイオンビーム加工の技術が進歩した現代では問題ない。問題は、電子銃内でこの小さな間隔を持ったスリットを清浄に保つことである。

この装置はデルフト工科大学で完成したものが、IBM ヨークタウンハイ츠の **Batson** の研究所に納入された[Mook et. al. 1999]。デルフトでこの装置を作った Mook がしばらく IBM に滞在して納入を行った。Batson は、はじめ学会で紹介していた[Batson 1999]が、やがてモノクロメータは装置から外されているといううわさが流れた。何年かして、島津のマンチェスターにある研究所がこのモノクロメータの権利と一台を買い取り、日本に運んだと言われている [Cublic et. al. 2004]。テストは東京で行われていると聞いたが、日本に運ばれてからの学会発表はない。

5.3. 商用の電子銃内ウィーン型モノクロメータ

FEI は、モノクロメータの商用機を最も早く出したメーカーである。デルフト工科大で Kruit の前任の教授はフィリップスの fan der Mast であったことからわかるように、フィリップス、やがて FEI は、デルフト工科大学と強いつながりがある。ウィーンフィルタを利用したモノクロメータ開発でも Kruit の指導があったと推定されるが、FEI では Mook らのプリンジフィールドウィーンフィルタは採用せず、独自のフィルタで商用機を作った。ウィーンフィルタの断面図は、FEI から出ている論文には一切掲載されていないが、学会発表のスライドで紹介された図面では、Mook のウィーンフィルタと同じ断面形状をしていた。つまり、FEI は、デルフト工科大学のウィーンフィルタの形は採用したが、Kruit の考えは退け、普通の一回フォーカスウィーンフィルタを商用機として採用した。これは、賢明なことである。ナノメータの隙間しかないスリットを使った場合、汚れがスリットの隙間についている場合などを想像すると、安定な装置として商品にはしにくいと考えられるからである。FEI は単純な一回フォーカスのウィーンフィルタを電子銃内モノクロメータとして採用し、スリットはアース電位上に置くことが出来たので、構造も簡単で 2000 年代初期からモノクロメータをしばらく独占的に販売した。

日本電子は、これと比べれば複雑なモノクロメータを開発していた。モノクロメータの第一号機は分析装置用、第二号機は高分解能用として受注していたが、いずれも自由な設計を許されず、レベルの高い要求に悩まされた。このため高度な設計を行わざるを得ず、完成まで多くの年月を費やすことになった。いずれの場合も収差のキャンセルが出来る二回フォーカス型のフィルタとなった。二回フォーカス自体は特に難しくはないが、二回フォーカス後には収差のキャンセルの他に分散もキャンセルされるので、エネルギー選択スリットは一回フォーカスの位置に入れなければならない。モノクロメータは、電子銃の中に

入っているので、そこは 200kV の高電圧中にある。ここに、機械的な動きの必要なスリットを入れることは大変なことでもあった。その他、ビームの調整も何個もの細かい穴をすり抜けて通さなければならず、調整に困難を極めた。しかし最終的にはオックスフォード大学に納入されたウィーン型モノクロメータは高い評価を受けているということである。

一方、Zeiss はモノクロメータとして、Wien フィルタを採用しなかった。Zeiss は、静電型オメガフィルタと言うこれも複雑なモノクロメータを開発した。これを開発したダルムスタット工科大学¹⁰の学生は、なぜ静電型オメガフィルタなどと言う複雑なものをモノクロメータに採用したのかと質問したところ、電子銃内は高真空にしなければならないのでコイルを巻くことが許されず、静電型にせざるを得なかったと答えてくれた。FEI も、日本電子もウィーンフィルタを採用し、従って電場だけでなく磁場も使っているので、当然コイルを高真空中に入れていた。ツァイスは 2012 年末で透過型電子顕微鏡事業から撤退したと伝えられている。電子顕微鏡を発明したドイツで最初にシーメンズが撤退し、今またツァイスの撤退によってドイツからは透過電子顕微鏡のメーカーがなくなったことになる。

しかし、初めて走査型の電子顕微鏡を完成させたケンブリッジ大学の指導を受けて初の商用機を完成させたケンブリッジインストルメントはやがてドイツのライカに買収され、ツァイスも加わった会社を経て、今ではツァイスの一事業所となっている。

ドイツの電子光学研究の中心は、Rose の最初の弟子であった Plies のチュービンゲン大学¹¹と、これも Rose の弟子であったハイデルベルクにある欧州共同体の分子生物学研究所を辞めて収差補正装置の会社 CEOS を設立した Haider と Zach の所に移った。ここには、Rose の最後の弟子たちも何人か入社し、ドイツ電子光学の中心をなしている。この点、日本では、日立には名古屋大学と大阪大学の後ろ盾があった¹²が、日本電子には電子光学の指導を担当した大学はなく、新しい技術の導入に当たっては、世界の著名な研究機関からの技術導入か、あるいはドイツの大学で書かれた学位論文の図を見て装置を作らざるを得なかった。

¹⁰ ダルムスタット工科大学は、シュルツァーの大学であり、その弟子であった Rose が長く教授を務めていたが、その間 Rose の設計したエネルギーアナライザは Zeiss で製品化された。しかし、Rose の主な研究対象であった収差補正装置は、Rose の在任中は実験的成功をおさめず、Rose の研究室は Rose の定年と共に閉鎖となった。

¹¹ Plies も今では定年となったので、ここも今では電子光学の中心ではなくなっている。かつては、日本の大学で電子回折の研究をした多くの先生方の一番の留学先であったチュービンゲン大学も電子光学研究の中心から外れようとしている

¹²今ではそのほとんどが定年退官されているので後ろ盾になれる教授はいない。

6. ウィーンフィルタのビームセパレータへの応用

試料に対して垂直にビームを入れ、試料からまた垂直に反射してきたビームの作る像を見ようとした場合にどのような方法があるだろうか。ビーム発生源である電子銃がまず必要で、ビームを試料にあてるためのレンズ系も必要である。反射ビームはそのままフィルムに記録すれば良い場合には、方法があった。LEED(Low Energy Electron Diffraction)と呼ばれる装置では、フィルムの真ん中に穴を明け問題を解決した。試料に入射するビームはこの穴を通して試料に達する。試料で反射したビームは、いろいろな角度に広がることと、穴を通り抜けて直進する電子は情報を持たないばかりでなく、強度が強いのでこれを検出すると周囲に悪影響があるので、むしろ穴を明けてこれを検出しない方が賢明であった。こうしてフィルム上に止まって感光した電子から電子回折の情報が読み取れた。

LEED の場合は電子回折図形なので、一定距離だけ離れたところに検出器を置けばよかったが、LEEM 即ち、Low Energy Electron Microscope になると、反射ビームに対しても像を作るためのレンズ系が必要になる。この場合、入射ビーム用のレンズ系と、反射ビーム用のレンズ系とが同じ場所に必要になるので、両方の軌道を分けてやる必要が出てくる。このような目的に使われるのが、ビームセパレータである。セクター磁石と呼ばれる電磁石を使うのが一般的であった。ただ、セクター磁石を使う場合は試料の面に対して入射ビームと反射ビームが反対方向に同じ角度だけ傾斜させる必要がある。ウィーンフィルタを使えばより重要なレンズ系カラムは試料に対して垂直に置くことが出来る。垂直に置く一番大きい利点は装置の安定性である。

ビームセパレータは、ウィーンフィルタの原理をそのまま利用した応用例である。ビームの直進条件(ウィーン条件)が、 $E_1 = vB_1$ 、と書かれることは前に説明した。電場 E_1 と磁場 B_1 の強さが電子の速度 v で結び付いている。ビームセパレータはこの式の v の符号を利用したものである。速度には向きがある。ある方向に進むビームがウィーン条件を満たしているとすれば、反対方向に進むビームの v の符号は逆であるから、ウィーン条件を満たされずビームは偏向する。これがビームセパレータとしてのウィーンフィルタの原理である。

ビームセパレータは LEEM とともに、SEM でも用いられている。ウィーン・ビームセパレータを SEM に応用したのは日立である。それがもとで日本では LEEM のビームセパレータもウィーンフィルタが使われたものと推定される。アメリカでもドイツでも LEEM のビームセパレータはセクター磁石が普通だからである。

6.1. 磁場イメージョン型 SEM 用ウィーン・ビームセパレータ

光の顕微鏡で、倍率を 1000 倍近くまで上げようとするとき対物レンズの先端と試料を液体に浸して使う浸潤型と呼ばれる方式が用いられる。電子レンズでも同じように磁場の中に試料を入れるイメージジョン型(浸潤型)と呼ばれる高分解能 SEM(走査電子顕微鏡)が使われている。ビームセパレータは、この磁場浸潤型対物レンズを持つ SEM で使われている。試料から出た二次電子のエネルギーは入射電子のエネルギー(30kV~1kV)と比べて低い(1~50V)。このため、対物レンズの磁場の中で、らせん運動をしながらレンズの上の方に引っ張り上げられる[図 3 の下の方]。らせん状に回りながら上がっていくが、レンズの中に入って磁場

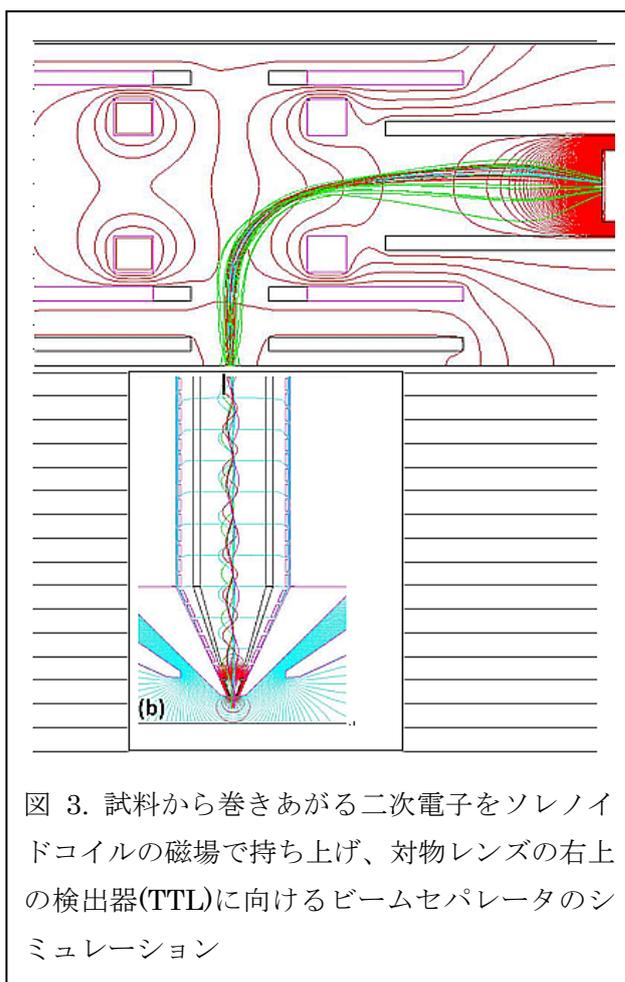


図 3. 試料から巻きあがる二次電子をソレノイドコイルの磁場で持ち上げ、対物レンズの右上の検出器(TTL)に向けるビームセパレータのシミュレーション

が弱くなると、らせん運動の半径が大きくなり、やがて磁場がなくなると二次電子は広がり、レンズの壁に衝突して消えてしまう。そこでレンズの穴の内側には電極(またはソレノイドコイル)が入れてあり磁場で吸い上げた電子を今度は電場(または再び磁場)の力で、対物レンズの上まで持ち上げる仕組みになっている[図 3 の中ほど]。こうして対物レンズの上まで持ち上げられた電子を対物レンズの上に設置した検出器で取り込む方式を二次電子検出のスルーレンズ方式と呼んでいる。

こうして対物レンズの上部で二次電子の検出が出来ることになったわけであるが、対物レンズの上まで上がった二次電子を従来型であるエバハート・ソーリー型¹³検出器を側面に置く方式には問題があった。それは、エバハート・ソーリー型検出器では 10kV 程度の電圧をかけて二次電子を収集して

いることから来る問題である。この電圧によって、一次ビームが偏向作用を受ける。対物レンズの下に検出器が置かれていた時には、この偏向作用は単に像を少しばかりシフトさせるだけであったが、対物レンズの上でビームの偏向が起こると、対物レンズに入射するビームの光軸がずれることになるので大きな収差を発生する。この問題を解決するのに使

¹³ SEM の商業機への開発に成功したケンブリッジ大学の Outley の弟子の中の二人の名前。シンチレータとフォトマルチプライヤーを組み合わせたもので、二次電子の収集のために 8~10kV の高電圧をかけている。

われたのがウィーン・ビームセパレータである。この方式は日立で考案された。

二次電子を対物レンズの上の方まで持ち上げることは同じであるが、あくまでも対物レンズ内に平らな穴の明いた検出器を置いて広がった電子を検出する方式はインレンズ検出方式と呼ばれ Zeiss で使われた。この他の FEI と日本電子では、対物レンズに吸い込まれた二次電子を対物レンズの側面に開けた穴を通して外に取り出し検出している。それぞれの方式がどのタイプの SEM で有利となり、どの検出方式を用いた SEM がより多く使われたかについては興味ある点が多いが、以下では、ウィーン型ビームセパレータを用いた日立方式についてのみ述べる。

SEM に対するビームセパレータの構想はすでに 1970 年代には出ており、一次ビームに対して 4 個、二次電子に対して 2 個(一個は共通)のセクター磁石を用いて行われた¹⁴[Wittry, Sullivan, 1970]。しかし、その構造の複雑さからかこの方式は発展せず 1990 年代になって、磁場イマージョンレンズが盛んに用いられるようになってからウィーン・ビームセパレータが登場している。Beck らは[1995] ウィーンフィルタを用いたビームセパレータの歴史について述べている。それによれば、すでに日立の大高、中泉、黒田は Int. Patent Application に Secondary Electron Detector と題する特許(Number PCT/JP85/00170(1985))を 1984 年に申請している。この国際特許から日本での出願を調べることが出来た。

日本での申請は 1983 年に黒田、戸所、米田の日立中研と斎藤、大高の日立那珂工場からの共同出願となっている。翌年、大高、中泉の那珂工場グループを先頭の名前とし、中研の黒田を含めたほぼ同一内容の特許が申請されていることから、1983 年の出願内容が商品として動き出したものと推定される。著者らのうち黒田は 1984 年、1990 年にウィーンフィルタに関する論文を発表している[Kuroda, Yamamoto 1990]が論文には収差の測定方法などが述べられているだけで、ビームセパレータへの応用については触れられていない。1990 年には戸所らによるウィーン・ビームセパレータを使った SEM の論文がある[Todokoro et. al. 1990]。

ウィーンフィルタで 90° 電極側に曲げられた電子は電極にぶつかってしまうため、日立の SEM では、片側の電極を網で作り、二次電子がこの網をすり抜けて検出器に向かうように作られている。検出器は電子を集めるために 8~10kV 程度の電圧をかけて電子を引っ張り込む働きをしているが、この電場が漏れて光軸にまで達すると、一次ビームの軌道に影響を及ぼす。この網にはもう一つの役割があって、網によって強い電場が光軸にまで侵入し

¹⁴ 4 個のセクター磁石で、オメガフィルタのようにビームを曲げて最終的に元の直線上にビームを戻している。この時の第一のセクター磁石では、下から上がってきた二次電子が一次ビームとは逆方向に曲げられ、さらにもう一つの磁石で別の方向に持っていかれる。

て来ず、網をすり抜けて来た二次電子だけを検出器に集める。図 3 では、金網をシミュレーションに取り込むのは難しいので、電極を二つに分割し、その隙間から検出器に向かうように計算している。

このビームセパレータはそのアイデアも素晴らしくまた、実用的にも成功した例であるにも拘わらず、オリジナル論文がない。SEM の一般的な解説記事には紹介されていることが多いが、引用文献がない。もう一つ不思議なことは、このアイデアについての特許はすでに期限切れであるが、他のメーカーではこの方式が採用されていない。オリジナルなアイデアは他のメーカーの技術者にとって特許とは関係なく真似すべからざるものというプライドがあるのかもしれない。大きなメーカーでは特許部の力が強く、装置の設計者は他のメーカーから特許が出されている方法で設計をすることが許されないという事情もある。いったん別の方法で解決した事柄を特許が切れたからと言って切り替えることも困難である。もう一つ考えられる事情は、スルーザレンズ方式の難しさである。対物レンズに入り込んだ二次電子をすべてレンズの上まで持ち上げることは実は難しい技術である。

6.2. リターディング SEM 用ウィーン・ビームセパレータ

低加速電圧 SEM は絶縁体や半導体の試料でもチャージアップが起これないと言うことで急速に普及した。その理由は、加速電圧が 1~2kV の間で、入射する電子ビームの量に対して、反射ビームや二次電子などを合計した試料から出ていく電子の量が丁度つりあうと言うことが分かったからである。入ってくる電子と出ていく電子が同じ数であれば、入ってきた電子を導電性の物質を通して外に逃がしてやる必要がない。半導体や絶縁体のように電流が流れない物質に電子ビームを当てても、入射した電子が試料中にたまっていくことがないので、チャージアップが起これない。このため、低加速電圧 SEM が SEM 観察の主流になってきたのであるが、問題は空間分解能であった。電子顕微鏡の分解能は、加速電圧に大きく依存する。低加速化の方法として、30kV の加速電圧を電子銃の直後に 1kV に落とす方式は汎用 SEM と呼ばれる一般の SEM で用いられている。もう一つ試料の直前で加速電圧を下げる方法はリターディング方式と呼ばれ半導体検査装置で広く用いられている。ただし、Zeiss と ICT のドイツグループは両者で同じリターディング方式を用いている [Frosien et. al. 1989]。このリターディングによって、二次電子に大きな影響があった。

磁場イメージ型対物レンズに対するビームセパレータとリターディング SEM 用のビームセパレータの装置開発の時期には、それほどずれがない。しかし磁場イメージ型のビームセパレータについては日立の特許があるだけで他のメーカーや大学等の研究はない。これに対して、リターディング SEM 用のビームセパレータについては他のメーカーや大学などの文献・特許が多く見られる。そして、日立で低加速 SEM 用ウィーン・ビームセ

パレータを使っているとみられる CD-SEM(半導体検査用 SEM)の紹介記事には、ウィーン・ビームセパレータを使っていると記載がない。

リターディング対物レンズの中で二次電子は試料から出たときは数ボルト以下の低加速であり、出たとたんに強い磁場にさらされる点は磁場イマージョンの場合と同じであるが、同時に強い電場にもさらされる。一次ビームに対して減速場となる電圧は、反対方向を向いて進む二次電子に対しては加速場になる。つまり、1eV で試料から出た二次電子は、対物レンズの中を通過している間に 30kV まで加速される。対物レンズの上に置かれたウィーン・ビームセパレータは 30kV のビームを 90° 曲げるだけの強さに電場と磁場を設定しなければならない。ここで、今までとは全く違う事情が起こった。それは、ウィーン・ビームセパレータの電場磁場が強くなったためこれが一次ビームの軌道に大きな影響を与えるようになったことである。フリッジ付近の電場分布と磁場分布の不一致の問題や、収差の問題が一次ビームの試料上でのビームサイズに影響を与えるようになった。SEM の空間分解能は、入射ビームのスポットサイズで決まるが、ウィーンフィルタの収差は、直接それに影響を及ぼす。そのため、ウィーン・ビームセパレータへの応用に関する論文や特許が沢山出されるようになった[Takafuji et. al. 2000, Kienle & Plies 2004]。

この問題はまだ解決しているとは言えず、現在も研究が行われている。多くの特許などで共通している点は、ウィーンフィルタを一次ビームに対しては二段用いて収差のキャンセルを行うこと、二次ビームの偏向角を 90° ではなく小さな角度にすることによって強度を弱めるなどの工夫がなされている。また、多極子型のビームセパレータがフリッジでのウィーン条件の一致の度合いを高めてビームの偏向を抑える工夫がなされている。このようにリターディング SEM 用のビームセパレータ研究は日立でも行われているが、その他のメーカーでも研究されている[Yonezawa 2005]。通常加速電圧用の完成された SEM 用ビームセパレータに追随するメーカーはないが、まだ技術が確立していないリターディング用のビームセパレータは各社こぞって研究している。

6.3. LEEM 用ウィーン・ビームセパレータ

図 4 に示すのは LEEM 装置[Tsuno 1994]で、試料から反射したビームが v を正にして直進の条件を満たしている。試料に入射するビームの方は v の符号が逆になるので、ビームは偏向して試料に入る。この角度が図 4 の装置では 30° に調節してある。この装置の発表後いくつかの Wien ビームセパレータを使った LEEM 装置が発表されている[Miyoshi et. al. 1999, Shimakura et. al. 2008]。これらは東芝¹⁵及び、日立から出されているものであるが、いずれもここに示した装置の設計を参考にして設計されたと聞いている。私の設計は早稲

¹⁵製作はニコンから荏原に譲渡されている

田大学の市ノ川先生の指導で 1990 年から開始されたものである。この当時、市ノ川先生が日立の SEM で使われ始めていたウィーン・ビームセパレータを見学などして LEEM に使おうと考えたとすれば、技術は連続していたことになる。この事情については分かっていない。私が担当することになったのは、ウィーンフィルタをモノクロメータ、アナライザとして使った経験があったからであって、私が担当する前からビームセパレータとしてウィーンフィルタを使うことは決まっていたのである。

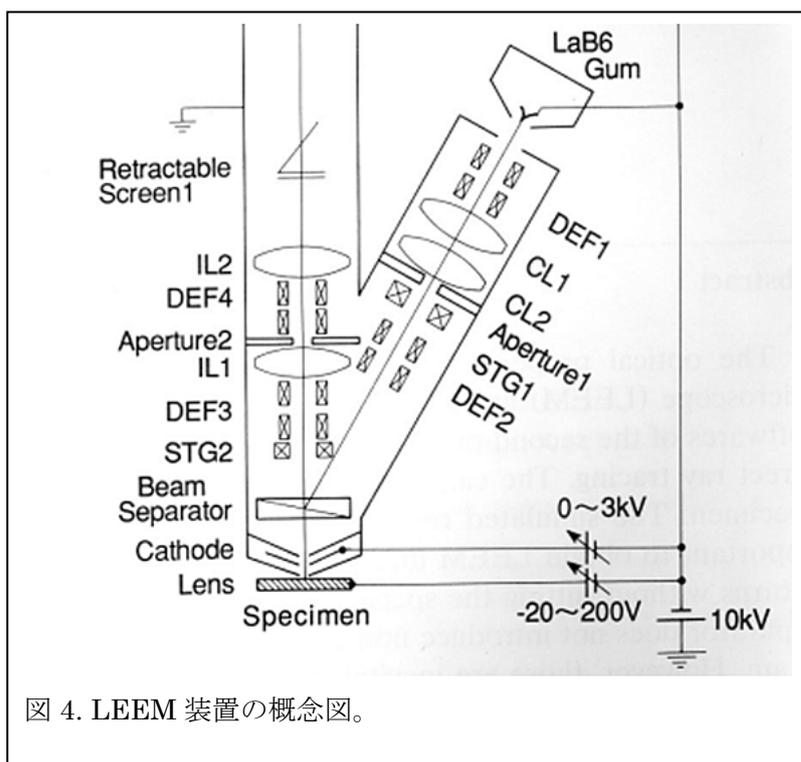


図 4. LEEM 装置の概念図。

リターディング SEM 用のビームセパレータで、一次ビームの加速電圧と二次ビームの加速電圧が等しくなったことから種々の困難が生じていることを上に書いたが、LEEM でもその点は同じなので、同様の問題は起きているはずである。ただ、LEEM でそれが問題とされなかった一つの理由は SEM が細く絞ったビームをスキャンする方式で、像分解能はもっぱらスキャンするビームのサイズ

によって決まるのに対し、LEEM では直進させるビームは直接写像されるので、像とクロスオーバーと言う直接写像の場合のビームの性質をうまく利用できたことがウィーンフィルタの収差の影響を避ける上で重要であったことがあげられる¹⁶。もう一つは、LEEM の空間分解能の要求が、まだ SEM ほどには高くないことがあげられる。

7. スピン回転器への応用

ウィーンフィルタはフィルタと言う名前では呼ばれているにもかかわらず、フィルタ、即ちエネルギー選別の道具としてだけでなく、別の用途にも使われている。上で説明したビ

¹⁶ これは収差補正で逆のことが起こっている。収差補正では細く絞ったビームをスキャンする STEM で Cs 補正の効果が像分解能に著しい貢献をしているのに対し、直接写像の TEM ではそれほど大きな効果を示していない。

ームセパレータも別の応用の一つであったが、ローレンツ力を利用した装置であるという点では、電子レンズ、電子線エネルギーアナライザと同種の装置であると言える。ところが、ここで紹介するスピン回転器は、電子に対する磁場のローレンツ力を利用したのではなく、磁場がスピンに直接作用する力を利用している。電場を重畳しなければならない理由はローレンツ力による偏向成分をキャンセルし、ビームを直進させるためである。つまり、ローレンツ力はこの応用にとってはむしろ邪魔になる。ただし、偏向は電場と磁場でキャンセルできるが、レンズ作用は凹レンズがないためキャンセルできず、結像条件の設定によって回避しなければならない。

ビームセパレータの場合も同じであったが、スピン回転器もセクター磁石と円筒電極の組み合わせでも使われている。これは初期の歴史の項で説明した、1930年代の質量分析装置に使われたことのある構造である。ウィーンフィルタの場合は、ビームが直進するが、セクター磁石を使った場合は90°回転した方向にビームが出てくる。スピン回転器をつなげた電子ビーム機器で、直進の方が便利な場合は、ウィーンフィルタを使い、90°曲げると装置全体が都合よく収まる場合は90°偏向器が選ばれている。

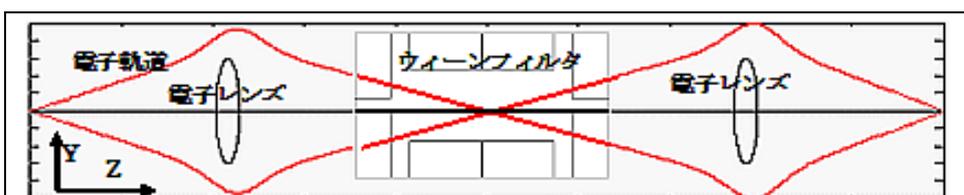


図5. ウィーンスピン回転器の動作。ウィーンフィルタを二つのラウンドレンズで挟み、最初のラウンドレンズで、ウィーンフィルタの中心にビームをフォーカスさせる。

図5にウィーンフィルタを使ったスピン回転器の電子軌道を示している。ウィーンフィルタを電子レンズの間に挟んで使う。最初の電子レンズで、ウィーンフィルタの中心にフォーカスするようにビームを入れる。こうすると、ウィーンフィルタの電場磁場の大きさを変えても全体のレンズ作用はあまり変化しなくなる。と言ってもウィーンフィルタにある程度の長さがあり、強さによって多少レンズ作用が変化するので、それは後ろの電子レンズで戻してやる。このような構成にすると、電子のスピン回転角は磁場の強さだけで決まるので、それほどレンズ作用を変えずにスピンの回転角度だけを変化させることが出来る。電場 E_1 はウィーン条件 $E_1 = vB_1$ に従って、 B_1 の変化に比例してその大きさを変えてやることでビームを直進させる役割を担うことになる。これがウィーンフィルタを利用したスピン回転器の仕組みである。

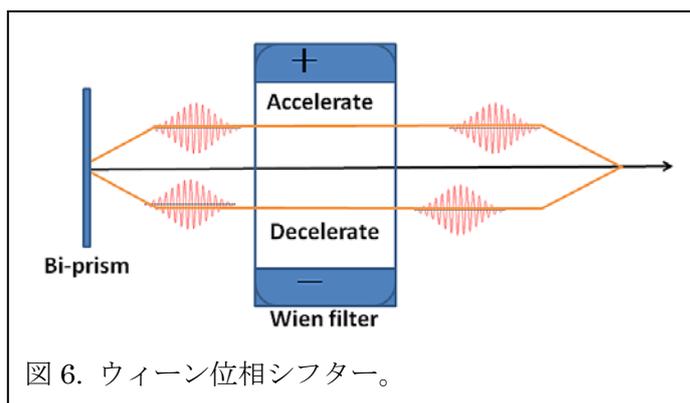
スピン回転器は、スピンSEMと呼ばれる磁区観察装置として実用化されている[Kohashi et. al. 2004, 2010]。スピンSEMは、試料の磁区構造に従って出てくる二次電子のスピンの向

きが影響を受けるが、あらかじめスピン偏極をした電子ビームを試料にあて、入射ビームと試料の磁区の中のスピンの方向によって反射電子の放出量に差が出ることを利用した SpinLEEM にも利用されている[Suzuki et. al.2009]。そのほか、加速器ではスピン偏極電子が良く使われ、それに伴ってウィーンスピン回転器も加速器内に組み込まれているケースが多くあるが、筆者はその方面に不案内なので省略する。

8. ウィーンフィルタを利用したフェイズシフターへの応用

電子は粒子であるとともに波でもある。今までの話はすべて電子の粒子としての性質に関係した事柄であったが、波としての電子の性質をコントロールすることにもウィーンフィルタは応用されている。この応用を行ったのはドイツのチュービンゲン大学 Haselbach である[Hasselbach 1997]。

ホログラフィーと言うのは光で広く使われているが、電子ビームを使ったホログラフィー



の研究もおこなわれている¹⁷。ホログラフィーを行うには、バイプリズムと言って、細い導電性の線に電圧をかけ、電子ビームを当てると、ビームは二つに分裂する。このうちの片方を試料にあて、もう片方を真空中に通す。その後再び二つのビームを交わらせて干渉縞を作ったのがホログラフィーで

普通には検出器に記録することのできない波の位相情報を記録することが出来る。

二本に分かれたビームの一方は物質中を通り、他方は真空中を通るため、両者の間に位相のずれを生ずる。両者をウィーンフィルタの中を通すと、プラス極に近いほうのビームの位相を進めてやることが出来、もう一方のマイナス極に近いほうのビームの位相を遅らせることができる。このような位相シフターの原理図を図 6 に示す。このようにして二つに分かれたビームの位相のずれをお互いに調節することで干渉性を良くしてやることが出来る。

スピン回転器では磁場が主役で電場は偏向をキャンセルするために補助的に使われた。フェイズシフターは逆に電場が主役で、磁場は偏向のキャンセルに使われている。

¹⁷電子線ホログラフィーでは日立の外村さんが有名であるが去年(2012年)の5月に亡くなりました。ドイツでは Lichte が盛んに研究している。

9. ウィーンフィルタの収差補正への応用

しばらく前まで高級一眼レフや光の顕微鏡に使われるレンズは、凸レンズや凹レンズを組み合わせた 10 段又はそれ以上のレンズで構成されていた。凸レンズと凹レンズの組み合わせで収差の補正が行われていたのである。電子顕微鏡のレンズでは凹レンズがないため、このように凸レンズと凹レンズの組み合わせによる収差補正は出来ないと言われていた。

電子顕微鏡の作る収差については電子顕微鏡の発明からわずか 5 年後の 1936 年に Schelzer の定理[Schelzer 1936]と呼ばれる球面収差係数 C_s や色収差係数 C_c が正の値を取って負にすることが出来ないいくつかの条件が発表されている。第一の命題は、物面と像面が実像と言う条件である。光のレンズの場合には、顕微鏡や望遠鏡など直接目で見るレンズが虚像で使われるが、検出器に光を取り込む場合は実像にする必要がある。電子の場合は、目で直接見る事が出来ないで、全て実像になる。

二番目の要請は、軸対称な電場と磁場と言う要請である。この項目が収差補正では最も良く知られており、多極子を利用した収差補正器が開発された。ところが、この項は軸対称なレンズと誤解されている場合が多い。軸対称でない場からも軸対称なレンズを作ることが出来る。多極場を用いていながら軸対称なレンズを作ることによって、シェルツァーの定理に矛盾せずに軸対称な負の収差を作ることが出来るのがウィーンフィルタである。非対称レンズの場合は収差補正を行うのに何段もの多極子やラウンドレンズを組み合わせた複雑な系を構成する必要があり、実際に現在大量に生産されている 6 極補正子は何段もの組み合わせで構成されている。しかし、軸対称レンズ一個で負の収差を作ることができれば収差補正系は簡単な構成になる¹⁸。

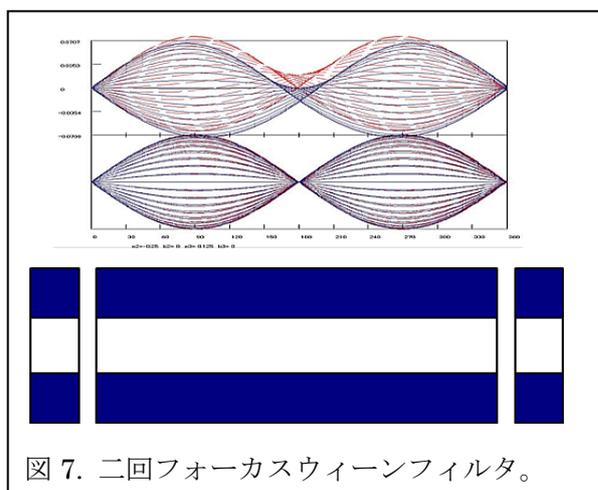
電子顕微鏡の収差補正は負の収差を持つ凹レンズと正の収差を持つ凸レンズを組み合わせて最終的には全体として凸レンズを形成させながら、収差としては凹レンズが作る負の収差が凸レンズの作る正の収差より大きくなるように調整する方法が一つ、もう一つはレンズ作用を持たず大きな負の収差だけを作る多極子レンズと小さな正の収差も作るがレンズ作用をして実像を作るラウンドレンズ(あるいは 4 極子レンズ)の組み合わせからなる場合の二通りが実用化されている。つまり、光の収差補正レンズが 10 段もの組み合わせレンズから構成されていた時代に対応するものと考えて良い。

¹⁸軸対称場の作る軸対称レンズで負の収差を作ることが出来るのが静電ミラーであり、そのレンズ構成は多極補正子と比べずっと簡単である。ただし、ミラーの場合にはビームセパレータを必要とするという別の問題点がある。

光のレンズは今では非球面レンズと呼ばれる一枚のレンズで収差のない条件が選ばれている。ウィーンフィルタは電子レンズの収差補正に置いて、非球面レンズのような役割を果たすものと考えることが出来る。ただ、非球面レンズが収差のないレンズであるのに対して、ウィーンフィルタの収差補正は、レンズとしてはあくまでも一倍のレンズでしかなく、負の収差を実像で作ることが出来るので、正の収差を作る電子レンズと組み合わせてその収差を補正できるものである。

それでは、ウィーンフィルタがどのようにして収差補正器として働くかを次に述べてみよう [Ioanoviciu et. al. 2004, Tsuno et. al. 2005]。まず、色収差 C_c に付いて考えてみる。ウィーンフィルタは一樣な電場と一樣な磁場に 4 極電場または磁場重畳した場の組み合わせで、非点なし結像を行わせている。このときのビームは、ラウンドレンズ収束と言う普通の軸対称レンズと同じ軸対称な軌道を描く。軸対称レンズと違う点は、X 方向に分散を生ずることと、2 次の収差を発生することである。軸対称レンズでは二次の収差は作らず、1 次の色収差の他は 3 次の収差から始まる。

図 7 は、ウィーンフィルタを二回フォーカスで使った場合の電子軌道である。上の図が電場方向(X)の軌道であり、下の図が磁場方向(Y)の軌道である。いずれもほぼ軌道はサインカーブを描いており、 180° で一回目のフォーカス、 360° で二回目のフォーカスを生じている。



また、X 方向軌道については、中心付近で電子のエネルギーの違いによって分散している。この一回フォーカス位置で、ビームが下向きの三角形に広がっているのが二次収差である。

ウィーンフィルタに付いてこの一回目のフォーカス位置で収差がなくなる条件を初めて示したのは Rose である [Rose 1987]。この条件は一段フォーカスでエネルギーフィルタを作る場合に有効な条件であったが、この時残る収差の符号が正

であることから、収差補正に使える条件ではなかった。収差の小さい条件でエネルギーフィルタを使用するにはウィーンフィルタに限らず多くのフィルタで二回フォーカスをさせれば良いと言うことは、1970 年代から知られていた。図 7 は、ウィーンフィルタの場合に二回フォーカスによって収差と分散が消滅する様子を示している。

続いて、Rose は、ウィーンフィルタを使った色収差補正の条件を示す論文を発表した [Rose

1990]。それは、二段フォーカスをさせることによって、二次の幾何収差と分散を消滅させた上で、残る色収差を丸くする条件を見つけたものであった。図8は、4極子成分と6極子成分の調節で、二次の幾何収差が消滅した後に残る色収差がどのような変化を示すかを表している。図からわかるように、色収差が丸くなる条件はいくつもあるが、零を通過できる条件は4極子と6極子のただ一つの組み合わせの場合しかないことが分かる。丸い色収差は、軸上色収差 C_c と同じである。また、零があるとすることは、その両側で収差の符号が変化していることを意味している。今の場合、6極場が $3/8$ の条件で、電場と磁場の4極子が共に負となっている領域で C_c は負の値を示している。このように、6極場の助けを借りれば、ラウンドレンズ収束をする条件の下でも負の色収差を作ることが出来ることがウィーンフィルタ収差補正の大きな特徴である。

よく知られた4極子による色収差補正では、他の収差成分の混入を防ぐために、X、Y方向の軌道がそれぞれ別々に光軸を横切るように設定し、その場所で他の向きのビームに4極場を加えて負の色収差を与え、これを交互に行って丸い色収差を発生させている。この場

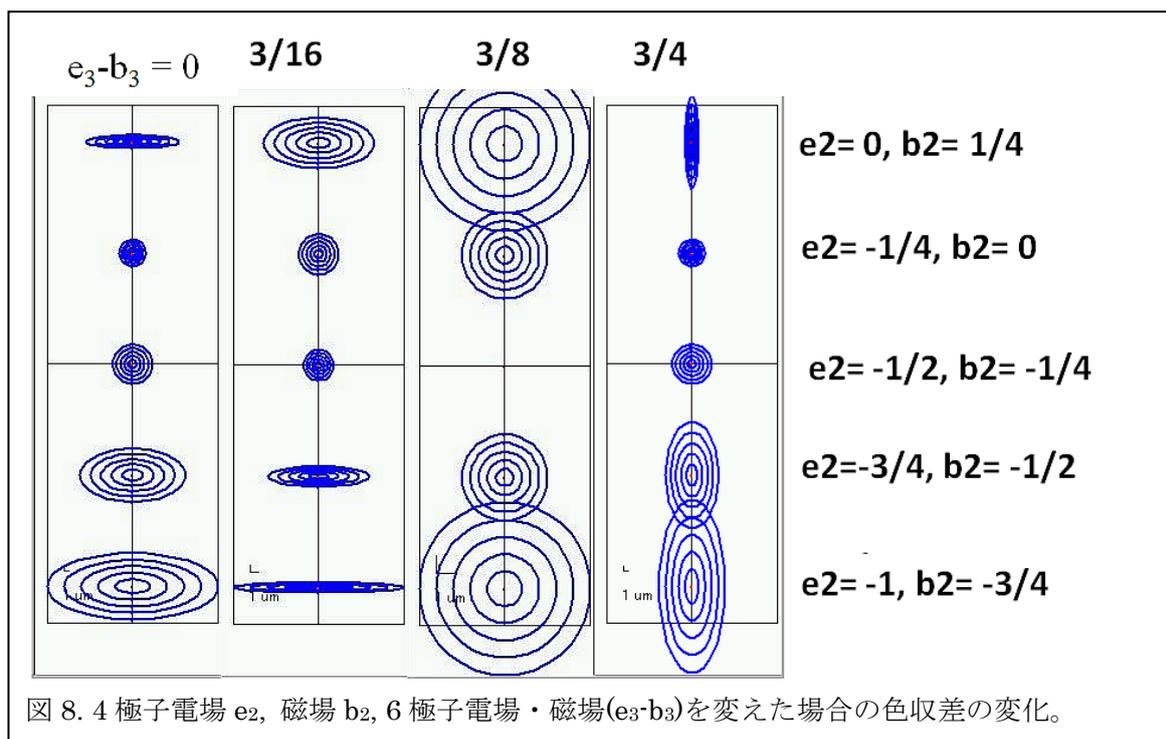


図8. 4極子電場 e_2 , 磁場 b_2 , 6極子電場・磁場(e_3-b_3)を変えた場合の色収差の変化。

合6極子は一切利用されていない。ウィーンフィルタによる収差補正では、あらかじめ理論によって余分な収差のない条件が分かっているので、ラウンドレンズ収束をさせたままで、直接負の軸上色収差を作ることが出来る。

さて、次は3次の収差、球面収差の補正に移る。図9は、ウィーンフィルタの軌道を6極補正子による収差補正と比較したものである。6極補正子の場合、2個の6極子の他、合

計 4 個のラウンドレンズを必要とする。これに対して、ウィーン補正子では、ウィーンフィルター一個ですべてを行うことが出来る。ただ、6 極補正子の場合は、多極子成分は磁場の 6 極子だけで良く、電場は必要としない。これに対して、ウィーン補正子ではラウンドレンズに対応する一様場の他、4, 6, 8 極子を必要とする。これらの全ての成分は、一つの 12 極子で作ることが出来るので、結局電場と磁場の両方を発生させる 12 極子が一個必要なだけである。

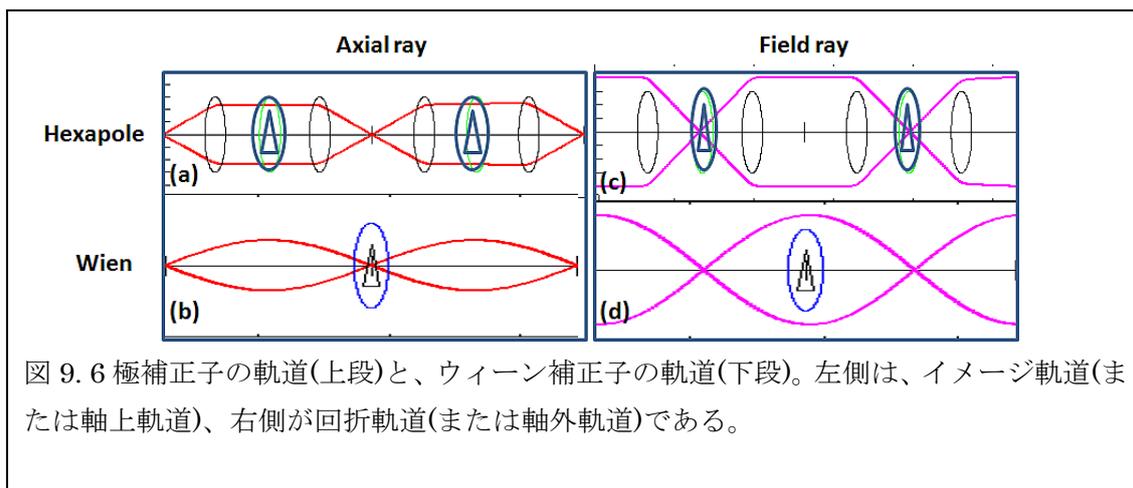


図 9. 6 極補正子の軌道(上段)と、ウィーン補正子の軌道(下段)。左側は、イメージ軌道(または軸上軌道)、右側が回折軌道(または軸外軌道)である。

Cs の場合も Cc 同様、多極子の値を調整して丸い 3 次収差の条件にしなければならない。6 極補正子の場合は二次の幾何収差はもう一つの 6 極子によってキャンセルするが、3 次の球面収差以外の収差については特に決まった条件はなく、像を見ながら色々調整することによって、付加的な収差をなくすように調整が行われる。ウィーン補正子の場合、あらかじめ理論によってどのような条件であれば、丸い収差となるかが知られているので、負の丸い 3 次収差即ち Cs のみを作り出すことが出来る。もちろん、実験に当たっては細かい調整が必要になり、理論は大体の値を予想してくれるだけである。

Cs と Cc の両収差が負となる条件は存在する。しかし、Cs と Cc の関係を変化させることが出来るパラメーターはフィルタの長さだけである。従って任意の Cs と任意の Cc を持つレンズの収差を同時に補正することはできない。フィルタ長は、数センチから 10cm 程度の間で使えるだけで、1m もあるフィルタは実際的ではないので、任意の関係を持たせることが出来ない。この問題に対して、Liu ら[Liu et al. 2011]は、二組のウィーン補正子を組み合わせることで、片方を Cs 補正、もう一方を Cc 補正用とし、任意の Cs, Cc を持つレンズの収差を補正できるとして、その条件をシミュレーションによって示した。彼らのもう一つの成果は、彼らはラウンドレンズと補正子を組み合わせた系において、Cs を零にする条件を探す最適化のアルゴリズムも彼らのソフトウェアに組み込んであるが、このソフトでウィーン収差補正を最適化した条件は理論で求めた丸いビームを作る条件のすぐ近くにあったことである。これは理論とソフトウェアのどちらも正しい解を与えていると言う証明

でもある。

10.4 極子ウィーンフィルタとその応用

ウィーンフィルタは、電場と磁場を重畳し、それぞれの場によるビームの偏向作用を打ち消すものである。この作用は一様場 E_1 , B_1 に限るものではない。4 極場 E_2 , B_2 に拡張することが出来る¹⁹。しかし、4 極子場は X 方向に収束作用が起こるときには Y 方向には発散作用を生ずる。それぞれの場で極性を逆にすれば、収束と発散の向きが入れ替わる。両方の 4 極場を加えておき、その強さを調節すれば、電場と磁場の 4 極場がかかっているながらレンズ作用は何も起こらないと言う状況を実現することが出来る。残念ながら 4 極場だけでは収差を零に調整することはできない。このため、全くローレンツ力が働かない状況は実現されないが、メインの作用はなくすことが出来る。一様場は加えておらず、4 極場だけを印加しているので、分散は生じない。

ウィーンフィルタの 4 極子だけを利用する使い方を初めて提案したのは Zach である [Zach & Rose 1986]。Zach の提案は通常の磁場が試料にかからないタイプの SEM のビームセパレータである。試料と対物レンズ底面の間にこの「電磁 4 極検出器」を入れる。この 4 極子ウィーンフィルタは 8 極で構成されているが、電極が水平・垂直の 4 極、磁極が斜め方向の 4 極からなる構成である。日立のビームセパレータ同様に水平方向の電極は金網になっており、曲げられた二次電子が網を通り抜けて検出器に達することが出来るように構成されている。両側の電極の後ろに検出器をそれぞれ用意すれば、二次電子はその放出の方向によって、異なる検出器に入れることができる。この 4 極子ウィーンフィルタによって、二次電子が右側に向かって放出されたのかそれとも左側に向かって放出されたかを知ることが出来、凹凸のある試料などの場合に立体的な像を合成できる可能性がある。

この同じ 8 極子はやがて色収差補正器として再び取り上げられた [Rose 2008]。6 極子による球面収差補正の爆発的ともいえる普及によって STEM(走査透過型電子顕微鏡)の空間分解能は 0.5 \AA に達したが、色収差補正についてはアメリカの Team プロジェクトなどで Rose の考案した多くの多極子を用いてほとんどすべての収差を補正できる装置などが組み立てられていたが、非常に込み入った装置であった。やがて Rose と Zach は、上で説明した 4 極子ウィーンフィルタをそのまま使って、これをそれ以前に Zach が SEM の Cs, Cc 補正に成功した 4 個の 4 極子を使った Cs 補正と同じような構成で組み合わせる Cc 補

¹⁹ 一様場 E_1 , B_1 ではレンズ作用をキャンセルすることはできず、偏向作用のキャンセルだけであった。レンズ作用は両方の場ともに電場方向即ち X 方向に凸レンズとして働き、磁場方向即ち Y 方向には何の作用もなかった。このため、これらを重畳してもレンズ作用をキャンセルすることはできないのである。

正法を提案し、実験的にも成功を収めている。この装置を **Rose** は、一次のウィーンフィルタと命名している。今までのウィーンフィルタは、零次のウィーンフィルタということになる。

一方、日本電子の細川らも同じ 4 極子を使った新しい色収差補正器を開発した [Hosokawa et. al. 2013]。彼らはそれを 4 極子ウィーンフィルタとは言っておらず 6 極 Cs 補正子同様の厚い多極子によるものとして解釈している。電場と磁場の役割について原理的には片方だけで良いが、実用的には大きな収差を作る電場の助けがあった方が良いと述べている。電場と磁場の組み合わせによってレンズ作用をキャンセルし、同時に収差もキャンセルされるが、電場の収差の方が磁場の収差より大きいいため、レンズ作用がなく、収差だけの 4 極子が作れるのである。実際、彼らは 2 個の 4 極子の前と間にラウンドレンズを挟んだ 6 極補正子同様の構成を発表しており、**Rose** らが 4 極子を 4-8 極 Cs, Cc 補正子の場合と同じように何段か組み合わせているのと違った構成になっている。両者に共通しているのは、4 極子ウィーンフィルタ単独では Cc を作ることが出来ず、別の 4 極子なりラウンドレンズとの組み合わせが必要であると考えている点である。この点、私は、12 極子を用いて、先にウィーンフィルタの収差補正のところで示したように、二次、三次収差を丸くする条件を見つけ、球面収差と色収差だけが出てくるようにすれば、一個の多極子で負の Cs, Cc を作ることが出来るのではないかと考えている。ただ、一様場を用いないでこれを行うにはラウンドレンズでレンズ作用を補助的に作ってやる必要が出てくる可能性もある。しかし、それでも、一様場のウィーンフィルタに比べれば多極子に加える電場が小さくでき、より大きな加速電圧に対応する補正子が出来る可能性があるのではないかと考えられる。

このような 4 極子ウィーンフィルタを用いれば、電子に対して 4 極場の作用によるローレンツ力以外の効果を及ぼすことが出来る。電子には、電荷の他に、スピンと、軌道角運動量という性質がある。スピンのらせん運動をする軌道角運動量を持たせておくと、それをウィーンフィルタの 4 極場を通したときに電子の持つスピンの向きを整列させるという働きがあることが分かっている [Karimi et. al. 2012]。これは難しい概念なので良く理解できないが、とにかく、ウィーン条件を一様場だけでなく 4 極場にも適用できること、そして、軌道角運動量と言った電子の別の性質に対して作用させる素子として利用できることが分かってきたことからウィーンフィルタは真空中電子のいろいろな操作、測定にさらに便利に使われていくということが期待される。

11. おわりに

ウィーンフィルタの色々な応用についてまとめて見ると、日本では、まず日立で SEM 用のビームセパレータとしてのウィーンフィルタが開発され、やがて日本電子で LEEM 用のウ

ウィーンフィルタが開発されていたことが分かる。いずれの場合も欧米では検討をされた形跡は残るものの、実用化されていないものである。前者に関しては、日立の主要製品に搭載され、世界を席卷する装置となった。後者に関しては、製品として販売された台数は数台であったが、その同じセパレータが東芝(ニコン、荏原)と日立で受け継がれて LEEM または MEM の検査装置として試作されている。

収差補正の所で、ウィーンフィルタの理論の話若干したが、この理論作りをどのように行ったかについて若干述べて見たい。このウィーンフィルタを用いた収差補正理論は、実は筆者が現役時代にルーマニアのアイソトープ研究所の Ioanoviciu 博士に依頼して作ってもらったものである。この時、私は彼に二つのことを強くお願いした。一つは私に理解できる数学を用いること。私が提案したのは、すべての式を三角関数で表現することである。理論の式を作る時には、イクスポネンシャルを用いる場合と虚数を用いる場合が多い。それぞれ利点があり、理論自身の自己都合としてはこれらを使う強い動機があることは分かるが、私としては自分で理解できない内容の式を作ってもらっても仕方がないので、私が普段から馴染んで来た三角関数だけを用いた式の展開をしてくれるよう強く要請した。

もう一つは、特殊な場合を詳しく調べる式の展開をしてもらうことであった。これはどういう意味かと言うと、実際に作る装置はある特殊な条件のもとで作られる。その実際に作られる装置の条件を入れて式を簡略化していくことである。普通、理論は一般的に作られる。どんな場合でも使える理論の方が、特殊な場合にしか通用しない理論よりも一般的には優れている。理論家はいつも一般化を念頭に置いて式を作っている。これを実際に作る装置の特殊な場合に限定してもらったことが第二点である。

この理論作成のお願いは、実はウィーンフィルタの収差補正とは関係なく、ウィーンフィルタのモノクロメータを製作していた時に、客先からの高度な要求に自分一人では対応しきれずに、いわば理論家に SOS を発したものであったが、この理論の作成に長い年月を要してしまったため、モノクロメータの作成には間に合わず、結局それが終わった後で、会社を定年退職するまでの比較的時間の余裕のある時期に完成した式を眺めて見る機会に恵まれたものである。このようにして、収差補正の条件式の導出にまで行きつくことが出来たわけである。このような理論家と実験家ないしは装置設計者の協力は別の面でも有効になるのではないかと思われる。理論家が一般化のみに拘り、さらに式の単純さ、きれいさにのみとらわれて、難しい表式になればなるほどそれは実際にその理論を利用できる人の数を減らしていく。

Rose の電子光学の理論は数多くあるが、理論家を別にすれば、彼の弟子以外には彼の理論式をフォローできる人があまりいないのも事実である。幸いにも、彼の弟子たちは、彼の

考えた理論に基づく装置を次々と実用化して行ったので、彼の理論も世の中に知れ渡っていくことが出来た。理論の発表と製品化にはかなりの時間差があったので、他で実用化されても良かったのであるが、理論の難しさがそれを妨げたのではないかと思っている。

ここではウィーンフィルタの歴史的発展と現代の応用に関して述べ、技術のつながりについて若干の見解を述べる事が出来た。

References

Andersen W. H. J., Optimum adjustment and correction of the Wien filter, Brit. J. Appl. Phys. 18 (1967) 1573-1579.

Andersen W. H. J., Le Poole J. B., A double Wienfilter as a high resolution, high transmission electron energy analyser, J. Phys. E: Sci. Instrum. 3 (1970) 121-126.

Bainbridge K., The Isotopic Weight of H₂, Physical Review 42 (1932) 1-10.

Bainbridge K.T., The masses of atoms and the structure of atomic nuclei, J. Franklin Institute 215 (1933) 509-534.

Bartky W., Dempster A.J., Paths of charged particles in electric and magnetic fields, Phys. Rev. 33 (1929) 1019-1022.

Batson P. E., Advanced spatially resolved EELS in the STEM, Ultramicroscopy 78 (1999) 33-42.

Beck S., Plies E., Schiebel B. (1995) , Low-voltage probe forming columns for electrons, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 363, 31-42.

Bleakney W., Hipple Jr. J. A., A new mass spectrometer with improved focusing properties, Phys. Rev. 53 (1938) 521-529.

Boersch H., Geiger J., Hellwig H., Steigerung der Auflösung bei der Elektronen-Energiesanalyse, Physics Letters, 3 (1962) 64-66. Wien

Boersch H., Geiger J., Stickel W., Das Auflösungsvermögen des elektrostatisch-magnetischen Energieanalysators für schnelle Elektronen, Zeitschrift für Physik 180 (1964). 415-424.

Boersch H., Geiger J., A. Imbusch, N. Niedrig, High resolution investigation of the energy losses of 30 keV electrons in aluminum foils of various thicknesses, Phys. Lett. 22 (1966) 146-147.

Bondy H., Popper K., Ein Massenspektrometer mit Richtungs- und Geschwindigkeitsfokussierung, Annalen der Physik. 17 (1933) 425-444.

Cubric D, van Kranen S., Kruit P, Kumashiro S, On the performance of an energy filter for a high brightness electron gun, Recent Trends (2004) p.19-20, (Brno, Check Republic)

Curtis G. H., Silcox J. (1971). A Wien filter for use as an energy analyzer with an electron microscope, Rev. Sci. Instrum. 42, 630-637.

Essig M., Dissertation. Universität Kaiserslautern. (1981)

Essig M., Mayer A., Geiger J., A high transmission Wien filter employing inhomogeneous fields, ICEM proceedings vol. 1, (Kyoto) 1986, Maruzen

Frosien J., E. Plies, Anger K., Compound magnetic and electrostatic lenses for low-voltage applications, J. Vac. Sci. Technol. B7 (1989) 1874-1877.

Hasselbach F., Selected topics in charged particle interferometry, Scanning Microscopy 11, (1997) 345-366.

Henneberg H., "Feldkombinationen zur Geschwindigkeits- und Massenspektrographie. I" Geschwindigkeits- u. Massenspektrographie. I Ann. Physik 19 (1934) 335-344.

Bleakney W. Hipple J. A., A mass spectrometer with improved focusing properties, Phys. Rev. 53 (1938) 520.

Herzog R., Ionen- und electronenoptische Zylinderlinsen und Prismen. I. Z. Phys. 59 (1934) 447-473.

Ioanoviciu D., Ion optics of a Wien filter with inhomogeneous fields, Int. J. Mass Spectro. And Ion Phys. 11 (1973) 169-184.

Ioanoviciu D., Tsuno K., Multinez G., Third order aberration theory of double Wien filters, Rev. Sci. Instrum. 75, (2004) 4434-4441.

Jordan E. B. , The $C^{12}H_2 - N^{14}$ mass difference, Phys. Rev. 57 (1940) 1009-1010.

Jordan E.B., The mass differences of the fundamental doublets used in the determination of the isotopic weights C^{12} and N^{14} , Phys. Rev. 60 (1941) 710-713.

Karimi E. K., Marrucci L., Grillo V., Santamato E. Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion and Spin-Polarization Filtering in Electron Beams, Phys. Rev. Lett. PRL 108, 044801 (2012) 044801-1-5.

Kienle M., Plies E., An off-axis multi-channel analyzer for secondary electrons, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 519 (2004) 325-330.

Kohashi T., Konoto M., Koike K., Rev. Sci. Instrum 75 (2004) 2003-2007. A spin rotator for spin-polarized scanning electron microscopy.

Krijin M PCM, Henstra A, Van Den Mast D, Correction device for the correction of lens aberrations in particle-optica apparatus, US Patent 5,838,011 (1998)

Kohashi T., Konoto K., Koike K., High-resolution spin-polarized scanning electron microscopy (spin SEM), J. Electron Microscopy 59 (2010) 43–52

Kuroda K., Yamamoto K. (1990) Aberration equation of ExB filters and its experimental evaluation, Optik 86 , 64-66.

Legler W., Ein modifiziertes Wiensches Filter als Elektronenmonochromator, Zeit. F. Phys. 171 (1963) 424-435.

Liu H., Wang L., Rouse J. Munro E. (2011). Design and optimization of multipole lens and Wien filter systems, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 645, 300-306.

Miyoshi M., Yamazaki Y., Nagai T., Nagahama I., Okumura K., J. Vac. Sci. Technol. B 17 (1999) 2799-2802. Development of a projection imaging electron microscope with electrostatic lenses

Mook H W , Kruit P, Inst. Phys. Conf. Ser. No.153, Proc. EMAG97(1997) 81-84

Mook H.W., Kruit P., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 427 (1999) 109~120

Mook H. W., Batson P.E., Kruit P. (1999) Operation of the fringe field monochromator in field emission STEM, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 161:Section 5 (EMAG99, Sheffield), 223-226.

Nagai S, Sakakibara H, Hata K., Okada M., Mimura H., Measurement of z-direction component of electron spins field emitted from a single-crystal magnetic whisker, Ultramicroscopy, 111 (2011) 405-408.

Plies E., Marianowski K., Ohnweiler T. (2011). The Wien filter: History, fundamentals and modern applications, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 645, 7-11.

Rose H (1987). The retarding Wien filter as a high-performance imaging filter, Optik 77 26-34.

Rose H. (1990). Inhomogeneous Wien filter as a corrector compensating for the chromatic and spherical aberration of low-voltage electron microscope, Optik 84, 91-107.

Rose H., Geometrical charged particle optics, Springer Series in Optical Science, ed. W. T. Rhodes, Atlanta, Springer, 2008.

Scherzer O., Über einige Fehler von Electronenlinsen, Z. Physik 101 (1936) 593-603.

Shaw A.E., Electron orbits in crossed electric and magnetic fields, Phys. Rev. 44 (1933) 1006-1011.

Shaw A. E., A new precision method for the determination of e/m for electrons, Phys. Rev. 54 (1938) 193-209.

Shimakura T., Takahashi Y., Sugaya M., Ohnishi T., Hasegawa M., Ohta H., Mirror electron microscope for inspecting nanometer-sized defects in magnetic media, Microelectronic Engineering 85 (2008) 1811-1814.

Suzuki M., Hashimoto M., Yasue T., Koshikawa T., Nakagawa Y., Konomi T., Mano A.,

Yamamoto N., Kuwahara M., Yamamoto M., Okumi S., Nakanishi T., Jin X., Ujihara T., Svartholm N., Velocity and two-directional focusing of charged particles in crossed electric and magnetic fields, (2009) 108-109.

Takafuji A., Nozoe M., Shinada H., *Microelectronic Engineering* 53 (2000) 649-652. Development of a secondary-electron detection system for high-speed high-sensitivity inspection SEM imaging

Teichert J., Design of an achromatic mass separator for a focused ion beam system, SPIE vol. 2014, Charged Particle Optics (1993) 85-92.

Terauchi M., Kuzuo R., Satou F., Tanaka M., Tsuno K., Ohyama J., Proc. XIIth Int. Cong. Electron Microscopy, (1990) San Francisco Press, 88-89

Terauchi, M., Tanaka, M., Tsuno, K. & Ishida, M. (1999) Development of a high energy resolution electron energy-loss spectroscopy microscope. *J. Microsc.* **194**, 203–209

Thomson J.J. (1897). Cathode rays, *Philos. Mag.* 44 293-317.

Todokoro H., Fukuhara S. Shinada H., Seitou S., Satou T. (1990) Multi-sampling method in an EBT for logic waveform measurement, *Microelectronic Engineering* 12, 417-424.

Todokoro H. (2002) Scanning electron microscope, US patent US 6,444,981, B1 (Sep. 3.

Tsuno K., *Ultramicroscopy* 55 (1994) 127-140, Simulation of a Wien filter as beam separator in a low energy electron microscopy

Tsuno K, Ioanoviciu D & Martinez G., , Third-order aberration theory of Wien filters for monochromators and aberration correctors, *J. Microscopy* **217** (2005) 205-215.

Wien K., 100 Years of Ion Beams: Willy Wien's Canal Rays in *Brazilian Journal of Physics* vol. 29, no. 3, September 1999 401-414,
http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v29_401.pdf.

Wien W., Untersuchungen über die elektrische Entladung in verdünnten Gasen, *Ann. Phys.* 301 (1898) 440.

Wittry D. B., Sullivan P.A. (1970). A scanning electron microscope with efficient detection of reflected or emitted charged particles, 6th Int. Cong. Electron Microscopy, Grenoble, 205-206.

Yonezawa A (2005) (Jpn 2002), Electron beam apparatus, US Patent 6,949,745 B2.

Zach J., Rose H., Scanning 8 (1986) 285- 293, Efficient Detection of secondary electrons in low-voltage scanning electron microscopy

村越久弥、牧野浩士、品田博之 (2008) 出願 2001, 荷電粒子線装置。日本国特許第 4103345 号