

技術報告

高エネルギー分解能アナライザ・モノクロメータとしての ウィーンフィルタ

津野 勝重*

EOS 津野

〒196-0001 東京都昭島市美堀町 2-10-11

*Tsunob6@hotmail.com

(2012年12月6日受理; 2013年2月14日掲載決定)

電場と磁場を重畳してビームを直進させるウィーンフィルタをその発明時から今日まで概観し、分析装置としてなぜ主流の位置を占めることが出来なかったかを考察する。また現代ではその欠点の大部分が克服され、最も優れた分析装置として使えることを示す。さらに実用的な観点から、3種類の多極子ウィーンフィルタについてそれぞれの特徴を示す。最後にエネルギー分解能向上のテクニックとしてのバトラー電極を用いたリターディング法についてシミュレーションによって検証する。

Wien filters as high energy resolution monochromator and analyzer

K. Tsuno*

Electron Optics Solutions (EOS) Tsuno

2-10-11 Mihori, Akishima, Tokyo 196-0001, Japan

*Tsunob6@hotmail.com

(Received: December 6, 2012; Accepted: February 14, 2013)

Wien filter has been described from its born to the present time and consider why it cannot be main analytical equipments. In recent years, most of the drawbacks of the Wien filter have been overcome and it becomes a best analytical instrument for electrons. Three different designs of multi-pole Wien filters are proposed and describe those merits and demerits. Lastly, retarding technique using Butler electrodes has been demonstrated to improve the energy resolution.

1. はじめに

電子線のエネルギー分析に使われるアナライザは電場あるいは磁場を電子の進行方向に直交して加えることによって電子を円運動させ、その半径が電子の持つエネルギーによって異なることを利用して軌道を分離する装置が多い。何個もの磁場や電場の装置を組み合わせると入口と出口を直線で結んだものもある。これに対し、ウィーンフィルタは電場と磁場

の偏向方向を逆にすることで直線の光軸を持つエネルギー分析装置である。このウィーンフィルタが1898年と言うX線や電子が発見された19世紀末に発明された[1]のは驚くべきことである。まだエネルギー分析装置どころか、電子顕微鏡も質量分析装置も作られていなかった時代のことである。

ウィリー・ウィーンがウィーンフィルタを発明した時、その目的は当時カソードレイと呼ばれていた

電子の電荷と質量の比を求めるためであった。この測定は J.J.トムソンによってウィーンの測定の前年 1897 年に行われた[2]。この実験で電子が質量を持つことが明らかとなり、真空中の放電によって生じた光のようなカソードレイは質量を持った粒子であることが証明され、J.J.トムソンは電子の発見者となった。トムソンの測定は、カソードレイに電場と磁場を別々に加えて、それぞれによる電子の曲がり方を測定したものであったが、ウィーンの測定は、直交する電場と磁場を同時にカソードレイにかけ、それが直進するように電場と磁場の強さを調節した。このためウィーンの測定した値は現在知られている値に近い精度の高いものであった。

しかし、このウィーンフィルタはその後忘れ去られ、1940 年代にアメリカで独立にペインブリッジ[3]によってアイソトープの測定をするための速度フィルタとして再発明され、その後 2~3 の装置に利用された。ドイツにおいては、1940 年代に電子とイオンの光学が研究され、特殊な例として電場と磁場の重畳した場合がウィーンフィルタとして紹介されている[4]。

本格的なウィーンフィルタの利用は 1960 年代になってからベルシェ[5]によって、高エネルギー分解能のモノクロメータ、アナライザとして使われたことに始まる。ウィーンフィルタはおよそ 60 年の休眠の後によみがえり、今またそれから 60 年の時を経ようとしている。ベルシェの利用以来ウィーンフィルタはその理論の展開が行われ[6]、さらに色々な分野に利用された。モノクロメータ、アナライザ、質量分析装置[7]の他には、ビームセパレータ[8]、スピン回転器[9]、位相シフター[10]、収差補正器[11]、軌道角運動量変換器[12]に応用されている。

しかしながら、モノクロメータ、アナライザへの利用と言う観点で見たとき、ウィーンフィルタは電場、磁場単独のフィルタに比べてはるかに低調な利用に止まっている。その理由は、ウィーンフィルタの性能が低いからではない。ビーム直進の条件(ウィーン条件と呼ばれる)がフリンジ(ビーム出入口近傍の電極又は磁極端末)領域で合わないことによるビーム偏向のため、直線の光軸が実際の装置で実現せず、実験ではビームを見出すことに困難が大きかったと言う事情によるものであったと今では考えられる。この記憶がいまだに尾を引いて、ウィーンフィルタは難しいと言う認識が広まってしまったと考えられる。

しかしながら、昨今、事情は大きく変わったと言

うことが出来る。まず多極子ウィーンフィルタの利用により、フリンジ領域でのウィーン条件がほぼ達成され、光軸は実用上問題にならない程度に直線となった。このため、ビームが出て来ないと言った極端な不都合はなくなった。多極子ウィーンフィルタが初めて提案されたのは実に 1986 年のことであり[13]、すでに 25 年も前のことではあるが、その普及には長い時間を必要としたと言わなければならない。ただ当時は多極子フィルタを精度良く作ることに困難が大きかったが、最近では機械工作技術の進歩により、容易にしかも精度良く作れるようになった。多極子ウィーンフィルタを前提とすれば、ウィーンフィルタの光軸の直線性というメリットは、高分解能アナライザにとって他に代え難い利点を提供するものである。

ウィーンフィルタのメリットの第一が光軸が直線であることだとすれば、第二のメリットは、理論の容易さと正確さである。これはもちろん第一のメリットから派生するものである。光軸がカーブしている分析装置の光学理論の決定的に不利な点は、フリンジ場の影響を正しく理論に取り込むことが出来ないことにある。フリンジ場がある限り、カーブした光学系の光軸は直線と円の組み合わせでは表すことが出来ない。フリンジでは最初大きな半径の円に沿ってビームは曲がり始め、次第に小さい半径の一定値近づく。この点一つとっても、この事実を理論に取り入れることは大変に困難である。フリンジはカーブしたアナライザにとって本質的に重要なものであり、その影響から逃れることは出来ない。しかしながら、ウィーンフィルタにとって、ウィーン条件が合っている限り、光軸は直線である。ウィーン条件を合わせることは努力によって克服できる課題である。直線の光軸を持つ場合、フリンジの影響は単に場の値が一定値より低いだけに止まる。そして、何よりも光軸が直線であることによって、理論式が単純に表現される。例えば、分析装置で大切な定理になっている、二回フォーカスによる二次の幾何収差の消滅などは理論式の中ですっきりと示すことが出来る[14]。

カーブした光学系で行われているように、形状によってフォーカス条件を決めてしまう場合は、実際に機械加工される寸法がシミュレーションした時の形状とずれる場合があり、機械的な設定だけでは良い条件に設定できないことがしばしばある。また、フィルタの作る収差を補正することはフィルタ自身では出来ず、フィルタの後に何段もの多極子を置い

て行わなければならない。第三の実用的に重要なウィーンフィルタのメリットは、多極子ウィーンフィルタでは一様場の大きさだけでなく4極子成分の大きさを自由に変えることが出来ることである。

さらに、12極子フィルタを用いれば、フィルタの作る二次収差の補正も電氣的に行うことが出来る[15].

ウィーンフィルタのこのような優れた性質はようやく知られ始めてきたばかりであり、今後の発展が期待される場所である。しかしながら、表面分析装置ですでにその地位を確立した静電半球型分析器や、電子顕微鏡で広く用いられているセクター磁石やオメガフィルタなどに対して、その優位性を主張していくことには、応用も含めてすでに確立した技術への挑戦と言う難しい面もある。

ここでは、基本的には一様場と4極場を生成できる3種類の多極子ウィーンフィルタを比較して示す。12極子による収差補正されたウィーンフィルタは製作された装置としてはまだ非点補正だけの8極子フィルタを上回るほどの成功例がないからである。続いて、そのうちの一つについてリターディングと言うフィルタ内での加速電圧を下げる方法によって、エネルギー分解能を高める方法について述べる。ここでは、電子銃で電子を加速するために提案されたバトラー型の電極[16]を用いて電子の減速を行わせる場合について述べる。

2. ウィーンフィルタの動作原理

Fig. 1(a), (b), (c)には、3種類の多極子ウィーンフィルタの断面形状を示す。(a)と(b)は8極子、(c)は12極子である。(a)は全ての角度が等しい8極子であるが、(b)はコイルを二個に纏めるために4本の極を折り曲げており、極の角度も二種類ある。Fig.1(b)に示したように、電極あるいは磁極のなす角度がそれぞれ 120° になるよう極の角度を決めてある。(c)は12

極子とは言っても、(a)のような同じ角度の極を12個並べた二次収差の補正が出来る12極子とは異なり、他の二個と同じ一様場(2極場)と4極場のみを作る多極子である。(b)では斜め方向の4本の極が電極と磁極の兼用となっているが、(c)ではこの4本のそれぞれを2本に分割して電極と磁極の役割を分離したものと理解することもできる。

ここで簡単にウィーンフィルタの電場と磁場の値について述べておく。電場や磁場単独のアナライザでは基本的な量が回転半径(サイクロトロン半径) R となるが、ウィーンフィルタではビームが直進するのでフィルタ長 L が基本量となる。電場や磁場が弱い場合はフィルタの両端は物面と像面にならず、フィルタから離れた場所にそれらが出来る。このため、フィルタの長さではなく、物面と像面間の距離を実効的なフィルタ長 L_{eff} として使う。このことも光軸が直線のウィーンフィルタならでのことである。光軸がカーブしている他の分析装置ではパスエネルギーと電場や磁場の強さの関係は固定しており、そもそもその関係から外れた弱い電場や弱い磁場で分析装置を働かせるということは出来ない。ただ一つの回転半径の下で使うことになる。

さて、ウィーンフィルタは

$$L_{eff} = \pi R \quad (1)$$

の関係によって、回転半径 R を持つ分析装置と寸法的な比較をすることが出来る。ウィーンフィルタの L_{eff} は、無限大から徐々に小さくしていくことが出来る。この点も最初に装置を立ち上げて行く時に便利である。光軸のカーブしている装置では、最初ビームが出ていない装置について突然所定の電圧あるいは電流を印加した上でビームを探さなければならない。これに対し、ウィーンフィルタでは最初フィル

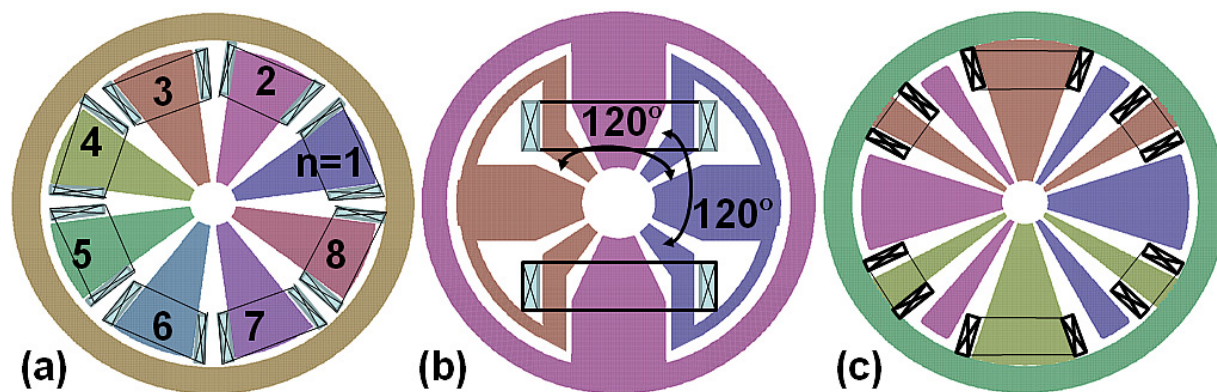


Fig. 1. Cross section of three multipole Wien filters.

タの電圧・電流を零にしてビームを出しておき、ビームを見失わないようにして徐々に電圧・電流を所定の値まで上げて行くことが出来る。

さて、加速電圧 U_0 と、フィルタ長 L_{eff} に対し一様電場 E_1 は次の式で与えられる。

$$E_1 = 2\pi U_0 / L_{eff} \quad (2)$$

電極間距離を S_e とすれば電場は電極に加える電圧に変換することが出来る。

$$V_1 = E_1 \cdot S_e \quad (3)$$

電子の速度はニュートンの運動方程式で与えられる。

$$v = \sqrt{2eU_0 / m} \quad (4)$$

有名なビームの直進条件であるウィーン条件は、この速度を使って与えられる。

$$E_1 = vB_1 \quad (5)$$

磁場 B_1 の値をコイルの巻き数 N と電流 I_1 の積であるアンペアターンに換算するのは次の式である。ウィーン条件をフリンジ領域でも満足させるためには磁極間ギャップ S_m は電極間距離 S_e と等しくしなければならない。 $S = S_e = S_m$ 。これはウィーン条件をフリンジでも満足させるための必要条件であるが、もちろん十分条件ではない。

$$NI_1 = B_1 \cdot S / \mu_0 = 2\pi U_0 \cdot S / (v \cdot L_{eff} \cdot \mu_0) \quad (6)$$

ところで、一様場 E_1 , B_1 によっては電場方向(X)のフォーカスが得られるだけで、磁場方向(Y)にはレンズ作用がない。つまり、ウィーンフィルタは電場と磁場と言う2つの場を直交方向にかけているにも拘わらず、そのレンズ作用はいずれも X 方向だけで、電場または磁場単独のアナライザと同じ円筒レンズを形成する。Y 方向にもフォーカスを行わせて、軸対称レンズと同じ結像条件であるラウンドレンズフォーカスを実現するには、4 極子場を導入する必要がある。ただ、4 極子場は Y 方向にフォーカス作用を持たせると、X 方向には発散作用が生ずるので、一様場に依るレンズ作用を $\sqrt{2}$ 倍に強めないと同じ場所にフォーカスさせることが出来ない。ウィーンフィルタでは、この 4 極子場は電場と磁場どちらの

場によって実現しても良く、両方を使っても良いが、後で示すように、6 極子成分を作れないフィルタ形状(8 極子)の場合には、電場 4 極子によって Y 方向フォーカスを行い、ラウンドレンズフォーカスを実現するのが収差を最も小さくする方法である。電場 4 極子は、

$$E_2 = \pi^2 \cdot U_0 / (\sqrt{2} \cdot L_{eff}^2) \quad (7)$$

で与えられる。 E_2 は電圧 V_2 に次のように変換される。

$$V_2 = E_2 \cdot S^2 \quad (8)$$

これでウィーンフィルタを動作させるに必要な電圧と電流が求まった。

3. 多極子ウィーンフィルタのいろいろ

Fig. 1(a) に示す多極子では、右側の水平線から反時計回りに n 番目の極の中心線までの角度を θ とすると、Fig.1(a)に示したように $n=1\sim 8$ と番号付けされた電極に与えられる一様場を作るための電圧 $V_1(n)$ と 4 極場を作るための電圧 $V_2(n)$, 並びに各極の周りに巻かれたコイルに与えられるアンペアターン $NI_1(n)$ は、

$$V_1(n) = V_1 \cdot \cos \theta \quad (9a)$$

$$V_2(n) = V_2 \cdot \cos(2\theta) \quad (9b)$$

$$NI_1(n) = NI_1 \cdot \sin \theta \quad (9c)$$

で与えられる。これらの式は、それぞれの電極の大きさが不揃いでも成り立つ。

サイン、コサインの関係から、8 極に対して同じ電圧が 2 つの極に与えられるので、電圧源は 4 種類で良く、電流の方はプラス、マイナスはコイルの巻き始めと巻き終わりを逆にすることで対応できるので、2 種類で良い。アンペアターンの絶対値は二種類でも電流値を一定とし、コイルの巻き数で異なるアンペアターンに調整することもできるので、電流源数としては一つに纏めることもできる。(a)の欠点は、8 極すべてが電極・磁極の両方で使われるため、

電磁石として考えた場合各極とヨークの間に絶縁物を挟まなければならない。このため、磁極としては余分のギャップが生まれ、ロスを生じる。ロスされた磁場は空間にさまよい出ることになる。また、電場は正確に決められるのに対し、磁場の値には不確実性が入り込むことになる。8極は一体として加工することが出来ず、バラバラに作った極を後で組み立てる方式で作らざるを得ない。このため、組み立て精度をいかに確保するかが課題となる。

これに対し、(b)では Fig.1(b)に示すように、コイルが8個ではなく2個に纏められており、電流源は1個で良い。電圧源は左右の電極に絶対値が同じで符号の異なる電圧を与え、上下極はアースに置くことで一様電場を作ることが出来る。電場偏向子などで一様場を作るときに、 120° の広がりを持つ電極をX方向とY方向に作るのと基本的には同じである。斜め方向の極を電極と磁極として共用することで 120° の角度を同一半径($S=S_e=S_m$)の円周上で実現している。

4極場は、左側電極電圧 $V(\text{left})$ は $V(\text{left}) = V_1 + V_4$ 、右側電極電圧 $V(\text{right})$ は $V(\text{right}) = -V_1 + V_4$ と言ったようにアンバランスに与えることによって作る。さらに $-2V_4$ を磁極に与えればより正しい4極子電場を作ることが出来るが、その場合は電圧源が2個ではなく3個必要になると同時に鉄芯をコイルから浮かせて電圧を印加出来るようにしなければならない。(b)は電源の数を節約できることも利点であるが、その他に、極を一個ずつバラバラに作るのではなく、3個または2個まとめて作ることが出来ることにより、組み立て精度が向上する。また超高真空を必要とする環境の中で使われる場合には、コイルに流す電流を大きくすることによって巻き数を減らし、各ターンを離して巻くことにより、絶縁被膜のない裸の銅線をコイルとして使用することで、コイル被膜を排除し超高真空実現の妨げとならないように配慮することも容易である。

(c)の最も大きな特徴は電極と磁極がはっきりと分離していることである。この形はブラウン管型のテレビのための静電偏向子として開発された[17]もので、これまでウィーンフィルタとして作られた記録はない。(b)と比べた時(b)の斜めの極が電極と磁極兼用であったのに対し、それぞれを二つに分割して電極と磁極に分けた場合であることが分かる。この多極子が考案されたのは1970年代で、まだ3次元磁場・電場計算は容易に行うことが出来なかった時代であり、理論的に求められたものと推定される。

(c)のフィルタでは磁極は全てリターンヨークに直接繋がっているためロスアンペアターンを生じない。計算値に一致する磁場を正確に作り出すことが出来る。全てのコイルに同じ電流を与えればよいので電流源は一個で良いが、コイルは6個必要である。電極は6個バラバラに作って絶縁物を介して磁極に固定する。電極にしか使わないからと言って非磁性材料で作るのではなく、他の場合と同様に全体を磁性材料で作る。磁性体が隣にあるということが一様磁場生成の前提となっているからである。各電極に与える電圧は左側3個と右側3個でそれぞれ同じ値で符号が逆である。Fig.1(b)の場合同様に、左右のアンバランスで4極場を作ることが出来るが、磁極に与える電圧は $-V_2$ となる。(c)の最大の欠点は、12極必要なことで、しかも均等なサイズの12極子に比べても斜め方向の極のサイズが小さいことである。ただ磁極は全てリターンヨークと繋がっているため、一体加工を行えば精度良く作ることが出来る。ただ、電極は小さい極を精度よく絶縁物を介して磁極上に固定しなければならない。しかし、これまでの経験では多極子ウィーンフィルタで製造上の問題が起こるのはほとんどが磁極なので、この方法は磁極の製作に信頼性が高いことから、電極が難しくても全体としては良いものが出来る可能性もある。

4. ウィーンフィルタの電子軌道

Fig. 2(a), (b) は Fig. 1(a)の等角度8極子を用いた場合の電子軌道を(a)はXZ面、(b)はYZ面について示している。いずれの方向でも軌道はほぼサインカーブをなしているが、X軌道では加速電圧5kVに対してエネルギーロス10eV(加速電圧4.99kV)のビームが偏向して上側に来ている。両者の差が分散であり、この違いをスペクトルで表示させてエネルギー分析をする。Y方向の軌道に分散は生じない。ビームのフォーカス面ではビームが一点に収束せず広がりを見せているが、これが収差である。(c)には4極場を入れないで、一様電場と一様磁場のみの場合のYZ面内の軌道を示した。エネルギーフィルタを分析のみに利用する場合、特に二次元検出器を用いてエネルギースペクトルを得る場合にはY方向のフォーカスを作らせない方が二次元検出器の全体を利用して好ましい場合もある。多極子ウィーンフィルタは4極場を電氣的に調整できるので、ビームの広がりを検出器の検出面の幅に合わせるように4極子電場を調節出来る。

収束点でのビームの形(収差図形)の一例を2コイ

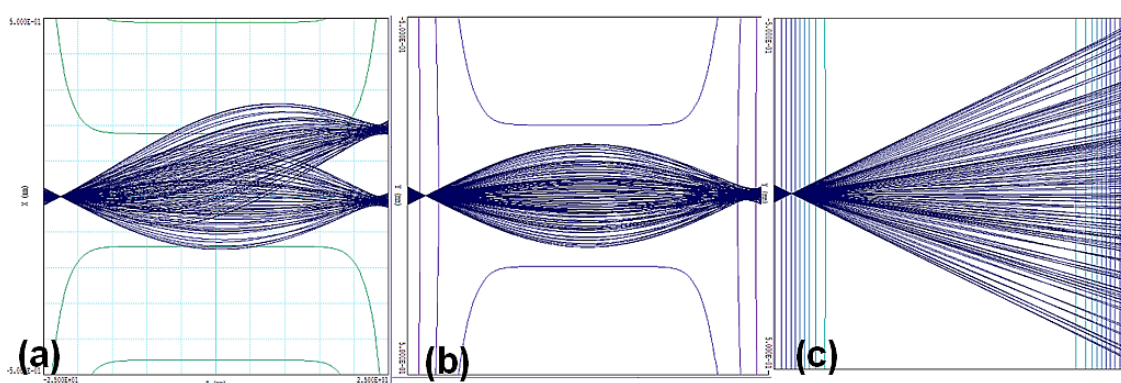


Fig. 2. Electron trajectories of equal arch 8-pole Wien filter [Fig.1(a)]. Accelerating voltages are 5 kV and 4.99 kV. (a): XZ-plane (b): YZ-plane trajectory after giving quadrupole electrostatic field E_2 . (c): YZ-plane trajectory of homogeneous E_1 and B_1 fields.

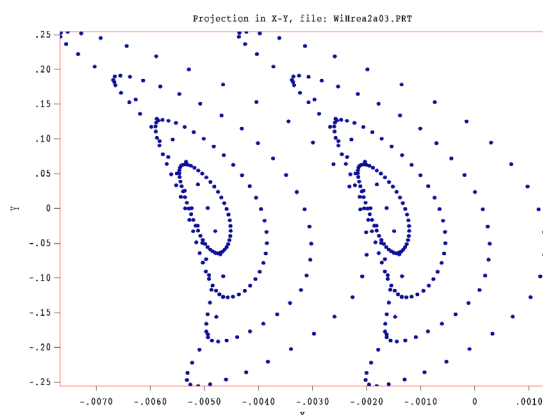


Fig.3. Aberration figure of eight-pole Wien filter with two coils [Fig.1(b)] Energy difference between two figures is 1 eV.

ル型 8 極フィルタ [図 1(b)] について Fig. 3 に示す. 分散によってビームは二つに分裂している. Fig. 2 と同じ 10 eV に対する分散ではビームの間が開き過ぎるので, Fig. 3 ではエネルギーロス 1 eV (加速電圧 4999 V) でシミュレーションしている. 収差図形は 1 eV のエネルギー差をはっきり分離しているが, ビームの形状は円弧状に歪んでいるため, 隙間が直線のスリットによって両者を分離して観測することが出来ない. この形状は二次収差によるものであるが, 4 極場の大きさ (非点量) とフォーカスの違いによってその形は大きく変わる. この図の縦横は同じ倍率ではなく, 非点のために縦に伸びている.

一方, Fig. 4 に示す収差図形は等角度 8 極子 [図 1(a)] を用いた場合である. 同じ 1 eV のロスに対してシミュレーションしている. この場合は非点をほぼ取りきるまで 4 極子の大きさを色々に変えて何度もシミュレーションをした結果を示している. おむすび型をしたビームは典型的な二次収差を表わしてい

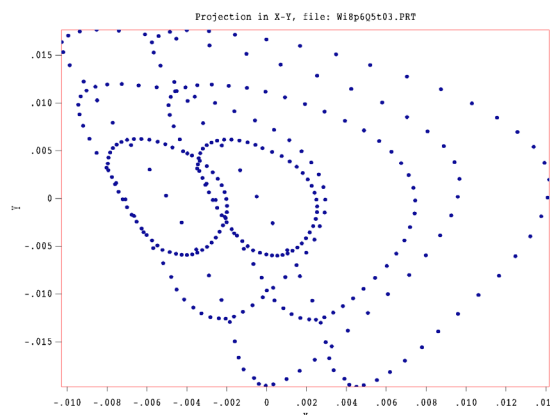


Fig.4. Aberration figure of the equal arch eight-pole Wien filter [Fig.1(a)]. Astigmatism has been removed and the ratio between horizontal and vertical ratio approaches to one.

る. ただ, この 3 角形も消滅して, 180° で対称となる二重の円形を示す場合もある.

5. 理論からの若干のウィーンフィルタ収差の説明

二次収差の説明に, 電場・磁場の値を簡単に表現するパラメータを導入する.

$$e_2 = E_2 \cdot R/E_1 \quad b_2 = B_2 \cdot R/B_1 \quad (10)$$

$$e_3 = E_3 \cdot R^2/E_1 \quad b_3 = B_3 \cdot R^2/B_1 \quad (11)$$

E_3, B_3 は 6 極子電場・磁場であり, R はサイクロトロン半径である. この定義式を使うと, ラウンドレンズフォーカスの条件は次のようになる.

$$e_2 - b_2 = -1/4 \quad (12)$$

e_2, b_2 を(12)式を常に満たすように表わすためのパラメータ m を Table 1 に示すように与えた時、収差は Fig. 5 の様に表わされる。パラメータ m を使うと、色収差を軸対称に(丸く)する条件は、

$$e_3 - b_3 = m/16 \quad (13)$$

と表わされ、この値も Table 1 に示してある。

Table 1. Field components $e_2, b_2, (e_3-b_3)$ against the parameter 'm' and characteristics for each 'm' value.

m	e_2	b_2	$e_3 - b_3$	Characteristics
-2	0	1/4	-1/8	Magnetic quadrupole
0	-1/4	0	0	Electric quadrupole
2	-2/4	-1/4	1/8	Zero Cc in double filter
4	-3/4	-2/4	2/8	-
6	-4/4	-3/4	3/8	Zero 2nd order geometrical aberrations in single filter

Fig. 5 は左の(a)が一段フィルタの場合、真ん中(b)と右の(c)が二段フィルタの場合で、(b)はエネルギーロスをしたビーム、(c)がウィーン条件を満たしたビームである。左側の一段フィルタの場合には両エネルギーに対して分散を含めた図が描かれている。エ

ネルギー分析に使用する一段フィルタの場合、パラメータ $m=6$ で二次の幾何収差が消滅する。この条件は発見者にちなんで、Rose の条件[18]と呼ばれている。丸の大きさはエネルギーロスのないビーム (右側の小さい丸印)では球面収差 C_s を表わし、左のエネルギーロスビームでは色収差 C_c を表わしている。残念ながら、両 C_s, C_c 共に正の値であるため一段フィルタで収差補正に使える条件ではない。二段フィルタの場合、 C_c はパラメータ $m=2$ で零、 C_s は $m=1.1$ 付近で零となる。パラメータ m に対する収差の特徴を Table 1 に纏めた。

Table 1 及び Fig. 5 に示した条件は、ラウンドレンズ収束をする色々な e_2 及び b_2 の組み合わせ(m の値)に対して収差の少ない最良の条件である。各 m の値に対する(e_3-b_3)の値が Table 1 に示す値から外れば、収差はずっと大きなものとなる。Table 1 の中で、 $m=0$ の場合だけは 6 極子成分(e_3-b_3)=0 を示している。つまり、6 極子を必要としないのは、 $m=0$ 即ち、4 極子として電場だけを用いた場合であることが分かる。ところで、Fig 1 に示したフィルタはいずれも 6 極子を作るには適さない形状である。6 極子を作るのに適したフィルタは、同じ曲率半径の極子を 8 個ではなく 12 個並べた多極子である。このことからウィーンフィルタとして Fig. 1 に示したどれかのフィルタを用いる場合は $m=0$ の条件即ち、4 極子は電場 E_2 のみで使うと良い。

ダブルフォーカスでは二次の幾何収差はすべて消滅する。この条件は特にウィーンフィルタに限定されるものではなく、一様場を利用した全てのエネル

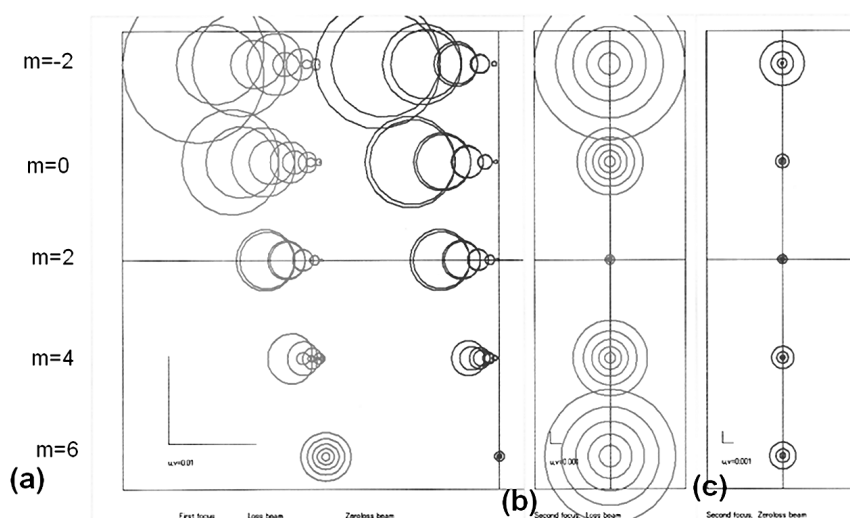


Fig. 5. Aberration figures of single and double focus Wien filters by changing the field parameter 'm'. (a): Single stage filter. Left side: Energy loss beam. Right side: Direct beam. (b), (c): Aberration figures of the double stage filter (b):Energy loss beam.(c):Direct beam.

ギーフィルタに共通した性質である。残りは色収差と三次収差である。二段フォーカスではパラメータ $m=2$ の条件を使えば最も少ない収差条件となる。ただし、ダブルフォーカスでは分散も消滅するので、エネルギー分析はあくまでも一回フォーカスで行わなければならない。エネルギーフィルタ像の形成にはスリットを一回フォーカスの位置に置き、二回フォーカス位置で像を作らせればエネルギー選択像にフィルタの二次幾何収差が入りこむことはない。しかしながら、エネルギー選択は一回フォーカスで行われるので、エネルギー分解能が向上するわけではない。このように、モノクロメータやイメージングエネルギーフィルタでは二段フォーカスを使い、エネルギー分析のみの場合には一段フォーカスを使うのが正しいやり方である。

6. リターディングエネルギーフィルタ

エネルギー分解能を向上させる最も有力な方法は加速電圧を下げることである。しかしながら、加速電圧は分析装置のエネルギー分解能に対する要請とは無関係に決まる場合が多いので、エネルギーフィルタの直前で加速電圧を落とし、フィルタの後で再び加速して元の加速電圧に戻すリターディングの手法が用いられる。エネルギーフィルタによって作られたエネルギー分散はもはや位置の違いに変換されているので、再び加速されたからと言って縮小されるものではない。再加速後にスリットや検出器を置き、分散を測定することが出来る。

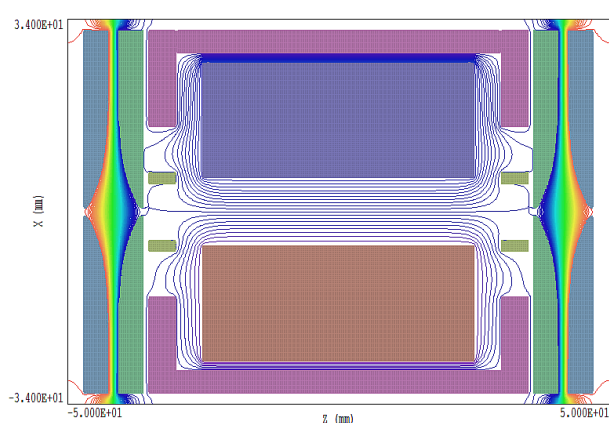


Fig. 6. XZ-plane cross section of the retarding Wien filter. Butler electrodes are used for retardation and acceleration between 100 V and 5 kV.

Fig. 6 は、Fig. 1(b)の8極ウィーンフィルタに対して、減速および加速レンズとしてバトラー電極[16]を用いた場合の電場等高線図を示している。バト

ラー電極は加速・減速レンズとして使用した場合の穴のレンズ作用を出来るだけ少なくなるように工夫された電極である。Fig. 7 はフィルタ中を加速電圧 100 V のダイレクトビームとエネルギーロス 1 eV の加速電圧 99 V にした場合の電子軌道を示している。(a)の場合は 5 kV の加速電圧をリターディングによって 100 V まで減速してからフィルタに入射させ、フィルタを通過後再び加速したものである。これに対して(b)では比較のために最初から 100 V の加速電圧でフィルタにビームを入射させた場合である。両者でほぼ同じような電子軌道が得られており、分散も同程度である。

Table 2. Comparison of dispersion before and after retardation for the Wien filter shown in Fig. 1 (b) and Fig. 6.

Wien Filter Fig. 1(b)	Beam Energy	Retarding Ratio	Filter Pass Energy	Dispersion
Wien filter only	5000 eV	1	5000 eV	3.3 $\mu\text{m}/\text{eV}$
With retarding	5000 eV	50	100 eV	36 $\mu\text{m}/\text{eV}$

Table 2 にリターディングを行う前後の分散の大きさを比較した。5000 V から 100 V にリターディングすることによって分散は約 10 倍に増えている。ただしリターディングの割合がこの場合は 50 と少ないので収差の増大は目立たないが、この割合がもっと大きくなると収差の増大によってエネルギー分解能向上の効果は次第に小さくなる。その事情を考慮しても、リターディングのエネルギー分解能向上に対する効果は大きく、又光軸が直線であることも技術的にリターディングを行いやすくしており、リターディングはウィーンフィルタに適した手法であると言える。

ここで Figs. 7(a), (b)を比べてみると、最初のビーム開き角は同じでも、5 kV からリターディングした場合の方が軌道のふくらみが大きい。これはビームを減速した際に開き角が大きくなったためである。Fig. 7(b) の軌道はサインカーブではなく上下で別の形をしている。下側に膨らんでおり、上側にはむしろへこんだ形をしている。このような形の軌道が描かれるのは、Fig. 1(b)のフィルタでは斜めについている磁極兼電極がコイルを巻くために途中から折れ曲がっているため、電極と磁極の形が先端では一致しているものの、途中から違っているためである。このように電極と磁極の形が中心から離れた場所で

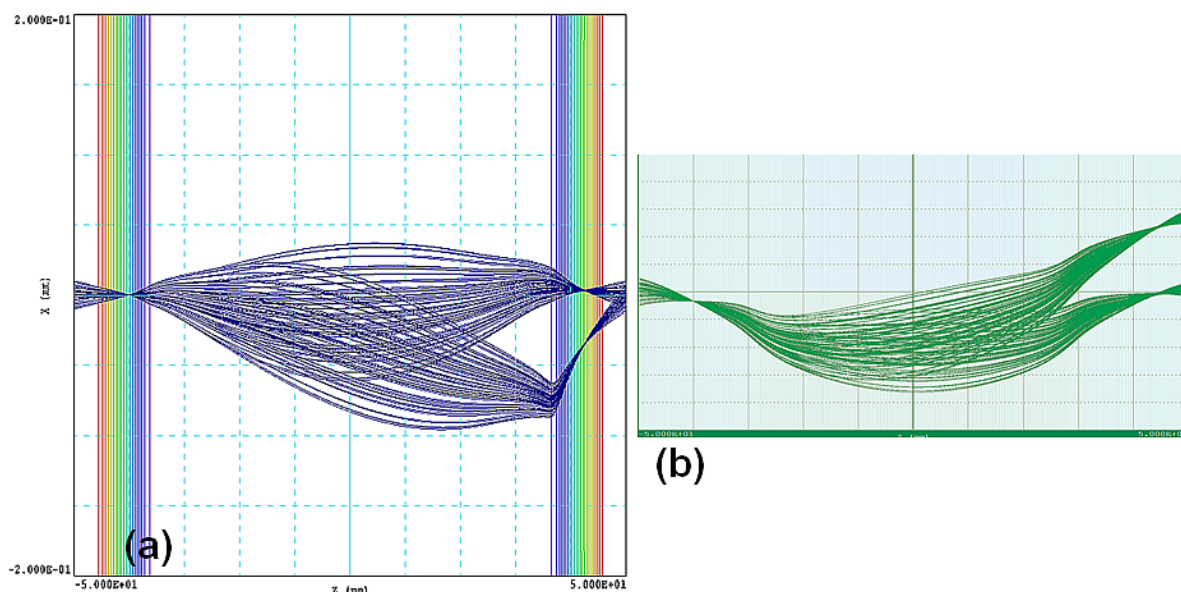


Fig. 7. Electron beam trajectories at 100 V and 99V accelerating voltages by use of the Wien filter.

(a): Decelerated from 5 kV to 100 V before entering the Wien filter. After passing through the filter, the beam is accelerated again to 5 kV. (b): Accelerating voltage 100 V from the start to the end.

あっても異なると、フリッジ場でウィーン条件が完全には満たされず、偏向を起こす。磁場の値を振ってウィーン条件を崩して行くと図に見られるように、ビームが光軸と平行に出ていく条件を見つけることが出来る。従って、程度が少なければ形状が異なってもビームが出なくなるとか、収差が大きいなどの大きな不都合を生ずるには至らない。しかし、軌道のサインカーブからの外れという形ではっきりとウィーン条件からの外れの影響が出ている。もちろん電磁極形状のずれがあまりにも大きくなるとビームが戻ってこれなくなるので、どの程度までの形状の違いが許されるかはシミュレーションによって確認する必要がある。軌道のサインカーブからのずれは、リターディングが大きくなればなるほど大きくなる場合もあるので、高いエネルギー分解能が要求される場合ほど、一般的には電極と磁極の同一性に対する高い配慮が必要となる。

ところが Fig. 7(a)の軌道ではむしろ、リターディングによってサインカーブに近づいた形状をしているように見える。リターディングをすることによってフリッジでの電場と磁場の分布の不一致が解消されたような軌道である。これは十分にあり得ることである。リターディングされた系の場合、レンズ作用はどこで起こるかと言えば、それは電圧が最も小さくなった付近である。電子レンズでもこの点を利用して、電場・磁場重畳型の対物レンズでは実質的にレンズ磁場の半値幅を狭くして分解能を向上させ

るテクニックが用いられている。フリッジ場をリターディング場と重畳出来れば、フリッジでの電磁場分布の不一致が実質的に効かなくなるような条件設定が可能かも知れない。Fig. 7(a)では、このようなことが偶然起こって Fig. 7 (b) の場合に比べて良好な電子軌道が得られたのではないかと想像している。

7. 終わりに

ここではウィーンフィルタをその起源から説き起こし、モノクロメータやアナライザとして使う場合について電場や磁場単独でのフィルタと比較しながらその特徴について述べた。またフリッジでのビーム直進条件(ウィーン条件)を合わせるためには多極子ウィーンフィルタの利用が不可欠であることを述べ、3種類の多極子ウィーンフィルタについてその利点・欠点を議論した。またラウンドレンズ収束を行わせるための4極子についてはどのような4極子を用いればよいかについて理論の助けを借りて述べた。最後にエネルギー分解能を向上させる有力な方法としてのリターディングのテクニックについてシミュレーションに基づいて説明した。

8. 謝辞

本小文は、アプロ社で東京都の補助金を得てウィーンフィルタを使った SEM 用のモノクロメータの試作を行ったことに始まる。完成したウィーン

フィルタをあちこちで見られていた折にこの文を書いてはというお勧めを頂いたものである。アプコ社の小粥啓子副社長と東京都に感謝する。

9. 参考文献

- [1] W. Wien, *Ann. der Physik* **301**, 440 (1898).
- [2] J.J. Thomson, *Philos. Mag.* **44**, 293 (1897).
- [3] K. T. Bainbridge, *J. Franklin Inst.* **215**, 509 (1933).
- [4] R. Herzog, *Z. Phys.* **59**, 447 (1934).
- [5] H. Boersch, J. Geiger, H. Hellwig, *Physics Letters* **3**, 64 (1962).
- [6] M. R. Scheinfein, *Optik* **82**, 99 (1989).
- [7] D. D. Ioanoviciu, C. Cuna, *Vacuum* **24**, 245 (1974).
- [8] M. Sato, H. Todokoro, K. Kageyama, *Charged-Particle Optics*, Proc. SPIE vol. 2014, 17 (1993)
- [9] T. Kohashi, H. Matsuyama, K. Koike, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 5537 (1995).
- [10] F. Hasselbach, *Scanning Microscopy* **11**, 345 (1997).
- [11] T. Steffin, P.C. Tiemeijer, M. P.C. Krijin, S.A.M. Mentink, *Microsc. Microanal.* **7** (Suppl.2:proceedings), 874 (2001).
- [12] E. Karimi, L. Marrucci, V. Grillo, E. Santamato, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 044801, (2012).
- [13] T. T. Tang, *Optik* **74**, 51 (1986).
- [14] D. Ioanoviciu, K. Tsuno, G. Martínez, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 4434 (2004).
- [15] K. Tsuno, D. Ioanoviciu, G. Martínez, *J. Microscopy* **217**, 205 (2005).
- [16] J. W. Butler, *6th Int. Conf. Electron Microscopy*, Kyoto, Maruzen Co. Ltd., Tokyo, 191(1966).
- [17] R. G. E. Hutter, *Adv. Image Pickup and Displays* **1**, 163 (1974).
- [18] H. Rose, *Optik* **77**, 26 (1987).

査読コメント

査読者 1. 岩井秀夫 (物質・材料研究機構)

[査読者 1-1]

ウィーンフィルタは直進型のフィルタなので、フィルタを OFF にすれば電子は直進するため軸合わせ等の調整がしやすく、電子銃のモノクロメータや光電子顕微鏡等に應用できれば非常に使い易い分光器だと思います。本文にも書かれていますが、収差を消すためには2段のフィルタが必要です。しかしながら色収差も消えてしまうので、顕微鏡として

は使えそうですが、電子銃のモノクロメータとしては十分なエネルギー分解能が得られないように思います。また、電子分光器として使うには1段フィルタとなりますが、最近の分析器のように感度を上げるためのマルチ検出器を使うには、収差を小さくしないとなりません。オメガフィルタや静電半球型分析器と比べてまだ使いにくいように思いますが、収差を小さくする勝算はあるでしょうか？

[著者]

ウィーンフィルタの電子銃モノクロメータへの応用は、TEM/STEM ではすでに FEI 及び日本電子から商品化されております。私の日本電子在職中の最後の仕事になりました。Zeiss は静電オメガフィルタで対抗しています。エネルギー分解能も 0.2eV 位までは達しています。収差につきましては、ご指摘のように一段フィルタで使わざるを得ませんので、二次の幾何収差キャンセルの条件が使えません。しかし、一段で使う場合にも収差をキャンセルできる条件があります。Fig.5 の左側の図がウィーンフィルタを一段で使った場合の収差図形です。ここで、一番下のパラメータ $m=6$ の所を見て頂きますと、エネルギーがきちんとウィーン条件にあっている場合(ダイレクトビーム)で収差が球面収差を除いてほとんど消えていることが見て頂けるかと思います。エネルギーロスしたビームに対しては色収差が残りますが、分散が必要な以上、色収差をなくすことは出来ません。多極子ウィーンフィルタは理論的に収差をなくす条件が分かっています。静電半球型にしる、磁場型にしる、形を決めてしまうと収差を調節できません。ウィーンフィルタでは電源が沢山必要になるのは欠点ですが、電氣的に調整してエネルギー分解能を高めて行くことが出来ますので、収差の少ない分光器を必要としている人達には持って来いの分析器と思いますが、まだ知名度が高くないことから、利用が広がっていません。

査読者 2.

[査読者 2-1]

電場 4 極子による”Y 方向フォーカスの条件”と”非点無しの条件”の2つの条件を同時に満足する条件は常に存在しますか？ それともそ2つの条件を同時に満足するような電子光学系の特別な工夫を必要としますか？

[著者]

査読者は”Y 方向フォーカス条件”と”非点なし条件”の二つが別々の条件であるかのように受け取ら

れておられます。このような誤解を与えるような記述であったことをまずはお詫びします。実はレンズやアナライザによるフォーカスをX方向のフォーカスとY方向のフォーカスに分けて考えます。その場合、フォーカスに3種類あると考えることが出来ます。普通のレンズによるフォーカスは「ラウンドレンズフォーカス」と呼びます。X方向とY方向で途中の軌道は異なりますが、最終的なフォーカス位置は同じと言う場合を「非点なしフォーカス」と呼びます。非点は、X方向のフォーカス位置とY方向のフォーカス位置がずれることを言うからです。両方向のフォーカス位置が一致していれば非点はないわけですからこのように言うことが出来ます。最後が「非点フォーカス」です。これはX方向、あるいはY方向だけのフォーカスしかない「一方向フォーカス」の場合も含まれます。もちろん、「非点なしフォーカス」は「ラウンドレンズフォーカス」の場合も含みます。

このように分類しますと、「Y方向フォーカス」と「非点なしフォーカス」が二つの条件を意味しているのではなく、「Y方向フォーカス」を実現すれば「X方向フォーカス」は一様場によって既に実現しているわけですから、「ラウンドレンズフォーカス」が実現することになりますので、別々の二つの条件ではなく、一つの条件であることがご理解いただけるかと思えます。なお、最初の原稿では「非点なしフォーカス」と書いておりましたが、これは間違いではありませんが、より正しくは「ラウンドレンズフォーカス」ですから、改定稿では直させていただきました。