連載

電子光学入門
－ 電子分光装置の理解のために －

嘉藤　誠
日本電子（株）
〒196-8558 東京都昭島市武蔵野 3-1-2
kato@jeol.co.jp
(2003 年 10 月 28 日受理)

電子光学の視点から電子分光装置を理解することを目標とした講座を今回から連載します。電子光学の基礎的なことから始め、収差などの光学特性がエネルギー分解能や感度におよぼす影響を議論します。また、電子分光系の解析のための数値計算手法に関しても紹介します。

Introduction to Electron Optics for the Study of Energy Analyzing Systems

M. Kato
JEOL Ltd., 3-1-2 Musashino, Akishima, Tokyo 196-8558.
kato@jeol.co.jp
(Received: October 28, 2003)

This serial course describes electron optics and its application to energy analyzing systems for electron spectroscopy. We start with the basics of electron optics, and investigate the influence of aberrations and other optical characteristics upon the performance of instruments. Several numerical calculation techniques for the study of electron lenses and energy analyzers are also presented.

はじめに

これから何回かにわたって、電子光学、およびその応用としての電子分光装置の話をさせていただきます。われわれにとって、光学レンズとか鏡を組み合わせた機器は馴染み深いものですが、このような系を研究する分野は「光学」と呼ばれています。カメラや望遠鏡、顕微鏡などの例を出すまでもなく、われわれの眼がそのような光学系です。この光学の理論を、光のかわりに電子にたいして適用したものが「電子光学」と呼ばれるもので、これが本講座の主題です。

電子にたいしてのレンズ作用を電磁場によって実現できることが指摘されたのは 1927 年のことです。そしてその数年後には世界最初の電子顕微鏡がつくられました。電子光学は電子顕微鏡の理論として生まれたものですが、その後は一般の荷電粒子ビームの制御理論として、質量分析装置や加速器の設計などにも応用されています。

一方、電子のエネルギーを分析する電子分光という手法は電子顕微鏡よりも古い起源をもちます。当初は、一様な磁場中に電子を入射させて出口で分散パターンを観測するような簡単なものでした。しかし現在では、電子光学理論が積極的に導入されることで、多様な機能を持った装置が開発されています。たとえば、電子を取り込んでアナライザに導くための電子レンズ系が追加され、そのレンズ系によって電子を減速することでエネルギー分解能を高めることができます。さらには、エネルギー分析機能と電子顕微鏡のイメージング機能を併せ持つものも現れています。

本講座は、日ごろから XPS や AES などの電子分光装置を使って研究している方、あるいは新しい電子分光系を設計しようとしている方を読者として想定しています。電子分光系の働きを理解することを目標に据えて、電子光学の基礎的な話から始めていきます。

全体の構成は次のようにさせていただく予定です。

1．電子光学概論
2．電子レンズのはたらき
3．収差理論
4．数値計算の手法
5．電子分光系
6．電子分光装置における最近の試み

1　電子光学概論

1.1　電子分光と電子光学

電子分光装置の役割は、電子を運動エネルギーごとに選り分けることです。そこで、「電子分光装置の最も重要な部分は？」と聞かれれば、エネルギーアナライザということになるでしょう。しかしながら、「装置の性能を決めるのはアナライザであるか？」と言われると答えはそう簡単ではありません。まえがきでも述べましたが、最近の商用機ではアナライザの前後にレンズ系を配置することで多くの機能が付与されています。このような状況では、エネルギー分解能とか感度といった性能が、アナライザ以外の部分で決まっていてもおかしくはありません。

たとえば透過電子顕微鏡においては、空間分解能を決めるのは初段の対物レンズのみで、後段の拡大レンズ系はほとんど影響しません。（これは電子ビームの開き角の変化を考えれば理解できることで、これに関しては後章で議論します。）しかしこれはあくまで、空間分解能だけを考えればそうだということです。別の評価基準として像の歪みを考えるなら、後ろのレンズほど影響が大きくなります。

電子分光系でも似たようなことがあり得ます。具体的には、たとえば感度の大きさを決めているのは初段の取り込みレンズ、感度のエネルギー依存性に関しては減速レンズ、エネルギー分解能を決めているのはアナライザ、というような状況です。電子分光装置によって最終的に与えられるエネルギースペクトルは、装置を構成するいろいろな光学要素の寄与がすべて積もり重なったものです。このような装置固有の特性を理解するには、電子光学の知識が必要となります。

電子分光系において、エネルギーアナライザは電子レンズと異なった扱いが必要と思われるかも知れません。しかしアナライザであっても、レンズとしての集束作用を同時にもつものでないと実用になりません。電子ビームがアナライザに入射するとき、そのビームは一般に空間的にも角度的にも広がりをもちますので、これらの要因によって分散面でビームがボケてしまうようだと、大雑把なエネルギー分離しかできないことになります。

そのような場合、もし高いエネルギー分解能を得ようとすればビームを細く絞ってアナライザに入射させるしかありませんが、すると今度は感度が犠牲になります。徐々にビームを絞っていくと、そのうち信号がノイズと同程度になって測定が不可能になってしまうでしょう。そこで、アナライザにたいしてもレンズとしての集束作用が望まれるわけです。さらにイメージング機能を持つ装置では、アナライザは結像作用を同時に持たなければなりませんから、結像レンズそのものとしての扱いが要求されます。（そのようなアナライザは、イメージングフィルタと呼ばれることがあります。）このように、電子分光系の解析のためには、電子レンズの働きを理解することが出発点となります。

1.2　レンズのはたらき

電子光学の基本は、軸対称な電磁場によってつくられるレンズ作用です。「電磁場」というと電磁波のことを想像されるかもしれませんが、電子レンズを構成するには静的な電場か磁場のどちらかで十分です。電子レンズは光学レンズとほとんど共通の性質を持つので、光学の話から始めたほうが具体的なイメージを持ちやすいでしょう。以下では、カメラレンズのような光学レンズと電子レンズとの類似性をたどりながら、電子光学の基本的な概念を導入していきます。

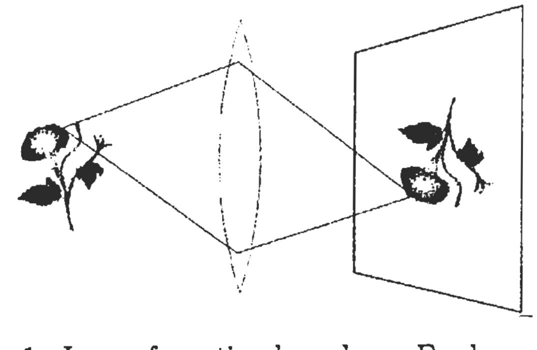

Fig. 1: Image formation by a lens. Fundamental function of a lens is to focus rays emitted from each object point to a corresponding position on an image plane.

まず、レンズによる「結像」ということの意味から

考えます。あなたの目の前に綺麗な花があるとします。その花の前に直接フィルムをかざして感光させても、花の写真は撮れません（！）。これは非常に重要なことです。花の像をフィルムに焼き付けるにはレンズが必要なのです。簡単な一個の凸レンズで写真を撮るときの様子を、Fig.1 に示します。レンズは、花の各点からいろいろな方向に反射された光線を、それぞれフィルム上の別々の点に結像させます。「同じ点から出た光線は、光線の出る方向にかかわらず同じ点に集束させる」ということがレンズのはたらきの本質です。花を眼で見る場合、眼の中のレンズが網膜に像を結んでいるわけで、単に光を感じる器官があるだけでは「物を見る」という概念は持ち得ないことになります。

ここで、凸レンズの結像作用というものを少し詳しく考えてみます。レンズがあるときの光線図の作図法は中学か高校で習うので、ご記憶の方が多いでしょう。Fig.2 を見てください。まず、レンズの対称軸は**光軸** (optical axis) と呼ばれます。光軸に沿って平行に、レンズの左から入射した光線は、レンズによって屈折されて光軸上の**焦点** (focal point) と呼ばれる場所（図の F_i）を通ります。レンズから焦点までの距離 f が**焦点距離** (focal length) です。また、レンズの逆方向から光軸に平行に入射した光線は、やはりレンズから同じ距離のところの焦点 F_o を通ります。逆に言えば、レンズの手前で焦点を通るように入射した光線は、レンズを通過した後で光軸に平行になるということです。

そこで、平面状の光源がレンズの手前に置かれたとして、その像がどこにできるかを考えましょう。光を出す面は**物面**（object plane）、結像面は**像面**（image plane）と呼ばれます。上に述べたように、物面のある一点から光軸に平行にレンズに向かう光線は F_i を通り、レンズ手前で F_o を通過した光線は平行光線になるわけですが、これら二本の光線の交わる点が像面の位置を示します。そこで、レンズの焦点距離 f とレンズから物面までの距離 a が与えられれば、像面までの距離 b が決まってしまうことがわかります。これらの関係は図から求められて、次式のようになります。(三角形の相似の関係をうまく使うと得られます。)

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

この式はレンズの厚みを無視した場合なので、薄肉レンズの公式と呼ばれることがあります。距離 a と b の符号をうまく定義すれば、いわゆる虚像の場合も同じ式が適用できます。また凹レンズにたいしても、焦点距離を負に定義するとこの公式をそのまま用いることができますが、本章では凹レンズに関する議論はほとんど行ないません。なお、複数のレンズが組み合わされた系であっても、全体として1個のレンズと見なすことができて、そのときも (1) に類似の関係が成り立ちます。

レンズによる結像の様子は、Fig.3 のような図を描くとわかりやすいでしょう。これは、物面の各点からいろいろな方向に出た光線が像を結ぶ様子を示したものです。レンズの焦点を含む面は焦点面と呼ばれますが、顕微鏡の場合はとくに**回折面**（diffraction plane）と呼ぶことがあります。この面では物面での出射角ごとに別々の点に集束し、このそれぞれが像面を照らすことで別々に像をつくっていると見なすことができます。Fig.3 では、物面から同じ角度で出た光線を太線で描いています。もし回折面に小さい**絞り** (aperture) を入れたとすれば、試料の各点から出る光線の取り込み角が制限されて像が暗くなりますが、像の一部が遮られるということはありません。重要なことは、回折面に写るのは物面での出射角の分布であり、そこでは物面での位置の情報は失われるということです。

つぎに**像倍率** (image magnification)M、すなわち物面から像面への像の拡大率を考えます。これは (1) を導くときに作図した二本の光線の関係だけから決まります。しかし補助的に、レンズ中心に向かう光線はそのまま素通りすることを用いて、物面の一点から像面に向かう直線を描くとわかりやすいでしょう。結果は次式で与えられます。

$$M=\frac{b}{a} \tag{2}$$

さらに**角度倍率** (angle magnification)M_α というものを定義します。これは、物面で光線が光軸となす角 α_o と、対応する像面での角度 α_i の比、すなわち $M_\alpha=\alpha_i/\alpha_o$ で与えられます。これも Fig.2 からわかることですが、角度倍率は像倍率と逆比例の関係にあります。

$$MM_\alpha=1 \tag{3}$$

たとえば焦点距離 f を自由に変えられるレンズがあったとして、f を長くして b が2倍になれば、像倍率 M は2倍になる一方、α_i は半分になるわけです。

この関係 (3) は実は一般の結像系で成り立つことで、非常に重要な意味を持っています。たとえば、レンズによって光源の縮小像をつくってビームを狭い範囲に集中させようとした場合、その分必ずビームの開き角が広がってしまうことになります。単位面積、

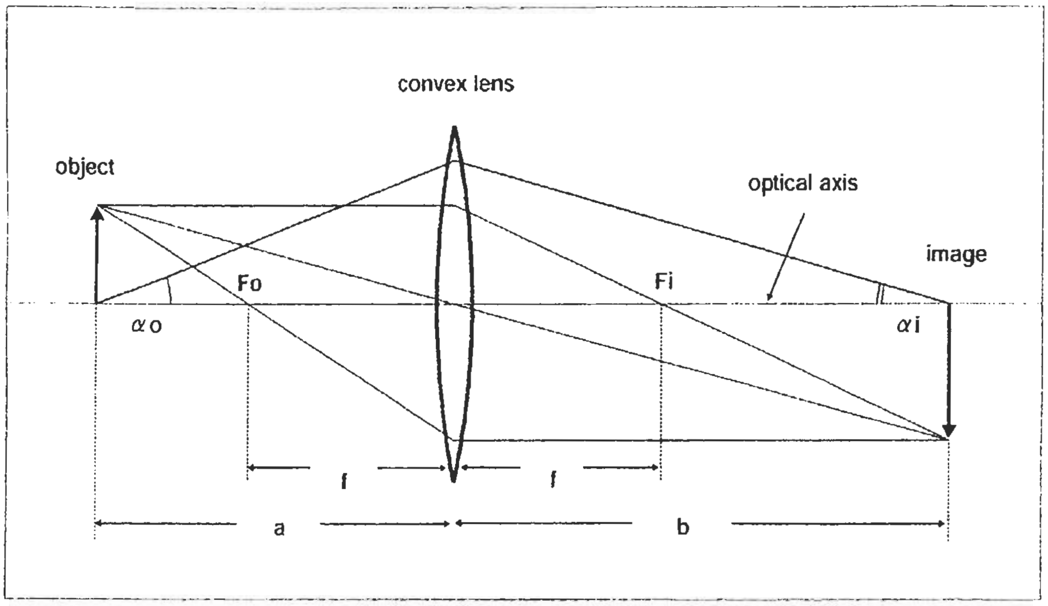

Fig. 2: Illustrating the function of a convex lens.

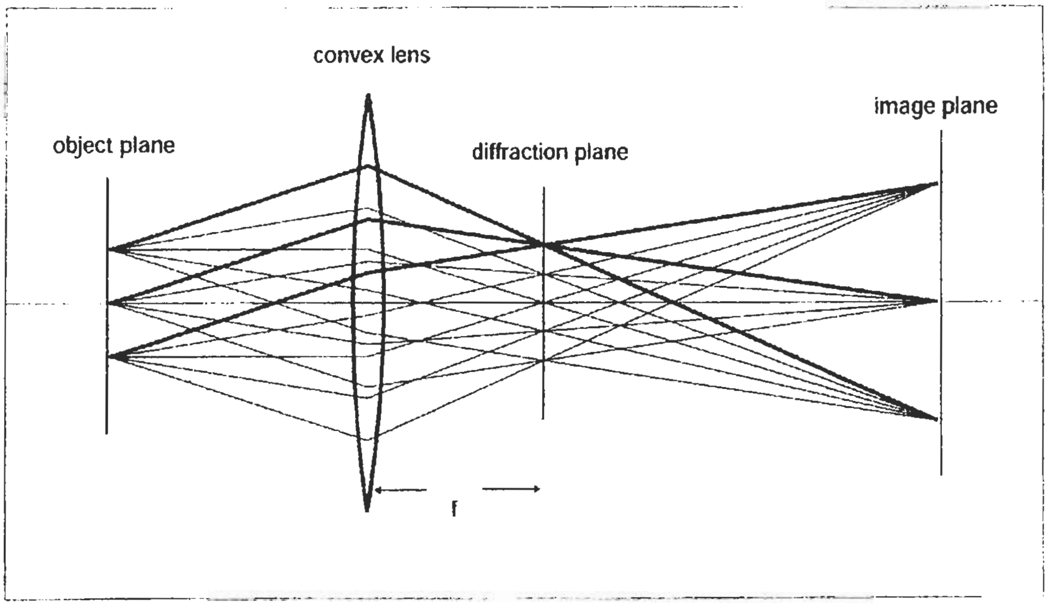

Fig. 3: Parallel rays emitted from an object plane converge on a specific point in a diffraction plane. Such a point serves as a source that illuminates a whole image.

単位立体角あたりの光強度は**輝度**（brightness）と呼ばれますが、(3) は**輝度不変則**（law of conservation of brightness）という法則を意味しています。（正確には輝度ではなく放射輝度という用語を用いるべきですが、ここでは簡略化しています。また、(3) は次節で述べる近軸近似における関係であり、かつ物面と像面の空間で屈折率が同一の場合です。一般的な式は後章で導出します。）これと同様の関係は電子ビームにたいしても成り立ち、電子分光系の感度を議論する際に重要になります。

さて、レンズ公式 (1) を導く際に、われわれはレンズを通る二本の光線しか考慮しませんでした。その作図においては、光軸に平行にレンズに入射した光線は焦点に集まるということと、その逆を用いたわけです。しかし、物面の同じ点からいろいろな方向に出る光線が、すべて像面の同じ点に集束することを示したわけではありません。このことは、平行光線を焦点に集めるという性質だけからは結論できないはずです。

すなわち、(1) を導く際の作図は、レンズが理想的な結像の作用を持つことをあらかじめ前提としているのです。そのような仮定のもとで、物面の位置から像面位置を知るための方法でしかありません。また、物面の光軸上の点からある角度で出た光線を考えて角度倍率を定義しましたが、この光線がレンズを通った後でどこに行くかも、ほんとうはわからないことのはずです。（Fig.3 の光線図は、結像を仮定して物面と像面の対応する点を結んでいるだけです。）

われわれが問題にすべきことは、「光にたいしてどんな働きをもつことが結像作用をもつということなのか」ということです。平行光線を一点に集める何らかのしくみがあれば、その系は必ず結像作用をもつといってよいか、あるいは光軸上の点光源を一点に結像させる働きがあればよいのでしょうか。さらに、結像系が必然的に持つべき制約を知ることも重要な問題です。たとえば、輝度不変則 (3) に反した光学系をつくることは不可能ですが、この制約はどこから来るのでしょうか？これはレンズの能力に制限があることを述べているのでしょうか、それとも光自身の生来的な振舞いから来るものなのでしょうか。

一般の光学系によってよって何ができるか、何ができないかを理解することは、光学という分野の根本をなす問題です。これは電子光学でも同様であり、本講座での中心テーマの一つです。本節では現実のレンズの構造をなにも考慮していませんので、これ以上一般的な議論ができません。最終的には連続的な屈折率分布を対象にした議論をすべきですが、次節以降において、実際的な凸レンズのはたらきを調べることから始めていきます。

1.3 収差の概念

通常の凸レンズはガラスでできていて、２つの球面を組み合わせた形状をしています。レンズに入射する光線は、ガラスの入射面と出射面で二回屈折作用を受けます。Fig.4 は、適当に形状を決めた凸レンズによって、軸上光源から出た光線がどう屈折されるかを計算した例です。

この計算のためには、レンズの入射面と出射面で屈折の法則、いわゆる**スネルの法則**（Snell's law）を適用します。これは屈折率が n の物質から n' の物質に入る際に屈折を受けるときの角度の関係を表すもので、

$$n \sin\theta = n' \sin\theta' \tag{4}$$

で与えられます。ここで θ と θ' はそれぞれ、屈折する前と後の境界面の法線方向から測った角度です。屈折率は、空気中では１、ガラスでは 1.6 前後です。ちなみにダイヤモンドの屈折率は 2.4 と大きく、ガラスとの輝きの違いの理由です。

計算結果を見ると、一点からでた光線は厳密には一点に集束せず、ボケが生じています。このような理想的なレンズ作用からのずれを、一般に**収差** (aberration) という言葉で表します。今の場合のように、軸上におかれた点光源の像がボケる現象はとくに**球面収差** (spherical aberration) と呼ばれます。

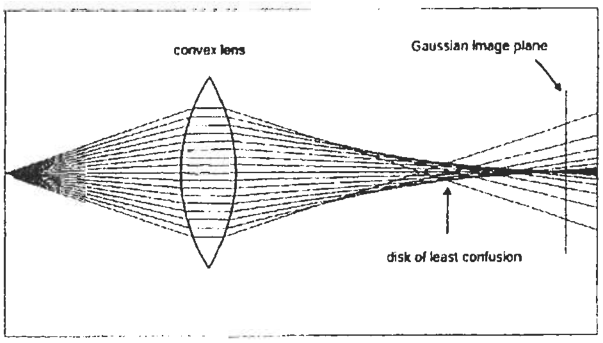

Fig. 4: Spherical aberration of a convex lens having spherical refractive surfaces.

もしレンズに結像作用を要求するのであれば、まず必要条件として、光軸上の点光源がシャープに結像されなければなりません。しかし、用途しだいでは

ある程度のボケまでは許せるでしょう。たとえ球面収差が大きくても、どこか適当な場所に絞りをいれてビームを細く絞ってしまうという手があります。絞りを小さくするほど点光源の像はシャープになりますが、あまり絞りすぎると像が暗くなってしまいます。

さて、図のように球面収差のあるレンズでは、像面がどこであるかがはっきりしません。そこで、無限に小さな絞りを入れた場合、すなわち物面での光線の出射角が0に近づいた極限を考え、そのときの像面の位置を**ガウス像面** (Gaussian image plane) と呼びます。図からわかるように、実際のビームが一番絞られるのはガウス像面よりも若干レンズに近い側にあり、この場所でのビームのボケを**最小錯乱円** (disk of least confusion) といいます。

軸上の点光源を、球面収差なしで一点に結像させるにはどうすればよいでしょうか？実は、球面収差は球面で構成したレンズでは無くすことが不可能であることが知られていて、それが球面収差という名前の由来です。球面の曲率を変えたり、あるいは複数の球面レンズを組み合わせてこの収差を減らすことはできますが、厳密に0にはできないということです。

そこで、球面収差をなくすには非球面のレンズが必要ということになります。ところで、Fig.4のような凸レンズでは、最初の入射面での屈折によってどこかに像が形成され、今度は出射面がさらにその像をつくるというように、二段階に分けて考えることができます。（最初の屈折面がつくる像は虚像になる場合もあります。）そこで、まず一つの屈折面のみを考えて、その球面収差を無くすことができるかどうかを調べるのがよいでしょう。

結果を先に示してしまうと、球面収差が0になるような屈折面は存在して、Fig.5のような形状になります。屈折面の左側が空気、右側がガラスとしています。（図を見やすくするために、通常のガラスより大きな屈折率を仮定して描いています。）図中の点線は、この曲面と光軸上で同じ曲率をもつ球面を示しています。球面だと、光軸から遠いところでは形状の曲がりが大きすぎるわけです。

球面収差が0の屈折面を自分で決定せよと言われたらどうすればよいでしょうか？これにはスネルの法則を用いて試行錯誤的に行なうのが一番直接的でしょう。つまり、点光源から出る光線をいくつか計算しながら、なるべくある一点の近傍に集束するように屈折面形状を少しずつ調整していくのです。

最近はコンピュータの発達で、このような「力づく」の設計法が主流になる傾向にあります。（しばしば「正攻法」になります。）しかし今の問題に関しては、よく知られた**フェルマーの原理** (Fermat's principle) を用いるのがスマートです。この原理は、「光は2点を結ぶ経路のうちで一番時間のかからない経路をとる」というもので、**最小時間の原理** (principle of least time) とも呼ばれます。

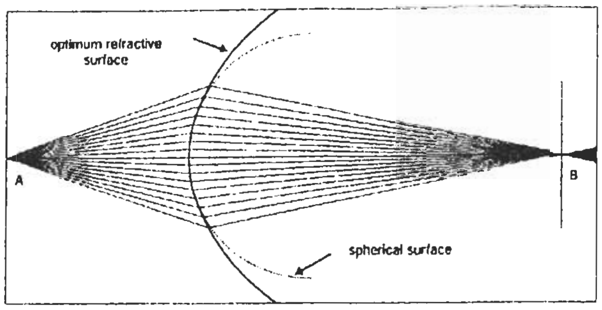

Fig. 5: Optimum refractive surface without spherical aberration.

ここで先に歴史的なことを述べておきます。フェルマーが最小時間の原理を唱えたのは1662年のことです。当時は光の本性についてはわかっておらず、光は粒子か波かという論争がおこなわれていた時代です。フェルマーは最小時間の原理を目的論的な思索のみから考え出しましたが、そのすぐ後にホイヘンスによって、この原理は光を波と考えれば説明できることが示されました。光を粒子と見なす説はニュートンらによるものですが、この粒子説と、フェルマー、ホイヘンスの波動説との対立となったわけです。

当時スネルの法則はすでに知られていて、この法則をいかに説明するかで粒子説と波動説は異なる予想を導きました。粒子の立場でスネルの法則を説明しようとすると、空気から水に入る際に光の速度が大きくなることが要求されます。一方最小時間の原理がなりたつためには、その逆である必要があります。しかし光速を測定することの困難さのために、フェルマーの側が正しいこと、すなわち水中で光は遅くなることが実証されたのは二百年近くもあとのことです。現在ではもちろん、光は電磁波であることがわかっていて、スネルの法則はホイヘンスの考えに沿って説明されています。

最小時間の原理は、物質中の光速が屈折率に反比例すること（当時はこれは仮説であったわけですが）を用いると、光線に沿った実際の距離に屈折率をかけたもの、すなわち**光路長** (optical length) が最短になると表現しても等価になります。つまり、空間内の2点

A、Bを指定すると、その2点を通る光線の経路は、

$$\delta l = \delta \int_A^B n(x,y,z)ds = 0 \quad (5)$$

をみたすものとして決定されます。ここで $n(x,y,z)$ は経路に沿っての屈折率で、これに経路の弧長 ds をかけながら積分したものが光路長 l となります。記号 δ は経路を微小に変化させることを意味します。上式は、経路の変化にたいして光路長の変化がないことを要求していて、それをみたす経路が現実の光線となります。実際は光路長が必ずしも最小になる必要はなく、経路の変化にたいして1次の変化がない、つまり停留になれば十分です。

この原理をつかうと、Fig.5 の問題は、「点 A から点 B に至るすべての光線に沿った光路長が一定値になるような屈折面形状」を決定する問題に帰着します。なぜなら、点 A から出た光線がすべて点 B に到達するためには、これらの光線が全部 (5) の停留条件をみたさなければなりませんが、これはすべての光線が同じ光路長を持つことを意味します。このことは**光路長一定の原理** (principle of constant optical length) と呼ばれます。

実を言えば、この原理を用いたとしても、Fig.5 の屈折面を決定する計算を紙と鉛筆だけでやるのは楽ではありません。答えは、「デカルトの卵形」と呼ばれる4次曲線になります。(形状を知るだけなら、光路長を一定にするような試行錯誤的な計算プログラムを書くのが早いと思います。しかしそれで形状が決定できたとしても、解析的な式で表せる形状かどうかは判断できないわけです。) 実際には Fig.5 のようにガラスの中に像ができるのでは不便なので、通常は凸レンズの形にして用います。先に述べた通り、凸レンズの作用は2つの屈折面のレンズ作用を合成したものとして説明されますが、少なくとも片方の屈折面を非球面にすることで、球面収差の無い凸レンズがつくれます。

球面収差が消えるような屈折面の形は、物点の位置ごとに違ってきます。もし Fig.5 で物点位置をずらすと、球面収差が発生します。つまり球面収差の大きさの程度はレンズ固有のものではなく、使い方で変わってくるということです。逆に言えば、理想的な屈折面の形は物点位置ごとに求めなければなりません。Fig.5 の場合で、もし図の左からやってきた平行ビームを一点に集める場合、すなわち物点が無限遠点にある場合は解は少し簡単になって、2次曲面 (楕円面) となります。

フェルマーの原理は光を波と考えれば説明できると述べましたが、これは Fig.5 の場合で言えば次のようになります。点 A に点光源を置いて、そこから球面波が発生している状況を思い浮かべます。一般に、光線とは波面に直交する曲線であると考えます。すると、A から出た光線がすべて B に集まるということは、A から出た球面波が、屈折面によって B に向かって集束する球面波に変換されるということです。よって、A から B に至る位相変化は経路に依らず一定、つまり光路長がすべての光線に沿って一定になっているはずです。また、もし波面と直交しない経路に沿って光路長を計算したとすれば、実際の経路に沿った値より大きくなってしまうのは明らかです。これはすなわち、(5) の原理に他なりません。

余談ですが、人間の眼の中には、水晶体と呼ばれる凸レンズの形をした部分があります。眼をカメラにたとえる際に、水晶体をカメラレンズに、網膜をフィルムに対応させて考えがちですが、これは正しくありません。眼のなかで一番大きなレンズ作用を持つのは、空気から角膜に入射するときの屈折作用で、ちょうど Fig.5 の状況です。角膜の表面は、球面よりも外側でいくぶん平たくなっていて、ちゃんと球面収差補正が施されています。(水晶体は角膜から少しはなれた内部に位置し、ピント合わせのためのレンズとして働きますが、屈折作用はそれほど強くありません。) なおこれも余談ですが、カメラレンズの中には、球面収差の大きさを加減できるものがあります。これは写真をきれいにボケさせるためで、単にフォーカスの合っていないピンボケ写真とは違った「ボケ味」がつくられます。(女性を美しく撮るためです。)

1.4 近軸特性と軸外収差

前節でみたように、一点から出た光線をすべて別の一点に集めるためには、複雑な式で表される曲面形状のガラスを製作しなければなりません。しかしそのような非球面レンズはかなり高価になります。そこで普通は、光軸において同じ曲率を持つ球面で置き換えてしまいます。この場合、球面収差が0になる曲面と一致するのは光軸付近のみですので、光軸とのなす角度の小さい光線はちゃんと1点に集束しますが、角度が大きくなると集束点がずれてしまいます。その状況を Fig.6(a) に示しました。Fig.4 と同じく、球面収差が生じています。(Fig.5 とは逆に、理想的な曲面の方を点線で描いています。)

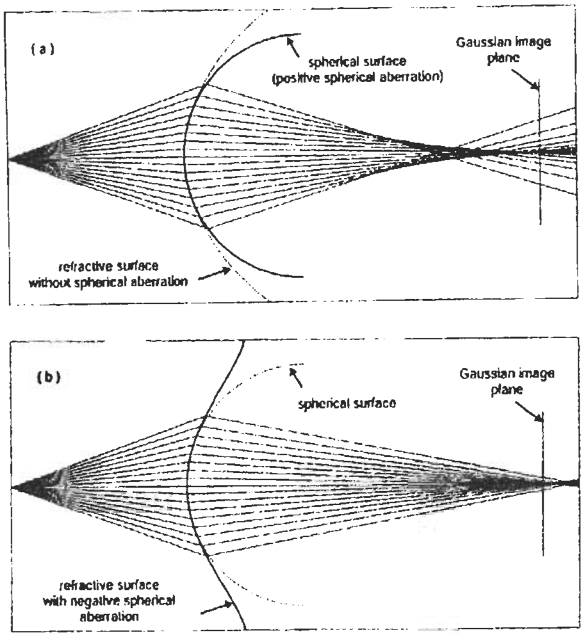

Fig. 6: (a) Spherical refractive surface with positive spherical aberration. (b) Refractive surface having negative spherical aberration.

Fig.6(a) では、光軸と大きな角度をなして光源を出射した光線ほど、ガウス像面の手前におちてしまっています。言い方を変えれば、レンズの外側ほど理想的な場合よりも集束力が強いということです。これはFig.4 でも同様でした。このような場合、球面収差は正であるという言い方をします。(光学ではこの言い方はあまり一般的ではありませんが、電子レンズとの比較をするときのためにこのように定義しておきます。) 逆にFig.6(b) のように、球面収差が0の屈折面よりも物体側にふくらませた形状にすれば、レンズの外側を通る光線ほどガウス像面から遠くはなれた位置におちます。この場合、球面収差は負であると言います。球面だけで構成した凸レンズでは球面収差が必ず正になることが示されますが、屈折面として非球面を許すなら、球面収差は正にも負にもできるわけです。

さて、一般に現実の光学系は、理想的な働きをするのは光軸の近傍だけで、軸外、すなわち光軸から遠くはなれた光線ほど収差が大きくなります。光軸付近での光学系の振舞いは**近軸特性** (paraxial characteristics) と呼ばれます。この性質が、近軸だけでなく軸外の光線にたいしても満たされるなら、収差のない理想的なレンズということになるわけです。実際には、収差には球面収差の他にもいろいろ種類があり、すべての収差を同時にゼロにするのは不可能です。そこで、光学系の用いられる目的に応じてどの収差を消すべきかが変わってくることになります。

さて、軸上の点光源にたいして球面収差を0にできることはすでに示しましたが、これだけでは広がった物体の像を得ることができません。そもそも、「軸上の光源を結像できるような何かのしくみがあった場合に、軸外の光源もちゃんと結像されるのか?」という問題があったわけです。

この問題を一般的に扱うのは簡単ではありませんが、もし一つの球面の屈折面だけを考えるなら、直感的でわかりやすい方法があります。Fig.7 のように、球面の曲率中心のまわりに系全体を回転させて考えます。新しい光軸は球面にとってはもとの光軸と同等ですから、A の像が B にできるのなら、それを回転した A' の像は対応する B' にできます。ただし、A と B から出た光線が球面にとって対等になるように、球面の曲率中心位置に絞りを置きます。A' がもとの光軸とそれほど離れていなければ、言い換えれば近軸領域にあれば、光源と像を含む球面は平面で近似できます。そこで、物面の軸外の光源が像平面上に結像されると見なしてよいでしょう。

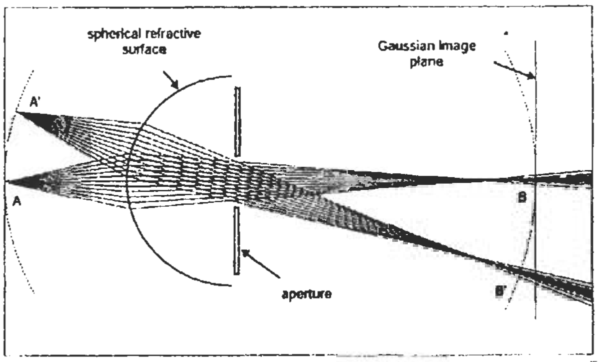

Fig. 7: Point source A on an optical axis is equivalent to off-axis source A' for a spherical refractive surface. Off-axis aberrations appear when object and image surfaces are assumed to be plane.

もし A' が近軸と言えないくらい離れていると、図から明らかなように、像面（平面としての）におけるボケの大きさは A の像より大きくなります。軸上光源のボケをつくるのは球面収差と呼ばれるわけですが、軸外ではこれにさらに別の種類の収差が重畳されるという見方をします。一般にこれらを**軸外収差** (off-axis aberration) と総称しますが、ボケの大きさ

が光源の光軸からの距離の何乗に比例するかによって分類されます。

軸外収差で一番重要なのは、光軸からの距離に比例してボケが増える**コマ収差** (coma) と呼ばれるものですが、Fig.7 の状況ではボケは 2 乗に比例するのでコマ収差はありません。この図で生じている軸外収差は、もし像面（正確には物面も）を平面ではなく球面と考えるなら存在しないわけで、この収差は**像面湾曲収差** (field curvature) と呼ばれます。なお、この図ではコマ収差はないと言いましたが、それは A と A' からの光線がレンズの球面にとって同等になるように、絞りで光線を制限しているからです。もしこの絞りを別の場所に移動すれば、二つの光源は同等でなくなって、コマ収差が発生します。

なお、レンズ系のもつ収差の正確な分類方法は後章で述べます。基本的な収差として、今まで述べた球面収差、コマ収差、像面湾曲収差のほかに、非点収差（astigmatism）と歪曲収差（distortion）があり、これらはまとめて**ザイデル（Seidel）の五収差**と呼ばれます。このうち、歪曲収差だけは像をボケさせる収差ではなく、たとえば正方形を樽形にゆがめて写すような収差です。

さて、Fig.7 は一つの屈折面だけの特別な場合ですが、一般のレンズ系でもいくつかの屈折作用の合成ですので、同様の状況が生じることが想像できるでしょう。すなわち、軸上の光源を結像できるレンズ系においては、光軸からはなれた光源は、光軸からの距離が小さければ軸上光源と同等に結像されますが、遠くなるほど一般に軸外収差が増加していきます。また、軸外収差を最小に抑えるための絞り位置がどこかに存在することも一般に言えます。（軸外収差が絞り位置に依存するという事実は重要です。）さらには、像面は平面であるより曲面であるほうが自然であることも理解できるでしょう。像面が平面でなければならないと考えるのは、主としてフィルムを製造する人間の側の都合です。

特殊な例ですが、フィルム面を湾曲させたシュミットカメラと呼ばれるものが存在します。これは明るくて視角が広いという特徴をもつので、天体撮影などに用いられます。この原理は Fig.7 の状況とよく似ているので、少し詳しく述べておきます。シュミットカメラはレンズではなく球面鏡を用います。球面鏡は、球面屈折面と同じく球面収差をもちますが、球面であることによって、球面の曲率中心に絞りを置くとどんな入射角で入ってきた光束も同等となり、コマ収差と非点収差が発生しません。また歪曲収差も（理由は別ですが）現れません。そこで、光路長にたいしての補正板を用いて球面収差を除き、最後に残った像面湾曲収差を消すために曲がった像面に沿ってフィルムを置く、というのがシュミットカメラの原理です。

1.5　電子レンズ

光学レンズの話が続きましたが、ここで電子レンズの例を示します。電子レンズは大きくわけて**静電レンズ** (electrostatic lens) と**磁界レンズ** (magnetic lens) がありますが、ここでは考えやすい静電レンズを考えます。Fig.8 は簡単な静電レンズで、電位の異なる二つの円筒状の電極からなります。左からやってきた電子線は、二つの電極間の電位差によってつくられる電場で加速され、その際に集束作用を受けます。

この図の電子軌道は、電場 $\boldsymbol{E}(x,y,z)$ の中での電子の運動方程式、すなわち

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = -e\boldsymbol{E}(x,y,z) \qquad (6)$$

を数値的に解くことで描いたものです。なぜ図のような電場分布によって集束作用が得られるかは、各点で電場が電子に及ぼす力の方向を考えればわかることですが、これは次章で説明します。（実際にはたとえエネルギーが低くても相対論的な運動方程式を用いるべきですが、これに関しても次章で述べます。）この図から、電子レンズでも光学レンズと同様に球面収差が存在することがわかります。また、軸外光源ではボケが増えていますので、軸外収差も存在しています。

さて、光学において、光線経路を決定するためのスネルの法則とは別の表現、フェルマーの原理があったように、電子の場合でも同様の原理が存在します。これは**最小作用の原理** (principle of least action) と呼ばれ、次式で与えられます。

$$\delta W = \delta\int_A^B \sqrt{\Phi(x,y,z)}ds = 0 \qquad (7)$$

ここで $\Phi(x,y,z)$ は静電ポテンシャル分布で、電子が静止する場所で 0 になるように原点を約束しています。よって $\Phi(x,y,z)$ は必ず正になります。上式を光路長に関してのフェルマーの原理 (5) と見比べれば、$\sqrt{\Phi(x,y,z)}$ を屈折率分布と見なせば、そのときの光線が電子軌道に一致することがわかります。光路長に相当する積分をここでは W という文字で表していますが、これは力学の言葉で「作用」と呼ばれるものです。

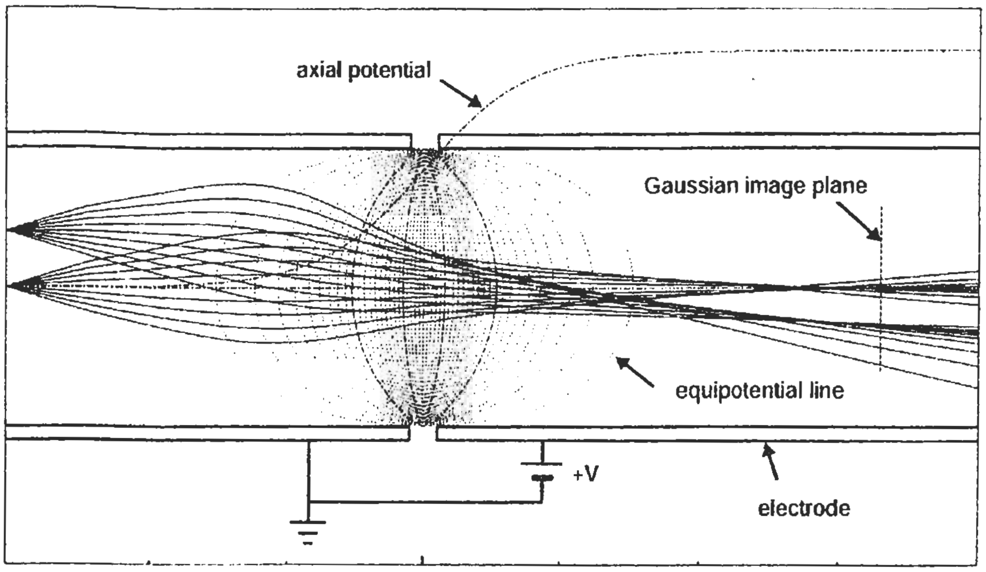

Fig. 8: Example of an electrostatic electron lens. Electrons are accelerated when passing through the gap of cylindrical electrodes with different potential, and undergo convergent lens action.

この原理を用いると、静電レンズは光の場合で屈折率が連続的に変化する状況に厳密に対応します。静電ポテンシャルの等高線は、光学での屈折率の等しい面に相当するわけです。Fig.8 では、静電ポテンシャルの等高線の形だけを見ると凸レンズに対応するように思ってしまいますが、物面と像面でポテンシャルが異なりますので、物面と像面の空間で屈折率が異なる光学系に対応しています。光学レンズの場合、複数の屈折面からなる系でもひとつひとつの屈折面の合成として考えることができました。そこで、静電レンズは光学レンズと本質的に同じ性質をもつことが言えるのです。

フェルマーの原理は光を波と考えると説明できるということをすでに述べました。すると、電子レンズの作用は電子の波動性が関係するのかと思われるかもしれません。しかし、(7) は純粋に古典力学のみから導かれるものです。実は、この原理を説明するための波動性とは、回折とか干渉を起こす波ではなく、粒子の軌道に直交するという意味での「波面」が存在するということなのです。つまり各粒子が勝手な運動をすることは許されず、波面を描くことができるような統率された運動だけが現実に起こりうるのです。フェルマーの原理の証明において要求されるのも、光線がこのような振舞いをするということだけです。力学において粒子の軌道に伴う波面を決定する方程式は**ハミルトン - ヤコビ方程式** (Hamilton-Jacobi equation) と呼ばれ、光学での波面を決定する**アイコナール方程式** (eikonal equation) というものに対応します。

電子光学の理論を展開するのに、電子の運動方程式をもとにするより最小作用の原理を用いるほうがはるかに計算が簡単になります。その理由は、運動方程式がベクトルの方程式であるのにたいし、(7) はスカラー量を扱っているということです。たとえば、近軸特性を問題にしたければ、$\sqrt{\Phi(x,y,z)}$ を光軸からの距離に関してテイラー展開して、最低次の項だけを残した上で (7) を適用すればよいのです。また、高次の項まで取り込めば収差が考慮されることになります。この過程は、天体運動学や量子力学における**摂動論** (perturbation theory) に対応するものです。

なお、いままで述べてきた収差は、光の場合で言えば、すべて単色の光線すなわち一定の波長を持つ光にたいしてのもので、一括して**幾何収差** (geometrical aberration) と呼ばれるものです。これとは別の範疇の収差として**色収差** (chromatic aberration) があります。色収差は、光の色ごとにレンズの焦点距離が異なる現象です。色収差の大きいレンズで写真を撮ると、像の端が虹のように縁取られて見えます。鏡による反射では、色による作用の違いはありません。そこで、鏡を曲面に磨いてレンズの代わりをさせれば色収差は除かれます。反射型の天体望遠鏡はこれを用いたものです。

電子レンズの場合は、電子は目に見えないので「色」の違いはありませんが、波長の違い、つまりエネルギーの違いによって焦点距離が変わることが色収差

と呼ばれます。この収差も球面収差と同様、大きな開き角のビームだと集束点のずれが目立つようになります。球面収差の符号に関してはすでに定義しましたが、色収差に関しては、エネルギーの高い電子ほどレンズから遠くに集束する場合を正、逆の場合を負と定義します。

また、ここまでの議論で光は光線、あるいはそれに直交する波面を考えていましたが、このような扱いは**幾何光学近似** (geometrical optics approximation) と呼ばれます。実際には光が真の波動であることによって**回折収差** (diffraction aberration) と呼ばれるものが生じます。これは、光が陰に回り込む回折現象によって、一点に集束するはずのビームがボケてしまうことを言います。これは波動性そのものから来る必然的なもので、無くすことはできません。電子も波動性を持ちますから、必ず回折収差が生じます。

1.6 光学と電子光学の対応について

前節では、フェルマーの原理と最小作用の原理を対応させて、光学と電子光学が本質的に同じ法則に支配されていることを述べました。フェルマーの原理と最小作用の原理はいずれも、ある積分が停留となるような道筋が実現されるということを述べています。このような方式で述べられた自然法則は、一括して**変分原理** (variational principle) と呼ばれます。力学における変分原理を総称して最小作用の原理と呼ぶ場合もありますが、前節で用いたのは狭義のもので、しばしばモーペルテューイの名を冠して呼ばれるものです。

力学法則を変分原理で記述する立場と通常の微分方程式を用いる立場の違いは、いくつかの解析力学の教科書で議論されていますが、ここではまずこの問題に関して簡単に記しておきます。

われわれは通常、自然現象というものを時間を追って因果的にとらえています。自然法則イコール「時間発展の法則」であり、時間というものが、ほかの力学変数とは明確に区別できる特別な意味をもっています。一方、変分原理は時間を追うものではなく、空間あるいは時空間における静的な曲線のうちの一つを選ぶための法則としてはたらきます。

電子の振舞いを、運動方程式によって時間変化を1ステップずつ追っていく方法ならわかりやすいわけですが、運動法則が変分原理の形で与えられるとわれわれは当惑してしまいます。電子があらかじめいろいろな経路を調査したえうで、実際にどの経路に進むかを決めているかのようです。しかしこのように感じるのは、まだ時間というものに束縛されているからとも言えます。変分原理は時間を一気に見渡した、動きの概念をもたない記述であり、力学の幾何学化という見方ができます。

前節で述べた最小作用の原理は、力学で現れる多くの変分原理の中ではいくぶん特殊なものです。力学で登場する多くの変分原理においては時間が積分変数としてはたらきますが、最小作用の原理では時間が消去されていて、電子の通った道筋のみを決定するものとなります。しかし、時間を含む変分原理の場合でも、電子の運動は時空間に埋め込まれた静的な曲線として扱われます。すなわち、変分原理は時間を逐次的に追いかけていく立場とは本質的に異なるのです。

歴史的に、変分原理が受け入れられた背景には、時代の特殊性があります。自然法則が変分原理のかたちで述べられたのはフェルマーの原理が最初ですが、その形式の持つ抽象性がむしろ当時の自然科学者たちを感動させ、一種の哲学あるいは宗教としての様相を帯びることになりました。フェルマーの原理を模した力学原理を最初に唱えたのはモーペルテューイですが (1747年)、彼の目的とするところは神の存在証明でした。

現代ではそのような意義は薄れたとはいえ、変分の概念はなお力学における指導原理としてはたらいています。それは主として、変分原理が、用いる座標系とは無関係な、幾何学的な主張を行なうものであることによります。つまり、力学系の自由度を記述する座標変数をどう選ぶかとは無関係に、運動というものの本質が表現されることになります。一方ふつう運動方程式と呼ばれるものは、3次元空間における粒子の運動をデカルト座標で記述すればたまたまそういう形になる、ということしか主張していません。

さて、ここでの目的は光学と電子光学の対応を議論することですが、このことのために変分原理を持ち出すことは必ずしも必要ではありません。変分原理が直接、具体的な運動の決定のために適用されることはまずありません。変分原理には必ずそれと等価な微分方程式が存在し、それが結局は、運動方程式に他ならないことが示されます。そこで、光学と電子光学の対応を示すためには、光線と電子の経路を決定する微分方程式が同じ形になることが示せれば、それで十分なわけです。

光線の屈折の仕方を記述するスネルの法則は、不連続な屈折率の境界のある場合ですが、これを連続

な屈折率分布 $n(x,y,z)$ の中での光線経路を決定する方程式に書き換えることができます。結果だけ述べると次式のようになります。

$$\frac{d}{ds}\left(n\frac{d\boldsymbol{r}}{ds}\right)=\nabla n \tag{8}$$

ここで $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(s)$ は光線経路を弧長をパラメタとして表したものです。上式は光学の教科書によくある表現ですが、これは次式のように変形することができます。

$$\frac{d\boldsymbol{u}}{ds}=\frac{1}{n}(\nabla n\cdot\boldsymbol{N})\boldsymbol{N} \tag{9}$$

ここで $\boldsymbol{u}=d\boldsymbol{r}/ds$ は光線経路の接線方向の単位ベクトル、$\boldsymbol{N}$ は経路の曲率中心方向の単位ベクトルです。$(\nabla n\cdot\boldsymbol{N})\boldsymbol{N}$ は、屈折率の勾配ベクトルの曲率中心方向への射影成分ですから、光線は屈折率の大きい方向に曲がって行くわけです。

一方、電子の電場中の運動方程式もこれと同じ形式に書き直すことができて、

$$\frac{d\boldsymbol{u}}{ds}=\frac{1}{2\Phi}(\nabla\Phi\cdot\boldsymbol{N})\boldsymbol{N} \tag{10}$$

が得られます。ここで $\Phi=\Phi(x,y,z)$ は (7) と同じく静電ポテンシャル分布です。上式はもとの運動方程式 (6) とはまったく違ったものに見えますが、それは、この式では時間が消去されていて、電子の経路のみを決定する方程式になっているからです。この式を導くには、エネルギー保存則を用いて、運動方程式から時間を消去します。(導出過程は次章で述べます。) (9) において n を $\sqrt{\Phi}$ に置き換えれば、(10) と同一の式になることが確認されます。光学と電子光学（ここでは静電レンズの場合だけですが）の対応を説明するには、これだけで十分です。

しかしながら、§1.2 ですでに述べたように、光学系にとって何が可能で何が不可能かを考えることが重要なテーマです。その際に、上のような方程式だけではほとんど無力です。たとえば輝度不変則は、スネルの法則、あるいは上の (8) や (9) をいくら眺めていても見えてきません。これは輝度不変則が、一本の光線に沿っての法則ではなく、複数の光線、つまり光線束に関しての法則であるからです。もし屈折率分布 $n(x,y,z)$ を自由に形成できるとすれば、一本の光線だけなら好き勝手な経路をとらせることができます。しかしそれによって別の光線の振舞いも制約を受けることになって、複数の光線の経路を任意に操作することは不可能になります。

輝度不変則は、光学だけでなく電子分光においても重要になりますので、少し立ち入って述べておきます。もし光学レンズ系によって輝度が変えられるとすると、低い温度から高い温度をつくりだすことができることになるのですが、これは熱力学の法則に反します。虫メガネで太陽の光を集めるときの状況を思い浮かべましょう。レンズの焦点においた紙が燃えだすのは、太陽の縮小像がそこにできているからです。レンズの焦点距離を0に近づけた極限を考えると、像倍率が無限に小さくなって、焦点での光強度をいくらでも大きくできそうに思えます。しかし、もしそうであれば、太陽表面より高い温度をつくれることになってしまいます。

逆に、熱力学の法則と矛盾しないためには、太陽の像を無限に縮小することを不可能にするような法則が、どこかに存在しなければなりません。それが実は輝度不変則であり、さらにその根源をたどれば、光の波面の概念に行き着くのです。(ここで述べているのは、像を縮小しようとしても回折現象によってボケてしまうということではありません。波長を 0 に近づけた幾何光学近似において、この基本的な制約が存在するのです。詳しくは、後章でアッベの正弦則を説明する際に述べます。)

この輝度不変則は電子ビームにたいしても成り立ちますが、電子の場合は**リュービルの定理**（Liouville's theorem）といったほうがわかりやすいでしょう。この証明自体は運動方程式だけでも可能ですが、その成立の裏には、前節で述べた、制限された意味での波動性が関与しています。リュービルの定理が規制しているのは、ひとつひとつの粒子の軌道ではなく、集団としての振舞いです。そして、そのような粒子束の扱いに適うのが、変分原理という記述形態なわけです。

力学はただ運動方程式が解ければよいという立場によっては、純粋な古典力学の枠内から、波動性を示唆するような理論は生じえなかったでしょう。変分原理による定式化はハミルトン・ヤコビの理論に結実し、さらには量子力学の成立を促がしたわけです。(ただし古典力学から必然的に波動力学が導かれるわけではなく、いくつかの飛躍が必要です。この事情は量子力学の歴史書などで述べられているので、ここではこれ以上述べません。)

本講座では、何か所かで最小作用の原理を用いますが、その目的のひとつは光学系というものに課せられる制約を議論するためです。そしてもうひとつは、前節で述べたように、計算を楽にするためです。電子レンズの収差係数の導出は、原理的には運動方程式だけを用いて可能なはずですが、とくに磁場が存在する場合には、膨大な計算を覚悟しなければなりま

せん。最小作用の原理の証明と詳しい解説は、3章で行ないます。

1.7 光学レンズと電子レンズの違い

前節までは光学レンズと電子レンズの類似性を強調しましたが、ここでこれらの決定的な違いを述べておきます。それは収差の補正に関することです。

光学レンズの場合は、前節までに述べたような収差は（回折収差を除けば）、うまくガラスレンズを設計し、あるいは複数個をうまく組み合わせて配置すれば問題の無いところまで取り除くことができます。球面収差を補正するためには、非球面レンズを採用するという方法がありました。また別の手段として、凸レンズと凹レンズを組み合わせる方法もあります。球面で構成した凸レンズは必ず正の球面収差をもつわけですが、球面で構成した凹レンズは必ず負の球面収差を持つ（つまりレンズの外側ほど理想的な場合よりレンズ作用が弱い）ことが知られていて、これらをうまく組み合わせて全体として球面収差を打ち消すことが可能です。（球面収差の符号の定義は§1.4で述べました。）

しかし、電子レンズあるいは電子レンズ系においては、球面収差も色収差も0にできないことが示されています。これは軸対称なレンズの場合に限った話ですが、軸対称な静電レンズも磁界レンズも必ず「正の」球面収差と色収差をもち、これは静電レンズの電極形状、あるいは磁界レンズの磁極形状（具体的な構成は次章で示します）をどう頑張っても変えることができません。すなわち、単体で収差のないレンズをつくることができないだけでなく、光学レンズ系の場合のように異なる符合のレンズを組み合わせて全体として打ち消すこともできません。

電子レンズでは凹レンズがつくれず、これが収差補正を不可能にしている、という言い方がされることがあります。電子レンズで凹レンズがつくれないというのは事実で、これに関しては次章で述べます。しかしそれが直接、収差補正の不可能性と結びつくわけではありません。§1.4で見たように、光学レンズの場合はたとえ凸レンズであっても球面収差は正にも負にもできます。しかし電子レンズにおいては、球面収差が正の凸レンズしかつくれないのです。電子レンズでは球面で構成した光学凸レンズに対応するものしかつくれず、非球面レンズに対応するものは不可能であるということです。

軸対称電子レンズは収差が補正できないという事実は、証明した人の名をとって**シェルツァーの定理**(Scherzer's theorem)と呼ばれます。これが証明されたのは1936年で、最初の電子顕微鏡がつくられてから間もない頃です。球面収差と色収差は、電子顕微鏡において高倍率像の空間分解能を決定する要因なので、これらが補正できないというのは非常に深刻な問題です。

電子線を用いて顕微鏡をつくろうという発想は、光学顕微鏡の分解能を凌駕しようというところからきています。光学顕微鏡の分解能の限界を決めているのは光の波長です。可視光の波長は$0.5\mu m$の前後で、これが分解能の限界となります。すなわち、波の回折現象によって、波長より細かい構造を見るのは（たとえレンズをたくさん並べて倍率を稼いでも）不可能なのです。これは前節で述べた回折収差に他なりません。

このような、波動性からくる分解能の限界は波長限界と呼ばれ、回折収差以外の収差がすべて取り除かれたときの分解能の下限を意味します。そこで、自然に思いつくことですが、可視光より波長の短い紫外線、あるいはX線を用いればより分解能の良い顕微鏡ができるはずです。しかし残念ながら、このような波長領域の光にたいして有効にレンズとして働くような物質が存在しないのです。

電子は、やはり波としての性質はもちますが、その波長は可視光よりはるかに小さくできます。電子を加速すればするほど波長が短くなり、たとえば数10Vの加速ですでに原子の大きさと同程度になります。もし100kVで加速すれば波長は0.04 Å(1 Å = 0.1 nm)です。電子顕微鏡によって、そのような分解能の実現が期待できるわけです。

しかし、現時点で電子顕微鏡によって得られている分解能はせいぜい1Åのオーダーです。光学顕微鏡をはるかに上回ってはいますが、電子の波長限界までは及んでいません。この原因の一つには、電子レンズの収差補正が不可能であるという事実があります。（電子レンズの収差が0になれば波長と同程度の分解能が得られるかという問題は、そう単純ではありません。電子レンズ系に供給する電源の安定度を現在より何桁か上げる必要があり、また機械的な振動や外乱場の問題もあります。現状の空間分解能では抑えられている要因が顔を出してくるのです。）

シェルツァーの定理は、軸対称な電磁場を用いた電子レンズに限った話ですが、そのほかに、電磁場が時間変化しない、空間電荷が存在しないなどの仮定のもとで証明されるものです。これらの制約のどれかを

除いたレンズを実際に用いるのは、技術的にはかなり困難ですが、それによって収差を消せる可能性があるわけです。シェルツァーの定理が示されたあとの電子光学の歴史は、収差補正の歴史であるといっても過言ではありません。なお、ガボアが発案したホログラフィーの原理は光の分野で有名ですが、もとはといえば、電子顕微鏡の球面収差によって失われた情報を取り戻すためのものです。

現在は、このような収差補正の試みのいくつかが成功し、実用になりつつありますが、これは本講座のテーマではありません。重要なのは、この光学レンズと電子レンズとの本質的な違いはどこから来るのかということです。これに関しては次章で議論しますが、それまでは問題意識のなかに留めていただくことにしましょう。

1.8　文献紹介

ここでは光学と電子光学の全般的な教科書を紹介し、各論に関しては後の章で挙げていきます。電子光学の入門書は何がいいか？と聞かれることがありますが、レンズ公式や収差などに関して、初歩的なところから説明しているものはなかなかありません。そこで、聞かれたときには最初に光学レンズの本を薦めることにしています。たとえば次のようなものがあります。

[1] 吉田正太郎、写真レンズの科学、地人書館 (1979)
[2] 小倉敏布、写真レンズの基礎と発展、朝日ソノラマ (1995)
[3] 松居吉哉、結像光学入門、啓学出版 (1988)
[4] 小倉磐夫、現代のカメラとレンズ技術、写真工業出版社 (1982)
[5] 富山小太郎訳、ファインマン物理 II 光・熱・波動、岩波書店 (1968)

まず [1] は「カメラマンのための」という触れ書きが付いていますが、レンズの収差に関して初歩から専門レベルのことまで、非常にわかりやすく書かれています。また [2] には、軸外収差の種類がていねいに説明されていて、コマ収差のあるレンズで写真を撮るとどう写るかなどの実例も載っています。近軸近似とかレンズ公式に関しては [3] がよくまとまっています。[4] はすこしマニアックな内容ですが、実際の設計現場の雰囲気が伝わってきます。また光学一般の物理的な入門として、[5] の光学に関する章がわかりやすいと思います。

光学の本格的な教科書としては次のものがあります。

[6] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 6th ed., Pergamon (1980); 草川　他訳、光学の原理（第5版訳）I-III、東海大学出版会 (1974)
[7] 久保田広、光学、岩波書店 (1964)

このうち [6] は有名な本ですが、内容は膨大です。フェルマーの原理は厳密にどう証明するか、などを調べるときにはあった方がよいでしょう。レンズ理論を勉強するだけなら [7] のほうが取っつき易いですが、どちらにしろ専門家向けです。

電子光学に関しては、邦書では次のものがあります。

[8] 裏克己、電子・イオンビーム光学、共立出版 (1994)
[9] 石黒浩三・高木左知夫、光学・電子光学 I、朝倉書店 (1967)
[10] 電気学会編、電子・イオンビーム工学、電気学会 (1995)

これらは視点が少しずつ異なっているので、相補的に読むのがよいでしょう。[8] は収差理論が詳しく述べられていて、[9] では光学との関連も説明されています。[10] は、電子顕微鏡を含めた荷電粒子ビーム装置の実際がよくわかります。

本格的なものとしては、

[11] W. Glaser, Grundklagen der Electronenoptik, Springer(1952)
[12] P. W. Hawkes and E. Kasper, Principles of Electron Optics, Academic(1989)

があります。私事になりますが、私が入社した頃は、設計者のための電子光学の教科書といえば [11] しかありませんでした。しかしそれに匹敵する [12] が出されたので、現在はこちらを読めばよいと言われています。しかし [12] はかなり理論寄りの内容で、しかも収差論に関してはこの分野独自の展開をしていて、標準的な力学の言葉では述べられていません。そこで、たとえ解析力学まで一通り勉強した方でも理解はなかなか難しいはずです。本講座では、収差の定式化に関してはもう少しくだけた解説を試みたいと考えています。