

近軸軌道計算法の非近軸軌道への拡張 —電子銃特性解析ソフト *G-optk* の開発—

Generalization of Paraxial Trajectory Method for the Analysis of Non-Paraxial Rays: Simulation Program *G-optk* for Electron Gun Characterization

藤 田 真^{a, b}
Shin Fujita

^a(株)島津製作所・分析計測事業部技術部

^b名城大学・総合研究所

要 旨 近軸軌道計算法を拡張し陰極から光軸と大きな初期角度を持って出射される電子銃内軌道の解析を可能とした。一般化を可能にしたキーポイントは軌道傾斜の指定に \tan に代わって \sin を用いた点にある。このことで実際軌道により近い近軸軌道の割り当てが実現された。新しい軌道パラメータにより陰極面での軌道初期条件（軌道変位と傾斜）とクロスオーバ面での軌道条件を多項式による写像で精度よく関係づけられる。多項式係数は電子銃特性の把握に有用な“光学パラメータ”として活用できる。このうち“電子銃焦点距離”は特に重要で、クロスオーバ径や電流角密度の評価に応用できる。一般化近軸軌道計算法に基づき電子銃特性解析ソフト *G-optk* を開発した。プログラムは軸上電位・磁束密度分布から近軸基本軌道および種々の光学パラメータの計算を行う。電子銃の物理的イメージをこれまでになく明快かつ迅速に把握するためのツールとして活用できる。

キーワード：軌道計算，数値シミュレーション，陰極レンズ，電子銃

1. はじめに

電子顕微鏡をはじめとする電子・イオンビーム鏡筒の設計に数値シミュレーション法は不可欠のツールとなっている。電子光学特性を計算できるいくつかの市販ソフトも入手でき、レンズ系の設計にひろく用いられている^{1,2)}。シミュレーションソフトがレンズ系開発において非常に有効な手段となっている大きな理由は、計算結果として焦点距離や倍率、収差係数といった“光学パラメータ”が提供されることにある。単に荷電粒子の軌道を計算するのではなく、直接に光学特性を示す指標が得られるため、設計したレンズ系がどのように機能するのか容易に把握できる。これが可能なのは、言うまでもなく、「近軸軌道計算法（+収差論）」というしっかりした理論ベースが確立されていることに依っている。

一方、電子銃部設計に対する数値シミュレーション法の適用を見てみると、満足できる方法論に基づいているとは言いがたい。確かに ray-trace によって陰極表面から多数の軌道を計算しそこからクロスオーバ（電子源）の特性を導き出す試みはなされている。しかしながら、レンズ系の解析と比べ計算量は膨大であり、もっと重要なことには計算結果の解釈法が必ずしも明快でないことが多い。これは電子銃の特性解析には近軸軌道計算法が適用できないとされてきたことによる。

陰極表面から出射される電子は光軸に対して大きな角度を持つ。このため近軸軌道近似が初めから破綻してしまう。電子銃解析に近軸軌道計算法は適用できない、よって電子銃をレンズ系特性の解析で用いられているような“光学パラメータ”で特徴づけることは難しいとされていた。しかしながら図 1 に示すような三極電子銃内の陰極からの軌道を見るとクロスオーバは陰極の“後焦点面”に相当しているように見える。筆者らは近軸軌道計算法をなんらかの工夫で非近軸軌道解析（「擬近軸軌道」と呼ぶのがもっと精確かもしれない）にまで一般化し、電子銃特性を鏡筒設計者に理解しやすい光学パラメータを使って表現する方法について考察してきた^{3~5)}。本講座ではそのために導入した「正準写像法」というコンセプトと、この方法論に基づいて開発を行った電子銃特性解析ソフト *G-optk* についての紹介を行う。

2. 正準写像法（CMT 法）と主要光学パラメータ

陰極から出射された電子銃内の電子軌道のふるまいを特徴づけるため、まず「正準写像法」という考えを導入する³⁾。図 2 を用いて原理を説明する。陰極表面から変位 ξ 、光軸との角度 α の初期条件で出射される電子軌道を考える。初期エネルギーは Φ_0 (eV) とする。電子は電子銃内の電磁界分布に従って加速されながら飛行し最終的に場が 0 となる場所に置かれた参照面を通過する。参照面での軌道変位を η 、角度を β とする。電子源特性を考えるときには、放出軌道からクロスオーバ面まで漸近線を引いて考えると便利である。クロ

^a 〒604-8511 京都市中京区西の京桑原町 1
TEL: 075-823-1204; FAX: 075-823-1365
2011 年 2 月 15 日受付

スオーバ面での軌道変位を η_c とする. 正準写像法は電子銃内軌道の初期条件 (陰極からの出射条件) とクロスオーバ条件とを関係づけることで電子銃特性を把握しようという試みである. このとき軌道の傾斜を示すパラメータとして \tan ではなく, \sin をとるところがポイントとなる. 次のような 2D-2D マッピング (写像) を考えることができる:

$$(\xi, u = \sin \alpha) \rightarrow (\eta_c, v = \sin \beta).$$

図 3 にこのマッピングを図表示したもの (CMT ダイアグラム) を示す. 図 1 に示す三極電子銃モデルを用いて, ある初期条件範囲 ($\xi, u = \sin \alpha$) について軌道計算した結果をまとめたものである. 写像によって (ξ, u) 座標系が (η_c, v) 座標系に対応づけられる様子を表したもので, 一見して従来から電子源の特性把握に用いられてきたエミッタンス図との類似が明らかであろう. ダイアグラムの横幅はクロスオーバ

(電子源) の大きさを与え, 縦長は放出ビームの角度ひろがりを表している.

軌道傾斜の指定に \tan ではなくあえて \sin を用いる理由は何であろうか? それは軌道パラメータに ($\xi, u = \sin \alpha$), ($\eta_c, v = \sin \beta$) を採用すると以下の関係式が厳密に成立することを利用できるからである:

$$\frac{\partial \eta_c}{\partial \xi} \frac{\partial v}{\partial u} - \frac{\partial \eta_c}{\partial u} \frac{\partial v}{\partial \xi} = \sqrt{\frac{\Phi_0}{\Phi_1}}. \quad (1)$$

(1) 式は解析力学で “Lagrange の微分不変量” として知られる一般的に成立する関係式である⁶⁾. 軌道傾斜の指定に \tan を使うと (1) 式のような簡単な関係式を導くことはできない.

(1) 式を満足する最も簡単な 2D-2D マッピング ($\xi, u = \sin \alpha$) \rightarrow ($\eta_c, v = \sin \beta$) は線形写像

$$\eta_c(\xi, u) = f \sqrt{\Phi_0 / \Phi_1} u, \quad (2.1)$$

$$v(\xi, u) = -\xi / f + mu, \quad (2.2)$$

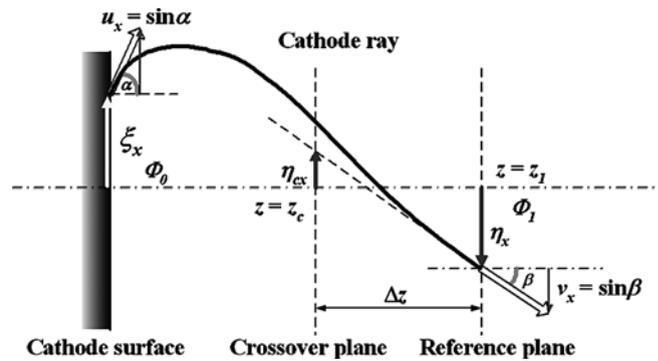
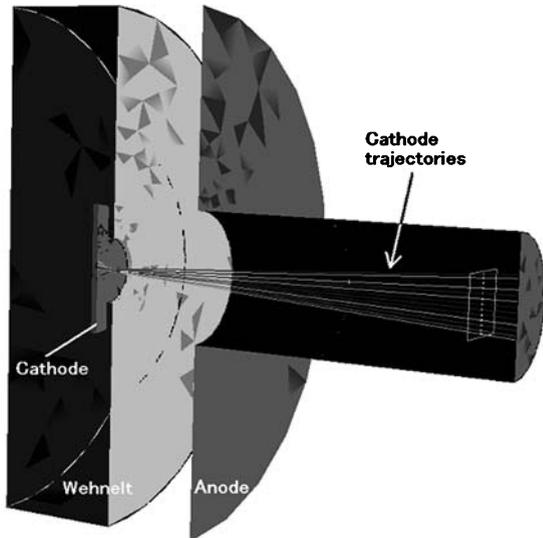


図 2 正準写像法に用いる軌道パラメータ

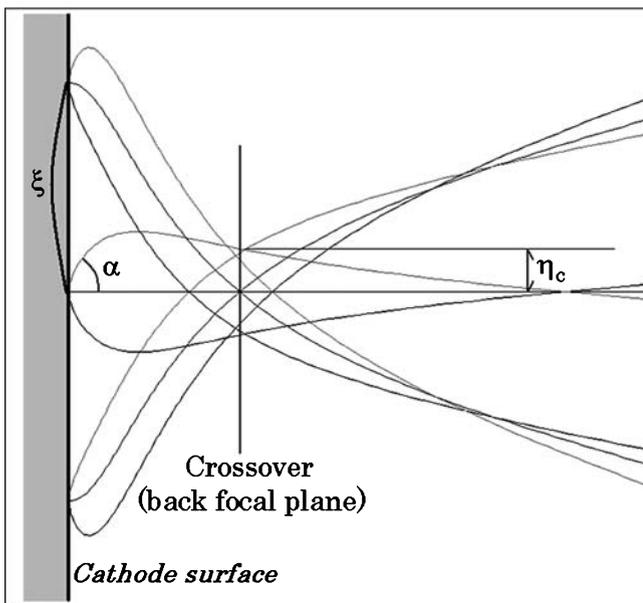


図 1 三極電子銃モデルと陰極軌道によるクロスオーバーの形成

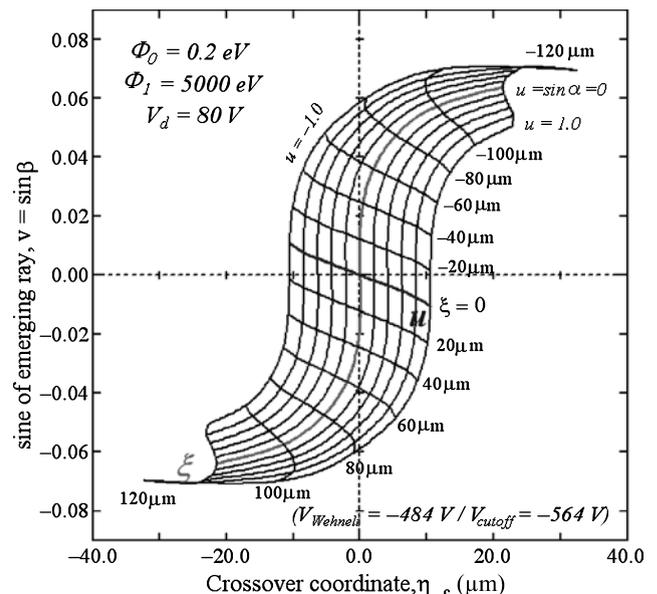


図 3 CMT ダイアグラムの例

である。図3に示すダイアグラムでも原点付近では線形写像近似がおおよそ成立しているようすが分かる。

η_c, v を与える式(2.1), (2.2)はそれぞれ勝手な係数をとることはできない。関係式(1)を満たす必要があるからである。あと述べるように、このことが電子源特性を数個の光学パラメータによって特徴づけることを可能にしている。2D-2D マッピングの線形写像近似はレンズ系特性解析における近軸軌道近似に相当し、その係数に現れるパラメータ f, m を主要(一次)光学パラメータとして電子源特性の把握に用いることができる。

正準写像法に現れる各種の光学パラメータのうち最も重要なものが“電子銃焦点距離” f である。その定義を図4に挙げる。陰極面(曲面でもよい)で変位 ξ から垂直出射した電子軌道が参照面で光軸となす角を β とするとき電子銃焦点距離は次のように定義される：

$$\frac{1}{f} = \lim_{\xi \rightarrow 0} - \frac{\partial \sin \beta}{\partial \xi} \Big|_{\sin \alpha = 0} \quad (3)$$

電子銃焦点距離 f は陰極面から垂直出射する軌道、つまり初期方向が光軸となす角が小さな軌道のみを使って求められることに注目されたい。電子銃焦点距離の導出には近軸軌道計算法が使用できることをが示唆されている。

クロスオーバー面での変位 η_c は(2.1)式によると軌道が陰極面で持つ初期角度 α ($u = \sin \alpha$) に依存しているが、比例係数は上で求めた電子銃焦点距離とビームの加速比で与えられる。つまり近軸条件を満たす軌道(垂直出射軌道)から得られる光学パラメータ(電子銃焦点距離)を使って電子源特性の主なるものが導出できることになる。

その定義から電子銃焦点距離 f は光軸まわりの限定された陰極面から出射された電子ビームがどの程度の立体角にひろがるのかを与える。これは電流角密度に関係する。また、クロスオーバー面での変位 η_c は電子源の大きさに関係していることは明らかであろう。結局、電子銃の電子源特性を特徴づけるクロスオーバー径(電子源の直径) d_{co} や電流角密度 J_Ω は電子銃焦点距離 f を使って以下のように与えられることが分かる⁷⁾：

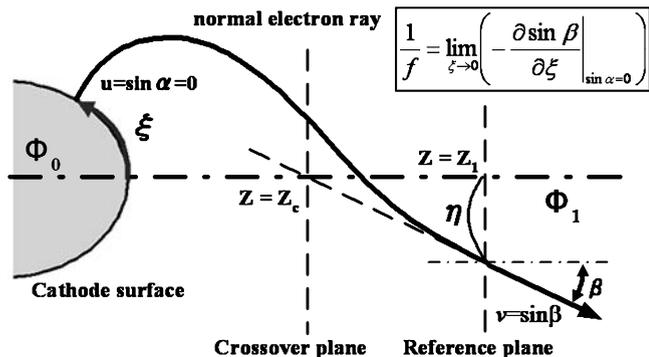


図4 電子銃焦点距離の定義

$$d_{co} = 2f\sqrt{kT/e\Phi_1}, \quad (4.1)$$

$$J_\Omega = f^2 j_s. \quad (4.2)$$

ここで、 T は陰極温度、 j_s は陰極電流密度である。

3. 近軸軌道計算法の非近軸軌道解析への展開

前節で原点近傍におけるCMTダイアグラムのふるまいは線形写像でよく近似できること、また線形近似に現れる係数を光学パラメータとして用いることで電子源径や電流角密度といった主要電子源特性を導き出せることを説明した。ここでは正準写像の線形近似からのずれ(つまり取差項)を3次多項式を使って考慮すればもっとひろい範囲に渡ってCMTダイアグラムを再現できることを示そう。3次多項式の係数を求めるのに一般化近軸軌道計算法を用いる。

CMTダイアグラムの2D-2Dマッピング $(\xi, u) \rightarrow (\eta_c, v)$ を以下のように3次多項式で近似することを考える：

$$\eta_c(\xi, u) = f\sqrt{\Phi_0/\Phi_1}u + \sum_{k+l=3} a_{kl}\xi^k u^l, \quad (5.1)$$

$$v(\xi, u) = -\xi/f + mu + \sum_{k+l=3} b_{kl}\xi^k u^l. \quad (5.2)$$

詳しい計算法は原論文⁸⁾に譲るが、一次特性を決める光学パラメータ f, m も含めて(5)式に現れる係数は通常近軸軌道計算法とほとんど同じ手法を用いて計算することができる。軸上ポテンシャル分布からまず近軸軌道方程式を解き2つの基本軌道 $g(z), h(z)$ を求める。 $g(z)$ 軌道は陰極面から垂直出射される軌道に、 $h(z)$ 軌道は軸上から角度をもって放出される電子軌道に対応するものである。クロスオーバー座標 z_{co} は条件 $g(z_{co}) = 0$ によって与えられ、電子銃焦点距離は $-1/f = g'(z_{co})$ となる。また、 $m = h'(z_{co})$ である。Helmholtzの関係式を使うと $h(z_{co}) = f\sqrt{\Phi_0/\Phi_1}$ となることが導出できる。これを(2.1)式と合わせて考えると、 $h(z)$ 軌道は、従来型の近軸軌道方程式を「 $h'(z_0) = 1$ 」という初期条件で積分した解であるにもかかわらず、その軌道は $u = \sin \alpha = 1$ という陰極条件に対応するものとなっている。つまり、陰極から光軸と垂直($\alpha = \pi/2$)に出射された電子軌道のふるまいを表すことになる。この奇妙な現象については次セクションで議論する。

3次項係数(取差係数) a_{kl}, b_{kl} は従来型近軸軌道計算法で用いられる取差積分と同様の積分を行うことで求めることができる。ただし積分範囲は、クロスオーバー面が後焦点面に対応することを考慮して、陰極面から後焦点面(クロスオーバー面)までとする必要がある。結局のところ、CMTダイアグラムを3次幾何取差まで考慮する(5.1), (5.2)式の多項式で近似しようとするとき、全ての多項式係数は従来型の近軸軌道計算法を用いて計算することができるのである。このようにして多項式係数を得たあとで軌道傾斜パラメータ、 u を \tan から \sin に変更すると初期出射角の大きな軌道にも適用

可能となる。これが一般化近軸軌道計算法のエッセンスである。その物理的根拠は、上記の $h(z)$ 軌道の解釈とも関係しており、次セクションで詳しく議論することにする。

図1の三極電子銃モデルについて一般化近軸軌道計算法を用いて特性解析を行った結果を図5に示す。図5(a)に基本軌道を示す。ウェネルト前方に実クロスオーバーが形成されることが $g(z)$ 軌道のふるまいから分かる。図5(b)に一般化近軸軌道計算法を用いて求めたCMTダイアグラム(実線)と初期条件を合わせてray-traceした結果から求めたダイアグラム(丸印)を示した。前者ではまず(5)式に示す多項式の“係数”が計算され、しかる後に初期条件 (ξ, u) を代入してダイアグラムを描いている。取差の影響を含めて両者のふるまいは良い一致をみせている。注目して欲しいことは一般化近軸軌道計算法で入力データとして与えているのは軸上ポテンシャルのみという事実である。ray-trace結果と合わせ

るためのフィッティングパラメータなどは一切用いていない。

ビームが光軸から大きくはずれず、電子軌道の“変位”が小さい限り、軸上電位とその微分形から得られるポテンシャル分布：

$$\phi(r) = \Phi(z) - \frac{r^2}{4}\Phi''(z) + \frac{r^4}{64}\Phi^{(4)}(z) + \dots, \quad (6)$$

は軌道の通過する領域の電界分布を精度よく再現する。軌道の“初期傾斜”の問題(陰極面で軌道が光軸と大きな角度をなすこと)については、軌道傾斜の指定に \sin を取ることで対処できる。このため近軸軌道計算法を用いて電子銃内軌道の評価が精度よく行えるのである。

多項式近似(5)に現れる3次係数のうちダイアグラムにS字カーブ曲率を与えるものを“球面収差係数” C_{sg} とした。これはレンズ系の持つ球面収差と同様の影響をビーム系に与える。この係数が大きいとビームの受入れ角をひろげるに従って電子銃の見かけの電子源径は本来の大きさよりもひろがってしまう。一般化近軸軌道計算法では球面収差係数 C_{sg} も光学パラメータとして与えられるため設計者は電子銃の性能を即座に評価できる。

4. 軌道傾斜角を \sin で指定する物理的な根拠

従来型の近軸レンズ理論とほとんど変わらない手法で近軸軌道・収差積分計算を行い、最後に軌道傾斜を指定する変数を $\tan \rightarrow \sin$ と変更するだけで近軸軌道計算法の適用範囲が陰極表面から出射されるような大傾斜角度の軌道にまで拡大できることは不思議に思われるかもしれない。数学的に厳密な議論については原論文⁸⁾をあたっていただくとして、本稿ではその物理的な意義づけをしてみたい。

以下では議論の論点を明瞭にするため陰極近傍付近に一樣な電界 $F = \Phi'_0$ が存在するものと仮定する。図6に初期エネルギー W (eV) を持って光軸とさまざまな角度をもって出射される電子軌道のふるまいを模式的に示した。一樣な電界 $F = \Phi'_0$ 中を運動する電子は放物線軌道を描く。放物線の“開き具合”は出射電子のもつ横方向(光軸と垂直方向)の運動量 $p_t = \sqrt{2meW} \sin^2 \alpha$ で決まる(α は出射角)。つまり横方向運動量が等しい軌道はすべて同形の放物線を描くことになる。放物線の形(開き具合)は横方向運動量のみで決まるが、その頂点位置は出射点(陰極面)での軸方向運動量 $p_z = \sqrt{2meW} \cos^2 \alpha = \sqrt{2meW_z}$ に依存する。軸方向運動量が大きくなるほど頂点位置 z_0 は陰極面より負側にずれていく：

$$z_0 = -W_z / \Phi'_0. \quad (7)$$

従来型の近軸軌道計算法ではこの軸方向初期運動量(エネルギー)に依存した“頂点の移動”に対応することができなかった。

裏・鷹岡⁹⁾、および下山ら¹⁰⁾は陰極付近の放物線軌道に対して適当な頂点移動を与えるため近軸軌道方程式の初期エネルギーに全エネルギー W ではなく軸方向エネルギー W_z を採

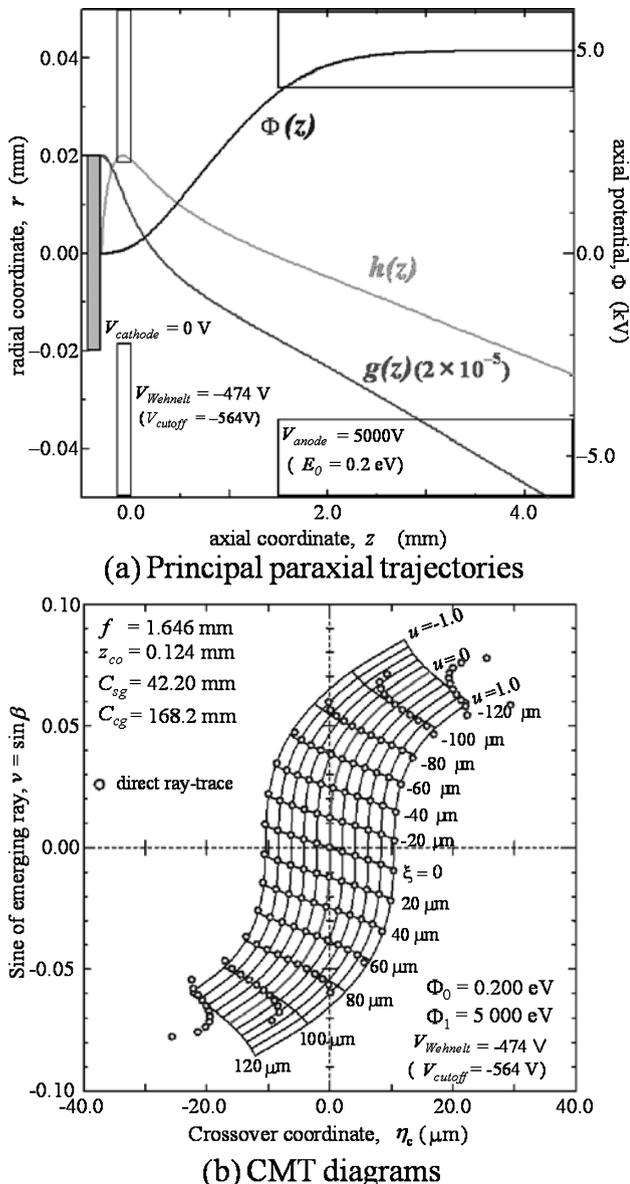


図5 一般化近軸軌道法による電子銃内軌道特性の解析例

用することを提案した（本節では電子の初期エネルギーを $\Phi(z)$ に含めない、 $\Phi_0=0$ とする）：

$$U''(z) + \frac{\Phi'(z)}{2\{\Phi(z)+W_z\}}U'(z) + \frac{\Phi''(z)}{4\{\Phi(z)+W_z\}}U(z) = 0. \quad (8)$$

陰極付近に一樣電界がかかる場合には原点から出射する近軸軌道解として次のものが得られる：

$$H(z;W_z) = \sqrt{z+(W_z/\Phi'_0)} - \sqrt{W_z/\Phi'_0} \quad (9)$$

近軸軌道解 (9) はちょうど必要な分だけ頂点が移動された放物線軌道になっていることが分かる。このため初期エネルギーに軸方向エネルギーを用いると放出角の大きな陰極軌道でもよい近似が実現できるのである。問題は近軸軌道方程式 (8) が全エネルギーではなく軸方向エネルギーを用いているため収差の計算につながらない、軌道の出射角度に近軸基本軌道 $H(z;W_z)$ が依存することである。

次に裏・鷹岡，下山らの計算法と一般化近軸軌道計算法の考え方を比較する。図7に1) 裏・鷹岡，下山ら，2) 従来型近軸軌道計算法，3) 一般化近軸軌道計算法における陰極近傍近軸軌道を比べた。第1の方法では前述したように近軸軌道で表される放物線軌道の頂点を適当量だけ移動することによって現実の陰極軌道を精度よく再現している。出射点の放出角 α および、横方向運動量 $p_t = \sqrt{2meW_z} \tan \alpha = \sqrt{2meW} \sin \alpha$ の両方を実際の軌道に合わせることができ。

従来型近軸軌道計算法では近軸軌道方程式に用いる初期エネルギーは全エネルギー W となる ((8) 式で $Wz \rightarrow W$ とする)。この近軸軌道方程式から得られる放物線軌道の頂点は $z_0 = -W/\Phi'_0$ となり実際軌道の頂点、 $z_0 = -W_z/\Phi'_0$ とずれる。このため近軸軌道の出射角度を実際の放出角 α に合わせると横方向運動量は、 $p_t = \sqrt{2meW} \tan \alpha$ となり放出角の大きな場合誤差が大きい。近軸軌道は実際軌道よりも開き具合の大きなものとなり、放出角が増大するにつれてずれは急速にひろ

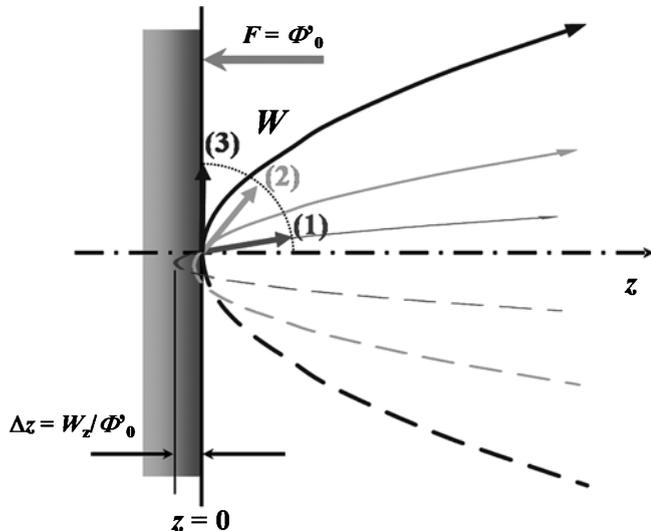


図6 陰極近傍での放物線軌道

がってしまう。

一般化された近軸軌道方程式では従来型と同じく全エネルギー W を用いる。相違点は近軸軌道の割り当ての際に初期放出角 α を合わせるのではなく、横方向運動量 p_t を合わせる点にある。つまり実際軌道のもつ横方向運動量 $p_t = \sqrt{2meW} \sin \alpha$ と同じものをもつ近軸軌道を割り当てるのである。近軸軌道の放出角は実際のものとは異なってくるが、軌道全体を見たときには実際軌道をよく近似できている。出射角度のずれは「収差」項で補償する。

このように近軸軌道の「割り当て」の際には必ずしも軌道の初期条件（出射位置と放出角度）を合わせるのではなく、全体を見比べたときに実際軌道をよく近似できる近軸軌道を選ぶ方が有利である、というのが一般化近軸軌道計算法の考え方である。摂動特性関数を用いた収差計算法（変分法）では、摂動軌道（収差まで考慮した際に得られる軌道）は必ずしも近軸軌道と同一の初期条件を持つ必要はなく、近軸軌道の割り当ての際により大きな自由度を与える数学的表式となっている⁸⁾。

5. G-optk プログラム

一般化近軸軌道計算法をベースに電子銃特性解析ソフト *G-optk*（ジー・オプティック）を開発した。図8にプログラムのユーザーインターフェースを示す。インターフェースは「計算条件指定」「近軸基本軌道表示」「CMT ダイアグラム表示」の3つのウィンドウから構成される。軸上ポテンシャル・ファイル（計算には別途電磁界計算ソフトが必要）を指定し、その配置や実際の印加電圧を入力し、陰極面の位置、初期エネルギーを与えてプログラムを実行すると、軸上電位分布、近軸基本軌道が「近軸基本軌道表示」ウィンドウに、またCMT ダイアグラムが「CMT ダイアグラム表示」に現れる。光学パラメータのうち主だったものは「計算条件指定」ウィンドウに表示される。

電子銃設計を行う場合、光学パラメータから (4) 式など

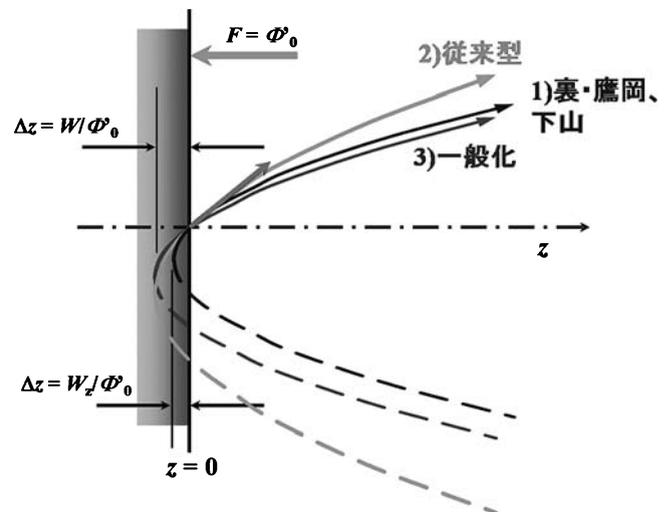


図7 近似軌道の割り当てについて

を用いて電子源特性を計算する必要がある。例えばクロスオーバー径をウェネルト電圧の関数として求めたいときなどがこれに当たる。*G-optk* プログラムは一連の光学パラメータ計算結果を csv ファイルに保存することができる。Excel などの表計算ソフトを使って簡単な後処理をすれば所望の結果を得ることができる (図 9 参照)。

近似軌道計算法との相性から *G-optk* プログラムの解析対象は当初は平面陰極電子銃に限定されていた。しかしその後の考察によってポイント型陰極など凸曲面陰極を持ったエミッターにも本手法は適用可能であることが分かった¹¹⁾。また評価面をクロスオーバー面から像面に切り替えるだけで Low Energy Electron Microscope など陰極レンズの結像特性の解析を行うこともできる¹²⁾。現在、これらの機能拡張を順次、行っている。

6. まとめ

近軸軌道計算法を拡張し陰極面から光軸と大きな初期角度を持って出射される電子銃内軌道の解析を可能とした。一般化を可能にしたキーポイントは軌道傾斜の指定に \tan の代わりに \sin を用いるようにした点にある。新しい軌道パラメータを使うことによって、陰極面での軌道初期条件 (軌道変位と傾斜) とクロスオーバー面での軌道条件を 3 次多項式による写像で精度よく関係づけられることが分かった。3 次多項式の係数は近軸軌道方程式ならびに取差積分法によって求めることができる。係数のうちいくつかは電子銃特性の把握に有用な“光学パラメータ”として使用することができる。このうち 1 次特性として得られる“電子銃焦点距離”は特に重要で、電子源のクロスオーバー径や電流角密度の評価に用いることができる。

一般化近軸軌道計算法で傾斜角の大きな軌道に対応できる理由を考察した。陰極面近傍の電子軌道は放物線となるが出射時の軸方向運動量に依存してその頂点位置が移動する。しかしながら従来の近軸軌道方程式の解は頂点移動を再現できない。一般化近軸軌道計算法では実際軌道と出射角度は異なるが横方向運動量が等しい放物線軌道を対応させることで、傾斜角が大きな場合でも実際軌道により近い近軸軌道の割り当てを実現している。

一般化近軸軌道計算法に基づいて電子銃特性解析ソフト *G-optk* (ジー・オプティック) を開発した。プログラムは軸上電位・磁束密度分布から近軸基本軌道および種々の光学パラメータの計算を行うことができる。電子銃筒設計者が電子銃の物理的イメージをこれまでになく明快かつ迅速に把握するためのツールとして活用できる。

謝 辞

本講座で紹介した一連の研究は名城大学・下山宏教授、大江俊美教授との共同で行われた。また第 4 節に展開された議論は大阪大学の裏克己名誉教授とのディスカッションにより発想されたものである。*G-optk* プログラムの開発は島津製作

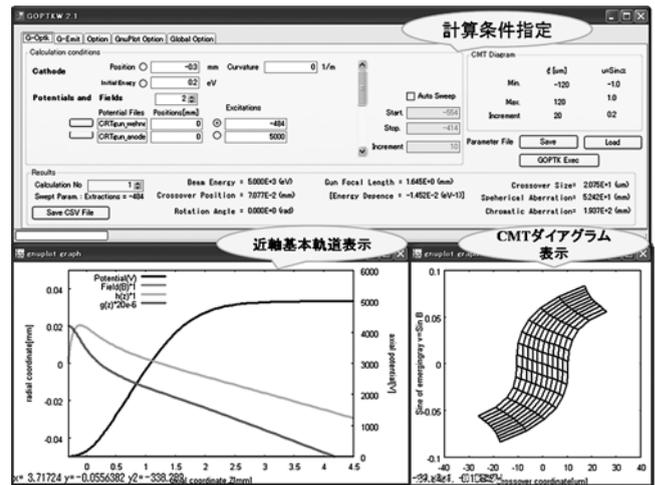


図 8 *G-optk* プログラムのユーザーインターフェース

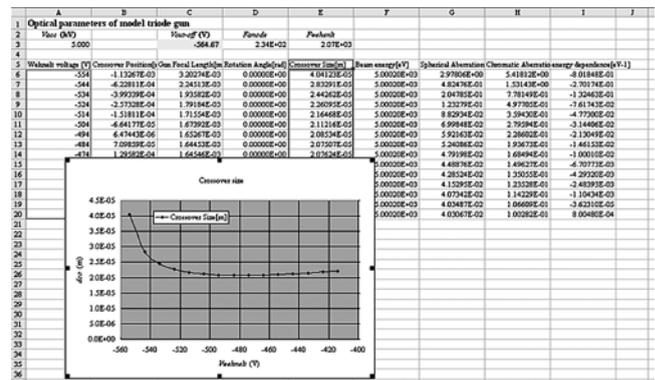


図 9 csv 出力ファイルを使ったデータの後処理例

所・竹部雅弘氏、潮互氏のご協力のもと行われた。ここに感謝いたします。

文 献

- 1) MEBS programs, “<http://www.mebs.co.uk/>.”
- 2) SPOC programs, “<http://www.lencova.cz/>.”
- 3) Fujita, S. and Shimoyama, H.: *J. Electron Microsc.*, **54**, 331–343 (2005)
- 4) Fujita, S. and Shimoyama, H.: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24**, 1891–1901 (2006)
- 5) Fujita, S., Takebe, M. and Shimoyama, H.: *Physics Procedia*, **1**, 13–33 (2008)
- 6) 裏 克己: ナノ電子光学, 共立出版, 東京, 232 (2005)
- 7) 藤田 真: 島津評論, **60**, 69–86 (2003)
- 8) Fujita, S., Takebe, M., Ushio, W. and Shimoyama, H.: *J. Electron Microsc.*, **59**, 3–15 (2010)
- 9) Takaoka, A. and Ura, K.: *Optik*, **68**, 107 (1984)
- 10) 鈴木正彦, 森村良夫, 下山 宏, 丸勢 進: 日本電子顕微鏡学会 第 38 回学術講演会予稿集, 103 (1982)
- 11) Fujita, S., Takebe, M. and Ohye, T.: *J. Electron Microsc.*, **59**(5): 351–358 (2010)
- 12) Nagasao, K., Takebe, M., Ushio, W., Fujita, S., Ohye, T. and Shimoyama, H.: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, doi:10.1016/j.nima.2010.12.140. (2011)