

電子衝撃加熱型電子銃の電位分布と衝撃電子軌道

飯吉 僚*・日置 伸一*・竹松 英夫

Potential Distribution and Bombarding Electron Trajectory in an Electron-Heated Point Cathode Gun

Ryo HIYOSHI*, Shin-ichi HIOKI* and Hideo TAKEMATSU*

環状ウェーネルトを備えた電子衝撃加熱型電子銃において、電極形状が衝撃電子軌道に与える効果を明らかにするために、電子銃内の電位分布と衝撃電子軌道の電算機計算を行なった。その結果、環状ウェーネルトの開口部の形状が重要になることがわかった。計算に使用した一連のプログラムは、この電子銃の電子光学的諸特性を解析するために有用で、これによって電極を設計する際の指針を得ることができる。

1. まえがき

電子顕微鏡などの電子ビーム応用機器に用いられている電子銃は、最近装置の高性能化が進むにともない、高輝度をもつものが望まれるようになってきた。ここで言う輝度とは、単位立体角あたりの電子流密度で定義される電子光学的輝度である。普通陰極にはタングステン・ヘアピン陰極が使用されている。これを高温に加熱することによって輝度を増加させることができるはずであるが、陰極前面に形成される空間電荷の影響によって、輝度は強い制限を受ける。さらに高温動作ではヘアピン・フィラメント材料自体の蒸発が増加して、陰極寿命が著しく短くなってしまふ。直径0.1 mmのタングステン・フィラメントの寿命は3,000Kを越えたあたりで1時間以下となる¹⁾

鋭い針状の先端をもつポイント陰極は、空間電荷の影響がないという良い特性²⁾をもっているが、ヘアピン・フィラメントで支持され加熱されているので、同一陰極温度においては寿命の点で劣ることになる。

このようなことから、ヘアピン・フィラメントによらないで、ポイント陰極の先端部を加熱する方法を採用して高温動作を実現し、高輝度を達成しようとする試みがなされている。K.D.Van der Mast³⁾や内川⁴⁾は、レーザー光による加熱を採用した電子銃の実験を行なっているが、我々は経済的に優位であるという見地から、電子衝撃加熱を採用した電子銃の開発研究を進めている。

これまで実験によって、電子衝撃で加熱された陰極先

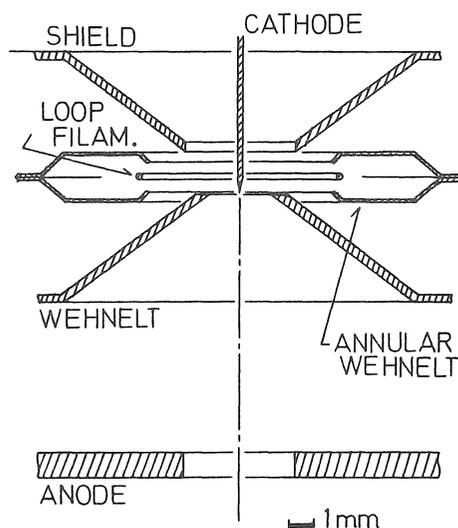


図1 電子衝撃加熱型電子銃

ループ・フィラメント、環状ウェーネルト、シールド及びウェーネルト電極が環状電子銃を構成している。ループ・フィラメントを放出した電子は、環状電子銃により中心に向けて加速され、陰極先端部を電子衝撃で加熱する。衝撃電子のエネルギーは4 keVである。

端から放出電子ビームが得られたことや、衝撃加熱のために環状電子銃を用いれば性能向上ができることなどを明らかにしてきた⁵⁾

* 電子工学科

この電子銃は、図1に示すようにポイント陰極、陽極、ウェネルトからなる3電極電子銃の内部に、陰極先端部を電子衝撃で加熱するための環状電子銃を配置した構造で、各電極は光軸に対して回転対称の形状である。ループ・フィラメント、環状ウェネルト、シールドとウェネルト電極が環状電子銃を構成しており、シールドとウェネルトに対して負の電位を印加したループ・フィラメントを通電加熱して、放出した電子を中心にに向けて加速し、電子衝撃によって陰極先端部を高温度に加熱する方法を採用している。環状ウェネルトにはループ・フィラメントよりさらに負のバイアス電圧が印加され、このバイアス電圧によって衝撃電子軌道の拡がり調整している。従って、電子が陰極を衝撃する位置を求めることが重要となるが、図からわかるようにループ・フィラメント直径が8mmと小さいこともあって、これを実験によって正確に求めることは困難である。このため電子銃内の電位分布と衝撃電子軌道の電算機シミュレーションを行なった。

衝撃電子加速電圧、環状ウェネルト・バイアス電圧、陽極電圧などが変化した場合に、衝撃電子の軌道がどのような変化を受けるかを知ることも実験上必要となるため、規格化した電位分布をSOR(Successive Over Relaxation)法によって計算した後、ループ・フィラメントから十分な衝撃電子が放出でき、また加熱された陰極先端部からも同時に電子放出可能な電位分布を求めた。任意の初期条件のもとで電子軌道を計算できるETCプログラムを開発し、これを用いて衝撃電子軌道の計算を行なった。

その結果、環状ウェネルト開口部の形状は、衝撃電

子軌道に大きな影響を与えることが明らかとなった。得られた結果は実験との対応が良く、この種の実験の検討を進める上で有益なものであることがわかった。ここで用いた一連のプログラムは、回転対称の電極からなる系の電子光学的諸特性を明らかにし、電極形状がもたらす効果を示すことができるため、これによって電極を設計する際に必要となる指針を得ることができる。

2. 電子銃内の電位分布

前述のように電子衝撃加熱型電子銃では、衝撃電子が放出でき、ポイント陰極先端部からも電子放出が可能な電位分布を求めることが必要である。また衝撃加速電圧が変化したり、各電極の電位が変化したとき、電位分布にどのような変化が生じるかを知ることも重要である。この観点から電子銃の電位分布を次の方法で求めた。

他の電極とは独立した電位で動作する電極を電位1[V]とし、他は全て0[V]とした場合の規格化した電位分布を、ラプラス方程式 $\nabla^2 V=0$ の差分型を用いてSOR法で計算した。常に陰極は0[V]とおき、シールド電極はウェネルト電極と同電位となることから、このようにして4つの規格化した電位分布の計算を行なった。既に述べたように系は回転対称であるので、円筒座標系の r および z 方向のみの差分方程式を用い、電極形状はSOR法で導入される格子点のうち電極近傍に位置する点で近似した。

計算領域を図2に示す。始めに 31×81 の2次元配列を使って 0.4×0.4 (mm²)メッシュで領域1について、次にメッシュ・サイズを 0.2×0.2 (mm²)にして領域2の規格化した電位分布を計算した。さらに領域3に対して

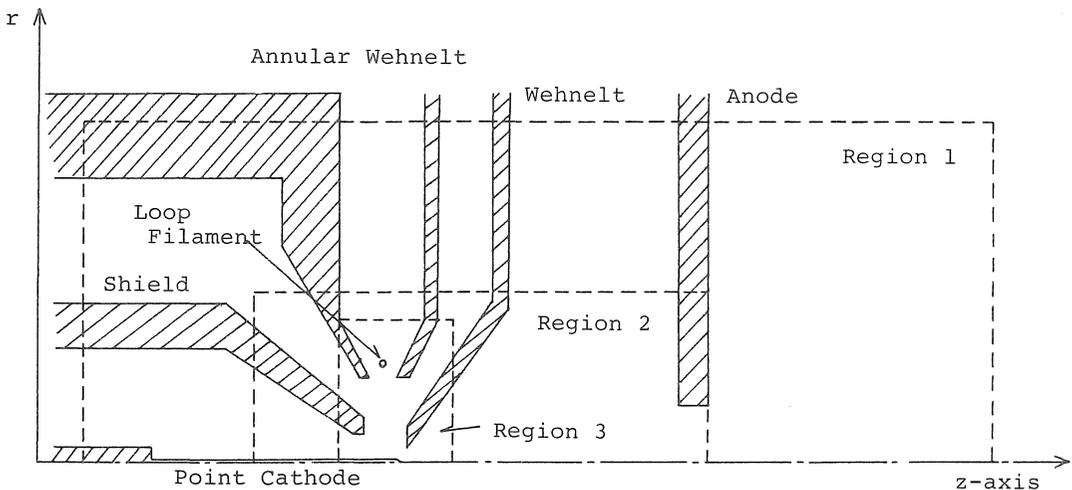


図2 電位分布の計算領域の一例

破線で示した3つの領域について順次計算を行なって、環状電子銃部の電位分布を求め、これをもとに衝撃電子軌道計算が進められる。

は、 0.1×0.1 (mm²) メッシュで 51×41 の配列を用いて計算を行なった。

これらの計算に必要な境界条件は、領域1では次式をもちいた。

$$V(r) = V(r_1) + [V(r_2) - V(r_1)] \ln(r/r_1) / \ln(r_2/r_1) \quad (r \text{ 方向}) \quad (1)$$

$$V(z) = V(z_1) + [V(z_2) - V(z_1)](z - z_1) / (z_2 - z_1) \quad (z \text{ 方向}) \quad (2)$$

ここで r_1, r_2, z_1, z_2 は電極表面の座標である。また領域2の境界条件には領域1の計算結果を、領域3に対しては領域2の結果をそれぞれ用いて計算を行なった。

このようにして各領域に対して得られた4つの規格化された電位分布を、1 [V] とおいた電極を添字に示して、 $V_a(r, z), V_{ws}(r, z), V_{aw}(r, z), V_l(r, z)$ とすると (a; 陽極, ws; シールドとウェーネルト電極, aw; 環状ウェーネルト, l; ループ・フィラメント)、それぞれの領域における電位分布 $V(r, z)$ は次式で与えられる。

$$V(r, z) = \Phi_a V_a + \Phi_{ws} V_{ws} + \Phi_{aw} V_{aw} + \Phi_l V_l \quad (3)$$

ここで Φ は各電極に与える印加電圧である。

さてここで衝撃電子が放出でき、同時に陰極先端からも電子放出が可能な条件を求めよう。衝撃電子を放出するループ・フィラメント前面の格子点座標を (r_i', z_i') 、ポイント陰極先端の前面の軸上格子点座標を $(0, z_c')$ とするとき、この条件を満たすためには次の2式が同時に成立せねばならない。

$$V(r_i', z_i') > \Phi_l \quad (4)$$

$$V(0, z_c') > 0 \quad (5)$$

陽極電圧 Φ_a と衝撃電子加速電圧となる Φ_l (< 0)を決定して、(3), (4), および(5)式から環状ウェーネルト電圧 Φ_{aw} と、シールドおよびウェーネルト電圧 Φ_{ws} の下限を求めることができる。このようにして得られた各電極電位 $\Phi_a, \Phi_{ws}, \Phi_{aw}$ と Φ_l から、式(3)によって電子銃内の電位分布を合成した。

電位分布 $V(r, z)$ は格子点電位であり、2,000を越えるデータ数となるので、解析を容易にするためグラフィック・ディスプレイ上に100 [V] 間隔の等電位面を描き出して結果の表示を行なった。

計算には本学計算センター設置の電算機YHP-21MXを使用した。SOR法で規格化した電位分布を求めるために、約25分の計算時間が必要であった。電子銃内の電位分布 $V(r, z)$ の計算は数秒程度であり、この電算機システムの端末として備えられた4015グラフィック・ディスプレイへの電位分布の表示は数十秒程度で行なう

ことができるので、電極電圧をいろいろと変化したときの特性を求めるのは容易である。

3. 衝撃電子軌道

格子点上の電位として計算された電子銃内の電位分布をもとに、衝撃電子の軌道を次の方法で計算した。求める電子軌道の微小区間で、電界のr方向すなわち動径方向成分と、z方向すなわち光軸方向成分を一定とみなす⁹⁾と、Lorentz Force $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$ から、時間tをパラメーターとして次の軌道方程式を得る。

$$r(t) = r_0 + v_{r0} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot E_r \cdot t^2 \quad (6)$$

$$z(t) = z_0 + v_{z0} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot E_z \cdot t^2 \quad (7)$$

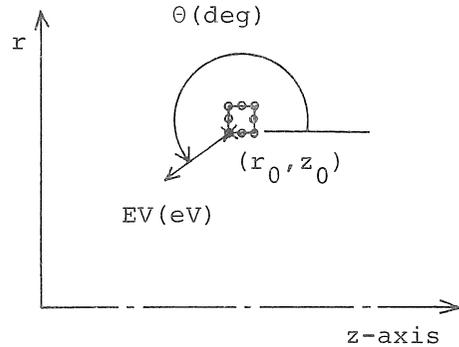


図3 電子軌道計算プログラムの初期条件
放出電子の初期座標 (r_0, z_0) 、初期エネルギー $EV[eV]$ 、光軸(z軸)に対する角度 $\theta(deg)$ を与えることで、軌道が計算される。結果は電位分布と共にディスプレイ上に表示される。

ここで r_0, z_0 は電子の初期座標、 v_{r0}, v_{z0} は初速度を示し、 E_r, E_z は微小区間内で一定とみなした電界の各方向成分でありe、mは電子の電荷と質量である。初期条件は図3に示すように、位置 (r_0, z_0) 、放出エネルギー EV [eV]と放出角 $\theta(deg)$ で与えた。このとき初速度の各方向成分は、

$$v_{r0} = v_0 \sin \theta \quad (8)$$

$$v_{z0} = v_0 \cos \theta$$

ここで

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot (e/m) \cdot EV}$$

である。

軌道計算のために必要な微小区間内の電界 E_r, E_z は、仮想メッシュの格子点上電位から求めた。仮想メッシュ

は電界計算のために導入したもので、電子の初期位置を中心にもつように選ばれている。格子点電位 $V(r, z)$ から内挿法によって仮想メッシュの格子点電位の計算を行なったが、この方法については次節で述べる。

このようにして初期条件と電界が与えられた後、電子軌道の計算を次の手順で行なう。始めに適当な微少時間 Δt を使って、各座標方向への移動距離 $\delta r, \delta z$ を求める。

$$\delta r \equiv r(\Delta t) - r_0 = v_{r0} \cdot \Delta t - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot E_r \cdot (\Delta t)^2 \quad (11)$$

$$\delta z \equiv z(\Delta t) - z_0 = v_{z0} \cdot \Delta t - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot E_z \cdot (\Delta t)^2 \quad (12)$$

得られた $\delta r, \delta z$ は電界を一定とみなす微少区間内に停まる必要があることから、 $\delta r \geq \delta z$ ならば

$$0.1 \cdot \Delta r_{im} < |\delta r| < 0.4 \cdot \Delta r_{im} \quad (13)$$

また $\delta r < \delta z$ ならば

$$0.1 \cdot \Delta z_{im} < |\delta z| < 0.4 \cdot \Delta z_{im} \quad (14)$$

を満たすまで、パラメータ Δt を変化させた。ここで $\Delta r_{im}, \Delta z_{im}$ は仮想メッシュの格子点間距離である。下限 $0.1 \cdot \Delta r_{im}, 0.1 \cdot \Delta z_{im}$ は軌道計算が長時間にならないように設けた。

(13)あるいは(14)式が満足されると、移動した後の電子の位置と速度は次式となる。

$$r(\Delta t) = r_0 + \delta r \quad (15)$$

$$z(\Delta t) = z_0 + \delta z \quad (16)$$

$$v_r(\Delta t) = v_{r0} - \frac{e}{m} \cdot E_r \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$v_z(\Delta t) = v_{z0} - \frac{e}{m} \cdot E_z \cdot \Delta t \quad (18)$$

こうして得られた位置と速度を新たに初期条件とみなして、新たな仮想メッシュから電界計算を行なって、(11)~(18)式の計算を繰り返すことで $\sum \delta r, \sum \delta z$ から全軌道を求めることができる。

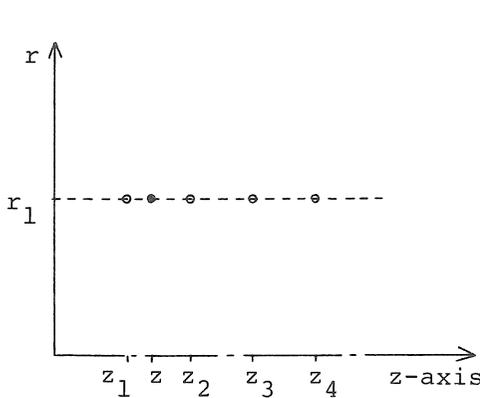
ここで述べた電子軌道計算法は、仮想メッシュのサイズ $\Delta r_{im}, \Delta z_{im}$ を小さくすれば、電界を一定とみなすことのできる微少区間を任意に小さくすることができる。

4. 電界計算

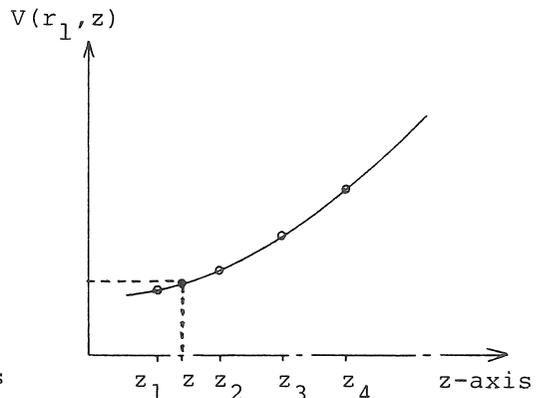
電子軌道を求めるために必要となる電界の各方向成分 E_r, E_z の計算法について述べる。微少区間内で電界を一定とみなす軌道計算法では、これまで SOR 法で電位分布を計算するために導入したメッシュの格子点電位から電界計算を行なっていた⁹⁾。しかしこの方法によると、電子の移動にともなってどのメッシュで電界計算を行なうかの判断が必要で、電子軌道が大きく変化するような計算はこの判別が複雑なものとなる。又時間の計算と各方向への移動時間の判別も必要なことから、電子が電極に到達した場合や、電界が極めて小さな場を移動する場合にも数値計算上の問題が生ずる。

このようなことから、電界計算のために仮想メッシュ法を導入した。この方法は電子の初期位置を中心とする仮想メッシュを考えて、この格子点上の電位から電界計算を行なうものである。仮想メッシュの格子点上電位は、電子銃内の電位分布 $V(r, z)$ から Newton の内挿法によって計算した。

z 軸に平行な格子上の電位 $V(r_{-const}, z)$ は、図 4 に示すように Newton の 3 次内挿公式を用いれば、 $z_1 \sim z_4$ の 4 点の電位によって次式で与えられる。



(a)



(b)

図 4 Newton の 3 次内挿法による電位計算

- (a) 既知の電位をもつ格子点 (○) の座標と内挿を受ける格子点 (●) の座標。
 (b) $r = r_1(\text{const})$ での 3 次内挿法による $V(r_1, z)$ の算出。

$$V(r_1, z) = V(r_1, z_1) + s \cdot V^{(1)}(r_1, z_1) + \frac{s \cdot (s-1)}{2!} V^{(2)}(r_1, z_1) + \frac{s \cdot (s-1) \cdot (s-2)}{3!} \cdot V^{(3)}(r_1, z_1) \quad (19)$$

$$\text{ここで } V^{(1)}(r_1, z_1) = V(r_1, z_2) - V(r_1, z_1) \quad (20)$$

$$V^{(2)}(r_1, z_1) = V(r_1, z_3) - 2 \cdot V(r_1, z_2) + V(r_1, z_1) \quad (21)$$

$$V^{(3)}(r_1, z_1) = V(r_1, z_4) - 3 \cdot V(r_1, z_3) + 3 \cdot V(r_1, z_2) - V(r_1, z_1) \quad (22)$$

$$s = \frac{z - z_1}{\Delta z} \quad (23)$$

である。

仮想メッシュの格子点は一般に格子上に位置しないので、この電位計算は次の手順で行なう。まず始めに図5に示すように、電子の初期位置から仮想格子点座標を求める。P₁点の電位は、(19)式を用いて1~4の内挿からQ₁~Q₄の電位を計算した後、r方向についてQ₁~Q₄をさらに内挿して得られる。この内挿法では、始点（前進公式である(19)式ではz₁）の近傍で誤差が最小となることから、計算に用いる4×4の格子点の選択には充分注意を払った。また図5(a)で○印で示した格子点のうち周辺部の1つが電極となる場合には、前進公式か後退公式のいずれか一方を用いて内挿を行なった。ここで式は示さない

が、後退公式では内挿に用いる終点座標近傍で誤差が最小となるからである。同様に、P₂, P₃, P₄点の電位を求めれば、これら仮想メッシュの格子点上電位から電子の初期位置の電界各方向成分は次式で与えられる。

$$E_r = -\frac{1}{2\Delta r} (V_{P1} - V_{P2} + V_{P4} - V_{P3}) \quad (24)$$

$$E_z = -\frac{1}{2\Delta z} (V_{P4} - V_{P1} + V_{P3} - V_{P2}) \quad (25)$$

4×4の格子点内に電極が入り込むと、電位分布V(r, z)は電極表面で不連続となる。従って、このときにも3次の内挿法を適用してしまうと大きな誤差が生じることがわかったので、この場合には1次の内挿を行なった（図6）。P₁の電位は、これをとりかこむ4つの格子点の電位と、格子からの距離ΔΔr, ΔΔzで与えることができる。

$$V_{P1} = \left(V_1 \cdot \frac{\Delta \Delta z}{\Delta z} + V_2 \cdot \frac{\Delta z - \Delta \Delta z}{\Delta z} \right) \cdot \frac{\Delta r - \Delta \Delta r}{\Delta r} + \left(V_4 \cdot \frac{\Delta \Delta z}{\Delta z} + V_3 \cdot \frac{\Delta z - \Delta \Delta z}{\Delta z} \right) \cdot \frac{\Delta \Delta r}{\Delta r} \quad (26)$$

P₂, P₃, P₄についても上式によって電位を計算し、(24), (25)式で電界を求めた。

衝撃電子はループ・フィラメントから放出されるので、放出位置でとられた仮想メッシュ内にはこの電極の一部が必ず含まれることになる。従ってこの場合には、1次内挿公式(26)によって仮想メッシュの各格子点上電位を計算した後、電極部分を仮想メッシュから除外した領域

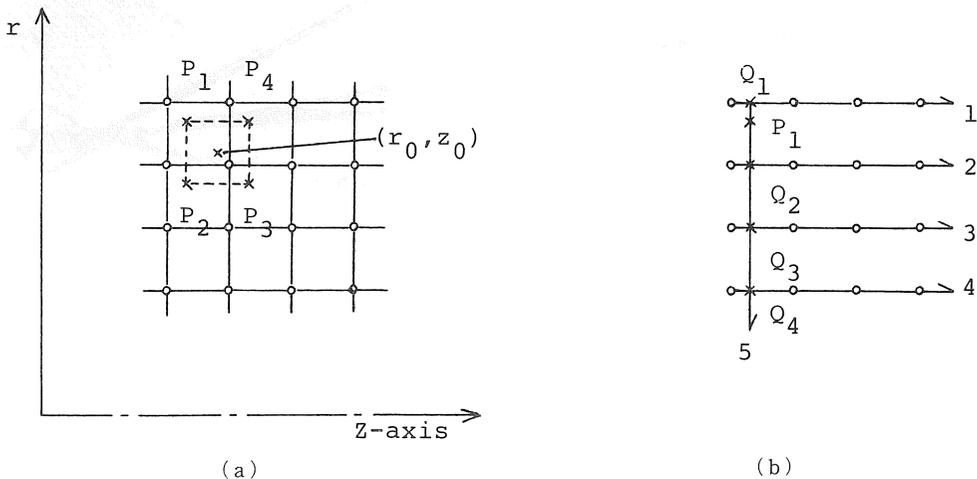


図5 仮想メッシュ（破線）座標と内挿方法

- (a) 電子の初期位置 (r_0, z_0) と、これを中心とした仮想メッシュ。既知の電位をもつ格子点 (○) から仮想メッシュ格子点 (×) 上電位が内挿される。
- (b) 仮想メッシュ格子点 P₁ と、この電位を計算するために用いられる格子点 (○)。矢印と番号は内挿の順序を示す。

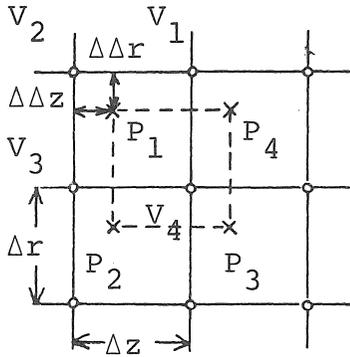
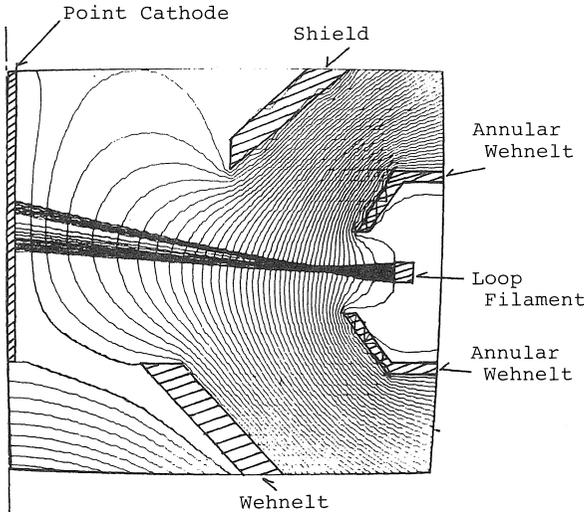


図6 仮想メッシュ(破線)と1次内挿法
仮想メッシュ格子点 P_1 上の電位を
求めるために用いられる格子点と、その
電位 $V_1 \sim V_4$ を示す。電極表面での電
位の不連続性によって3次内挿法が適
用されない場合に用いられる。

から電界計算を行なった。

5. 計算結果と考察

前節で述べた計算方法によって得られた電子銃内の電



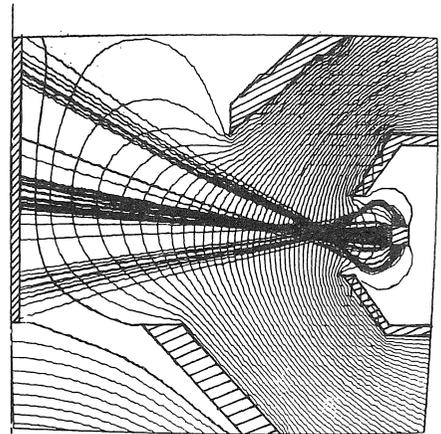
Loop Filament ; -4kV
Annular Wehnelt ; -4.1kV
Wehnelt, Shield ; -200V
Anode ; 30kV

図7 電子衝撃加熱型電子銃内の電位分布
と衝撃電子軌道

図1に示した電子銃の検討結果で陰極
先端に0 [V]の等電位面が入り込んで
おり、ここからも電子放出が可能な
状態であることを示している。

位分布と衝撃電子軌道の計算結果の一例を図7に示す。
衝撃電子加速電圧4 [kV]、環状ウェーネルト・バイア
ス電圧-100 [V]で、ウェーネルト・バイアス電圧-
200 [V]、陽極電圧30 [kV]の場合である。電位分布
は100 [V]間隔の等電位面で表わした。得られた結果
は、このような電極形状のもとでは衝撃電子がやや上向
きの軌道をとることを示している。これは環状ウェーネ
ルトの陰極に対向する部分が、上部と下部とで形状が少
し異なっており、この影響で等電位面が光軸に対して、
やや傾きをもったためであることがわかる。電子軌道は、
式(1)(2)からもわかるように、速度が低いときには電界
による効果が支配的となる。従って、衝撃電子は放出直後
で、環状ウェーネルト電極の形状に強く依存した電場の
影響を受けて、軌道を上向きにとったものと考えられる。

環状ウェーネルト・バイアス電圧が小さくなった場合
の計算結果を図8に示す。これはループ・フィラメント
の衝撃電子放出面を広くして、加熱に用いる衝撃電子量
をこのバイアス電圧で増加させた場合に対応している。
ループ・フィラメントの陰極に向かい合う面から放し
た衝撃電子軌道にはほとんど変化はないが、これ以外の
面から放出した電子は環状ウェーネルト内部の電場の影
響を受けて大きく軌道を変え、クロス・オーバーを作
った後、発散している。これは衝撃電子の加速場内で、等
電位面が陰極に向って凸型となっており、ここで発散電界



Loop Filament ; -4kV
Annular Wehnelt ; -4.02kV
Wehnelt, Shield ; -200V
Anode ; 30kV

図8 環状ウェーネルト・バイアスが小さ
くなった場合の電位分布と衝撃電子
軌道

が形成されているためである。このような効果をさらに詳しく調べるために環状ウェネルトの形状だけを変えた場合について計算を行なった。

ポイント陰極に向けて突出した環状ウェネルトの上部と下部を光軸と平行にした場合には、環状ウェネルト付近に光軸とほぼ平行な等電位面が形成されて、陰極に対向したループ・フィラメント表面から放出した電子が、陰極表面にほぼ垂直に衝撃するようになることがわかった。又、上部と下部電極の差が0.2mmに増加したときには、平行な場合と比較して衝撃位置が0.5mm程度、上方に移動することも明らかになった。これらの形状においても、衝撃加熱される領域が環状ウェネルト・バイアス電圧が小さいときに大きく広がってしまうことは、図8に示した結果と同様であった。

このように環状ウェネルト電極の形状が重要となることが明らかになったので、次の改良を行なった。ループ・フィラメントの衝撃電子放出面の前方に形成される発散電界の効果を減少させるために、環状ウェネルト

の陰極に対向する面を平坦な形状にし、シールドやウェネルト電極の形状も電位分布が陰極へ向って大きくはみ出るのを防ぐように修正した場合の計算結果を図9と図10に示す。衝撃加速電圧と環状ウェネルト・バイアス電圧は図7、8に示した値とそれぞれ同じである。環状ウェネルト電極の形状の改良によって、この前面に光軸とほぼ平行な等電位面ができ、発散電界は前の形状と比較して小さくなっていることがわかる。図9を図7に示した結果と比較すると、衝撃位置は先端部に近づいていて、環状ウェネルトとループ・フィラメントを下部へわずかに移動できれば、さらに先端部の加熱もできることがわかる。環状ウェネルト・バイアス電圧が小さいとき（図10に示す）には前の電子銃との差は特に大きく、衝撃領域が $\frac{1}{2}$ 以下に減少しており、陰極先端部の衝撃加熱領域が環状ウェネルト・バイアス電圧にほとんど依存しない特性をもち、効率良く陰極が加熱できることを示している。

計算結果と検討を基に電極形状に改良を加えた電子銃を図11に示した。この電子銃で実験を行なった結果、環状電子銃の特性が改善されて、陰極先端部を3,000 K以上の高温に電子衝撃加熱しながら電子ビームを得るこ

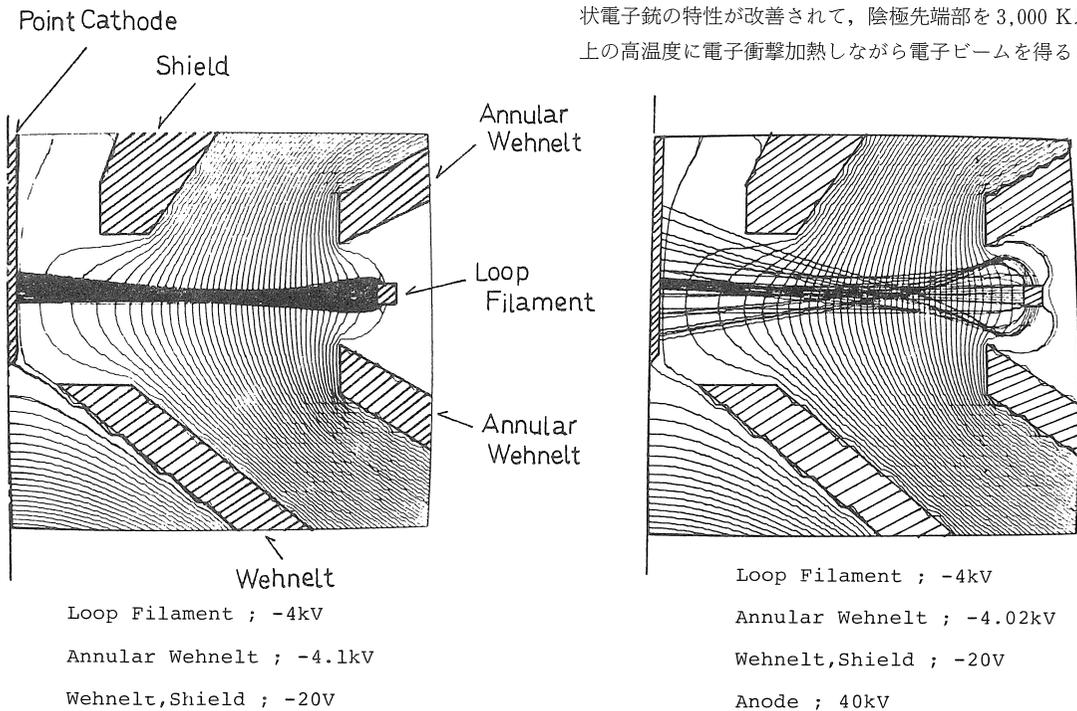


図9 改良された電子銃内の電位分布と衝撃電子軌道

環状ウェネルトの陰極に対向する面を一部平坦な形状とし、シールドやウェネルトも改良を加えた場合の結果を示す。

図10 環状ウェネルト・バイアスが小さくなった場合の電位分布と衝撃電子軌道

図8と比較すると、改良によって陰極での衝撃領域が $\frac{1}{2}$ 以下になっており、効率の良い加熱が実現できることを示している。

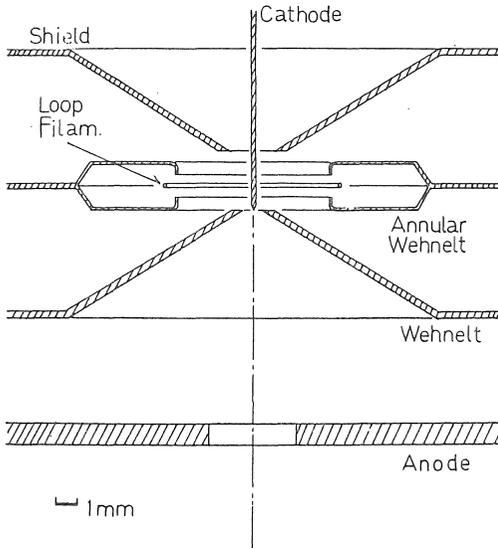


図11 計算結果をもとに改良された電子銃

とができた⁵⁾。さらに図1に示した電子銃では得られなかった3,600 K以上の高温度も比較的容易に実現できる特性をもつことが実験によって明らかになった。

6. むすび

電子衝撃加熱型電子銃の検討を行なうために、電子銃内の電位分布と衝撃電子軌道の電算機計算を行なった。SOR法によって電位分布を求めた後、開発した電子軌道計算プログラムを用いて衝撃電子軌道を計算して、この電子銃内に配置された環状電子銃の特性を調べた。実際に実験を行なった電子銃を含む、いくつかの電極形状についての計算結果から、環状ウェーネルト電極の形状が重要となることが明らかとなった。これらの検討をもとに改良した電子銃の計算を行ない、さらに実験も行なって、電子衝撃加熱効率の高い電子銃を実現することができた。ここで述べた計算方法は近似的方法であるが、回転対称の電子光学系の諸特性を明らかにでき、電子銃の電極を設計する際の指針を与えることができる。

本報告では、ループ・フィラメントを通電加熱する際に生じる磁界による影響は考慮しなかった。環状電流による磁場が衝撃電子軌道に与える効果は、ループ・フィラメントを含み光軸と垂直に交わる平面内で大きくなると考えられるので、今後 $r-\theta$ 平面内での衝撃電子軌道についても検討を進めて行きたい。

本研究を進めるにあたり、当初より有益な多くの御助言をいただいた名古屋大学工学部丸勢進教授に深く感謝いたします。また日頃より多くの御示唆をいただいている本学計算センター皆福正彦氏および本学科諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Bloomer R.N. : Proc. Int. Elect. Engrs. 104, Part B 153-157, 1957
- 2) Ohshita A. Shimoyama H. and Maruse S. : J. Electron Microsc. 27, 253-257, 1978
- 3) Van der Mast K.D. : Dissert. Delft Univ. Tech. Delft Netherland, 1975
- 4) 内川嘉樹, 尾崎一幸, 大下昭憲, 丸勢進, : 日本電子顕微鏡学会第34回学術講演会予稿集 191, 1978
- 5) 飯吉僚, 竹松英夫, 丸勢進: 日本電子顕微鏡学会第34回学術講演会予稿集 189, 1978
- 6) 竹松英夫: 愛知工業大学研究報告 第1号 15-24, 1965