

## 3D ELECTROMAGNETIC FIELD AND ELECTRON BEAM TRAJECTORY SIMULATION AND ANALYSIS CONSIDERING GRID GEOMETRY OF TRIODE TYPE ELECTRON GUN

Koichi Kanno<sup>1</sup>, Eiji Tanabe

AET Inc.

2-7-6 Kurigi, Asaoku, Kawasaki-City, 215-0033

### Abstract

A grid-cathode assembly with mesh grid is simulated using the three-dimensional electromagnetic field and charged particle trajectory code "PARTICLE STUDIO". Since this simulation is performed about fairly closely to real electrode shape, it is possible to examine the lens effect of mesh grid. The effect of mesh grid on electron beam emittance and transparency is studied.

### グリッド形状を考慮した三極管型電子銃の 3次元電磁場・電子軌道シミュレーションと解析

#### 1. はじめに

加速器で使用される電子銃は、放出ビームを制御するため三極管型が多く、特に網目状のメッシュグリッドが使用される。このメッシュサイズは陰極径に対して十分小さく設計されているが、ビーム軌道の上に張られているのでビームへの影響は完全には避けられない。この影響に関して、空間電荷を考慮しない電位分布の理論解析<sup>[1-3]</sup>や2次元シミュレーションによって議論されている。しかし、これらはいずれも極めて簡易的なモデルで、実際のモデルに対して解決することは現実には困難であった。一方、最近ではPC及びシミュレーターへの高性能化により3次元解析が容易かつ現実的となった。

ここではメッシュグリッドを用いたグリッド-カソードアセンブリの3次元シミュレーションをし、推定できるメッシュグリッドを通過するビームの挙動を明らかにする。

#### 2. メッシュグリッド電子銃

三極管型電子銃のグリッドの機能は

- ①ビームのON/OFF、
- ②ビーム電流の制御、
- ③パルスビームの生成、

があげられる。しかし、グリッドを設置しても加速電場の浸み出しがあり、ビームへの影響（レンズ効果）が生じる。この効果を積極的に利用した装置が静電レンズであるが、グリッド-カソードアセンブリではビームに悪影響を及ぼし、設計においてはできる限り抑えなければならない。メッシュグリッドでは単孔状のアパーチャグリッドに比べ、理想的な（平らな）ポテンシャル面ができ、ラミナービームを得やすい。しかし、実際にはメッシュが有

限のメッシュ線幅を持っているので、ビームをかく乱してしまう<sup>[4]</sup>。また、グリッドに電子が衝突するため、ビーム電流が制限される。このビームの透過率（Transparency）、すなわち陰極からの放出電流に対するビーム電流はメッシュの開口率でほぼ決まる。従って、開口率を上げると透過率が大きくできるが、理想的なポテンシャル面がくずれ、ビームの質が劣化する。実際の電子銃設計においてはこのメッシュの影響は殆ど考慮されず、2次元シミュレーションにおいては一般にはグリッドを無視し、二極管と仮定していた。しかし、メッシュグリッドがビームに与える影響を把握するためには、3次元シミュレーションの実施が必要である。

#### 3. 3次元電子軌道シミュレーション

シミュレーションは理論と実験にならぶ非常に重要な科学及び技術の手法である。設計や現象解析のみならず、新規アイデアの検証、実測が困難な現象の可視化などにも非常に有効かつ強力な手段である。

最近では汎用シミュレーターの高性能化とPCのハイスペック化によりますますシミュレーションの実用性が高まっている。特に多くのメモリを必要とする3次元荷電粒子軌道解析の実用性が高まっている。ドイツCST社では3次元荷電粒子軌道解析コードPARTICLE STUDIOを実現している。PARTICLE STUDIOは、長年におけるMAFIA TSソルバの開発で培ったノウハウを基にした新世代3次元荷電粒子軌道解析コードである。既に国内外で多く利用されているMW STUDIO/EM STUDIOと共にCST STUDIO SUITEを構成している。本コードによって電界電子放出、二次電子放出、ウェークフィールドの計算も可能で、マイクロ波管、X線管、FEA、加速器、集束電磁石、偏向電磁石、ビームモニター等の高精度解析ができる。

<sup>1</sup> E-mail: kanno@aetjapan.com

## 4. メッシュグリッドアセンブリのシミュレーション

### 4.1 シミュレーションモデル

一般的な加速器用メッシュ型グリッド-カソードアセンブリをモデルとした。図1にシミュレーションしたグリッドアセンブリのモデル形状を、表1にシミュレーション仕様を示す。

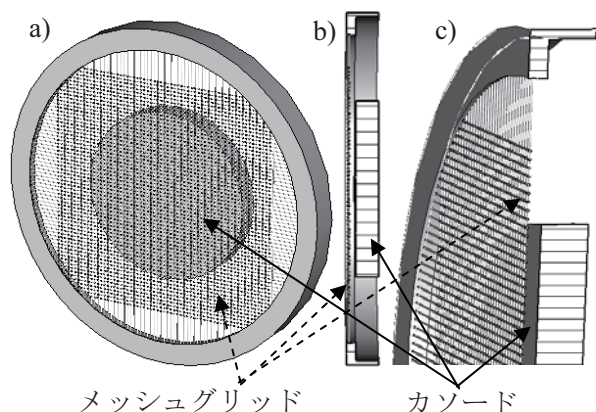


図1：メッシュ型グリッド-カソードアセンブリの3次元シミュレーションモデル。a)全体形状、b)横断面図、c)カソード-グリッド間ギャップの拡大図

表1. シミュレーション仕様

カソード径	2R	8.0	mm
カソード-グリッド間電圧	$V_g$	100	V
カソード-グリッド間距離	$D_{cg}$	0.3	mm
メッシュグリッドタイプ		丸棒格子	
メッシュ線幅	$L_w$	0.05	mm
メッシュ線距離	$L_s$	0.175	mm
透過率		51	%
加速電圧	$V_{acc}$	100	kV
カソード-アノード間距離	$D_{ca}$	25	mm

実際には加速電圧が影響するのでシミュレーションでも考慮する。ここでは、カソード-アノード間距離と加速電圧から推定できる仮想アノードを設定する。カソード-アノード間を25mmと仮定すると、100kVの加速電圧では平行平板で考えると生じる電場は4MV/m(100kV/25mm)になる。しかし、一般的な電子銃をEGUNで計算したところ、ウェーネルトの影響でカソード表面は2.7MV/m程度と低い。これはウェーネルトのエッジでも放電をさけ、結果としてカソード表面での電場が低くなるためである。そこで、本シミュレーションではこれを反映させるためにカソードから6mmの距離に16kVの仮想アノードを設定した。ただし、ウェーネルトによる等電位面の歪みは考慮せず平行平板と考えた。透過率はグリッド全面積に占めるメッシュ線がカソードに向かう面の面積から求める一般的な方法で算出した値である。

### 4.2 シミュレーション結果

シミュレーション実行結果を以下に示す。エミッタンスはrmsエミッタンスで示す。透過率は表1とほぼ一致している。放出電流からビーム電流を差し引いた電流0.778Aはグリッドに衝突し消滅した。

放出電流： 1.594A  
ビーム電流： 0.8161A  
透過率： 51.2%  
エミッタンス：  $20.67 \times 10^{-6} \text{m}$   
規格化エミッタンス：  
 $1.315 \times 10^{-6} \text{m}$

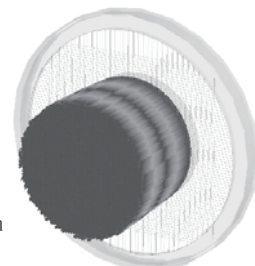


図2：3次元電子軌道シミュレーション結果。 $V_{acc}=100\text{kV}$ 、 $V_g=100\text{V}$ 。

### 4.3 加速電圧依存

前節と $V_{acc}=25\text{kV}$ での結果を比較した。 $V_g$ は同じ100Vとする。 $V_{acc}$ が異なるために、グリッド-カソード間への電場の浸み出しが変化し、ビームの質に影響することが予想される。結果を表2に示す。図3に軌道断面を示す。図4には $V_{acc}$ が100kVの場合のグリッド付近の拡大図を示す。

表2.  $V_{acc}=25\text{kV}$ における結果( $V_g=100\text{V}$ )

放出電流	1.509	A
ビーム電流	0.7596	A
透過率	50.3	%
規格化エミッタンス	$0.167 \times 10^{-6}$	m

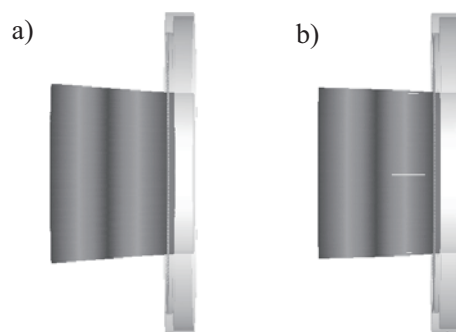


図3： $V_g=100\text{V}$ の時の電子軌道。  
a) $V_{acc}=25\text{kV}$ 、b) $V_{acc}=100\text{kV}$

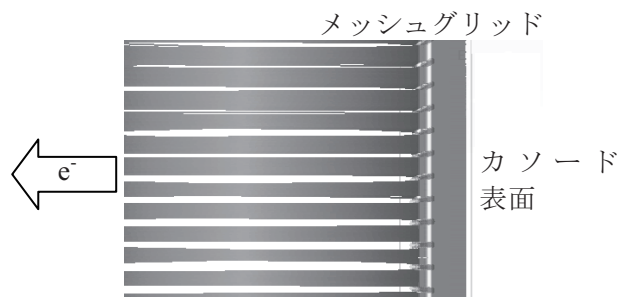


図4： $V_g=100\text{V}$ 、 $V_{acc}=100\text{kV}$ の時の軌道断面拡大図

#### 4.4 カソード-グリッド間電圧依存

$V_{acc}=25kV$ において、 $V_g=1V$ と $100V$ の場合を比較した。図5に $V_g=1V$ の軌道計算結果を示す。図6には軌道断面の拡大図を示す。

放出電流： 4.867mA  
 ビーム電流： 3.517mA  
 透過率： 72.3%  
 エミッタンス：  $45.23 \times 10^{-6}m$   
 規格化エミッタンス：  $0.71 \times 10^{-6}m$



図5： $V_{acc}=25kV$ 、 $V_g=100V$ におけるシミュレーション結果

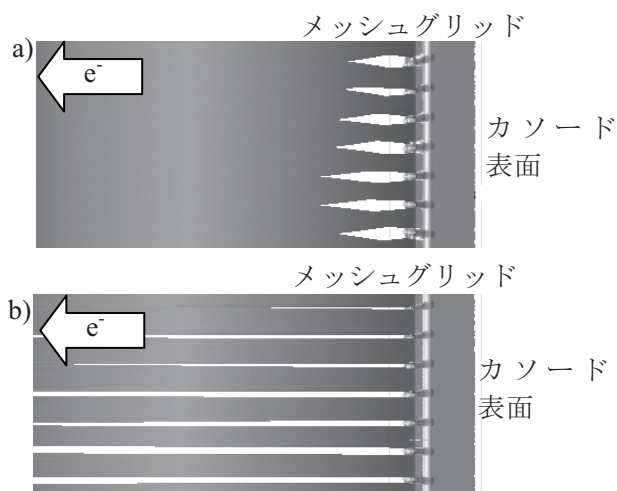


図6： $V_{acc}=25kV$ における軌道断面拡大図。  
a)  $V_g=1V$ 、b)  $V_g=100V$

### 5. 考察

#### 5.1 加速電圧依存について

加速電圧 $V_{acc}$ が $25kV$ と $100kV$ について比較する。 $V_g$ はいずれも $100V$ とした。そのため放出電流はほぼ同じだったが、 $100kV$ の場合が少し大きい。これは $V_{acc}$ による電場の浸み出しのためと考えられる。

一方、規格化エミッタンスに関しては、ほぼ同じ電流で、且つ4倍も高い電場で加速しているにもかかわらず、 $100kV$ の場合のほうが一桁程度も高くなっている。 $V_g$ 及び $V_{acc}$ によってできる電場を比較すると、 $V_g$ からは $0.333MV/m$ ( $100V/0.3mm$ )だが、 $V_{acc}$ からは $100kV$ の場合 $2.667MV/m$ 、 $25kV$ の場合 $0.667MV/m$ であり、 $100kV$ の場合では $V_g$ による電場との差が非常に大きい。このため、グリッドのレンズ効果でエミッタンスが大きくなったと推定される。図4をからも分かるように、メッシュ線間を通過したビームがオーバーフォーカスをしていることがわかる。一般に単孔電極では強い電場の側から弱い電

場へ浸み出す<sup>[5]</sup>ので、メッシュグリッドでもこのようなレンズ効果が起こる。これは電場の強度バランスがビームの質に影響することを示唆する。特にカソード-グリッド間でのビームのエネルギーは低いので、静電レンズの効果は大きく影響が現れやすい。

#### 5.2 カソード-グリッド間電圧依存について

カソード-グリッド間電圧 $V_g$ が $1V$ と $100V$ について比較する。 $V_{acc}$ はいずれも $25kV$ とした。 $V_g=1V$ においてはカソード-グリッド間の電場は低くなるので電流は制御され小さくなる。透過率は $V_g=100V$ とメッシュグリッドの開口率から推定される値よりも大きくなった。これもレンズ効果のためカソード-グリッド間でビーム進行方向に対して電場の横向き成分が相対的に強くなり、ビーム集束効果が発生し、ビームの通りがよくなったためと考えられる。図7に $V_g=1V$ の時のビーム軌道と電場を示す。 $V_g$ による電場は $1V/0.3mm=3.33kV/m$ で $V_{acc}$ による電場( $0.667MV/m$ )と大きな差があり、その効果が大きいことが推定される。図5、6からも分かるように直進性はかなり悪くなる。規格化エミッタンスにもこの傾向は表れている。

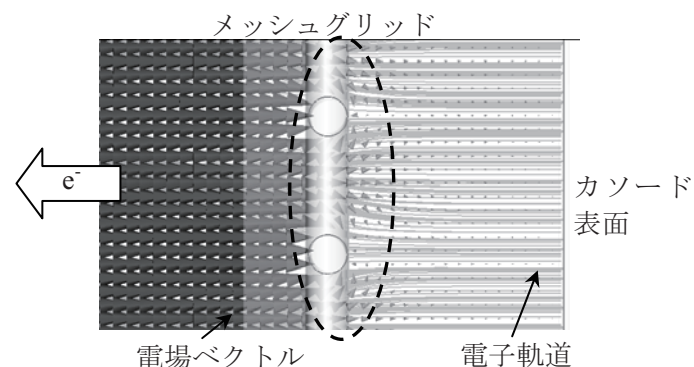


図7： $V_{acc}=25kV$ 、 $V_g=1V$ におけるグリッド-カソード間の電子軌道と電場分布。矢印が電場の強度と向きを示している

### 6. まとめ

3次元電磁場・荷電粒子軌道シミュレーションでメッシュグリッドのビームへの影響を解析した。グリッドのレンズ効果で局所的なビームの乱れが、グリッド電圧やそれに対する加速電圧とのバランスに依存して現れることが推定された。

### 参考文献

- [1] A.H.W.Beck, THERMIONIC VALVES, Cambridge University Press., pp249-252
- [2] 電気学会大学講座 電子・イオンビーム工学, 電気学会, pp131-133
- [3] 西村信雄, 落山謙三 著, 新編電気工学講座13 改訂 電子工学, コロナ社, pp160-161
- [4] 裏 克己 著 ナノ電子光学, 共立出版, pp49
- [5] 電気学会大学講座 電子・イオンビーム工学, 電気学会, pp108