

3S-1

スーパーコンSXによる 電子銃3次元シミュレータ ELEGUNS-FEM

土肥俊, 柳井良彰, 萩原繁和, 速水謙, 内記一晃, 原田紀夫, 山口幸郎
日本電気(株), 日本電気技術情報システム開発(株)

1. はじめに

高精細カラーCRT用電子銃形状の非軸対称化に伴い、3次元の電界及び電子軌道解析が必要となってきた。本稿では、スーパーコンピュータSX上に開発した電子銃シミュレータELEGUNS(ELEctron GUN Simulator)の概要を紹介する。電子軌道解析のために新たに二重格子法を開発した。また、電界解析に有限要素法を用い、方程式求解にスーパーコンピュータ向き反復解法SCG法を用いた。

2. 解析の原理

a) 電界解析: Poisson方程式

$$-\text{div}(\epsilon \text{grad} \phi) = \rho \quad (\epsilon: \text{真空の誘電率})$$

を解き、電位 ϕ を求める。電子ビームによる空間電荷密度 ρ は初め未知である。初期値を0とする。

b) '代表'電子の初期状態計算: 陰極近傍に仮想陰極を仮定し、Childの法則により、多数の'代表'電子について、電流 $|J|$ 、初速度 $v(0)$ を求める。

c) '代表'電子の軌道計算: 各'代表'電子について、電界中の電子の運動方程式

$$d(mv(t))/dt = -eE = e \text{grad} \phi$$

(e : 電子の電荷, m : 電子の静止質量)

を時間積分し、'代表'軌道を求める。

d) 空間電荷配分: 各'代表'電子の電流、軌道、速度から、空間電荷密度 ρ を求める。

e) 自己無撞着反復: a)に戻り、d)で求めた ρ の下でPoisson方程式を解き直す。収束するまで繰り返す。

3. 解析手法

複雑な境界形状を持つPoisson方程式解法として有限要素法(FEM)と境界要素法(BEM)があり、それぞれ表1のような特徴がある。

電子銃の解析では'代表'電子の軌道計算において多数の内点で電界計算が必要であり、BEMではその演算量が多い。一方FEMの場合電界は要素内の内挿により容易に求まる。空間電荷の取り扱いもまた容易である。方程式が正定対称疎行列を持ち、反復解法によって方程式求解を高速化できることも魅力である。

一方、要素は電界計算の精度の観点から高次要素を使う必要がある。ここではメッシュ生成法(4.参照)を考慮し、10節点四面体要素TETS10²⁾を用いている。

二重格子法(図1): 形状関数から電界を求めるためには局所座標(TETS10の場合、体積座標)を正確に計算しなければならず、Newton反復等が必要になるが、その計算は無視できない量である。また、ランダムなメッシュ内での電子の追跡も単純ではない。これらの問題を解決するために二重格子法を開発した。

'代表'電子の通過領域に直行格子(以降、軌道解析格子)を生成し、電子軌道解析はその上で行う。格子点上の電界は、有限要素解析結果から形状関数に基づいて内挿する。各格子点を包含する要素内の体積座標値の計算は必要ではあるが、空間電荷効果考慮のための反復の前に一度行えばよいので、トータルの演算量に与える影響は少ない。

'代表'電子の時間積分は電子の進行方向に垂直な面(以降、格子面)毎に行う。各格子面での電界は面内格子点の電界から補間する。図の「平滑化処理」は軸対称面の電界の誤差除去等を行うためのものである。空間電荷配分も同様に軌道計算格子を介して行う。

4. システムの構成(図2)

有限要素法の欠点の一つは領域内部をメッシュ分割しなければならないことである。ここではモデル作成の工数削減のために、ソリッドモデルによる入力と自動メッシュプログラムを用いている。また、微少寸法の最適化をソリッドモデルまで戻らなく行うために、有限要素メッシュを変形する機能を開発している。

表1 FEMとBEMの特徴の比較

	長所	短所
FEM	方程式は対称正定疎行列をもつ 内点での電界計算が容易	領域内部を要素分割する必要がある
BEM	固定境界(電極)のみを要素分割すればよい	方程式は非対称密行列をもつ 内点の電界計算の演算量が膨大

5. 解析例

カラーCRT電子銃を例にとり解析を行った。図3は電極のメッシュである。1ガンの1/4空間のモデル化である。要素数、節点数はそれぞれ3288, 6309である。軌道計算格子は $16 \times 16 \times 200$ である。'代表'電子の数は約230である。10回の反復で、軌道計算格子上の空間電荷の相対最大残差ノルムは 10^{-6} 程度となった。

図4, 5に解析結果を示す。図4は電界解析結果の等ポテンシャル線と'代表'電子の軌道を表している。図5はフォーカス電圧の変化による管面上の電流密度分布の変化を表している。

計算時間はスーパーコンピュータSX-2を用いて1ケース約1分であった。

6. まとめ

電子銃シミュレータELEGUNS-FEMの概要を述べた。'代表'電子軌道計算のために二重格子法を開発した。電界解析に有限要素法を用いた。更にスーパーコンとスーパーコン向き算法¹⁾の利用により、空間電荷を考慮した3次元形状電子銃の一括解析が可能となった。

文献

- 1) 速水 謙 他：本大会予稿集, 3S-2.
- 2) 有限要素法ハンドブック, 培風館.
- 3) 電子管工学 I, 電気通信学会大学講義, コロナ社.
- 4) 荒木義考 他：第6回電気・電子工学への有限要素法の応用シンポジウム論文集, p. 127-132 (1985).

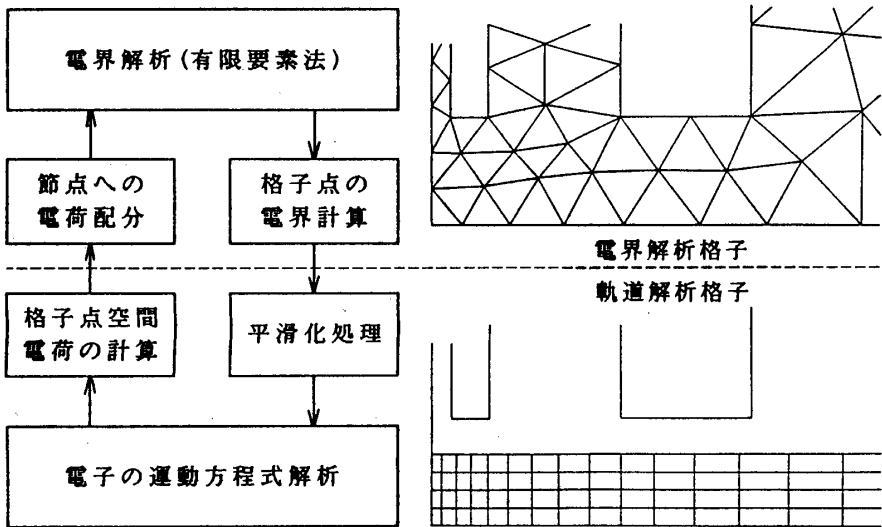


図1 二重格子法

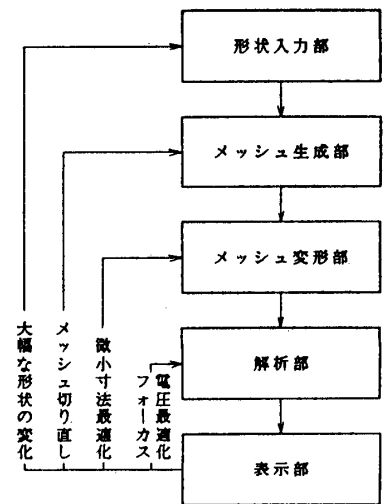


図2 システムの構成

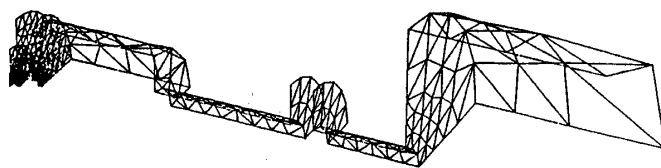


図3 解析モデルの電極表面メッシュ

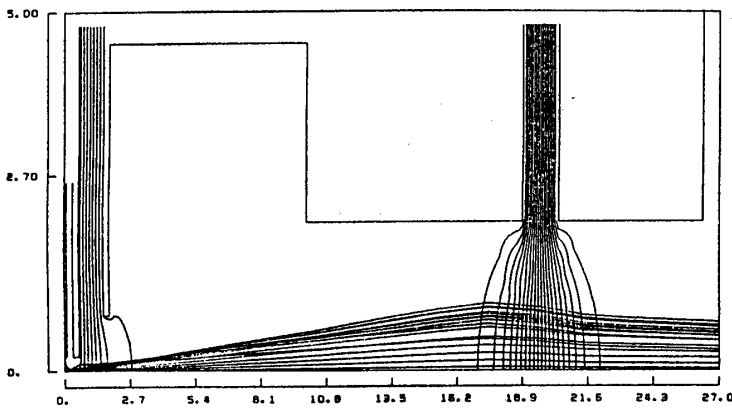


図4 '代表'電子軌道の断面図

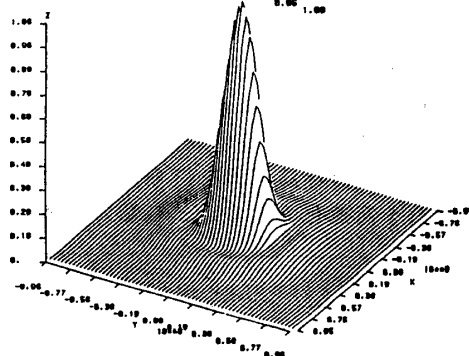
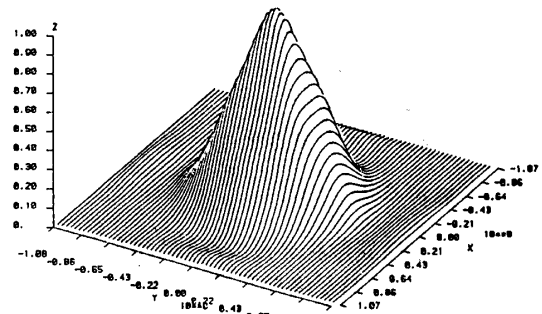


図5 電流密度