

## DEVELOPMENT OF 2D ELECTROMAGNETIC FIELD SOLVER

Masashi Yamamoto\*, Shinji Endo, Shogo Miyata, Takuya Natsui  
Department of Electrical and Computer Engineering, Akita National College of Technology  
1-1, Bunkyo-cho, Iijima, Akita, 011-8511, Japan

### Abstract

Recently, we have used 3D simulation programs, which can analyze an electromagnetic field in a complex structure. But 2D simulation programs are also very useful because many components in linac are cylindrical symmetry. For this purpose, many 2D programs had been developed for a long time. However, such programs can't be modified freely by user. Therefore, we had started to develop 2D programs for analyzing static and RF fields in accelerator. At present, our programs can calculate a electromagnetic field in cylindrical symmetric structure by using a finite element method (FEM). Using 2nd order elements in our FEM programs, we can analyze fields with very good accuracy. Furthermore, we will make programs which can calculate motion of charged particles in such fields. In this paper, we will present current status of developing programs and future plans.

### 加速器用2次元電磁場解析コードの開発

#### 1. はじめに

加速器は複雑なシステムであるため、その設計時には、様々なコードを用いたシミュレーションが重要な役割を果たす。静電場や静磁場、あるいは高周波電磁場の解析、ビームの軌道解析等である。近年、パソコンのCPUの高速化とメモリの大容量化に伴い、これらの解析コードは高精度化し、3次元問題が取り扱えるようになってきている。商用のコードでは、もはや3次元問題が取り扱えるのは当たり前のこととなってきている。しかし、加速器のコンポーネントの解析では、対称性を考慮することにより、2次元問題で済むものも多数ある。このような場合、わざわざ3次元の解析コードを使う必要はない。計算時間やメモリーが大量に必要となり、その上、計算精度まで低下するからである。したがって、2次元の計算コードはその役割を終えたわけではなく、今後も使い続けられると考えられる。その開発の方向は、高精度化と使いやすいユーザーインターフェースに向かうであろう。ずいぶん以前から、2次元問題を解析する加速器用のコードはたくさん開発されている。しかし、目的に応じて、そのソースコードを我々が自由に書き直すことは難しい。そこで、我々が自由に改変ができ、かつ高精度に2次元問題を解析するコードを開発することにした。

電磁場の解析とそれと相互作用する荷電粒子の運動を総合的に計算するプログラムを作成することを最終目標としている。特にリニアックの設計に用いるコードの作成を念頭に入れ開発を進めている。具体的には、POISSON<sup>[1]</sup>のような静磁場、E-Gun<sup>[2]</sup>のような電子銃、SUPERFISH<sup>[3]</sup>のような高周波電磁場、時間領域での電磁場解析が可能なものを目指している。加えて、これらの結果を利用して、PARMELA<sup>[4]</sup>あるいはGPT<sup>[5]</sup>のようなビームトラッキングのためのプログラムを作成することを考えている。

昨年からはじめ、静電場と静磁場、高周波電

磁場の計算ができるようになった。メッシュ作成から、連立方程式や固有値の計算まで、全てコードを我々で書き、外部のコードは全く使用していない。ここでは、我々が開発しているコードの現状と今後の予定を報告する。

#### 2. コードの体系

まだ開発を始めたばかりで、完成時の姿には程遠いが、最終的には図1に示すようなプログラム群になる。これを見て分かる通り、電磁場計算とビームトラッキングのシミュレーションを行い、リニアックの設計に役立つものを目指している。機能毎に独立した10個程度のプログラム群から構成される。そして、GUIを兼ね備えたプログラムにより、これらの全てをコントロールするつもりである。ユーザーインターフェースの開発も重要と考え、使いやすいものを目指す。

図1に示した機能毎のプログラムのうち、モデリング部分は計算すべき領域や形状、条件を記述したファイルの生成の役割を担う。ここでは、ユーザーインターフェースを考慮し、問題の設定が容易で、使いやすいものを目指す。ただ、この部分はまだ未着手で、現状はPOISSON/SUPERFISHのように頂点の座標を記述したテキストファイルをユーザーが作成している。

メッシュ生成のコードでは、離散化したマクスウェルの方程式を計算するために領域を効率よく分割し、それを記述したファイルを生成する。もちろん、誘電率や透磁率が異なる領域を反映させることや、内部が空白となっているような形状にも対応できる。ここでのメッシュ生成のルーチンでは、ドロネ三角分割を使っている<sup>[6]</sup>。1次要素、曲線を含んだ2次要素、メッシュの大きさを変化させるアダプティブメッシュの機能を持たせている。現状、これら3つのメッシュを生成するルーチンは完成し、利用している。

静電場計算の部分は、軸対称あるいは並進対称構

\* E-mail: yamamoto@akita-nct.ac.jp

造のポアソン方程式やラプラス方程式を計算する。有限要素法を使いこれらの方程式を離散化して、スカラーポテンシャルを計算している。現状、1次要素で計算ができるようになっている。ここでの計算結果は、後の GUN の計算に使われる。

静磁場計算の部分は、軸対称構造あるいは並進対称構造を計算する。ここでも、有限要素法を使って計算を行う。現状、軸対称構造の2次要素の計算まで可能となっている。ベクトルポテンシャル  $A_\phi$  を計算し、その回転から磁場  $B$  を求めている。いまのところ、磁場強度による透磁率の変化を無視しているが、近いうちにそれも取り込めるようにする。

固有モード計算の部分では、軸対称構造の空洞の共振モードを計算する。ここでも有限要素法のプログラムとしている。取り扱う問題は、定在波のみならず周期的境界条件を取り入れ進行波も解析可能にする予定である。さらに、単極モードにとどまらず多極モードも取り扱いたい。現状は単極の定在波(TMモード)が2次要素で計算可能となっている。

時間領域計算では、電磁場が非定常の解析が可能にする。ここでは、有限積分法 (Finite Integration Technique: FIT) を計算手法を用いる予定である。この部分は全く手を着けていないので、本年度の課題の一つとなっている。

Gun 計算の部分は、計算された静電場を用いて、電子銃あるいはイオン銃でのビームトラッキングを行う。この部分も未着手であるが、近いうちにプログラムの開発を始める予定である。

粒子軌道計算の部分は、電磁場中やドリフトスペース中でのビームトラッキングを行う。電磁場との相互作用をきちんと計算するために、Particle In Cell (PIC) の手法を使う予定である。これも、本年度の課題の一つである。

ポストプロセッサの部分で、加速器の設計に必要なパラメータの算出と、図の作成を行う。ディスプレイ上の描画には、高品位な図が容易に作成できる OpenGL を用いている。OpenGL の図は、ビットマップに変換することもできるようにしている。加えて、ビットマップだと拡大/縮小すると図の品質が著しく低下するので、ポストスクリプトでの出力も可能にしている。現状、OpenGL の図の作成、そのビットマップ画像への変換、ポストスクリプト出力が可能となっている。

### 3. 現状と今後の予定

#### 3.1 開発環境

開発環境の OS には、Linux を使っている。フリーでかつ高品質のツールが使えるからである。開発言語は、ソースコードの再利用が容易な C++ を用いている。さらに、作図には OpenGL を用いている。これらの開発環境には全く費用をかけていないが、快適で全く問題は無い。

現在は Linux で開発を行い、他の OS には対応していないが、将来は Windows にも対応できるようにしたいと考えている。使っているライブラリーは OpenGL のみで、これは Windows にも対応できる。Linux 固

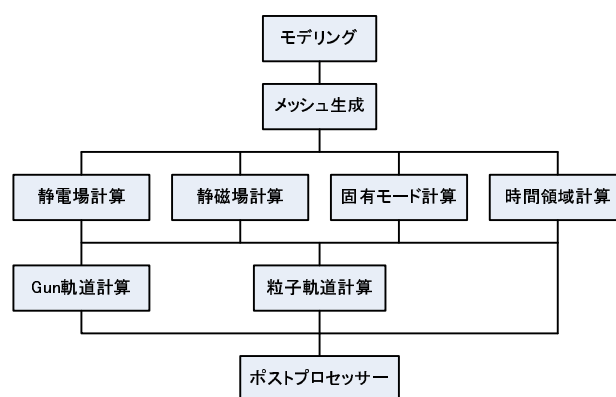


図 1: コードの体系

有のコードやライブラリーは全く使っていないので、Windows への移植も容易と考えている。

コード開発では、数学のパッケージなどは全く使っていない。世の中には信頼できるパッケージは多数あるが、使わないようにしている。ソース全てにわたって自分たちで管理すべきという信念からきている。また、その方が教育的でもあるし、不具合が生じたときにも対応しやすい。

#### 3.2 現状

ユーザーインターフェースを考えると完成度は、まだまだ不十分である。しかし、静電磁場や共振モードは計算可能となっており、研究者がソースコードを改変しながら使う分には実用に耐える。これら以外の計算は、全く手がつけられておらず、今年度開発を進める予定となっている。

現段階の我々のプログラムで、開発状況は次の通りである。

- メッシュ生成
  - 1 次要素、曲線を含んだ 2 次要素、アダプティブメッシュの生成が可能
- 静電場計算
  - 1 次要素でのポアソン方程式、ラプラス方程式の計算が可能
- 静磁場計算
  - 2 次要素を用いた軸対称構造の磁場計算が可能
- 固有モード計算
  - 2 次要素を用いた軸対称構造の定在波の計算。単極の TM モードのみ計算可能である。
- ポストプロセッサ
  - OpenGL を用いた図の作成と、ビットマップおよびポストスクリプトファイルの生成が可能。

静磁場と固有モードの計算が比較的進んでいる。これらの詳細については本研究会で宮田や夏井が報告する<sup>[7][8]</sup>ので、ここでは計算結果の図を示すことにとどめる。図2に磁気レンズの計算例を示す。静磁場の計算精度については、POISSONと比較を行いほぼ一致していることが確かめられている<sup>[7]</sup>。

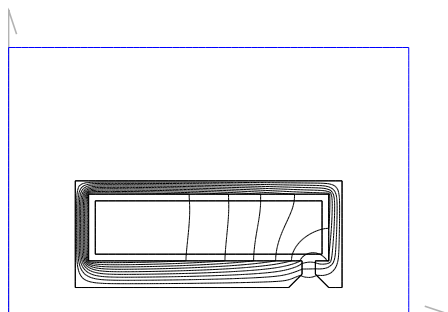


図2: 磁気レンズの計算例

固有モード計算については、XバンドRF電子銃の第1空洞の共振モードを解析した。図3に計算された電磁場を示す。我々のプログラムで計算された共振周波数は11.4229[GHz]で、SUPERFISHの結果は11.4239[GHz]であった。開発したプログラムの計算精度はSUPERFISHに比べ、かなり良いことが分かっている<sup>[8]</sup>。共振周波数の計算精度は、 $10^{-10}$ のオーダーで、現状でも、空洞の設計には十分使えると考えている。

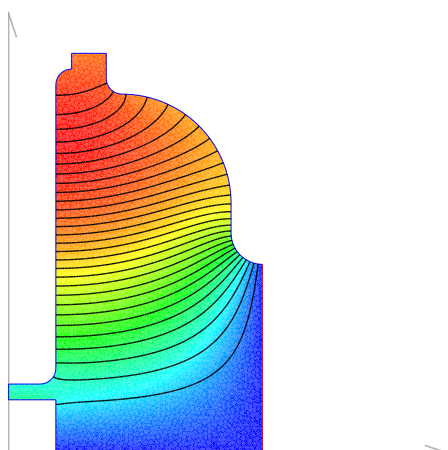


図3: XバンドRF電子銃の第一空洞の電磁場の様子

### 3.3 今後の予定

図1に示した体系のうち未着手の部分、時間領域の計算とGun軌道計算、粒子軌道計算については早急にプログラム作成に取りかかる予定である。あわ

せて、GUIを使ったユーザーインターフェースの開発も始めることになっている。

本研究会で報告した静磁場と固有モード計算のプログラムも、実際の設計での適用範囲を広げるために、機能の追加を進める。静磁場計算では、実際の磁性体の磁場強度と透磁率の関係を取り入れるようにする事が急務である。固有モード計算では、周期的境界条件を取り入れることを次の課題としている。SUPERFISHではこの境界条件が設定できなかったため、実用上かなり不便である。つぎのステップとして、ぜひ周期的境界条件を計算できるようにしたい。

## 4. まとめ

加速器、中でもリニアックの設計に使える2次元のコードの開発を進めている。開発しているものは、電磁場と荷電粒子の軌道の双方を解析するものである。

静電磁場や共振モードの計算ができるようになった。これら、電磁場の計算には有限要素法を適用して解析している。2次元要素を用いているので、格段の精度向上が図られている。しかし、解決すべき課題も多く残っている。静磁場解析では材料の特性を取り入れられるようにすることが急務である。共振モード解析では周期的境界条件が取り扱えるようにする事が次のステップとして重要である。これができると進行波が取り扱え、応用範囲が広がる。

荷電粒子の軌道解析は全く手を着けていない。本年度、後半、この部分のプログラムを作成するつもりである。PICを用いて、電磁場との相互作用をきちんと取り入れたプログラムを目指す。

## 参考文献

- [1] J. H. Billen, et al., "POISSON/SUPERFISH on PC Compatibles" Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conf., Vol. 2.
- [2] W.B. Herrmannsfeldt, "EGUN-Electron Optics and Gun Design", SLAC Rept. 331, October 1988.
- [3] K. Halbach, et al., "SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry," Particle Accelerators 7 (4), 1976.
- [4] L. M. Young, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835.
- [5] M.J. de Loos, et al., "General Particle Tracer: A new 3D code for accelerator and beamline design", Proc. 5th Eur. Part. Acc. Conf., Sitges, 1996.
- [6] 谷口建男, "FEMのための要素自動分割", 森北出版株式会社, 2002.
- [7] S. Miyata, et al., "MAGNETIC FIELD ANALYSIS BY USING 2ND-ORDER ELEMENTS", this meeting.
- [8] T. Natsui, et al., "DEVELOPMENT OF A CODE FOR ANALYZING RESONANT MODES", this meeting.