

# Beam Dynamics in an RFQ with Higher-order Electric Multipole Moments

Yoshiyuki OGURI, Masahiro OKAMURA, Osamu TAKEDA\*,  
Kiyokazu SATOH\* and Toshiyuki HATTORI

Tokyo Institute of Technology, O-okayama 2, Meguro-ku, Tokyo 152

\*TOSHIBA Corporation, Suehiro-cho 2, Tsurumi-ku, Yokohama 230

## ABSTRACT

In order to investigate the beam dynamical performance of an RFQ cavity with a small vane-tip curvature, we have developed a beam tracking computer code in which the effects of higher-order harmonics in the intervane potential are taken into account. It has been found that these higher-order multipole moments can lead to a serious degradation of the transmission performance especially at large values of vane modulation factors.

## 電場の高調波成分を考慮したRFQ内ビーム軌道解析

### 1. 序論

大強度重粒子線照射によるプラズマ発生の研究のために、現在 $^{16}\text{O}^{1+}$ までの重イオンを5keV/uから200keV/uまで加速する80MHzの四ベインRFQの建設準備を進めている[1]。二次元電磁場解析によれば $\rho = 0.75r_0$  ( $\rho$ : ベイン先端曲率半径,  $r_0$ : ギャップ内接円半径)の薄いベインの場合、従来の $\rho = r_0$ の構造に比べ10%程度の電力効率向上が期待される[2]。しかしベインを薄くすると、四重極チャンネル内電場中で高調波成分の割合が増大する。この様な多極成分存在下での大電流ビームの振舞いを調べるのが目的である。

### 2. 方法

RFQのビーム軌道計算にはPARMTEQ[3]が広く用いられているが、この計算コードでは電場中の高調波成分の影響は計算できない。また空間電荷力の計算にインパルス近似を用いているため、刻々変化する粒子密度分布を反映した非線型空間電荷効果の評価はできない。そこで新たに軌道解析コードを開発し、上記の薄いベインを持つ構造について計算を行った。

各粒子 $^{16}\text{O}^{1+}$ の軌道はそれぞれの運動方程式

$$\ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{E}/m = -(e/m)\nabla U = -(e/m)\nabla(U_{RF} + U_{sc} + U_{mir}) \quad (1)$$

を4次のRunge-Kutta法で直接積分して求めた。上式で $U_{RF}$ は高調波成分を含むRFQ固有のポテンシャル、 $U_{sc}$ は空間電荷によるポテンシャル、そして $U_{mir}$ はビームの鏡像電荷によるポテンシャルである。

$U_{RF}$ は次式のように多重極展開される[4]：

$$U(r, \theta, z) = \frac{V}{2} \left( \sum_{m=1}^{\infty} A_{0m} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{2m} \cos 2m\theta + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} I_{2m}(nkr) \cos 2m\theta \cos nkz \right). \quad (2)$$

ここで $I_\nu(x)$ は $\nu$ 次の第1種変形Bessel関数である。 $\rho = 0.75r_0$ の場合の各高次成分の振幅 $A_{nm}$ はCrandall[4]による表を内挿して求め、12極成分までを考慮に入れた。

空間電荷力のポテンシャルについては、他の全ての粒子から受ける静電場を時々刻々計算し、その総和を取った。ただし $\mathbf{r}_i$ は $i$ 番目の他の粒子の位置である：

$$U_{sc} = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|}. \quad (3)$$

一つのバンチはその前後にある多数のバンチからもクーロン斥力を受ける。この効果を考慮に入れるため、計算を行っているバンチから前後にそれぞれ $2L$  ( $L$ はセル長)離れた位置に同じ粒子分布を持つ仮想的なバンチを一つずつ置き、そこからの静電力を計算した。

鏡像電荷によるポテンシャル  $U_{mir}$  を厳密に求めることは、全粒子の位置を参照しながら三次元の境界値問題を時々刻々解くことに等しく、計算時間の点から困難である。そこで8極場だけを近似的に考慮した。円形断面ビームが変調のない双曲線状断面の四重極チャンネル中心にあるとき、鏡像による8極場は次式で表せる [5]。ただし  $I_{beam}$  は [A] 単位のビーム電流で、 $U_{mir}$  は [V/m] 単位で与えられる：

$$U_{mir} = -2.856 \times 10^3 I_{beam} (r/r_0)^4 \cos 4\theta. \quad (4)$$

計算は東工大のスーパーコンピュータ CDC-ETA10 で行った。同期入射位相 ( $-90^\circ$ )  $\pm 180^\circ$  の範囲のランダムな RF 位相で RFQ に入射する  $2^8$  個の粒子の軌道を同時に追跡した。

$xx'yy'$  位相空間における入射エミッタンス楕円の形状としては、以前に PARMTEQ で得られたアクセプタンス楕円 [1] (面積  $15\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ ) をそのまま使用した。Monte Carlo 法により  $xx'yy'$  四次元位相空間内の球殻上に代表点を一様分布させ、いわゆる Kapchinskij-Vladimirskij ビームを形成させた。

### 3. 結果

計算は入射ビーム電流ゼロ及び 10mA の両方について行った。

図1は高調波成分を持たない、いわゆる two-term potential を用いたときの空洞の長さに沿ったビーム透過率及び損失プロファイルの計算結果である。PARMTEQ による結果 [1] との一致は良い。

図2は  $\rho = 0.75r_0$  の構造を取ったときの結果で、透過率は大きく減少している。粒子の損失は殆どがセパレーターからの脱落によることが分かる。これは、高調波の発生に加え、同期加速に必要な  $z$  方向成分の振幅  $A_{10}$  が特に大きく減少したためである。そこで、 $\rho = 0.75r_0$  を保ちつつ  $A_{10}$  を回復させるため、計算コード MOD12[6] を用いてベインの変調係数  $m$  を修正した。(ただしこの修正では横方向四重極場の振幅  $A_{01}$  の回復は考慮されていない。) 図3はこの修正後の結果である。ビーム電流ゼロのとき、縦方向の損失は完全に回復するが、横方向の損失が特に  $m$  の大きい領域で増大している。全体では透過率は幾分改善される。しかしビーム電流 10mA では大きな改善は見られない。

図4は上記の修正の後、 $A_{10}$  と  $A_{01}$  を除く全ての  $A_{nm}$  をゼロとしたときの結果である。図3 と比べ、大幅な改善が見られる。従って図3における低い透過率の主な原因は、高調波成分の存在にあることが分かる。

### 4. 結論

RFQ 内の電場の高調波成分を考慮した粒子軌道計算の手法を開発し、その影響を解析することができた。加速電力効率の向上を目指してベイン先端の曲率半径を小さくすると、主に電場中の加速成分の減少によりビーム光学に重大な影響が生じる。ベインの変調を修正することで加速軸方向成分を回復すれば、ある程度の改善が見られる。しかし加速成分を回復しても、残留する高調波が特に大電流ビームの透過率に大きな影響を与えることが分かった。従って本研究の場合を含め、双曲線から大きく異なる断面形状のベイン採用する際には、電場の高調波成分を考慮したビーム軌道解析が重要である。

### 参考文献

- [1] M.Okamura *et al.*, Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan (1991) 184.
- [2] O.Takeda *et al.*, presented at this conference.
- [3] K.R.Crandall *et al.*, Proc. Linear Accelerator Conf., Montauk, N.Y. (1979) 205.
- [4] K.R.Crandall, Los Alamos Report LA-9695-MS, UC-28 (1983).
- [5] P.Junior and A.Harth, High Energy Density in Matter Produced by Heavy Ion Beams, Annual Report 1990, GSI-91-27 (1991) 53.
- [6] N.Tokuda, private communication.

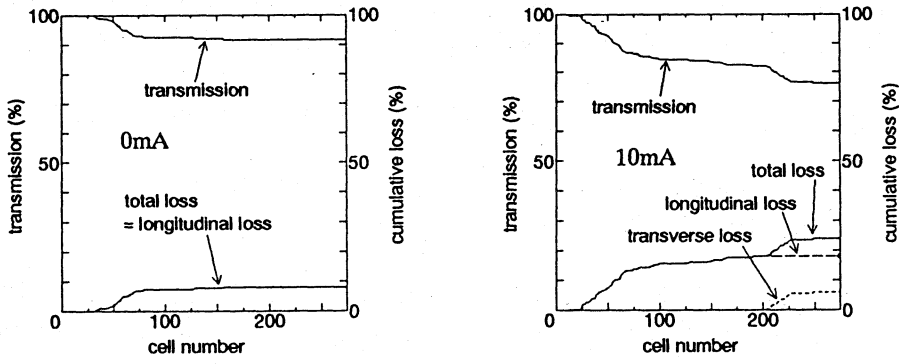


図1：Two-term potential に対するビーム透過率及び損失プロファイル。

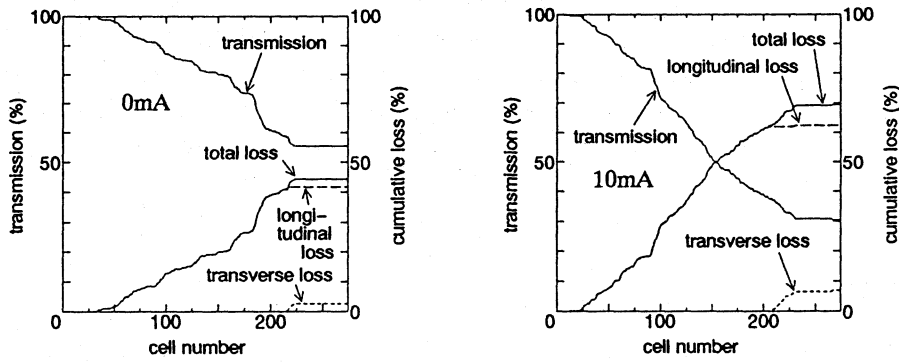


図2： $\rho = 0.75r_0$  の構造に対するビーム透過率及び損失プロファイル。

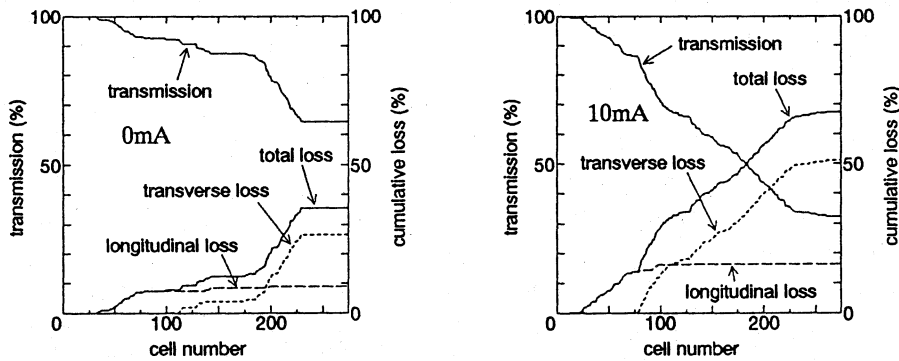


図3： $\rho = 0.75r_0$  の構造で変調  $m$  に修正を加えたときの計算結果。

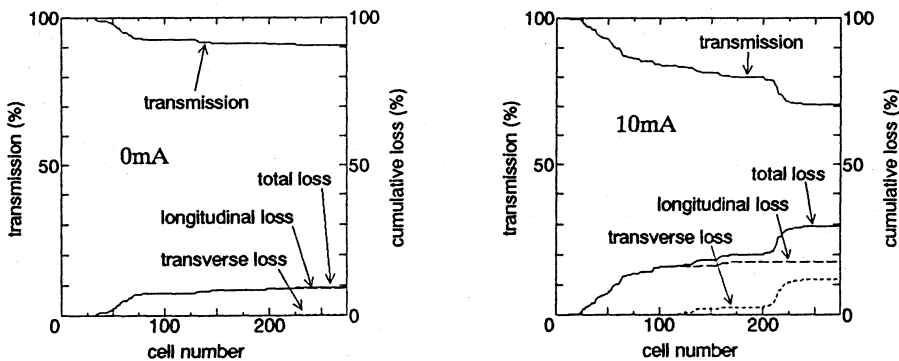


図4：上記修正の後、 $A_{10}$ と $A_{01}$ を除く $A_{n,m}$ をゼロとしたときの計算結果。