

## NUMERICAL ANALYSIS OF SLOT ANTENNA IN NEAR FIELDS

Shusuke NISIYAMA, Hiroyasu ITOH, Satoshi TOMIOKA, Takeaki ENOTO  
 Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University  
 Kita-13jo Nishi-8chome Kita-ku Sapporo, Hokkaido, 060, Japan

### ABSTRACT

In this paper, we have described the frequency characteristics of a slot antenna made of a small conductor plate placed near the charged particle beam, similar to the antenna as a beam position monitor in our experiments. The dependence of the antenna output on the distance from the slot has also been shown.

These results are obtained using the boundary element method in frequency domain. The frequencies analyzed are the acceleration microwave frequency and its higher orders. The slot length influences on the amplitudes of the antenna output, however, the anticipated resonance concerning the slot length does not appear. The frequency characteristics depend on the size of the conductor plate, but not on that of the slot. The output is reciprocally proportional to the distance from the beam, and is independent of the frequency and the sizes of the slot and plate. These results are in good agreement with our experimental results.

### ビーム近傍におけるスロットアンテナの数値解析

#### 1. はじめに

近年、自由電子レーザーやリニアコライダーなどで、加速器のビームはより大電流、低エミッタンス、安定化が要求されている。そのため、運転中のビームの監視が可能な非接触型のビームモニタは重要であり、ボタン電極型をはじめ様々な種類のモニタが研究開発されている。

本研究室においてもスロットアンテナを用いた非接触型のビーム位置モニタの実験が行なわれてきたが、形状や寸法の最適化は行なわれていなかった。これは、通常スロットアンテナの理論的な取り扱いでは、無限大の導体板上にあるスロットの遠方界での特性が議論されているのに対し、電磁波のソースとなる荷電粒子ビームからの距離および導体板の寸法が、注目する周波数での波長と同程度となり、解析的な取り扱いが難しいためである。そこで今回の報告では、数値解析によって3種類のスロットアンテナの距離特性や周波数特性を求め、実験結果との比較を行なった。

#### 2. 解析モデルと数値解法

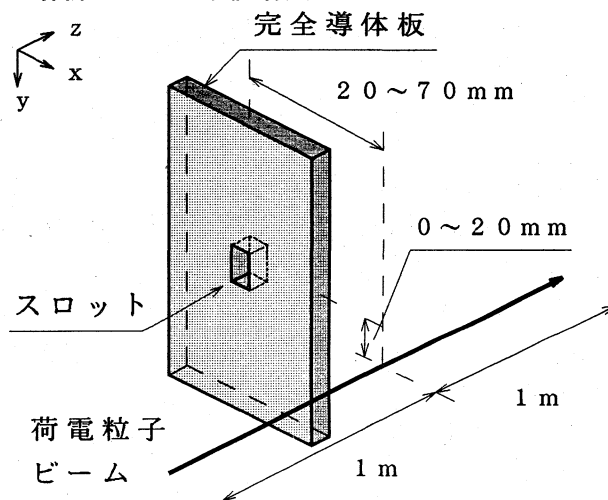


図 1: 解析モデル

解析モデルは図 1 に示すように、長方形の完全導体板の中央にスロットがあり、導体板に対し垂直に、スロットから 20 ~ 60mm 離れた位置を荷電粒子ビームが通過している。ビームの長さは 2m でその中央にスロットアンテナがある。また、

解析領域は真空中で、周囲からの散乱の無い開放領域とした。導体板およびスロットの寸法は以下の3種類で計算した。

- No.1 : 24 × 48 × 2mm — slot 3 × 6mm
- No.2 : 12 × 24 × 2mm — slot 3 × 6mm
- No.3 : 12 × 24 × 2mm — slot 3 × 9mm

荷電粒子ビームは加速周波数 2856MHz の電子線形加速器からのビームで、速度は  $\beta = 0.99986$  (約 30MeV) とした。

周波数領域での解析を行うため、基礎方程式は電流をソースとする電場の 3次元 Helmholtz 方程式である。

$$(\nabla^2 + k_0^2)E = j\omega\mu_0 J - \frac{\nabla\nabla \cdot J}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

ここで  $\epsilon_0, \mu_0, k_0, \omega$  はそれぞれ真空中での誘電率、透磁率、波数、角周波数であり、 $E$  は電場、 $J$  は電流密度、 $j$  は虚数単位である。解析手法に境界要素法を用いたので、自由空間中の Green 関数  $u^*(r) = -e^{-jk_0 r}/4\pi r$  を重み関数として (1) から境界積分方程式

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} E\delta(r) d\Omega \\ & + \int_{\Gamma} u^*(\nabla E) \cdot n d\Gamma - \int_{\Gamma} E\nabla u^* \cdot n d\Gamma \\ & - \int_{\Omega} \left( j\omega\mu_0 J - \frac{\nabla\nabla \cdot J}{j\omega\epsilon_0} \right) u^* d\Omega = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

を導き、境界表面を離散化して境界条件を与えることで、解析領域内の任意の位置における電場を求めることができる。境界表面の離散化は矩形の一定要素で行った。

荷電粒子ビームは (1)(2) 式の  $J$  として組み込まれる。 $x = 0, y = 0$  を  $+z$  方向に形を変えずに速度  $v$  で進む直線状のビームは、 $z = 0$  でのスペクトルを  $J_{\omega,0}$  とすると以下のように表される。

$$J_{\omega}(x, y, z) = J_{\omega,0} \exp\left(-j\frac{\omega}{v}z\right) \delta(x)\delta(y)e_z(3)$$

$J_{\omega}(x, y, z)$  をフーリエ逆変換するとビームによる電流密度  $i(x, y, z, t)$  になる。線形加速器からのビームは、幅が数十ピコ秒の微細構造パルスが加速高周波の周期で繰返されることから、スペクトルも加速周波数の整数倍の成分が顕著に現

れる [1]。そこで、解析する周波数も加速周波数 (2856MHz) の 1, 2, ..., 8 倍とした。

実験ではスロットの中央部の両端に同軸ケーブルを接続して出力を取り出したが、この解析ではスロットの中央の位置での短辺方向 (図 1では  $x$  方向) の電界強度を出力として評価した。

### 3. 解析結果

まず 3 種類のアンテナの周波数特性を図 2 に示す。ビームは図 1 のスロットの中心を原点とした座標系の  $x = 40\text{mm}, y = 0\text{mm}$  を通過させた。ビームが作る電場は、スペクトルの強度を同じにすると周波数によらずほぼ同じなのであるが、アンテナの出力は高周波側ほど大きくなっている。No.1 と No.2 を比較すると、導体板が倍の大きさの No.1 の方が低周波側にシフトしたようになっている。また、No.2, No.3 ではスロットの長さから 15GHz 以上に現れると思われた共振特性が全く現れていない。No.2 と No.3 を比較すると、スロットの長さは出力の大小には影響するが周波数特性はほとんど変わらないことがわかる。

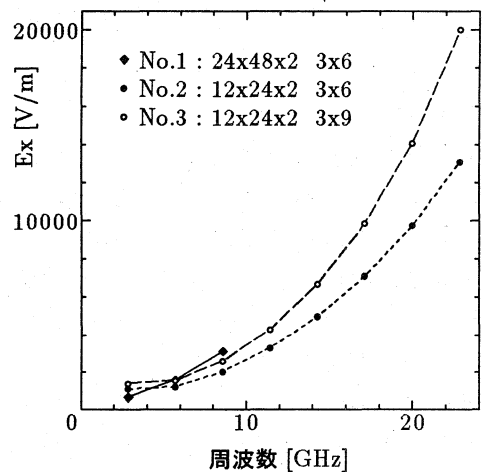


図 2: 周波数特性

図 3 に周波数が 20GHz、ビームの位置が  $x = 20\text{mm}, y = 0\text{mm}$  でのスロット内部の短辺方向の電界強度分布 ( $E_x$ ) を示す。短辺方向の分布は台形状だが、長手方向にはコサイン分布で、No.3 は No.2 と比べるとスロットの長さに合わせて全体の電界強度が大きくなっている。No.2 のスロットの長さは 0.4 波長で No.3 は 0.6 波長だが、どちらも同じ様に分布し、共振は見られない。図には

示さなかったが、No.2のスロットが0.06波長になる2856MHzでも長手方向にはコサイン分布をしている。

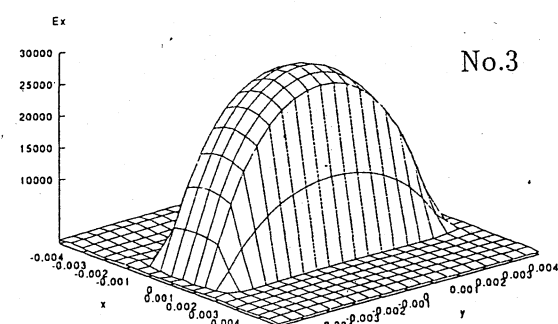
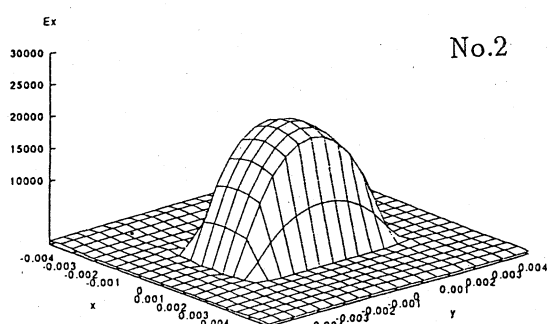


図3: スロット内部の電界強度分布

距離特性は、ビームがスロットの真横 ( $y = 0$ ) を通っている場合はスロットの中央とビームとの距離  $r$  の  $-1$  乗に比例している。比較的長いビームが近傍に作る電場の動径方向成分は  $r^{-1}$  に比例しており、それがそのまま出力に反映されている。ビームが真横ではなく図1の上下方向にずれた場合は、( $y = 10\text{mm}, y = 20\text{mm}$ ) そのままでは  $r^{-1}$  には比例しないが、方向余弦を考慮するとやはり  $r^{-1}$  に比例している。言い替えると、スロットの短辺方向の電場を検出している。

これらの距離特性は3種類のアンテナの間でも、周波数を変えた場合でもおよそ同じであった。一例として周波数が20GHz、アンテナがNo.2の場合の距離特性を図4に示す。実験では  $r^{-0.7} \sim r^{-1.1}$  という結果が得られているが[2]、ビームの広がりや周囲からの反射波の影響、ビーム位置の設定誤差などによって  $r^{-1}$  とならなかったと思われる。また、ビームのそれぞれのスペクトルについて位相も考慮して重ね合わせた結果、 $r^{-1}$  から

多少ずれていくことも考えられる。

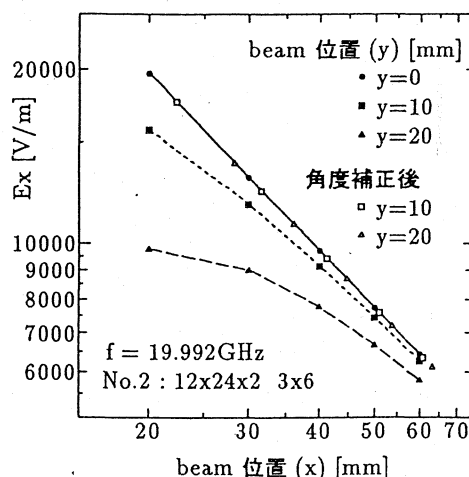


図4: 距離特性 (No.2 20GHz)

#### 4. おわりに

ビームの近傍にあるスロットアンテナの数値解析によって、周波数特性は導体板の大きさによること、スロットの長さは半波長でも共振を示さず、単に出力の大きさに影響すること、距離特性は  $r^{-1}$  であり、スロットの短辺方向の電場を検出していることが示された。

今後は、導体板、スロットともにさらに寸法の異なる場合や、周囲を開放領域ではなく導波管のような場合、さらに、同一の導体板に複数のスロットを置いた場合の相互作用を数値計算すると共に、それに合わせた体系での実験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] H. ITOH et al., "SPECTRUM ANALYSIS OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD GENERATED BY ELECTRON BEAMS," Proc. of the 1994 International Linac Conference, Vol.2 pp.860-862, 1994
- [2] S. NISIYAMA et al., "AN ELECTRON LINAC BEAM POSITION MONITOR USING SLOT ANTENNAS," Proc. of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.254-256, 1994