

# スロットアンテナを用いた平面状ビーム位置モニタ

西山 修輔<sup>1</sup>、富岡 智、榎戸 武揚  
北海道大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻  
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

## 概要

平面構造のアンテナであるスロットアンテナを組み合わせた非接触型のビーム位置モニタの設計、計算機シミュレーション、および実験をおこなった。モニタの形態はこれまでの実験や数値解析の結果を用いて決定し、ビームの通過位置を2次元で求められるように設計した。また、計算機シミュレーションと実験でビーム位置モニタとして機能することを確かめた。電子LINACのビームを用いた実験では、ビームの変位が $\pm 5\text{mm}$ の範囲では $0.5\text{mm}$ 以下の精度でビーム位置が求まった。

## 1. はじめに

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は、シンプルな平面構造で小型、低雑音、広帯域などの特徴を持ち、[1]で提案されて以来種々の形態で試作・実験が行われてきた。著者らは、実験とともに数値解析も併用し、相対論的な電子ビーム周辺の電磁界に対するスロットアンテナの動作原理の検討を行い、実用化を進めている。

これまでの数値解析では、単独のスロットアンテナによるビーム周辺電磁界の検出を解析対象として、検出感度や周波数特性などから適切なアンテナの形態を検討してきた<sup>[2]</sup>。本報告では、ビーム位置計測のために複数のアンテナを組み合わせたモニタを設計し、数値解析および実験でその性能を確認した。

## 2. ビームモニタの設計と解析

### 2.1 ビームモニタの設計

スロットアンテナの構造は薄い導体板上に設けたスロット(溝)であり、スロットを横断する方向の表面電流を誘起する電磁界に感度を持つアンテナである。相対論的な荷電粒子ビームの周辺に生じる電界は、ビームの電荷が静止している場合の静電界をビーム進行方向へ圧縮された様になるため、ビーム軌道に対して垂直な平面内で放射状の電界となってビームと共に移動する。したがって、ビーム周辺の電磁界を検出するためには、ビームの軌道に対し垂直に導体板を設け、導体板上でビーム軌道を中心とする円周方向にスロットを配置することになる。

このとき、電磁界の強度はビーム軌道からの距離に反比例するので、ビーム軌道を挟む位置にもスロットを配置し、それぞれのスロットで検出した電磁界の強度を比較することで二つのスロットを結ぶ

直線上での位置が求められる。直交する位置関係の2組のスロットを用いれば、平面内におけるビームの通過位置を知ることが可能であり、非接触型のビーム位置モニタとして機能する。

この場合、導体板にはビームが通過するための孔が必要となる。今回は、加速器から空気中に取り出した、直径 $10\text{mm}$ 程度の電子ビームを用いて実験することを考慮し、 $\pm 15\text{mm}$ の測定範囲を持たせるために直径 $40\text{mm}$ の円形のビーム通過孔とした。

ビーム周辺の電磁界の強度はビーム軌道からの距離に反比例するため、スロットはビーム軌道に近くに配置する方が検出感度が良く、ビーム位置の変動も敏感に出力に反映される。しかし、導体板表面に誘起される電流がビーム通過孔で制限されるため、スロットアンテナと通過孔の縁までの距離が検出される信号の周波数特性にも影響し、ビーム通過孔近くでは低周波数での感度が低下する<sup>[2]</sup>。マイクロパルスのパルス幅を $20\sim 30\text{ps}$ とすると、ビームが発生する電磁界のスペクトルは $0\sim 30\text{GHz}$ 程度となるので、[2]の結果を参考にスロットとビーム通過孔の縁までの距離を $5\text{mm}$ として、 $15\text{GHz}$ を中心に感度を持つようにした。

また、スロットアンテナは長さがおおよそ $1/2$ 波長となる周波数で共振するため、長さは $15\text{GHz}$ に合わせて $10\text{mm}$ とした。スロットに生じた電位差は、スロットの中央に直接細い同軸線路を接続して信号として取り出す構造にした。

### 2.2 数値解析による検討

前節の設計を元に図1に示す解析モデルで、相対論的な電子ビームを扱うFD-TD法<sup>[3]</sup>により電子ビームに対する出力信号を求めた。ビームは、エネルギーが $45\text{MeV}$ 、太さは十分細い線状ビームとし、進行方向には半値幅が $30\text{ps}$ のガウス波形をした電荷量 $50\text{pC}$ のシングルバンチビームとして解析を行った。

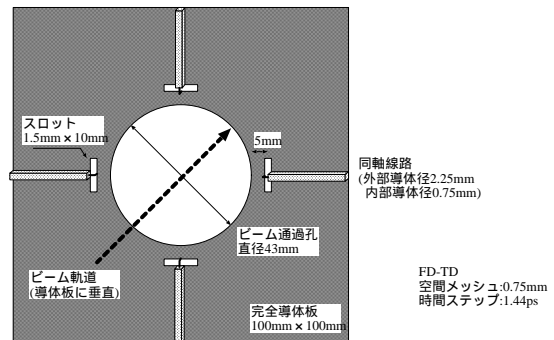


図1: 数値解析モデル

<sup>1</sup> E-mail: shu@qe.eng.hokudai.ac.jp

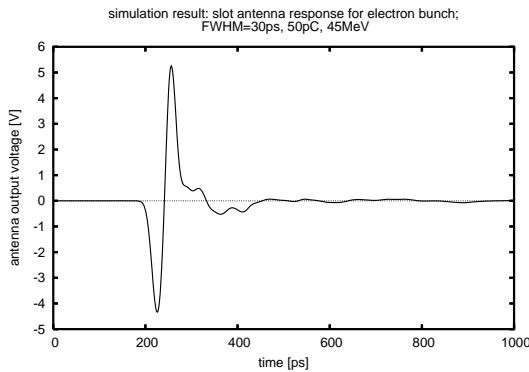


図2: モニタの出力波形(シミュレーション)

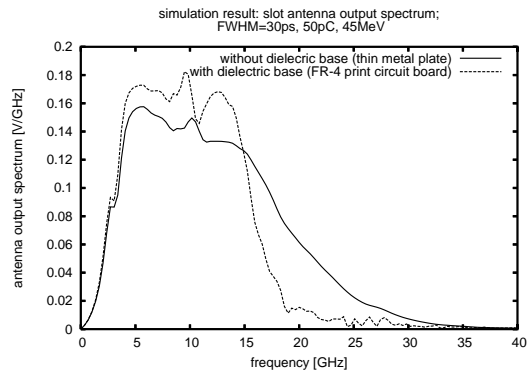


図4: 出力信号のスペクトル

ビームがモニタの中心を通過した場合に得られる出力電圧波形を図2に示す。出力電圧はスロットに接続した同軸線路の末端に線路とインピーダンス整合した抵抗負荷を接続し、その負荷にかかる電圧とした。始めにビーム周辺の電界により直接生じた負側のピーク、続いてビーム通過孔の縁へ電子ビームに引き寄せられていた正電荷がスロット側へ戻っていくことによる正側のピークが生じ、その後は急速に減衰する。スロットアンテナの共振とみられる振動が若干みられるが、負荷が接続されているためにダンピングされている。SバンドのマルチバンチLINACでは約350ps毎にマイクロパルスが並ぶが、このモニタはマイクロパルス毎の独立した信号が取り出せる高速応答性を持つモニタであることがわかる。感度は、マイクロバンチあたりの電荷量が50pCの場合で信号のピーク電圧が4V程度となり、十分な感度を有する。

次に、ビームの通過位置を水平方向へ移動し、水平方向にあるスロットアンテナの出力とスロットの中心からビームまでの距離の関係を示したのが図3である。縦軸は負荷抵抗で消費される電力であり、縦軸横軸ともに対数目盛で表してある。

このグラフの傾きから、スロットアンテナの出力電力は、ビームからの距離の $-2.1$ 乗に比例していることが読み取れる。これは、ビーム周辺の電界強度がビームからの距離に反比例していることと対応している。 $-2$ 乗から若干ずれるのはビーム通過孔の縁が影響しているためと思われるが、それぞれのアン

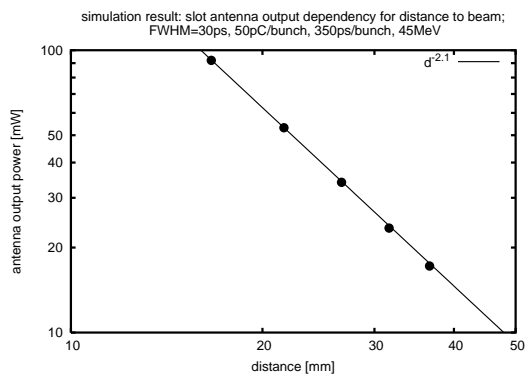


図3: ビームまでの距離とアンテナ出力の関係

テナが同じ特性を持っていればビーム位置測定の精度にはほとんど影響しない。具体的には、アンテナからの出力がビームまでの距離の乗に比例しているとすると、2つのアンテナの中間からのビーム変位 $x$ は  $x = d$  として  $x=(d/2) \times (v1-v2)/(v1+v2)$  で表される。ここで、 $d$ はアンテナ間の距離、それぞれのアンテナからの出力が $v1, v2$  である。

導体板としてプリント基板を用いると製作が容易であるが、誘電体基板の影響でスロットアンテナの共振周波数は低下する。入手が容易なガラスエポキシ基板 (FR-4) では比誘電率が4.4であり、共振周波数は1/2程度になる。そこで、スロットの長さを変えずに誘電体基板を用いた場合を解析し、出力電圧のスペクトルを比較した。(図4)

共振周波数が低下するため、アンテナの出力信号のスペクトルも低周波側へ移動し、15GHz以上のスペクトルが大きく減少するものの、スペクトルの大部分は15GHz以下にある。そのため、出力電圧の波形や出力電力とビームまでの距離の関係はほぼ同じであった。したがって、スロットアンテナをプリント基板上に作成しても導体板によるアンテナと同等な性能を期待できることがわかった。

そのほかに、ビーム通過孔を円形から矩形に変えた場合も解析したが、結果に大きな差異は生じなかったため、加工のしやすい通過孔を選ぶことができる。

### 3. 電子LINACによる実験

#### 3.1 実験体系・方法

解析の結果を参考にスロットアンテナによるビームモニタを製作し、ビームの通過位置を変えてモニタの出力から求めたビーム位置と比較した。実験体系を図5に示す。

製作したビームモニタは、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 1.6\text{mm}$  のプリント基板 (FR-4) の中心に直径42mmの円形ビーム通過孔をあけ、中心から26mm離れた位置に基板の辺と並行に4ヶ所のスロットを設けた。スロットは $1.5\text{mm} \times 10\text{mm}$  で、ビーム通過孔の縁から5mm離れていて、ビーム下流に向かってビーム軌道の上下左右に配置される。スロットには中央を跨ぐように外径2.2mmのセミリジッド同軸ケーブル (SR-2) をはんだ

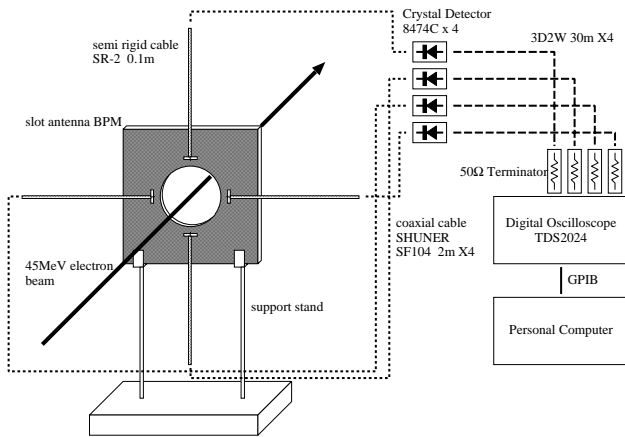


図5: 実験体系

づけで直接接続した。中心導体がスロットのビーム側(中心寄り)に接続される。

このビームモニタを、加速器のビーム取り出し窓から約300mm離して設置した。同軸ケーブルへ取り出された信号は、それぞれクリスタル検波器 (Agilent Technologies 8474C; 0.01-33GHz) を通してからデジタルオシロスコープ (Tektronix TDS2024; 2GS/s, 200MHz) でマクロパルスのエンベロープを記録しピーク値をアンテナの出力値とした。クリスタル検波器の入力電力と出力電圧の関係はCW発振器を用いて校正データを作り、検波器の出力電圧からマイクロ波入力電力へ換算した。

加速器は北大45MeV電子LINACを用いてマクロパルス幅10ns、繰り返しが10ppsの場合のビーム電流が15nAのビームを発生させた。この加速器の加速高周波は2855MHzである。ビームの通過位置は、加速器のビーム調整用偏向電磁石を調整しておこない、励磁電流とビーム位置の関係は、予備実験で蛍光セラミック板(デマルケスト)をビームモニタのビーム通過孔に重ね、ビデオカメラで確認した。

ビームモニタの中心から水平および垂直方向に5mm間隔で±15mmまでビーム位置を動かし、4つのスロットアンテナからの出力からビーム位置を求め、実際の位置と比較した。

### 3.2 実験結果

それぞれのアンテナの出力(マクロパルスのピークにおける電力値)とビームまでの距離の関係を図6に示す。製作精度の問題で、4つのアンテナの感度に多少の差異が生じている。上側と下側で1:1.03、左側と右側で1:1.3の感度比があり、ビーム位置を算出する段階で感度係数として補正する必要がある。また、ビームまでの距離に対して各アンテナの出力は $-1.5 \sim -1.6$ 乗で変化していて、ビーム周辺電界の強度や数値解析から予想される $-2 \sim -2.1$ 乗とはなっていない。ビームが直径10mm程度に広がっていることやプロファイルの影響と思われるが、上下および左右のそれぞれのアンテナの組で同じ距離依存性となっているので、ビーム位置の算出にはそれほど影響しない。

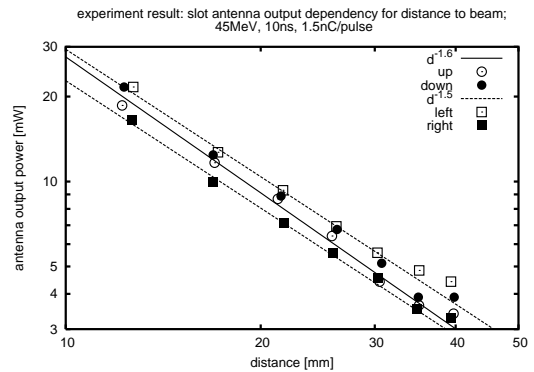


図6: 各アンテナの出力とビームまでの距離の関係

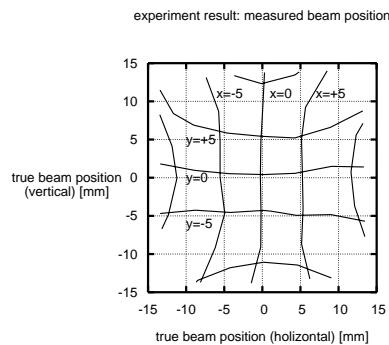


図7: モニタで求めたビーム位置

図7は、実際のビーム位置に対しモニタで求めたビーム位置を重ねた結果である。ビームがモニタの中心から±5mm程度の範囲であれば誤差は0.5mm以下であり、測定に用いたオシロスコープやビーム位置の確認に用いたビデオ映像の分解能を考慮すると十分な精度といえる。

## 4. おわりに

今回用いたモニタでは、信号を取り出すセミリジッドケーブルをスロットに直接接続しているため、この部分の製作精度が十分ではなく、それぞれのアンテナの感度差に現れてしまっている。そのため、マイクロストリップラインに置き換えることを検討中である。また、スロットの数を増やすことは比較的容易なので、ビームの位置だけでなくプロファイルに関する情報も得られるのではないかと期待している。

## 参考文献

- [1] T. Enoto, A. Endou, "Beam Position Monitor by Slot Antennas", Proceedings of the 10th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1985) 76.
- [2] S. Nisiyama et al., "FD-TD Analysis of Slot Antennas for LINAC Beam Position Monitor", Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, (2001) 364
- [3] S. Nisiyama et al., "FD-TD Analysis of Scattered Fields Excited by a High Energy Pulsed Beam of Charged Particles using Point Charge Responses", IEEE Trans. Magnetics, 36 (2000) 888