

[P 1 – 33]

CHARACTERISTICS OF THE SMALL SLOT ANTENNA AS AN ELECTRON BEAM MONITOR

Shusuke NISIYAMA, Hiroyasu ITOH, Satoshi TOMIOKA, Takeaki ENOTO

Division of Quantum Energy Engineering, Graduate school of Engineering, Hokkaido University
Kita-13jo Nisi-8chome Kita-ku Sapporo, Hokkaido, 060, Japan

ABSTRACT

In this paper, we have described the numerical analysis results of the characteristics of small slot antennas as a beam position monitor adjacent to a relativistic electron beam. We have also compared the numerical results with experimental results got by using an electron LINAC.

The numerical results show that slot antennas have sensitivity to acceleration microwave frequency, and are more sensitive to its higher order harmonics frequencies. They show also that the relation between the antenna output and the distance from the beam is apart from inverse proportion when the width of antenna plate is less than one wave length.

The experimental results can be explained using these numerical results.

小型スロットアンテナによる電子ビームモニタの特性

1. はじめに

高品位なビームが求められる加速器の調整、制御において、ビームモニタは重要な要素であり、特に運転中の監視やフィードバック制御が可能な非接触型のモニタは、様々なタイプのモニタが研究開発されている。著者らは、非接触型のビーム位置モニタとしてスロットアンテナを用いたモニタの研究を行ってきており、その諸特性を実験的に評価して、小面積のスロットアンテナでもビームモニタとして使用可能であることを示した [1]。また、スロットアンテナの適切な寸法や形状を検討するために、数値解析によるビームに対する応答のシミュレーションも行っている。

本稿では、数値解析によって明らかになったスロットアンテナの形状がビームモニタとしての特性に及ぼす影響を示すと共に、実際に加速器を用いた実験の結果との比較も行う。

2. 数値解析

数値解析は、図 1 に示す体系で行った。スロットアンテナは、中央に $3 \times 6\text{mm}$ のスロットがある厚さ 2mm の完全導体板とし、スロットの中心から $15 \sim 70\text{mm}$ 離れた位置を導体板に対して

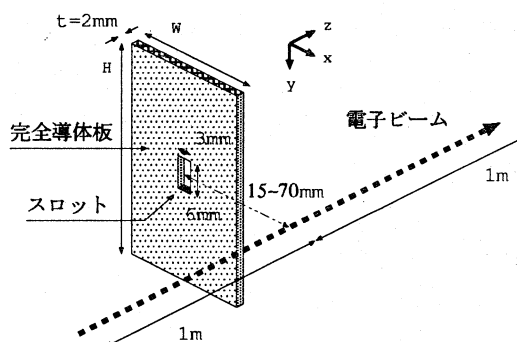


図 1: 解析体系

垂直に、ほぼ光速で伝播する線状電流が通過するモデルとした。アンテナの出力は、スロットの中心における短辺方向の電界強度で評価した。解析手法には 3 次元の境界要素法を用い、周波数領域での電界を変数とするヘルムホルツ方程式を解いた。

前回の本研究会では、スロットの長さや幅が出力の大小に関係するのみで、周波数特性やビームまでの距離に対する応答などには影響しないことを示した [2]。今回は、導体板の大きさを $12 \times 24\text{mm}$, $18 \times 36\text{mm}$, $24 \times 48\text{mm}$ とした場合について比較する。

2.1. 周波数特性

まず、周波数によるアンテナからの出力の変化を図2に示す。スロットの中心とビームまでの距離は40mm、ビーム電流の強度は全ての周波数で1Aとした。

スロットアンテナは、低い周波数に対してはほぼ一定の感度であり、ある周波数を境に出力が増加している。低周波側での感度は、導体板が小さいアンテナの方が高く、ほぼ大きさに反比例している。出力が増加しはじめる周波数は、導体板の幅が1/4波長となる周波数に対応している。導体板の幅、及び長さをそれぞれ独立に変えた場合の解析から、幅が支配的に影響しているという結果を得ている。高周波側の感度は、大きいアンテナの方が若干高いが、より高い周波数では、導体板の大きさに依存しなくなる。

LINACからの位相集積されたビームは、加速高周波の高次高調波成分を多く含んでいる。スロットアンテナは、そのような高調波成分の検出に適したモニタであるといえる。また、モニタ系の周波数特性が分かれば、ビームが放出する高調波成分のスペクトルからマイクロパルスの状態を推定することが可能である。

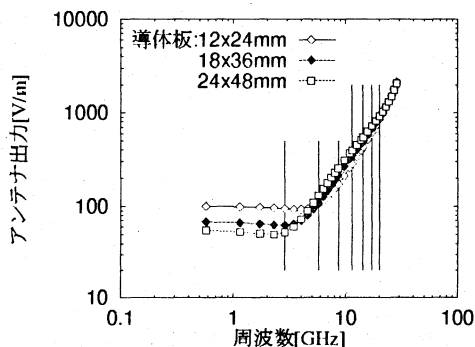


図2: 解析結果—周波数特性

2.2. 距離特性

図3は導体板の大きさが24×48mmのスロットアンテナについて、ビームまでの距離 r に対する出力の変化を両対数で示したものである。ビームが発生する電界の動径方向成分はどの周波数でも距離に反比例しているが、アンテナの出力は、特にビームまでの距離が近い場合に r^{-1} とはなっていない。図3のグラフの傾き、すなわちアンテナ

の出力を r^n に比例しているとしたときの n の値を r に対してプロットしたのが図4である。高い周波数に対しては、ほぼ -1 で一定であるが、導体板の幅が波長の $1/2 \sim 1/4$ となる周波数では、ビームに近付くにつれて n が 0 に近くなり、 r の変化に対する出力の変化が少なくなる。逆に、さらに低い周波数で、導体板の幅が波長の $1/4$ より小さい場合では、ビームの近くでは n が -1 よりも小さくなる。この傾向は、導体板の大きさが異なる場合でも同様である。

モニタの出力が A, B を定数として Ar^{-B} と表される場合は、2つのモニタの間にあるビームの位置は、ビームの強度などによらない簡単な式で表される。従って、図4は距離 r によらずほぼ一定となる方が望ましい。そのためには、加速高周波の波長と同程度以上の幅を持つ導体板を使用するか、フィルタにより低周波側の信号を減衰させてしまう方法が考えられる。

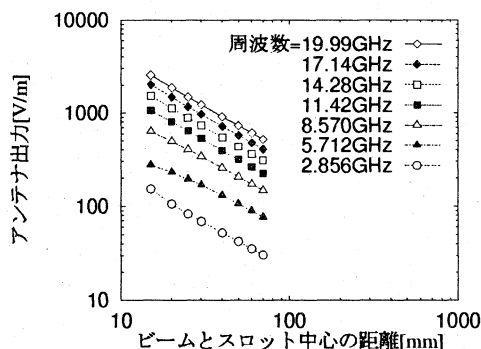


図3: 解析結果—距離特性

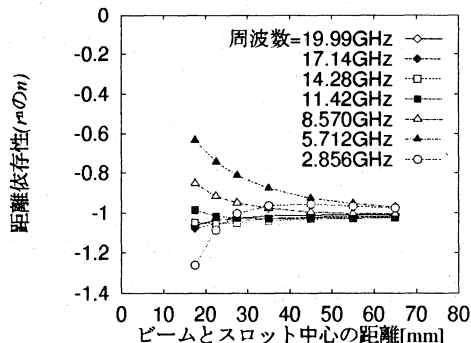


図4: 解析結果—距離特性(図3の傾き)

3. 実験

解析体系とほぼ同じ体系で、北海道大学45MeV電子LINACによる実験を行った。スロットアン

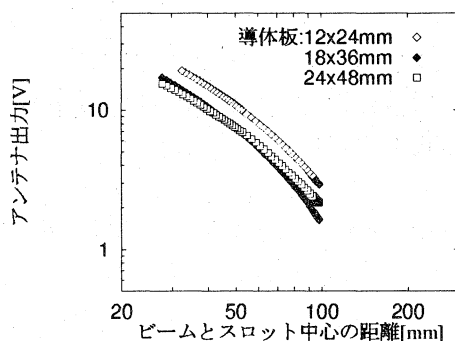


図 5: 実験結果—距離特性

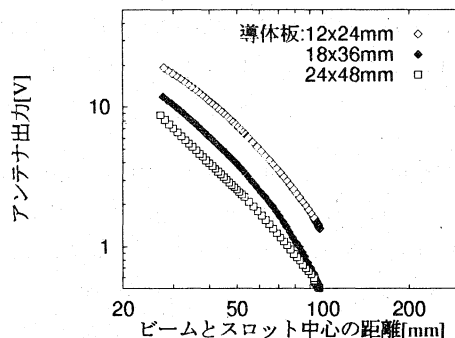


図 6: 実験結果—距離特性 (2 次高調波除去)

テナは、両面に銅箔が張られた誘電体基板 (厚さ 1.6mm:エポキシ樹脂含浸グラスファイバ) の片面にエッチング加工で作成し、裏側から SMA コネクタを介して、スロット両端の電位差を同軸ケーブルに引き出す構造である。裏側は全面銅箔なので、ビーム下流からの散乱電磁波の影響は受けない。また、スロットアンテナとビームライン先端の間 (60cm) は電波吸収材で囲んであるので、ビームからの直接の電磁波のみがアンテナで検出される。アンテナからの信号は、自乗検波特性を持つクリスタル検波器 (HP423B:10MHz~12.4GHz) によりマクロパルスエンベロープにしてから、そのピーク値を記録した。

加速器は、マクロパルス幅 $0.2\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 10pps、平均電流 440nA で使用した。加速周波数は 2856MHz である。

ビームの中心とスロットの中心との距離に対するアンテナの出力の変化を両対数グラフにプロットしたものが図 5 である。導体板の大きさが $12 \times 24\text{mm}$ のアンテナが他よりも約 1.5 倍の出力であり、 $18 \times 36\text{mm}$ と $24 \times 48\text{mm}$ はほぼ同

じレベルである。また、 $18 \times 36\text{mm}$ のアンテナは、グラフの傾きが他のアンテナに比べやや大きく、いずれのアンテナでもビームまでの距離が遠くなるに従い、傾きが増す。

検波器の前に加速高周波の 2 次高調波を除去するフィルタを挿入した場合は図 6 に示す結果が得られた。フィルタを挿入しない場合に比べ、 $12 \times 24\text{mm}$ のアンテナで出力が $1/3$ 、 $18 \times 36\text{mm}$ では $1/4$ 、 $24 \times 48\text{mm}$ では $1/5$ になっている。グラフの傾きはどのアンテナでもフィルタを挿入しない場合より大きくなっており、特に $24 \times 48\text{mm}$ のアンテナでは、ビームに近いところでほぼ一定の傾きになっていて、位置モニタに適した特性を示している。

検波器の特性や同軸ケーブルの損失を考慮すると、検波器の出力に寄与するのは加速高周波の高調波の 1~4 次成分、10GHz 程度までであり、低周波側の方が寄与が大きいと考えられる。解析結果 (図 2,3,4) と照らし合わせると、導体板が大きくなるほど 2.856GHz での感度が下がり、2 次高調波が出力に寄与する割合が大きくなることや、2 次高調波に対しては、ビームに近いときに r^n の n が 0 に近付くため、2 次高調波成分を除去すると n が増すことが説明できる。しかし、図 5,6 での傾きが、ビームから遠い場合でも変化していることや、傾きが -2 を越えていることなどは説明できない。この理由には、検波器の特性が自乗検波となっていないことやビームプロファイルの影響、ビーム取り出し窓や空気中で散乱された電子の影響などが考えられる。

4. おわりに

小型のスロットアンテナをビームモニタとして用いた場合の特性を、数値解析によって求め、実験の結果と比較した。今後は、ビームパイプ内におけるスロットアンテナの特性の解析や実験を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 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
- [2] S. NISIYAMA et al., "NUMERICAL ANALYSIS OF SLOT ANTENNA IN NEAR FIELDS," Proc. of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.248-250, 1995