HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スロット・アンテナを用いた電子線加速器電子ビームポジションモニターの研究
Author(s)	榎戸, 武揚; 吉田, 貴彦; 遠藤, 彰
Citation	北海道大學工學部研究報告, 139, 161-169
Issue Date	1988-02-20
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/42072
Type	bulletin (article)
File Information	139_161-170.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第139号（昭和63年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 139 (1988)

スロット・アンテナを用いた電子線加速器電子ビームポジションモニターの研究

榎戸武揚　吉田貴彦　遠藤　彰

（昭和62年9月30日受理）

A Study of Beam Position Monitors of Linear Electron Accelerator By using Slot Antennas

Takeaki ENOTO Takahiko YOSHIDA Akira ENDOC

(Received September 30, 1987)

Abstract

It became clear that microwave band slot antennas can be used as beam position monitors of linear electron accelerator. This monitor can be made easily and cheaply and is characterized by its' small size. Experimental results show that this monitor can be used for the electron beam with a duration from 10 nsec to 3 μsec. Changing the slot length and the shape of beam transit hole, cutting upon a conductive plate, the relation between output voltage of the slot antennas and beam position was improved. The electric field distribution obtained exprimetally is well explained theoretically, by using Lorents transform. Then, the beam position could be calculated accurately using the output voltage of both right and left slot antenna. It seems that the slot antenna is excited not only by the electromagentic field but also electro static induction on conductive plate by electron beams.

1. 緒　　言

Isingの最初の提案になる電子線形加速器は1928年のWideröeの2段加速の成功，1931年のLawrence, Sloanによる30段加速の成功で現実のものとなって以来，6年でエネルギーが10倍にもなる進歩を続けている。原子核物理学研究への応用のみならず最近は医療用及び半導体製造，非破壊検査用など全世界で3,000台余建設され工業用としても広く応用され始めている。これ等の幅広い研究分野での利用に於いて，電子線のビーム波形・ビーム位置を，実験と併用して非接触，実時間で測定出来るビームモニターの有用性は非常に高いと言える。

今日すでに開発されているビームモニターの主なものとしては，ピックアップ電極型，ピックアップコイル型，ウォールカレントモニター，そしてスクリーンモニターなどがある。筆者等は磁界に比べ強度が格段に大きい電界を検出することの利点に着目し，スロットアンテナを用いた新しい非接触型電子ビームポジションモニターを考案し，試作モニターの諸特性を測定し，精度よくビーム位置を測定出来ることを見出したので報告する。

2. 電 界 計 算

筆者等の提案するビームポジションモニターは，上下左右4つのスロットアンテナにより相対論的電子ビームの作る電界を検出し，それら出力電圧からビーム位置(X, Y)を非接触，実時間で求めるものである。スロットアンテナは，十分に大きい薄い導体板に細長い隙間を設けたもので，磁流ダイポールと等価なマイクロ波アンテナと見なせる。このスロットアンテナをビームポジションモニターに応用した場合，

1) 一枚の銅板を用いるだけで出来るため，安価で，製作が容易である。

2) 平面構造であるため場所をとらない。そのため，加速器の途中に設置でき，ビーム輸送の調整を容易にできるため，ビーム位置の自動制御が可能となる。

3) ノイズ帯域にたいしてはインピーダンスが低い為ノイズに強く，且つ高出力・広帯域である。従って従来のピックアップコイルに比べ短いパルス幅のビームを測定出来，又長パルス幅ビームでもサグの無い測定が可能である等の特徴を持つと期待される。

北大45 MeV Electron Linac電子ビームは，周期350 ps，バンチ幅数10 psの微細構造パルス列が集まって3 μsから10 nsのパルス幅を構成し，更にこのパルス群が10—200 PPSで繰り返している。理論解析はこの微細構造パルスを，総電荷量 q，長さ $2L$ のガウス分布した線状電荷［長さ2 L ($c\beta\tau$)］と見做し，一定速度 $v=c\beta$ で z 方向に運動しているとして電界を求めた（図1)。即ちLorentzゲージにおける電磁ポテンシャルを時間に関してFourier変換し，Maxwellの方程式から非斉次のHelmholtzの方程式を導く。この方程式の解で遠方で消えるもののみ採用すると，ガウス分布電荷群が，軌道 $z=v(t)$ を描いて運動する故，

$$dq(z')=\frac{q}{L}\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\mathrm{EXP}\left\{\frac{-2(z-vt-z')^2}{L^2}\right\}dz' \tag{1}$$

とする。この分布は，$z=\pm L$ で $e^{-2}=0.135$ に小さくなり，

$$q'=\int_{-L}^{L}d\ q(z')=0.954q \tag{2}$$

となる分布である。時刻tに観測点Pに作られる電界 E_x は，

$$E_x=\frac{x}{4\pi\ \varepsilon_0(1-\beta^2)^{1/2}}\int_{-L}^{L}\frac{d\ q(z')}{\left\{x^2+y^2+\dfrac{(z-vt-z')^2}{(1-\beta^2)}\right\}^{3/2}} \tag{3}$$

と表される。この式を z=vt として，Simpsonの積分公式を用いて数値積分して分布を求めた。

平均電流，繰り返し周波数，パルス幅を，それぞれ I_0[A], f[PPS], W[s] とすると，微細構造パルスあたりの電荷量 qは，

$$q[\mathrm{C}]=\frac{I_0}{2855*10^6*\mathrm{P}*\mathrm{W}} \tag{4}$$

である。また，電子線のエネルギーを E_n[MeV] とすると

$$1-\beta^2=\left(\frac{0.51}{0.51+E_n}\right)^2 \tag{5}$$

となる。

$I_0=60$[nA], $f=10$[PPS], $W=10$[ns], $E_n=45$[MeV] とし，バンチ幅 L を10 ps, 20 ps, 30 psとして，微細構造パルスの真横の観測定 $P(x,\ 0,\ vt)$ での電界 E_x を $x=10$ mm～100 mmについて求め，$x=10$～50 mmと，$x=50$～100 mmの領域に分けて最小自乗法により回帰曲線式を求め

表－1　電界分布の距離依存性

パルス幅	X＝10～50mm	X＝50～100mm
10pSec	$E_X=\frac{2.8*10^6}{\gamma^{1.14}}$	$E_X=\frac{8.8*10^6}{\gamma^{1.44}}$
20pSec	$E_X=\frac{1.2*10^6}{\gamma^{1.06}}$	$E_X=\frac{2.2*10^6}{\gamma^{1.22}}$
30pSec	$E_X=\frac{7.3*10^5}{\gamma^{1.03}}$	$E_X=\frac{1.1*10^6}{\gamma^{1.13}}$

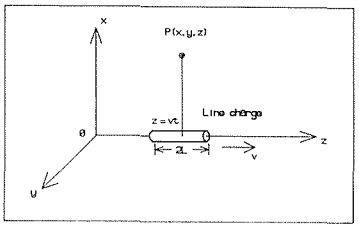


図 1　バンチングされた相対論的電子ビーム

ると，図 2，3 並びに表 1 のようになる。どのバンチ幅の場合でも，ビームに近い領域の方が $1/\gamma$ の分布に近いことがわかる。これは，ビームに近いほど観測点から電荷を見込む角度が大きくなり線状電荷としての性質がきわだつためと思われる。また前後の微細構造パルスは，時間にすると約 350 *ps* 離れていることから，それらからの影響は無視でき，電子ビームによって作られる電界は微細構造パルス 1 つによって作られる電界の繰り返しであると結論出来る。但し，後述のように周囲の境界からの反射等を考慮するときは，前の微細構造パルスの作る電磁界を考慮する必要がある。ここで微細構造パルスを，ビーム断面においてもガウス分布した線状電荷の集合と見なした場合の数値計算結果は，前述の断面内ではデルタ関数的と仮定した場合と比較し，ビームに近いところにおいては，電界強度，分布に多少違いがみられるが，50 mm 程度はなれるとそれほど違いはみられないので，ここではデルタ関数的分布と仮定した。

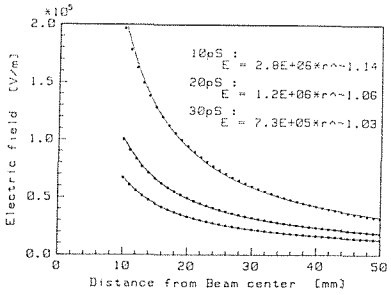


図 2　電子ビームによる電界分布 E_X：D_X＝10～50 mm（ガウス分布）

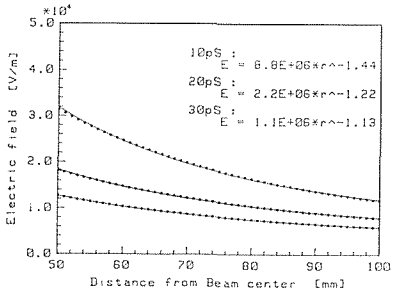


図 3　電子ビームによる電界分布 E_X：D_X＝50～100 mm（ガウス分布）

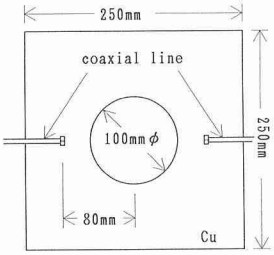
3. 実験結果

3. 1　モニターの形状

図 4 に示すように一枚の薄い銅板（250 mm * 250 mm：厚さ 0.2 mm）にビーム通過口（100 mmϕ）及び 4 つのスロットを開け，スロット中央には 50 Ω のセミリジット型同軸ケーブル（SR-3）を接続した。スロット長さは受信電磁波の波長 λ を微細構造パルス幅から推定して 6 mm，スロット幅は 3 mm とした。

3. 2　出力波形

本モニターをアクリルの枠にはめこみ，ビーム取り出し口から約 10 cm のところに設置した移動台の上に載せた。(図 5)，左右及び上下のスロットアンテナからの出力を 20 m 離れた中性子実験室のオシロスコープ(Tektronix 7104 Oscilloscope＋7A29 Plug-in［立ち上がり時間 350 pSec：



Slot size 6mm*3mm

図 4 マロットアンテナの形状

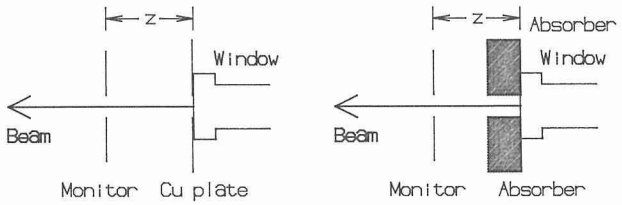


図 5 銅板あるいは電波吸収材を配置したビーム測定位置

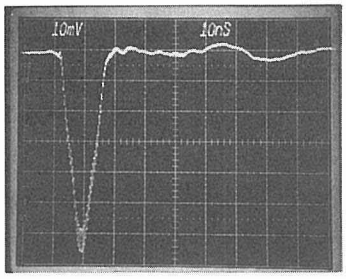


写真 1 10 ns ビーム

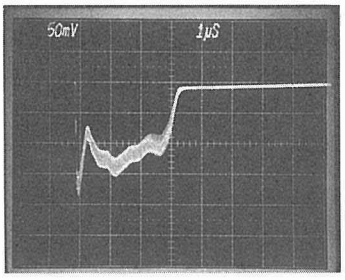


写真 2 3 μs ビーム

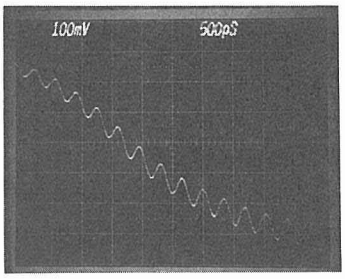


写真 3 掃引速度 500 ps/dw 時の波形

帯域 1 GHz]）で観測した。得られたパルス幅 10 ns, 3 μs 時の出力波形を，写真 1, 2 に示す。ノイズ，反射等による波形の歪はみられず，きれいな波形となっている。又オシロスコープの掃引時間を短くしてみると微細構造パルス 1 つ 1 つによる出力が観測できており（写真 3），本モニターの高速応答性，広帯域性が示された。尚この時間分解能の制約はオシロスコープ並びに 20 m の同軸ケーブルによる劣化である。図 6 に示すような自動測定体系を製作し，モニターは $X-Y$ ステージに載せ，パーソナルコンピューター（PC-9801＋PMC2）によりパルスモーターを駆動することにより，0.02 mm/step の精度で二方向に移動することができる。各スロットアンテナからの出力は，自乗検波特性を有するクリスタル検波器（Hewlett packard 423A）を通して約 20 m 離れたデジタルストレージオシロスコープ（岩通 TS-8123）に接続されている。オシロスコープでデジタル的に記録された出力波形は GP-IB を経由してパーソナルコンピューターに転送される。以上の測定体系により，ビーム位置とその位置での出力電圧（ピーク値）が“Auto data acquisition program”により同時に得られ，その結果ビーム位置が推定される。

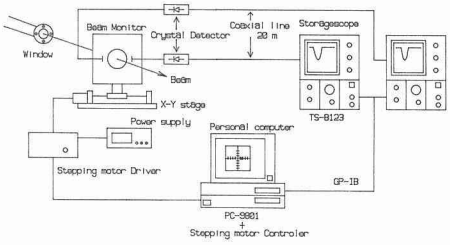


図 6 測定体系図

本測定体系に於いては実際にビームを振って位置を移動させる方法と，その代わりに，モニターを載せたステージを移動させることによってビーム位置を変える 2 通りの測定を実施した。結果に大きな違いは見られなかったのでここではモニターを移動した測定結果について以下に記述する。ビーム中心がモニターの中心を通る位置までのステージ移動距離はセミリジット型の同軸ケーブル（SR-3）を用いて製作したビーム中心検出器を用い，出力が最大となる点をビームの中心がモニターの中心を通るときであると見なし，そのときの移動距離 Lc を求めビーム位置 $X=O$ と決める。以後ビーム位置 X は，ステージ移動距離を L とすると，$X=Lc-L$ として求められる。

3. 3　ビーム通過口の大きさ，形状

ビーム位置とスロット出力関係はビーム通過口の大きさ，形状に依存した。ビーム通過口が50 mm* 50 mm の四角形，50 mmϕ の円形，75 mmϕ の円形の3つの場合について測定したところ50 mm* 50 mmの四角形，50 mmϕ の円形を比較すると，円形の方がビーム位置が負であるところ，つまりビームがスロット寄りのところでは出力電圧は高く，正であるところでは低くなっている。そして曲線の形に違いがみられる。また，50 mm* 50 mm の四角形の場合と75 mmϕ の円形の場合を比較すると出力電圧は50 mm* 50 mm の四角形の方が全般的に大きいが，曲線の形は似ていることがわかる。このことから，それらの違いはビーム通過口の形状には余り依存せず通過口の面積，つまりビームと通過口周辺銅板との距離に依存すると結論出来る。

モニター中心からスロットまでの距離はどの場合についても同じであるので，ビーム位置が同じであるなら，スロットとビームとの距離はどの場合でも等しくなり，同じ出力電圧が得られると期待される。にもかかわらず，上のような結果が得られたことから，出力電圧には電子ビームによるビーム通過口周辺銅板への静電誘導，及び解析では無視しているビームからの近傍界も寄与していると結論できる。つまり，ビーム通過口の大小，すなわちビームとビーム通過口周辺銅板との距離の違いが，ビームによって銅板上に誘導されるイオンの数に差をもたらし，その差が出力電圧に影響していると言える。ビームがスロット側の銅板に近づくとき，(ビーム位置が負)，その効果は出力を増大させる方向に働き，逆側の銅板に近づくときは，減少させる方向に効いていると考えられる。ビーム通過口を大きくして行けば，ビームとビーム通過口周辺銅板との距離も大きくなり，静電誘導の影響は小さくなると考えられる。そこで，ビーム通過口を50 mm，60 mm，70 mm，80 mm，90 mm，100 mmϕ と10 mm 間隔で大きくしていき，それに伴う出力特性の変化を調べた。

結果を，図7に示す。スロットからの出力電圧は，同様な傾向がみられるが，90 mmϕ，100 mmϕ を比べると，それほど違いがみられず，ビーム通過口を100 mmϕ ぐらい大きくすれば数波長分離れることになり，ビーム周辺銅板への静電誘導の影響，近傍界の影響は無視できると言える。

3. 4　モニター中心とスロットとの距離

ビーム通過口の大きさを変えることにより出力電圧に変化が見られたことから，出力はビームとビーム通過口周辺銅板との距離だけに依存するのではないかと懸念される。そこで，通過口の大きさは100 mmϕ に固定し，モニター中心からスロットまでの距離を60 mm，80 mm，100 mmと変えて実験を行った。結果をビーム位置と出力電圧の関係として示すと，ビームからスロットまでの距離と出力電圧の関係として示すと図8になる。明らかに3つの場合で違いがみられることから，出力電圧はビーム通過口の大きさだけでなく，モニター中心からスロットまでの距離，

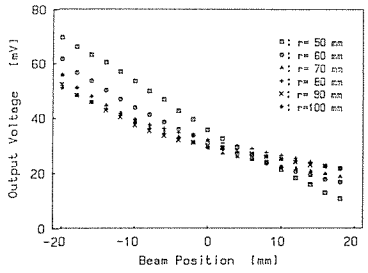


図7　ビーム通過口大きさによる出力特性変化

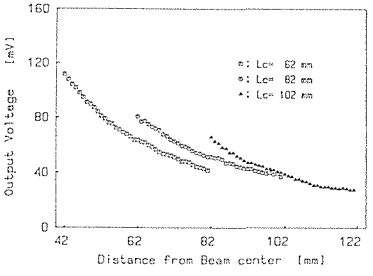


図8　スロット位置による出力特性変化

つまりビームとスロットとの距離に依存し，同時にビームからスロットまでの距離が同じでも出力に違いが見られる。この違いの部分がビームによる通過口周辺銅板への静電誘導，近傍界の寄与によるものであると言える。

3. 5　周囲金属の影響

ビーム取出窓からの距離の違いによっても出力特性は変化するがこれは周囲金属特にビーム取りだし窓とスロットアンテナとの間の定在波として説明出来，図5右のごとく電波吸収材を置くことにより減衰する。即ち，ビーム位置 X を固定し，ビーム進行方向(Y 軸)に平行に，モニターを取出窓側から徐々に移動させ，その距離による出力の変化を観測した。結果を図9，10に示す。前者は反射電波による効果を助長する目的で，ビーム取出窓に大きな銅板を張り付け，その銅板からの距離による出力の変化を観測した。後者は、モニターとその銅板間に電波吸収材を挿入し多重反射の影響を取り除いた結果である。電波吸収材を挿入した場合において，距離が小さいところで出力が大きく低下しているのは，その距離では電波吸収材に非常に近いために，遅延ポテンシャルによる場も吸収されたためであると考えられる。また，距離と共に出力が少しづつ上昇しているのは，ビームの広がりによる影響，ビームの進行方向に対するモニターの移動方向が完全に平行でないことによるものであると思われる。この二つの実験から，周囲金属の影響が非常に大きく，スロットからの出力電圧にはその周囲金属との間での電磁波の多重反射による成分が含まれていることが明らかとなった。

ビーム取出窓等周囲金属との間で多重反射した電磁波の影響を除去した場合とそれがある場合の，出力電圧のビームとの距離依存特性は最小自乗法により，それぞれについて回帰曲線式を求めると，

$$V=\frac{5.29*10^4}{r^{1.60}} \quad \text{(吸収材なし)}$$

$$V=\frac{3.69*10^5}{r^{2.13}} \quad \text{(吸収材あり)} \qquad (6)$$

となる。多重反射した電磁波の影響を除去した電界分布は，自乗検定器を使用していることから，(6)の平方根を取り，$1/r^{1.46}$ に比例することがわかる。これは，理論解析で微細構造パルスの幅を10 psとして計算した結果と良く一致し，これとは別に定在波分布の周期から推定した結果にも近い値となっている。

図6に示す測定体系で，2台のデジタルオシロスコープ(TS-8123)を用い，左右のスロットからの出力を検波器を通して各々に同時に記録し，それらの出力電圧から計算式によってビーム位

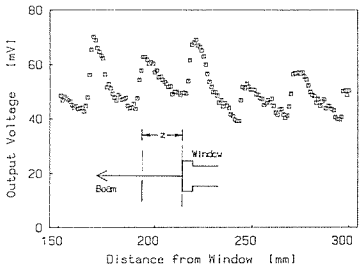


図 9　ビーム取出窓からの距離による出力特性変化（銅板設置）

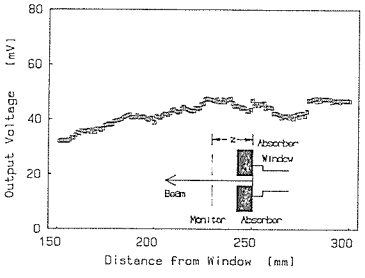


図 10　ビーム取出窓からの距離による出力特性変化（電波吸収材設置）

置 X を算出し，コンピューター CRT グラフィック画面上に約 10 秒間隔でビーム位置を表示するシステムを構成した。この時間間隔は，ほとんどがデジタルオシロスコープの書き込みに要する時間に起因するものである。このシステムについて，絶対的ビーム位置算出誤差，及びそれぞれのビーム位置 X_1 での変動誤差についての評価を行った。偏差の原因としては，主としてビーム自身の変動と，オシロスコープの読み取り誤差の 2 つが考えられるが，ここではほとんどがオシロスコープの読み取り誤差（量子化の際の誤差）に起因するものであると結論できた。より高精度の A/D 変換器の開発により，これらの偏差は更に小さくすることができるものと期待される。

3. 6　ビームポジションモニター特性

ビーム位置の変化に伴うモニターの出力特性について調べた。結果を図 11 に示す。左右それぞれの出力についてその回帰曲線式を求めると

$$V_R=\frac{1.403*10^5}{r^{2.00}}\quad V_L=\frac{7.682*10^4}{r^{1.86}} \tag{7}$$

となり，これから，V_R, V_L とも $1/r^2$ に比例すると仮定し，ビーム位置 X について解くと，

$$X_c=82-\frac{162}{1+\left(\frac{1.401*V_R}{1.381*V_L}\right)^{1/2}} \tag{8}$$

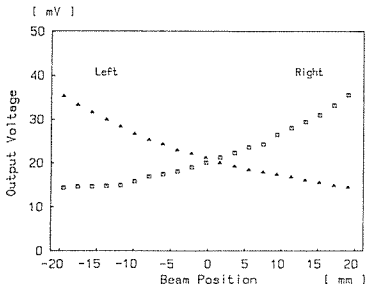


図 11　ビーム位置変化にともなう左右のスロットアンテナ出力特性

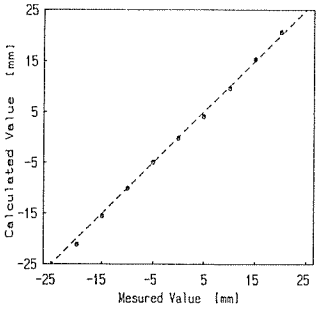


図 12　ビーム位置変動実測値（横軸）と本測定法に基づくビーム位置推定値

この式から明らかになるように，ビーム位置 X_c は左右の出力電圧の比 V_R/V_L だけによって求められそれらの絶対値には依存しないため，ビーム位置はビーム電流値には依存することなく求められる。結果として実際に与えたビーム位置の移動距離（測定値）と（8）式に基づき推定した位置の計算値との関係を図 12 に示す。結果は 45 度の直線上に乗っており，±1.0 mm の誤差で位置が推定出来ることが求められた。この誤差は略 A/D 変換器の精度に依存しており，結論としてビーム位置を精度よく求められたと言える。

4. 結　　論

新しいタイプの非接触型ビームモニターとして，スロットアンテナを用いた電子ビームポジションモニターを試作し，その出力特性を調べ，位置推定の実用性を評価した。

理論計算では，電子ビームの作る電界強度分布は微細構造パルスの幅を 15 ps とすると，距離 r の $1/r^{1.4}$ に比例することがわかり，モニターからの出力もそれに比例したものが得られたが，この

値はビーム通過口，スロット長，スロットの位置などのモニターに形状，モニターの設置位置(周囲金属の影響）の違いにより変化がみられた。スロットアンテナからの出力はスロットとビームとの距離に関係すると共に，ビームによるビーム通過口周辺銅板への静電誘導，近傍界による寄与，特に周囲金属の影響が大きいことが明らかとなった。今後は，周囲の境界条件をも考慮した電子ビームの作る場の詳細な解析(ウエイクフィールド，放射場)，スロットアンテナの過渡応答解析等に基づいたこれらの出力特性の理論解析が必要である。デジタルストレージオシロスコープ2台を使用したシステムを構成し，ビームポジションモニターの，ビーム位置算出誤差は±1.0 mm 以内，標準偏差 0.4 mm 未満という良い結果を得た。この偏差は，オシロスコープの読み取り誤差(量子化誤差)によるものであることが示された。将来的には D/A 変換器を加えることにより，本モニター信号を利用したマグネット電流制御によるビーム位置自動制御が可能となる。

最後に，本研究を遂行するに当たり，北海道工学部原子工学科，諸住　高教授，片山明石教授，施設の皆様方には貴重な御指導，御援助を賜りました。また電気工学科，深井一郎教授には検波器の特性測定を始め数々の御援助を賜り深謝申し上げます。電子工学科，故鈴木道雄教授には解析法始め多くの御指導を賜りました。先生の御冥福を心から御祈り申し上げます。

参 考 文 献

1) T. A. TUMOLILLO, J. P. WONDRA, W. E. HOBBS, K. SMITH, "THE RADITED ELECTROMAGNETIC FIELD FROM COLLIMATED GAMMA RAY AND ELECTRON BEAMS IN AIR", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-27, No. 6, December 1980, p 1851～1856.
2) T. ENOTO, A. ENDOH, "BEAM POSITION MONITOR BY SLOT ANTENNAS," Proccedings of The 10th Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN 東北大学核理研研究報告 Vol. 18, 1985, p 76-78.
3) A. ENDOH, T. YOSHIDA, T. ENOTO, "A STUDY OF BEAM POSITION MONITOR BY SLOT ANTENNAS," Proccedings of The llth Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN, KEK-Report 86-4, August 1986 p 174-176.
4) 遠藤，吉田，榎戸，"スロットアンテナを用いた電子ビームポジションモニターの検討"，電子通信学会技術研究報告，Vol. 86 1986, p 31～36.
5) 吉田貴彦昭和61年度卒業論文"ホーンアンテナによる電子線形加速器電子ビームからの放射電磁界に関する研究"
6) C. E. SWARTS, "The Control System. Part-IV-Pickup Electrodes," THE REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 24. Number 9. September 1953, p 851-853.
7) W. J. SZAJNOWSKI *et al.*, "ION BEAM CO-ORDINATE MONITOR," ELECTRONICS LETTERS 14th August 1980, Vol. 16 No. 17, p 674-675.
8) T. YAMAMOTO *et al.*, "REAL TIME BEAM POSITION MONITOR (II)", Proccedings of The 8th Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN, 第8回リニアック研究会報文集 july 1983, p 163-165.
9) T. YAMAMOTO *et al.*, "BCM OF ROGOWSKI COIL," Proccedings of The 9th Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN, 第9回リニアック研究会報文集 July 1984, p 60～62.
10) T. OZAKI *et al.*, "DEVELOPMENT OF SHORT PULSE BEAM MONITOR," Proccedings of The 9th Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN, 第9回リニアック研究会報文集 July 1984, p 57-59.
11) De Kang LIU, "IMAGE PROCESSING SYSTEM FOR ELECTRON LINAC BEAM DIAGNOSIS," Proccedings of The llth Meeting on LINEAR ACCELERATOR IN JAPAN, KEK

-Report 86-4, August 1986, p 183-185.
12) 熊谷寛夫編集『加速器』実験物理学講座 28.
13) ファイマン, レントン, サンズ著『ファイマン物理学』III, IV 岩波書店.
14) 砂川重信著『理論電磁気学』紀ノ国屋書店
15) R. E. COLLIN, F. J. ZUCKER,『ANTENNA THEORY』Part I, McCraw -hill Book Company.
16) J. A. NATION, W. L. GARDNER, "AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MICROWAVE RADIATION EMITTED BY A HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ELECTRON BEAM", NUCLEAR FUSION 11 (1971) p 5～14.
17) B. J. EASTLUND, " THEORY OF COHERENT CHERENKOV RADIATION PRO- DUCTION BY HIGH-INTE NSITY ELECTRON BEAM", NUCLEAR FUSION 11 (1971), p 15～23.