

Study of Beam based Alingment for Accelerator Structure

M. Kagaya and H. Hayano*

Tohoku-gakuin university

1-13-1, Chuo, Tagajyo, Miyagi 985 Japan

*National Laboratory for High Energy Physics

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

Abstract

One of the major problems facing a linear collider design is the preservation of the transverse emittance. In most designs, the structures must be alignend with an accuracy of the order of microns. This would be extremely difficult to achieve and maintain with a mechanical alignment system. The object of a structure-BPM is direct measure of a beam position to a structure in this accuracy . This study describes the beam experiment of the structure-BPM using 3m accelerating structure of S-band.

加速管のビームに対するアライメントの研究

1. はじめに

加速構造がビームに対して横方向にずれている時、wakefield (ビームによって起こされる電磁波) が加速管での各モードの電場に対して非対称となるため、ビームを横方向に蹴るモードが励起される。このモードの影響で後からくるバンチが蹴られ、エミッタンスの増大やバンチの振動を引き起こす。また、そのバンチ自身も自らの非対称なwakefieldの影響を受ける。そのため、加速管は、正確にビームが加速管中心軸上を通る様にアライメントする必要がある。現在考えられる光学機器や機械的方法によるアライメントでは限界があり、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の精度を得ることは困難であると思われる。そのためビームを直接使用したアライメントが考えられている。ビームを使用した加速管のアライメントの一つの方法として加速管にビームポジションモニター (BPM) を直接取り付け BPM でビーム位置を測定することでビームが加速管中心を通るように調整することが考えられている。この場合 BPM による絶対的な位置の測定精度と BPM を加速管に取り付ける時の精度が問題となる。もう一つの方法として加速管にビームが通るときに加速管内に発生する二重極モードの TM110 モードを検出して加速管の位置を直接検出する事が考えられている。この方法は、加速管内に発生するエミッタンス増大に直接寄与する励振モードを抑える様にアライメント調整を行うもので、より直接的である。本稿では、後者の加速管の TM110 モード測定の実験を行ったため、その結果について報告をする。

2. TM110 モードによるビーム位置測定

ビームが通過した時の TM110 モードについて考えると完全な半径 R の円形導波管型共振器での TM110 モードの位置 (r, θ) での電場は

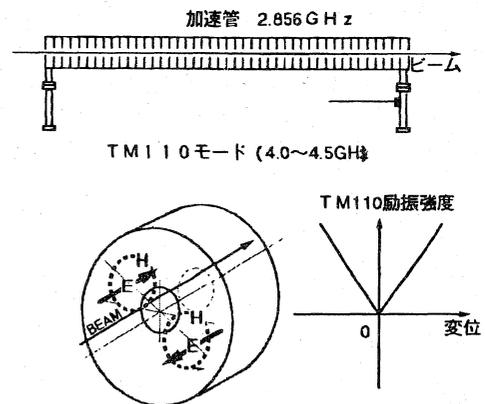
$$E_r = 0$$

$$E_z = kJ_1\left(\frac{\rho_{11}}{R}r\right)\cos\theta$$

とかげ r が R に対し小さいとき、すなわち空洞中心付近では、

$$E_z = K \cdot r$$

で近似できる。従ってビームによる TM110 モードの励振は中心からの半径位置 r に比例する。すなわち、励振される TM110 モードの大きさは、ビームが空洞の中心からずれた距離に比例する (図1参照)。従って加速管からの TM110 モードの振幅の検出を行えばビームの中心からのずれた距離がわかる。



TM110モードの励振強度はビームが通る中心からの距離に比例する

図1

3. TM110 モードの検出と加速管アライメントへの応用

加速管内の TM110 モードを検出する際、特別なピックアップを使用する事なく行うため、導波管結合器を介して導波管部へ出てくる TM110 モード信号を検出する方法を採用した。TM110 モードは直交する2つの TM110 モードで表せ、加速管の導波管への結合部に対称のモードとそれに直交するモードが存在する。ATFの非対称結合器付加速管は結合部がビーム進行方向に対して左側にあり、ビームの横方向のずれによって励振される TM110 モードは導波管の基本モードの TE10 モードと結合する。また縦方向のずれによって励振される TM110 モードは、

が、TE₂₀モードのカットオフ周波数4.17GHz以上の周波数でなければならない（非対称結合器型加速管）（図2参照）。導波管からの信号の取り出しにはベータホール結合器を用いた。ベータホール結合器は、導波管にセラミックの窓を備え、そこから出される電磁場をアンテナで取り出すというものである。

加速管の結合器は導波管を伝わる電磁波のエネルギーを加速管に導く、又は加速管から導波管にエネルギーを導くものである。通常の加速管の導波管との結合部は、入力結合器、出力結合器共に片側だけに結合部がある。この場合、電磁場は結合部の穴のために非対称となり、ビームに悪影響を及ぼす。これを解決したものが対称結合器である。従って、TM₁₁₀モードにおいても非対称結合器付セルでは電磁場が非対称となり、電場の中心は結合部側にずれ、セルの中心をビームが通ってもTM₁₁₀モードは励振される。対称結合器付のセルは、空洞の構造が中心軸に対して対称になり、TM₁₁₀モードの電磁場も対称なものとなり、ビームが中心を通る時はTM₁₁₀モードは励振されない。ビーム実験で使用した対称結合器型加速管は、結合部が上下にあり、縦のモードに対しては、導波管への結合が電場、磁場共に強い部分での結合となるため、強い伝達をされると考えられる。又、横のモードでは、電場、磁場共に最も弱い部分での結合となり、伝達も弱いと考えられる。導波管での伝達は縦のモード、横のモード共にTE₁₀モード及び、4.17GHz以上では、それにTE₂₀モードが考えられる。本研究ではこの両方の結合器タイプによる実験を行った。

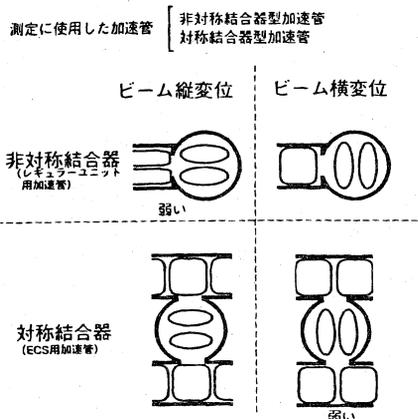


図2

4. 実験方法

実験に使用した部分では、加速管、BPM、Qマグネット、ステアリングマグネットが配置されている。これらのコンポーネントのアライメントはテレスコープを用いて行われ、アライメント誤差は50 μ m以内に収められている。ビームは測定する加速管をBPMを使用して $\pm 300\mu$ m程度の精度で中心を通る様に調整された。TM₁₁₀モードの検出には加速管入力結合器、出力結合器に接続される導波管に取り付けられている方向性ベータホール結合器から行い、20mの10D相当の位相安定化ケーブルを使用してトンネル外に信号を運び、ゲイン40dB帯域50KHz \sim 4.2GHzの出力27dBmのRFアンプを介してスペクトラムアナライザー（HP8753E）に入力させた（図3参照）。このスペクトラムアナライザーはゲート機能がついておりビームと同期した外部トリガーを入力することで常にビームに対して同じタイミングで信号検出ができ、ゲートが閉じているときは検出しないため、パルス性信号に対してS/Nを向上させることができる。実験に使用した方向性ベータホール結合器は、加速管入力側の導波管に取り付けられているものでは、2.856GHzで導波管を伝わるTE₁₀モードに対してRFの加速管反

射波をみる向きの結合器であり、2.8GHzではほぼ反射波のみの検出、すなわち加速管から出て来る向きの波のみ

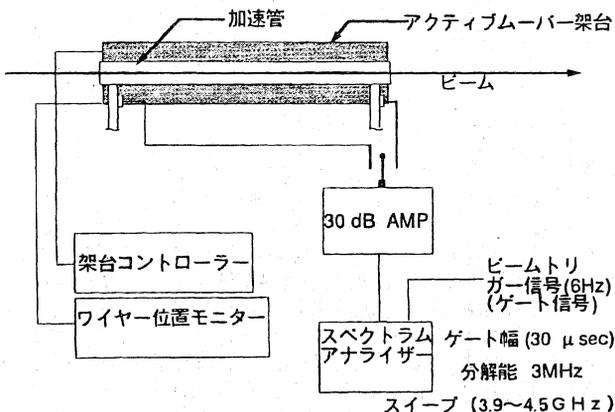


図3 測定方法

の測定を行うためのものである。出力側に取り付けられている側の使用した方向性ベータホール結合器は、加速管からの進行波の検出を行うためのものであるが、これも同様に加速管側から出てくるTE₁₀モードの検出を、2.856GHzにおいて方向性を持って行うものである。このTE₁₀モードの2.856GHzでの結合度は-70dBである。実験で測定する周波数は3.9GHz \sim 4.5GHzであるが、TE₁₀モードの検出では、磁場、電場の両方の結合からの検出が同位相の重ね合わせた分として出てくるため検出感度は高いものと考えられる。ダイポールモードのTE₂₀モードについては、方向性ベータホール結合器の結合する位置がこのモードのダイポールの中心の電磁場の弱いところにあることと、アンテナであるストリップラインの長さや波長及びダイポールとして取り出すことから考えて、非常に弱い検出感度と考えられる。

5. ビーム実験

測定実験は初めに水平ステアリングマグネットとビーム軌道を水平方向に変位させ、入力結合器側のベータホール結合器（導波管に信号を取り出すためのセラミックの窓がありそこから出てくる電磁波を検出する。）からの信号をスペクトラムアナライザーで観測した。ビームを変位させるとその周波数からTM₁₁₀モードと思われる多数のピークが大きくなるのが確認された。次にビーム位置と各ピークの間隔をみるために水平ステアリングマグネットの電流値を変え、それぞれの電流値の時のスペクトラムピークにおける電圧の測定をおこなった。この時のビーム位置変化は角度変化を伴う。ビーム位置とステアリングマグネットの電流値には比例関係があり、ダイポールモードであるTM₁₁₀モードの発生電圧はビームの中心からのずれに比例関係にあることから加速管に対するビーム位置とTM₁₁₀モードの信号強度の関係のグラフは、線形のV型になり、極小点ではほぼ0になることが予想された。測定の結果を図4に示す。図4ではグラフの形状はV型になっているのがみられる。

ビームが加速管を通りぬける時、加速管のTM₁₁₀モードの成分の電磁場が加速管の各セルで残る。このTM₁₁₀モードを加速管のカップラーセルから観測しようとする、それぞれのセルからのダイポールモードの伝達による重ね合わせの量として観測される。それぞれのTM₁₁₀モードからの波は、カップラーセルにそれぞれの位相（時間変化を伴った）で伝わってくるものの重ね合わせとなり、ビームが加速管の各セルのTM₁₁₀モードの電場中心から等しい比で距離が変化しない場合ビーム軌道

変化に対して複雑な変化を示すと考えられ、グラフの形状に凹凸が大きいものは、その影響と思われる。次に縦方向のモードの検出を見るため、パーティカルステアリングマグネットでビームを縦方向に変位させた時の実験を行った。結果、縦方向のモードの検出が行われているのはV形の応答が得られた事から明らかであった。これは導波管の伝達可能なダイポールモードに加速管で発生した上下方向のTM110ダイポールモードとの結合があるため検出ができたものと考えられる。

次に、ステアリングマグネットの電流値をビームが加速管に平行になるような値に固定し、アクティブムーバーにより架台をビームに対し平行に動かし、加速管に対する平行なビーム変位に対するスペクトラムの変化を測定した(図5参照)。これらの結果から、縦、横、両方に感度があることが確認されたが加速管をビームに対しムーバーで平行移動させた変位の幅2mmでのスペクトラムの強度の変化に比べステアリングマグネットでの変化によるビームの位置変位(1.6mm)での変化が明らかに大きい(図4、5参照)。このことから加速管とビームとの角度の影響は、かなり大きいことがわかる。

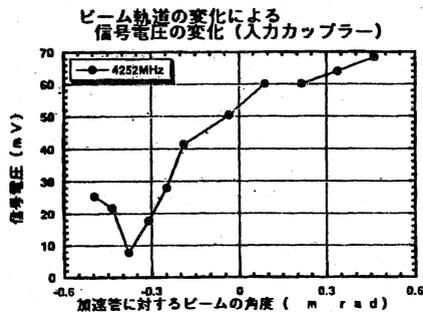


図4 ホリゾンタルステアリングマグネットによるビーム軌道変化による信号電圧の変化

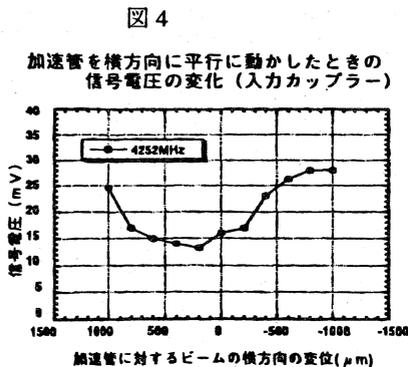


図5 アクティブムーバーにより横方向に加速管(レギュラーユニット)を動かした時の変化

対称結合器型加速管においてはビームを固定し加速管をアクティブムーバーで動かした時の測定のみを行った。この時加速管のセル数は86であるが、この内二つは対称結合器付のセル(カップラーセル)である。測定の結果、加速管に対するビーム位置と信号強度の関係は、非対称結合器型加速管と同様に位置-信号強度のグラフがV型になる事が確認された。ビームが加速管の中心を正確に通る、ビーム位置ジッターがなければ、非対称結合器付のセルではTM110モードの励振がおきるが、対称結合器付セルでは、電場の対称性が加速管セルと同様に対称であるため励振がおきないはずである。そのためTM110モードの信号の最小値が非常に小さくなり、中心付近では、高い分解能が得られる事が考えられたが、ビーム位置ジッターが全幅で300 μmあり、今回の方法による実験では、確認できなかった。

測定結果

	非対称入力結合器型加速管 (レギュラーユニット用加速管)	対称入力結合器型加速管 (ECS用加速管)
位置感度(縦)	15μV/μm	1μV/μm
位置感度(横)	13μV/μm	未測定
位置不感帯(縦)		280μm
位置不感帯(横)	380μm	未測定

(注意) レギュラーユニットとECS用ではカップラーの関係が縦横逆である。

但し
 ビーム位置ジッター 300μm
 ビームサイズ 1mm
 ビーム強度 $1 \times 10^{10} e^- / \text{Single bunch}$
 ビーム強度ジッター 2%
 スペクトラムアナライザ
 のノイズレベル 4μV
 の時

表1

6. 実験結果と考察

実験の結果をまとめると表1の結果を得た。検出信号の強度の幅から位置の測定限界以下になる様な領域が存在するが、これを位置不感帯と定義する。実際にはビーム位置ジッターにより位置変化が識別できない領域が、位置不感帯となる。位置不感帯は、測定した信号のジッターから求めた物であり、ジッターによる信号電圧変化範囲をグラフ上で表し、信号電圧に対してとりうる位置の範囲として位置不感帯(分解能)を出した。この不感帯は、ビーム位置ジッター全幅300 μmとほぼ同値であることから、ほとんどビーム位置ジッターによるものと考えられ、ビーム位置ジッターがなければ、スペクトラムアナライザのノイズレベル4 μVに相当する300 nm程度の分解能になることが考えられる。以上の測定の条件は、ビーム位置ジッターは全巾で300 μm、ビーム強度ジッターは全巾で2%、ビームサイズは約1mm、ビーム強度は $1 \times 10^{10} e^-$ (シングルバンチ)、測定時のスペクトラムアナライザのノイズレベル4 μVであった。

謝辞

ATFグループの方々にはビーム実験で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。