

Development of High accuracy Cavity BPM

Yoichi Inoue^{1,A)}, Masato Higuchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}

^{A)} Tohoku Gakuin University

1-13-1 Tyuo, Tagazyoshi, Miyagiken, 985-8537

^{B)} KEK

1-1 Oho, Tsukubashi, Ibarakiken, 305-0801

Abstract

The development of Beam Position Monitor with high resolution needed the next generation linear collider. We developed the Cavity BPM as for high resolution Beam Position Monitor at ATF(Accelerator Test Facility). I report the result of beam position measurement using this Cavity BPM in this paper.

高精度空洞型ビーム位置モニターの開発研究

1. はじめに

次世代の電子・陽電子衝突型線形加速器では高精度、高分解能なビーム位置モニターが要求されている。我々はこのような加速器に十分応用可能なビームモニターとして空洞型ビーム位置モニター(Cavity BPM)を開発してきた。Cavity BPMの特徴としては以下の事柄が挙げられる。まずは旋盤加工により、加工精度 $10\mu\text{m}$ 以下が容易なこと、そして高分解能が得られることである。

ILC(International Linear Collider)のための試験加速器であるATF(Accelerator Test Facility)では高分解能ビーム位置モニターとしてCavity BPMをロシアのBINP研究所と共同で開発を進めてきており、現在、実用段階にある。得られた分解能は最高 $0.2\mu\text{m}$ と将来型線形型加速器の要求を十分に満たすものであるが、絶対位置精度は考慮に入れていないため空洞外周加工面から空洞の電気的中心まで数 $100\mu\text{m}$ 程度であろうと考えられ問題である。そこで本開発研究ではQマグネットの中心および加速管の中心位置に対して通過するビーム位置を $10\mu\text{m}$ 以下の絶対設置精度でかつ分解能 $0.2\mu\text{m}$ 以下で検出できるビーム位置モニターとしてCavity BPMを採用する事とし、現状のBINPのモニターから発展的に改良、開発する。方針としてはBINP研究所との共同開発した空洞型位置モニターをベースにして、機械加工精度をあげ、基準面を正確に出し、かつ絶対位置精度を損なわせるコモンモードを排除する電気設計とし、長時間安定に精度を維持できる安価な検出回路を開発しようというものである。

2. 電気的中心と機械的中心の一致精度

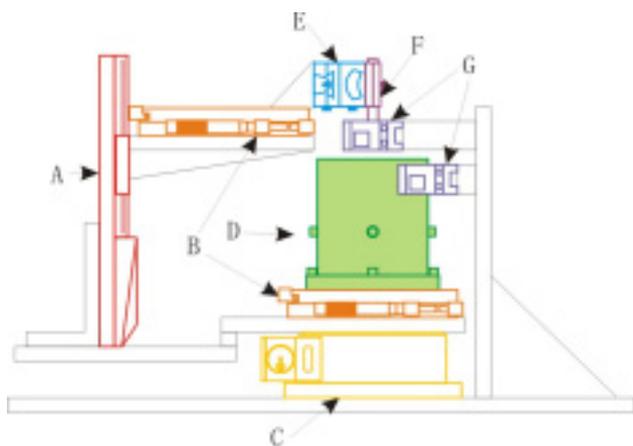
Cavity BPMの電気的中心と機械的中心の位置精度を知っておくことはQマグネット取り付け型のビーム位置モニターを開発する時には非常に重要なことである。あらかじめビームラインの中心に空洞の外

形基準面を用いて、Cavity BPMの電気的中心を合わせるようにアライメントをすることによってビームラインの中心でビームの位置を高分解能で測定することができるからである。空洞の外形基準面の位置とQマグネット相対位置を測定するにはSMARTを用いる。最終的なビーム位置分解能は測定回路のアッティネーターを調整することによって決定される。アッティネーターを加えればダイナミックレンジを広く取ることができるが分解能は下がる。アッティネーターを全て除いた場合のビーム位置分解能 $0.2\mu\text{m}$ を達成することができる測定範囲は $10\mu\text{m}$ 程度であると考えられるので、中心偏差が $10\mu\text{m}$ 以下のCavity BPMを開発したい。Cavity BPMの中心偏差はコモンモードなどによる影響を除けば、機械加工精度のみによって決定する。そこで、空洞の作成に当たっては外形基準面空の中心と空洞の機械的中心位置が $10\mu\text{m}$ 以下で一致させるという要求のもと開発を行った。

空洞の中心偏差は次の装置を作成し測定を行った。また、空洞も中心偏差の測定のためのセンサー空洞の試験空洞を作成した。Wave Portは外形基準面を出すため、円筒構造内に収まるよう折れ曲がった構造をしている。折れ曲がったWave Portの長さはビーム位置測定に用いる TM_{110} モードの波長とし、コモンモードである TM_{010} モードを除く構造とした。

空洞の機会的中心位置の測定は空洞中心と電気的中心位置測定のためのアンテナの中心を、最下部に設置された回転ステージの回転中心に一致させることで決定する。この装置の測定精度は $2\mu\text{m}$ 程度である。機会的中心位置の決定後、アンテナをX,Y方向にスキャンして電気的中心位置を測定する。電気的中心位置の測定はネットワークアナライザーを用い、アンテナから供給され、空洞のポートへ取り出された信号の強度を測定することによって行う。X,Y方向へのスキャン結果は以下のようになった。

¹ E-mail: yinoue@post.kek.jp



A	Z軸移動ステージ	E	ゴニオステージ
B	XY軸移動ステージ	F	アンテナ
C	回転ステージ	G	デジタル寸法測定器
D	空洞		

図1：絶対位置精度測定装置

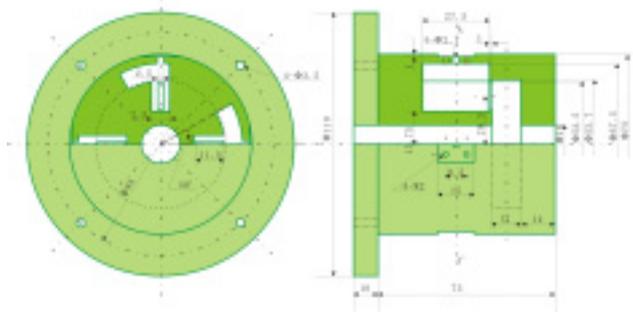


図2：センサー空洞の試験空洞

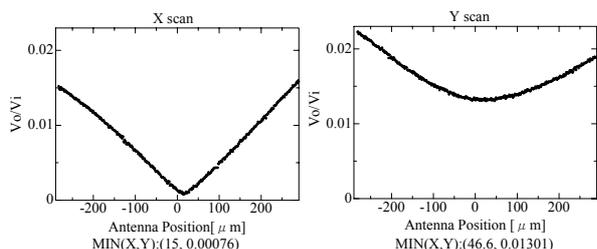


図3：電氣的中心のX, Yスキャン

X方向の機会的中心と電氣的中心のずれ15 μm に比べ、Y方向の中心偏差は46.6 μm とずれが多きい。またX,Y方向でのシグナルの強度が異なる等の問題があることがわかる。これはアンテナの傾きが修正できていないためだと考えられるが、現在のセットアップではこの傾きを修正することができないので、装置自体の改善が必要である。

3. 測定用回路の製作

ビーム位置の測定のためにはビームのインテンシティー測定と位相検波に用いるための基準空洞が必要である。我々は基準空洞の試験空洞も作成し、周波数をセンサー空洞に一致させるように外形を決定した。

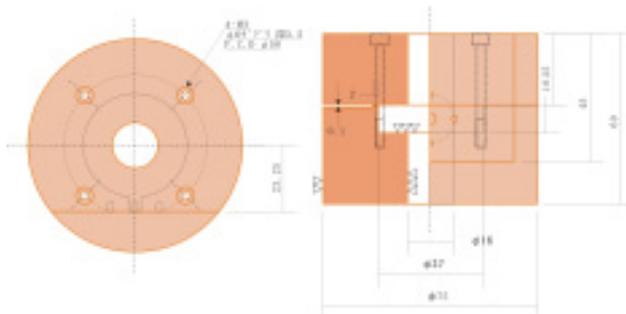


図4：基準空洞の試験空洞

また基準空洞とセンサー空洞からの信号を用いた次のビーム位置測定回路を作成した。

センサー空洞からのコモンモードは空洞近くに設置されるコンバイナーにより除去される。測定回路にはまずリミッターが置かれ、ビームが中心からずれて大きな信号が発生したときに回路を守る。次に測定精度を選ぶためのアッティネーターが置かれている。次に6.5GHzのシグナルは714MHzに変換され、基準空洞とセンサー空洞の位相関係により位相検波が行われる。プラス方向にビームがあるときの信号とマイナス方向にあるときの信号は別々のポートより得られるため、ビームの方向はソフトウェアで判断する。

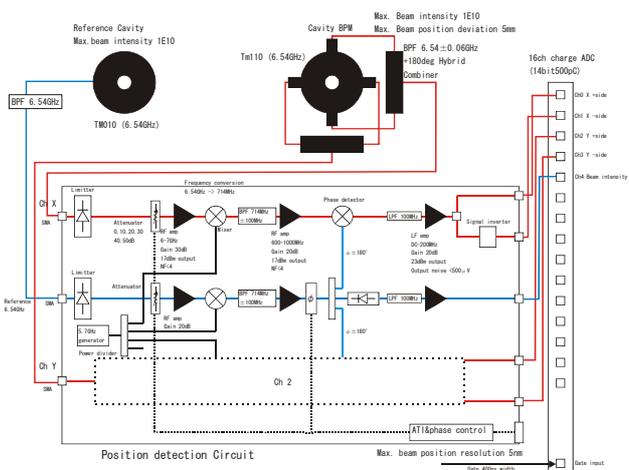


図5：測定用回路

4. 空洞型ビーム位置モニター実機の開発

Cavity BPM実機は基準空洞とセンサー空洞がひとつの円筒内に収まった構造である。ビームラインに取り付けてビーム位置分解能の測定をする際に、相対的な位置比較をするため3台のCavity BPMを製作した。基準空洞の周波数調整のためにディンプリング用の穴を作成し、ディンプリングハンマーで空洞壁を凹ませることによって基準空洞の周波数を上げる方向に調整する。この方法では周波数を意図的に1MHz程度まで容易に調整することができた。基準空洞とセンサー空洞周りにはそれぞれヒーター用の溝を作っており、ビームラインに取り付けた後、より精密に周波数を合わせることが可能である。

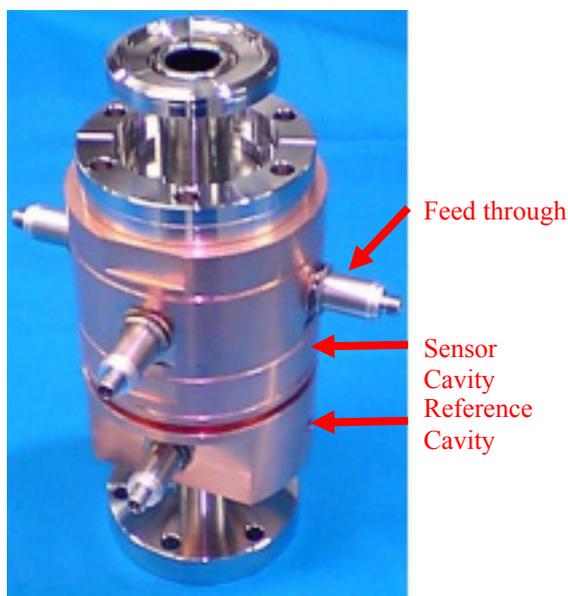


図6：空洞型ビーム位置モニター実機

5. ビーム位置分解能の測定

ビーム位置分解能の測定はATFの取り出しラインにCavity BPM実機を設置して行う。底面からの振動を抑えるため石定盤の上に3台のCavity BPMを設置し、レーザー干渉計を使用したナノムーバーを用いて316nmステップでCavity BPMを移動させることができる。

6. 測定結果

以下に、前節にあるセットアップを用いた時の空洞型ビーム位置分解能の測定結果を示す。測定には3台のCavity BPMを使用しビームラインの上流、下流のモニターから推定される真ん中のCavity BPMでのビーム位置と、実際に真ん中のCavity BPMが示すビーム位置との分散からビーム分解能を算出する。結果はビームの状態によらない分解能を評価する為、統計的な処理を加えたものである。この結果から、3つのCavity BPMの分解能を同じものと仮定して、

統計的な効果による係数 $\sqrt{2/3}$ を掛けて空洞型ビーム位置分解能の分解能を72nmと結論する。

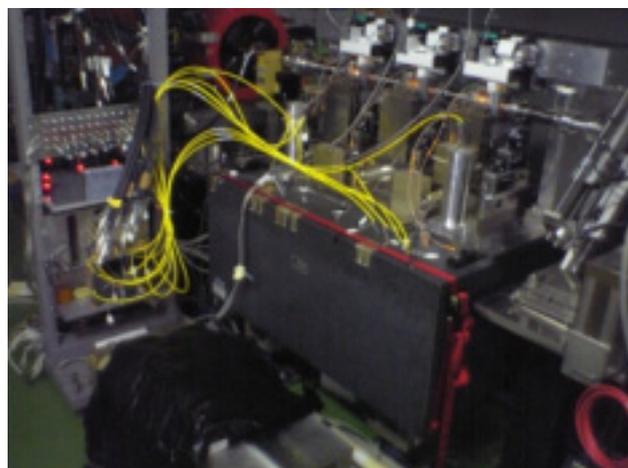


図7：測定セットアップ

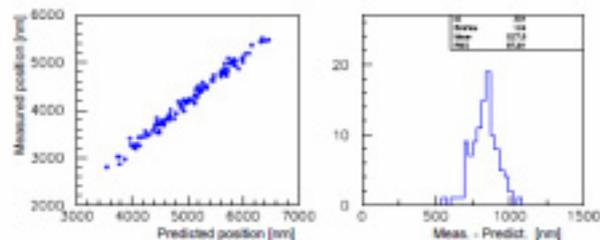


図8：ビーム位置分解能測定結果

7. まとめと今後の予定

空洞型ビーム位置モニターの絶対位置精度と、ビーム位置分解能にスポットを当てて開発を行ってきたが、絶対位置精度に関してはアンテナの傾きを修正するような更なる改良が必要である。ビーム位置分解能では目標を上回る精度を実現することができた。本空洞型ビーム位置モニターは現在ATFにおいてILC最終収束系におけるnanoBPM用のモニターとしての研究が進んでおり、目標とされるビーム位置分解能は2nmである。現在の測定用回路のノイズが25nmであることから、測定用回路のノイズ低減、さらに空洞から取り出される信号を増大することが必要である。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、神谷施設長を初め多くの方に理解を頂き、高エネルギー加速器研究気候との共同開発研究として進めることができました。また、nanoBPMプロジェクトのもと本田さんや田内さんには多くのご助力を頂きました。この場を借りてお礼を申し上げます。