

空洞型ビーム位置モニター実用機の開発研究

井上 洋一^{1,A)}、樋口 正人^{A)}、早野 仁司^{B)}、内藤 孝^{B)}

^{A)} 東北学院大学工学研究科応用物理学専攻

〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目 13 番 1 号

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

JLC や FEL などの将来型線形加速器では高精度高分解能のシングルショット測定可能なビーム位置モニターが必須である。その要求を満たすビーム位置モニターとして空洞型ビーム位置モニターが候補にあげられ、現在開発研究をおこなっている。空洞型ビーム位置モニターは高分解能はもとより、機械的加工精度が出しやすく外周基準面から中心までの絶対位置精度が出しやすくと考えられる。その絶対位置精度を損なわずものは、ビーム通過と同時に位置に依存しないコモンモードの信号が混じり込むためである。本稿では絶対位置精度を追求するため機械的加工精度と電気的中心の偏差を測定する測定装置について報告する。

1. はじめに

JLC のための試験加速器である ATF では、高分解能ビーム位置モニターとして空洞型ビーム位置モニターをロシアの BINP 研究所と共同で開発を進めており現在、実用運用段階にある。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っ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空洞型ビーム位置モニターを採用する事とし、現状の BINP のモニターから発展的に改良、開発する。これは空洞の分解能を上げて位置測定をする際には処理回路のダイナミックレンジが小さいため測定可能範囲が小さくなるため、絶対精度をあげ初期の設置精度をよくすれば常時高分解能測定が可能となるためである。この開発は 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。この開発研究は始まったばかりであるので本稿では実験室で絶対位置精度を測定するシステムについてのみ報告を行う。

2. 絶対位置精度の必要性

空洞型ビーム位置モニターは、中心付近を通過するビーム位置分解能は $0.2\ \mu\text{m}$ 以下が容易であり、機械加工精度だけから電気的中心と機械的中心がキャリブレーションなしでも $10\ \mu\text{m}$ 程度以下であわせることが可能である、さらに円筒形状なので精度よく外形基準面を作り出せ、その基準位置を測定しながら Q マグネットなどに $10\ \mu\text{m}$ 程度以下の精度で設置することができる、などの利点を持つ。しかし、空洞製作コストが高い、検出回路がマイクロ波領域であり複雑でコスト高、長期間安定に動作する回路が難しいなどの理由もあり、空洞型ビーム位置モニターはこれまで各国の研究所、研究者らにより研究開発されてきたが、実用運用までなされたものは少ない。しかし JLC や FEL などの将来型線形加速器では加速管の中心や Q マグネットの中心を絶対精度 $10\ \mu\text{m}$ 以下でビームを通し、かつ長時間安定に軌道を $0.2\ \mu\text{m}$ 以下の分解能で観測し維持する必要がある。初期設置時に数 $100\ \mu\text{m}$ の誤差で設置された場合測定位置の分解能をあげようと回路のゲインを上げていくと測定範囲が $100\ \mu\text{m}$ 程度以下にまで狭まってくる。常に高分解能で位置測定をするためには初期設置を数 $10\ \mu\text{m}$ 程度以下の精度で行う必要があり、そのためには空洞外側の基準面と電気的中心位置とのずれの精度は $10\ \mu\text{m}$ 程度以下が必要とされる。Q マグネットの中心から位置モニター中心までの最終的なずれはビームベースアライメントにより求められるであろう。

3. ビーム位置検出空洞

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、開発研究をするので現状の空洞型位置モニターについて述べておく。空洞の外観図を図 1 に示す。ダイポールモードの周波数は 6.426GHz であり、検出空洞の端板部より半径方向に切った細いスリット穴により磁場結合でテーパー状導波管に結合される。ダイポールモードは各軸ひとつの導波管で信号引き出しがなされている。コモンモードはこの細いスリット穴には磁場が直交しているので結合度が低く抑制されている。導波管への結

¹ E-mail: yinoue@post.kek.jp

合度が低く抑えられているのでQ値は比較的高く約8500程度と実測されている。

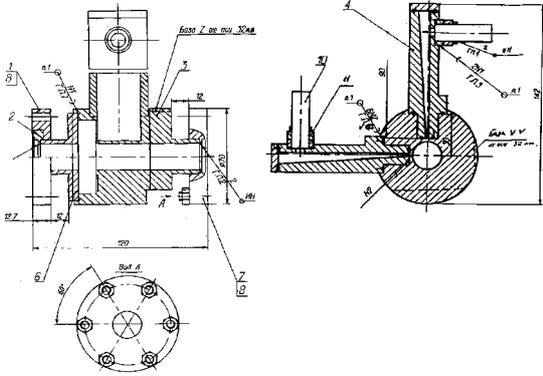


図1：ATFに現在設置されている空洞型ビーム位置モニター

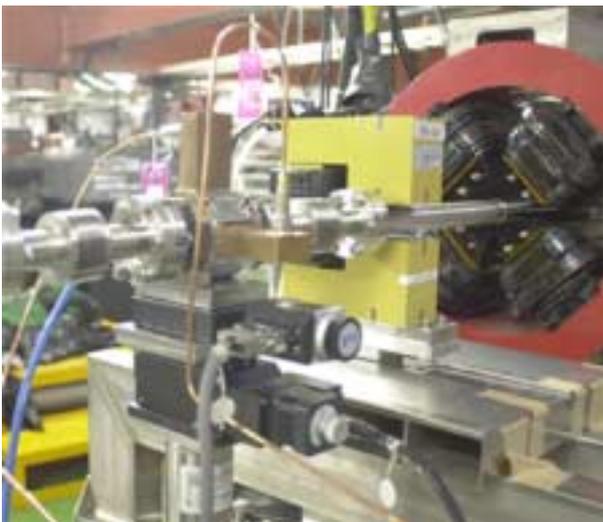


図2：X-Y ステージに設置されている空洞型ビーム位置モニター

ATFに設置するためビームの通過アパーチャーを確保する必要があり直径20mmのビーム穴をとっているため、空洞周波数はそれほど上げる事はできず（周波数を上げると空洞がコンパクトになる）、結局6.4GHz程度になっている。空洞外周には電気ヒーターが貼られ空洞の周波数制御がなされている。この空洞の加速器への設置に際しては取り付け基準（空洞外側面）が精度がないためQマグネットに固定して位置調整するような取り付け方ができず、独立して設置位置調整ができるように各空洞毎にX-Yステージが取り付けられている（図2の写真参照）。高分解能ビーム位置測定の際には電気回路の測定レンジに入るようにこのX-Yステージを駆動させる。すなわち現用の空洞位置モニターではビームの相対変動の測定のみで使用されていて、Qマグネットの

中心からの絶対的な偏差を測定する事は行っていない。

今後開発する空洞はこれをベースとし結合導波管を対称位置にもう2つ設け積極的に外付け回路で共通モードの抑制をさらに行う。そして空洞外周面と空洞の中心の機械的精度をあげた製作とし、基準面にヒーターなどの面を隠すようなものを置かない設計とする。

4. コモンモードの排除

絶対精度は空洞の機械加工精度が主に原因として効いてくるが、電気的要因として考えられるのが共通モードの存在である。空洞位置モニターの中心付近をビームが通過するとき、空洞内部には中心軸に対して対称な共通モードと、ビーム位置測定に使用される非対称なダイポールモードが励起される。共通モードは軸対称に励起されるため、ビームの絶対位置精度を損なわせる原因となる。この共通モードは検出周波数が共通モード共鳴ピークからかなり離れるため誘起される信号の大きさとしては大分小さいのであるがダイポールモードで検出する電氣的中心を数μm以上ずらす効果をもっている。空洞外壁で磁場カップルにより信号検出するような円形空洞のビーム位置モニターの場合、共通モードによるビーム位置精度の誤差errorは、

$$error = 0.305 \frac{\lambda_{110}}{Q_{110}} \quad (1)$$

で表される^[1]。使用するダイポールモードの周波数は6GHz程度であるので $\lambda_{110}=50\text{mm}$ 、また $Q_{110}=4000$ を仮定すると、 $error=3.8\mu\text{m}$ となる。この値は空洞のQ値や磁場カップリングの仕方などによってより大きくなる可能性がある。しかし、共通モードの排除を積極的に行っておけば、これによる電氣的中心位置の検出誤差を1/10以下にはできるであろう。そこで空洞から信号を対称的に配置された2ポートから取り出し、共通モードによる信号が逆位相になるようにして合成し相殺すれば電氣的中心位置の共通モードによる揺らぎを1μm程度以下に保証することができる。本研究では機械加工精度にしわ寄せがいかない様に、組み込みでの共通モード抑制立体回路などは避け、安価に実現できる外付け共通モード排除回路を用いる事とした。

5. 絶対位置精度の測定装置

ビーム位置モニターの絶対位置精度を測定するには、空洞の電氣的中心と機械的中心の一致精度を評価する必要がある。そこで図3に示される高精度回転ステージを使用した中心位置決め機構による空洞とアンテナのアライメント装置を作成した。

空洞には外付け共通モード排除回路を取り付け、測定にはネットワークアナライザーを用いる。空洞とアンテナはともに同じ高精度回転ステージの上に設置され、それぞれ独立で高精度XYステージおよ

び、高精度 Z ステージ、ゴニオステージによって微細な位置調整を行う事ができる。ここで使用する高精度回転ステージは newport 製 RV160MS であり回転時の芯ぶれ量は $2\mu\text{m}$ 以下である。また高精度 XY ステージは PI 製 M-013.00 の 2 段組のものであり位置精度 $0.1\mu\text{m}$ で位置決めが可能である。高精度 Z ステージは位置決めされたアンテナをまっすぐに空洞中心部に降ろして行く必要がありその時の直進度は $1\mu\text{m}/100\text{mm}$ である。ゴニオステージはアンテナの保持角度を調整するものであり調整後はそのまま保持される。デジタル寸法測定器 (keyence 製 測定部 LS-7030 とコントローラ LS-7000) は向かい合って設置された LD 投光部と受光部から構成されており、投光部から幅 30mm の均一な平行光が発生し測定対象物に照射される。このとき測定対象物によって生じた影の映像が受光部から出力され、測定対象物の影端部分の位置が $\pm 2\mu\text{m}$ 以下の精度で演算、表示される。空洞やアンテナはこの光をよぎるように設置され、そのときに計測されている端部の位置が回転によっても変わらない様に空洞やアンテナを位置決めする。ここで測定精度は回転ステージの芯ぶれによる機械的中心の設置誤差が $2\mu\text{m}$ 以下、アンテナ下部の XY ステージの設置誤差が $0.1\mu\text{m}$ 、デジタル寸法測定器の測定誤差が $2\mu\text{m}$ 以下、これらから算出して $4.1\mu\text{m}$ 程度以下である。実際の測定精度は装置の完成後評価する。

測定の手順は、まず空洞を回転ステージで回転させデジタル寸法測定器で、回転したときのずれを測定し、ずれを無くするように空洞の中心を回転ステージの中心軸上に調整する。また、このときアンテナも同様にして回転の中心軸上に設置し、このアンテナの位置を空洞の機械的中心として決定する。この後、ネットワークアナライザでダイポールモードの振幅を観測をしながらアンテナのみを XY ステ

ージにより移動させ、空洞のダイポールモードが最小となる点をさがす。このときのアンテナの位置を空洞の電気的中心とすると、アンテナの移動量から、空洞の機械的中心と電気的中心のずれを求めることができる。

現在この測定装置は製作中であり残念ながら本報告には間に合わなかったが 9 月には初期の結果が得る予定である。

6. 今後の計画

本研究は今年度始まったばかりであり絶対位置測定装置の構想と設計が終了し組立ての準備が進行中である。今後、その絶対位置精度の測定装置を用いて現用空洞および発展型のコールドテスト空洞の機械的中心と電気的中心の一致精度の測定、評価を行う予定である。さらに 2002 年中にはそれをもとにして空洞型ビーム位置モニター実用機的设计と製作、そして 2003 年にはビーム試験および設置運用試験を予定している。

7. 謝辞

本研究をおこなうにあたり、菅原機構長、木村物質構造科学研究所長、神谷加速器研究施設長の方々にご理解を頂き共同開発研究として進める事ができました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] J.P.H.Sladen and W.Wuensch., "The effect of finite Q on the precision of resonant beam position monitors", CLIC Note 185, 8 January 1993.

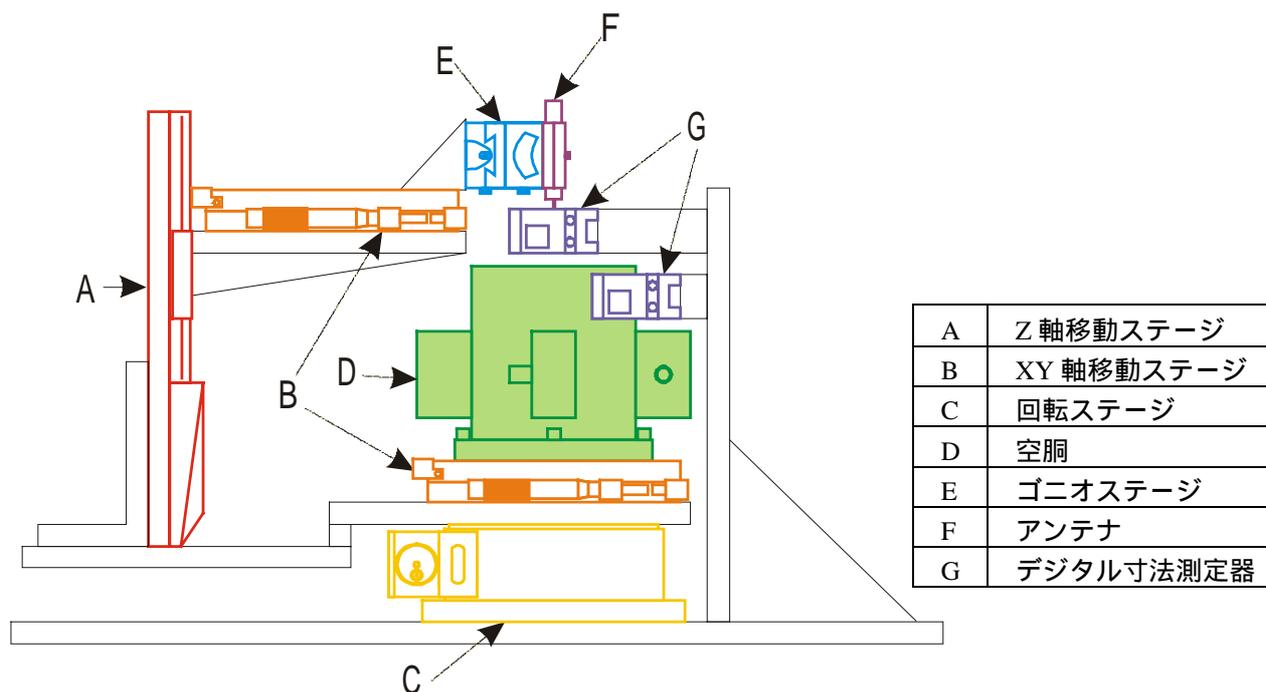


図 3 : 絶対位置精度の測定装置