

氏 名 服部 綾佳

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1915 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 局在高調波モードを用いた非直線軌道ビームの下での高周
波加速空洞位置測定方法の研究

論文審査委員 主 査 教授 久保 淨
教授 早野 仁司
教授 肥後 壽泰
准教授 梅森 健成
准教授 宮島 司
助教 渡邊 謙
チームリーダー 大竹 雄次
理化学研究所

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

高周波加速空洞を用いた線形加速器では、ディスパージョンやエミッタンスなどのビームの質を維持し、ビーム加速を行うために、高周波加速空洞の中心軸を設計ビーム軌道に合わせる必要がある。超伝導空洞は液体ヘリウムによる冷却のためのヘリウム容器に詰められ、断熱容器（クライオモジュール）内に組み込まれるので、常伝導空洞の場合と比較してアライメント維持の確認が困難となる。

ヘリウム容器の位置ではなく空洞自身の位置を測定できる従来からある唯一の方法として、高調波モード（HOM）を用いた手法があるが、その正確な測定のためには、ビームが空洞内を直線的に通過している必要がある。つまり、ビーム軌道が加速場のフリンジにより大きく曲げられる低エネルギーの電子ビームでは、この手法での正確な測定は困難となる。超伝導空洞に取り付けられている HOM カプラーにより HOM はクライオモジュールの外部まで取り出される。HOM のうちダイポールモードの振幅はビームのオフセットに比例する関係があるため、HOM の波形データをビーム掃引中に取得し、その中のダイポールモードの振幅とビーム通過位置とを関連づけることで、ダイポールモードが誘起されない点（電氣的中心）を求めることができる。このとき、ビーム軌道が空洞内で曲がっていると、空洞内でのビームが通過した平均位置に対する、空洞全体にわたってのダイポールモードの電氣的中心の平均位置を求めることになり、ビーム通過位置の偏差がアライメント計測に影響してしまう。

そこで、本研究では空洞の長手方向に局所的に誘起される高調波モードを使用することにより、ビーム軌道が直線でない場合にも、その局在する場所での空洞の位置を測定する方法の開発を行った。非直線軌道を持つビームの下でも空洞の位置を求めることができれば、主に低エネルギーの領域での高品質なビーム加速の実現に寄与することができる。

本研究は入射ビームエネルギーが 4 MeV 程度であり、超伝導加速空洞の加速場のフリンジの影響を受け、ビーム軌道が曲がる STF 加速器を対象とした。そして、STF 加速器のクライオモジュール内に収められた 2 台の超伝導加速空洞の内、上流側の空洞の局在モードの性質を明らかにし、ビーム掃引中の波形データの取得および解析を行った。

まず、空洞セル内に幅広く分布する空洞セル高調波モードと分離でき、同定可能であり、容易に検出できる局在モードとして、電磁場計算（CST MICROWAVE STUDIO；CST）での周波数が 2282.2 MHz と 2309.5 MHz の空洞の上流側に局在しているモードを使用することにした。ビームによる励起振幅のビーム通過位置への依存性など、このモードの電氣的な特性は電磁場計算で確認を行った。この電磁場計算にて局在モードが局在している範囲を代表できる空洞長手方向の位置を見つけた。また、カプラーなどの非対称な構造による局在モードの電氣的中心と機械的中心の偏差も推定した。（ここで、機械的中心とは空洞セルおよびビームパイプの回転対称な軸を指す。）

そして、実際に STF 加速器にて HOM の測定を行った。クライオモジュールの上流側にあるダイポールマグネットを用いて、ビームを水平方向、垂直方向にそれぞれ 5 回ずつ掃引し、その間の HOM の波形をビーム位置データ、ビーム電流データと同期して取得した。

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

そのビーム位置とビーム電流のデータはそれぞれクライオモジュールの上流側と下流側の両方にあるビーム位置モニター (BPM) と電荷量積分電流トランス (ICT) で得られたものである。

電氣的中心を求めるには、局在モードの振幅のビーム通過位置に対する変化を調べなければならない。局在モードの振幅は HOM 波形を高速フーリエ変換し、周波数領域での局在モードの周波数でのピークの値から得た。そして、対応させるビーム通過位置には電磁場計算で得られた局在モードを代表できる空洞長手方向位置 (Z0) でのビーム通過位置を用いることとした。

そのビーム通過位置を推定するために、HOM 波形取得時のクライオモジュール上下流の BPM でのビーム通過位置を再現するビーム軌道を General Particle Tracer にて計算した。このとき、入射ビームのオフセット量とティルト、超伝導空洞の加速場強度をパラメータとした。ビームが加速場のフリッジにより横方向の力を受けるので、加速場の中心位置のずれがビーム軌道の推定に影響を及ぼす。そのため、加速場の中心位置のずれもビーム軌道計算時に考慮する必要がある。加速場の中心は超伝導空洞の機械的中心と一致していると考え、空洞の設置誤差 (オフセットとティルト) を仮定し、これらから計算される Z0 での空洞の機械的中心を「機械的中心 B」と称することにする。

ビーム軌道が推定されれば、局在モードの振幅変化から求められる電氣的中心より、Z0 での機械的中心 (「機械的中心 A」とする) が求められる。ここで、座標の基準は 2 つの BPM の中心を結ぶ軸である。この機械的中心 A と先に仮定した機械的中心 B とは一致している必要がある。

機械的中心 B には、初期アライメント時のデータから推定された値 (初期アライメント値) を使用するが、設置時の作業工程から、機械的中心がその値から変位している可能性は十分に考えられる。そこで、機械的中心 B もパラメータに含めたいが、ティルトを変えて機械的中心 B をずらすと、空洞の下流側で設置誤差をはるかに超えた変位になりやすい。そこで、本研究では機械的中心のずれは空洞のオフセット量に依存すると考え、空洞のティルトは固定することにした。また、局在モードに関与しない下流側の空洞のオフセット量・ティルトは初期アライメント値に固定することにした。そうして、機械的中心 A と B が誤差の範囲で一致するまで、機械的中心 B を変位させ、機械的中心 A の計算を繰り返し、機械的中心を求める方法を開発した。なお、求められた機械的中心の誤差範囲の評価も実施した。

この方法は、電磁場計算による局在モードの電氣的中心と機械的中心の偏差の導出、ビーム誘起された局在モードによる電氣的中心の計算、ビーム軌道計算とを統合した、新たな手法であり、非直線軌道ビームの下においても加速空洞の位置を推定できるものである。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文の研究は、電子ビームにより高周波加速空洞に局所的に励起されるダイポール高調波モードを検出することで、空洞のアライメントを評価する方法を検討して実験によって実証したものである。軸対称な空洞に荷電ビームが通過して励起されるダイポールモードの高調波の振幅は、ビーム通過位置と空洞の中心軸とのずれに比例するので、これを測定することで通過ビーム位置に対する空洞電気中心の相対位置がわかる。ダイポールモードを利用したアライメント測定方法は以前から行われてきているが、従来の方法で測定されるのは空洞の長さ全体にわたってのビームが通過する平均位置と空洞中心軸とのずれであり、ビーム軌道が空洞内で（近似的に）直線であるとみなせる場合にのみ有効となる。それに対して本研究では、空洞のビーム軸方向に局所的に励起される高調波モードを使用することにより、ビーム軌道が直線でない場合にもその局所的な場所でのビームと空洞中心との相対位置を測定する方法を開発したものである。

本研究では、KEKにあるSTF(Superconducting RF Test Facility)に設置された加速器の9セル超伝導空洞(STF空洞)を研究対象とした。

まず服部氏は、多数の高調波モードのうちの高調波モードが上記目的のために適切であるかを検討した。STF空洞のモデルによる電磁場計算により、あるモードがビーム軸方向に局所的であること、励起される振幅がビーム通過位置に依存することが判り、局所モードの使用がアライメントに有効であることを実証した。さらに実際の空洞の高周波測定によって、このモードが実際に存在しており測定可能であることを確認した。

ビームを用いた実験において、局所モード部でのビーム通過位置と空洞中心の相対的な位置の測定は、入射ビームの軌道を変化させながら着目した高調波モードの信号強度を測定することで行われた。一方、高調波モードの励起される場所でのビームの位置の推定は、前記と同時に測定したビーム位置モニターの情報から、フリンジ場を含む空洞の電磁場を考慮に入れたビーム軌道の解析により行われた。服部氏は、これらを比較することによりこの方法が有効であることを実証した。

特筆すべきは以下の点である。本研究対象のSTF空洞へのビームの入射エネルギーはその加速電場に対して低いため、その軌道はフリンジ電磁場のために曲げられて直線から大きくずれる。このように、加速空洞への入射エネルギーが低い場合には、本研究で提案されているような局所的なアライメントの評価が必須となる。

ビーム軌道が直線でない場合にも有効であるような、局所的に励起される高調波モードを使用したアライメントの測定方法はこれまでになく、本研究はこの新しい手法を提案して実証したという点が評価できる。また、STF以外の低エネルギーの加速器においても、加速空洞と他のビームモニターの配置等を工夫することにより、局在する高調波モードを位置モニターとして利用するという応用が期待できる。以上により、本審査委員会は、服部氏の研究内容が博士論文に値するものと判断した。