

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400300

研究課題名(和文) 加速ビームを使った超伝導加速空洞の精密アライメント技術開発

研究課題名(英文) Development of precise alignment method of superconducting accelerator cavities using accelerated beam

研究代表者

早野 仁司 (HAYANO, Hitoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：00173055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極低温に冷却された超伝導加速空洞の姿勢位置情報を、通過させる電子ビームにより誘起される高調波から算出する方法を開発したものである。実際のビームを使用した過去の実験データではビームエネルギーが低かったため、その時に同時に存在した加速モードのフリッジ場により空洞通過ビーム軌道が複雑に曲がる。そのような複雑なビーム軌道を計算により推定するところから始め、高調波モードの電気的中心をあらかじめ計算により知っておき、ビーム励起された高調波モードを使って算出した電気的中心との絶対的な偏差を矛盾なく最小化することで空洞姿勢位置を算出する方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a method to calculate position information of superconducting acceleration cavity cooled to cryogenic temperature from higher harmonics induced by passing electron beam. Since the beam energy was low in the past experimental data using the actual beam, the cavity passing beam trajectory is complicatedly bent by the fringe field of the acceleration mode that was simultaneously present at that time. Starting from estimating such a complicated beam trajectory by calculation, the electrical center of the harmonic mode is known in advance by calculation, and the absolute value with the electrical center calculated by using the beam excited harmonic mode, we developed a method to calculate the cavity position by minimizing their deviations without contradiction.

研究分野：加速器科学

キーワード：加速器 超伝導加速空洞 アライメント 局在高調波モード

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導加速空洞(図1)は極低温に冷却されて運転されるため、多重の遮熱シールドを施した非常に高断熱なクライオスタット内部に収納され、外部から直接その姿勢や位置は計測できない。また、組み込む前に調整してある空洞の位置や姿勢は室温時の調整値であり、-271 の極低温では空洞や支持治具に収縮がおり、位置がそのまま保存して姿勢が保たれているとは限らない。超伝導加速空洞の姿勢位置情報が加速器ビーム性能に影響を与えるケースは ILC のような大型加速器では大きな問題となるので、世界的にはドイツ DESY 研究所、米国 FNAL 研究所、日本 KEK の大型の超伝導線形加速器を有しているか、もしくは、計画している研究所で研究されている。もっとも研究が進んでいるのは DESY 研究所であり、2006 年ごろから各種データ蓄積が行われているが、注目している高調波はもっともインピーダンスが高いモードのみで研究が行われている(、)。そのモードでは空洞の中心位置の横方向のズレを検出できるが、局在する高調波モードを用いてさらに傾きや空洞自体の曲がりを検出しようと積極的に研究を行っているのは、日本 KEK の本研究のみである。

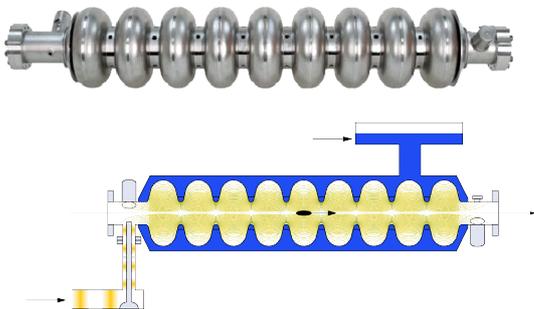


図1 1 m長の超伝導加速空洞の写真(左)とその中の加速電場の様子(右)。9セル空洞(9個の楕円体状セルが連結された形状を持つ)の内部に加速電場、そのすぐ外側のヘリウム容器内に液体ヘリウム(青色)が満たされる。RF パワー(黄色)は左側の導波管から供給され、9セル内部に満たされる。電子ビームは、この中心軸を左から右へと進行し、9つのセルで加速され、同時に9つのセルに高調波を誘起させる。

### 2. 研究の目的

本研究は、超伝導加速器内の極低温に冷却された超伝導加速空洞の姿勢・位置情報を、通過させる電子ビームによって誘起される高調波信号から算出し、精密アライメントに応用する研究である。実現には、超伝導加速空洞の高調波モードの詳細な研究が必要不可欠であり、高調波モードの局在場所、偏極角度、インピーダンスを系統的に調べ、ビーム誘起信号からその姿勢(傾きや空洞自体の曲がり)および位置情報を精密にかつ簡便に引

き出す手法の開発を第一の目的としている。さらに、通過させる電子ビームのエネルギーが低い場合には超伝導加速空洞のなかの加速場のフリンジにより通過軌道が直線ではなく複雑に曲がったものになり、電子ビームの空洞通過位置の推定も必要となってくる。この場合空洞の位置がフリンジの位置を変えビーム軌道に影響をおよぼすので、高調波モードから求めた空洞位置とビーム軌道推定とが矛盾なく求まらなければならない。このような場合でも有効な解析手法を開発する事も目的となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 加速空洞の高調波モードの解析

STF 加速器において、クライオモジュールの上流側の空洞1の上流側のビームパイプ周辺に局在するダイポールモードについて計算するために、空洞1の上流端にテーパ構造とペローズとゲート弁の構造を再現した図2に示すモデルを作成した。ピックアップアンテナと入力カプラーをポートに指定し、frequency domain solver にて計算した。計算した周波数範囲は 2265 MHz から 2465 MHz である。偏極方向が異なるために周波数がわずかにずれた 2282.2 MHz (図3)と 2309.5 MHz (図4)の周波数を持つ局

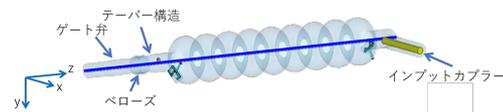


図2 計算モデル

在ダイポールモードが電磁場計算コード(CST MW Studio)を用いた計算より見つかった。これらのモードがアライメント検出に利用できることを確かめるために、局在ダイポールモードの縦方向および横方向の電場分布を計算した。確認した内容は局在モードの局在、ダイポールモードであること、電気的中心の位置と局在ダイポールモードの長手方向分布位置が局在であること、である。



図3 局在モードのうちの一つの偏極方向モード 2282.2 MHz の電場分布



図4 局在モードのうちの図3と直交する偏極方向モード 2309.5 MHz の電場分布

(2) ビーム誘起高調波信号から加速空洞の電気的中心を計算する方法

局在高調波モードの2つの偏極モードの周波数は10数MHz程度異なる。この2つのモード各々に対して、ビーム掃引毎にその誘起信号振幅が最小となるビーム通過位置を集め直線でフィットし、それぞれの偏極軸を求め、そして、その偏極軸の交点を高調波モードの電気的中心として求める。その過程を図5を使って示す。図5中の右図に示すオレンジ線(x方向)と緑線(y方向)に沿って、ビームをx方向、y方向に掃引し、高調波モードの2つの偏極モードの振幅が最小となる点を見つけると、左図の水色で示す方向に偏極するモードでは右図の水色線で縁取りされた丸点が見つかり、黒波線で示す方向に偏極するモードでは右図の黒色線で縁取りされた丸点でそのモードの振幅が最小となる。ビームのx方向掃引したときに見つかる点はオレンジ色で、y方向掃引で見つかる点は緑色で塗られている。モードの振幅は偏極軸からの距離に比例するので、それらの振幅最小の点はモードの偏極軸上にある。よって、右図の水色線で縁取りされた丸点から直線フィットにより水色で示す偏極モードの偏極軸が求められ、黒線で縁取りされた丸点から直線フィットにより黒波線で示す方向の偏極モードの偏極軸を求めることができる。そして、2偏極軸の交点をこのモードの電気的中心として赤丸で示す。

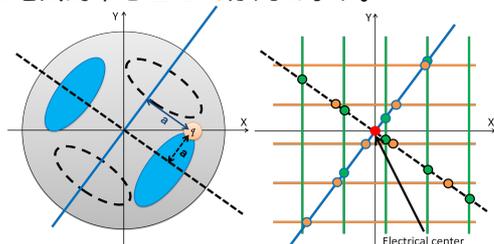


図5 電気的中心を求める概念図。左図は2つの偏極の異なる高調波モードの空間的電場分布を示し、右図はそれらの偏極軸をビーム掃引時の誘起高調波モード振幅から求める図。

したがって、ビーム通過位置を変化させ、そのときの高調波モードの振幅を測定することで電気的中心を求めることができる。このとき、高調波モード振幅の測定は、HOMカプラーによりクライオモジュールの外部まで取り出された高調波モード波形をオシロスコープで取得し、高速フーリエ変換し、高調波モードのピークの振幅を読み取ることで取得できる。

#### (3) ビーム位置モニターからのデータによりビーム軌道を推定する方法

高調波モードのビーム測定実験では10回のビーム掃引に分けてビーム位置データを取得しており、その時のビーム軌道を実際に再現した加速器モデルに基づきGPT軌道計算プログラムで計算した。ビーム掃引は、ダイポールマグネット電流値を変えビーム軌道をx方向やy方向に曲げて変化させたもので

あり、すべてのデータセットで、空洞上流のビーム位置モニターMB03と空洞下流のビーム位置モニターMB04で算出されたビーム位置と実際に測定されたビーム位置との間の二乗の差を足し上げたもので計算のよさの評価を行った。その評価値が、位置モニターの誤差で規定される目標値以下に達するまで、モデル上のビーム入射パラメータを探し、それを通過軌道と推定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 局在高調波モードがアライメントに利用できる事の実証

現実の加速空洞の局在高調波モードの電気的中心を探するときと同様の手順でシミュレーション上で電気的中心を探す手順で、電気的中心を探せることを実証した。ビーム掃引時に得られた局在モードの振幅のデータから2時間数フィットで最小となるビーム位置を求め、それぞれの偏極モードでプロットしていくと、図6のようになり、それら直線の交点として電気的中心が求まることがわかる。

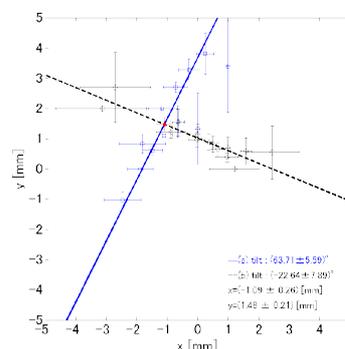


図6 計算により求めた電気的中心と二次関数フィットより求めた振幅が最小となる頂点のプロット(青2282.2MHz,黒2309.5MHz,赤電気的中心)

局在モードの電気的中心を計算するときの長手方向の範囲を決めるに当たり、ビーム実験時のSN比8.8%を使った。ピークに対して8.8%未満ではノイズに隠れてしまうので、8.8%以上の振幅を持つ範囲を、電気的中心を計算するときの長手方向範囲と決めた。その結果、局在モード振幅がそのピークの値の8.8%を上回る最大範囲は $z = -64.0 \sim 349.4$ mmであり、これをこの電気的中心を算出する長手方向範囲とした。すなわち、それが局在の範囲となる。

##### (2) 複雑に曲がった電子ビームを用いて空洞位置情報を引き出す方法の開発

曲がった軌道の電子ビームとそれによって誘起された局在モードを用いて加速空洞のアライメント情報を引き出すには、以下の手順を行う。まず、実際の加速器においてビーム掃引を行い、ダイポールマグネット電流値、2つのBPMでのビーム通過位置、局在モードの振幅、のデータを取得する。これ

らのデータから、ビームが局在モードの電気的中心を通る軌道の時のダイポールマグネット電流値を求めておく。次に空洞の機械的中心をオフセットと傾きで仮定する(初期値はアライメント値)。ダイポールマグネット電流値、ビーム通過位置から、ビーム軌道を決めるパラメータ(入射ビームエネルギーや入射角度など)を推定する。求めたダイポールマグネット電流値でのビーム軌道を計算し、その軌道を使って局在モードの電気的中心を求める。局在モードの電気的中心を機械的中心に変換する。その上で、仮定した機械的中心と求めた機械的中心とが誤差の範囲で一致しているかを判断し、一致していなければ、空洞1のオフセットを変えて機械的中心の位置を再度仮定しなおす。再度、同様の手順で機械的中心を求め、それが仮定した機械的中心と一致するまで計算を繰り返す。このようにして、それらが一致した時に、その値が求める機械的中心とする、という方法である。本方法を実際のSTF加速器中の空洞1に応用し、空洞1の上流端部に局在するモードを使って、その機械的中心を求めると、 $(x,y)=(0.44 \pm 0.56 \text{ mm}, -1.95 \pm 0.40 \text{ mm})$ であった。

#### <引用文献>

N. Baboi, G. Kreps, G. Devanz, O. Napoly and R. G. Paparella, "Preliminary Study on HOM-based Beam Alignment in the TESLA Test Facility," in LINAC2004, Lubeck, Germany, 2004.

S. Molloy et al., "High precision superconducting cavity diagnostics with higher order mode measurements," 10.1103, PhysRevSTAB.9.112802, 2006.

S. Pei, Z. Li, K. Bane and J. Smith, "TF HOM Data Analysis with Curve Fitting Method," in EPAC2008, Genoa, Italy, 2008.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

A. Hattori and H. Hayano; "SRF Cavity Alignment Detection Method using Beam-Induced HOM with Curved Beam Orbit", NIM-A 866 (2017)172-181.

〔学会発表〕(計4件)

A. Kuramoto and H. Hayano; "SIMULATIONS AND MEASUREMENTS OF BEAM PIPE MODES EXCITED IN 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES", Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany(2014)

A. Kuramoto, H. Hayano and N. Baboi; "MEASUREMENTS OF CAVITY MISALIGNMENT BY BEAM INDUCED HOM EXCITED IN 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES", Proc. of

ILNAC2014, Geneve, Swiss(2014)

倉本(服部)綾佳, 早野仁司, Nicoleta Baboi; 「9セル超伝導加速空洞のアライメント検出のためのHOM研究」2014年加速器学会プロシーディングス、青森(2014)(口頭発表)  
服部綾佳, 早野仁司; 「低エネルギー電子ビームにより9セル超伝導加速空洞内に誘起されたTE111-6の電気的中心の新解析手法」2016年加速器学会プロシーディングス、千葉(2016)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

早野 仁司 (HAYANO Hitoshi)  
高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設・教授  
研究者番号: 00173055

##### (2)研究分担者

服部 綾佳 (HATTORI Ayaka)  
茨城工業高等専門学校  
電子情報工学科・助手  
研究者番号: 10758569

##### (3)連携研究者

該当者なし

##### (4)研究協力者

該当者なし