

氏 名 渡邊謙

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1136 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 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 超伝導 9 セル加速空洞の高次モードに関する研究

論文審査委員	主 査 教授	野口 修一
	教授	佐藤 康太郎
	教授	古屋 貴章
	教授	赤井 和憲
	准教授	早野 仁司
	グループ リーダー	羽島 良一(日本原子力研究 開発機構)

国際リニアコライダー加速器 (ILC : International Linear Collider) は10km+10kmの電子陽電子主線形加速器が使用される。そのILCに用いられる超伝導加速空洞はTESLA (Tera electron volt Energy Superconducting Linear Accelerator) デザインが長年の研究開発と性能実証がなされているためベースラインデザインとなっている。ILCのメインライナックでは合計17,000台の加速空洞を必要とし、この製作においては多くの技術的チャレンジを含んでいる。その問題の一つとして、空洞アライメントの取り扱いがある。ビームのエミッタンス増大を抑えるための空洞アライメント許容量 (空洞設置誤差) は  $RMS=0.3\text{ mm}$  以内であれば短距離、長距離の両ウェーク場に対して問題ないことが、TESLA空洞の横方向のウェーク関数および高次モード (HOM: Higher Order Mode) のダンプ能力などのパラメーターを元に計算されている。

超伝導空洞はその製作方法や各種カプラの配置の非対称性などから機械的中心と加速モードおよび高次モードの電気的中心が一致しているとは限らない。また、モード間およびセル間にも電気的中心および偏極方向に差があることが予想されている。しかし、それに関する詳細な精密測定はされていない。クライオモジュール内に設置された空洞の機械的中心を $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内にあわせるのは難しく、また、観測することも難しい。クライオモジュールに組み込まれた空洞アライメントを観測する手段として、空洞内を通過するビームにより励起される高次モード (ダイポールモード:  $TE_{111}, TM_{110}$ モードなど) を用いた方法がある。空洞に励起されるダイポールモードはビームの通過位置がモードの電気的中心からX-Y (ビーム軸をZとする) の変位に対して比例した電圧が空洞内に発生する。この発生電圧はHOMカプラで空洞の外へ取り出され、空洞アライメントに使用できるダイポールモードを選択的に観測すれば、空洞アライメントや空洞自身の変形に関する情報を得ることができる。これにより、空洞とビームの相対位置つまり空洞のビーム軸回りのずれが検出できる。この方法を用いるに当たって、予め使用するモードの素性 (電磁界分布、偏極方向、電気的中心と機械的中心の差など) を知らなければいけない。

本研究では、ILCのベースデザインであるTESLA空洞およびKEK(高エネルギー加速器研究機構) STF (Superconducting rf Test Facility) にてILCのために研究開発がなされているSTF Baseline空洞の両空洞を用いて、超伝導9セル加速空洞の高次モードを用いた空洞アライメントの研究を行った。主な実施内容は次の3つである。

#### [1] STF Baseline空洞のための新しいHOMカプラの開発

STF Baseline空洞にTESLA型HOMカプラを使用した場合、ビーム軸からのHOMカプラの高さがHeジャケット径を超えてしまうため、Heジャケット径の最小化 (コストダウン) のためには、TESLA型HOMカプラより6mm以上背の低いHOMカプラが必要となった。

開発方針として、ノッチフィルターの短縮およびHOMカプラ内導体と外導体の一体化を行い、HOMカプラのコンパクト化を試みた。ノッチフィルターの開発では、STF I-type、STF L-typeの設計を行った。STF L-typeではスタブ形状をクランク化することで、禁止帯のない良い透過特性を持つフィルターが設計できた。ノッチフィルターとHOMカップリングアンテナと一体化したモデルでは、HFSSによる計算と銅製カプラの実測で良い一致を得た。しかし、STF L-typeカプラでは4.5GHzに禁止帯が現れたが、スタブとカップリン

グアンテナの切り離しを行った結果 (STF L-type-II)、禁止帯の緩和ができた。STF Baseline空胴に装着したHOMカプラはSTF L-type、STF I-typeの2機である。9セル空胴における高電界試験を縦測定および横測定にて行った。結果、CW運転ではエンドセルの加速電界で32MV/mまで、パルス運転では1.5ms、5Hz で19.3MV/m、0.6ms、5Hz で23.4MV/mまで問題なく動作することを確認した。観測されたプロセッシングレベルの多くは10MV/m以下と16MV/m、20MV/m周辺にも観測された。

## [2] 空胴アライメントのための9セル空胴HOM解析

HOMを用いて空胴ミスアライメント検出を行うに当たって、STF Baseline空胴4台とTESLA空胴(シリアル番号:Z84)のHOMの素性を調べた。測定モードはTE<sub>111</sub>,TM<sub>110</sub>,TM<sub>011</sub>である。測定はパスバンド周波数の測定と電磁界分布の測定によるモードの同定、HOMのダンピング能力の測定、メインダイポールモードのモード間およびセル間における偏極方向の分布(ビーズ測定)、ダイポールモードの電氣的な中心と機械的中心の差の測定(アンテナ測定)を行った。

HOMダンピング測定では、TE<sub>111</sub>,TM<sub>110</sub>のダイポールモードの $Q_{ext}$ はSTF Baseline空胴、TESLA空胴ともに $1 \times 10^5$ 以下であった。TM<sub>011</sub>モードに関してはTESLA空胴では $1 \times 10^5$ を下回ったが、STF Baseline空胴では $2 \sim 4 \times 10^5$ であった。これはSTF Baseline空胴のHOMカプラの向きは加速モードとのカップリングを避けるため、TESLA空胴と異なる回転方向に配置したためである。HOMカプラの回転方向を変えることで、これは改善できると考えられる。次期モデルで実証する。

偏極方向のセル間およびモード間の分布を調べた。セル間の分布では、TE<sub>111</sub>,TM<sub>110</sub>のパスバンド全てで、測定エラーの範囲内で差は見られなかった。また、ダイポールモードのダブレット間では、ダブレット間の周波数差が100kHz以上のモードではX-Yダイポールの角度差が $90 \pm 10^\circ$ に収まっていた。STF Baseline空胴4台の測定結果から、ダイポールモードの偏極方向はHOMカプラでほぼ決定することが分かった。

アンテナ測定にて電氣的な中心位置と機械的中心位置の偏差の測定を行った。本測定ではHOMカプラ近傍のセルにおける電氣的な中心の測定を意味する。測定できたダイポールモードの電氣的な中心位置はHOMカプラ側に $\sim 2.6$ mmシフトしていた。

## [3] HOMを用いた空胴アライメントのビーム実験 (FLASHにおけるビーム実験)

DESY 研究所にあるFLASH(Freie-elektronen LASer in Hambrug)にて、TESLA 空胴を用いたビーム応答試験を行った。測定に使用した空胴はACC6 moduleにインストールされた8空胴である。TESLA 空胴実機(Z84)の測定より、メインダイポールモードの電磁界分布の測定を行い、TE<sub>111</sub>-1,2,3といった局所的な電磁界分布を持つモードに着目し、これらのモードを使用することで、空胴の歪みを検出する可能性があると考え、その検証を試みた。また、TE<sub>111</sub>-6、TM<sub>110</sub>-5といった高インピーダンスモードを用いた空胴ミスアライメント測定も行った。空胴アライメントの目標値はビーム軸からの距離で $\pm 300 \mu\text{m}$ である。測定の結果、ACC6 module 8空胴のビーム軸からのずれは、 $\pm 300 \mu\text{m}$ (エラーバーの範囲を加えると $\pm 500 \mu\text{m}$ )以内に収まっている空胴は2台(#6,#7)、 $\pm 1\text{mm}$ (エラーバーの範囲を含む)以内に収まっている空胴は5台(#3,#5,#6,#7,#8)、1mm以上の空胴は3台(#1,#2,#4)、であった。TE<sub>111</sub>-6、TM<sub>110</sub>-5の電氣的な中心位置は測定エラーの範囲内で一致しており、両モードともに空胴ミスアライメント検出に使用

できることが分かった。ダイポールモード間における電氣的中心位置のずれを調べた結果、TE<sub>111</sub>-1,-3といった局所的電磁界分布を持つモードの電氣的中心位置がその他のモードと比較して大きくずれていた空洞があった。これは空洞の曲がりを示唆するのか、空洞の端と真ん中のセルで電氣的中心位置が異なることを示唆していることが考えられる。TESLA銅製9セル空洞を用いて、セル間の電氣的中心位置の測定を試みたが精密な結果は得られなかった。今後、9セル空洞のセル間における電氣的中心位置の分布を調べる必要がある。

渡辺君の学位論文は超伝導電子陽電子衝突型線形加速器 (ILC) の空洞アライメントに関するものである。この加速器における、空洞の主要な偏極モードの電気的中心の水平、垂直方向の標準偏差の許容値は  $300\mu\text{m}$  とされている。しかしながら、超伝導空洞は主として板金加工により成形される為、幾何学的中心をこれより充分良い精度で決めることはできない。又、仮に幾何学的中心を定義できたとしても、空洞形状の不完全さ等により、電気的中心はこの幾何学的中心から大きくずれる。通常の高周波測定で精度良く電気的中心を求めるのも難しく、最終的にはビームを使ったアライメントが不可欠となる。渡辺君はこのビームによる空洞アライメントの可能性を KEK の超伝導試験設備 (STF) で検証することを目指し、設計を開始していた (1) STF 空洞の高調波出力カップラー (HOM カップラー) の設計、性能試験。(2) この空洞の高調波モードの特性の実験的解析を進めた。残念ながら、KEK でのビーム試験が延期されたことから、DESY の試験線形加速器 (TTF) でビーム試験を行なうこととし、TTF 空洞の高調波モードの特性の実験的解析を経て、(3) ビーム試験、解析を行なった。

(1): HOM カップラーについては、STF 空洞の設計方針に適合するように TTF 空洞の HOM カップラーの改造、改良設計から銅製モデルの測定、ニオブ製実機の測定と、手順を尽くした開発を行なった。空洞に取付け後は超伝導状態での耐電圧試験、高調波モードの負荷  $Q$  値の測定等を行ない、十分な性能を有することを確認した。又、この開発過程で得られた知見は ERL 等の連続運転空洞の HOM カップラーの提案に生かされている。

(2): 高調波モードの特性の解析においては、ビーズ法を駆使し、偏極モードの偏極方向の測定を行なった。測定した STF、TTF 空洞では、入力、HOM カップラーが偏極方向に大きな影響を与えていることが確認された。又、エンドセルに大きな電磁界を持つ特殊なモードでは偏極方向がセル毎に回転していく例も観測された。電気的中心位置の測定では、ビーズ法では十分な精度が得られないことが分かったが、ビームパイプ部での電気的中心は中心軸付近をアンテナでスキャンする方法で、機械的中心から  $2\text{mm}$  程度ずれていることが確認出来た。

(3): ビーム試験は 2006 年夏と 2007 年夏の 2 回行なった。実験、解析に使用した空洞は同一クライオモジュール内の 8 空洞、解析に使用した偏極モードは、インピーダンスが大きく、偏極モード間の周波数分離の良い、 $\text{TE}_{111-6/9\pi}$ 、 $\text{TM}_{110-5/9\pi}$  モードである。最上流の 1 台を除く 7 台の空洞では、両モードの電気的中心はほぼ同じ値を示し、全体として  $+0.5\pm 0.3\text{mm}$  であったが、上流側の空洞では、両モードとも、 $-1\text{mm}$  ほどずれていた。又、空洞の長手方向の歪みを見る為、中心セルに強い電磁界を持つ  $\text{TE}_{111-1/9\pi}$  モードについての解析を行なった結果、いくつかの空洞で他のモードで得られた中心から  $1\text{mm}$  程度ずれているものがあった。

以上、ビームによる空洞のアライメントの可能性を検証することを目的として、HOM カップラーの高周波設計、性能測定、空洞の偏極モードの実験的解析といった準備を経て、ビーム実験を遂行した。測定精度の向上、測定結果をどのように初期の幾何学的アライメントに反映するかといった課題が残されているが、初期の目的を達成した、充分学位論文に値する仕事であり、審査員全員で合格とした。