

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 STUDY OF BEAM INDUCED HOM FOR ALIGNMENT DETECTION OF 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES

倉本綾佳^{#, A)}, 早野仁司^{B)}, Baboi Nicoleta^{C)}
Ayaka Kuramoto^{#, A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Nicoleta Baboi^{C)}
A) Sokendai, B) KEK, C) DESY

Abstract

Alignment estimation of superconducting accelerator cavities in a cryomodule can be done by using beam induced higher order mode (HOM). We have been studying on beam pipe modes which are localized at each beam pipe and 1/9 pi mode of the first dipole passband. These electrical centers indicate misalignment, tilt and bending of superconducting cavities. We measured beam induced HOM in STF accelerator at KEK from 2012 to 2013 and beam induced HOM in TESLA cavity in FLASH at DESY on September 2013 and May 2014. The electrical centers are also studied by bead pull method and simulation. We discuss these measurements and simulation.

1. はじめに

クライオモジュール内の超伝導加速空洞のアライメント評価をビーム誘起高調波ダイポールモードによって測定することができる。これまで超伝導空洞のビームパイプに局在するビームパイプモードと空洞長手方向中心に最大振幅を持つ TE111 の 9 分の 1 パイモード (TE111-1) に着目し研究を行ってきた。これらのモードの電気的中心が空洞のミスアライメント量, 歪みを示唆する。2012~2013 年には KEK の STF 加速器にて, 2013 年 9 月および 2014 年 5 月には DESY の FLASH にて TESLA 空洞内にビームが誘起する高調波モードの測定を行った。STF で用いられている 9セル超伝導加速空洞 (KEK 空洞) の形状は DESY の TESLA 空洞のものとは異なっているが, どちらの空洞においても現在までに TE111-1 の信号およびビームパイプモードと思われる信号を測定することに成功している。これらの電気的中心の研究はビーズ測定やシミュレーション計算などからも行っている。今回はこれらの測定及びシミュレーションについて述べる。

2. ダイポールモード電気的中心

2.1 ビーム誘起 HOM

ダイポールモードの振幅はビームの電荷量 q , オフセット量 r に比例し, 次式で記述することができる^[1]。(R/Q)^(mn)は n 番目の m -pole の R/Q であり, $m=1$ のときダイポールモードを表す。

$$A_{\text{dipole}} \approx q \cdot r \cdot \left(\frac{R}{Q}\right)^{(1n)}$$

ここでオフセット量とはダイポールモードの偏極

軸からの距離のことである。1つのダイポールモードには偏極方向の違いから数 MHz から 10 数 MHz 程度周波数の異なる 2つのピークが存在する。それらの偏極軸をそれぞれ求め, その交点をビーム誘起ダイポールモードの電気的中心として求める。この交点は電気的中心であり, 空洞の機械的中心と一致するとは考え難い。なぜなら空洞はインพุットカップラーや HOM カップラー等が取り付けられており, 非対称になっているからである。特に非対称な部分に局在しているビームパイプモードへの影響が大きいと思われる。そこで, 電気的中心と機械的中心とのズレを見積ることを試みている。

2.2 シミュレーション

HESS 12^[2]を用いて, 9セル超伝導空洞 (KEK 空洞) のビームパイプモードを固有値解析で計算した。共振周波数 2194 MHz に Figure 1(a)に示す電場分布を持つモードが見つかった。Figure 1(b)はそのモードの空洞長手方向の軸に沿っての電場強度をプロットしたものであり, 軸のオフセット量を変えたときの電場強度が共に示されている。空洞の機械的中心での電場強度は赤線で示されている。左側から1つ目の山は Figure 1(c)の位置に相当し, この部分ではモノポールであるが, 2つ目の山では Figure 1(d)に示す通りダイポールモードとなっていることが分かる。

2.3 ビーズ測定

空洞に摂動を与えたときの周波数変化量 Δf は次式で表される^[3]。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\int_{\Delta V} (\alpha_h \mu |H|^2 - \alpha_e \epsilon |E|^2) d\Delta V}{4U}$$

ここで, f_0 は摂動前の共振周波数, ΔV は摂動を与える物体の体積, U は空洞内の総蓄積エネルギー, α_e ,

[#] kuramoto@post.kek.jp

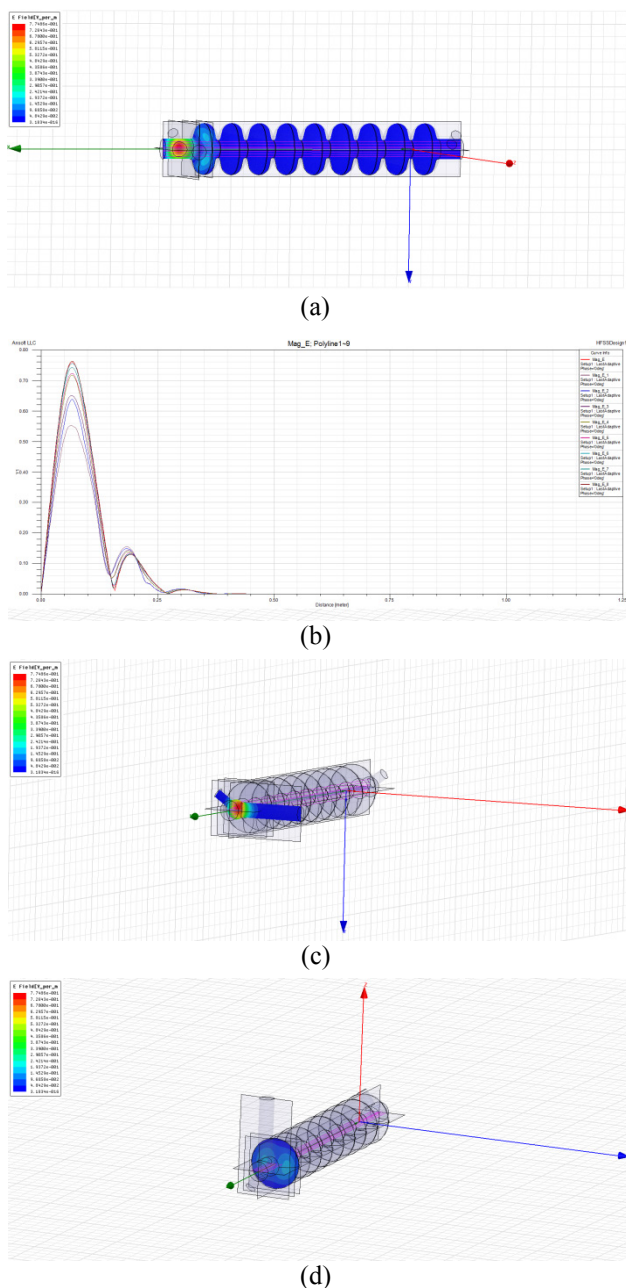


Figure 1: Simulation Result of Beam Pipe Mode for KEK cavity.

α_h は摂動を与える物体の電場形状因子、磁場形状因子、EとHは ΔV 内の摂動を与える前の電場と磁場である。この式により、摂動を与えたときの周波数変化からモード分布を知ることができる。直径6mmのセラミックビーズを空洞長手方向に移動させたときの周波数の変化をFigure 2に示す。誘電体球による周波数摂動は電場の影響のみを反映しており[4]、HFSS 12の計算から求めたビームパイプモードの周波数2194 MHzとは多少異なる周波数2254 MHzであるが、Figure 1(b)の電場強度と似た振る舞いを示すモードが見つかった。このモードの電磁場分布をさらに詳細に測定し、電気的中心と機械的中心

のズレを求める予定である。

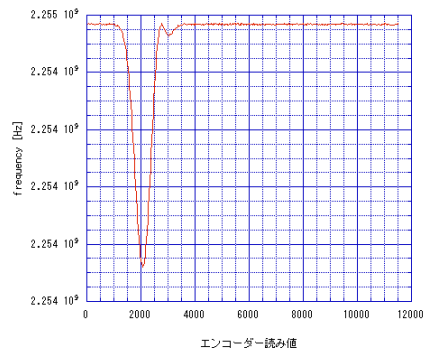


Figure 2: Example of bead pull measurement.

3. ビーム誘起 HOM 測定

3.1 STFでのビーム誘起 HOM 測定

KEKのSTF加速器にてビーム誘起高調波モードの測定を行った[5]。TE111-1電気的中心、ビームパイプモード電気的中心を求めたプロットをFigure 3, Figure 4に載せる。Figure 5にそれらの結果から得られた電気的中心を空洞長手方向(z軸)中心を原点とし、z軸に対してまとめた。

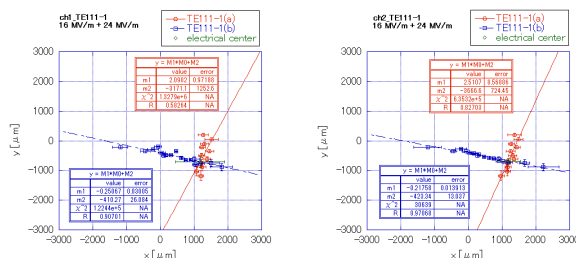


Figure 3: Electrical center of TE111-1.

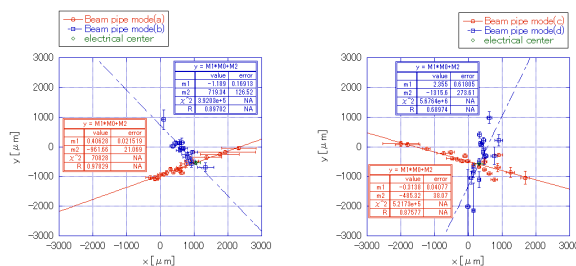


Figure 4: Electrical center of Beam Pipe Mode.

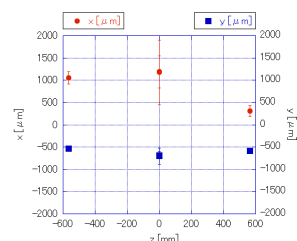


Figure 5: Electrical centers in a cavity.

3.2 FLASHでのビーム誘起HOM測定

DESYのFLASHにてビーム誘起HOM測定を行った。Figure 6はFLASHの概略図^[6]を示している。2013年9月の測定において、上流から7番目のクライオモジュール（ACC7）内の上流から8番目（最下流）のTESLA空洞のHOMを測定し、TESLA空洞においてもビームパイプモードらしい信号を検出できることが確認できた^[7]。2014年5月の測定にて上流から5番目のクライオモジュール（ACC5）内の上流から8番目（最下流）にある空洞Cav8のTE111-1とビームパイプモードの電気的中心を求めるための測定を行った。測定中のビーム運転は1バンチ、バンチ電荷量が約0.52 nCであった。

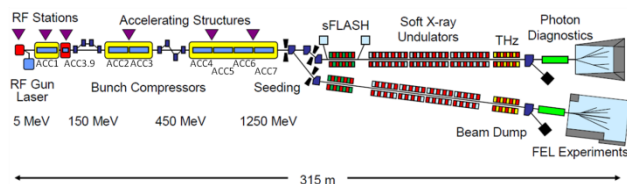


Figure 6: FLASH Layout.

データ取得はHOMカプラーからの信号をオシロスコープ（Tektronix TDS7404）に接続し、ACC4の上流にあるダイポールマグネットのH3DBC3（水平方向）とVBDBC3（垂直方向）の電流値を変えて行った。そのときのACC5Cav8の中心でのビーム位置をFigure 7に示す。ACC5の上流と下流にあるBPMの値からACC5Cav8の中心でのビーム位置を算出した。その際、BPMの読み出したビーム位置がBPMの線形範囲から外れているところでのビーム位置はダイポールマグネットのセット値に比例すると仮定している。また、ビーム軌道上にあるQマグネットによるビーム軌道の変化を今回は無視し、BPM間でビームは直線移動したことを仮定している。今後、シミュレーションを行い、補正を行う予定である。

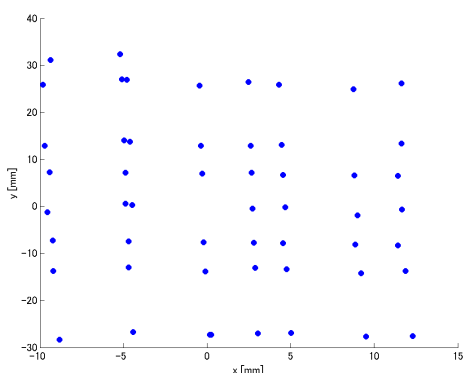


Figure 7: Beam Positions during beam induced HOM measurements.

測定セットアップをFigure 8に示す。それぞれのHOMカプラー（HOM1, HOM2）から取り出され、スプリッターで分けられたHOM信号の内の一つを測定することができた。HOM信号はもれ出てくる加速モードのパワーを減衰させるためのハイパス

フィルター（HPF; Mini-Circuits VHF-1500+）2つを通過後、再度スプリッターで経路①と経路②に分けられた。経路①にはTE111-1測定用の（TE111のパスバンドをカバーする）1605~1785 MHzのバンドパスフィルター（BPF）とアンプZX60-1614LN-S（1217~1620 MHz, Gain = 14 dB, NF = 0.5dB）が2つ接続され、経路②にはビームパイプモード測定用の2100~2210 MHzのBPFとアンプZRL-2400LN（1000~2400 MHz, Gain = 28 dB, NF = 1.2 dB）が接続され、その後オシロスコープに繋がられた。

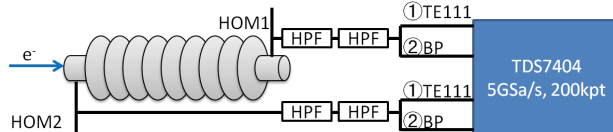


Figure 8: Measurement Setup.

1つの波形データは200kのデータポイントがあり、1秒当たり5Gサンプル取得した。HOM1からのHOMの波形をFigure 9に載せる。赤線は経路①（TE111-1用）でのデータを、青線は経路②（ビームパイプモード用）のデータを示している。

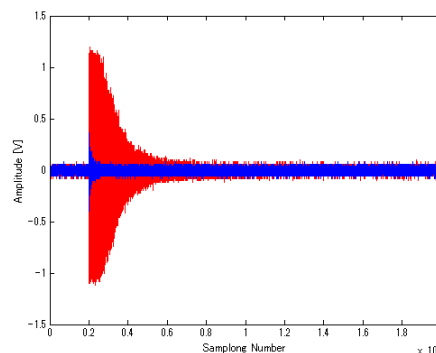


Figure 9: An Example of HOM Waveform.

HOM1から取り出されたHOM波形をFFTし、求めたTE111-1のスペクトラムをFigure 10に示す。周波数刻みはおよそ20 kHzである。異なるビーム位置でのデータが重ねられている。Figure 10中に見られる2つのモードは偏極モードである。周波数の低い方からそれぞれTE111-1a, TE111-1bと呼ぶことにする。TE111-1aとTE111-1bの周波数は順に1610.09 MHzと1610.30 MHzである。Figure 11にはそれぞれの頂点の値を抽出し、ビーム電荷量で規格化したものをビームポジションに対してプロットした。TE111-1と同様に、HOM1（下流）側のビームパイプモードについてもスペクトラム例とビームパイプモードの強度分布をFigure 12, Figure 13に示す。先と同様周波数の低い順にBP-a, BP-bとラベル付けした。BP-aとBP-bの周波数はそれぞれ2108.07 MHzと2116.86 MHzである。TE111-1a, TE111-1b, BP-a, BP-bの強度分布に偏極軸を見つけることができる。今後、偏極軸の交点を算出して行く予定である。

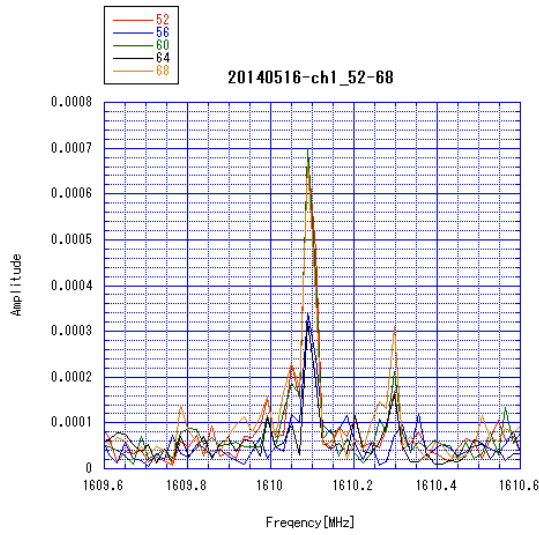


Figure 10: Spectrum of TE111-1.

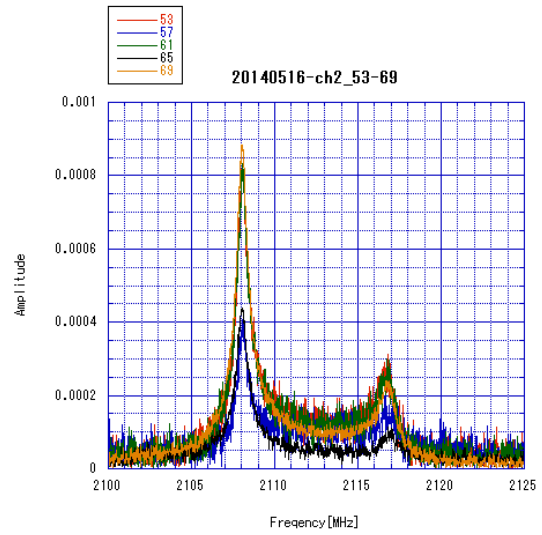
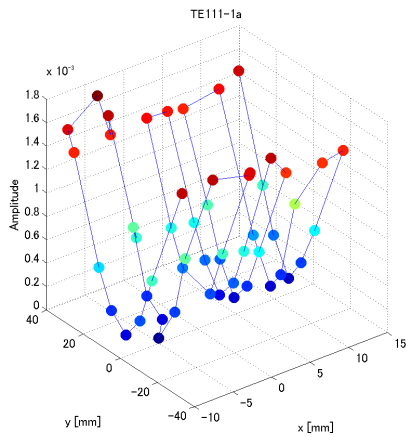
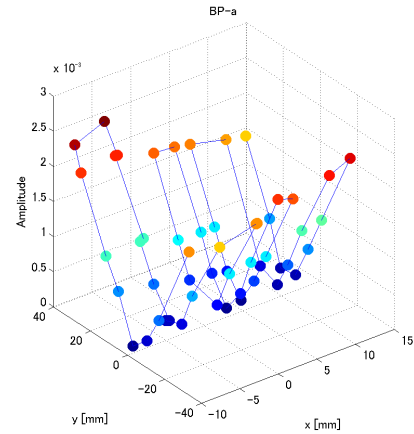


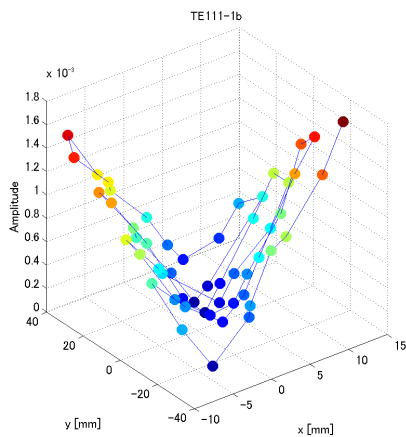
Figure 12: Spectrum of Beam Pipe Mode.



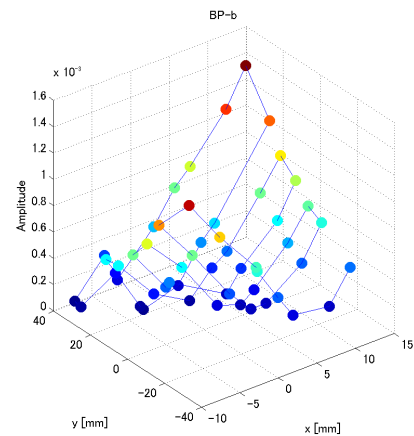
(a) TE111-1a



(a) BP-a



(b) TE111-1b



(b) BP-b

Figure 11: Amplitude Distributions of TE111-1.

Figure 13: Amplitude Distributions of Beam Pipe Mode.

また、HOM2 の経路② (ビームパイプモード) 側から検出されたスペクトラムを Figure 14 に示す。

ビームパイプとみられるピークを1つしか検出することができなかった。もう一方の偏極モードの偏極方向が HOM カプラーとカップルしない方向であったためではないかと考えている。

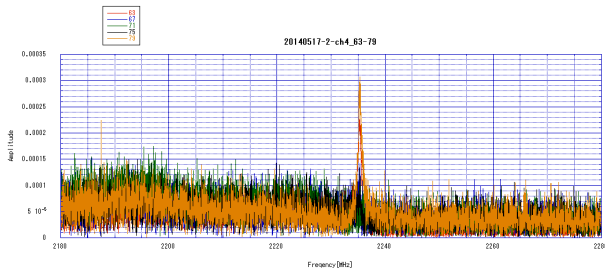
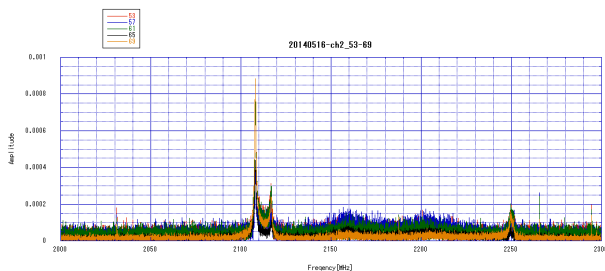
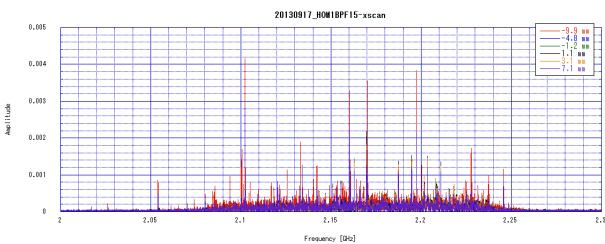


Figure 14: Spectrum of Beam Pipe Mode from HOM2.

DESY で測定を行った 9 セル超伝導加速空洞 ACC5Cav8 と ACC7Cav8 のスペクトラムが大いに異なることが Figure 15 から分かる。この原因は現在よく分かっていない。



(a) ACC5Cav8



(b) ACC7Cav8

Figure 15: Comparison of Spectrum for different cavities.

4. 結論・考察

DESY の TESLA 空洞においても TE111-1 とビームパイプモードを測定することができ、強度分布を得ることができた。今後、ビーム軌道の補正を行い、偏極軸を求め、電気的中心を算出する。また、電気的中心と機械的中心のズレの補正を行い、アライメント情報を取り出す予定である。

5. 謝辞

STF でのビーム運転をサポートして下さいました STF グループの方々に感謝いたします。

DESY での測定は総合研究大学院大学のインターンシッププログラムで実施しました。また、DESY での測定において T. Wamsat と L. Shi に協力してい

ただいたことに感謝します。

参考文献

- [1] P. Zhang, "Beam Diagnostics in Superconducting Accelerating Cavities".
- [2] ANSYS HFSS website: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Signal+Integrity/ANSYS+HFSS>
- [3] W. Barry et al., "Perturbation Method for the Measurement of Longitudinal and Transverse Beam Impedance", LBL-22212, March 1987.
- [4] R. G. Carter, "Accuracy of Microwave Cavity Perturbation Measurements", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.49, No.5, May 2001.
- [5] A. Kuramoto et al., "Beam Induced HOM Analysis in STF", SRF2013, THP094.
- [6] FLASH website: <http://flash.desy.de/>
- [7] A. Kuramoto et al., "Simulations and Measurements of Beam Pipe Modes Excited in 9-cell Superconducting Cavities", Proceedings of IPAC2014.