

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 center と機械的 center

のズレを求める予定である。

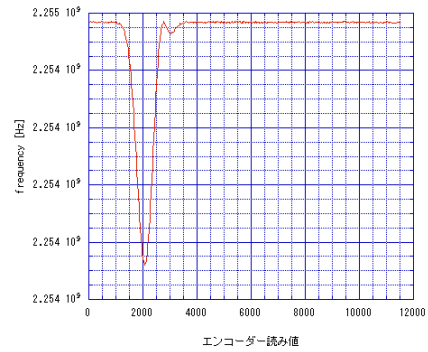


Figure 2: Example of bead pull measurement.

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 center，ビームパイプモード電気的 center 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 center を空洞長手方向 (z 軸) center を原点とし，z 軸に対してまとめた。

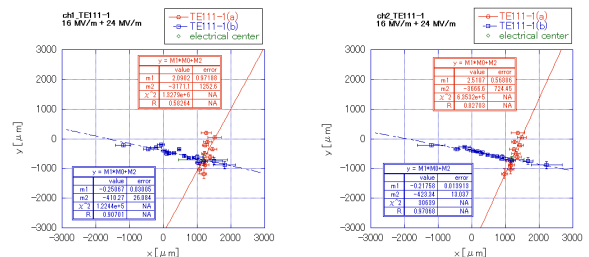


Figure 3: Electrical center of TE111-1.

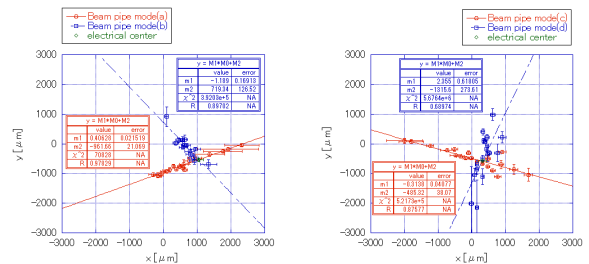


Figure 4: Electrical center of Beam Pipe Mode.

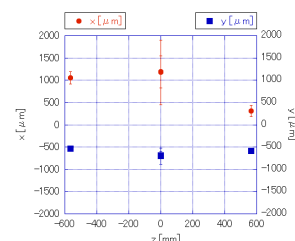


Figure 5: Electrical centers in a cavity.

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。

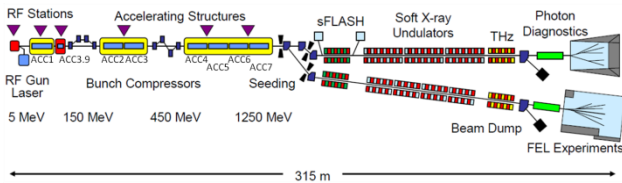


Figure 6: FLASH Layout.

データ取得は HOM コー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。

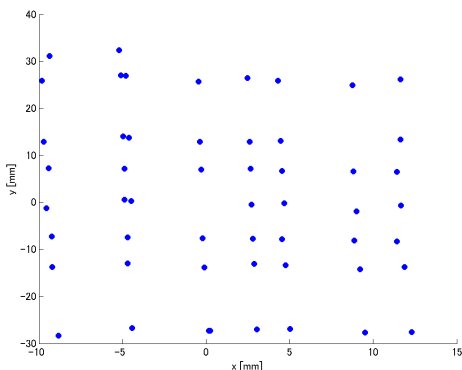


Figure 7: Beam Positions during beam induced HOM measurements.

測定セットアップを Figure 8 に示す。それぞれの HOM コーラー (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。

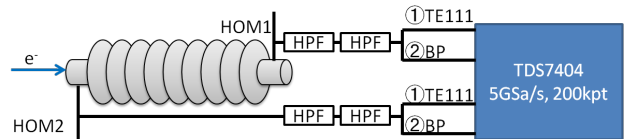


Figure 8: Measurement Setup.

1つの波形データは 200 k のデータポイントがあり、1秒当たり 5 G 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。

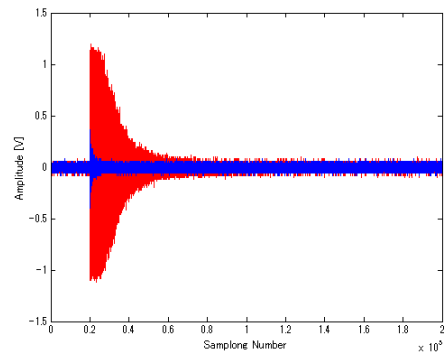


Figure 9: An Example of HOM Waveform.

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。

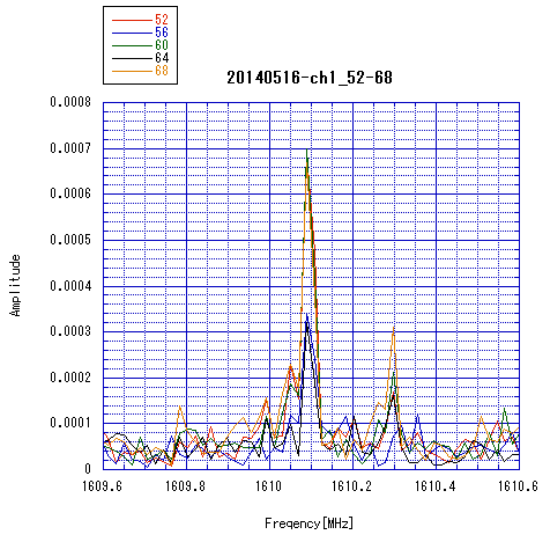


Figure 10: Spectrum of TE111-1.

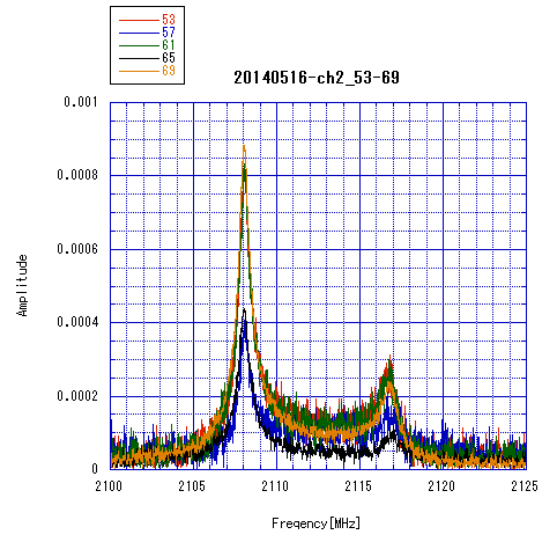
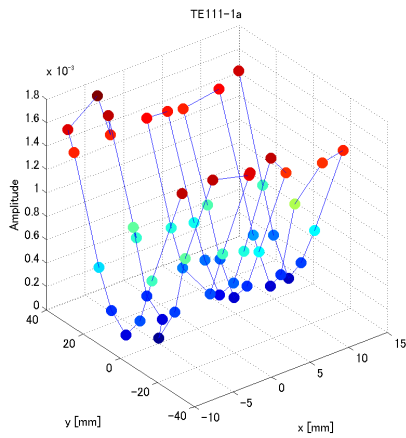
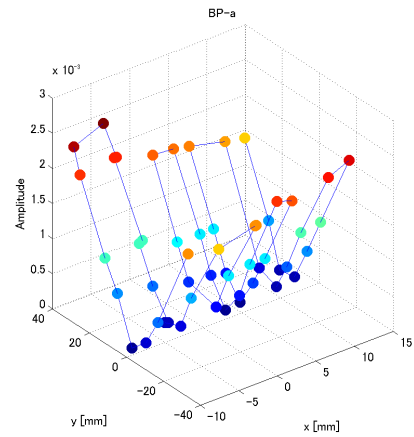


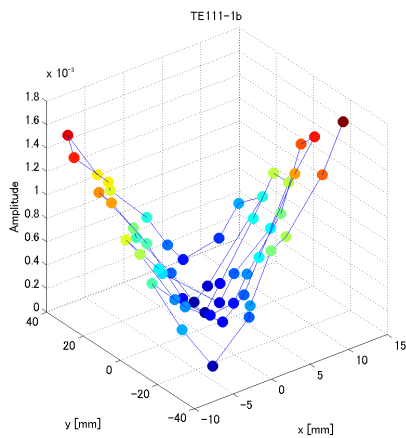
Figure 12: Spectrum of Beam Pipe Mode.



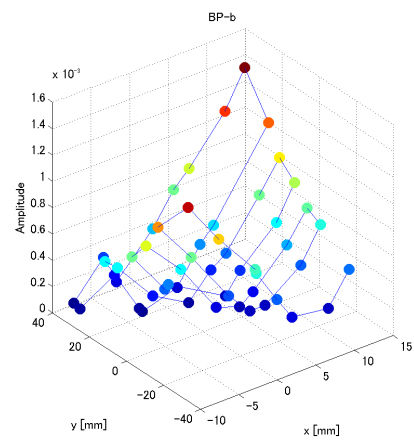
(a) TE111-1a



(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。

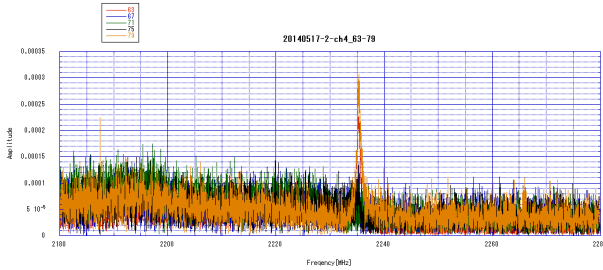
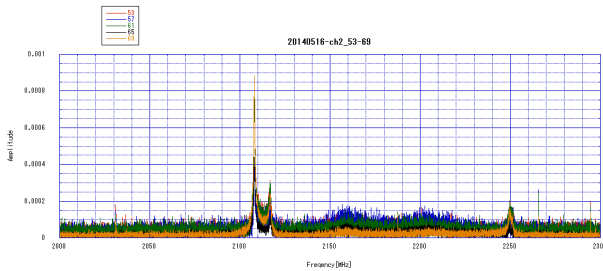
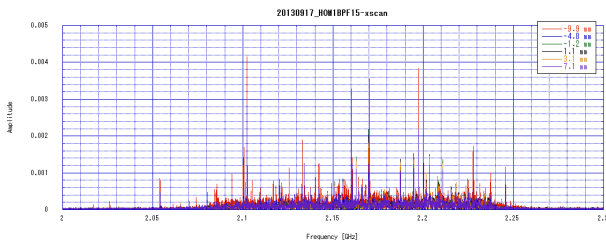


Figure 14: Spectrum of Beam Pipe Mode from HOM2.

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.