

STF 加速器での 9 セル超伝導加速空洞アライメント検出のための HOM 解析

ANALYSIS OF HOM FOR ALIGNMENT DETECTION OF 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES IN STF ACCELERATOR

倉本綾佳^{#, A)}, 早野仁司^{B)}

Ayaka Kuramoto^{#, A)}, Hitoshi Hayano^{B)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Cavity alignment requirements for ILC are less than 300 μm offset and 300 μrad tilt with respect to cryomodule axis. To achieve these requirements, we need to confirm alignment quality of the existing cryomodule. Beam induced HOM was measured with beam trajectory sweep in STF (Superconducting rf Test Facility) accelerator in 2012 - 2013. To detect alignment of 9-cell superconducting cavities, we propose to use electrical centers of TE111-1 and beam pipe modes. The detailed data analysis is discussed in this paper.

1. はじめに

ILC ではクライオモジュールに対して 300 μm 以下のオフセット且つ 300 μrad 以下の傾きで 9 セル超伝導加速空洞が設置されていることが要求されている^[1]. 現状ではどの程度のアライメント精度を得られているのか検証する必要がある. ビーム通過位置と電気的中心との距離はダイポールモード HOM の強度に比例することが知られており, ダイポールモードのこの性質を利用した空洞のオフセット量測定はすでに DESY の FLASH において測定されている^{[2][3][4][5][6]}が, 組み立て中や 2 K までの冷却中に生じた空洞の曲がり等の変形の測定は未だ行われていない. 空洞の傾きおよび歪みを空洞長手方向中心および両端での空洞電気的中心の関係から推定することを試みている.

2. 測定セットアップ

2.1 STF 加速器

STF 加速器^{[7][8][9]}にて HOM 測定を行った. L バンド RF 電子銃^[10]で生成された電子ビームはクライオモジュール内に納められた 2 つの 9 セル超伝導加速空洞^[11]により 40 MeV まで加速される. Figure 1 はクライオモジュールの上流側から下流を向いて撮られた写真である. STF 加速器ビームラインの内, HOM 測定に関する部分のみのレイアウトを Fig. 2 に示す. 9 セル超伝導加速空洞を上流からそれぞれ cav1, cav2, 9 セル超伝導加速空洞に 2 つずつ取り付けられた HOM カプラーを上流から HOM1, HOM2 と呼ぶ. ビーム位置モニター (BPM) はクライオモジュールの上流, 下流に設置されている.



Figure 1: STF Accelerator.

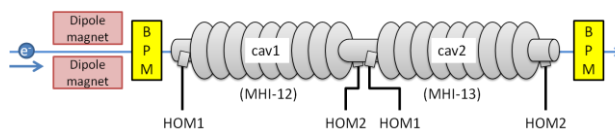


Figure 2: Simplified Layout of HOM detection. An electron beam comes in from the left through dipole magnets, beam position monitor (BPM), two SC cavities, and another BPM.

2 つのダイポールマグネットが上流の BPM よりも上流にあり, このマグネットを用いてビームを横方向にスキャンすることができる. ビーム軌道スキャン時に HOM 信号をオシロスコープ (Agilent Technologies DSO9404A) を用いて 10 GSa/s, 262 kpts で 2 つの BPM の信号と同期して取得した. そのときのビームパラメータを Table 1 に示す.

[#] kuramoto@post.kek.jp

Table 1: Parameter of Beam

Parameter	value
Frequency of accelerator	1.300 GHz
Number of beam bunches	28
Bunch spacing	6.15 ns
Bunch charge	~50 pC
Repetition	5 Hz
Gradient of RF Gun	40 MV/m
Gradient of cav1	16 MV/m
Gradient of cav2	24 MV/m

2.2 ビーム位置推定

BPMにはクリッピング回路が組み込まれ、バンチにわたって平均を取り位置を導出している。これらのゲート幅は30 nsである。2つのBPMデータから空洞内でのビーム位置を見積った。このときBPM間ではビーム軌道は線形であることを仮定した。クリッピング回路と計算式の非線形よりビーム位置導出には補正が必要であった。HFSSでビーム位置変化による電圧応答を計算し、ビーム位置の補正を行った。

2.3 電氣的中心導出方法

ダイポールモードの強度はビーム位置に比例する。ビームが横方向にスキャンされたとき、ビーム位置に対するダイポールモード強度のプロットはV字を描く。Figure 4はビームをx方向にスキャンした時のFig. 3中のピークTE111-1(a)のV字プロットの一例である。

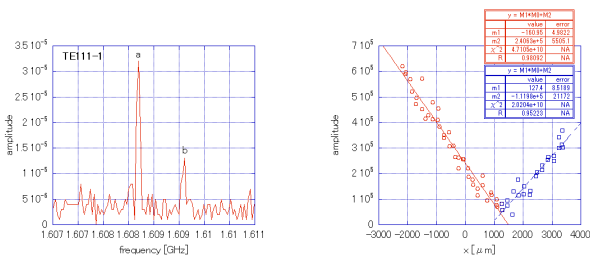


Figure 3: FFT of data from HOM1 in cav1
Figure 4: V-shape response of TE111-1(a)

V字プロットの頂点はダイポールモードの中心軸上にある。V字プロットを2つの領域に分け直線フィットした結果、求められた交点をV字の頂点とした。ダイポールモードは偏極方向の違いによりFig. 3のようにスプリットしているの、ダイポールモードの中心軸が2本求められ、その交点が電氣的中心となる。模式的に示した図がFig. 5である。

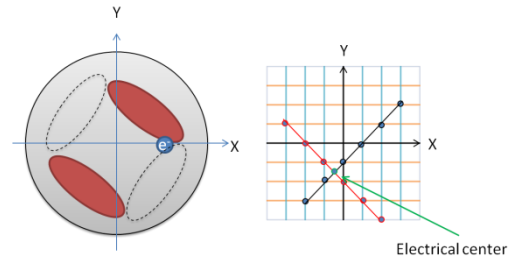


Figure 5: Conceptual diagram of detecting an electrical center.

2.4 アライメント検出方法

空洞長手方向中心の電氣的中心はその位置で最も振幅が大きくなる電場分布を持つHOMの最低周波数帯中の9分のπモード (TE111-1) から導出し、空洞両端の電氣的中心はビームパイプ付近に局在するモードを用いて求める。

2.5 TE111-1モード

TE111-1の測定時にはHOMカプラーとオシロスコープとを接続するケーブルの間に2つのハイパスフィルター (HPF: Mini-Circuits VHF-1500+)と1.590 GHzから1.802 GHzを通過させるバンドパスフィルター (BPF)を1つ接続した。このセットアップではTE111のすべてのモードを検出できる。cav1でのTE111の共振周波数をTable 2に示す。#は共振周波数の通し番号であり、n*(π/9)がセル間の位相進みである。スプリット毎に周波数が低い方からa, bとラベル付けをしている。

Table 2: Observed frequencies of TE111-n in cav1

#	n	Frequency [GHz]	#	n	Frequency [GHz]
1	1	a 1.6087	10	6	a 1.6933
2		b 1.6096	11		b 1.6936
3	2	a 1.6146	12	7	a 1.7231
4		b 1.6153	13		b 1.7234
5	3	a 1.6255	14	8	a 1.7537
6		b 1.6262	15		b 1.7541
7	4	a 1.6430	16	9	a 1.7829
8		b 1.6435	17		b 1.7849
9	5	a 1.6664			

2.6 ビームパイプモード

ビームパイプモード測定時にはIQコンバーターを用いた。その概略図をFig. 6に示す。2.100 GHz, 10 dBmの信号を入力し、50 MHzのローパスフィルター (LPF)を用いることで、2.050 GHzから2.150 GHzまでのHOM信号を測定することができる。このとき信号の周波数は2.100 GHzからの差Δfとしてのみ分かる。

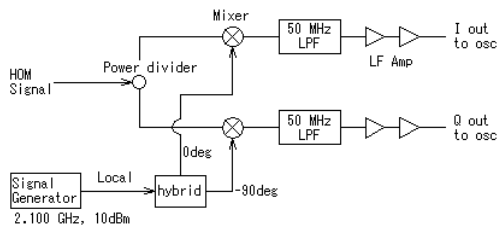


Figure 6: Schematic diagram of IQ Converter.

3. HOM 解析

3.1 TE111-1

cav1 の TE111-1 の電気的中心を Fig. 7, Table 3 に示す. 左図は HOM1 から取り出された TE111-1 の解析結果であり, 右図は HOM2 から取り出された TE111-1 の解析結果である. 2つの図から導出された TE111-1 の電気的中心は誤差の範囲で一致している.

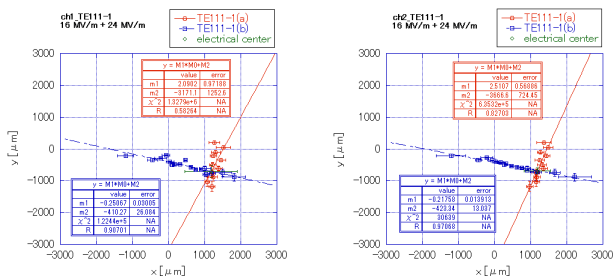


Figure 7: Electrical centers of TE111-1 in cav1: Left one is analysis of TE111-1 from HOM1 and right one is that from HOM2.

Table 3: Electrical center of TE111-1 in cav1

	HOM1	HOM2
x [μm]	1179 ± 725.6	1189 ± 363.4
y [μm]	-705.9 ± 186.0	-682.0 ± 82.63

3.5 ビームパイプモード

TDR-like TESLA 9セル超伝導加速空洞でのビームパイプモードの共振周波数計算値は 2.288 GHz である^[12]が, cav1 では 2.050 GHz から 2.150 GHz の間にダイポールモードのような振る舞いをする共振点が HOM1 から 5 個, HOM2 から 10 個の見つかった. その中からスプリットモードだと考えられるほど周波数の近い共振点であり, かつ振幅が大きく V 字をはっきりと示すものについての解析を行った. cav1 の解析を行った共振点の Δf を Table 4 に, それらの電気的中心を Figure 8 及び Table5 に示す.

Table 4: Observed frequencies of the beam pipe mode

		Δf [GHz]
		from 2.100 GHz
HOM1	a	0.0327
HOM1	b	0.0331
HOM2	c	0.0202
HOM2	d	0.0208

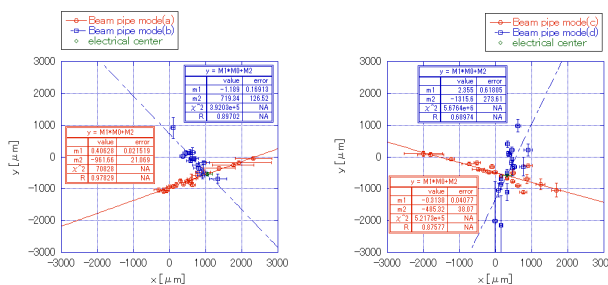


Figure 8: Electrical centers of beam pipe modes in cav1: Left one is at upstream beam pipe and right one is at downstream beam pipe.

Table 5: Electrical centers of beam pipe modes in cav1

	HOM1	HOM2
x [μm]	1054 ± 138.4	311.1 ± 126.2
y [μm]	-533.5 ± 60.25	-582.9 ± 52.91

3.6 TE111-6

DESY の FLASH で行われたビーム励振 HOM を用いたオフセット測定では TE111 モードの中でインピーダンスの高い TE111-6 が使われている. 今回取得したデータから実績のあるモードである TE111-6 についての解析もまた行った. Figure 9 と Table 6 は HOM2 からの信号を解析した結果である. HOM1 からの信号は TE111-6(a) と結合をしていなかったため, 解析することができなかった. これは HOM カプラーの取り付け角度とモードの偏極方向の関係が原因であると考えられる. このプロットの x, y 座標は空洞長手方向中心でのビーム位置である. TE111-1 と TE111-6 とはモードパターンが異なるため, 電気的中心が一致しなくても良いものであると考えているが, TE111-1 と TE111-6 とで求められた電気的中心の位置が近い値となっていることより, この解析方法は大きく間違っていないと考えている.

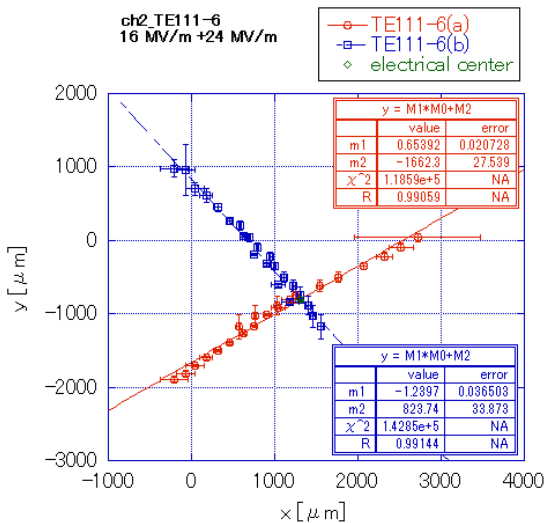


Figure 9: Electrical center of TE111-6 in cav1

Table 6: Electrical center of TE111-6 in cav1

	HOM1	HOM2
x [μm]	—	1313 ± 37.13
y [μm]	—	-803.9 ± 32.45

4. アライメント検出

4.1 cav1 アライメント

Figure 10 に TE111-1 およびビームパイプモードの電気的中心を z 座標に対して示した. 空洞長手方向中心を z=0 とし, 下流側を正方向とした. x, y 座標の基準は 2つの BPM の 0 点を結ぶ線であり, x 軸正方向はインプットカプラーが挿入されている側であり, y 軸正方向は重力方向である.

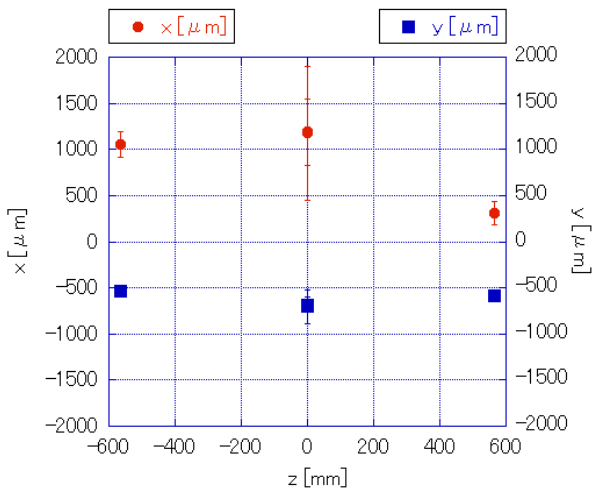


Figure 10: Preliminary alignment detection results of cav1, plotted along the cavity z-axis.

この図は y 座標についてはそれぞれの電気的中心が誤差の範囲で一致しており, BPM 基準点より 500 μm 程上に電気的中心があることを示している. x 座標については HOM1 から求めた TE111-1 エラーが大きいが, それぞれの位置での電気的中心が異なっているように見える. しかし, ビームパイプの電気的中心がカプラーの影響で空洞の機械的中心からずれている可能性が考えられるので, 今後電気的中心と機械的中心との位置関係を調べる必要がある. また, 次に示すカプラーによるビームキックの影響も考慮しなければならない.

4.2 カプラーによるビームキック効果

9セル超伝導加速空洞に RF パワーを入力せずにビームを通過させ HOM 測定を行った. このときデチューニングした状態での測定であったが, TE111-1 の周波数はわずかであり, (a)1.6088 GHz, (b)1.6096 GHz である. TE111-1(b)の V 字プロットは Fig. 11(b)の通り得ることができたが, TE111-1(a)では Fig. 11(a)のようになり, V 字プロットはスキャン範囲で見つけることができなかった.

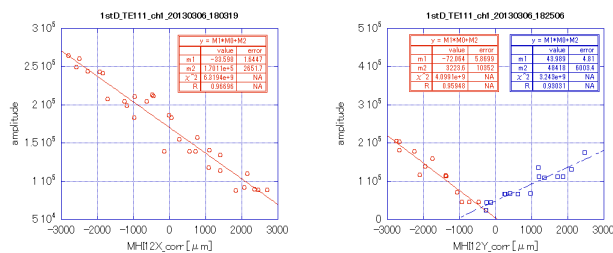


Figure 11(a): Beam position vs. amplitude of response of TE111-1(a)
Figure 11(b): V-shape position vs. amplitude of response of TE111-1(b)

Figure 11(a)よりスキャン範囲でのモードの中心軸の x 座標が 3000 mm 前後かそれ以上であることが推定される. TE111-1(b)で得られた V 字頂点の信号強度の平均を TE111-1(a)での V 字頂点での強度であると仮定し, V 字頂点の位置を見積もった. TE111-1(b)の V 字とならなかったものについても同様に V 字頂点の位置を見積もった. それらの点をすべてプロットしたものが Fig. 12 であり, 電気的中心は Table 7 の通りとなった.

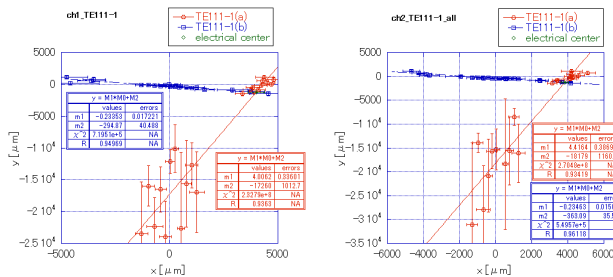


Figure 12: Electrical centers of TE111-1 when RF power into 9-cell superconducting cavities was turned off

Table 7: Electrical centers of TE111-1 when RF power into 9-cell superconducting cavities was turned off

	HOM1	HOM2
x [μm]	4001 ± 397.5	3831 ± 209.0
y [μm]	-1229 ± 119.6	-1262 ± 80.82

Table 3 と比較して, x 座標で $\sim 3000 \mu\text{m}$, y 座標で $\sim 600 \mu\text{m}$ の差が生じている. これは HOM カプラー及び入力カプラーによるビームキック^[13]の影響でビーム軌道を正しく見積もれていないことが原因であると考えられる. 今回の測定は RF 電子銃を出てすぐの超伝導加速空洞で行ったために, カプラーからのビームキックの影響が FLASH での実験よりも大きくなったものと思われる. 今後この影響を考慮していかなければならない.

5. 結論・考察

HOM 解析を行い, TE111-1 およびビームパイプモードの電気的中心を求めることができた. しかし, カプラーキックの影響を受けていると考えられるため, 補正を行う必要がある, また, 電気的中心と機械的中心との位置関係を測定する必要がある.

6. 謝辞

本測定を行うにあたり STF 加速器のすべての装置を稼働しビーム運転を行う必要がありました. STF 加速器の建設, 運転に関わったすべての方々に感謝致します.

参考文献

- [1] ILC TDR Vol. II.
- [2] N. Baboi et al., "Preliminary Study on HOM-based Beam Alignment in the TESLA Test Facility", Proceedings of LINAC 2004, Lübeck, Germany.
- [3] Marc Ross et al., "Cavity Alignment Using Beam Induced Higher Order Modes Signals in the TTF Linac", Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee.
- [4] S. Pei et al., "TTF HOM Data Analysis with Curve Fitting Method", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy.
- [5] Stephen Molloy et al., "High Precision Superconducting Cavity Diagnostics with Higher Order Mode Measurements", Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 9, 112802 (2006).
- [6] K. Watanabe, PhD thesis 2008.
- [7] K. Watanabe et al., "Beam commissioning of STF accelerator at KEK", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, WEPL01.
- [8] M. Kuriki et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 52 (2013) 056401.
- [9] J. Urakawa, "Compact X-ray source at STF (Superconducting Accelerator Test Facility)", J. Phys.: Conf. Ser.357 (2012) 012035.
- [10] S. Hosoda et al., "Generation of 1-ms pulse by Cs2Te photo-cathode in a RF electron gun", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, THPS031.

- [11] M. Omet et al., "Development and Application of a Fully Automated PkQI Control Procedure at KEK STF", Proceedings of IPAC2013.
- [12] R. Wanzenberg, "Monopole, Dipole and Quadrupole Passbands of the TESLA 9-cell Cavity", TESLA 2001-33, (DESY) September 14, 2001.
- [13] N.Solyak et al., "RF Kick in the ILC Acceleration Structure", Proceedings of EPAC08.