

MISSALIGNMENT DETECTION OF SUPERCONDUCTING CAVITIES BY HIGHER ORDER MODES (HOM) AT STF

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

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI]
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

STF accelerator in KEK has been commissioning since April 2012. This accelerator has one cryomodule in which two superconducting accelerator cavities are installed. Higher Order Modes (HOM) excited in the cavities by beam traversing are related to a position of beam and a beam intensity. HOM based beam alignment method using beam excited dipole modes has been developed at FLASH in DESY. We apply this method to the superconducting cavities in the STF accelerator.

STF における超伝導空洞 HOM を利用した空洞アライメントの検出

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の超伝導リニアック試験施設 (STF) では量子ビーム基盤技術開発プログラムの中の高輝度光子ビーム生成 (量子ビーム実験) のための STF 加速器の試験運転が 2012 年 4 月から開始された^[1]. STF 加速器の超伝導リニアックには ILC 用 9 セル超伝導加速空洞 2 台がクライオモジュール内に納められている. 量子ビーム実験ではバンチ繰り返し 162.5 MHz, 1 msec のトレイン長の電子ビームを 5 Hz の繰り返しで最大ピーク電流 10 mA (バンチ当たり 62 pC の電荷量) で 40 MeV まで加速することを目指している.

電子ビームが超伝導加速空洞を通過する時に励振する高調波モード (Higher Order Modes : HOM) には空洞内を通過するビームの位置情報が含まれていることは知られている. ビーム軌道を, 基準となるビーム位置モニター (BPM) で計測しながら, ダイポールマグネットの強度を変えることによりビーム軌道の変化と変化する HOM の振幅と位相との相関から, 超伝導加速空洞の電気的中心を計測し, BPM に対するミスアライメント量を検出することができる. この HOM を用いた空洞アライメント法は DESY の FLASH (Free-Electron Laser in Hamburg) で盛んに追及されてきた技術であり^[2,3,4,5], 本研究においてもその技術を STF 加速器の超伝導加速空洞に応用する. 今回はダイポールモード TE111 の高いインピーダンスを持つモードを用いて, ミスアライメント量を求めた. HOM 信号はフィルターと RF アンプを通過した後, 高速オシロスコープでデジタル化し, FFT 解析により振幅と位相を求めた. その結果について報告する.

2. 高調波モード

HOM はビーム進行横方向平面の極の数によって分類される. 今回の測定では 2 つの極を持つダイポールモードに着目した. TESLA TDR-like 9 セル空洞のダイポールモードの分散曲線を図 1 に示す^[6]. 図 1 中の点線, 実線がそれぞれ分散曲線, 光速円錐を表している. ◇は 9 セル空洞両端に磁場境界条件 (空洞の両端で縦方向の電場が 0) を, ×は電場境界条件 (空洞の両端で電場垂直) を課し MAFIA で計算したものである.

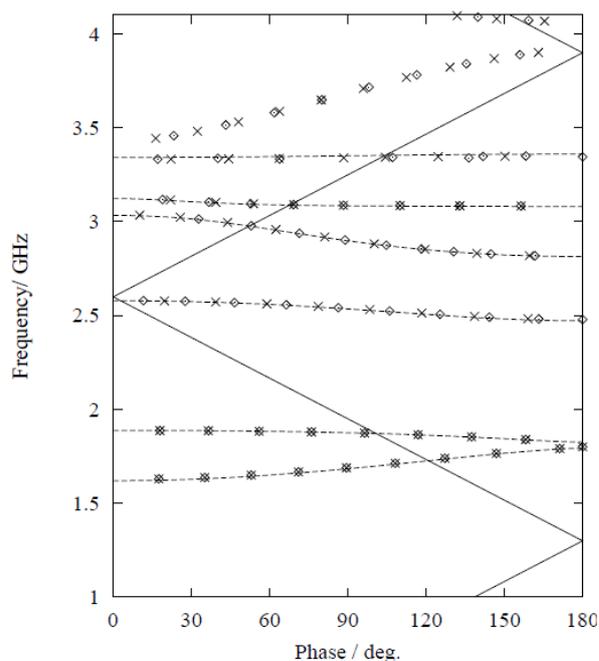


図 1 : ダイポールモードの分散曲線 (…分散曲線, ◇MM, ×EE, ___光速円錐)

1つのパスバンド内にはセルの数だけセル毎の位相進みの異なる HOM が存在する. 図 1 中の一番周波数の低いパスバンドが TE111 モードである. ただし, 今回実際に測定に用いた空洞と計算された空洞形状とは厳密には異なるため, モードの周波数は図 1 中の値から数十 MHz 程度外れる.

分散曲線と光速円錐との交差点近傍にあるモードがビームと強く結合するので, 図 1 から TE111-6 (TE111 の 6 番目の HOM), TE111-7 がビームにより励振されやすいことが分かる.

3. HOM 測定

3.1 測定セットアップ

STF 加速器のビームラインレイアウトを図 2 に示す. 図 3^[7]はクライオモジュール内の 2 台の 9 セル超伝導加速空洞のそれぞれの両端に取り付けられた HOM カップラーの位置を示している.

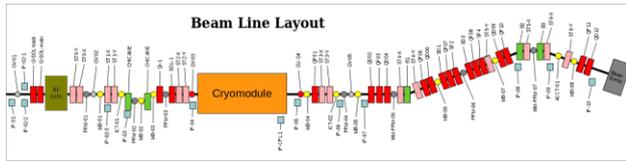


図 2 : STF 加速器ビームラインレイアウト

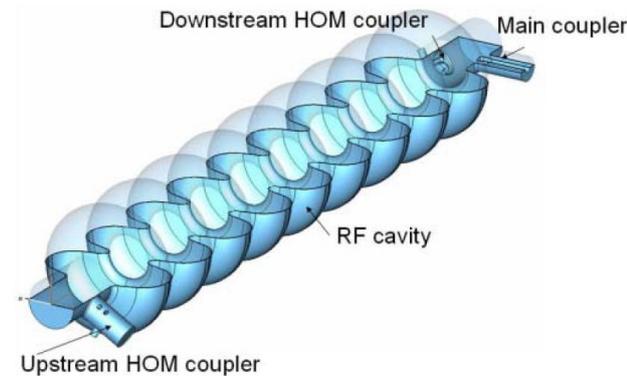


図 3 : 9 セル超伝導加速空洞における HOM カップラー取り付け位置

今後, 上流の HOM カップラーを HOM1, 下流の HOM カップラーを HOM2 と呼ぶ. HOM カップラーに結合された HOM のパワーは図 4 のように方向性結合器 (Spectrum Microwave FC6370-4) により -20 dB 減衰された後, 電力分配器 (Mini-Circuits ZFRSC-42-S+ -6dB) で分けられ 21 m の同軸ケーブル (WF-H50-3S, 10D-WFLEX-DH など), ハイパスフィルター (Mini-Circuits VHF-1500+ $f_c=1550$ MHz) とアンプ (Mini-Circuits ZX60-6013E+ gain=15 dB, 2 台直列) を通過後高速オシロスコープに接続されている.

測定に用いた高速オシロスコープは DPO7354 (Tektronix) であり, 4 チャンネル測定時には 10.0 GS/s でデータ取得を行う. バンド幅は 3.5 GHz である. 測定レンジは縦横それぞれ 80 mV/div, 500

ns/div にし, IT (Interpolation mode) に設定し 50 ps/pt で測定を行った.

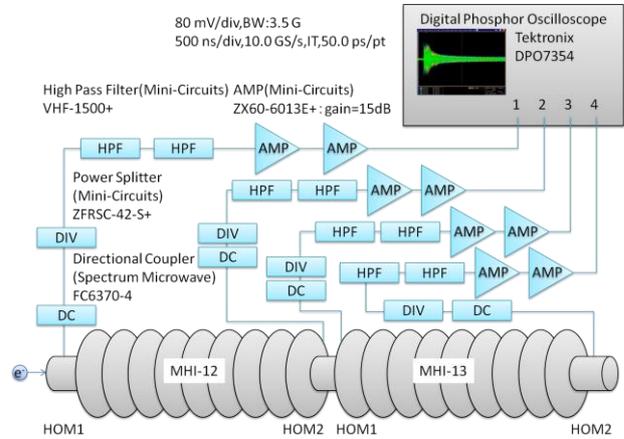


図 4 : 測定セットアップ

クライオモジュールの直前にあるダイポールマグネットの磁場強度を変えて, ビーム軌道を変位させ, そのときの BPM 信号と HOM 信号を検出した. クライオモジュール中には 2 台の超伝導加速空洞が設置されており, それらはビーム上流から順に MHI-12, MHI-13 と呼ばれている. これら空洞 2 台の上流と下流にあるビーム位置モニターの測定値から MHI-12 と MHI-13 のビーム通過位置を推定した.

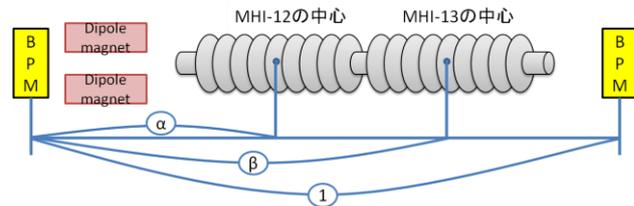


図 5 : ビームライン位置関係

クライオスタット上流の BPM の x 座標, y 座標をそれぞれ x_1, y_1 とし, 下流の BPM の x 座標, y 座標を x_2, y_2 とする. BPM と空洞との位置関係は図 5 のとおりになっているので, MHI-12 と MHI-13 の縦方向中心での x 座標 $MHI12X$ と $MHI13X$, y 座標 $MHI13Y$ と $MHI13Y$ は次式より求めた.

$$\begin{aligned} MHI12X &= \alpha(x_2 - x_1) + x_1 \\ MHI12Y &= \alpha(y_2 - y_1) + y_1 \\ MHI13X &= \beta(x_2 - x_1) + x_1 \\ MHI13Y &= \beta(y_2 - y_1) + y_1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここでそれぞれの距離比 $\alpha = 0.3924$, $\beta = 0.5505$ である. ダイポールマグネットが上流の BPM より下流にあるが, 位置推定は 2 つの BPM 間でビームの軌道は直線であるという仮定のもと行った. しかし正確ではない. 次回測定時にはダイポールマグネットとクライオモジュールの間に BPM を追加するので, この問題は解消される.

STF の相関データ取得システムによりビーム位置, ビーム強度, HOM 信号はビームパルス通過に同期

され取得される．観測周波数帯域 1.55 GHz～3.5 GHz, ビーム電荷 90 pC/bunch, 40 バンチ, ビームエネルギー40 MeV の条件で実際に測定された高速オシロスコープの波形の例を図 6 に示す．

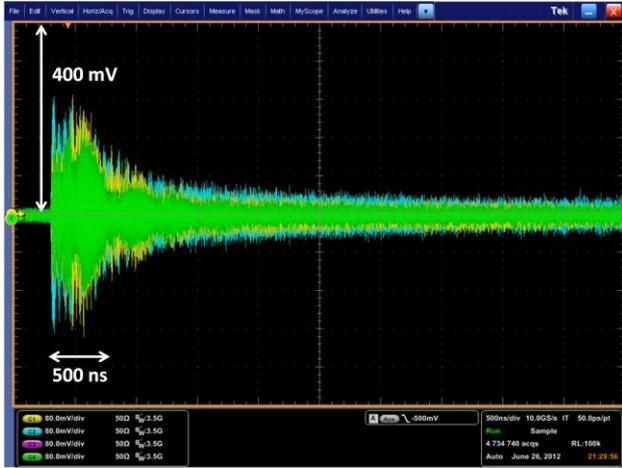


図 6 : 測定されたオシロ波形の例

3.2 データ解析

取得した HOM 信号の FFT 解析により図 7 のようなスペクトルが得られる．データ解析には Matlab 2007B+を用いた．

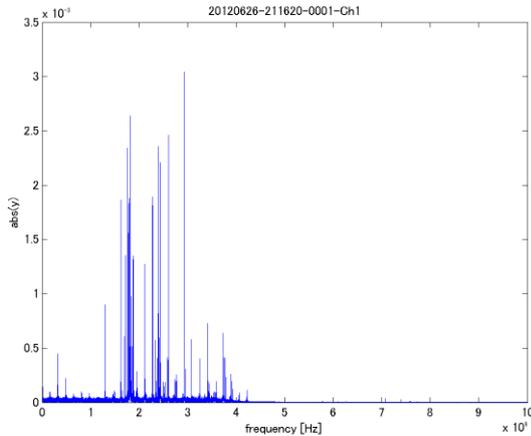


図 7 : FFT 解析後の HOM 信号

超伝導空洞の両端に取り付けられた HOM カップラー同志をネットワークアナライザーに接続したときの通過域 S21 とビーム励起された HOM 信号に FFT 解析をかけたものを, TE111 のパスバンドの周波数範囲で図 8, 図 9 に同時に示した．図 8 は MHI-12, 図 9 は MHI-13 についてのプロットである．ビームとの結合の強い TE111-6, TE111-7 の HOM 信号を確認することができた．その他にも TE111-3, TE111-8, TE111-9 の信号が大きいことが分かった．

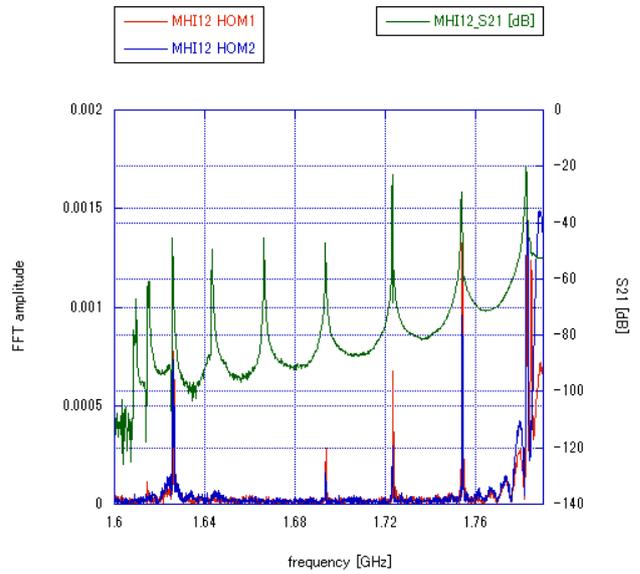


図 8 : MHI-12 における TE111 の FFT と S21

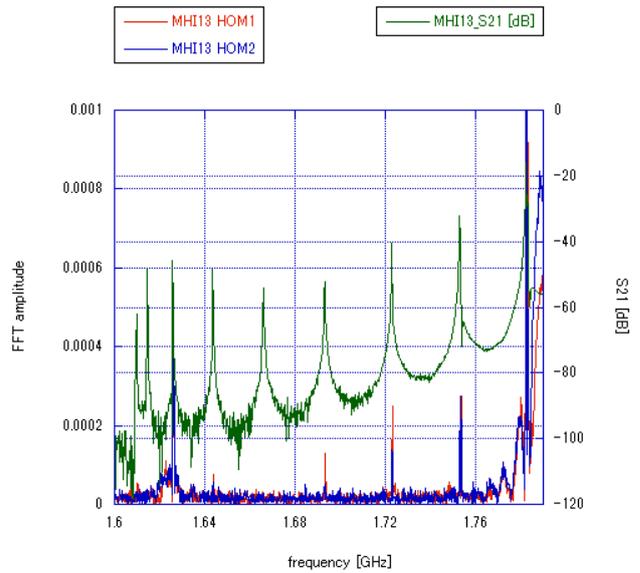


図 9 : MHI-13 における TE111 の FFT と S21

図 10 は図 8 の TE111-3 のモードを拡大したプロットである．ピークが 2 つあることが分かる．ダイポールモードでは偏極の仕方の異なる同じモードが 2 つのスプリットピークとして現れる．

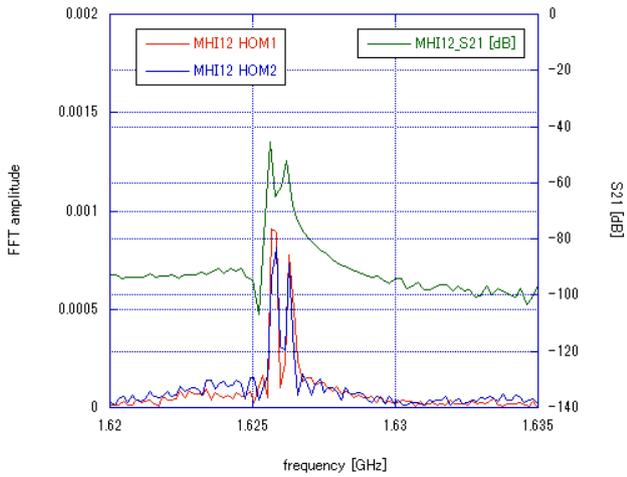


図 10 : MHI-12 における TE111-3 の FFT と S21

ダイポールマグネットの強度を変化させビームを x 軸方向に変位させたときの MHI12X を横軸にとり、そのときのダイポールモードの振幅を縦軸にとると図 11 のように V 字カーブが得られる。ダイポールモードの振幅は FFT プロットからその周波数部分でのピークを抽出し求めた。TE111-3a は TE111-3 の周波数の低い方のピーク、TE111-3b は TE111-3 の周波数の高い方のピークを指す。

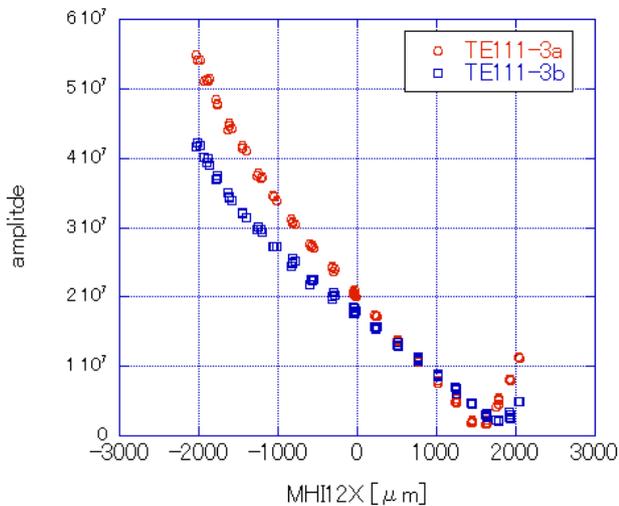


図 11 : MHI12 の TE111-3a および TE111-3b のスプリットモードの V 字カーブの例

V 字の頂点はビームがダイポールモードを一番励起しにくいところを通過したこと、つまり 2 極間の中心軸上の点であることを示している。

3.3 HOM 測定結果

y 座標を 0, 600, -500 μm に固定したときの x 方向のビームスキャンと、x 座標を 0, 1600, 1200 μm に固定したときの y 方向のビームスキャンを行った。

スキャン名を表 1 の通り定め、スキャン時の MHI-12 でのビーム位置を図 12 に示す。

表 1 : 実施したビームスキャン

| | X [μm] | Y [μm] |
|--------|---------------------|---------------------|
| Scan A | Beam scan | 0 |
| Scan B | 0 | Beam scan |
| Scan C | Beam scan | 600 |
| Scan D | 1600 | Beam scan |
| Scan E | Beam scan | -500 |
| Scan F | 1200 | Beam scan |

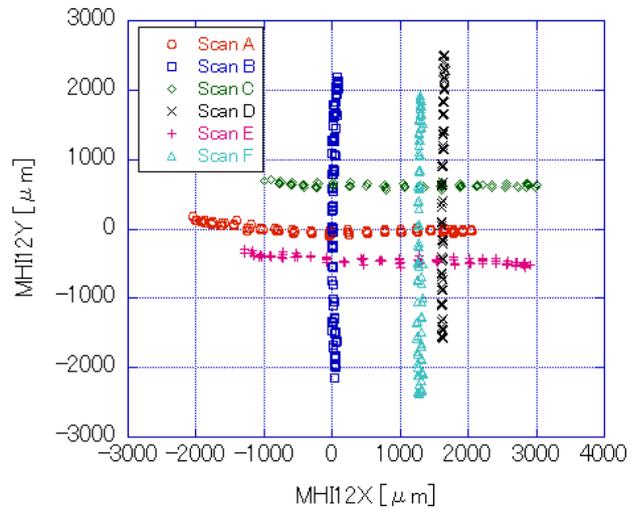


図 12 : ビームスキャン時のビーム位置

電子銃からクライオモジュールを通過させるためには、図 5 の上流 BPM とクライオモジュールの間にある 4 極マグネットとソレノイドマグネットに磁場をかけなければならない。そのことによるビームの x 方向と y 方向の混ざりこみと考えられる現象が図 12 の直線の変化からのズレで確認される。あるいは BPM の特性とも考えられるので確認が必要である。

表 2 に MHI-12 の HOM1 でのスキャンの結果をまとめる。

表 2 : ビームスキャン結果

| | TE111-3a min X [μm] | TE111-3b min X [μm] | MHI12Y [μm] |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Scan A | 1635 | 1785 | 0 |
| Scan C | 2200 | 1600 | 600 |
| Scan E | 2200 | 2020 | -500 |

| | MHI12X [μm] | TE111-3a min Y [μm] | TE111-3b min Y [μm] |
|--------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Scan B | 0 | — | 800 |
| Scan D | 1600 | -800 | 630 |
| Scan F | 1200 | -2000 | -100 |

TE111-3a および TE111-3b のスプリットモードの V 字カーブの頂点を xy 平面にプロットすると図 13 が得られる。

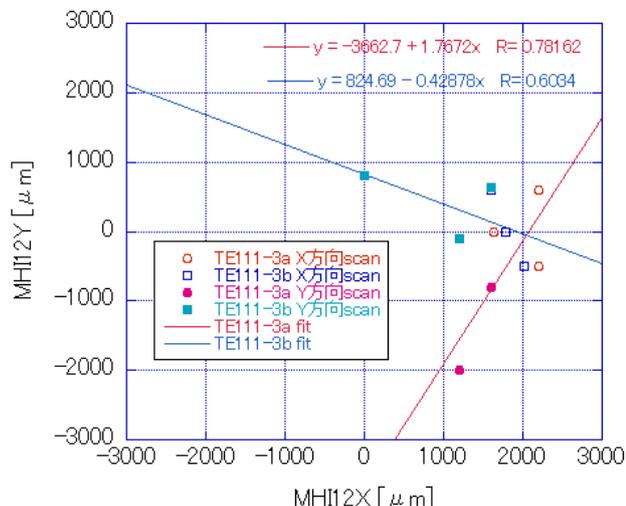


図 13 : MHI-12 の TE111-3a および TE111-3b のスプリットモードの V 字カーブの頂点

HOM スプリットモードの 2 極間の中心軸は垂直に交わる²⁾。そして、その交点がモードの電気的中心である。図 13 から分かるように、TE111-3a と TE111-3b の中心軸は 83.7° で交わっており、交点は MHI12X=2040 μm, MHI12Y=-50 μm である。

3.4 分解能と精度の考察

使用している BPM の回路熱雑音から決まる分解能は 50~70 μm である。±0.24 mm/5 m の精度を持つローテイングレーザで水平度を確認されたビームパイプおよびマグネットに BPM は取り付けられているため、BPM の設置は±0.5 mm 程度の誤差があることが見込まれる。上記の X 方向に 2040 μm ずれた電気的中心はそれらの誤差から有為にずれた値を示している。

その他にも考慮すべきエラーにはビームサイズからくる位置測定の不定性があり、クライオモジュール通過時のビームサイズはおよそ φ1.6~0.5 mm と GPT の計算より見積もられている。また、V 字カーブから頂点を見つけるときのエラーおよび HOM スプリット交点を求めるときのエラーも数十 μm 程度考えられ、今後考慮に含める。

4. 考察

MHI12 での TE111-3 の電気的中心が x 方向に 2 mm もずれているという結果が得られた。その原因として空洞アライメントのずれが考えられる。また入力カップラー挿入等によりモードが歪み、空洞の機械的中心と電気的中心がずれ生じたと考えることもできる。

5. 今後の計画

9 月下旬からの STF 加速器運転時までにはダイポールマグネットとクライオモジュールの間に BPM を追加し、ビームスキャンにより様々なモードの電気的中心とモードの回転を求める。さらに HOM のモードパターンの違いを利用した空洞変形の検出可能性を探る。そのためにはビームとの結合の弱い HOM の検出が必要となるので、新たなバンドパスフィルタを導入し必要な信号のみを切り出し増幅して測定を行う。そのための解析方法の検討および計測ソフトウェアのプログラムも必要である。

また、入力カップラー挿入によるモード中心シフト効果を電磁場計算から見積もる予定である。

参考文献

- [1] Ken Watanabe, et al., “Beam commissioning of STF accelerator at KEK”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
- [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] R. Wanzenberg, “Monopole, Dipole and Quadrupole Passbands of the TESLA 9-cell Cavity”, DESY, September 14, 2001
- [7] N. Solyak, et al., “RF KICK THE ILC ACCELERATION STRUCTURE”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy