

学位論文

局在高調波モードを用いた非直線軌道ビームの下での  
高周波加速空洞位置測定方法の研究

服部 綾佳

総合研究大学院大学  
高エネルギー加速器科学研究科  
加速器科学専攻

平成28年度  
(2016年度)



## 目次

局在高調波モードを用いた非直線軌道ビームの下での .....	1
高周波加速空洞位置測定方法の研究 .....	1
第 1 章. はじめに .....	8
1.1. 超伝導空洞のアライメントの重要性と計測の困難さ .....	8
1.2. 従来の超伝導空洞の位置測定方法 .....	10
1.3. 従来の高調波モードを用いた方法 .....	12
1.4. 研究目的 .....	13
1.5. 本論文の構成 .....	14
第 2 章. 高調波モードを用いた電氣的中心の測定 .....	15
2.1. 高調波モードとは .....	15
2.2. 空洞モードと局在モード .....	15
2.3. 空洞モード .....	16
2.4. 局在モード .....	20
2.5. 高調波モードの誘起 .....	20
2.6. ダイポールモードの性質 .....	21
2.7. ダイポールモードの電氣的中心 .....	23
2.8. ダイポールモードの電氣的中心の測定原理 .....	24
第 3 章. 非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフロー .....	26
3.1. 機械的中心と電氣的中心の定義 .....	26
3.2. フローの概念 .....	26
3.3. フロー手順 .....	27
3.4. 機械的中心の推定方法について .....	29
第 4 章. STF 加速器内の超伝導加速空洞 .....	30
4.1. STF 加速器の建設目的と構成 .....	30
4.2. STF 空洞の構造 .....	33
4.3. 超伝導空洞からの高調波モードの取り出し .....	33
4.4. STF 空洞の組み立て工程 .....	38
4.5. クライオモジュールのアライメント結果 .....	40
第 5 章. STF 空洞の局在ダイポールモードの選択 .....	44
5.1. 局在する高調波モードの選択 .....	44
5.2. 電磁場シミュレーションの設定 .....	44
5.3. 局在の確認 .....	45
5.4. ダイポールの確認 .....	47
5.5. CST 計算によるトランジットタイムを考慮した電氣的中心の計算方法 .....	49
5.6. 電氣的中心位置のメッシュ数依存性の検討 .....	50
5.7. 電氣的中心の計算および製作誤差評価 .....	52

5.8.	局在モードの長手方向の範囲 .....	59
5.9.	局在ダイポールモードの電気的特性 .....	60
第 6 章.	ビーム誘起局在モードのデータ取得 .....	61
6.1.	ビーム誘起高調波モードの測定 .....	61
6.2.	データ取得方法 .....	65
6.3.	ネットワークアナライザによる局在モードの確認 .....	66
6.4.	ビーム位置モニターの校正 .....	66
6.5.	局在モードの電気的中心を通るときのダイポールマグネット電流値の算出 .....	67
第 7 章.	実験データからの機械的中心の推定 .....	70
7.1.	局在モードの電気的中心の計算 .....	70
7.2.	GPT によるビーム軌道計算 .....	70
7.2.1	ビーム軌道計算モデル .....	70
7.2.2	ビーム軌道の推定 .....	73
7.3.	局在モードの電気的中心の導出 .....	75
7.4.	局在モードの電気的中心から機械的中心への変換 .....	76
7.5.	導出した機械的中心と設定した機械的中心との差の低減 .....	76
7.6.	本研究手法により求められた機械的中心 .....	78
第 8 章.	議論 .....	79
第 9 章.	今後の課題と検討 .....	80
第 10 章.	結論 .....	81
付録 A.	ビーム位置モニターの校正と分解能 .....	82
付録 B.	set0～set9 でのダイポールマグネット電流値とビーム通過位置の測定データ .....	91
付録 C.	局在モード取得データの二次関数フィット .....	109
付録 D.	1 回目の電気的中心を求める試行での GPT による 82 回目のビーム軌道推定計算の結果 .....	113
謝辞 .....		119
引用文献 .....		120

## 図表目次

図 1-1 : 超伝導加速器と常伝導加速器 .....	8
図 1-2 : L-BAND 9 セル超伝導空洞 .....	9
図 1-3 : 超伝導空洞の位置を測定する方法の模式図 .....	11
図 1-4 : 加速場のフリッジによるビームの曲がりの様子 .....	12
図 1-5 : 従来の HOM を用いた方法で想定されているビーム軌道の概念図 .....	13
図 1-6 : 本研究で取り扱う非直線軌道の概念図 .....	13
図 2-1 : 空洞モードと局在モードの概念図 .....	15
図 2-2 : 円筒座標系 .....	16
図 2-3 : 9 セル空洞の等価回路 .....	17
図 2-4 : 1300 MHz の加速モード (TM <sub>010-9</sub> ) を持つ 9 セル空洞のディスパージョンカーブ .....	19
図 2-5 : 半径の異なるビームパイプ部にて R1 のオフセットを持つ点電荷 Q1 を R2 のオフセットを持つ点電荷 Q2 が追従する様子 .....	20
図 2-6 : 機械的中心と電気的中心の模式図 .....	23
図 2-7 : 電気的中心を求める概念図 .....	24
図 2-8 : ダイポールモードの振幅測定手順 .....	25
図 3-1 : 非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフローチャート .....	28
図 4-1 : STF 加速器のビームラインレイアウト .....	30
図 4-2 : STF 加速器の全景 .....	31
図 4-3 : クライオモジュールの横から見た断面図 .....	32
図 4-4 : STF 空洞の断面図 .....	33
図 4-5 : HOM カプラーの断面図 .....	34
図 4-6 : STF 加速器用に設計開発された HOM カプラー .....	35
図 4-7 : 空洞上流と空洞下流の HOM カプラーの取り付け角度 .....	35
図 4-8 : STF 加速器用に設計開発された HOM カプラーの通過域特性 .....	36
図 4-9 : MHI-12 に取り付けられた HOM カプラーの通過域特性計算値 .....	37
図 4-10 : クライオモジュール内のアライメント基準座とワイヤーポジションモニターの配置 .....	38
図 4-11 : アライメント基準座およびワイヤーポジションモニターの Z 方向の位置関係 .....	40
図 4-12 : クライオモジュールのアライメント計算時の位置関係 .....	41
図 5-1 : 計算モデル 1 .....	45
図 5-2 : 計算されたピックアップアンテナから上流側の HOM カプラーへの透過特性 .....	45
図 5-3 : 2282.2 MHz の電場分布 .....	46
図 5-4 : 2309.5 MHz の電場分布 .....	46
図 5-5 : X = 5 mm, Y = 0 mm でのビーム軸方向の電場強度分布 .....	46
図 5-6 : X = 5 mm, Y = 0 mm での Ez 分布 .....	46
図 5-7 : XY 平面上 (Z = 161 mm) での電場の様子 .....	47

図 5-8 : $R = 5 \text{ MM}$ での $E_z$ 成分の角分布 .....	47
図 5-9 : $z$ 軸上での $R^2$ の係数分布 .....	48
図 5-10 : 積分する軸の配置 .....	49
図 5-11 : 電気的中心位置のメッシュ数依存性 .....	50
図 5-12 : 異なるメッシュ数で計算した電気的中心 .....	51
図 5-13 : オフセット量に対する $\int E_z r, \theta, z \exp - i \omega z dz^2$ の変化 .....	52
図 5-14 : 電気的中心と二次関数フィットより求めた頂点 .....	54
図 5-15 : 2822.2 MHz のオフセット量に対する $\int E_z r, \theta, z \exp - i \omega z dz^2$ の変化 1 .....	55
図 5-16 : 2822.2 MHz のオフセット量に対する $\int E_z r, \theta, z \exp - i \omega z dz^2$ の変化 2 .....	56
図 5-17 : 2309.5 MHz のオフセット量に対する $\int E_z r, \theta, z \exp - i \omega z dz^2$ の変化 1 .....	57
図 5-18 : 2309.5 MHz のオフセット量に対する $\int E_z r, \theta, z \exp - i \omega z dz^2$ の変化 2 .....	58
図 5-19 : 振幅最大時の FFT スペクトラム .....	59
図 5-20 : $r = 5 \text{ MM}$ , $\theta = 337.5^\circ$ での $E_z$ 分布 .....	59
図 5-21 : 角度 $\theta$ に対する $r = 5 \text{ MM}$ での $f\theta$ の応答 .....	60
図 6-1 : 測定セットアップの概念図 .....	61
図 6-2 : 局在ダイポールモードの測定セットアップ .....	62
図 6-3 : オシロスコープ上の取得波形 .....	63
図 6-4 : $y$ 軸方向へビーム掃引したときの異なるビーム軌道での FFT スペクトラム .....	63
図 6-5 : ビーム掃引に対する各局在ダイポールモードの応答例 .....	64
図 6-6 : データ取得フロー .....	65
図 6-7 : モニターポートのピックアップアンテナから HOM2 への透過特性 .....	66
図 6-8 : 2314.4 MHz に対する SET9 での二次関数フィット .....	68
図 6-9 : 電気的中心を示したときのダイポールマグネットの電流値 .....	69
図 7-1 : ビーム軌道計算モデル .....	70
図 7-2 : GPT 計算によるビーム位置計算の粒子数依存性 .....	71
図 7-3 : $s^2$ ヒストリー横軸 .....	74
図 7-4 : SET6 でのビーム掃引と軌道計算の一致度 .....	74
図 7-5 : ビーム軌道計算の例 .....	75
図 7-6 : 電気的中心の計測域を通るビーム軌道計算値 .....	75
図 7-7 : 設定した機械的中心位置と導出した機械的中心の推移 .....	77
図 7-8 : 機械的中心の範囲 .....	78
図 8-1 : 空洞内でのビーム軌道変位と局在モード誘起範囲内でのビーム軌道変位 .....	80
図 A-1 : ボタン型 BPM の断面図 .....	82
図 A-2 : クリッピング回路の概念図 .....	82
図 A-3 : ベースラインクリップ回路測定時のセットアップ .....	83
図 A-4 : 電流値に対する ADC カウントの応答 .....	83
図 A-5 : MB03 の各チャンネルの期待される ADC カウントと実測された ADC カウントとの相関 .....	84
図 A-6 : MB04 の各チャンネルの期待される ADC カウントと実測された ADC カウントとの相関 .....	85

図 A-7 : チャンネル間のゲイン比.....	86
図 A-8 : チャンネル間の相関.....	87
図 A-9 : BPM モデル .....	88
図 A-10 : アンテナ位置を変えたときの S パラメータ .....	88
図 A-11 : BPM モデル計算 .....	89
図 C-1 : 2277.2 MHz の二次関数フィット .....	110
図 C-2 : 2314.4 MHz の二次関数フィット .....	112
図 D-1 : SET0 のビーム掃引計算 .....	113
図 D-2 : SET1 のビーム掃引計算 .....	114
図 D-3 : SET2 のビーム掃引計算 .....	114
図 D-4 : SET3 のビーム掃引計算 .....	115
図 D-5 : SET4 のビーム掃引計算 .....	115
図 D-6 : SET5 のビーム掃引計算 .....	116
図 D-7 : SET6 のビーム掃引計算 .....	116
図 D-8 : SET7 のビーム掃引計算 .....	117
図 D-9 : SET8 のビーム掃引計算 .....	117
図 D-10 : SET9 のビーム掃引計算 .....	118

## 第1章. はじめに

### 1.1. 超伝導空洞のアライメントの重要性と計測の困難さ

高周波加速空洞を用いた線形加速器では、ビームの質（位相空間内のビームの占める面積であるエミッタンスやビーム内粒子のエネルギー広がり）を維持してビーム加速を行うために、高周波加速空洞の中心軸が設計ビーム軌道に許容誤差の範囲で一致していなければならない。一般に、高周波加速空洞の内、超伝導空洞の方が構造上、常伝導空洞に比べ、アライメントの維持の確認が困難である。例として、ドイツの DESY 研究所 (Deutsches Elektronen-Synchrotron) [1]の加速器 Free-electron laser FLASH (FLASH) [2]にある超伝導空洞を断熱真空容器の外から見た様子を図 1-1 (a) に示す。超伝導空洞は液体ヘリウムによる冷却のためにヘリウム容器につつまれ、さらに断熱真空容器 (クライオモジュール) 内に組み込まれるので外部から直接見ることはできない。一方、図 1-1 (b) のような SACLA (国立研究開発法人理化学研究所放射光科学総合研究センターX線自由電子レーザー施設) [3]で使用されている常伝導加速空洞の場合には加速空洞外面に設置されたアライメントターゲットを直接見る事ができる。この直接見えるかどうかの違いより、超伝導空洞の方が常伝導空洞に比べて、アライメント維持の確認が困難であることが容易に想像できる。なお、例として、図 1-2 (a), (b) に本研究で対象とした L-band 9 セル超伝導空洞単体およびヘリウム容器装着後の様子を示す。このように、空洞にヘリウム容器が装着された時点で、ヘリウム容器内での空洞の位置（ヘリウム容器と空洞との位置関係）を直接確認することは困難となっている。



(a) FLASH (超伝導加速器)



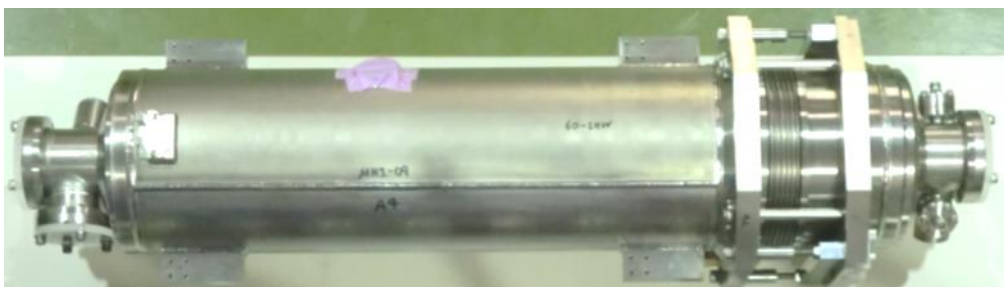
(b) SACLA (常伝導加速器)

図 1-1 : 超伝導加速器と常伝導加速器





(a) 9セル超伝導空洞単体



(b) ヘリウム容器装着後の9セル超伝導空洞の様子

図 1-2 : L-band 9セル超伝導空洞

## 1.2. 従来の超伝導空洞の位置測定方法

従来行われている超伝導空洞の位置を計測する手法の代表例を図 1-3 に示し、それぞれの測定方法の長所と短所を表 1-1 にまとめる。

図 1-3 (a) のレーザートラッカー [4] [5]による方法は、空洞を断熱真空容器内に設置する直前に実施される方法である。この方法では、キャッツアイと呼ばれる球体のレーザー光リフレクターを測定対象であるヘリウム容器（空洞）に取り付けられた基準座に押し当て、レーザートラッカーからキャッツアイまでの距離と 2 方向の角度からヘリウム容器（空洞）の位置を精度よく 3 次元測定するものである。測定原理は以下の通りである。レーザートラッカーは、自身からレーザーをキャッツアイめがけて出射し、キャッツアイで入射レーザーのちょうど反対方向に反射されるレーザーをトラッカー自身でとらえる。それらの出射したレーザーと反射され帰ってきたレーザーとの干渉を用いて、キャッツアイまでの距離を精密に測定する。また、キャッツアイからの反射光を常に捕らえるようにトラッカー出射部ミラーの 2 つの角度で追尾することにより、キャッツアイの 2 つの方位角を精密に測定することができる。これらから、キャッツアイの 3 次元位置を計測する。ヘリウム容器（空洞）をアライメントするには、レーザートラッカーから空洞が見えている必要があるため、クライオモジュール（断熱真空容器）に挿入する前には計測可能だが、挿入後の計測は困難を極める。

図 1-3 (b) のワイヤー位置モニター（Wire Position Monitor : WPM） [6]を用いた方法では、冷却中の空洞位置の変位を測定できる。クライオモジュール中に設けられた金属製パイプ内に張った極細のワイヤーにパルス状に切り出された高周波信号を入力し、測定対象に取り付けられたワイヤー位置モニターの各ポートから検出される信号の振幅差を測定することでワイヤー位置が求められる。そのワイヤーの一端はクライオモジュールの外側室温部で固定され、もう一端の室温部に取り付けられた重りにより、張力をかけることで直線性を担保している。ワイヤーは室温部分以外には接触しないため、ワイヤーの位置は温度によって変化しない。よって、冷却により位置が変わる測定対象に取り付けられたワイヤー位置モニターにより、ワイヤー位置を求めることで、ワイヤーの位置を基準としたヘリウム容器（空洞）位置の変位量を測定できる。ワイヤーを張るのは空洞をクライオモジュールに挿入した後なので、空洞に対するワイヤーの絶対位置が測定できないため、常温時のワイヤーと空洞との位置関係を基準とした相対変位の測定となる。

図 1-3 (c) のレーザー位置モニターを用いた方法では、クライオモジュールに窓を用意し、その窓からレーザー光を入射し、測定対象であるヘリウム容器（空洞）からの反射光を検出することで、モニターと測定対象間の距離を精度よく測定する。しかし、この方法では、クライオモジュールに窓を用意する必要があり、そのことによりクライオモジュール内への輻射による熱侵入（熱負荷）が増加するという短所がある。

図 1-3 (d) の高調波モード（Higher Order Mode : HOM）を用いた方法は、実際のビーム運転にて空洞内をビーム（荷電粒子）が通過したときに誘起される高調波モードの電氣的中心を測定する方法で、本研究でも使用される方法である。電氣的中心を測定するにあたり、任意のダイポールマグネットを操作し、空洞内を通過するビーム位置を変化さ、ビーム位置と高調波モードの信号の振幅、位相を測定することで、ビームライン上に設置された空洞の電氣的中心を求めることができる。

レーザートラッカーによる方法、ワイヤー位置モニターによる方法、レーザー位置モニターによる方

法、いずれも空洞を覆うヘリウム容器の位置を測定している。ヘリウム容器内にある空洞自身の位置情報を知ることができるのは、ビーム通過により誘起される空洞内の高調波モードを用いた方法のみとなる。このことから、本研究ではこの高調波モードを用いた方法に着目した。

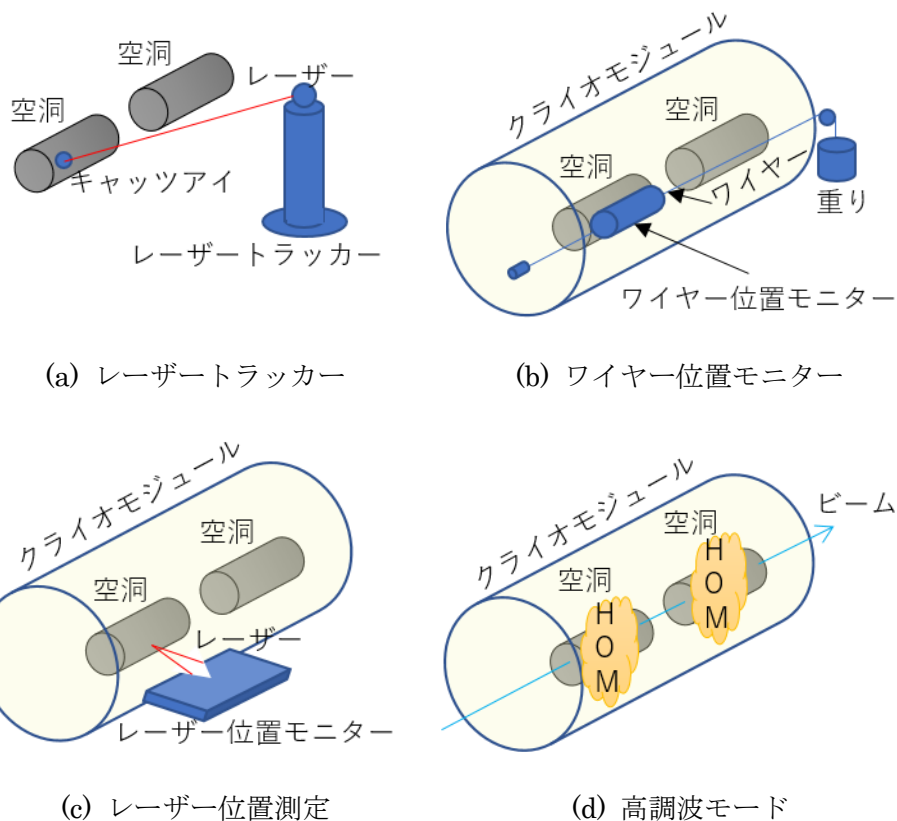


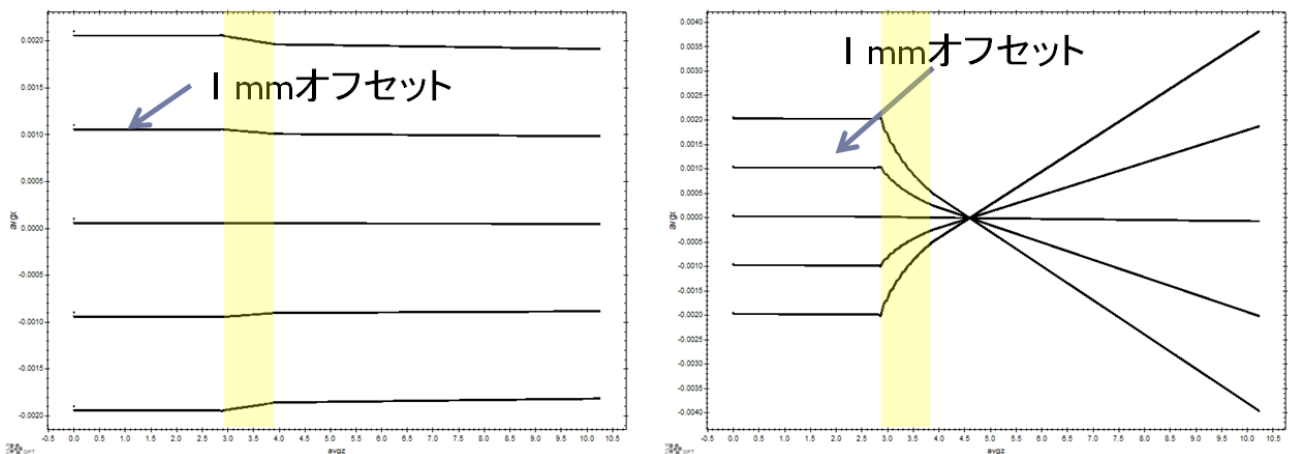
図 1-3：超伝導空洞の位置を測定する方法の模式図

表 1-1：超伝導空洞の位置を測定する方法の長所と短所

	(a) レーザートラッカー	(b) ワイヤー	(c) レーザー位置測定	(d) 高調波モード
方法	キャッツアイの3次元位置を測定する。	ワイヤーに流したパルス信号からワイヤー位置を測定する。	レーザー光の反射を利用し、距離を測定する。	ビームが誘起する高調波モードの電氣的中心を測定する。
長所	高精度な測定が可能。	冷却中の変位測定が可能。	高精度な測定が可能。	空洞自身の測定が可能。
短所	ヘリウム容器の測定である。 組み立て工程内で測定値の不連続がある。	ヘリウム容器の測定である。 常温での位置を基準とした相対変位しか測定できない。	ヘリウム容器の測定である。 レーザー導入窓からの熱侵入がある。	直線的にビームが通過する必要がある。

### 1.3. 従来の高調波モードを用いた方法

ビーム通過により誘起される空洞内の高調波モードを用いた方法では、ビーム通過により誘起されるダイポールモードの振幅が、そのモードの偏極軸からのビーム通過位置の距離に比例した大きさを有するという性質を用いて、ダイポールモードが誘起されない点（これを電気的中心と定義する）を求め、そこから空洞の位置を評価することができる。この L-band 9 セル超伝導加速空洞を対象とした HOM を用いた空洞位置の測定は主に DESY の FLASH にて研究開発されてきた方法であり、そこでは高調波モードの最も低周波である通過帯域 ( $TE_{111}$ ) 中の  $(6/9) \pi$  モードが使用されている [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]。このモードは、 $TE_{111}$  の中で最も高いインピーダンスをもつため、ビームにより誘起される信号強度が大きく、分解能が優れていることから使用されている。ただし、この手法を用いるためには、ビームが空洞内を直線的に通過している必要がある。つまり、ビーム軌道が加速場のフリンジにより曲げられるほど低エネルギーの電子ビームでは HOM の空洞断面内励起位置が長手方向の場所によって異なることになり、空洞内に残された HOM 信号はそれらの励起の合成であるので、HOM 信号振幅とビーム通過位置との相関が明確にはならない。このため、この手法での正確な測定は困難となる。例として、L-band 9 セル超伝導加速空洞において、16 MV/m の加速場の中心から 1 mm ずれ、かつ、加速場に平行に 100 MeV 以上の電子ビームが入射されたときを考えると、ビーム軌道の曲がり角は空洞内で  $50 \mu\text{rad}$  以下に抑えられるが、入射ビームのエネルギーが 4 MeV まで下ると曲がり角は  $755 \mu\text{rad}$  以上となる。そのビーム軌道の様子を図 1-4 に示す。図の左端から、1mm 毎のオフセットを持ったビームが入射し、黄色の部分の加速空洞に入射し、その入口のフリンジ場で大きく曲げられている事がわかる。もし、このように非直線軌道を持つビームの下でも、空洞の位置を求めることができれば、高品質なビーム加速の実現に寄与することができると考える。これまでビーム軌道が直線でない場合の HOM を用いた空洞位置測定は研究されておらず、本研究ではじめて実施される。



(a) 約 100 MeV の電子ビームの軌道

(b) 約 4 MeV の電子ビームの軌道

図 1-4 : 加速場のフリンジによるビームの曲がりの様子

(それぞれの 5 本の軌道は上から順に +2, +1, 0, -1, -2 mm のオフセットを持って、加速空洞の長手方向軸に平行に入射されたビーム軌道を示す。黄色の部分には 16 MV/m の加速場を持った 9 セル超伝導加速空洞がある。なお、それぞれの軌道は  $z = 0 \sim 10.3 \text{ m}$  まで追跡したものである。)

従来の HOM を用いた方法ではビームが空洞内を図 1-5 に示すような直線軌道で通過した場合に 9 セル超伝導空洞の全長にわたってのダイポールモードの電気的中心の位置を測定することで、空洞位置の測定を行う。図 1-6 に示すように、ビーム軌道が空洞内で曲がっている場合には、空洞内でのビームが通過した平均位置に対する空洞全体にわたってのダイポールモードの電気的中心の平均位置を求めることになり、ビーム通過位置の偏差が空洞位置の測定に影響することが問題である。そこで、本研究では空洞の長手方向に局所的に誘起される高調波モードを利用することにより、ビーム軌道が直線でない場合にも、その局在する場所での空洞の位置を測定する方法の開発を行った。



図 1-5：従来の HOM を用いた方法で想定されているビーム軌道の概念図

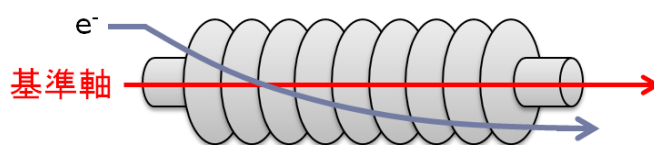


図 1-6：本研究で取り扱う非直線軌道の概念図

本研究は高エネルギー加速器研究機構（KEK）内の超伝導加速技術の研究開発を行っている施設 Superconducting RF Test Facility（STF）にある L-band 9 セル超伝導加速空洞 2 台（STF 空洞）を内包した STF 加速器を対象として実施された。この加速器の対象とした部分は、キャプチャーモジュールとして使用されるため、電子銃（RF ガン）から取り出されたビームがそのまま入射される。このため、入射エネルギーは 4 MeV 程度と低いので、オフセンタースを通過したビームは空洞の加速場のフリッジの影響を受け、ビーム軌道が曲がるのが推測される。このことは実測およびシミュレーションにより確認されている。

#### 1.4. 研究目的

空洞内で軌道が非直線となる低エネルギービームに対応した超伝導空洞の位置測定方法を開発することが動機である。低エネルギービーム（非直線軌道ビーム）下で高調波モードを用いて、空洞位置測定を行うことの課題として、主に次の 2 点が挙げられる。

- 空洞内でのビーム軌道の変化が大きく、その偏差が空洞位置測定に影響する
- 2 つのビーム位置モニター（BPM）間の直線近似でビーム軌道を推定することができず、ビーム軌道の測定が困難である

そこで、その解決案として、以下の 2 点を提案し、検証を行うことが本研究の目的である。

- 空洞内のビーム通過位置を平均する範囲を狭くするために空洞長手方向に局所的に誘起される局在 high 調波モードを使用する
- ビーム軌道を推定するための軌道解析を組み込む

このようにして、本研究では空洞の長手方向に局所的に誘起される高調波モードを利用することにより、ビーム軌道が直線でない場合にも、その局在する場所での空洞の位置を測定する方法の開発を行った。

## 1.5. 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。第2章では一般的な高調波モードの導入を行い、ダイポールモードの性質およびダイポールモードの電氣的中心の測定原理について述べる。第3章では本研究で実施した非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフローについて述べる。そして、第4章にて本研究の検証に利用した STF 加速器の概要について述べ、STF 加速器のクライオモジュールの構成やそれに組み込まれている超伝導加速空洞の形状等について説明する。また、STF 加速器のアライメント工程についても触れる。このクライオモジュールの構成をモデル化した電磁場計算を第5章で行い、第6章・第7章では実際に STF 加速器にて HOM の測定と解析を行う。アライメント工程で測定した空洞位置情報については第7章にて使用することになる。

第5章の電磁場計算 (CST MICROWAVE STUDIO ; CST) では、空洞セル内に幅広く分布する空洞セル高調波モードと分離でき、同定可能であり、容易に検出できる局在モードとして、周波数が 2282.2 MHz と 2309.5 MHz の空洞の上流側に局在しているモードの電氣的な特性を確認し、そのモードが使用可能であることを確認する。さらに、この電磁場計算より局在モードの電氣的中心と機械的中心の偏差を推定し、局在モードが局在している範囲を求める。

第6章では実際に STF 加速器にて行った HOM の測定について述べる。その測定時にはクライオモジュールの上流側にあるダイポールマグネットを用いて、ビームを x 方向, y 方向にそれぞれ5回ずつ異なる軌道でビーム通過させ、その間の HOM の波形をビーム位置測定、ビーム電流測定と同期して取得した。そして、電氣的中心を求めるために、局在モードの振幅のダイポールマグネット電流値に対する変化を調べ、電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値を求めた。局在モードの振幅は HOM 波形を高速フーリエ変換し、周波数領域での局在モードの周波数でのピークの値から得ることができる。

第7章では第6章で求めた電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値から電氣的中心の座標を求め、その電氣的中心から空洞位置(機械中心)を導出する方法を述べる。ダイポールマグネット電流値からビーム通過位置を推定するために、HOM 波形取得時のクライオモジュール上下流の BPM でのビーム通過位置を再現するビーム軌道を General Particle Tracer (GPT) にて計算する。ここで、ビーム軌道を決めるパラメータが推定されれば、電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値より、局在モードの電氣的中心が求まり、第5章で求めた電氣的中心と機械的中心との偏差を用いることで機械的中心が求められる。しかし、その GPT でのビーム軌道推定の際に、加速場の中心位置のずれもビーム軌道計算時に考慮する必要がある。その加速場の中心位置は空洞形状から決まり、理想的には加速場の中心は超伝導空洞の機械的中心と一致する。そこで、本研究では、加速場の中心と機械的中心は一致すると仮定する。すると、ビーム軌道計算の時点で、空洞の機械的中心を設定していることになる。局在モードの振幅測定より求めた機械的中心と GPT 計算時に設定した機械的中心とは一致している必要がある。そこで、2つの機械的中心が誤差の範囲で一致するまで、設定する機械的中心を変位し、ビーム軌道を推定したのちに、機械的中心の導出を繰り返し、機械的中心を求める方法を開発した。なお、求められた機械的中心の誤差範囲の評価も実施した。その後、議論を行い、まとめとする。



## 第2章. 高調波モードを用いた電氣的中心の測定

### 2.1. 高調波モードとは

高周波加速空洞は、一般に  $TM_{010}$  (加速モード) と呼ばれるモードを用いて荷電粒子の加速を行うものである。本研究で扱う9セル超伝導空洞は定在波型であり、ビーム加速にあたり  $TM_{010}$ -9 ( $\pi$ モード) が使用される。運転周波数は 1300 MHz であり、冷却後、チューナー駆動による周波数調整により、運転周波数に合わせられる。運転時にはその周波数の Radio Frequency (RF) パワーを入力する。この空洞形状で、空洞内に励振されるモードは  $TM_{010}$   $\pi$ モードの他にも多数存在するが、ビーム通過直前までは空洞外部から供給される RF (1300 MHz) 以外の入力がないので、 $TM_{010}$   $\pi$ モードの他のモードは空洞内には存在しない。しかし、空洞内に電子などのバンチ状の荷電粒子が通過することにより誘起され共振するモードがある。これらのモードのことを高調波モード(Higher-Order-Mode; HOM)と呼んでいる。

### 2.2. 空洞モードと局在モード

空洞は、加速電場を誘起させるための空洞セルに、ビームが通過するためのビームパイプを取り付けた構造から成る。さらに、加速モードを誘起するための RF パワーを供給するインプットカプラーと、ビーム通過時に誘起されてしまう高調波モードの RF パワーを空洞外部に取り出すための HOM カプラーが取り付けられている。本研究では、図 2-1(a)のように、空洞セルに結合し、空洞内に広く分布するモードを空洞モードと定義する。一方、図 2-1(b)に示すように、ビームパイプや空洞セルの一部と結合し、狭い範囲に分布するモードを局在モードと定義する。

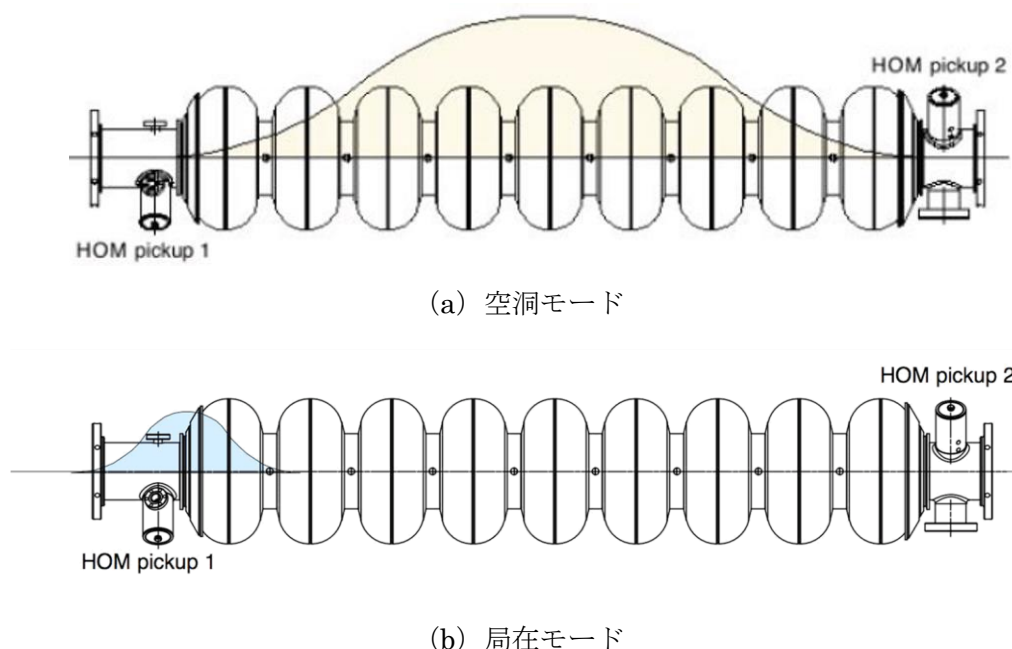


図 2-1 : 空洞モードと局在モードの概念図

### 2.3. 空洞モード

空洞セルに結合し、空洞内に広く分布する空洞モードを、ピルボックス形状での共振モードから簡略的に導出する。まず、空洞セルの構造はピルボックスを出発点とし、ビーム通過用の穴を開け、加速へのインピーダンスを最適化したものである。今回研究対象とした9セル超伝導空洞は、加速効率を上げるため、空洞セルを9つ連結したものである。ピルボックス形状での電磁場モードは解析的に計算できるので見通しが良く、電磁場モードの分類にも用いるため、まずピルボックス空洞の共振モードについて述べる。ピルボックス空洞の場合には空洞内に励振されるモードはTM (Transverse Magnetic) モードかTE (Transverse Electric) モードである。図 2-2 に示す円筒座標系を用いると、TM モードおよびTE モードは以下の式で記述することができる。TM 後に続く  $m, n, p$  はそれぞれ  $\theta$  方向,  $r$  方向,  $z$  方向の節の数に相当し、TE の後に続く  $m, n, p$  はそれぞれ  $\theta$  方向,  $r$  方向,  $z$  方向の腹の数に相当する。

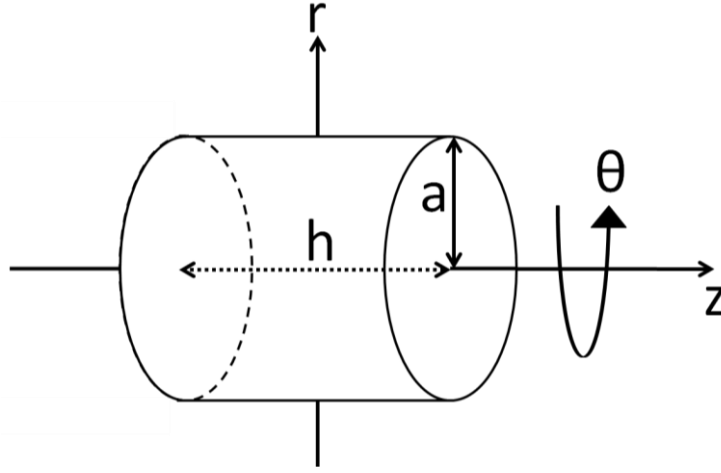


図 2-2 : 円筒座標系

TM<sub>mnp</sub>

$$E_r(r, \theta, z) = -\frac{1}{k^2} \frac{p\pi}{h} \frac{P_{mn}}{a} A \cos m\theta J'_m\left(\frac{P_{mn}}{a}r\right) \sin\left(\frac{p\pi}{h}z\right)$$

$$E_\theta(r, \theta, z) = \frac{1}{k^2} \frac{p\pi}{h} \frac{m}{r} A \sin m\theta J_m\left(\frac{P_{mn}}{a}r\right) \sin\left(\frac{p\pi}{h}z\right)$$

$$E_z(r, \theta, z) = A \cos m\theta J_m\left(\frac{P_{mn}}{a}r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h}z\right)$$

$$H_r(r, \theta, z) = -\frac{i\omega\epsilon}{k^2} \frac{m}{r} A \sin m\theta J_m\left(\frac{P_{mn}}{a}r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h}z\right)$$

$$H_\theta(r, \theta, z) = -\frac{i\omega\epsilon}{k^2} \frac{P_{mn}}{a} A \cos m\theta J'_m\left(\frac{P_{mn}}{a}r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h}z\right)$$

$$H_z(r, \theta, z) = 0$$



TE<sub>mnp</sub>

$$\begin{aligned}
 E_r(r, \theta, z) &= -\frac{i\omega\epsilon m}{k^2} \frac{A \sin m\theta J_m\left(\frac{P'_{mn}}{a}r\right) \sin\left(\frac{p\pi}{h}z\right)}{r} \\
 E_\theta(r, \theta, z) &= -\frac{i\omega\epsilon P'_{mn}}{k^2} \frac{A \cos m\theta J'_m\left(\frac{P'_{mn}}{a}r\right) \sin\left(\frac{p\pi}{h}z\right)}{a} \\
 E_z(r, \theta, z) &= 0 \\
 H_r(r, \theta, z) &= \frac{1}{k^2} \frac{p\pi P'_{mn}}{h} \frac{A \cos m\theta J'_m\left(\frac{P'_{mn}}{a}r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h}z\right)}{a} \\
 H_\theta(r, \theta, z) &= -\frac{1}{k^2} \frac{p\pi m}{h} \frac{A \sin m\theta J_m\left(\frac{P'_{mn}}{a}r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h}z\right)}{r} \\
 H_z(r, \theta, z) &= A \cos m\theta J_m\left(\frac{P'_{mn}}{a}r\right) \sin\left(\frac{p\pi}{h}z\right)
 \end{aligned}$$

ここで、 $P_{mn}$ は  $m$  次の第一種ベッセル関数  $J_m(x)$  の  $n$  番目の零点、 $P'_{mn}$ は  $m$  次の第一種ベッセル関数の導関数  $J'_m(x)$  の  $n$  番目の零点を意味する。また、 $A$ は $\theta$ 方向単振動の振幅、 $\omega$ は角周波数、 $\epsilon$ は誘電率、

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2 = \begin{cases} \frac{P_{mn}}{a}, & (\text{TM}_{mnp} \text{ のとき}) \\ \frac{P'_{mn}}{a}, & (\text{TE}_{mnp} \text{ のとき}) \end{cases}$$

である。そして、 $\theta$  方向の分布の違いによってモノポールモード、ダイポールモード、クアドロポールモード等と分類することができる。このとき、TM010 モードが加速モードである。

実際の空洞の場合にはモノポールモードを除いた他のモードは純粋な TM, TE にはならず、TM と TE との混合種となる [14]。しかし、便宜上、9セル超伝導空洞においても TM<sub>mnp</sub> モードや TE<sub>mnp</sub> モードと呼ぶ。本研究対象である STF 空洞は、上に述べたセルの固有モードが隣合うセル間で結合した系である。この多セル空洞の共振モードを理解するためには、本研究の場合は結合が 1%レベルであって小さいので、弱く結合する LC 回路から成る等価回路として考えることができる。9セル空洞の場合の等価回路は図 2-3 と書くことができる。ここで、 $C_k$ はセル間の結合、 $C_b$ はビームパイプへの結合を表す。この等価回路について、キルヒホッフの法則より次式で記述することができる [15]。

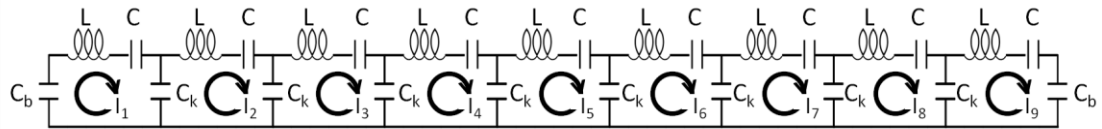


図 2-3 : 9セル空洞の等価回路

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{i\omega C_b} I_1 + \left(i\omega L + \frac{1}{i\omega C}\right) I_1 + \left(\frac{1}{i\omega C_k}\right) (I_1 - I_2) &= 0 \\
 \frac{1}{i\omega C_k} (I_2 - I_1) + \left(i\omega L + \frac{1}{i\omega C}\right) I_2 + \left(\frac{1}{i\omega C_k}\right) (I_2 - I_3) &= 0 \\
 2 \leq j \leq 8
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{i\omega C_k}(I_j - I_{j-1}) + \left(i\omega L + \frac{1}{i\omega C}\right)I_j + \left(\frac{1}{i\omega C_k}\right)(I_j - I_{j+1}) = 0$$

$$\frac{1}{i\omega C_k}(I_9 - I_8) + \left(i\omega L + \frac{1}{i\omega C}\right)I_9 + \left(\frac{1}{i\omega C_b}\right)I_9 = 0$$

以上の両辺に $i\omega C$ を掛け、 $\omega_0^2 = 1/LC$ とし、行列方程式で表すと、

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{C}{C_b} + \frac{C}{C_k} & -\frac{C}{C_k} & 0 & \cdots & 0 \\ -\frac{C}{C_k} & 1 + \frac{2C}{C_k} & -\frac{C}{C_k} & & \vdots \\ 0 & & \ddots & & 0 \\ \vdots & & -\frac{C}{C_k} & 1 + \frac{2C}{C_k} & -\frac{C}{C_k} \\ 0 & \cdots & 0 & -\frac{C}{C_k} & 1 + \frac{C}{C_b} + \frac{C}{C_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_8 \\ I_9 \end{pmatrix} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_8 \\ I_9 \end{pmatrix}$$

となる。ここで、 $\pi$ モードが9番目の規格化固有ベクトル

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{pmatrix}^{(9)} = \frac{1}{\sqrt{9}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

をもつことより、行列方程式の1・2行目について解くと、次の関係が分かる。

$$C_b = \frac{1}{2}C_k$$

すると、この方程式の解は

$$I_j^{(m)} = \sqrt{\frac{2 - \delta_{m9}}{9}} \sin\left(m\pi\left(\frac{2j-1}{2 \cdot 9}\right)\right)$$

$$j = 1, 2, \dots, 9, \quad m = 1, 2, \dots, 9, \quad \delta_{m9} = \begin{cases} 0, & m \neq 9 \\ 1, & m = 9 \end{cases}$$

と求められる。ここで、 $j$ はセルの番号、 $m$ はモードの番号である。

$$I_{j-1}^{(m)} + I_{j+1}^{(m)} = 2I_j^{(m)} \cos\left(\frac{m\pi}{9}\right)$$

であることより、モードの周波数に関して次のように書け [16],

$$\frac{\omega_j^2}{\omega_0^2} = 1 + \frac{2C}{C_k} \left(1 - \cos\frac{m\pi}{9}\right)$$

各セル間の位相進みが

$$\frac{\pi}{9}, \frac{2}{9}\pi, \frac{3}{9}\pi, \frac{4}{9}\pi, \frac{5}{9}\pi, \frac{6}{9}\pi, \frac{7}{9}\pi, \frac{8}{9}\pi, \pi$$

となるモードが存在することが分かる。セル内モード分布を表す  $\text{TM}/\text{TE}_{mnp}$  に、各セル間の位相進みを  $\pi/9$  で割った値  $a$  とを組み合わせ、 $\text{TM}_{mnp}\cdot a$  もしくは  $\text{TE}_{mnp}\cdot a$  のように9セル空洞内モードを指定することができる。図 2-4 は加速モード  $\text{TM}_{010}\cdot 9$  が 1300 MHz である9セル空洞のディスペーションカーブを示す。共振周波数が高周波になるにつれ、異なるモード間の周波数差が小さくなり、モードの同定は困難になる。加速モードである  $\text{TM}_{010}\cdot 9$  は光円錐と一致させてあり、効率のよい加速ができるように設計されている。DESYでHOMアライメント研究に用いられている  $\text{TE}_{111}\cdot 6$  モードも光円錐に近く、ビームと結合しやすいインピーダンスが高いモードである。

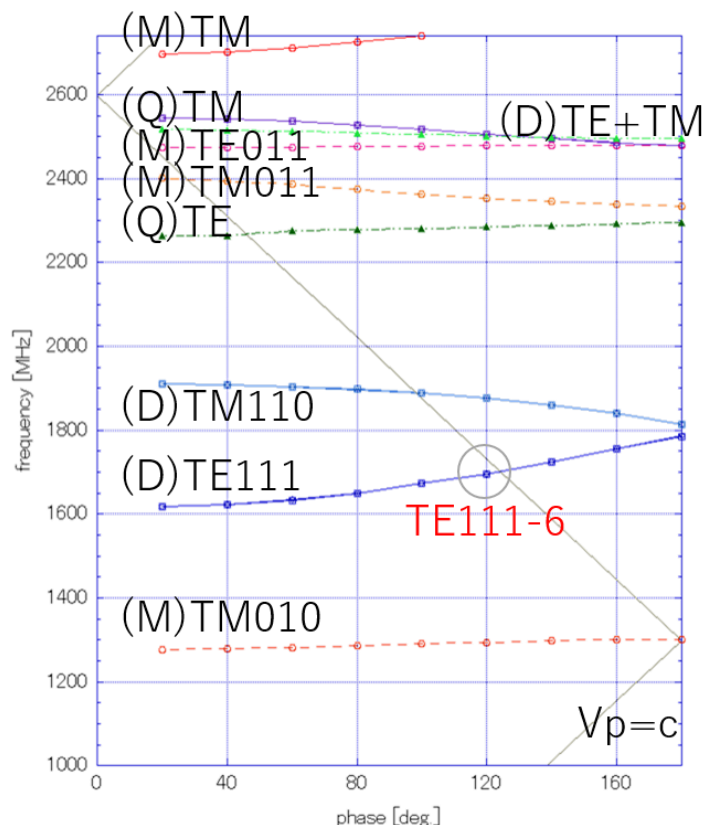


図 2-4 : 1300 MHz の加速モード ( $\text{TM}_{010}\cdot 9$ ) を持つ9セル空洞のディスペーションカーブ

(茶色の実線は位相速度が光速と一致する光円錐を示す。(M)，(D)，(Q) はそれぞれモノポールモード，ダイポールモード，クアドロポールモードを意味する。)

## 2.4. 局在モード

9セル超伝導空洞の多セル構造部以外にも共振モードが誘起される場所がある。ビームパイプにつながる加速セルやベロース等のコンポーネント形状が端部境界条件となり、ピルボックス形状を持つビームパイプ部周辺のみで誘起されるモードが存在する。このモードのことを空洞モードと区別し、局在モードと定義した。このモードは境界条件が複雑であり解析的に解くことができないため、CST を用いてモードの電磁場計算を実施した。その計算については第 5 章にて述べる。モードが誘起するビームパイプ部は HOM カプラーや Input カプラーがパイプ内に非対称的に突き出ているため非対称な構造となっている。その非対称のため、電気的中心は機械的中心からのズレが生じることが想定される。本研究では、Input カプラーなど非対称の影響を極力受けない STF 空洞の上流側のビームパイプに局在するモードを使用した。

## 2.5. 高調波モードの誘起

図 2-5 のように、点電荷 $q_2$ が点電荷 $q_1$ と距離  $s$  だけ離れており、どちらの電荷もほぼ光速で移動している状態を考える [14]。

先行する点電荷 $q_1$ により生じる場によって後続の点電荷 $q_2$ が受けるローレンツ力は

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = q_2(\mathbf{E} + c\mathbf{e}_z \times \mathbf{B})$$

である。点電荷 $q_1$ により生じるウェイクポテンシャルは

$$\mathbf{W}(x_2, y_2, x_1, y_1, s) = \frac{1}{q_1} \int dz (\mathbf{E} + c\mathbf{e}_z \times \mathbf{B})_{t=(z+s)/c}$$

と定義され、その積分範囲はウェイクポテンシャルの及ぶ範囲である。

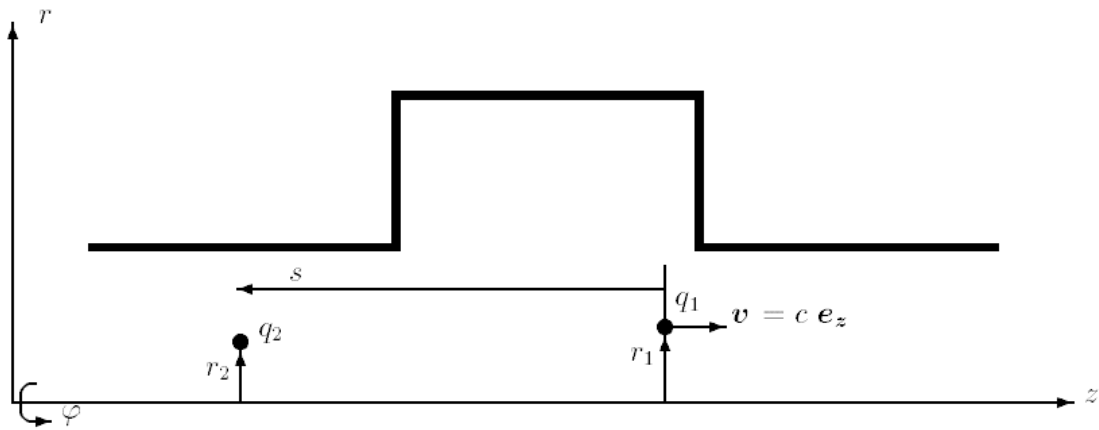


図 2-5：半径の異なるビームパイプ部にて  $r_1$  のオフセットを持つ点電荷  $q_1$  を  $r_2$  のオフセットを持つ点電荷  $q_2$  が追従する様子

( [14]より転載。)

Panofsky-Wenzel の定理 [17]よりウェイクポテンシャルの縦成分と横成分は以下のとおり関係づけられる。縦成分ウェイクポテンシャルの点電荷 $q_2$ の座標系での横成分の勾配の積分が横成分のウェイクポテンシャルとなる。

$$\frac{\partial}{\partial s} \mathbf{W}_\perp(x_2, y_2, x_1, y_1, s) = -\nabla_\perp W_\parallel(x_2, y_2, x_1, y_1, s)$$

円筒対称である場合には次式のように縦成分ウェイクポテンシャルを多重極展開を用いて表すことができ、

$$W_\parallel(r_1, r_2, \phi_1, \phi_2, s) = \sum_{m=0}^{\infty} r_1^m r_2^m W_\parallel^{(m)}(s) \cos m(\phi_2 - \phi_1)$$

となる。ここで  $W_\parallel^{(m)}(s)$  は  $2m$  極の縦成分ウェイクポテンシャルを意味する。モノポール ( $m=0$ )、ダイポール ( $m=1$ )、クアドロポール ( $m=2$ ) までは十分にこの式で考えることが可能である。このとき  $2m$  極の横成分ウェイクポテンシャルは次式で定義される。

$$W_\perp^{(m)}(s) = - \int_{-\infty}^s ds' \frac{d}{ds'} W_\parallel^{(m)}(s'), \quad m > 0$$

さらに、ロングレンジウェイク場すなわち高調波モードについて考えるときには縦成分ウェイクポテンシャル  $W_\parallel^{(m)}(r, s)$  をすべてのモードの足し合わせとして計算することが可能である。 $2m$  極の縦成分ウェイクポテンシャルと横成分ウェイクポテンシャルは

$$W_\parallel^{(m)}(r, s) = - \sum_n 2 \frac{1}{r^{2m}} k_{\parallel n}^{(m)}(r) \cos(\omega_{mn}s/c), \quad s > 0$$

$$W_\perp^{(m)}(r, s) = \sum_n 2 \frac{k_{\parallel n}^{(m)}(r)}{\omega_{mn} r^{2m}/c} \sin(\omega_{mn}s/c), \quad s > 0, m > 0$$

と書け、ここで  $\omega_{mn}$  は  $2m$  極の  $n$  番目のモードの周波数を意味し、 $k_{\parallel n}^{(m)}(r)$  はそのモードのロスパラメータであり、

$$k_{\parallel n}^{(m)}(r) = \frac{|V_{\parallel n}^{(m)}(r)|^2}{4U_n^{(m)}} = \frac{\left| \int E_{z,n}^{(m)}(r, z) \exp\left(-\frac{i\omega_{mn}z}{c}\right) dz \right|^2}{4 \times \frac{\epsilon_0}{2} \int |E_n^{(m)}|^2 dr^3}$$

と表される。そして、ロスパラメータと  $R/Q$  との関係は次式で表される。

$$\frac{R^{(m)}}{Q} = \frac{1}{r^{2m}} \frac{2k^{(m)}(r)}{\omega}$$

## 2.6. ダイポールモードの性質

特定のダイポールモード ( $m=1$ ) の縦成分ウェイクポテンシャル  $W_{\parallel n}^{(1)}(s)$  は

$$W_{\parallel n}^{(1)}(s) = - \frac{2}{r^2} k_{\parallel n}^{(1)}(r) \cos(\omega_{1n}s/c), \quad s > 0$$

であり、 $k_{\parallel n}^{(1)}(r)$  は

$$k_{\parallel n}^{(1)}(r) = \frac{|V_{\parallel n}^{(1)}(r)|^2}{4U_n^{(1)}} = \frac{\left| \int E_z(r, z)_n^{(1)} \exp\left(-\frac{i\omega_{1n}z}{c}\right) dz \right|^2}{4 \times \frac{\epsilon_0}{2} \int |E_n^{(1)}|^2 dr^3}$$

である。ビームにより誘起されるダイポールモードの電圧は上式のロスパラメータを使って、以下のよう書ける。

$$V_{dipole} \propto \sqrt{k_{\parallel n}^{(1)}(r)} \propto \int E_z(r, z)_n^{(1)} \exp\left(-\frac{i\omega_{mn}z}{c}\right) dz$$

TM ダイポールモードにおいて

$$E_z(r, z)_n^{(1)} = A \cos \phi J_1\left(\frac{P_{1n}}{a} r\right) \cos\left(\frac{p\pi}{h} z\right)$$

となり,  $J_1\left(\frac{P_{1n}}{a} r\right)$  は  $r = 0$  の近傍で  $r$  に比例するので,  $V_{dipole}$  はビームオフセット量に比例する。

## 2.7. ダイポールモードの電氣的中心

ダイポールモードには形状の非対称性から生じる偏極方向が異なるモードが存在する。ダイポールモードの性質により、ビームが通過しても、そのどちらのモードも誘起されない点が存在する。その点をダイポールモードの電氣的中心と定義する。偏極モードの一方が誘起されない点の集合は、そのモードの偏極軸となり、2つの偏極モードの偏極軸の交点が電氣的中心となる。また、空洞セルおよびビームパイプの回転対称な軸上の点を機械的中心と定義すると、ダイポールモードの電氣的中心は機械的中心とは必ずしも一致するとは限らない。それは、ビームパイプに取り付けられる非回転対称な構造体、例えばインプットカプラーや HOM カプラーなどの影響により、電氣的中心が機械的中心からずれることが推測されるためである。それを模式的に示したのが図 2-6 である。

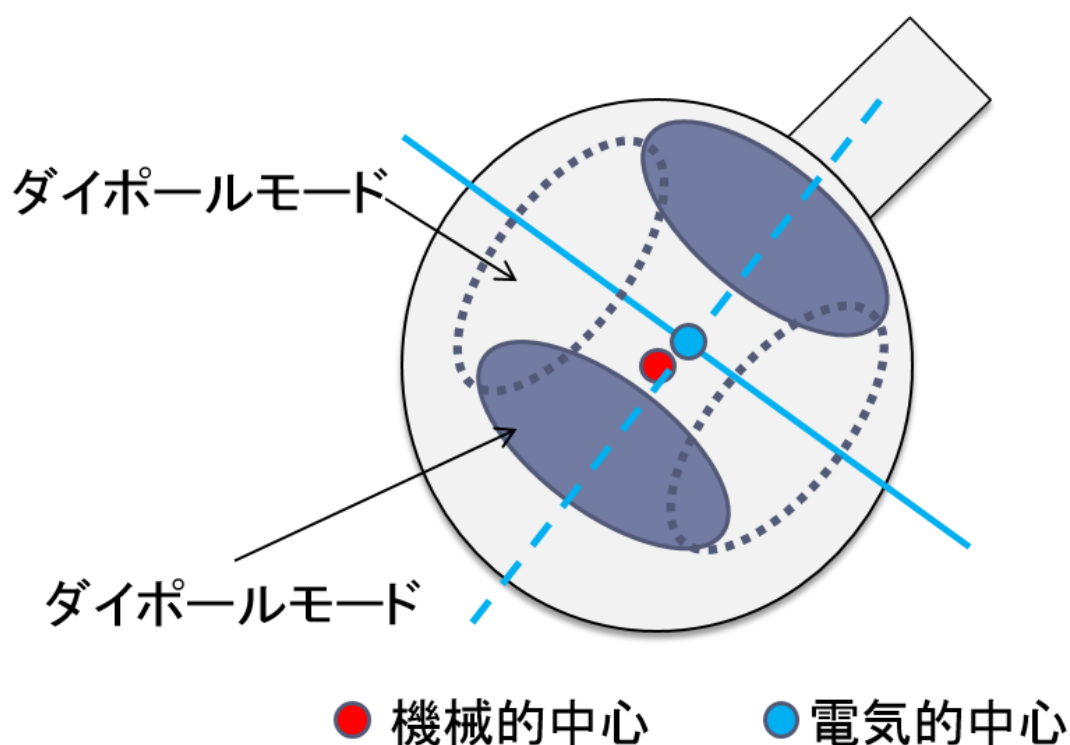


図 2-6 : 機械的中心と電氣的中心の模式図

(空洞端部のビームパイプ断面をビーム進行方向に向かってみたときの図であり、2つの偏極方向が直交するダイポールモード（偏極モード）を模式的に示している。斜め右方向に飛び出している矩形のものが HOM カプラーを表している。)

## 2.8. ダイポールモードの電氣的中心の測定原理

ダイポールモードの2つの偏極モードの周波数は数 MHz から 10 数 MHz 程度異なる。この2つのモード各々に対して、ビーム掃引毎にその誘起振幅が最小となるビーム通過位置を集め直線でフィットし、それぞれの偏極軸を求める。そして、その偏極軸の交点をダイポールモードの電氣的中心として求める。その過程を図 2-7 を使って示す。図 2-7 中の右図に示すオレンジ線（x 方向）と緑線（y 方向）に沿って、ビームを x 方向、y 方向に掃引し、ダイポールモードの2つの偏極モードの振幅が最小となる点を見つけると、左図の水色で示す方向に偏極するモードでは右図の水色線で縁取りされた丸点が見つかり、黒波線で示す方向に偏極するモードでは右図の黒色線で縁取りされた丸点でそのモードの振幅が最小となる。ビームの x 方向掃引したときに見つかる点はオレンジ色で、y 方向掃引で見つかる点は緑色で塗られている。モードの振幅は偏極軸からの距離に比例するので、それらの振幅最小の点はモードの偏極軸上にある。よって、右図の水色線で縁取りされた丸点から直線フィットにより水色で示す偏極モードの偏極軸が求められ、黒線で縁取りされた丸点から直線フィットにより黒波線で示す方向の偏極モードの偏極軸を求めることができる。そして、2 偏極軸の交点をこのモードの電氣的中心として赤丸で示す点を求めることができる。したがって、ビーム通過位置を変化させ、そのときのダイポールモードの振幅を測定することで電氣的中心を求めることができる。このとき、ダイポールの振幅の測定は、図 2-8 に示す通り、HOM カプラーによりクライオモジュールの外部まで取り出された HOM 波形をオシロスコープで取得し、高速フーリエ変換したのち、ダイポールモードのピークでの振幅を読み取ることで取得できる。

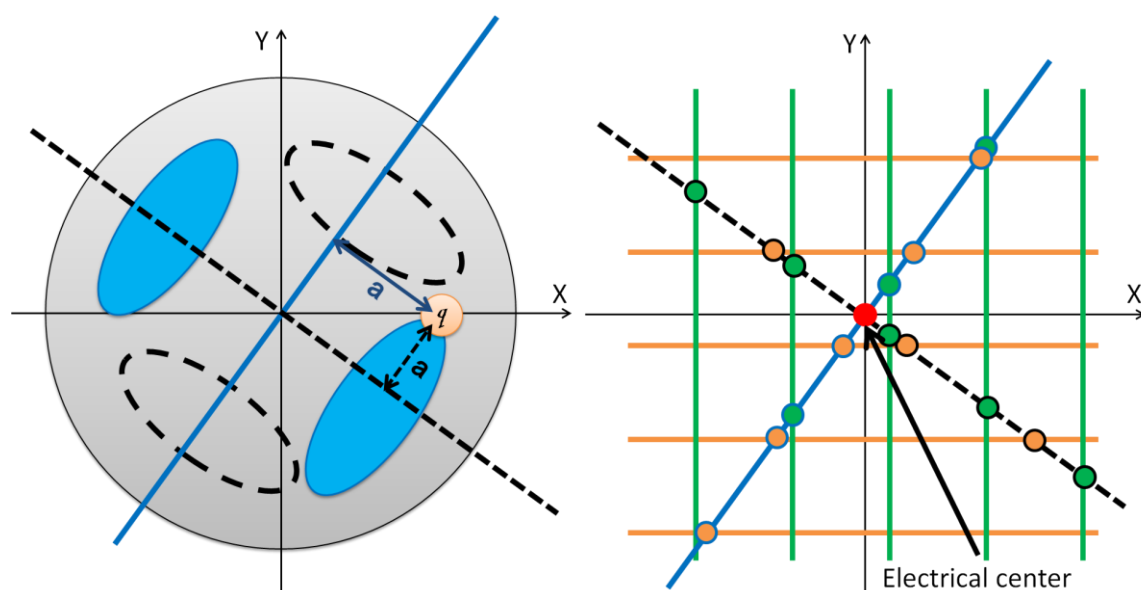


図 2-7：電氣的中心を求める概念図



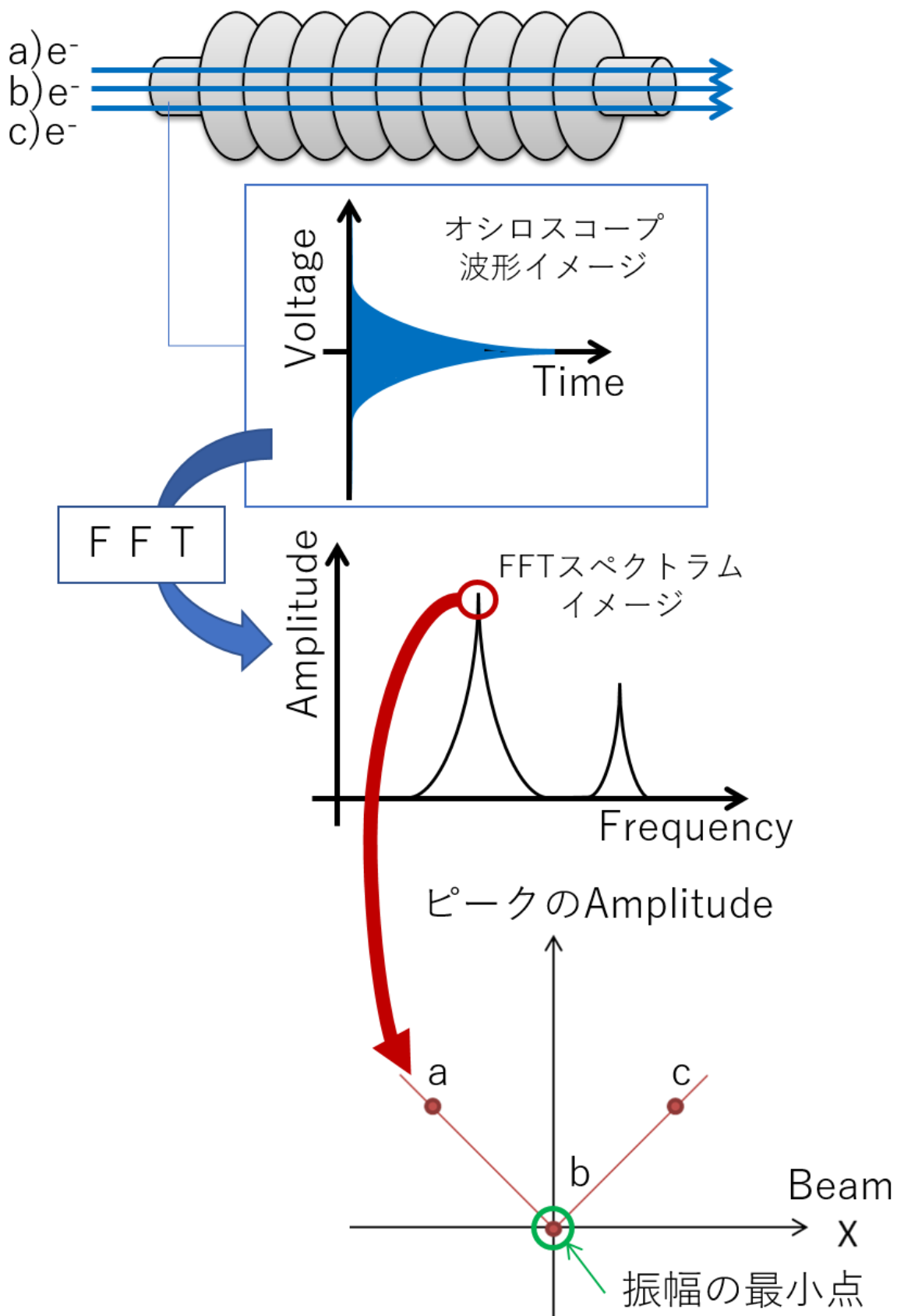


図 2-8 : ダイポールモードの振幅測定手順

## 第3章. 非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフロー

### 3.1. 機械的中心と電気的中心の定義

まず、初めに機械的中心と電気的中心を定義する。空洞は円筒状のビームパイプと回転対称な空洞セル部から成る。実際の空洞設置時には、ヘリウム容器（空洞）上に基準を設け、その基準が設計位置にくるようにアライメントする。ヘリウム容器取り付け時の空洞の基準は、9セル超伝導空洞の種類によって、ビームパイプであったり、エンドセルであったりと異なるが、機械的中心と基準との位置関係は、空洞形状は設計図通りの理想的な状態にあると仮定し、設計図から見積もられている。そこで、本研究でも、空洞形状は設計図通りの理想的な状態にあると仮定し、空洞セルおよびビームパイプの回転対称な軸上の点を機械的中心と定義することにした。

そして、ダイポールモードの電気的中心はそのダイポールモードが誘起されないビーム通過位置とする。ダイポールモードの電気的中心は、空洞に取り付けられるアンテナなどの非対称を生む構造物により、機械的中心から偏差をもつ。本解析時には、ビーム位置モニターは設計ビーム軌道軸上に設置されていると仮定し、ビーム位置モニターの電気的中心を結ぶ直線を基準軸（ $z$  軸）とし、水平方向を  $x$  軸、鉛直方向を  $y$  軸とする。そして、実際のビーム位置モニターと設計ビーム軌道上のズレは誤差として取り扱うことにする。

### 3.2. フローの概念

局在ダイポールモードの使用による解析方法の大きな変化はなく、従来方法と同様に、電気的中心の導出にはビーム軌道と、そのときのダイポールモードの振幅が必要である。そして、求めた電気的中心から機械的中心を求める。

ビーム軌道解析の組み込みは、空洞の上流と下流でのビーム位置を頼りに、空洞内でのビーム軌道を推定するのが目的である。そのためには、解析方法に工夫が必要であった。それは、加速場フリンジの影響を受けたビーム軌道を計算するには、本来導出するはずの機械的中心を予め仮定しなければならなかったためである。加速場の中心と機械的中心とは一致すると仮定したため、加速場の位置の指定、つまり機械的中心の指定が必要であった。そこで、ビーム軌道を推定する過程と機械的中心を推定する過程とを分けて、フローに組み込んだ。

加速場フリンジの影響を受けたビーム軌道を計算するためには、ビームの初期値と加速場を設定する必要がある。ビームの初期値には設定ビーム軌道からのオフセットと傾きが含まれる。そして、加速場を設定するためには、加速場分布、加速場強度と加速場を与える位置を指定しなければならない。加速場分布は9セル超伝導空洞の形状から **Superfish** で計算された電場分布を使用できた。残りの入射ビームのオフセット（ $x$  方向： $x_{ini}$ 、 $y$  方向： $y_{ini}$ ）と傾き（ $x$  方向： $B_{fieldX00}$ 、 $y$  方向： $B_{fieldY00}$ ）、空洞の加速場強度（ $A$ ）を可変パラメータとし、推定することにした。ビーム掃引時に取得できるデータを利用して、ビーム掃引時のダイポールマグネット電流値を設定したときに2つのビーム位置モニターで実測したビーム位置をビーム軌道計算にて再現する入射ビームのオフセットと傾き、空洞の加速場強度を求めた。実際のビーム軌道計算時には、現実の加速器をより忠実に再現できるようにクアドロポールマグネットやソレノイドマグネットも組み込んでいるが、その値は実験時の設定値に固定している。

### 3.3. フロー手順

非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフローチャートを図 3-1 に示す。仮定した空洞の位置により、加速場のフリンジの位置が指定され、それに伴い、通過するビームの曲げられ方が変わるので、ビーム軌道と空洞の位置は密接な関係にある。仮定した空洞の機械的中心は、ビーム軌道と局在モードを利用し導出した機械的中心と一致しなければならないので、それを判定する手順を入れた。したがって、手順は以下ようになる。

まず、ビーム掃引を行い、以下のデータを取得する。

- ① ダイポールマグネット電流値
- ② 2つの BPM でのビーム通過位置
- ③ 局在モードの振幅

そして、そのデータの内、①ダイポールマグネット電流値と③局在モードの振幅とを解析し、局在モードの電気的中心を通るダイポールマグネット電流値を求める。

次に、ビーム軌道を推定する計算の準備として、空洞の機械的中心をオフセットと傾きで仮定する。(初期値はアライメントの測定値とする。)そして、ビーム軌道計算にて、ダイポールマグネット電流値(①)での2つの BPM でのビーム通過位置(②)を再現する、ビーム軌道を決めるパラメータ ( $x_{ini}$ ,  $y_{ini}$ ,  $B_{fieldX00}$ ,  $B_{fieldY00}$ ,  $A$ ) を推定する。先に求めた局在モードの電気的中心を通るダイポールマグネット電流値でのビーム軌道を計算し、局在モードの電気的中心を求める。そして、局在モードの電気的中心を機械的中心に変換する。

ここで、先述した判定として、仮定した機械的中心と求めた機械的中心とが誤差の範囲で一致しているかを判断する。一致していた場合には、機械的中心が求められる。そして、一致していなかった場合には、(空洞1のオフセットを変え、)機械的中心の位置を仮定しなおし、一致するまで繰り返す。

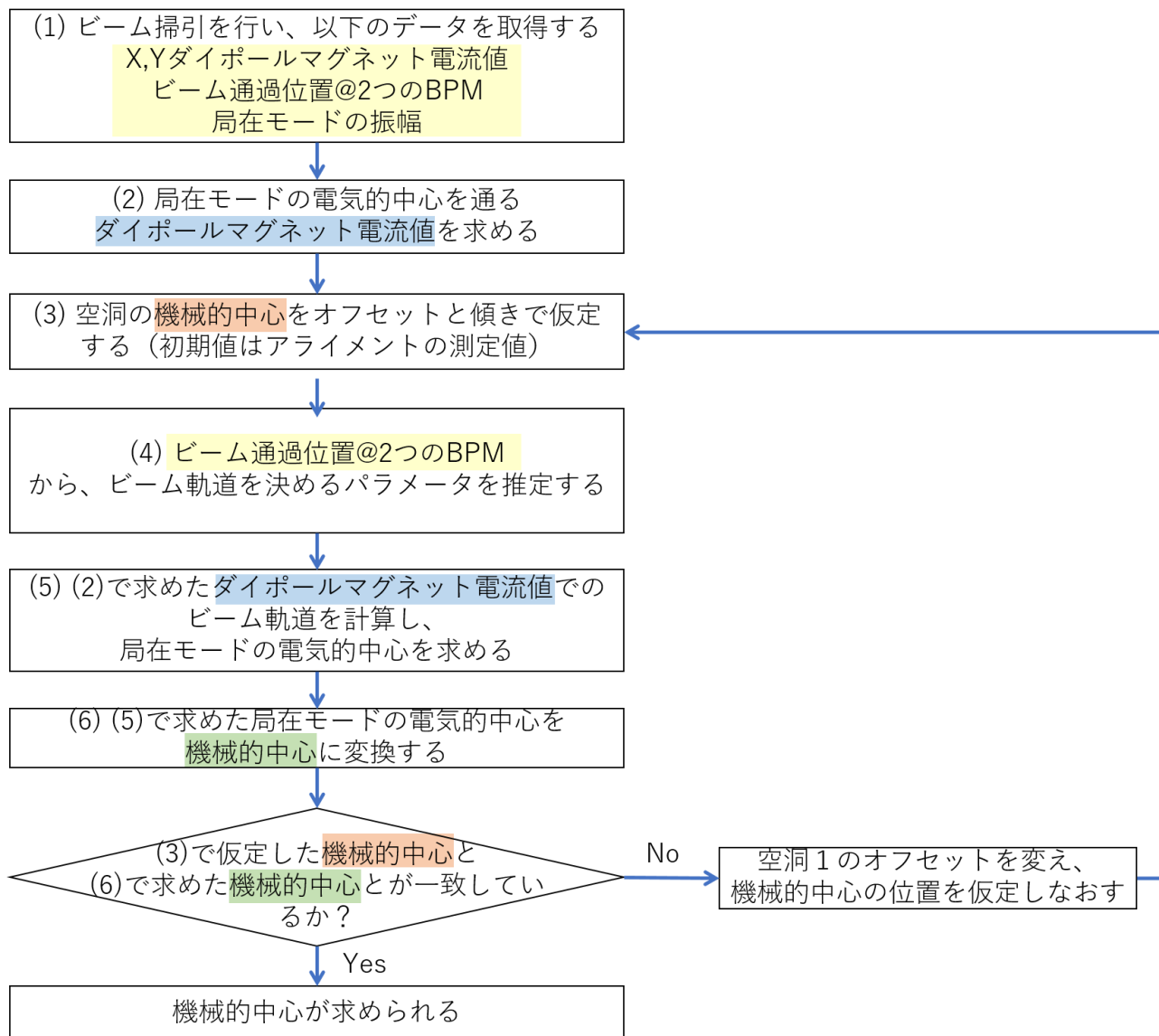


図 3-1：非直線ビーム軌道下での機械的中心を求めるフローチャート

### 3.4. 機械的中心の推定方法について

仮定した機械的中心が求められた機械的中心と一致しなかった場合に、本研究では空洞1のオフセットのみを変えることにした。空洞2に関しては通過するビームのエネルギーが空洞1通過時に比べて高く、オフセットと傾きが与える影響は小さいため、今回は無視した。空洞2を無視しても、オフセットと傾きを両方求めるには測定データが不足している。

空洞位置（オフセットと傾き）の初期値にはレーザートラッカーによるヘリウム容器（空洞）設置時のデータ、ワイヤー測定から求めた冷却によるヘリウム容器（空洞）位置の変位量から求めた値が入っている。ヘリウム容器と空洞中心とのずれは含まれていない。冷却による変位量を見積もるときには、ワイヤー測定のデータから推定されるヘリウム容器とワイヤー位置モニター（WPM）の支持構造の熱収縮量を引き、ヘリウム容器の変位量を求めた。推定された熱収縮量が異なっている場合には、設定した初期値からオフセットをもつことになる。そこで、空洞1については、オフセットと傾きの内、変位量が大きいと推定されるオフセットのみをフリーパラメータとし、求めることにした。



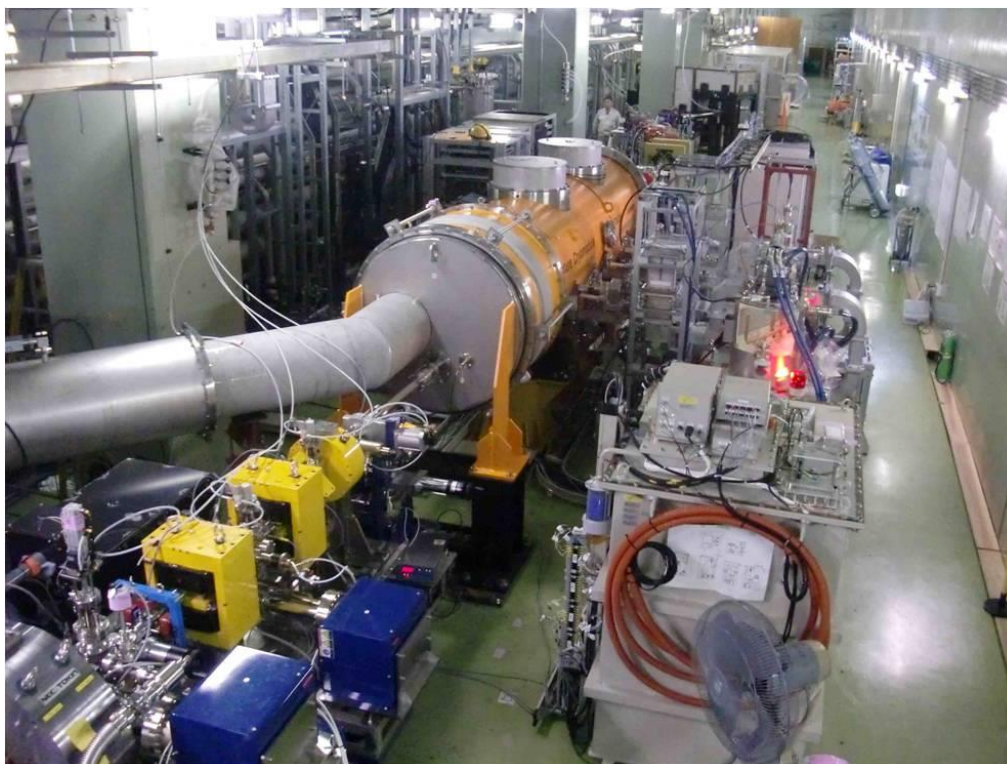


図 4-2 : STF 加速器の全景

(左下がフォトカソード RF 電子銃, 中央がクライオモジュールである。)

次に、2 台の STF 空洞が内蔵されたクライオモジュールのビーム軸に沿った断面図を図 4-3 に示す。クライオモジュールは直径 1 m、長さ約 4 m の鉄製真空容器の中に SUS 製ヘリウム冷却配管と 2 台の超伝導加速空洞および 2 重のアルミニウム製断熱シールドから構成されており、それらは上部から 2 つの断熱サポートで吊るされている。クライオモジュールの上流側（図 4-3 の左側をビーム上流とする）の空洞を MHI-12、下流側（図 4-3 の右側をビーム下流とする）の空洞を MHI-13 と呼び、測定に使用した STF 空洞は MHI-12 である。MHI-12 の上流側のビームパイプには  $\phi 80$  mm から  $\phi 60.2$  mm まで絞られた長さ 55 mm の SUS 製テーパ管が取り付けられており、その上流側にベローズ管を介してゲート弁に取り付けられている。下流側のビームパイプは MHI-13 と内直径 70 mm、長さ 79.4 mm の SUS 製ベローズ管を介して接続されている。2 空洞とも、それぞれの下流側のビームパイプ部にはインプットカップラーが取り付けられ、室温側から RF パワーを供給している。ビーム加速に使用する超伝導空洞において高い加速勾配を得るために重要な事は空洞セルに使用するニオブ材の純度や RF 電磁場がかかる空洞内面の平滑度と清浄度である。徹底した電解研磨設備環境の清浄化、電解研磨後に空洞内部に残存析出する酸化ニオブ微小粒やイオウ微小粒の除去、微小粉塵の混入を最小とするような超純水高圧洗浄、引き続きクリーンルーム内での組立作業、その後行われる空洞ベアキングにおいてもシール材のメッキ材質の変更など各種改善の結果、MHI-12 と MHI-13 の性能はそれぞれ 40 MV/m、33 MV/m という高電界が達成された空洞である。クライオモジュールへの STF 空洞の組み込み、クライオモジュールの STF 加速器への組み込みについては 4.4 節と 4.5 節で述べる。キャプチャーモジュールを実験室となる地下トンネルに設置すると同時に、2K 冷凍機や 1 台のクライストロンで 2 空洞を励振する分配型 RF システムである DRFS (Distributed RF Scheme) [24]の組み込み、高精度デジタル RF 制御回路 [25]の組み込



みが行われた。

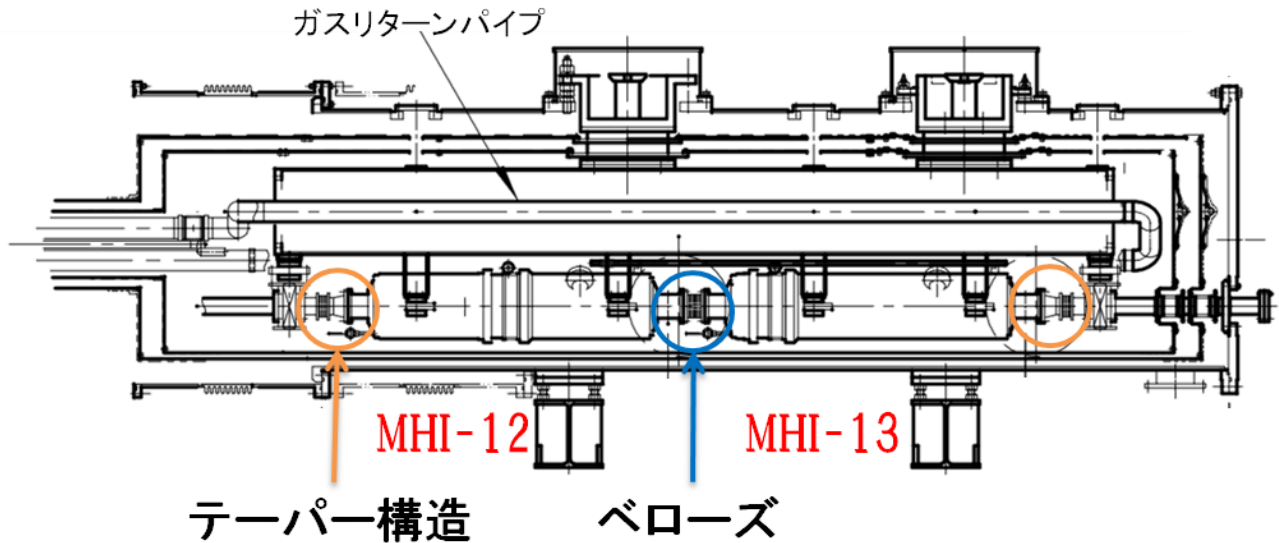


図 4-3：クライオモジュールの横から見た断面図

下流に設置された小型高フラックス X 線源用収束ビームラインには四極マグネットが 12 台並べられており、逆コンプトン散乱用レーザーとの衝突点においてビームサイズは  $40\ \mu\text{m}$  まで収束される。

電子銃システムは 2012 年 2 月から試験運転を開始し、この間 STF 空洞については 2 K までの冷却と調整試験が並行して行われた。2012 年 2 月 27 日に、35 バンチ、 $200\ \text{pC/bunch}$  の強度のビームを取出す事に成功した。その後、軌道調整と収束調整が施された結果、2012 年 3 月 22 日の RF 電子銃試験において、RF 電子銃空洞に供給する RF 振幅と位相にデジタルフィードバックをかけ安定化する事により、また、照射レーザーの調整を行うことによりビーム強度がほぼフラットな 1 ms トレイン長のビームの取り出しに成功した。このときのビーム強度は  $30\sim 40\ \text{pC/bunch}$  で、設定バンチ数は 162450 バンチであり、電子銃への RF 入力パワーは 2.6 MW で、 $37.5\ \text{MV/m}$  のカソード電場でビームを引き出したことに相当する。2012 年 9 月から 2013 年 3 月には前述の「次世代ビーム技術開発課題」（通称：量子ビームプロジェクト）[18]のもと逆コンプトン散乱による高輝度 X 線生成の実証試験のため、2 台の STF 空洞を内蔵したクライオモジュールを使用してビーム運転が行われた。このビーム運転期間中にクライオモジュール内の超伝導空洞を使用して本研究のための測定を行った。



## 4.2. STF 空洞の構造

本研究に使用した STF 空洞の断面図を図 4-4 に示す。図中の左側（Pick-up 側）がビームライン上で上流側に位置する。次いで、インプットカプラー側から各セルを第 1 セル，第 2 セル，…，第 9 セルと呼ぶ。全長は 1247.6 mm，上流側フランジ端面から第 9 セルアイリス溶接部までのビームパイプは長さ 91 mm，内径  $\phi 80$  mm であり，第 1 セルアイリス溶接部から下流側フランジ端部まで長さ 112 mm，内径  $\phi 80$  mm である。各セルの赤道部の内直径は  $\phi 206.85$  mm であり，アイリス部の内直径は  $\phi 70$  mm でセルの長さは 115.4 mm である。空洞材質は RRR300 の純ニオブである。各セルは純ニオブ円盤からハーフセルにプレス成型されたパーツを製作，パーツを連結したのち，アイリス部および赤道部を電子ビーム溶接にて溶接する。外直径  $\phi 124$  mm，厚さ 14 mm のビームパイプフランジは真空封じを目的とするために，硬さが要求されるためニオブチタン合金を採用している。ヘリウム容器用の端板（ニオブチタン合金製）が第 1 セルと第 9 セルの外側に溶接され，ヘリウム容器を構成する。

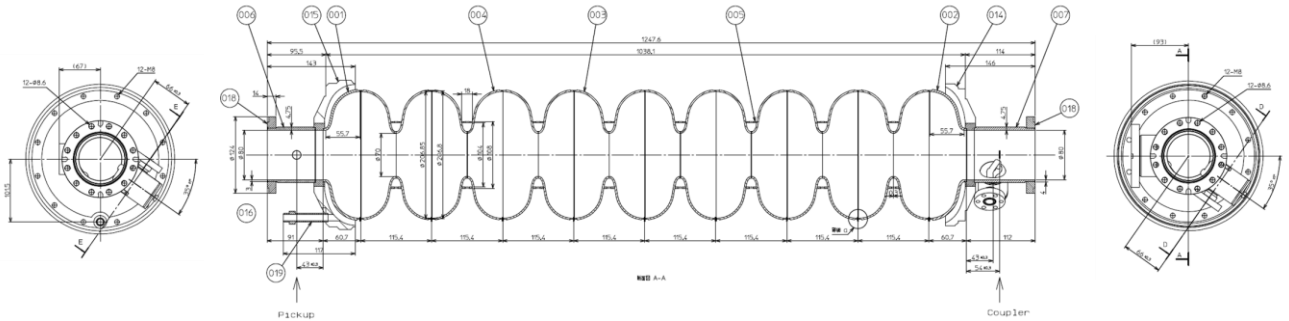


図 4-4 : STF 空洞の断面図

## 4.3. 超伝導空洞からの高調波モードの取り出し

高いインピーダンスを持つ高調波モードは多数の連続するバンチを加速する場合，先行するバンチが引き起こす高調波モードにより後続するバンチが力を受け軌道が曲げられることにより，多バンチ不安定性やビームブレイクアップの原因となる。超伝導空洞の場合には，空洞壁が超伝導となり表面抵抗が非常に小さくなり， $Q$  値が非常に大きく上昇し，それに伴いインピーダンスも非常に大きくなりビームへの影響が大きい。設計電流のビームをエミッタンス増大を抑制して加速するためには高調波モードの  $Q$  値をなんらかの方法で下げることが要求される。ILC ではピーク電流 5.8 mA (3.2 nC, 554 ns バンチ間隔, 1312 バンチ) のビームを大きなエミッタンス増大を招くことなく加速するために高調波モードは各モードでの外部  $Q$  値は  $Q_{ext} < 10^5$  を満たすように 9 セル超伝導空洞両側のビームパイプ部に HOM 取り出し用カプラーが取り付けられている。この HOM カプラーはアンテナを内蔵した円筒状のカップをビームパイプに突き刺すように直角に取り付けたもので，アンテナはビームパイプ内部に突き出ており，ビームパイプ内に浸み出した高調波モードの電場及び磁場に結合するように設計されている。そのためにアンテナの形状はダイポールアンテナ様とループアンテナ様の複合的な形状を持っている。さらに，加速に用いるモード 1300 MHz と結合させないことも必要となり，1300 MHz に共振特性を持つノッチフィルターが一体化されている。ノッチフィルターのノッチ周波数の調整は HOM カプラー先端にあるチューニングギャップを機械的に変形させることで行われる。HOM カップの中心軸のビーム軸方向位置

は上流側，下流側共にエンドセルのアイリス溶接部から 45 mm の位置である。HOM アンテナは HOM カップの中心軸の周りにビーム軸から上流側が $+120^\circ$  回転した位置，下流側が $+60^\circ$  回転した位置に取り付けられる。HOM アンテナに結合した高調波モードのエネルギーはキャパシター結合により HOM ピックアップアンテナに再度結合し，フィードスルーコネクタを通過し，同軸ケーブルを経由し，クライオモジュールの外部まで取り出された後，ダミーロードに吸収される。図 4-5 は ILC で使用される TESLA 空洞の HOM カプラーの構造を示している [26]。また STF 加速器用に設計開発された HOM カプラーは図 4-6 に示すものであり，図 4-5 とはアンテナ形状が異なるが，これは STF の加速空洞用に最適化したものであり，性能は同等である。入力カプラーが付いている側を空洞の下流側と呼び，入力カプラーは x 方向（水平方向）マイナス側から差し込んである。空洞上流側 HOM カプラーはその座標系で x 軸から $-145^\circ$  回転させて取り付けであり，空洞下流 HOM カプラーは x 軸から $-35^\circ$  回転させて取り付けである。したがって，両者の軸の回転角度は  $110^\circ$  であり，図 4-7 に示した通りとなる。STF 加速器用に設計開発された HOM カプラーの通過域特性は図 4-8 に示すように 1600 MHz から 3600 MHz まで結合でき，4500 MHz 以上にも結合できる。実際に，実験に使用した空洞（MHI-12）には通過域特性が改善されたものが取り付けられており，その HOM カプラーの通過域特性の計算値を図 4-9 に示す。

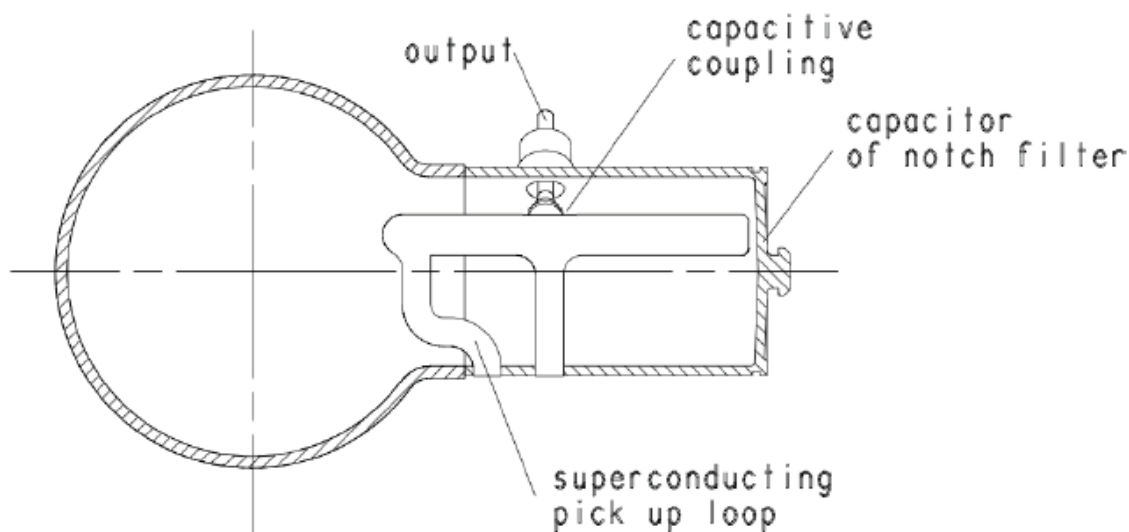


図 4-5 : HOM カプラーの断面図  
( [26]より転載。 )

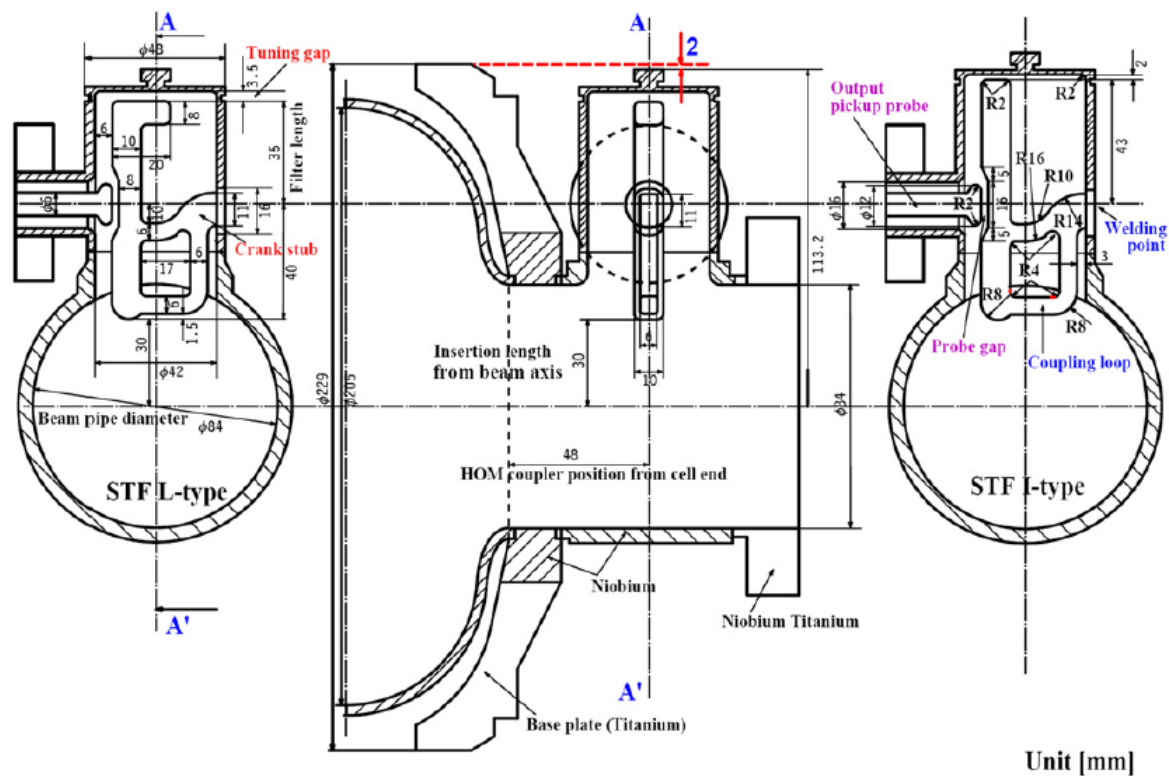


図 4-6 : STF 加速器用に設計開発された HOM カプラー

( [27]より転載。左側の HOM カプラーは L-type, 右側の HOM カプラーは I-type である。)

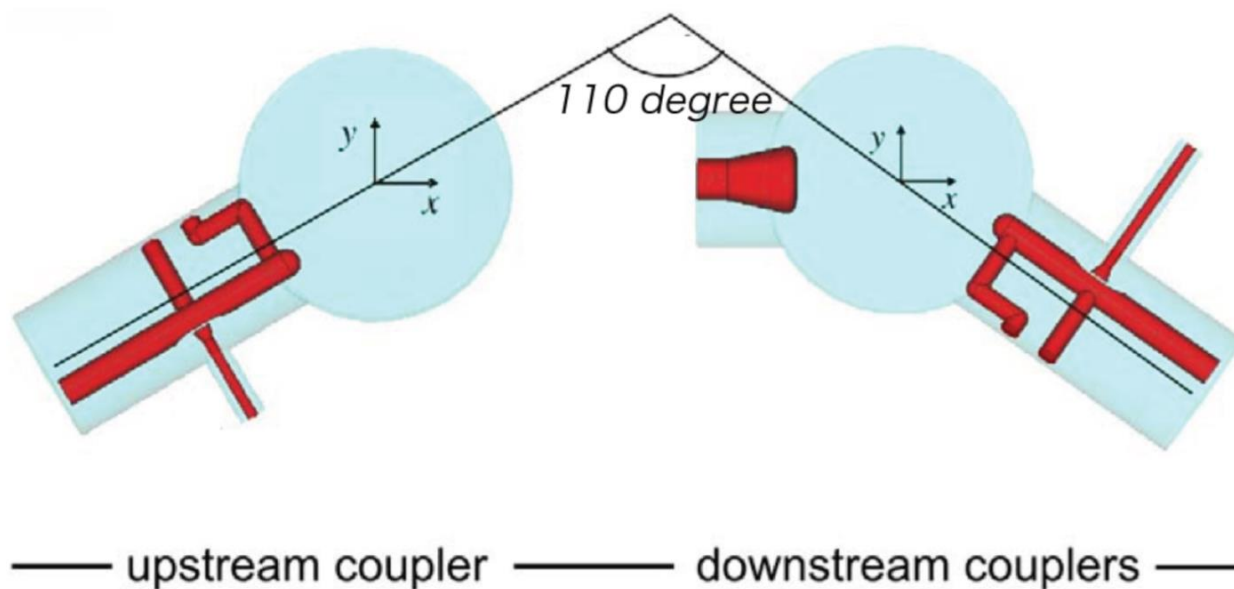


図 4-7 : 空洞上流と空洞下流の HOM カプラーの取り付け角度

( [26]より転載。)

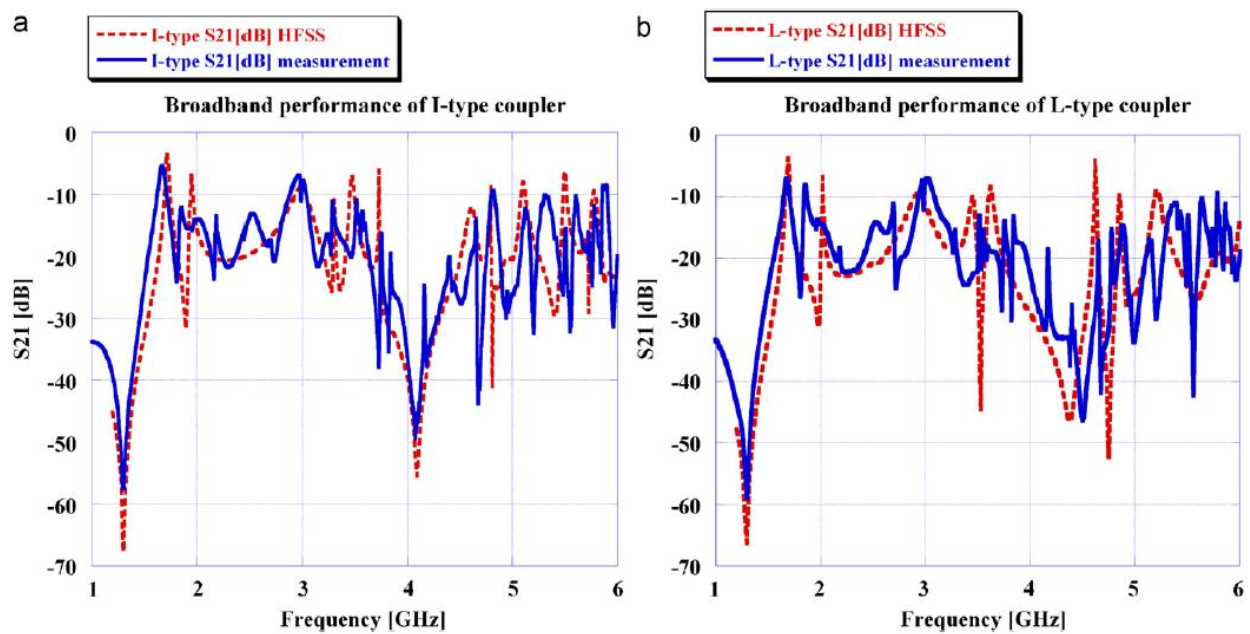


Fig. 6. Comparison of the broadband performance in the measured and calculated results.

図 4-8 : STF 加速器用に設計開発された HOM カプラーの通過域特性  
( [27]より転載。 )

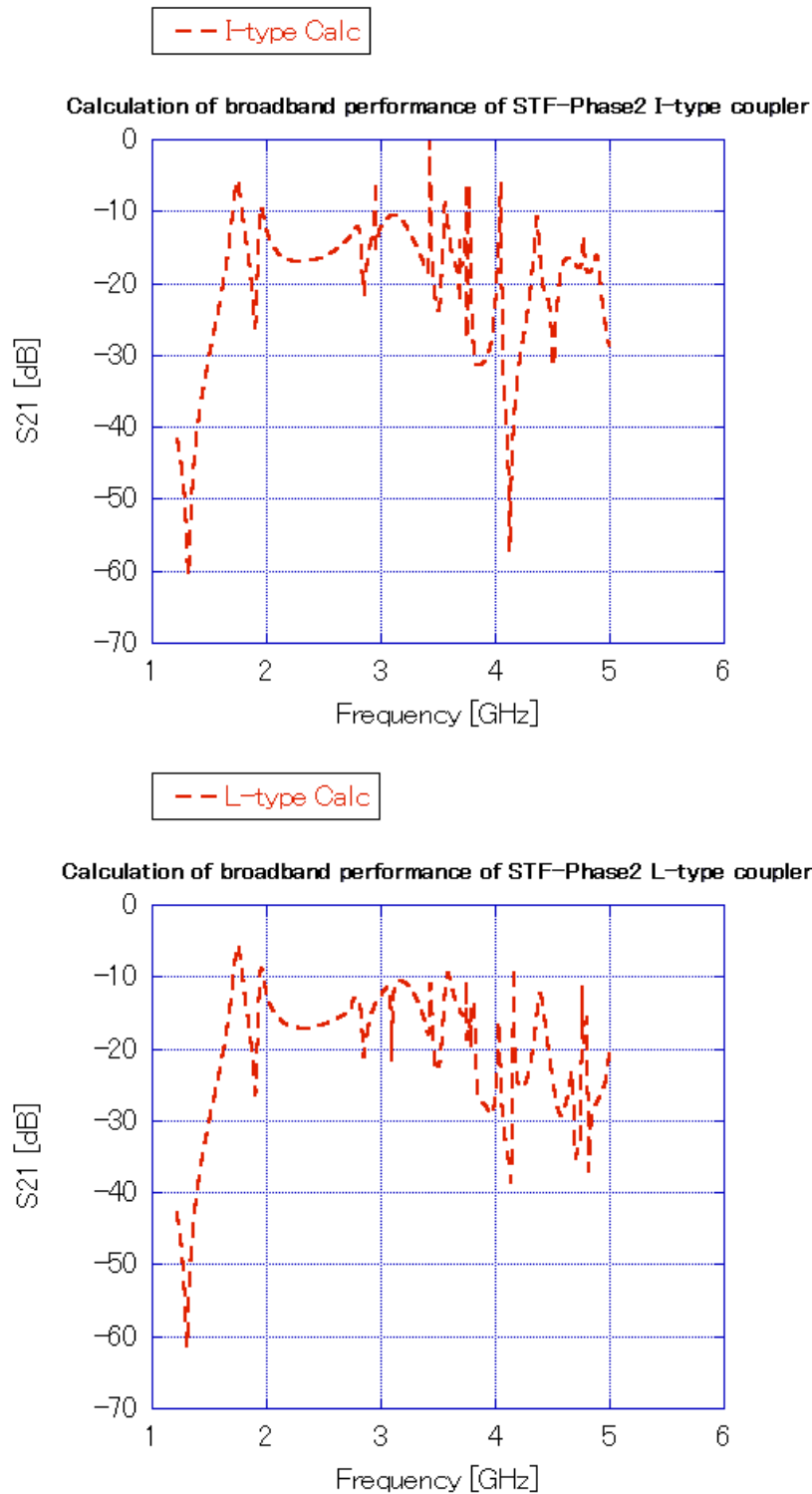


図 4-9 : MHI-12 に取り付けられた HOM カプラーの通過域特性計算値

#### 4.4. STF 空洞の組み立て工程

アライメント検出を行うにあたり、まずは STF 空洞がクライオモジュール内に設置されるまでの工程について以下に列挙する。項目は STF 空洞の表面処理・組み立て工程の内、アライメントと関係する作業に絞った。このアライメントで使用された基準座は合計で6か所である。図 4-10 に示すように、空洞 1 台あたりには2か所ずつ設けられ、残りの2か所はガスリターンパイプをつるす断熱サポートの中心部にある。空洞 1 (MHI-12) の基準座を上流側から K1 と K2 とし、空洞 2 (MHI-13) の基準座は上流側から K3 と K4 とする。また、ガスリターンパイプの断熱サポートの基準座は上流側から P1, P2 とする。

工程①：空洞形状測定およびフィールドフラットネス調整

工程②：電解研磨等の表面処理

工程③：STF 空洞の加速電界試験（縦測定）の実施

工程④：ヘリウム容器の装着

工程⑤：クリーンルーム内にて各空洞の回転を調整して相互に連結する

工程⑥：連結された空洞をガスリターンパイプに吊るす

工程⑦：レーザートラッカーによるアライメント（P1, P2, K1, K2, K3, K4）実施

工程⑧：クライオモジュール内に挿入し、クライオモジュールを加速器室に設置する

工程⑨：基準ターゲットを指標としたクライオモジュールのアライメント（P1, P2）

工程⑩：2 Kへ冷却（W1, W2, W3, W4）

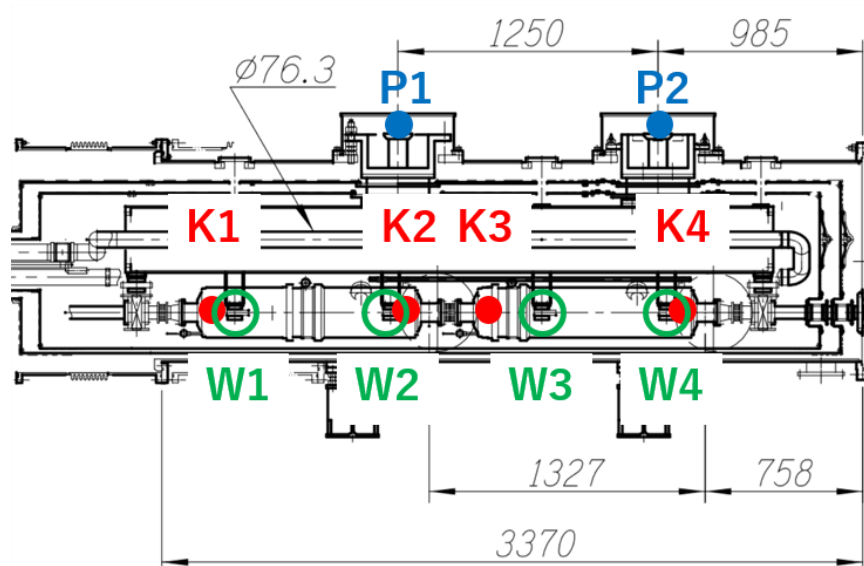


図 4-10：クライオモジュール内のアライメント基準座とワイヤーポジションモニターの配置

（空洞 1 の基準座を上流側から K1 と K2 とし、空洞 2 の基準座は上流側から K3 と K4 とする。また、ガスリターンパイプの断熱サポートの基準座は上流側から P1, P2 とする。W1, W2 は空洞 1 のワイヤーポジションモニターを表し、W3, W4 は空洞 2 のワイヤーポジションモニターを表す。）

縦測定にて加速性能が確かめられた 9 セル超伝導空洞は工程③から工程④に進む。工程④の段階でヘリウム容器内に 9 セル超伝導空洞が隠されてしまい、9 セル超伝導空洞の空洞形状を外側から見ることはできなくなる。ヘリウム容器は溶接で STF 空洞に取り付けられるが、そのときの熱による変形の有無を実測することは難しい。工程⑤からクライオモジュールへの組み立てである。工程⑤で連結された空洞は床に轆かれたレールで移動され、ガスリターンパイプに吊るされる（工程⑥）。工程⑦を実施するために、クライオモジュールに納められたときに基準とするターゲットと STF 超伝導空洞との位置関係が同じになるように、クライオモジュールの外部に基準ターゲットと STF 空洞とが一度設置される。そこでレーザートラッカーを用いて、各 STF 空洞のターゲットの位置が基準ターゲットに対する位置の設計値となるように調整される（工程⑦）。工程⑧を行うために、このセットアップは断熱サポートの底面とガスリターンパイプの断熱サポート用取り付け座の間で一度解体され、クライオスタットに挿入された後、断熱サポートをクライオスタットの上部から挿入し、再度ボルト留めで同じ位置関係を保つように固定される。断熱サポートの底面と取り付け座には位置決めピンが使われていて、50  $\mu\text{m}$  以下の精度で位置が再現される。その後、クライオモジュールは加速器室に移動、設置され、インプットカプラーを横から装着し、上流および下流のクライオモジュール端板が装着されて蓋をされた。次に、工程⑨にて、断熱サポート上面の基準座（P1, P2）を加速器ビームライン設計値になるように、クライオモジュール台座のアライメント調整ネジを調整し、アライメントを終了した。

以上、組み込みが完了したら、2K へ冷却し、運転となる。冷却中のヘリウム容器の位置変位の測定がワイヤーや反射型レーザー計測器を用いた方法で検証されている。ここで得られる変位量は冷却前の位置を基準とした相対的な値であり、工程⑦でのアライメントが工程⑨後にも維持されていることを仮定した上でしかアライメントを評価することができない。

#### 4.5. クライオモジュールのアライメント結果

STF 加速器ではビーム軸方向に  $z$  軸，重力方向に  $y$  軸を取り，上流から下流を見たときに右方向が正となるよう水平方向に  $x$  軸を取った。STF 加速器における超伝導空洞のアライメントの手順は 4.4 節に記述されている。そのアライメントに用いた基準座 K1~K4，P1，P2 およびワイヤーポジションモニター W1~W4 の  $z$  方向の位置関係を図 4-11 示す。

工程⑦で，クライオスタットの外側にて，K1~K4 は P1，P2 の位置に対する設計された位置に調整され，その後再度測定された。そのときの設計位置からのズレを表 4-1 に示す。K1，K3 での設計値からのズレをそれぞれ空洞 1 と空洞 2 のオフセット量とし，空洞の傾きは K1 と K2 の変位置量，K3 と K4 の変位置量から算出した。空洞 1 の  $x$  方向の傾き  $xtilt_{cav1}$  を以下の式より計算した。

$$xtilt_{cav1} = \frac{\Delta x_{K2} - \Delta x_{K1}}{z_{K2} - z_{K1}} = \frac{0.139 - 0.0029}{1038.1} [\text{rad}] = 0.106 [\text{mrad}]$$

ここで， $\Delta x_{K1}$ ， $\Delta x_{K2}$  は K1 と K2 での  $x$  方向の設計値からのズレであり， $z_{K1}$ ， $z_{K2}$  は K1 を原点としたときの K1 と K2 の  $z$  座標である。 $y$  方向の傾きも同様に求めた。

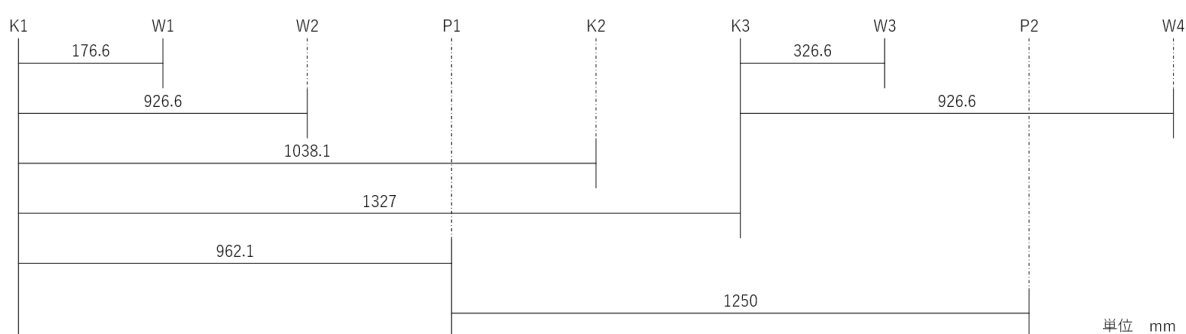


図 4-11：アライメント基準座およびワイヤーポジションモニターの  $z$  方向の位置関係

表 4-1：STF 空洞アライメント時の測定値

	$z$ [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]
K1	0	0.029	0.177
K2	1038.1	0.139	0.068
K3	1327	-0.096	0.032
K4	1327+1038.1	0.005	0.053

表 4-2：STF 空洞のアライメントデータ

	$x$ offset [mm]	$y$ offset [mm]	$x$ tilt [mrad]	$y$ tilt [mrad]
空洞 1	0.029	0.177	0.106	-0.105
空洞 2	-0.096	0.032	0.097	0.020

表 4-1 の状態を確認したのち，K1~K4 はお互いの関係を保った状態で，クライオモジュールに挿入



された。その後、工程⑨において、ガスリターンパイプの支持部の基準座 P1、P2 の位置を設計値に合わせこみ、アライメントを終了した。そのときの設計値と測定値とのズレを表 4-3 に示す。そして、表 4-3 の数値から求めたクライオモジュールのオフセット量と傾きを表 4-4 に示す。傾きは P1 と P2 の変位量から求めた。x 方向の傾きを次式で計算した。

$$x \text{ tilt} = \frac{\text{delta } x_{P2} - \text{delta } x_{P1}}{z_{P2} - z_{P1}} = \frac{-0.03 - (-0.012)}{1250} [\text{rad}] = -0.014 [\text{mrad}]$$

そして、クライオモジュールのオフセットは、図 4-12 に示すように、K1 を基準とし、先に求めた傾きと P1 と K1 の間の距離から求められた。また、x 方向のオフセット量を次式で計算した。

$$\begin{aligned} x \text{ offset} &= \text{delta } x_{K1} = \text{delta } x_{P1} - x \text{ tilt} * (z_{P1} - z_{K1}) \\ &= -0.012 - (-0.014 * 962.1 * 10^{-3}) [\text{mm}] = 0.0019 [\text{mm}] \end{aligned}$$

同様にして、K3 を基準としたオフセット量も計算した。y 方向のオフセット量と傾きも同様にして計算した。K1、K3 のどちらかだけではなく、両方を基準としたオフセット量を求めたのは、冷却後の空洞の位置を推定するために必要になるからである。

表 4-3：クライオモジュールアライメント時の測定値

	z [mm]	delta x [mm]	delta y [mm]
P1	962.1	-0.012	0.03
P2	962.1+1250	-0.03	-0.03

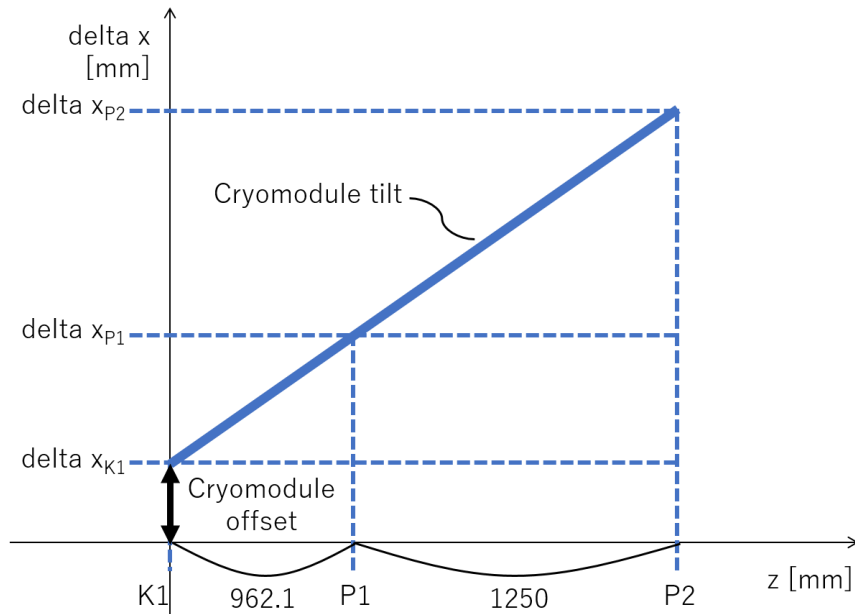


図 4-12：クライオモジュールのアライメント計算時の位置関係

表 4-4：クライオモジュールのアライメントデータ

	x offset [mm]	y offset [mm]	x tilt [mrad]	y tilt [mrad]
K1 基準	0.002	0.076	-0.014	-0.048
K3 基準	-0.017	0.012	-0.014	-0.048

冷却時の空洞の変位を測定するために、クライオモジュール端板間に設けられた金属製パイプ中に  $\phi 70 \mu\text{m}$  の金メッキタングステンワイヤーを張り同軸構造とし、ワイヤーに 140 MHz のパルス状の高周波を入力、空洞に取り付けたワイヤー位置センサーで検出される信号の振幅差からワイヤーの位置を求める。これにより空洞の相対変位を読み取ることができる。そのワイヤーの一端はクライオモジュールの外側の室温側で固定され、もう一端に取り付けられた重りにより、張力をかけ、ワイヤーの直線性を担保している。ワイヤーは室温部分以外には接触しないので、ワイヤーの位置は温度によって変化しない。よって、冷却により位置が変わるヘリウム容器（空洞）に取り付けられたワイヤー位置モニターにより、ワイヤー位置を求めることで、室温におけるワイヤーの位置を基準としたヘリウム容器（空洞）位置の変位量を測定することができる。超伝導空洞のヘリウム容器には一台あたり 2 機のワイヤー位置センサーが取り付けられており、W1, W2, W3, W4 の合計 4 台ある。それぞれのセンサーでの室温と 2K 時の変位量を表 4-5 に示す。

表 4-5：ワイヤー位置センサーにより測定された超伝導空洞の室温と 2K 時での変位量

	z [mm]	x 変位量 [mm]	y 変位量 [mm]
W1	176.6	-0.35	-1.60
W2	926.6	0.25	-1.72
W3	1327+326.6	-0.10	-1.72
W4	1327+926.6	-0.25	-1.66

冷却により、空洞は x 方向に -0.40 mm, y 方向に -1.57 mm だけ変位すると計算されている。そのため、表 4-6 に示す冷却中に生じるズレは、実際の変位量（表 4-5）から変位予測値（ $\delta x = -0.40 \text{ mm}$ ,  $\delta y = -1.57 \text{ mm}$ ）を引いた値になる。そして、クライオモジュールのオフセット量と傾きとを求めたときと同様に、冷却による空洞 1 のオフセット量と傾きとを K1 を基準として求め、空洞 2 のオフセット量と傾きとを K3 を基準として求めた。その結果を表 4-6 に示す。空洞 1 の x 方向の傾き（ $\Delta x \text{ tilt}$ ）とオフセット量（ $\Delta x \text{ offset}$ ）を次式より求めた。

$$\Delta x \text{ tilt} = \frac{x_{W2} - x_{W1}}{z_{W2} - z_{W1}} = \frac{0.25 - (-0.35)}{926.6 - 176.6} [\text{rad}] = 0.83 [\text{mrad}]$$

$\Delta x \text{ offset} = x_{W1} - \Delta x \text{ tilt} * (z_{W1} - z_{K1}) - \delta x = -0.35 - 0.83 * 176.6 * 10^{-3} + 0.4 [\text{mm}] = -0.09 [\text{mm}]$   
y 方向の傾きとオフセット量も同様に計算した。

表 4-6 : 冷却中の測定データから算出した空洞の変位量

	$\Delta x$ offset [mm]	$\Delta y$ offset [mm]	$\Delta x$ tilt [mrad]	$\Delta y$ tilt [mrad]
空洞 1	-0.09	-0.00	0.80	-0.16
空洞 2	0.38	-0.18	-0.25	0.10

冷却時の空洞の位置は, 空洞設置時の空洞の位置 (表 4-2) にクライオモジュール設置時のずれ (表 4-4) と冷却中の空洞の変位量 (表 4-6) とを足すことで求められる。その値を表 4-7 に示す。

表 4-7 : 空洞およびクライオモジュール設置時と冷却中の測定データから見積もられる空洞位置

	x offset [mm]	y offset [mm]	x tilt [mrad]	y tilt [mrad]
空洞 1	-0.06	0.25	0.89	-0.31
空洞 2	0.27	-0.14	-0.17	0.07

これらの測定より求めた空洞 1 と空洞 2 のオフセットと傾きをビーム軌道計算の初期値として使用する。それらは, 空洞 1 のオフセットの x 方向は-0.06 mm, y 方向は 0.25 mm, 傾きの x 方向は 0.89 mrad, y 方向は-0.31 mrad であり, 空洞 2 のオフセットの x 方向は 0.27 mm, y 方向は-0.14 mm, 傾きの x 方向は-0.17 mrad, y 方向は 0.07 mrad であった。これらの数値は STF 加速器の設置基準を満たすものである。

## 第5章. STF 空洞の局在ダイポールモードの選択

### 5.1. 局在する高調波モードの選択

局在する高調波モードを選択するにあたり、次の3点を条件とした。まず1点目は、空洞セル高調波モードと分離していることである。本研究で実際に高調波モードを検出した空洞は9セル空洞であり、空洞のセル内に共振するモードが複数存在する。それらのモードと分離している必要があった。そして、2点目に、モードを同定できることを条件とした。本研究においては、CST MW Studioでの電磁場計算を主な判断基準とし、その計算で得られた周波数分布と一致しているとみなせるモードの振る舞いがビーム実験時にダイポールモードの応答を示していることより、同定を行った。本研究では現実の空洞周辺のセットアップを実験室で再現できなかったため、シミュレーション計算のみで同定することにした。そして、3点目に、そのモードの振幅検出を容易にできることとした。本研究では、これらの条件を満たすものとして2282.2 MHz, 2309.5 MHzを選択した。この2つのモードは偏極方向の異なるモードであり、その詳細については後述する。なお、これより高い周波数では他の空洞セル高調波モードとの分離が難しくなる。

### 5.2. 電磁場シミュレーションの設定

STF 加速器において、クライオモジュールの上流側の空洞1 (MHI-12) の上流側のビームパイプ周辺に局在するダイポールモードについて計算するために、空洞1の上流端にテーパー構造とベローズとゲート弁の構造を再現した図 5-1 に示すモデルを作成した。さらに、このモデルは2つの HOM アンテナを内蔵した HOM カプラーを含んでいる。インプットカプラーは内導体の直径が $\phi 30$  mm で、外導体の直径が $\phi 60$  mm の同軸管でモデル化してある。内導体のビームパイプ内部への突き出し量は5 mm であり、全長は251 mm とした。インプットカプラー終端での境界条件は横方向電場  $E_t = 0$  を設定した。空洞内は真空を指定、バックグラウンドは $3.34 \times 10^{19}$  S/m の金属を指定した。これは2 K でのニオブの電気伝導率に相当する。HOM カプラーとピックアップアンテナはバックグラウンドと同じ設定をした。入力カプラーは同軸構造でモデル化し、内導体は銅の電気伝導率である $5.8 \times 10^7$  S/m の金属を設定した。モデル全体の両端面の境界条件は横方向磁場  $H_t$  がゼロであるとした。電磁場シミュレーション計算を実施したコンピュータの性能は Core i7-3.2 GHz, メモリー2.98 GB である。ピックアップアンテナと入力カプラーをポートに指定し、frequency domain solver にて計算した。その Accuracy には0.001 を指定し、215253 個の tetrahedra メッシュによりで行った。計算した周波数範囲は2265 MHz から2465 MHz である。このときのピックアップアンテナから上流側の HOM カプラーへの透過特性を図 5-2 に示す。偏極方向が異なるために周波数がわずかにずれた2282.2 MHz と2309.5 MHz の周波数を持つ局在ダイポールモードが電磁場計算コード CST MICROWAVE STUDIO (CST MW Studio) を用いた計算より見つかった。これらのモードがアライメント検出に利用できることを確かめるために、局在ダイポールモードの縦方向および横方向の電場分布を計算した。確認した内容は局在モードの局在、ダイポールモードであること、電氣的中心の位置と局在ダイポールモードの長手方向中心位置である。

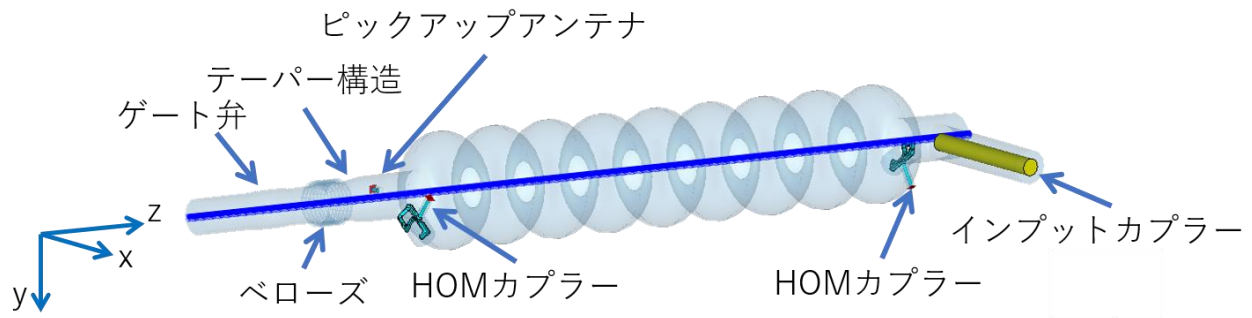


図 5-1 : 計算モデル 1

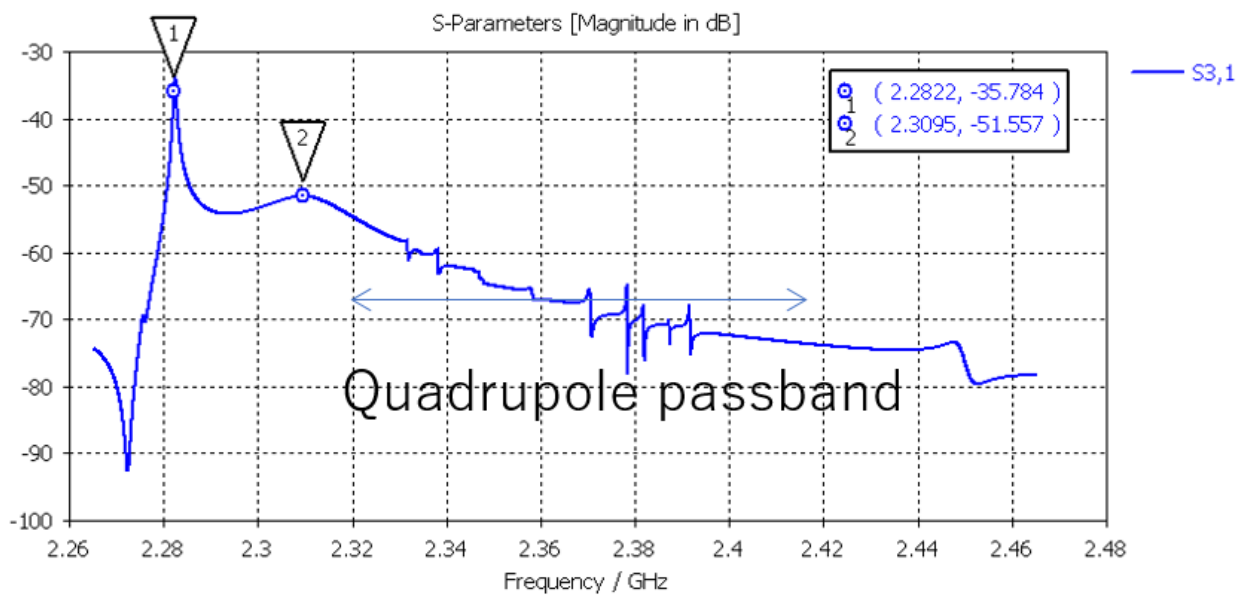


図 5-2 : 計算されたピックアップアンテナから上流側の HOM カプラーへの透過特性

### 5.3. 局在の確認

局在モードの局在を確認するために、まず横方向の電場分布を確認した。図 5-3、図 5-4 に計算した電場を示す。空洞の上流部に局在していることが分かる。図 5-5 は中心から  $x$  軸方向に 5 mm のオフセットを持つ  $z$  軸に平行な線上の電場の強度分布を示す。空洞の上流フランジ端を  $z$  軸の原点とした。電子ビームにより誘起されるダイポールモードの強度はビームの進行方向である電場の縦成分  $E_z$  に依存するが、その分布も図 5-6 に示す通り、空洞の上流部に局在していることが確認できた。その時の振幅最大位置は後述するように、 $z = 161$  mm および  $z = 163$  mm であった。なお、 $z = 0$  mm の位置は空洞 1 の上流フランジ面位置である。

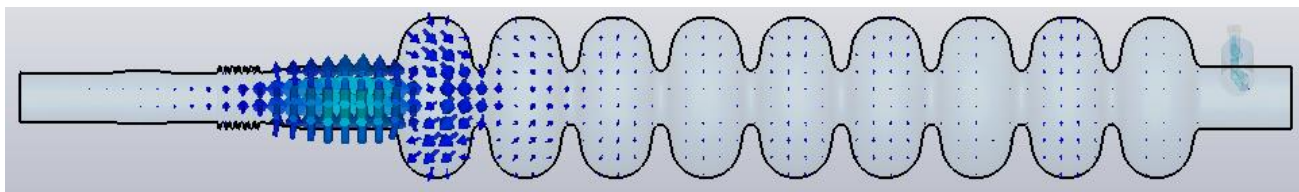


図 5-3 : 2282.2 MHz の電場分布

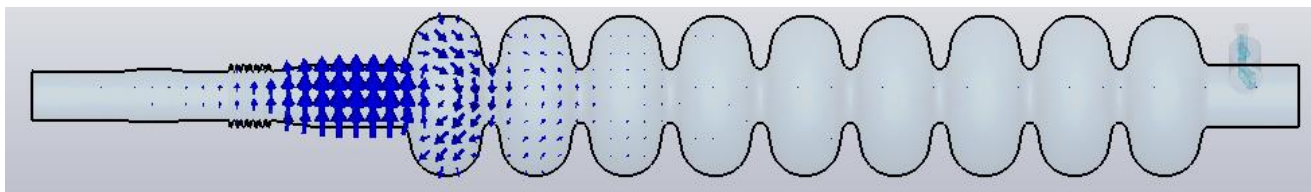


図 5-4 : 2309.5 MHz の電場分布

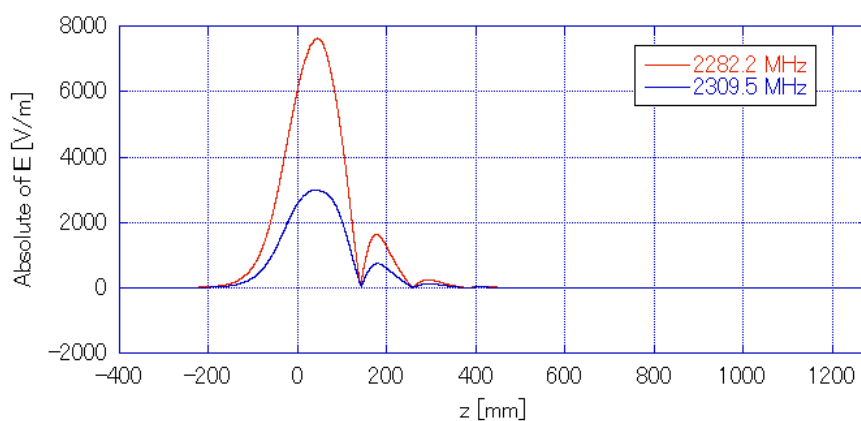


図 5-5 :  $x = 5 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$  でのビーム軸方向の電場強度分布

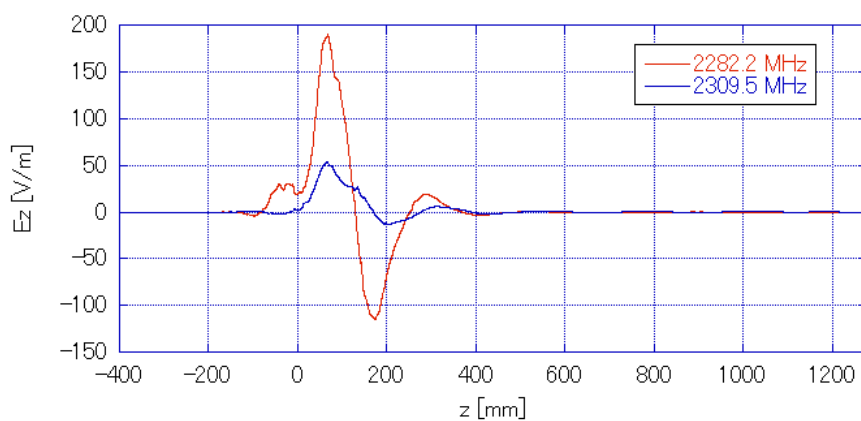


図 5-6 :  $x = 5 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$  での  $E_z$  分布

## 5.4. ダイポールの確認

$z = 161 \text{ mm}$  での縦方向の電場分布を図 5-7 に示す。 $z = 161 \text{ mm}$  での電場の縦成分を角度に沿ってプロットすると図 5-8 に示す通りコサイン関数を示すことより、これらのモードは偏極方向の異なるダイポールモード (TM モード) の成分を持つことが言える。これらのモードは、電場あるいは磁場が完全にきれいな TM モードを持つのではないが、 $z$  方向に電場を積分したときに、実質的にダイポールの働きをすることを後述の 5.5 節～5.7 節で確かめている。4 極のような分布を持つ部分や 0 極のような分布をもつ部分も存在するが、 $z$  方向に電場を積分したときの振る舞いが 2 極となるものをダイポールとして取り扱っている。この取り扱い、計算上でも現実のビーム実験でも同じと考えて実施した。

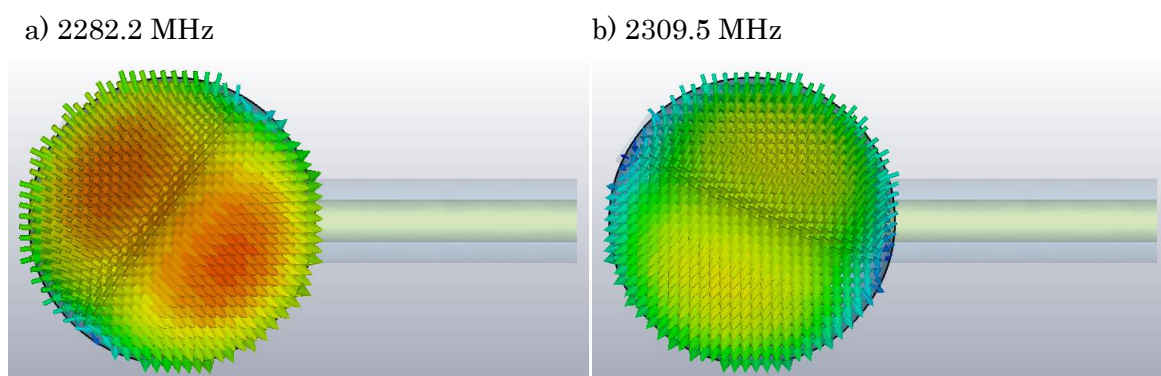


図 5-7 :  $xy$  平面上 ( $z = 161 \text{ mm}$ ) での電場の様子

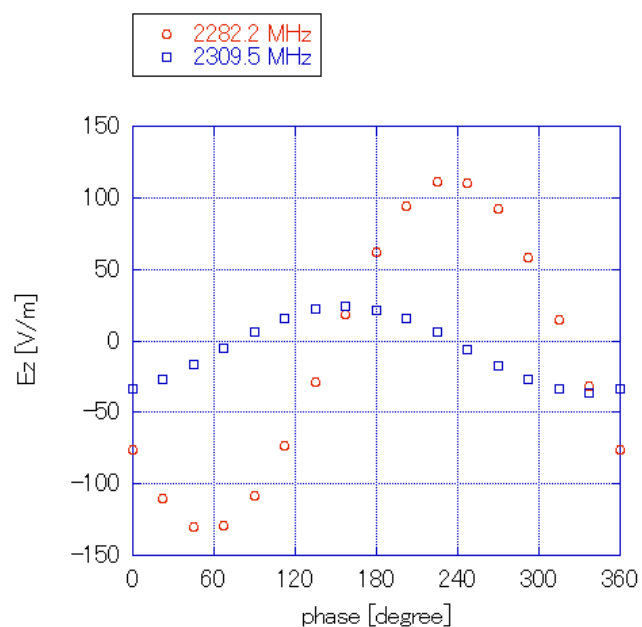


図 5-8 :  $r = 5 \text{ mm}$  での  $E_z$  成分の角分布

モードの長手方向のどの部分でダイポールとなっているかを調べるために、 $f_{\theta,z}(r) = E_z(r, \theta, z)^2$ を導入した。ただし、 $r = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$ であり、 $\theta = (22.5 \cdot n)^\circ, n = 0, 1, \dots, 7$ とした。ダイポールであればこの関数 $f_{\theta,z}(r)$ は中心からの距離 $r$ に対して二次関数でフィッティングでき、同じオフセット量を持つとき

には  $r^2$  の係数（放物線の勾配具合）が大きいほど、ダイポールモードの振幅も大きくなる。すなわち、局在モードのオフセット量に対する感度として評価することもできる。モードの偏極方向により、 $r^2$  の係数が大きくなる  $\theta$  が決まる。 $f_{\theta,z}(r)$  を計算した  $\theta$  のうち、 $r^2$  の係数が最大となる  $\theta$  において、 $z$  位置毎の  $r^2$  の係数を図 5-9 に示す。2282.2 MHz での局在モードの  $r^2$  の係数は、 $z = 161\text{mm}$  で最大であり、もう一方の偏極モードでは  $z = 163\text{mm}$  で最大となる。

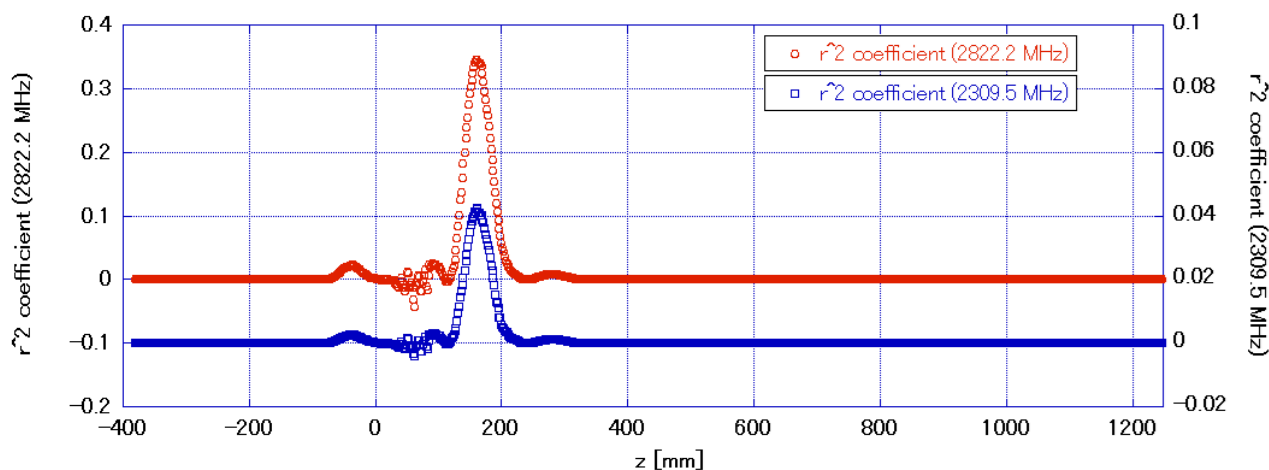


図 5-9 :  $z$  軸上での  $r^2$  の係数分布



### 5.5. CST 計算によるトランジットタイムを考慮した電氣的中心の計算方法

計算された局在モードは局在してはいるが、長手方向に分布を持っており、モード全体としての振る舞いがダイポールモードとして機能し、アライメント検出に利用できることを確認しなければならない。さらに、アライメントを推定するためには電氣的中心から機械的中心へと変換する必要があるため、局在モードの電氣的中心の位置をシミュレーションより見積ることとした。

モード全体としてダイポールモードとして振る舞うことを確認するために、ダイポールモードの振幅に相当する値として、トランジットタイムを考慮した電場分布を  $z$  軸に平行な軸に沿って積分したものの大きさ  $M_\theta(r) = |\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|$  を求めた。ここで、 $\omega$  はそのモードの角振動数である。その積分する軸のオフセット量  $r$  を変え、そのオフセット量  $r$  に対する  $M_\theta(r)$  の応答を調べることで、モードがダイポールモードとして機能するかを調べることができる。ダイポールモードであれば、オフセット量に対して  $M_\theta(r)$  をプロットしたときに V 字形状を示す  $\theta$  方向が存在し、最も振幅差の大きい V 字形状を示す  $\theta$  方向と  $90^\circ$  をなす角度では  $M_\theta(r)$  のオフセット量  $r$  に対する応答はほぼなくなる。電氣的中心と機械的中心とが一致していれば、オフセット量  $r$  に対して  $M_\theta(r)$  の応答がなくなる  $\theta$  方向が偏極軸となる。

本研究では、解析の都合上、 $M_\theta(r)$  の代わりに  $f_\theta(r) = M_\theta(r)^2$  を用いて評価を行った。 $f_\theta(r)$  を使うことで、オフセット量  $r$  に対するダイポールモードの  $f_\theta(r)$  のプロットが二次関数でフィットできるようになり、偏極軸を求めることが容易になる。偏極軸は結合が最も弱くなる点の集まりなので、 $\theta$  が一定の直線毎に放物線  $f_\theta(r)$  の頂点を求め、それらの点を直線近似することで推定できる。

そこで、CST 計算のモデルに電場を積分する軸を図 5-10 の通りに 81 本用意し、それらの軸のオフセット  $r = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$  とし、 $\theta$  方向に  $22.5^\circ$  間隔で配置した。さらに、それら 81 本の軸を  $x$  方向に 1 mm、 $y$  方向に 2 mm だけ動かしたものを 81 本用意し、合計で 162 本とした。積分範囲は計算モデルを覆う -400 mm から 1248 mm までとした。

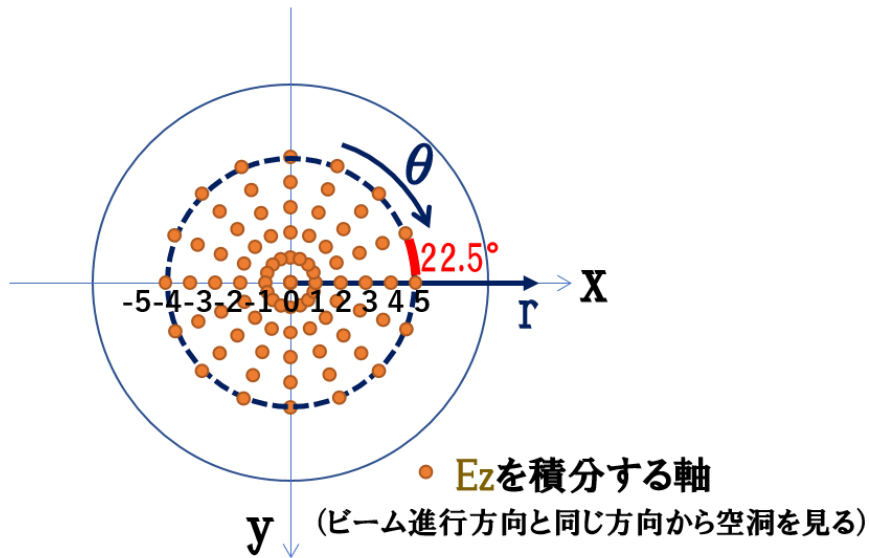


図 5-10 : 積分する軸の配置

## 5.6. 電気的中心位置のメッシュ数依存性の検討

5.5 節の方法で電気的中心位置を求めるにあたり、電磁場計算の精度を確認するために、電気的中心位置のメッシュ依存性について調べた。約 20 万、40 万、50 万、60 万、70 万メッシュで計算した電場分布から電気的中心位置を推定した。80 万メッシュ以上での計算は計算機の性能のため困難であった。また、上記のメッシュ数 5 通りでの電気的中心の x 座標と y 座標の位置の変化を図 5-11 に示す。それぞれのメッシュ数での電気的中心位置を図 5-12 に示す。このとき、誤差には  $f_{\theta}(r) = M_{\theta}(r)^2$  を二次関数でフィットしたときの誤差のみ考慮している。計算したメッシュ数範囲では、電気的中心の座標はメッシュ数に依らず、おおよそ安定していることが分かった。そこで、メッシュ数が 622875 のときのデータを基に解析を進め、 $f_{\theta}(r)$  の系統誤差にはメッシュ数 708675 と 514661 のときのデータとの偏差を使用することにした。

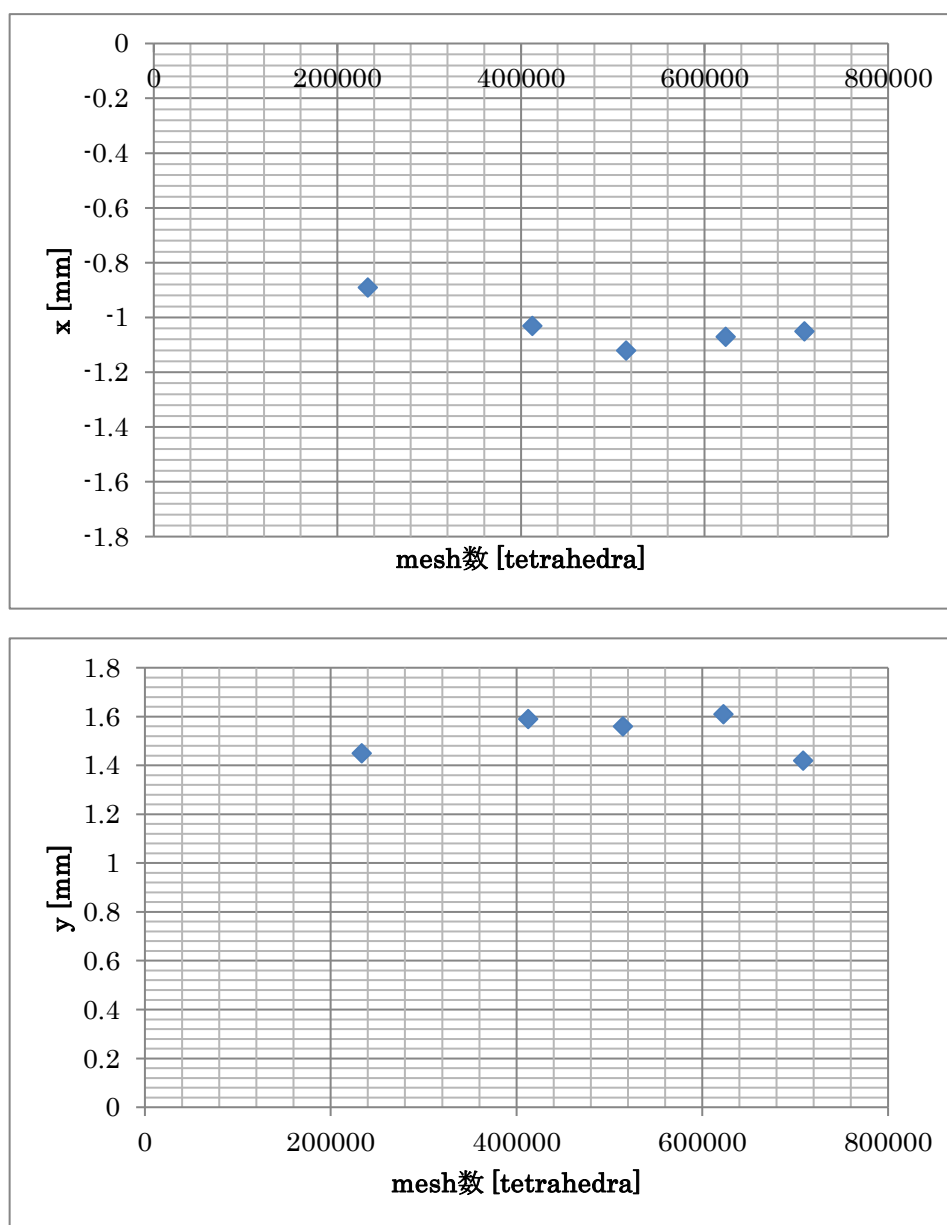
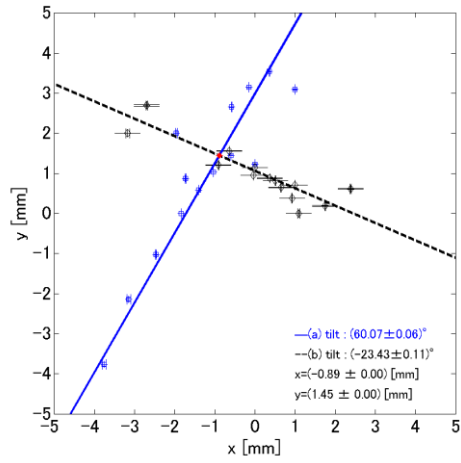
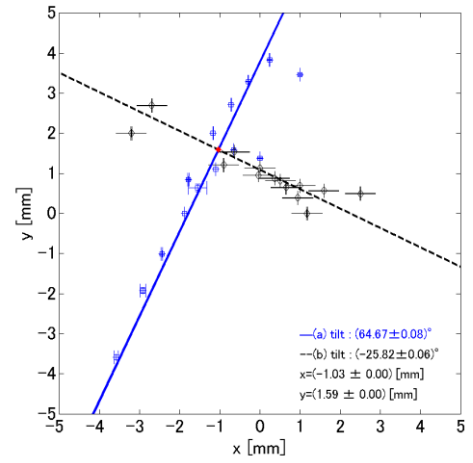


図 5-11 : 電気的中心位置のメッシュ数依存性

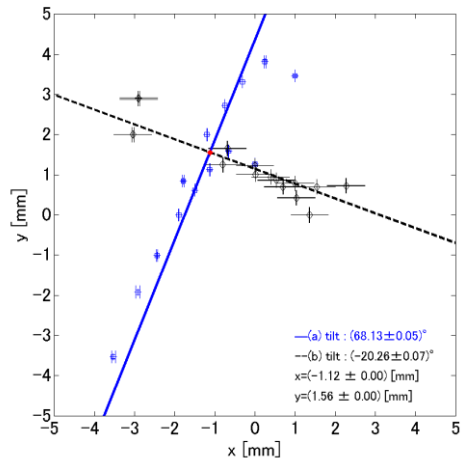
2332681 メッシュ



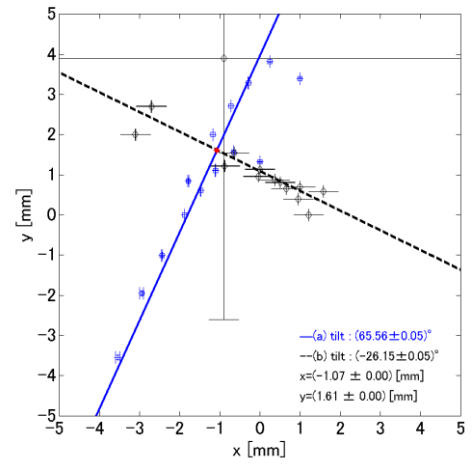
412526 メッシュ



514661 メッシュ



622875 メッシュ



708675 メッシュ

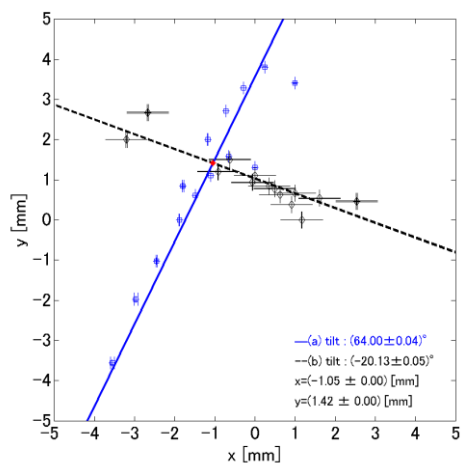


図 5-12 : 異なるメッシュ数で計算した電氣的中心

## 5.7. 電氣的中心の計算および製作誤差評価

$r$ に対する $f_{\theta}(r)$ のプロットを図 5-15～図 5-18 に示す。図 5-15・図 5-16 は 2822.2 MHz のもの、図 5-17・図 5-18 は 2309.5 MHz のものである。そして、図 5-15・図 5-17 は図 5-10 に示した軸配置で導出したもの、図 5-16・図 5-18 は図 5-10 に示した軸配置を x 方向に 1 mm, y 方向に 2 mm だけ動かした軸配置で導出したものである。図 5-13 は図 5-10 に示した軸配置を x 方向に 1 mm, y 方向に 2 mm だけ動かしたときの、 $\theta = 0^{\circ}$ での $r$ に対する $f_{\theta}(r)$ をプロットした図（図 5-17 の 2309.5 MHz・ $22.5^{\circ}$  の拡大したもの）である。メッシュ数が 622875 のときの $f_{\theta}(r)_{m0}$ を赤丸で示し、エラーバーはメッシュ数 708675 と 514661 のときの $f_{\theta}(r)_{m1}, f_{\theta}(r)_{m2}$ との偏差 $\sigma = \sqrt{\frac{(f_{\theta}(r)_{m1}-f_{\theta}(r)_{m0})^2+(f_{\theta}(r)_{m2}-f_{\theta}(r)_{m0})^2}{2}}$ を示す。 $y = f_{\theta}(r)_{m0}$ を二次関数でフィットし、そのフィットの際の系統誤差に $\sigma$ を用いた。そこで、得られたフィット関数から算出した値を青丸で示す。

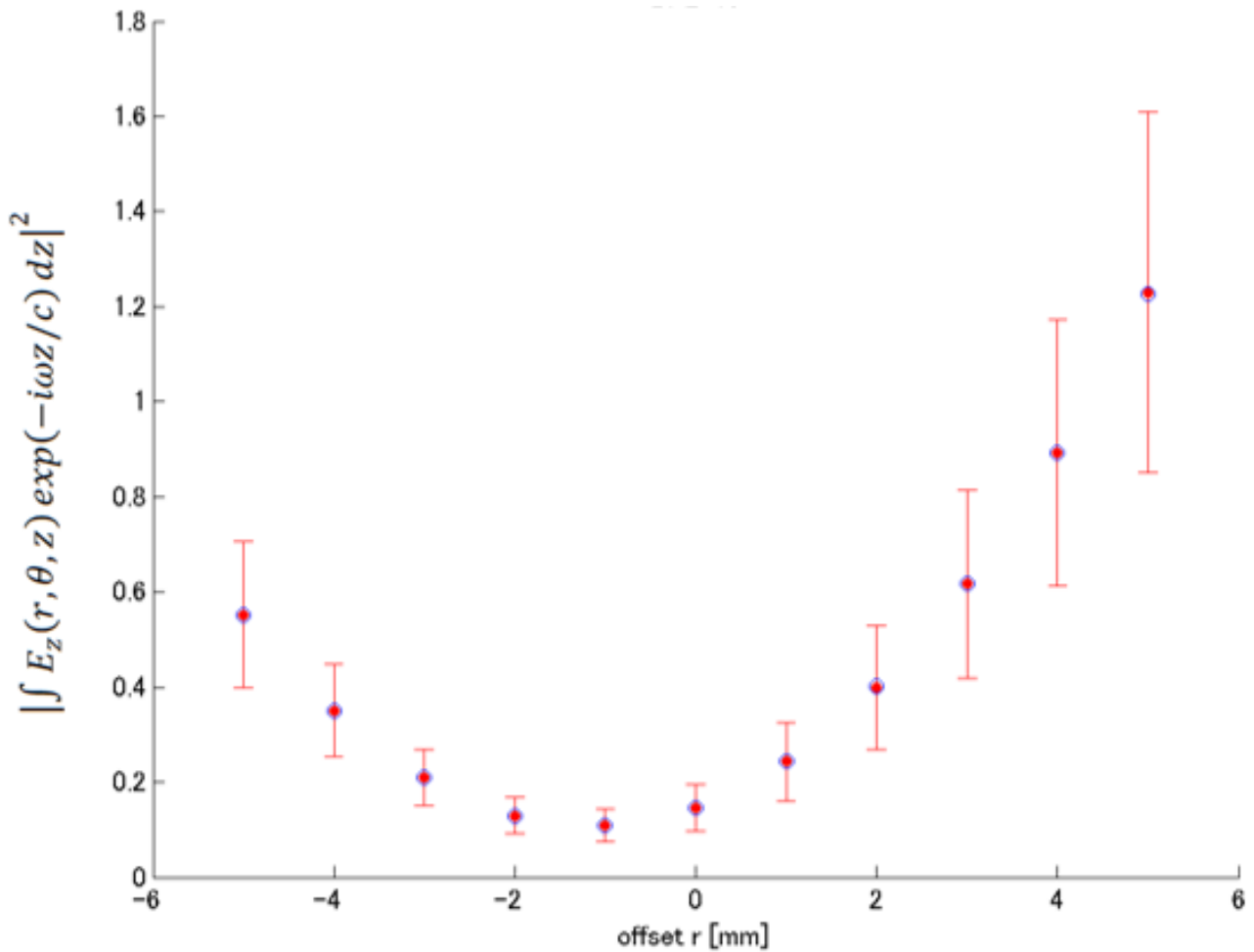


図 5-13 : オフセット量に対する $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$ の変化

(赤丸は CST MW Studio で計算した値, 青丸はフィット関数から算出した値である。)

その得られたフィット関数を  $y = ar^2 + br + c$  とすると、その頂点の座標は  $r = -\frac{b}{2a}$  となり、その頂点

の誤差は  $\delta r = -\frac{b}{2a}$  の誤差伝搬から算出した。すべての  $\theta$  について、二次関数でフィットし求めた頂点の座標を  $xy$  座標系に変換し、図 5-14 に偏極モード毎に色分けし、プロットした。青で示した点は 2282.2 MHz のものであり、黒で示した点は 2309.5 MHz のものである。ただし、以下の 2 点に当てはまるデータは除外した。図 5-15～図 5-18 の図中の\*は除外されたデータを示す。

- ・頂点が  $\pm 5$  mm よりも外にある
- ・データとフィットで求めた値との相関係数が 0 未満である

頂点が  $\pm 5$  mm よりも外にあるにある場合には、フィットしたデータには放物線の片側しか含まれていないことになり、フィットの信頼性が低くなる。また、相関係数が 0 未満であるときには、フィットできていないことになるので、これら 2 点に該当するデータは除外することにした。

それぞれの頂点はモードの偏極軸に相当し、交点が電気的中心となる。各偏極モードの頂点の座標をそれぞれ一次関数でフィットし、求めた 2 直線の交点を求めると、 $x$  位置は  $-1.09 \pm 0.26$  mm、 $y$  位置は  $1.48 \pm 0.21$  mm であった。2 直線の交点の座標は機械的中心を原点としたときの電気的中心の位置であり、機械的中心と電気的中心との差に等しい。

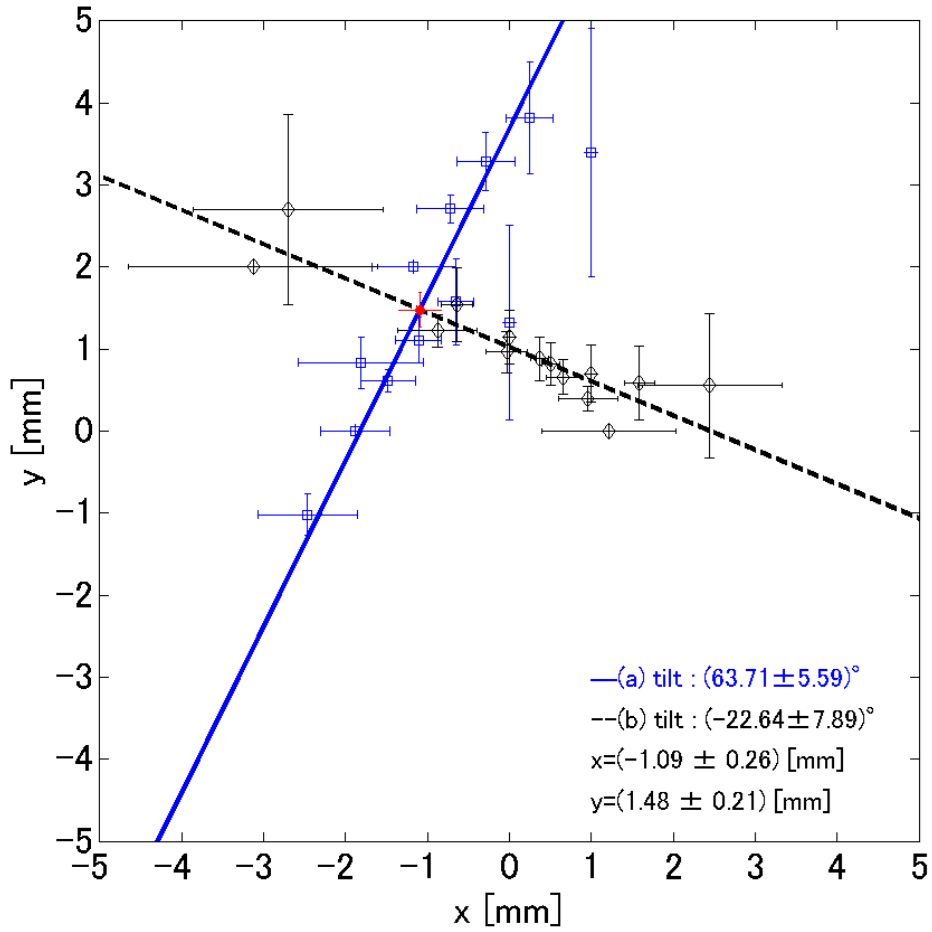


図 5-14 : 電氣的中心と二次関数フィットより求めた頂点

(青は 2282.2 MHz のもの、黒は 2309.5 MHz のもの、赤点は電氣的中心を示す。)

ビームにより誘起される高調波モードの強度を、ビームが  $z$  軸に沿った各点で励振する電場成分にトランジットタイムファクターを考慮して積分したものの大きさ  $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|$  として求め、そのビーム通過位置と高調波モードの強度の関係を調べたところ、局在モードも空洞ダイポールモードと同様に電氣的中心のセンサーとして機能することが確認できた。以下、局在モードを局在ダイポールモードと呼ぶこととする。

ここまでの計算で求めた電氣的中心の誤差は、メッシュ数に起因する計算精度から算出した値である。製作誤差から生じる誤差を見積もるために、HOM アンテナの取り付け位置誤差によるビームパイプ部への突き出し量の影響が大きいので、HOM の突き出し量が 0.5 mm (HOM アンテナ長さの精度+取り付け精度) 変化したときの電氣的中心の偏差量を見積もると  $x$  方向 -0.23 mm,  $y$  方向 +0.07 mm であった。これらを合わせた機械的中心に対する電氣的中心の偏差は以下の通りとなる。

$$\Delta x_{me} = -1.09 \pm 0.26 \pm 0.23 \text{ mm}$$

$$\Delta y_{me} = 1.48 \pm 0.21 \pm 0.07 \text{ mm}$$

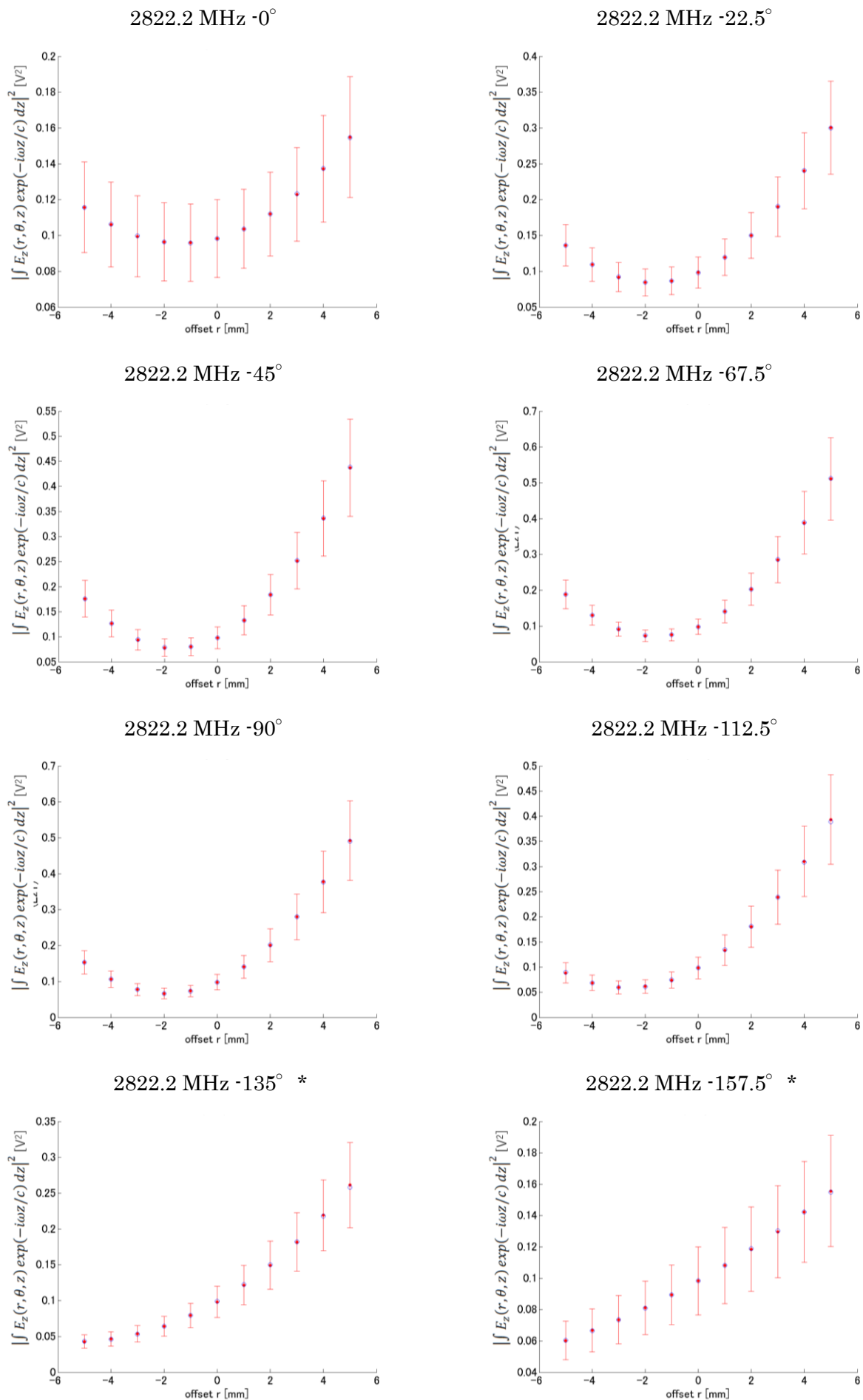


図 5-15 : 2822.2 MHz のオフセット量に対する  $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$  の変化 1

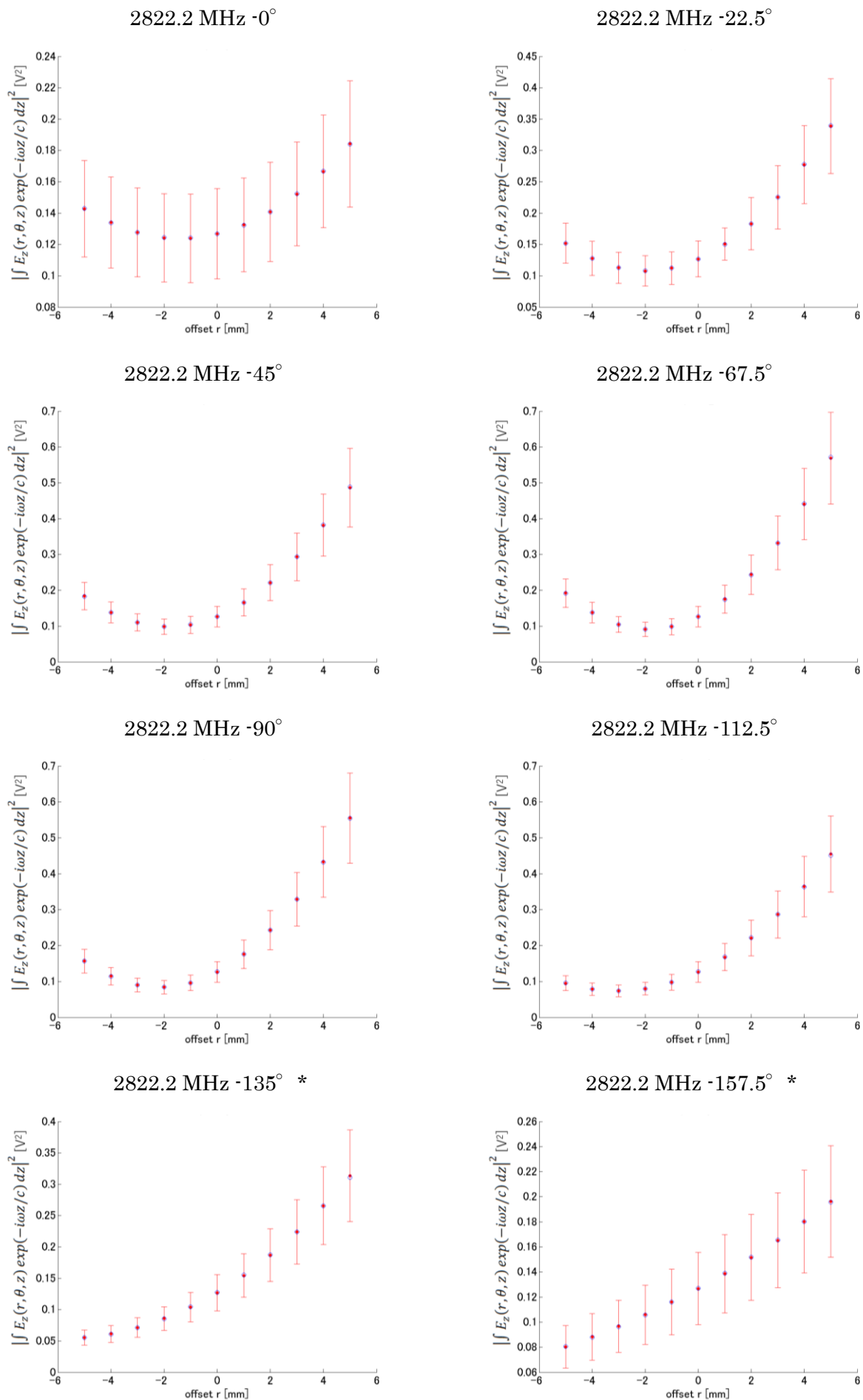


図 5-16 : 2822.2 MHz のオフセット量に対する  $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$  の変化 2



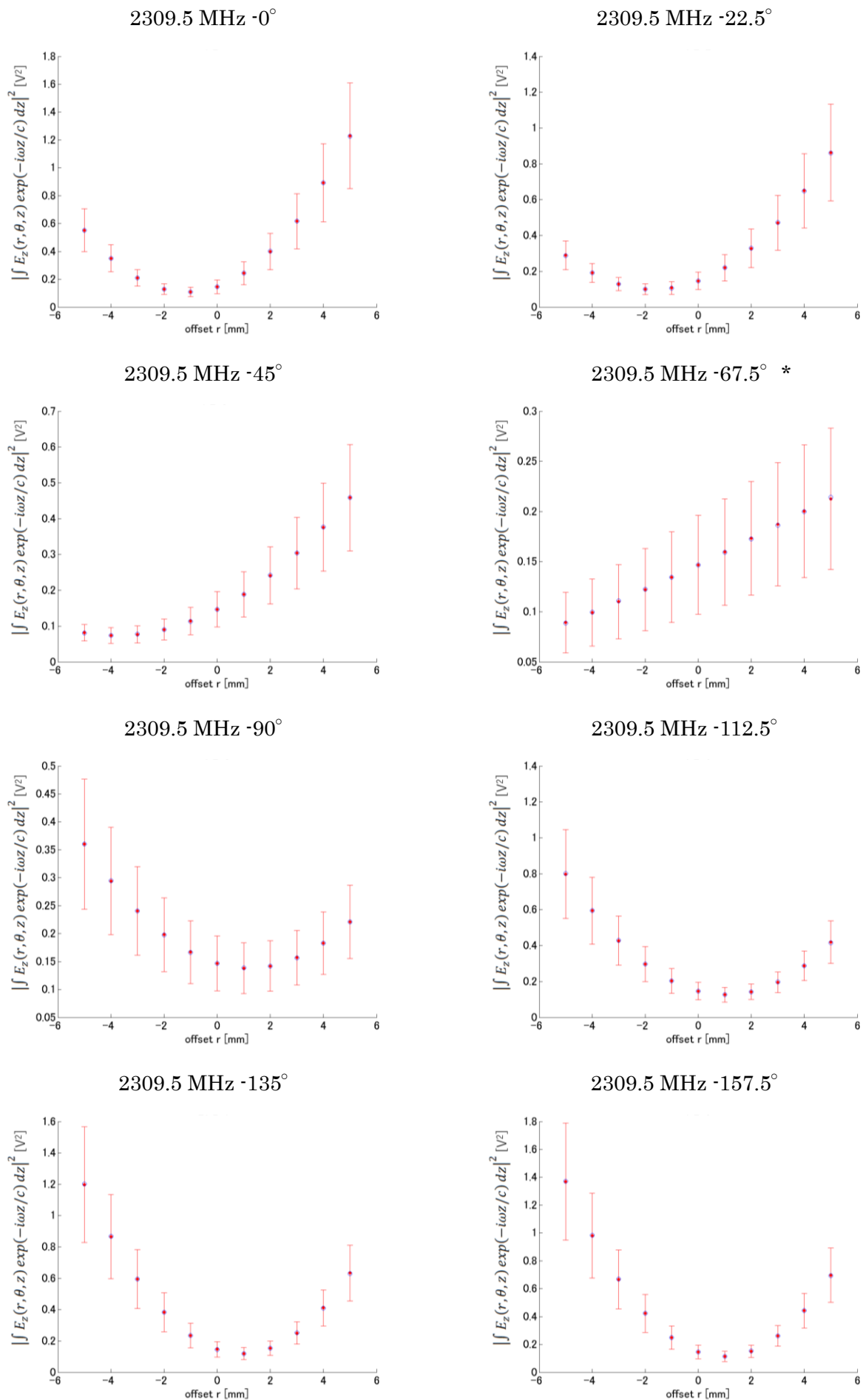


図 5-17 : 2309.5 MHz ののオフセット量に対する  $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$  の変化 1

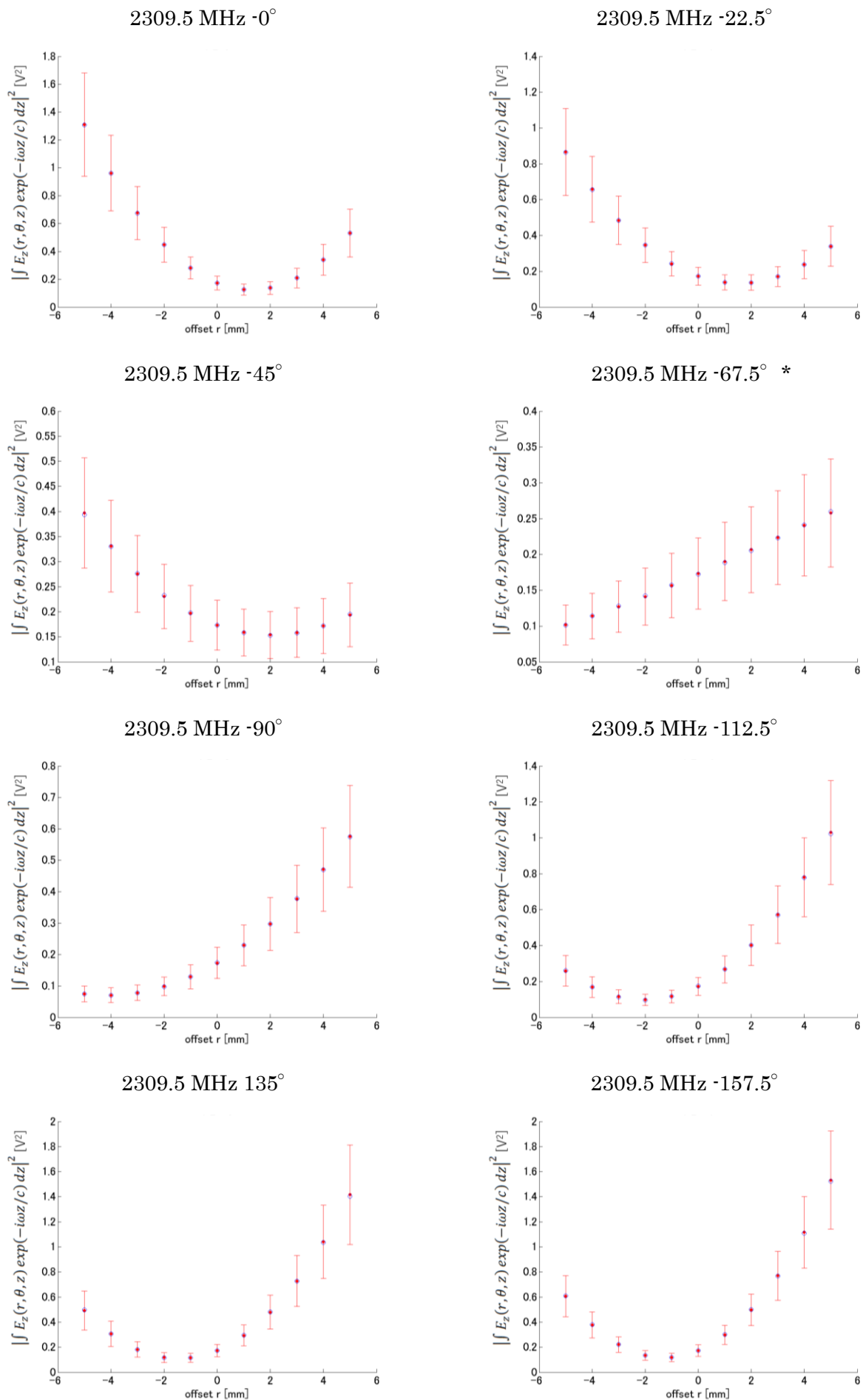


図 5-18 : 2309.5 MHz のオフセット量に対する  $|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$  の変化 2

## 5.8. 局在モードの長手方向の範囲

局在モードの電氣的中心を計算するときの長手方向の範囲を決めるに当たり、ビーム実験時の SN 比を基準として用いた。これは、実際のビーム実験と同じ状況を再現するべく、ビーム実験時にはノイズに埋もれてしまい検出できない信号の範囲を、電氣的中心の計算時にもそれを求める長手方向の範囲として再現しようとしたためである。測定した振幅最大時の FFT スペクトラムを図 5-19 に示す。このときのピークの振幅は $2.5 \times 10^{-4}$ 、ノイズレベルは $2.2 \times 10^{-5}$ であり、その SN 比は 8.8 %であった。ピークに対して 8.8 %未満ではノイズに隠れてしまうので、8.8 %以上の振幅を持つ範囲を、電氣的中心を計算するときの長手方向範囲と決めた。図 5-20 に示した $|E_z|$ がピークの値の 8.8 %を上回る最大範囲は $z = -64.0 \sim 349.4$  mm であり、これを電氣的中心を算出する長手方向範囲とした。

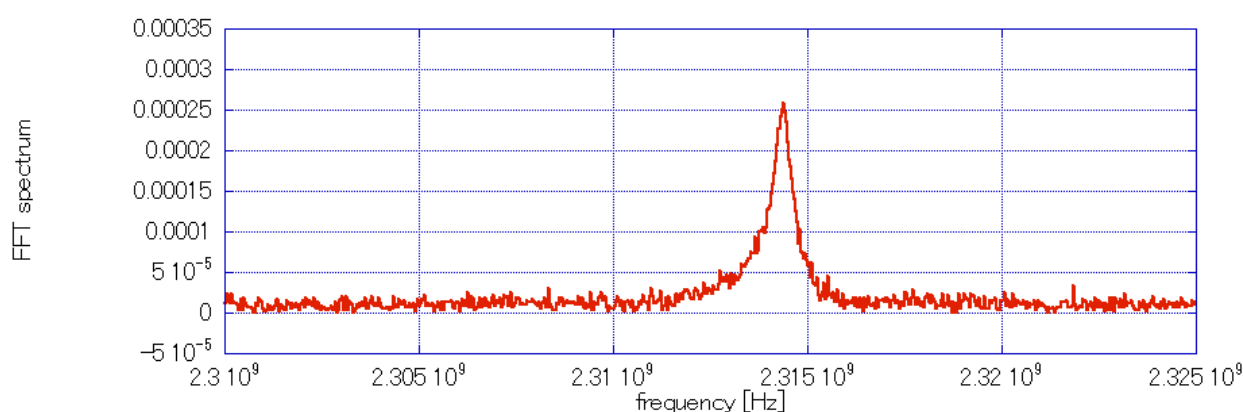


図 5-19 : 振幅最大時の FFT スペクトラム

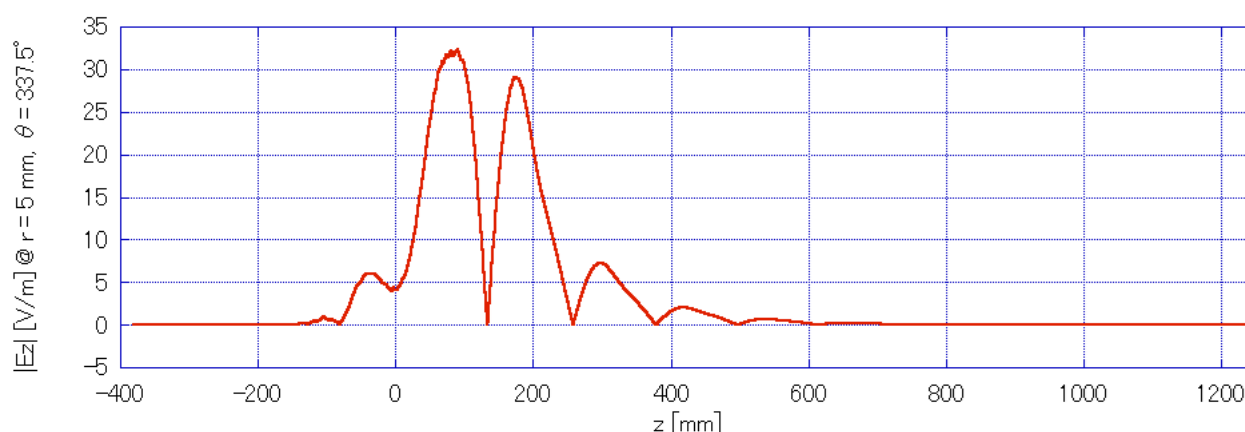


図 5-20 :  $r = 5$  mm,  $\theta = 337.5^\circ$ での $|E_z|$ 分布

## 5.9. 局在ダイポールモードの電気的特性

電気的特性を見るために、局在ダイポールモード 2282.2 MHz, 2309.5 MHz の R/Q を計算した。2.5 節より、ダイポールモードの R/Q は次式で書ける。

$$\frac{R}{Q} = \frac{1}{r^2} \frac{2k_{\parallel}(r)}{\omega} = \frac{1}{r^2} \frac{|V_{\parallel}(r)|^2}{2\omega U} = \frac{1}{r^2} \frac{|\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2}{2\omega U}$$

ここで、5.5 節で計算した  $f_{\theta}(r)$  を用いると、

$$\frac{R}{Q} = \frac{1}{r^2} \frac{f_{\theta}(r)}{2\omega U}$$

となる。ただし、 $f_{\theta}(r)$  には、 $f_{\theta}(r)$  が最大となる  $\theta$  方向での値が入る。 $f_{\theta}(r)$  の計算に用いる電場を計算したときの、2282.2 MHz, 2309.5 MHz の局在ダイポールモードの  $\omega U$  は、CST で計算でき、それぞれ 7.10 W, 214 W であった。5.5 節で計算した  $f_{\theta}(r)$  の内、最も中心から離れており計算誤差が少なくなる、半径 5 mm でのものを使用することにした。半径 5 mm での  $f_{\theta}$  の最大値を求めるために、 $\theta$  に対する  $f_{\theta}$  を図 5-21 にプロットした。そして、 $f_{\theta}(r) = |\int E_z(r, \theta, z) \exp(-i\omega z) dz|^2$  なので、 $y = |M1 * \cos(x - M2)|^2$  でフィットし、パラメータ  $M1$ ,  $M2$  を推定した。ここで、 $M1$  が  $f_{\theta}(r)$  の最大値である。その値を上式に代入し、R/Q を求めた。求められた 2282.2 MHz, 2309.5 MHz の R/Q はそれぞれ 0.097  $\Omega/\text{cm}^2$ , 0.008  $\Omega/\text{cm}^2$  であった。よって、50 pC の電荷が 1 mm のオフセットで空洞を通過したときに、空洞内に誘起される 2282.2 MHz, 2309.5 MHz の局在ダイポールモードの電圧はそれぞれ 0.70 mV, 0.06 mV である。

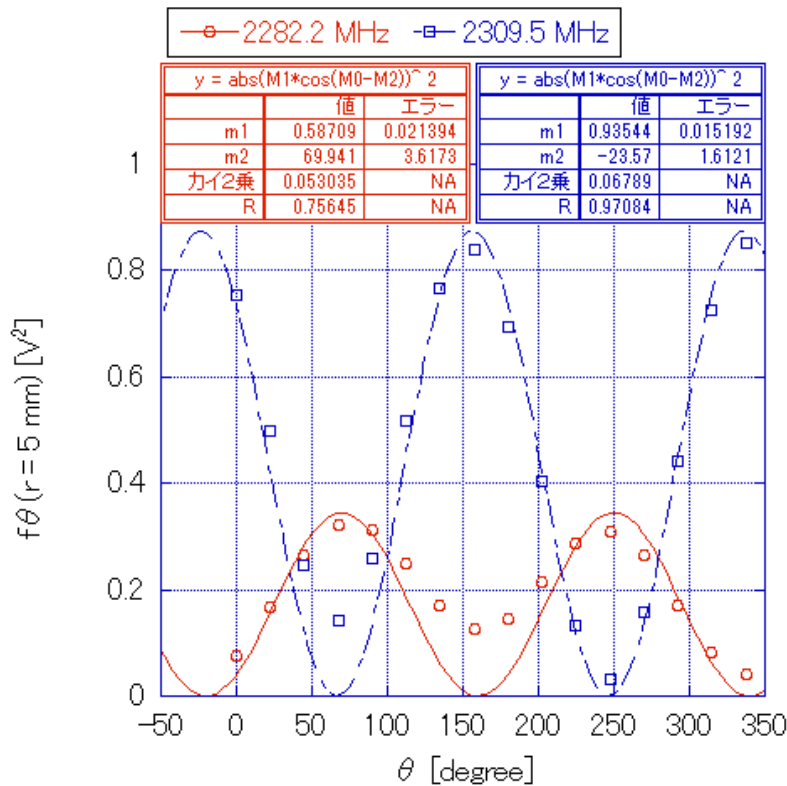


図 5-21 : 角度  $\theta$  に対する  $r = 5 \text{ mm}$  での  $f_{\theta}$  の応答

## 第6章. ビーム誘起局在モードのデータ取得

### 6.1. ビーム誘起高調波モードの測定

空洞の機械的中心を求めるためのビーム掃引を行い、データの取得を STF 加速器にて実施した。フォトカソード L バンド RF 電子銃で生成された 4.0 MeV/c 電子ビームはクライオモジュール内に納められた 2 台の 9 セル超伝導空洞により 40 MeV/c まで加速される。測定時のビームバンチ数は 28 バンチで、バンチ電荷量はおおよそ 50 pC であった。代表的なビームパラメータを表 6-1 に示す。ビームのバンチ長は本研究で使用した GHz 領域の波長 10 cm 級の空洞に比べて十分短いので、各バンチは空洞のすべてのモードを誘起できる。ただし、多バンチビームの場合には、バンチ間隔の周波数の整数倍の周波数成分が主になるので、この周波数成分と空洞内のモード周波数が一致する高調波モードが強く誘起されることになる。

表 6-1 : ビームパラメータ

Parameter	value
Frequency of accelerator	1300 MHz
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

ビーム誘起高調波モードの測定には 9 セル超伝導空洞をビームが通過する位置を横方向にスキャンし、そのビーム軌道を測定する必要がある。超伝導空洞の上流のダイポールマグネット (x 方向 : ST2-X, y 方向 : ST2-Y) とビーム位置モニター (MB03)、超伝導空洞下流のビーム位置モニター (MB04) を使用した。そのセットアップの概念図を図 6-1 に示す。また、ビーム強度モニターにはクライオモジュールの上流にある ICT-01 と下流にある ICT-02 のビーム電流モニターを使用した。

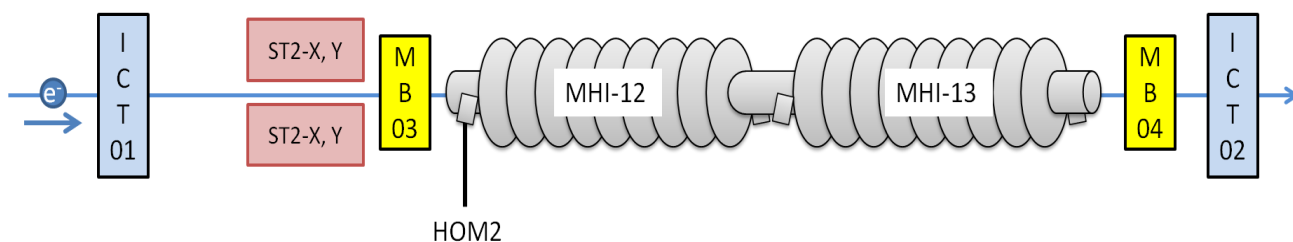


図 6-1 : 測定セットアップの概念図

局在ダイポールモードの測定時には図 6-2 に示す通りに、空洞 1 (MHI-12) の HOM2 からのビーム誘起高調波モードの信号を 1500 MHz のハイパスフィルター (Mini-Circuits VHF-1500+) を 3 個と 2100 MHz (Mini-Circuits VHF-2100) のハイパスフィルター 1 個を経由して、オシロスコープ (Agilent Technologies DSO9404A) に入力した。データは 8bit, 10 GSa/s, 262kpts で BPM 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表 6-1 に示し、そのときの信号波形を図 6-3 に示す。また、y 軸方向へビーム掃引したときの異なるビーム軌道でのそれぞれの FFT スペクトラムを図 6-4 に示す。図 6-4 中の各プロットにつけられた数字はビーム掃引中に取得した何番目のデータであるかを示す。数字の順にスペクトラムを見ると、2277.2 MHz と 2314.4 MHz にあるピークの振幅が小さくなり、その後、また大きくなっている様子が分かる。ビーム掃引に対する振幅の応答例を図 6-5 に示す。これより、2277.2 MHz, 2314.4 MHz のピークがダイポールモードの応答を示すことが確認できた。

以上の測定セットアップにて、10 回のビーム掃引を実施した。その 10 回のデータを順に set0～set9 とする。そのうちの 5 回 (set0～set4) は ST2-X のダイポールマグネット電流値を変え、x 方向にビーム軌道を変化させたときのデータであり、それぞれの掃引で異なる ST2-Y の電流値をもつ。残りの 5 回 (set5～set9) は ST2-Y のダイポールマグネット電流値を変え、y 方向にビーム軌道を変化させたときのデータであり、それぞれの掃引で異なる ST2-X の電流値をもつ。このときのダイポールマグネット電流値に対する MB03 および MB04 でのビーム通過位置は付録 B に載せた。

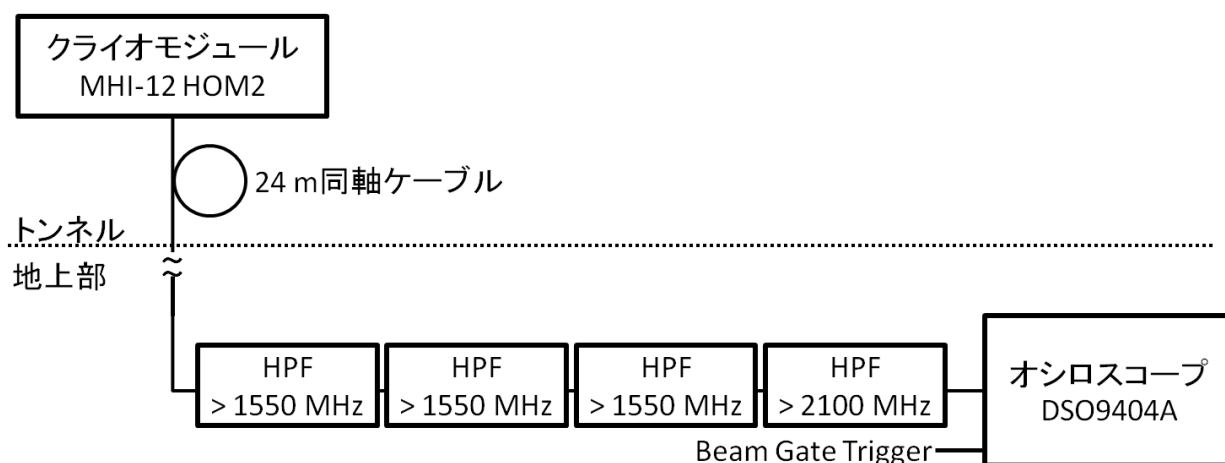


図 6-2 : 局在ダイポールモードの測定セットアップ

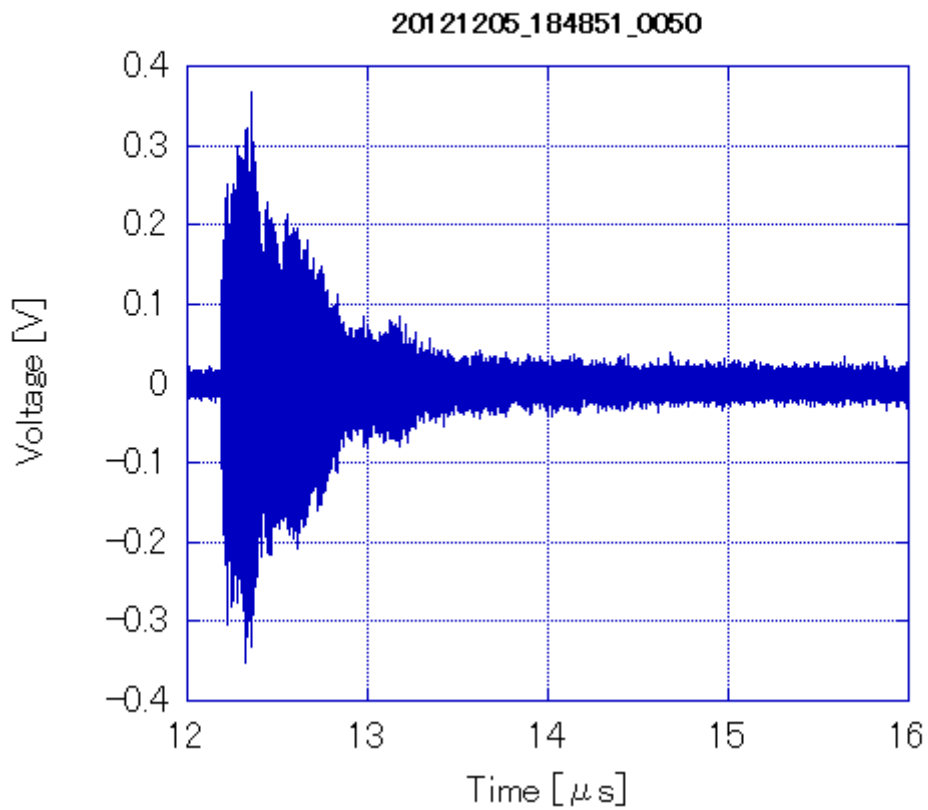


図 6-3 : オシロスコープ上の取得波形

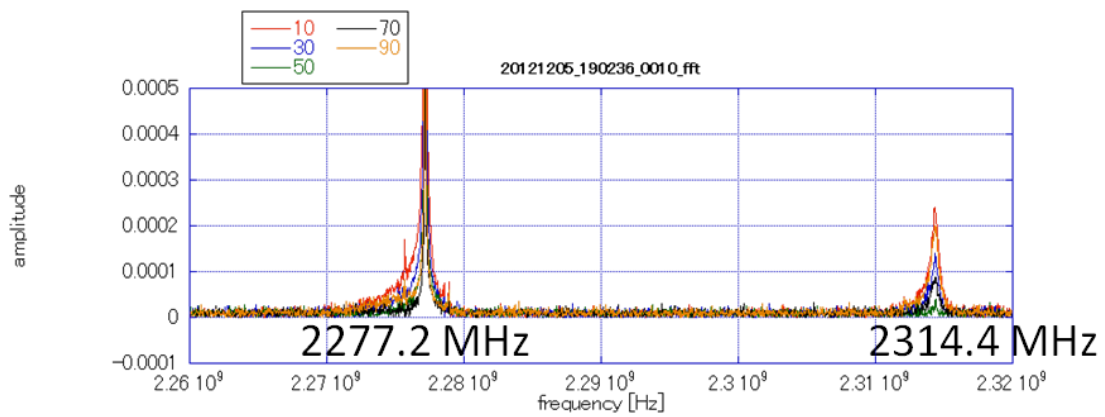


図 6-4 : y 軸方向へビーム掃引したときの異なるビーム軌道での FFT スペクトラム  
(ラベルはビーム掃引中に取得したデータの通し番号である。)

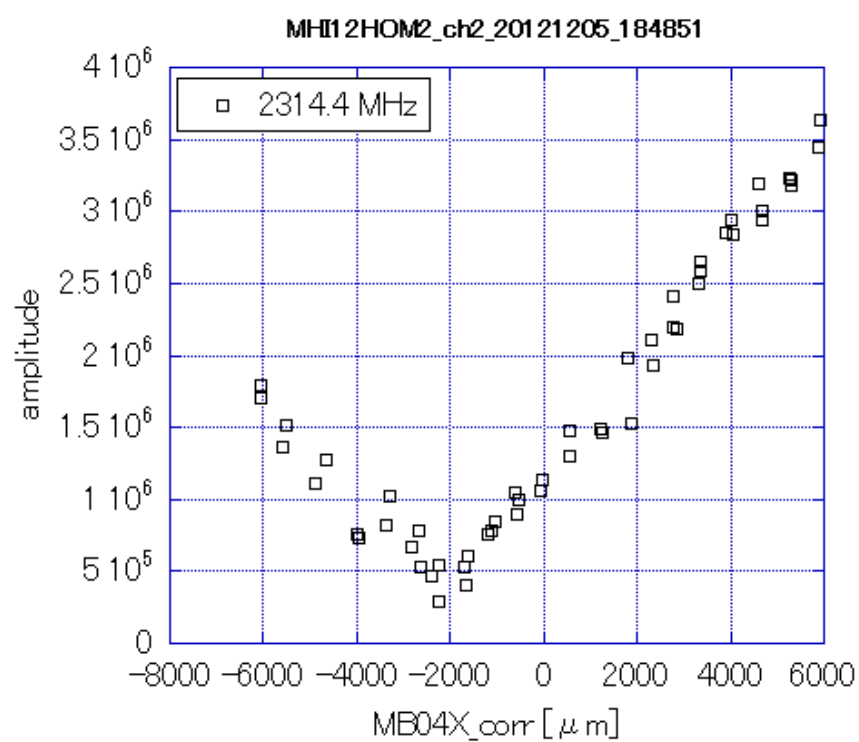
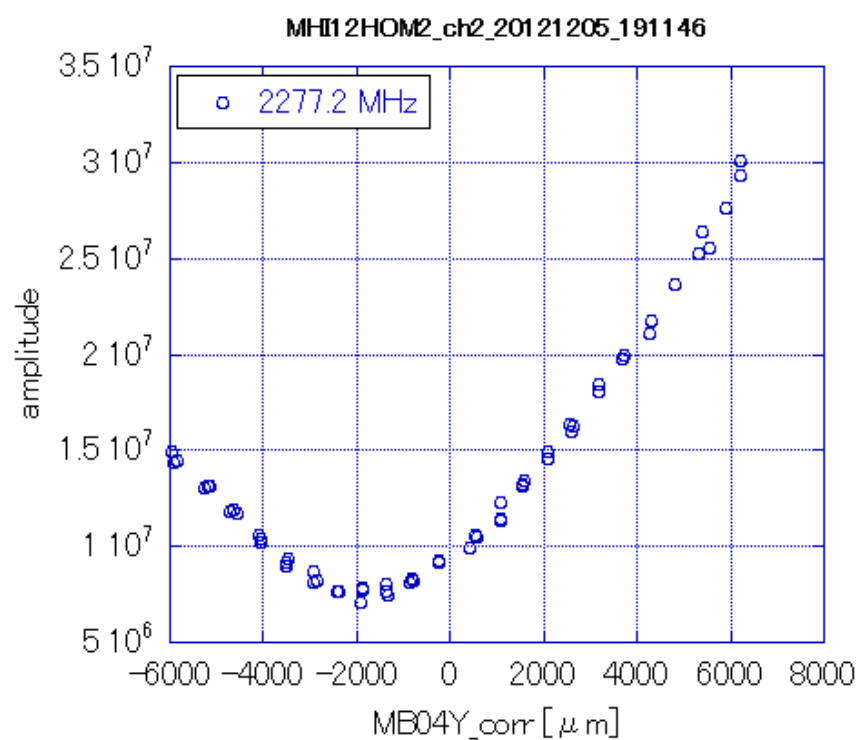


図 6-5 : ビーム掃引に対する各局在ダイポールモードの応答例



## 6.2. データ取得方法

ビームの一回の通過で関連する情報をすべて取得するために、特殊なデータ取得システムを構築した。ダイポールマグネットの電流値設定プログラムにより一定間隔でST2-XまたはST2-Yに流す電流値の設定を変えながら、トリガー回路がBPM ADC, 電荷量ADC, オシロスコープにタイミング信号を配ると、MB03とMB04でのビーム位置、ICT01とICT02での電荷量、HOM信号がその同一タイミングで保存され、「BPM reader」プログラムにより、ビーム位置、電荷量、ダイポールマグネットの設定値は同一ファイルに書き込まれ、オシロスコープで取得した波形はオシロスコープ内の別のファイルにおとすように指令が与えられる。その後、「BPM reader」からトリガーのクリアー指令が送られ、トリガー回路が次のトリガー信号を発生することで次のビーム通過と同期して繰り返しデータを取得することができた。取得したファイルはオフラインにてMatlabによりFFT解析され、サマリーデータが生成される。この一連の手続きを表したのが図 6-6 である。

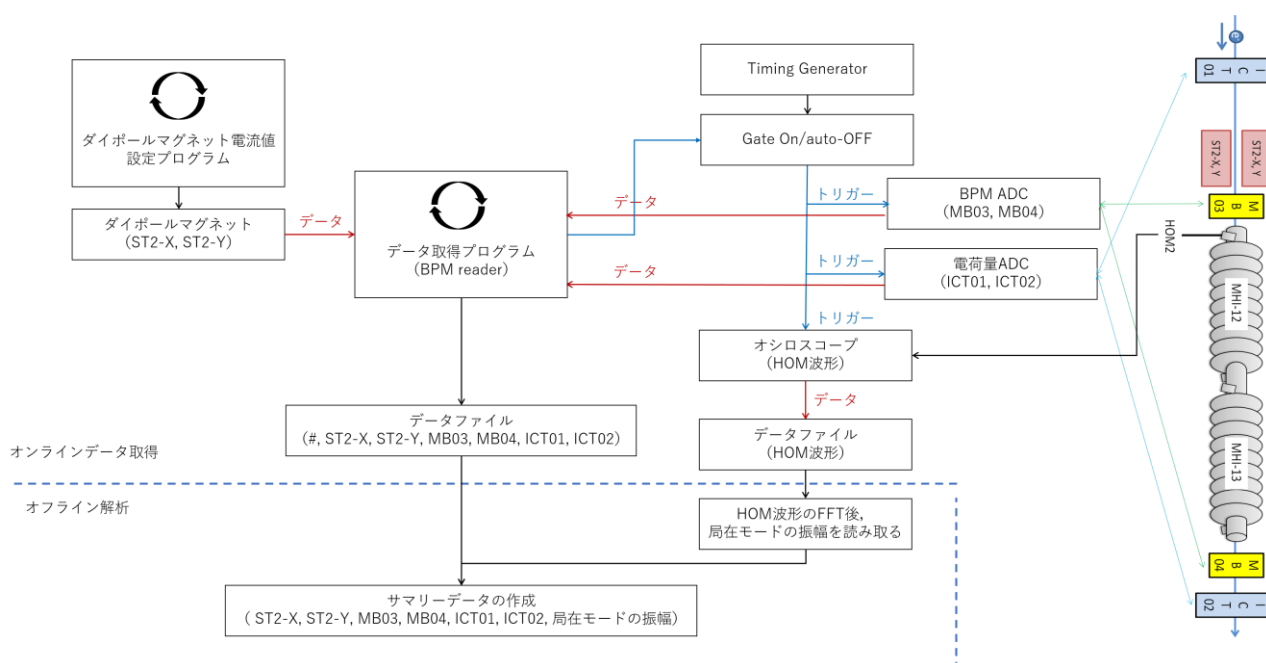


図 6-6 : データ取得フロー

### 6.3. ネットワークアナライザによる局在モードの確認

第5章の CST シミュレーションにより計算されたビームパイプモードの実在を確かめるために、クライオモジュール内に設置された空洞1（MHI-12）の透過特性をネットワークアナライザ（NWA）で測定した。測定はクライオモジュールが室温状態のときに行ったものであるが、クライオモジュール内部の信号配線は冷却運転中のときと変わらない状態である。上流側 HOM カプラーを HOM2 とし、下流側 HOM カプラーを HOM1 とする。上流側ビームパイプには運転時の加速電界強度のモニターとしてピックアップアンテナが取り付けられている。

モニター用のポート（ピックアップアンテナ）から HOM2 への透過特性と HOM1 から HOM2 への透過特性を測定し比較したものが図 6-7 である。ピックアップアンテナから HOM2 への透過特性では上流ビームパイプ部に局在するビームパイプモードと推測できる 2273 MHz と 2310 MHz に共振ピークが検出された。低温時との共振周波数の差は、4 MHz 低い方向へシフトしている。同じくダイポールモードである TE111 や TM110 についても空洞1（MHI-12）の周波数の差 2～4 MHz 程度であり、同様に低い方向へシフトする。局在ダイポールモードの冷却による周波数の変化量と傾向は合致している。HOM1 から HOM2 への透過特性には 2273 MHz と 2310 MHz とに同時に該当するエンハンスが見られず空洞間では共振していないことが分かった。

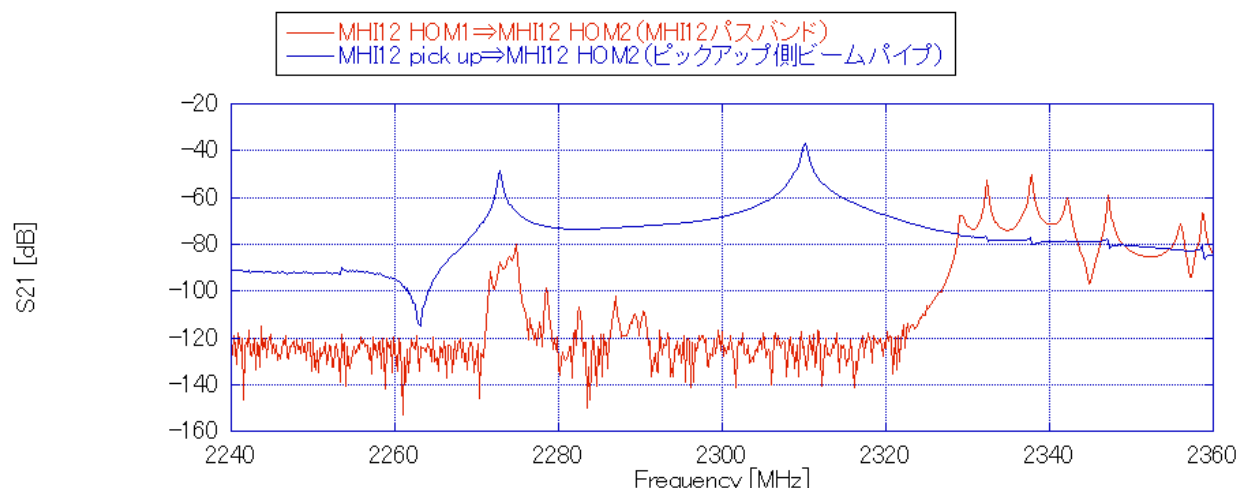


図 6-7：モニターポートのピックアップアンテナから HOM2 への透過特性

### 6.4. ビーム位置モニターの校正

ビーム位置モニター（BPM）にはボタン型電極（付録 A 図 A-1 参照）によるピックアップとクリッピング回路および charge ADC（付録 A 図 A-2 参照）が使用されている。ボタン型電極からのビーム信号はゲート幅 30 ns でバンチにわたって電荷積分され、それを電圧信号として取り出され、4つの電極信号から位置を導出している。本測定では BPM がアライメントの基準であるので、正確にビーム位置が計測できるように、以下の（1）～（3）の BPM の校正を行った。その詳細は付録 A に示す。

- （1）ペDESTAL補正
- （2）ベースラインクリップ回路補正
- （3）BPM モデルシミュレーションによる位置感度係数の導出

## 6.5. 局在モードの電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値の算出

図 3-1 のフローチャートの 2 つ目の項目である「局在モードの電氣的中心を通るダイポールマグネット電流値を求める」ため、以下に示す解析を実施した。ここで、使用したデータは第 6 章で測定した ST2-X, ST2-Y の電流値および MB03, MB04 でのビーム通過位置と局在モードの振幅である。さらに、ビームが空洞内を通過していることを確認するために、ICT-01 と ICT-02 のデータにより損失が起きていないイベントを用いた。

ビーム掃引軌道がダイポールモードの偏極軸と交差するとき、ビームオフセット量 ( $x$ ) に対してダイポールモードの強度をビーム電荷量で規格化したもの ( $y$ ) をプロットすると V 字の形状を見ることができ、正規化された振幅は、以下の関数でフィッティングすることができる。

$$y = |ax + b| + c$$

ここで、 $a$ 、 $b$ および $c$ はフィッティングパラメータであり、 $a$ はダイポールモード強度のビームオフセット量に対する比例係数であり、V 字の頂点は $x = -\frac{b}{a}$ 上にくる。そして、 $c$ は測定のノイズレベルに相当する。

ダイポールマグネットの電流値に対して、ビーム位置は線形応答するため、 $x$ にビーム掃引した方向のダイポールマグネット電流値を代入しても、上式は成立する。ただし、この関数でのフィットを行うには、フィッティング範囲の指定が必要かつ重要となる。そこで、フィッティング範囲の指定を避けるため、正規化振幅の二乗をフィットすることによりダイポールモードの電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値を導出することを検討した。その手順を以下に述べる。

最初に、ノイズレベル  $c$  を推定するために、 $y^2$ を二次関数でフィット（一度目の二次関数フィット）

し、その二次関数の軸を見つけた。厳密には、 $(|ax + b| + c)^2$ は二次関数ではなく、 $x > -\frac{b}{a}$ のときには $y^2 =$

$a^2 \left(x + \frac{b+c}{a}\right)^2$ 、 $x < -\frac{b}{a}$ のときには $y^2 = a^2 \left(x + \frac{b-c}{a}\right)^2$ となるが、この 2 式は $x = -\frac{b}{a}$ で交点を持ち、 $x = -\frac{b}{a}$

を軸として左右対称となるので、二次関数で二乗式 $y^2$ をフィットすることによって、軸を見つけること

ができる。 $x = -\frac{b}{a}$ の対称軸の周りの  $y$  の平均値としてノイズレベル  $c$  を定義する。 $y$  の平均値を求める

範囲を、まずは、対称軸 $\pm 0.1$  A の範囲とし、 $y$  の平均値 $\langle y_0 \rangle$ と標準偏差 $\sigma_{y_0}$ を求めた。その後、 $y$  の平均値を求める範囲を  $0.1$  A ずつ両側に広げながら、その都度、その範囲での  $y$  の平均値を計算し、 $\langle y_0 \rangle \pm \sigma_{y_0}$ に入っているかを確認した。そして最終的には、 $y$  の平均値が $\langle y_0 \rangle \pm \sigma_{y_0}$ 内にある最大範囲を  $c$  を求める範囲として用いることにした。このノイズレベル  $c$  を使用して、

$$Y = (y - c)^2 = (ax + b)^2$$

を二次関数によってフィット（二度目の二次関数フィット）した。ここで、 $(y - c)^2 = ax^2 + 2abx + b^2$ は二次関数でフィットすることができる。このとき、ノイズレベル  $c$  の標準偏差  $\sigma$  を系統誤差としフィットに組み込んだ。そして、頂点の  $x$  座標を求めた。ここまでのフィットの様子の一例を図 6-8 に示す。set0 ~ set9 での 2277.2 MHz と 2314.4 MHz の全フィット結果を付録 C に載せる。ただし、以下の 2 点を満たす取得データについてのみ上記の方法を適用した。

- (1) ICT-01 と ICT-02 との差が 2 pC 未満である
- (2) 各 BPM 電極の振幅が ADC の動作範囲である

(1) は空洞内でビームをロスすることなく、通過していることを保証するために、(2) は BPM の信頼性を保証するために条件とした。ここまでで得られた頂点の  $x$  値を用いて、図 6-9 に示すマッピングのプロットを作成した。ただし、 $c$  を求めた範囲内に頂点があることを条件とした。そして、ビームを掃引しなかった方向の座標には、その方向のダイポールマグネット電流値を使用した。ビーム掃引した方向のエラーバーには先のフィットの誤差を用いた。その後、偏極軸を求め、交点の座標を求めた。このとき、求めた誤差は偏極軸を求めた線形近似の誤差の伝搬のみを考慮したものである。以上より、局在モードの振幅が最小となるダイポールマグネット電流値を算出すると、 $x$  方向電流値は  $1.000 \pm 0.002$  A,  $y$  方向電流値は  $-1.485 \pm 0.002$  A と求められた。このダイポール電流値でのビーム軌道から局在モードの電氣的中心を求め、機械的中心を導出した。

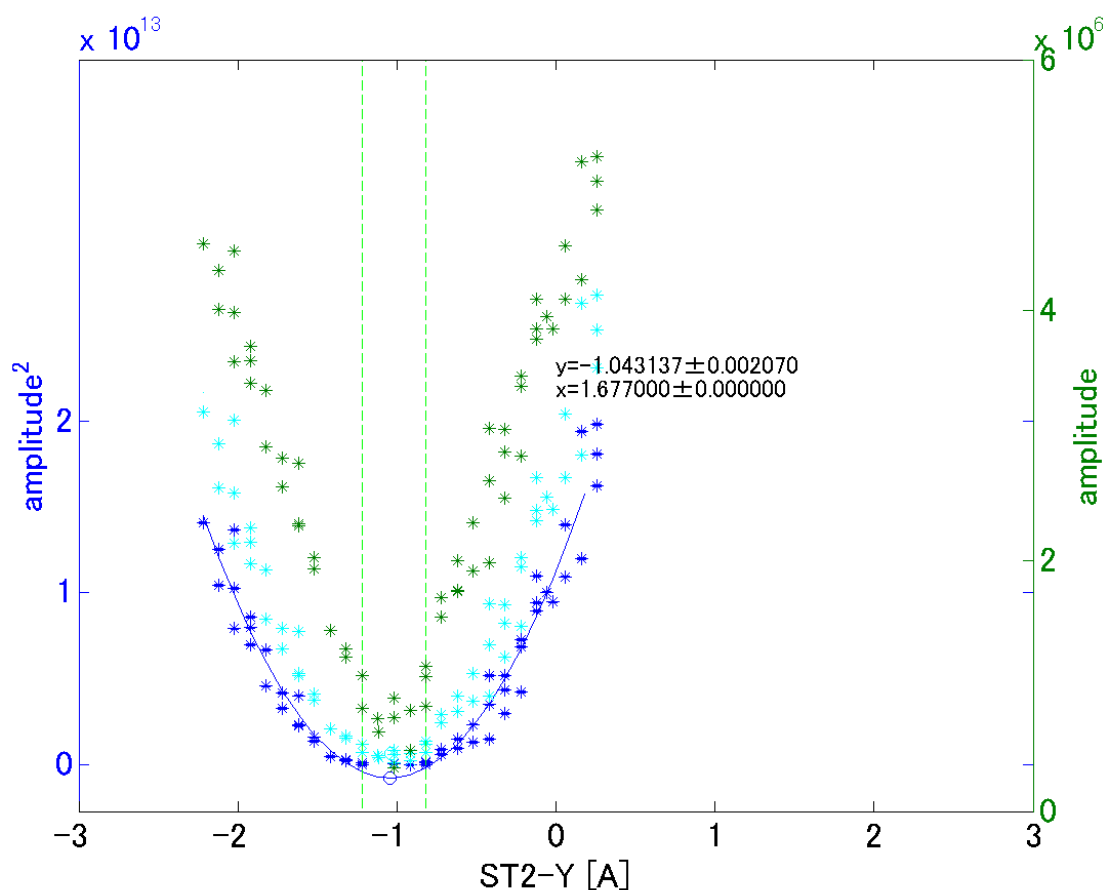


図 6-8 : 2314.4MHz に対する set9 での二次関数フィット

(緑 : V 字応答, 水色 : 一度目の二次関数でのフィット, 緑波線 :  $c$  を求めた範囲, 青 : 最終二次関数フィット)

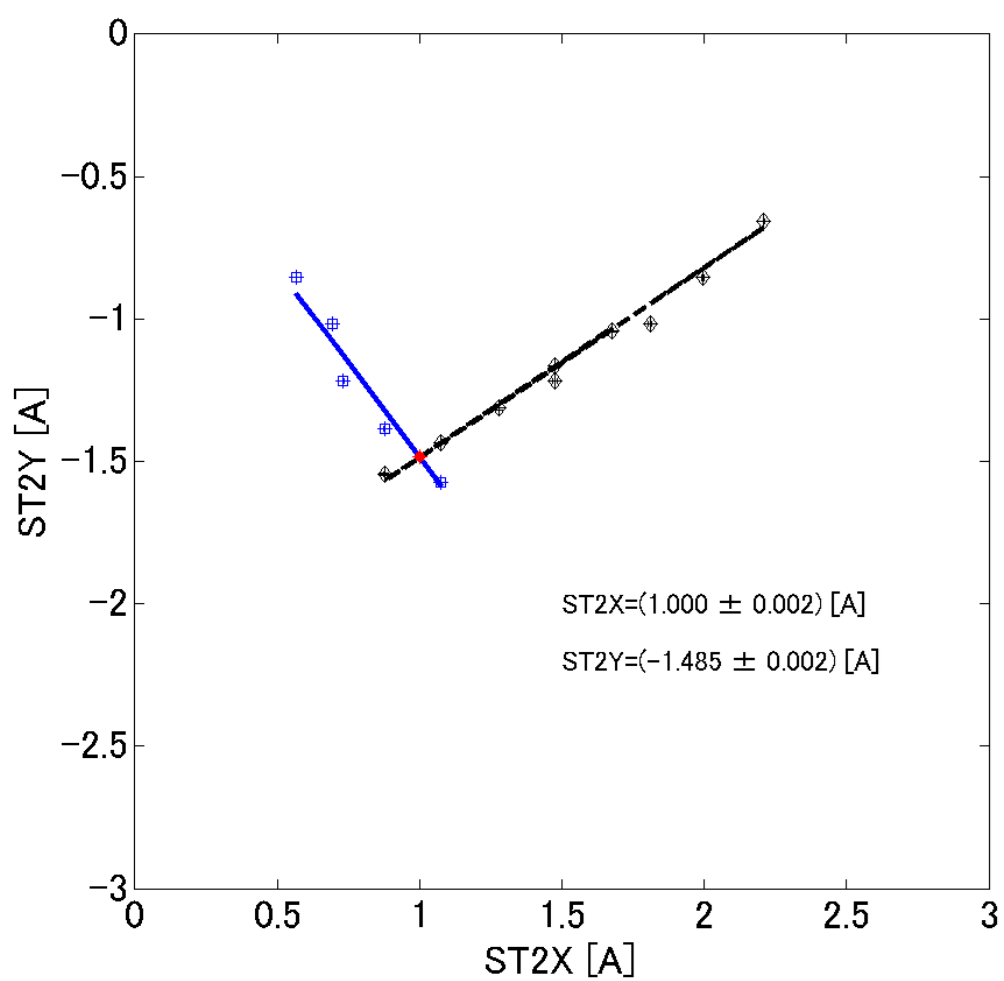


図 6-9 : 電氣的中心を示したときのダイポールマグネットの電流値

## 第7章. 実験データからの機械的中心の推定

### 7.1. 局在モードの電氣的中心の計算

局在モードの電氣的中心を通るダイポールマグネットの電流値を求めた後、局在モードの電氣的中心を見積るために4つの要素がある(図 3-1 参照)。1つ目は「ビーム軌道を決めるパラメータを推定する」ための GPT によるビーム軌道計算 (7.2) であり、2つ目は「求めたダイポールマグネット電流値でのビーム軌道を計算し、局在モードの電氣的中心を求める」計算 (7.3)、3つ目が「局在モードの電氣的中心を機械的中心に変換する」計算 (7.4)、そして4つ目が「仮定した機械的中心と求めた機械的中心とが一致しているか」判定し、作業を繰り返す行程 (7.5) である。

### 7.2. GPT によるビーム軌道計算

ST2-X の値を増やしたとき、MB03 でのビームの x 座標は正の方向に移動したが、下流の MB04 では逆の負の方向に移動した。このことより、ビームが2つの BPM 間で直線的に移動していないことが分かった。ビーム通過位置の計算をするために、General Particle Tracer (GPT) を用いて図 4-1 の QI-1 の上流 (CHICANE の下流) から MB04 までの間の計算を実施した。

#### 7.2.1 ビーム軌道計算モデル

図 7-1 にビーム軌道計算に用いたモデルを示す。モデルはシケインの下流のビームエネルギーをモデル化するための長方形の箱で囲まれた一定電場と、4つのダイポールマグネット (ST-00X, ST-00Y, ST2X, ST2Y)、四極マグネット (QI-1)、ソレノイド (SOL) と2つの STF 空洞の RF 場からなる。

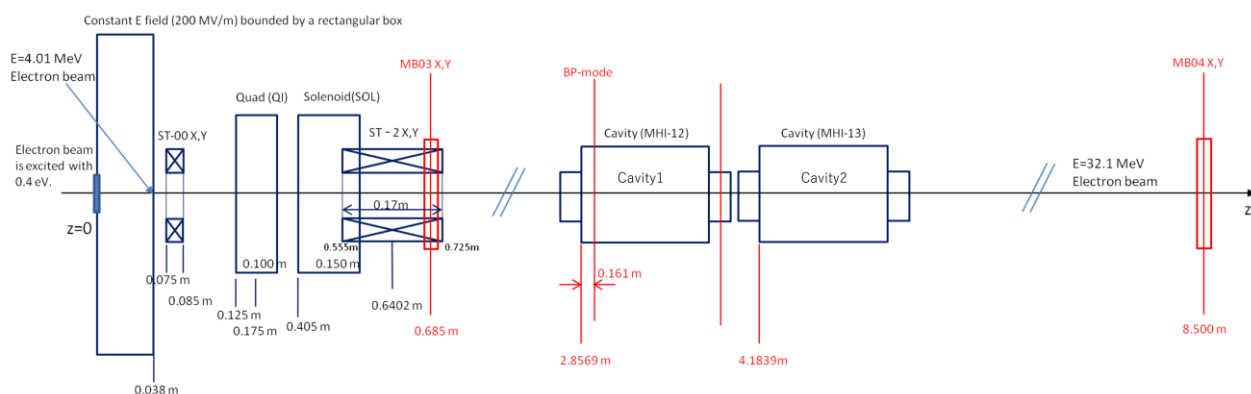


図 7-1 : ビーム軌道計算モデル

初期電子ビームとして、 $z=0$  で 100 個の粒子をガウス分布 ( $\sigma = 0.43 \text{ mm}$ ) で生成し、その総電荷量は  $50 \text{ pC}$  とした。そして、空間電荷効果を考慮した計算を実施した。このときの電子ビームのオフセット量  $x_{ini}$ ,  $y_{ini}$  をパラメータとした。ここで、粒子数を 100 個としたのは、初期粒子の分布の偏りから生じるビーム位置のゆらぎを軽減するためである。7.2.2 で評価に用いる  $s^2$  (計算したビーム位置と実測値との差の二乗) が粒子数によって、図 7-2 に示すように変化する。そこで、計算時間を短くでき、かつ

安定した計算結果を得られる粒子数として、100個を指定した。

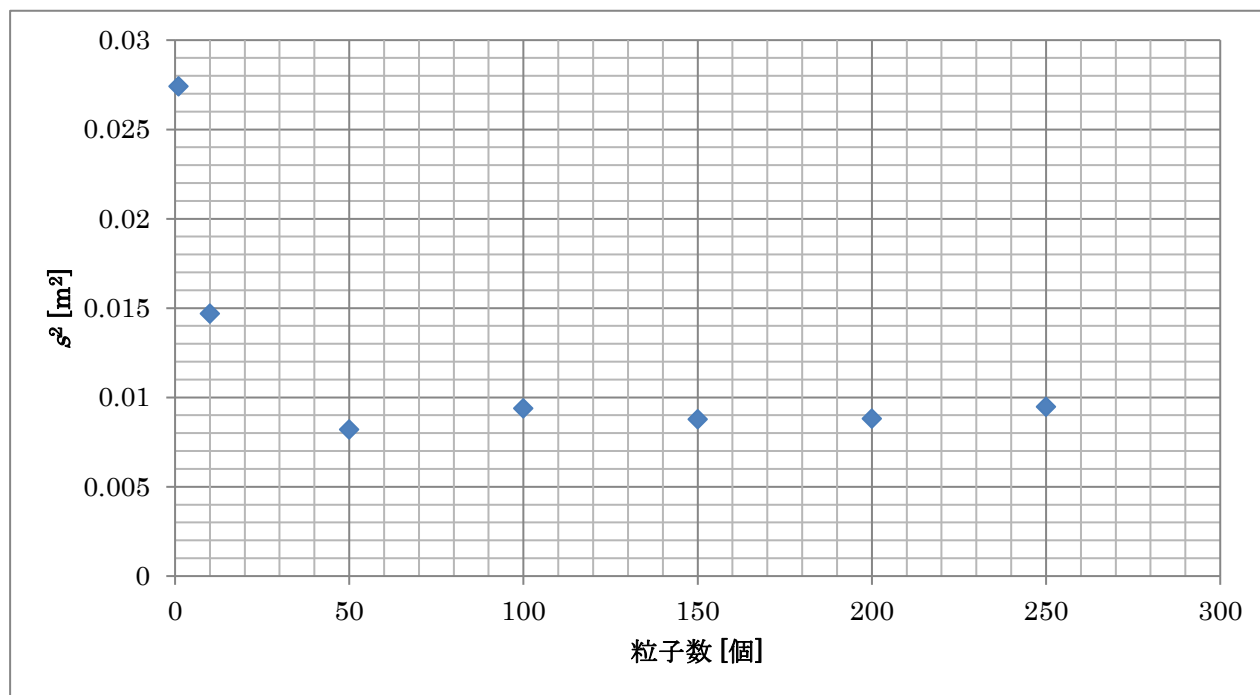


図 7-2 : GPT 計算によるビーム位置計算の粒子数依存性

電子ビームの傾きは ST00-X と ST00-Y によって生成される磁場 BfieldX00 と BfieldY00 で調整した。電子ビームのエネルギーに関して、初期エネルギーは 0.4 eV とし、200 MV/m の一定電場によって 4.01 MeV まで加速した。空洞 1 (MHI-12) と空洞 2 (MHI-13) については 22.6 MV/m と 33.9 MV/m のピーク電場を持つ 1.3GHz の RF 電場を指定した。空洞 1 と空洞 2 との位相差は 90 度に固定し、空洞 1 の位相はビーム実験時と同様に最大加速が得られる位相に設定した。このとき、空洞 2 の位相も最大加速位相となる。パワーメータによる電場の測定は 10% 程度の誤差を有すると考えられるので、空洞の電場の強度を調整するために係数 A を導入した。よって、空洞 1 と空洞 2 のピーク電場の強度は  $22.6 \cdot A$  MV/m,  $33.9 \cdot A$  MV/m となり、係数 A のとる範囲は 0.9~1.1 程度とした。空洞 1 の傾き (x tilt<sub>c1</sub>, y tilt<sub>c1</sub>) と空洞 2 のオフセット (x offset<sub>c2</sub>, y offset<sub>c2</sub>) と傾き (x tilt<sub>c2</sub>, y tilt<sub>c2</sub>) は、表 4-7 のレーザートラッカーと WPM によるデータから推定した値に固定した。唯一、空洞 1 のオフセット (x offset<sub>c1</sub>, y offset<sub>c1</sub>) のみをパラメータとして扱った。ビーム実験でデータを取ったときにはソレノイド磁石に流した電流は 20.95 A であり、そのときの磁場を測定したところ 150.3 mT だったので、GPT 計算に組み込むソレノイドの磁場のピーク値をその値に設定した。四極磁石の上流端の位置を  $z = 0.125$  m とし、長さは 0.100 m とし、磁場勾配はメーカーの検査報告書を参照し 0.054 T/m とした。フリンジフィールドを考慮するために、ST2-X と ST2-Y は、長さは 10 mm の 17 個の矩形マグネットによってモデル化した。それぞれの矩形マグネットの磁場の振幅は変換係数と電流値の積で与え、その変換係数は各補正マグネットの磁場計測を行い表 7-1 に示す通りに決定した。また、電流値は set0~set9 でのダイポールマグネット電流値とビーム通過位置の測定データ付録 B の表 B-1~表 B-9 に示す高調波モード測定時の設定値を使用した。

表 7-1 : ST2-X と ST2-Y の変換係数

#	ST2-X の変換係数 [mT/A]	ST2-Y の変換係数 [mT/A]
1	0.03	-0.03
2	0.09	-0.09
3	0.20	-0.18
4	0.35	-0.33
5	0.56	-0.52
6	0.78	-0.76
7	1.00	-0.97
8	1.16	-1.12
9	1.23	-1.19
10	1.20	-1.15
11	1.07	-1.03
12	0.86	-0.83
13	0.63	-0.59
14	0.41	-0.39
15	0.23	-0.23
16	0.11	-0.12
17	0.04	-0.05



## 7.2.2 ビーム軌道の推定

高調波モードの測定実験では 10 回のビーム掃引に分けてデータを取得しており、その時のビーム軌道を先のモデルにおいて GPT で計算した。ST2-X, ST2-Y の電流設定値を付録 B の表 B-1～表 B-10 に示す。各掃引毎に set0～set9 までラベルを付けている。set0～set4 までは ST2-X のマグネット電流値を変え、ビーム軌道を x 方向に変化させたものであり、それぞれの掃引で異なる ST2-Y の電流値をもつ。残りの set5～set9 は、y 方向へのビームの掃引のためのものであり、それぞれの掃引で ST2-X が異なる。

すべてのセットでの MB03 と MB04 で算出されたビーム位置と実際のビーム位置との間の二乗の差を  $s^2$  とし、評価した。

$$s^2 = \sum_{n=1}^{497} \sum_{i=3,4} \left\{ (x_{MB0i}^{mea} - x_{MB0i}^{cal})^2 + (y_{MB0i}^{mea} - y_{MB0i}^{cal})^2 \right\}$$

ただし、大きなオフセットをもつビームに対して BPM の測定信頼性がないので、測定されたビーム位置が  $-6.5 \text{ mm} \sim 6.5 \text{ mm}$  の範囲の外である場合のデータは使用しないことにした。アライメント誤差 ( $\sim 280 \mu\text{m}$ ) とビームのゆらぎ (MB03 では  $\sim 20 \mu\text{m}$ , MB04 では  $\sim 100 \mu\text{m}$ ) から決めたターゲット  $1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  を全 497 の ST2-X と ST2-Y の組についての  $s^2$  の目標値として設定し、 $s^2$  が目標値を下回るパラメータ  $xini$ ,  $yini$ ,  $BfieldX00$ ,  $BfieldY00$ ,  $A$  を探した。その作業はマニュアルで行った。その際には、表 7-2 に示す各パラメータを大きくしたときの MB03X, MB03Y, MB04X, MB04Y の応答する方向を指針とした。一回目の、ビーム軌道の再構築と電気的中心の計算を繰り返した後、 $s^2$  が目標値を下回るまでの  $s^2$  のヒストリーを図 7-3 に示す。 $s^2$  が  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  となるパラメータを得た。この内、 $s^2$  が最小となったのは 82 回目の試行時であり、そのときの set6 でのビーム軌道の計算結果を図 7-4 に示す。付録 D に set0～set9 のすべてのビーム軌道の計算結果を示す。計算したビーム位置は測定したビーム位置とよく一致している。ビーム軌道の z 軸方向の全体像は解析には使用しないが、一例として、図 7-5 にビーム軌道掃引中に測定したダイポールマグネット電流値でのビーム軌道を z 方向に対して示す。軌道は ST2-X または ST2-Y によって曲げられ、空洞 1 の入り口で収束される。なお、局在モードの長手方向の中心は、図 7-5 の空洞 1 の入り口近くの赤い線上に位置している。

表 7-2 : マニュアルでの  $s^2$  調整指針

Parameter	MB03X	MB03Y	MB04X	MB04Y
xini ↑	↑	↓	↑	↓
yini ↑	↑	↑	↑	↑
BfieldX00 ↑	↑	↓	-	-
BfieldY00 ↑	↓	↓	-	-
A ↑	-	-	↷	↶

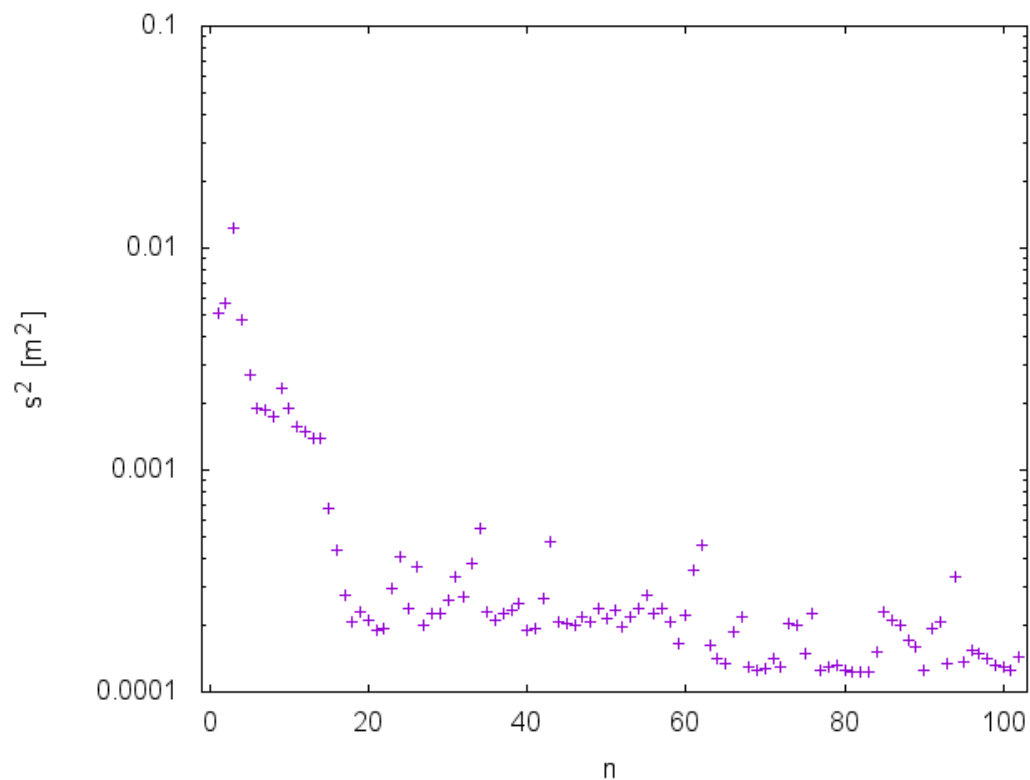


図 7-3 :  $s^2$  ヒストリー横軸  
(横軸が試行回数である。)

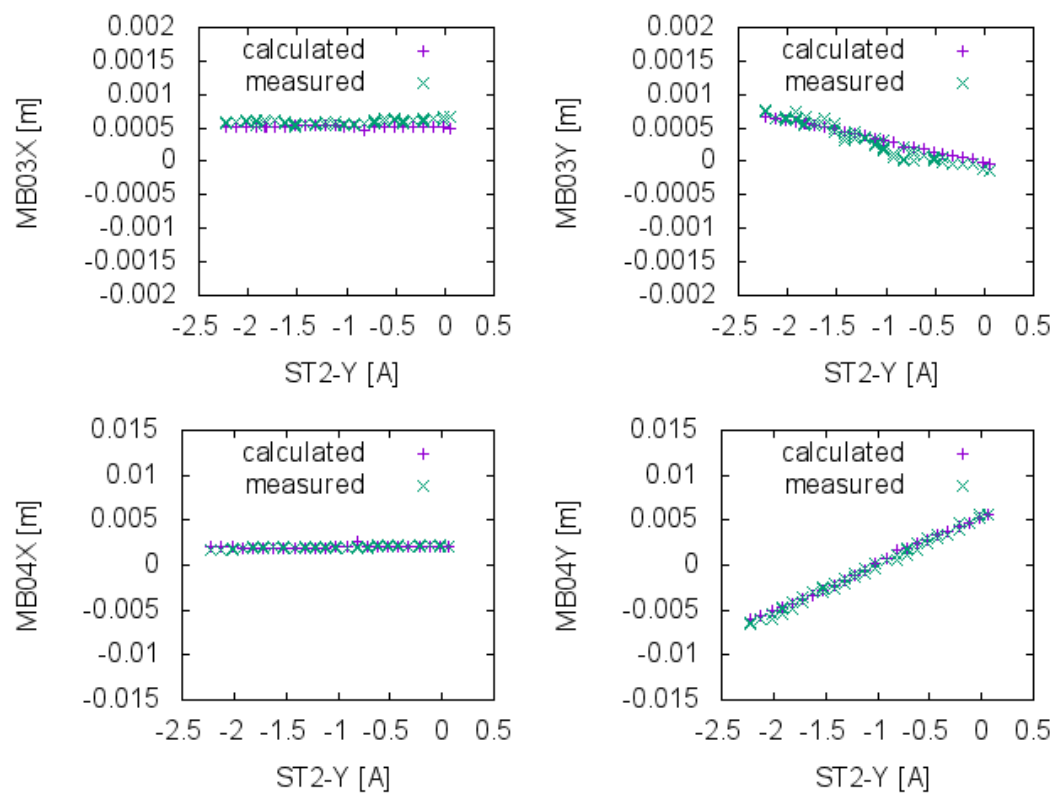


図 7-4 : set6 でのビーム掃引と軌道計算の一致度  
(+は計算データ, x は測定データを示す。)

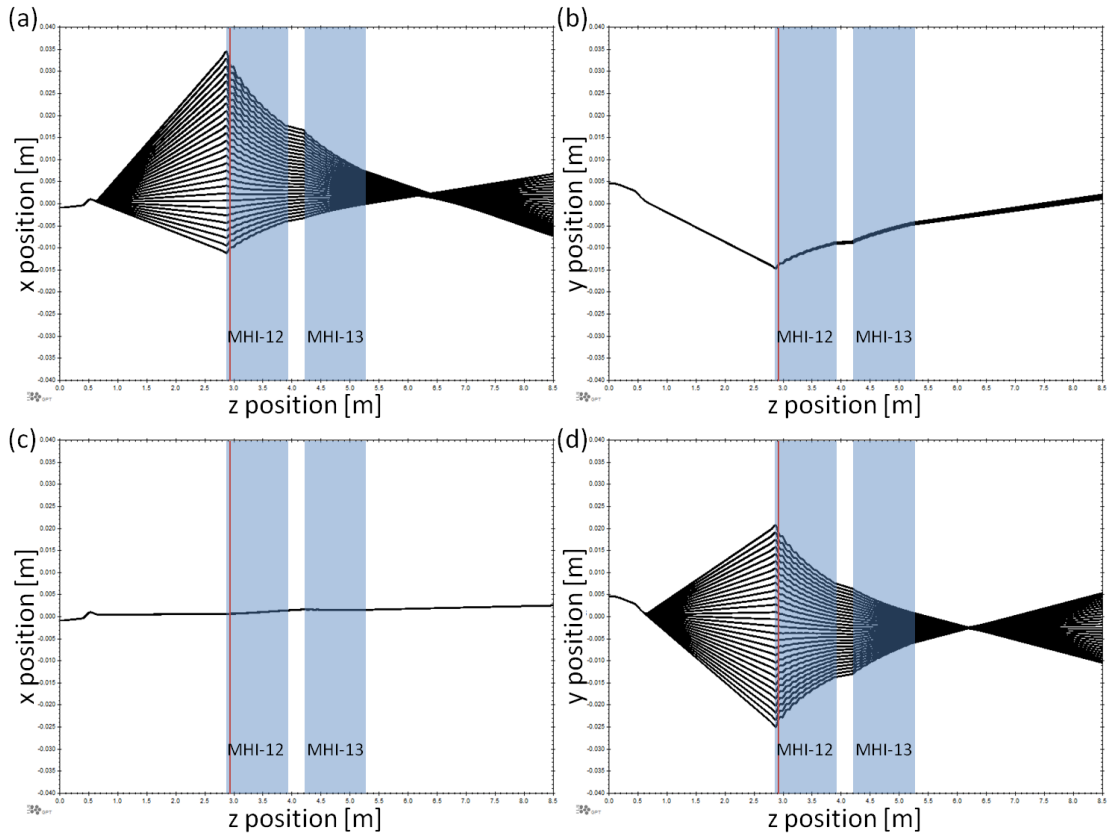


図 7-5 : ビーム軌道計算の例

((a)(b)は x 方向へのビーム掃引, (c)(d)は y 方向へのビーム掃引での軌道を示す。)

### 7.3. 局在モードの電気的中心の導出

6.5 で求めたダイポールマグネットの電流値( $ST2X, ST2Y = (1.000 \pm 0.002 \text{ A}, -1.485 \pm 0.002 \text{ A})$ )のときに, 5.8 で求めた局在モードの長手方向範囲 $z = -64.0 \sim 349.4 \text{ mm}$ を通過するビーム軌道を図 7-6 に示す。この軌道の最大値と最小値から電気的中心を算出した。このときには, 電気的中心は $(x_{ec}, y_{ec}) = (-0.50 \pm 0.15 \text{ mm}, -0.175 \pm 0.325 \text{ mm})$ となった。

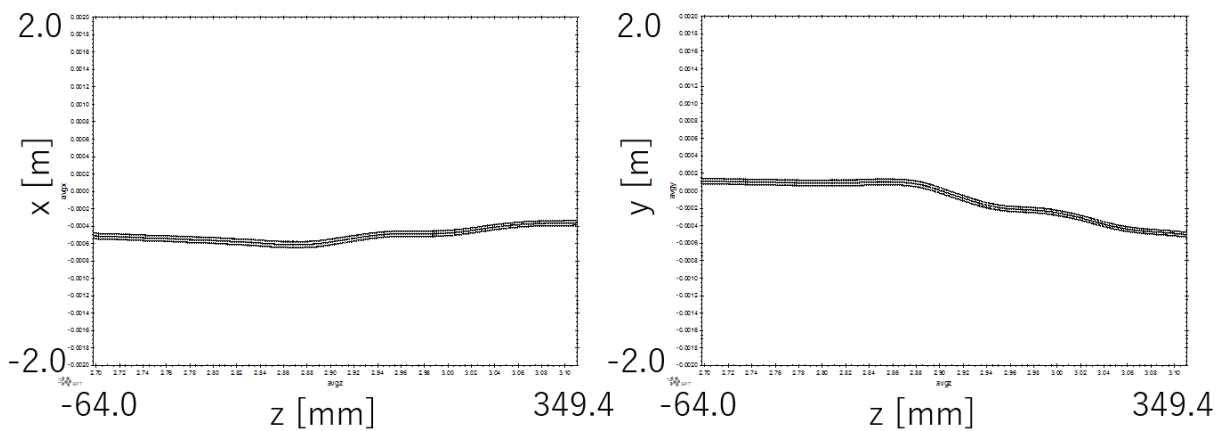


図 7-6 : 電気的中心の計測域を通るビーム軌道計算値

#### 7.4. 局在モードの電氣的中心から機械的中心への変換

機械的中心は、局在モードの電氣的中心から、5.7 節で求めた電氣的中心と機械的中心との偏差  $(\Delta x_{me}, \Delta y_{me}) = (-1.09 \pm 0.26 \pm 0.23 \text{ mm}, 1.48 \pm 0.21 \pm 0.07 \text{ mm})$  を引くことで求めることができる。

#### 7.5. 導出した機械的中心と設定した機械的中心との差の低減

GPT コードで空洞 1 のオフセットと傾きとを指定している。このとき、空洞 1 が傾きを持つために、機械的中心が幅をもつ。そこで、機械的中心の座標を中央値と偏差を用いて、 $P_{mc}^{set} \pm \delta P_{mc}^{set}$  とすることにした。そして、局在モードの電氣的中心から変換し導出した機械的中心 ( $P_{mc}^{cal} \pm \delta P_{mc}^{cal}$ ) が GPT コードで設定した機械的中心 ( $P_{mc}^{set} \pm \delta P_{mc}^{set}$ ) と一致するかどうかを調べるために、

$$|P_{mc}^{cal} - P_{mc}^{set}|^2 - (\delta P_{mc}^{cal^2} + \delta P_{mc}^{set^2}), \quad P = x, y$$

を計算した。 $|P_{mc}^{cal} - P_{mc}^{set}|^2 - (\delta P_{mc}^{cal^2} + \delta P_{mc}^{set^2})$  が 0 よりも大きい場合には、導出した機械的中心と設定した機械的中心とが誤差の範囲内で一致しないため、GPT 計算で仮定した空洞 1 の機械的中心の位置  $(X_{mc}, Y_{mc})$  を変更し、 $|P_{mc}^{cal} - P_{mc}^{set}|^2 - (\delta P_{mc}^{cal^2} + \delta P_{mc}^{set^2})$  が 0 よりも小さくなるまで、ビーム軌道計算と電氣的中心および機械的中心の計算を繰り返した。ここで、空洞 1 の機械的中心は、GPT 計算において空洞のオフセット量と傾きとを指定することで決まるので、機械的中心の位置を変更するときには、オフセット量のみを変更することとした。その過程で設定した機械的中心の位置と導出した機械的中心とを図 7-7 に示す。導出した機械的中心と設定した機械的中心とが最初に誤差の範囲で一致したのは 5 回目の試行であった。このとき、GPT 計算時のパラメータは表 7-4 に記載されている値であった。そのときの電氣的中心と機械的中心の座標は表 7-3 にまとめたが、局在モードの電氣的中心は  $(x_{ec}, y_{ec}) = (-0.5 \pm 0.15 \text{ mm}, -0.175 \pm 0.325 \text{ mm})$  であり、機械的中心と電氣的中心の偏差  $(\Delta x_{me}, \Delta y_{me}) = (-1.09 \pm 0.26 \pm 0.23 \text{ mm}, 1.48 \pm 0.21 \pm 0.07 \text{ mm})$  より、機械的中心は局在モードの電氣的中心から機械的中心と電氣的中心の偏差を差し引き、 $(x_{mc}^{cal}, y_{mc}^{cal}) = (x_{ec} - \Delta x_{me}, y_{ec} - \Delta y_{me}) = (0.59 \pm 0.38 \text{ mm}, -1.66 \pm 0.39 \text{ mm})$  と求められた。このときの誤差は差を求めたときの誤差伝搬から求めている。

表 7-3 : 導出した機械的中心と設定した機械的中心とが最初に一致したとき (図 7-7 の 5 回目) の座標

	$x$ [mm]	$y$ [mm]
局在モードの電氣的中心 $(x_{ec}, y_{ec})$	$-0.5 \pm 0.15$	$-0.175 \pm 0.325$
機械的中心と電氣的中心の偏差 $(\Delta x_{me}, \Delta y_{me})$	$-1.09 \pm 0.26 \pm 0.23$	$1.48 \pm 0.21 \pm 0.07$
空洞 1 の機械的中心 $(x_{ec} - \Delta x_{me}, y_{ec} - \Delta y_{me})$	$0.59 \pm 0.38$	$-1.66 \pm 0.39$

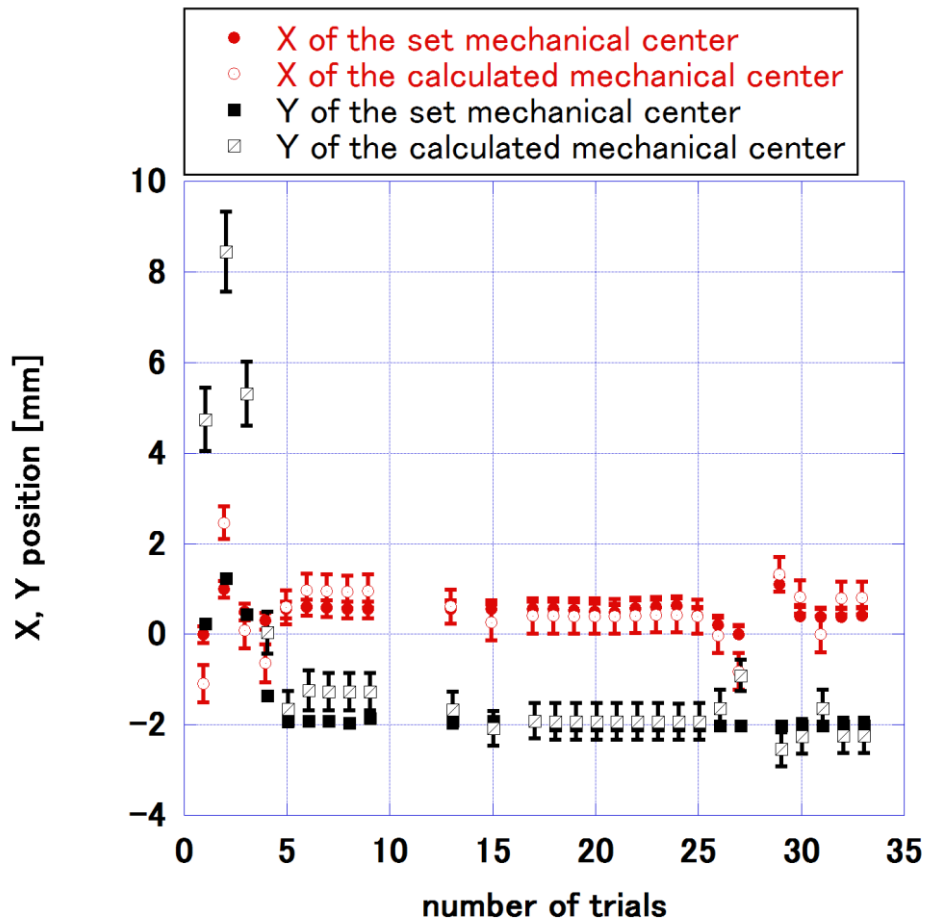


図 7-7：設定した機械的中心位置と導出した機械的中心の推移

表 7-4：パラメータの最終値

Parameters	Final Values
xini	-0.2 mm
yini	4.96 mm
BfieldX00	0.6 mT
BfieldY00	4.3 mT
A	0.90

## 7.6. 本研究手法により求められた機械的中心

導出される機械的中心の位置は設定する機械的中心の位置によって変化する。図 7-8 には図 7-7 中の導出された機械的中心に対する  $|P_{mc}^{cal} - P_{mc}^{set}|^2 - (\delta P_{mc}^{cal^2} + \delta P_{mc}^{set^2})$  を示す。 $|P_{mc}^{cal} - P_{mc}^{set}|^2 - (\delta P_{mc}^{cal^2} + \delta P_{mc}^{set^2})$  が 0 以下となる範囲が本研究にて求める機械的中心の範囲である。その範囲を図 7-8 を二次関数でフィットすることで求め、それは  $(x_{mc}, y_{mc}) = (0.44 \pm 0.56 \text{ mm}, -1.95 \pm 0.40 \text{ mm})$  であった。

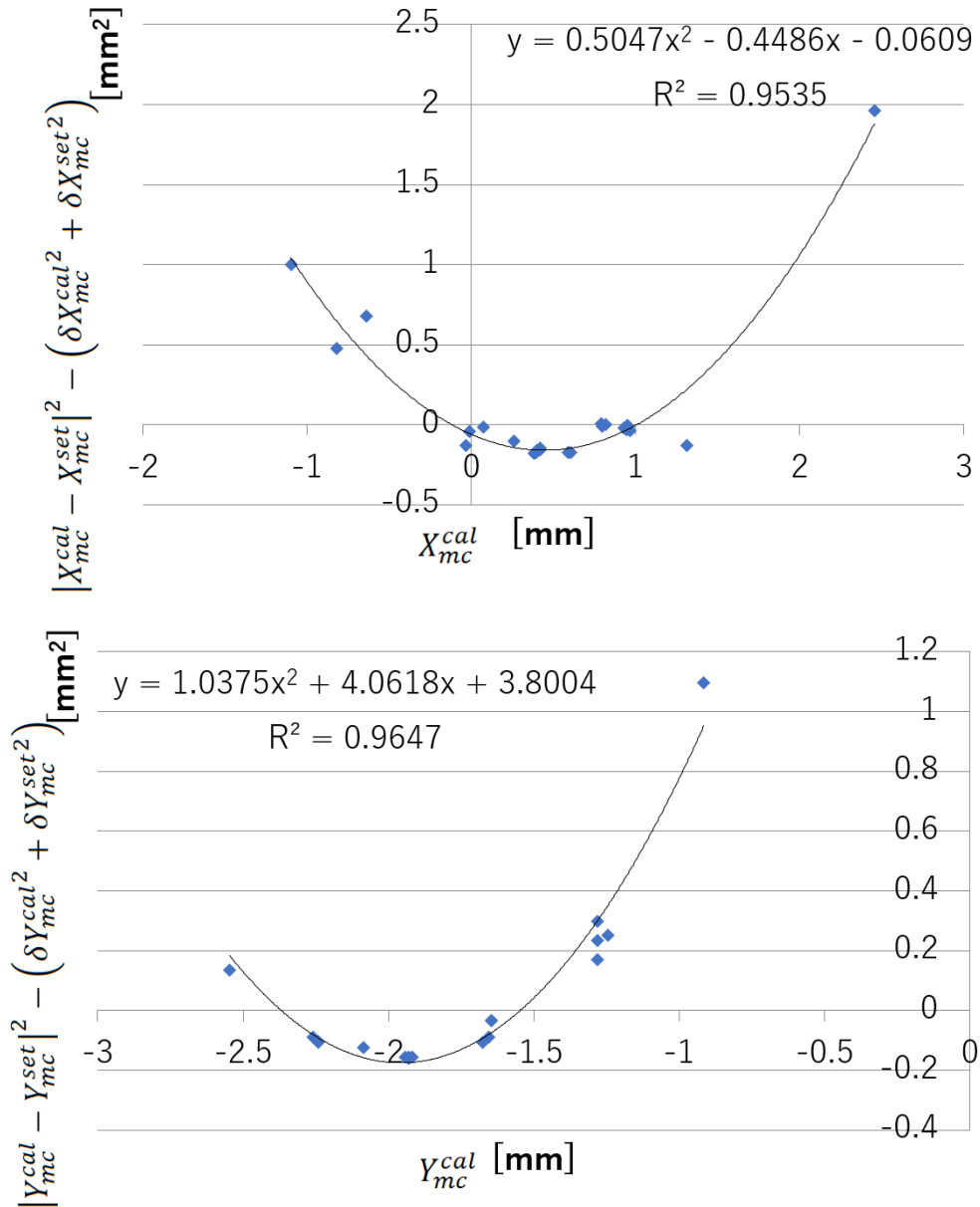


図 7-8 : 機械的中心の範囲

## 第8章. 議論

本研究においては、空洞1の傾きと空洞2のオフセットと傾きは固定した。空洞2を固定した理由は、空洞1通過時よりも空洞2通過時のビームエネルギーが高いため、ビーム軌道が空洞2から受ける影響は空洞1よりも小さいためである。さらに、オフセットと傾きとでは、空洞のオフセット量に主に影響を及ぼす冷却による均一な熱収縮量の見積もり誤差が大きいと考え、空洞1のオフセットに対し空洞1の傾きの影響は小さくなるので、空洞1の傾きは固定した。そして、空洞1のオフセットのみ可変パラメータとして取り扱ったので、これらの固定したパラメータが機械的中心にどの程度の影響を与えるのかを調べ、表 8-1 にまとめた。アライメント精度から期待される誤差はオフセットでは 0.1 mm、傾きでは 0.2 mrad である。空洞1の傾きを 0.2 mrad だけ変化させると、ビーム軌道が再構成でき、計算された機械的中心と導かれた機械的中心とが一致したとき、機械的中心は  $(x_{mc}^{cal}, y_{mc}^{cal}) = (0.82 \pm 0.36 \text{ mm}, -2.26 \pm 0.38 \text{ mm})$  となった。同様に、空洞2のオフセットを 0.1 mm だけ変化させたとき、機械的中心は  $(x_{mc}^{cal}, y_{mc}^{cal}) = (-0.01 \pm 0.40 \text{ mm}, -1.64 \pm 0.41 \text{ mm})$  となった。空洞2の傾きを 0.2 mrad だけ変化させたとき、機械的中心は  $(x_{mc}^{cal}, y_{mc}^{cal}) = (0.80 \pm 0.37 \text{ mm}, -2.24 \pm 0.39 \text{ mm})$  となった。固定されたアライメントパラメータの期待される誤差に対する求める機械的中心の変化量は、この解析で得られた電気的中心  $(x_{mc}, y_{mc}) = (0.44 \pm 0.56 \text{ mm}, -1.95 \pm 0.40 \text{ mm})$  の誤差範囲に入る程度である。

表 8-1 : 固定したパラメータの影響

条件	機械的中心
空洞1 傾きを 0.2 mrad だけ変化させたとき	$(x, y) = (0.82 \pm 0.36 \text{ mm}, -2.26 \pm 0.38 \text{ mm})$
空洞2 オフセットを 0.1 mm だけ変化させたとき	$(x, y) = (-0.01 \pm 0.40 \text{ mm}, -1.64 \pm 0.41 \text{ mm})$
空洞2 傾きを 0.2 mrad だけ変化させたとき	$(x, y) = (0.80 \pm 0.37 \text{ mm}, -2.24 \pm 0.39 \text{ mm})$

STF 加速器において、空洞の下流ビームパイプにはインプットカプラーがあるため、アライメント検出に有用な局在モードはなかった。しかしながら、もし局在モードが存在するに適した空洞構造を構成することができれば、上流と下流の空洞端部で機械的中心を求める事が可能となり、空洞のオフセットと傾きをすべて求めることが可能になると期待できる。

本研究で導入した機械的中心を得る方法を簡単にまとめる。この方法は、空洞が超伝導か常伝導かに関わらず、局在モードが存在すれば応用出来る方法であり、その応用範囲は広い。

- (1) ビーム掃引中に局在モードの振幅測定を実施する
- (2) ビーム位置モニターのデータを用いて、ビーム軌道を再構成する
- (3) (1) (2) より、機械的中心を求める
- (4) (2) (3) を繰り返し、加速器パラメータを決定する

局在モードを使用したことによる機械的中心の誤差低減への効果を議論する。図 8-1 の横軸の全長は空洞 1 の長さに相当し、縦軸にはビームの  $x$  座標を示す。緑色で塗られた範囲は局在モードが誘起される範囲である。空洞全体でのビームの変位量は  $1.2\text{ mm}$  であるが、局在モードが誘起される範囲でのビームの変位量は  $0.30\text{ mm}$  である。よって、局在モードを使用したことにより、高調波モードの誘起範囲内での横方向ビーム偏差量を低減させることが可能になり、誤差を 4 分の 1 にすることが可能になった。

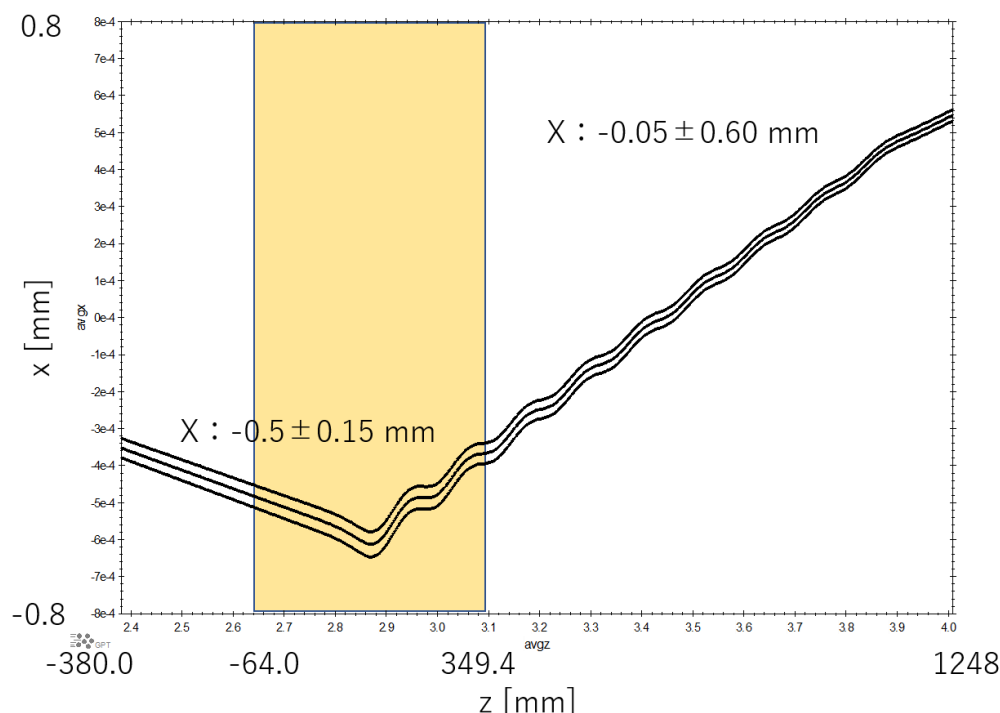


図 8-1：空洞内でのビーム軌道変位と局在モード誘起範囲内でのビーム軌道変位

## 第9章. 今後の課題と検討

本研究においては、空洞 1 の傾き、空洞 2 のオフセットと傾きを固定して解析を行った。これらの固定した空洞パラメータを含めた軌道解析を行うためには、パラメータ自由度を規定するための BPM の追加や加速場を変えての測定が必要である。

また、測定精度向上のためには、以下の改善策が挙げられる。

- 局在モードの電氣的中心の計算精度を上げる
- 製作誤差をあらかじめ実測し、計算モデルに組み込む
- 局在モードの利用により、長手方向範囲を制限することができたが、より局在するモードを使用することができれば、測定精度の向上が見込まれる。

また、本研究において開発された非直線な軌道による空洞の電氣的中心を求める手法は以下の加速器に適用可能である。

- ビームエネルギーが低い加速器に適用できる。
- 超伝導空洞・常伝導空洞どちらにも適用可能である。
- 局在モードを検出できる加速器に適用できる。



## 第10章. 結論

加速空洞のフリンジ場によりビーム軌道が曲げられる程ビームエネルギーが低い場合にも，局在モードの電気的中心および空洞の機械的中心を導出する方法を開発した。ビーム誘起局在ダイポールモードの電気的中心および空洞の機械的中心を取得するためには次の方法で行う。

- (1) 空洞上流にあるダイポールマグネットを用いてビーム掃引を行い，その間に局在ダイポールモードの振幅・空洞上下流でのビーム通過位置の測定を行う。
- (2) (1)で測定した局在ダイポールモードの振幅とダイポールマグネットの電流値より，ビームが電気的中心を通過するときのダイポールマグネット電流値を計算する。
- (3) ビーム軌道を再構成するための GPT コードでのビーム軌道計算の準備として，空洞の機械的中心位置を仮定する。
- (4) (1)で測定したビーム通過位置を再現するビーム軌道を再構成できる加速器パラメータを GPT コード用いて推定する。(再構成できたかは，測定ビーム通過位置と計算したビーム通過位置との偏差の二乗 $s^2$ で判断する。)
- (5) (4)で得られた加速器パラメータを用いて，(2)で求めたダイポールマグネット電流値でのビーム軌道を計算し，局在ダイポールモードの分布範囲内でのビーム軌道変位から電気的中心を求める。
- (6) 局在ダイポールモードの電気的中心座標を空洞の機械的中心座標に変換する。(CST 計算により，求まる局在ダイポールモードの電気的中心と空洞の機械的中心との偏差を用いる。)
- (7) (3)で仮定した空洞の機械的中心と(6)で求めた機械的中心とが誤差の範囲で一致するまで (3) ～ (6) を繰り返す。

この方法により，STF 加速器の 9 セル超伝導空洞内の局在ダイポールモードを用いて求めた機械的中心は $(x, y) = (0.44 \pm 0.56 \text{ mm}, -1.95 \pm 0.40 \text{ mm})$ であった。この方法は，電磁場計算による局在モードの電気的中心と機械的中心の偏差の導出，ビーム誘起された局在モードによる電気的中心の計算，ビーム軌道計算とを統合した，新たな手法であり，非直線軌道ビームの下においても加速空洞の位置を推定できるものである。

## 付録A. ビーム位置モニターの校正と分解能

ビーム位置モニターにはボタン型電極（図 A-1 参照）によるピックアップとクリッピング回路および charge ADC（図 A-2）が使用されている。ボタン型電極からのビーム信号はゲート幅 30 ns でバンチにわたって電荷積分を行い、その電圧を取りだし、4つの電極信号電圧から位置を導出している。本測定では BPM がアライメントの基準であるので、BPM の校正を行い、正確にビーム位置が計測できるようにした。ビーム位置校正は次の順で行った。

- 1) ペDESTAL補正
  - 2) ベースラインクリップ回路補正
  - 3) BPM モデルシミュレーションによる位置感度係数の算出
- それぞれについて以下に述べる。

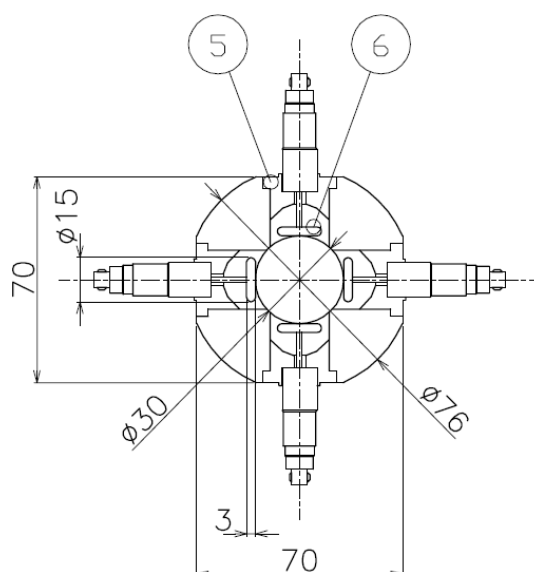


図 A-1 : ボタン型 BPM の断面図

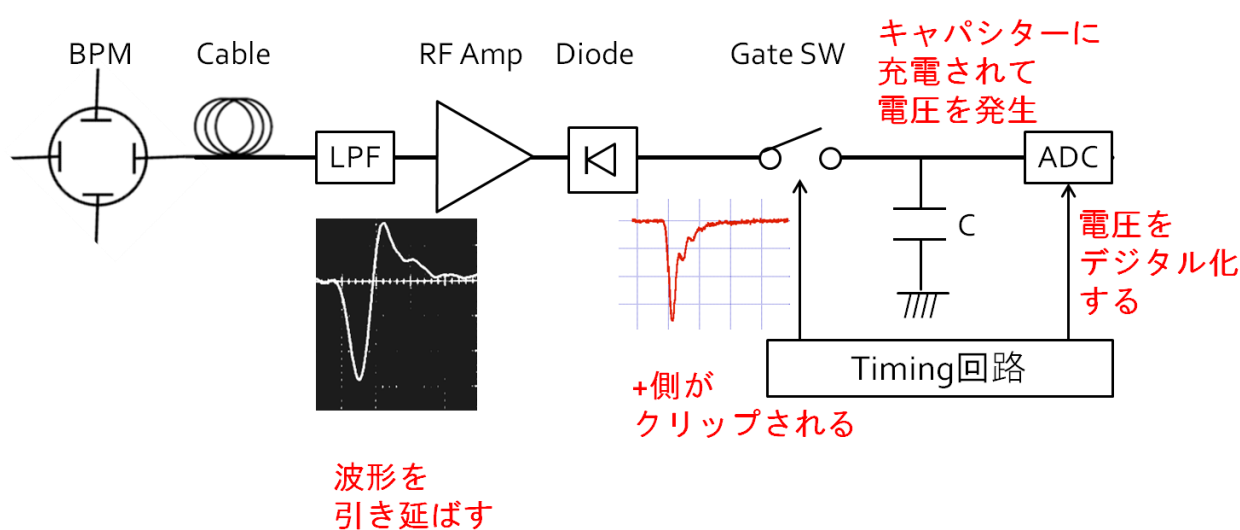


図 A-2 : クリッピング回路の概念図

## 1) ペDESTAL測定

ビームがない状態で 1000 回の charge ADC データの平均を取り、ペDESTALとした。それぞれのチャンネルのペDESTALを表 A-1 に示す。

表 A-1 : 各チャンネルのペDESTAL

チャンネル名	ペDESTAL
MB03CH1	600.97
MB03CH2	588.49
MB03CH3	503.72
MB03CH4	514.63
MB04CH1	590.95
MB04CH2	599.12
MB04CH3	566.03
MB04CH4	625.65

## 2) ベースラインクリップ回路の補正

まず図 A-3 の ADC カウント取得のセットアップを用意し、BPM の一つのチャンネルのビーム信号が減衰器を通した後、クリッピング回路の CAL IN に挿入し、どのチャンネルも同じ信号が入力されるようにした。その上で、フォトカソードに照射するレーザーの強度を変化させたときの ICT-01 で測定したビーム電流強度とそのときの charge ADC カウントの関係を調べた。このとき、減衰器は 0dB である。測定結果を図 A-4 に示す。

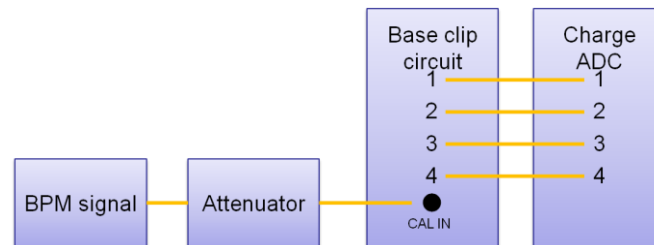


図 A-3 : ベースラインクリップ回路測定時のセットアップ

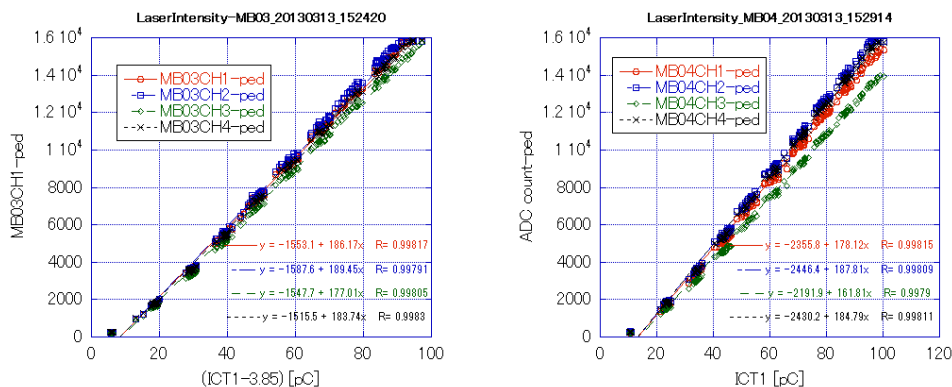


図 A-4 : 電流値に対する ADC カウントの応答

(左) 上流側の BPM (MB03) の測定結果, (右) 下流側の BPM (MB04) の測定結果

得られたビーム電流値に対する charge ADC カウントの応答を次式でフィットし、パラメータ  $a$ ,  $b$  を得た。

$$(ADC - ped) = a \times (ICT - ped) + b$$

次に、減衰器の強度を変えたときのクリッピング回路の応答を調べた。ここで、ビーム強度は、減衰器が 0dB のときに、ADC カウントのレンジを十分に外れるように設定した。期待される ADC カウントを先に求めたパラメータ  $a$ ,  $b$  を用いて

$$(a \times (ICT - ped) + b) \times 10^{\left(\frac{-att}{20}\right)}$$

と定義し、実測された ADC カウントとの相関を以下の式でフィットした。

$$ADC_{exp} = m1 \times (ADC - ped) + m2 \times \sqrt{ADC - ped} + m3$$

その結果を MB-03 については図 A-5 と MB-04 については図 A-6 に示す。チャンネル間のゲイン比の補正として、図 A-4 の測定データに対して、CH1 と CH3 の ADC カウント、CH2 と CH4 の ADC カウントのゲイン比を測定した。その結果を図 A-7 に示す。

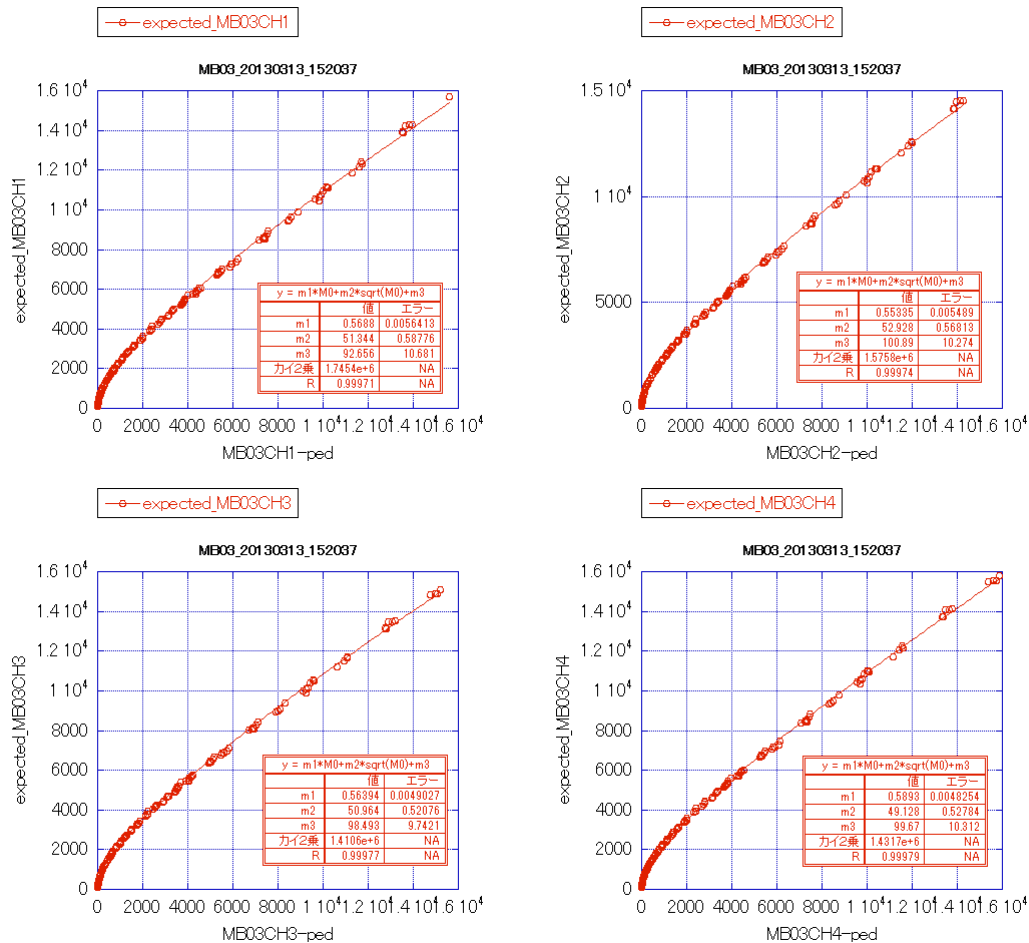


図 A-5: MB03 の各チャンネルの期待される ADC カウントと実測された ADC カウントとの相関

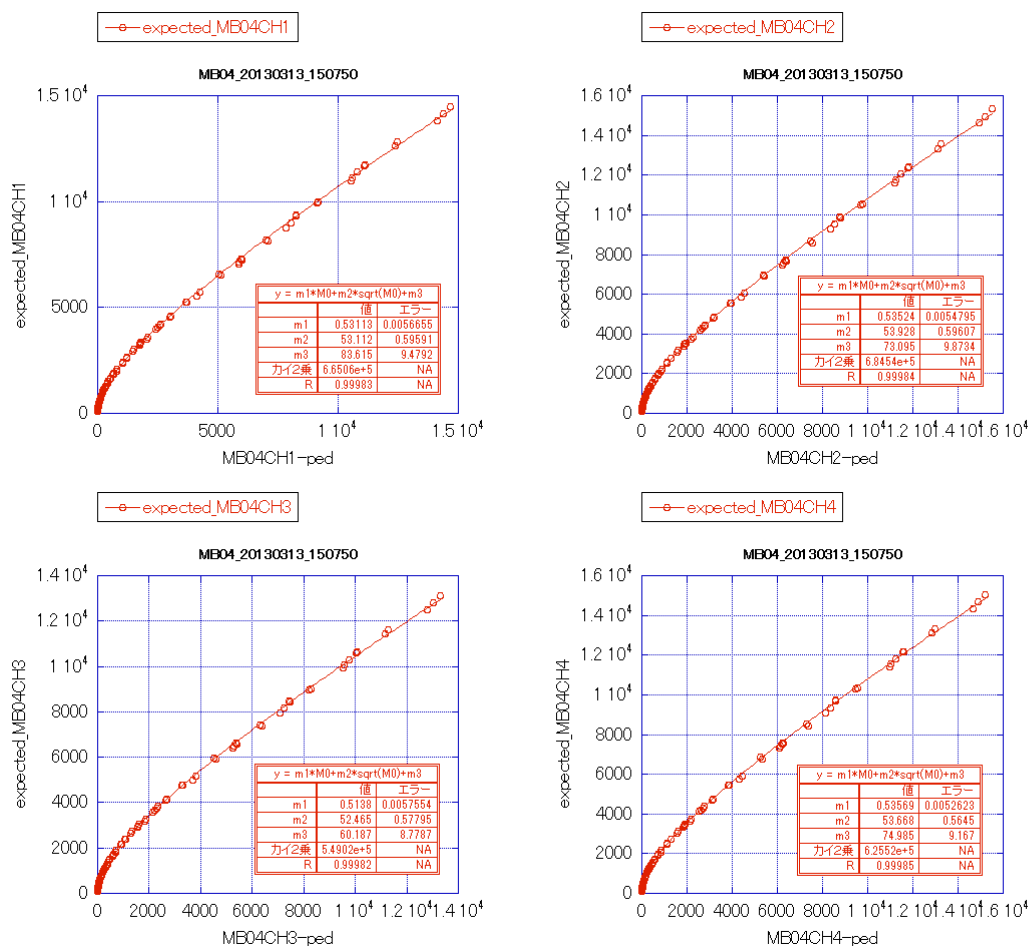


図 A-6 : MB04 の各チャンネルの期待される ADC カウントと実測された ADC カウントとの相関

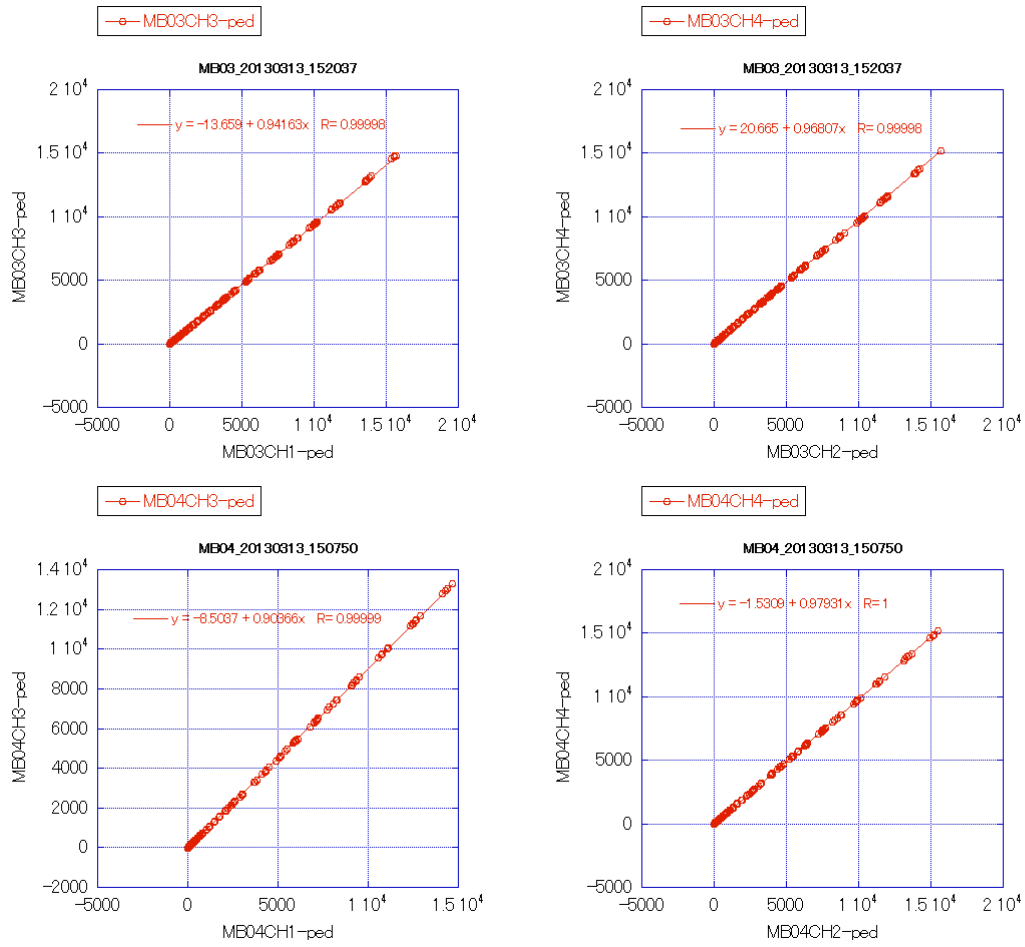


図 A-7 : チャンネル間のゲイン比

ここまで求めた以下の式に

$$ADC1_{exp} = m1 \times (ADC1 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC1 - ped} + m3$$

$$ADC3_{exp} = m1 \times (ADC3 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC3 - ped} + m3$$

ここで求めた CH1 と CH3 のゲイン比を想定した値を  $ADC1-ped$  ならびに  $ADC3-ped$  に入れ、このときのチャンネル間の相関をプロットしたのが図 A-8 であり、次式

$$ADC3_{exp} = ADC1_{exp} \times c + d$$

でのフィットを行い、最終的なゲイン比を求めた。

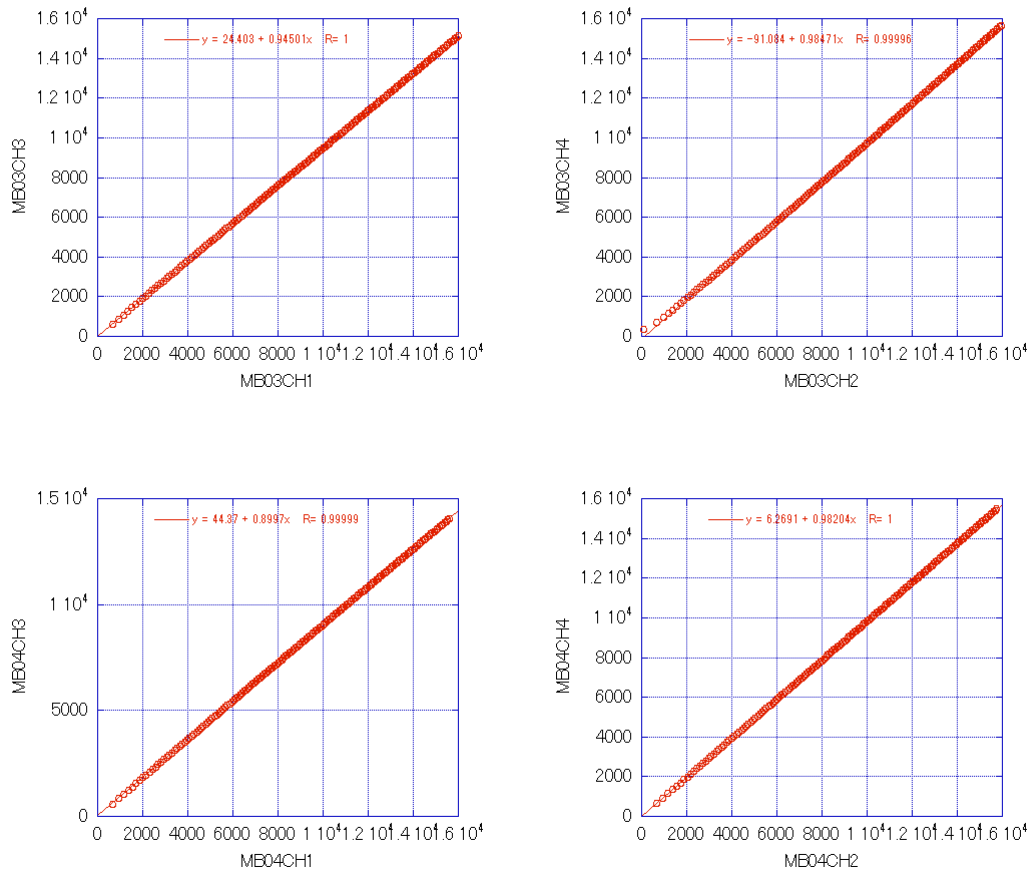


図 A-8 : チャンネル間の相関

以上の校正により，ADC カウントを以下の式で求める。

$$ADC1_{corr} = ADC1_{exp} \times c + d = (m1 \times (ADC1 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC1 - ped} + m3) \times c + d$$

$$ADC3_{corr} = ADC3_{exp} = m1 \times (ADC3 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC3 - ped} + m3$$

同様に CH2，CH4 においても

$$ADC2_{corr} = ADC2_{exp} \times c + d = (m1 \times (ADC2 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC2 - ped} + m3) \times c + d$$

$$ADC4_{corr} = ADC4_{exp} = m1 \times (ADC4 - ped) + m2 \times \sqrt{ADC4 - ped} + m3$$

となる。

### 3) BPM モデルシミュレーションによる位置感度係数の算出

ここまではクリッピング回路の校正であり，BPM 電極の電磁場分布による補正も必要である。そこで，BPM モデルのシミュレーション計算を HFSS [28]で行い，ビーム位置を計算する式の補正式を求めることにした。

BPM モデルを図 A-9 に示す。ビームパイプ径  $\phi 30$  mm である。中央にボタン電極を配置し，左側から同軸アンテナを挿入した。同軸アンテナの内導体の半径は 0.635 mm，外導体の半径は 1.46115 mm とし，内導体露出部の長手方向 30 mm の長さであり，中心が BPM の中心に合わせてある。

アンテナからの放射が安定で，かつ，ビーム放射に近いようにするため，BPM 電極に曲がった電場が入

らないようなアンテナ内導体の露出長さを選んだ。

アンテナの位置のオフセット量を-13.5 から 13.5 mm の間を 1.5 mm ずつ変化させたときのアンテナから BPM 電極への S パラメータを計算し (図 A-10 参照), アンテナ位置を BPM 計算式から推定したものが図 A-11 である。S パラメータを計算した周波数はビームの繰り返し周波数である 162.5 MHz とし, S パラメータの計算値が収束する Max. Mag. Delta S が 0.008 以下とした。

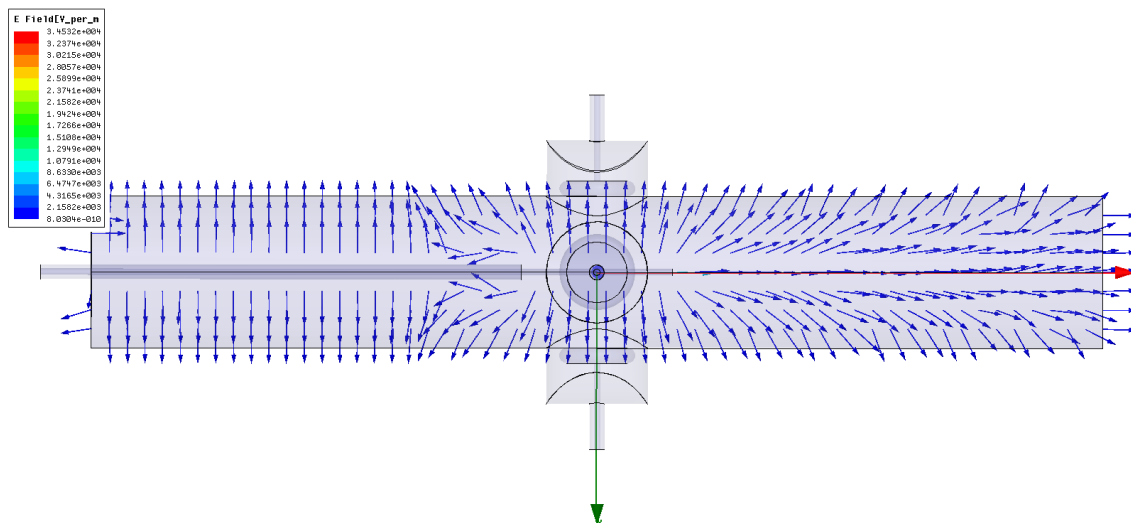


図 A-9 : BPM モデル

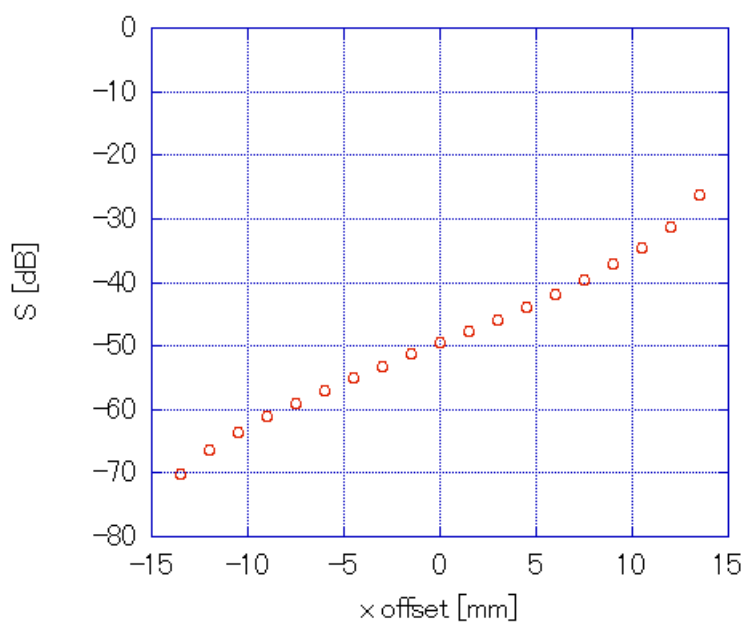


図 A-10 : アンテナ位置を変えたときの S パラメータ



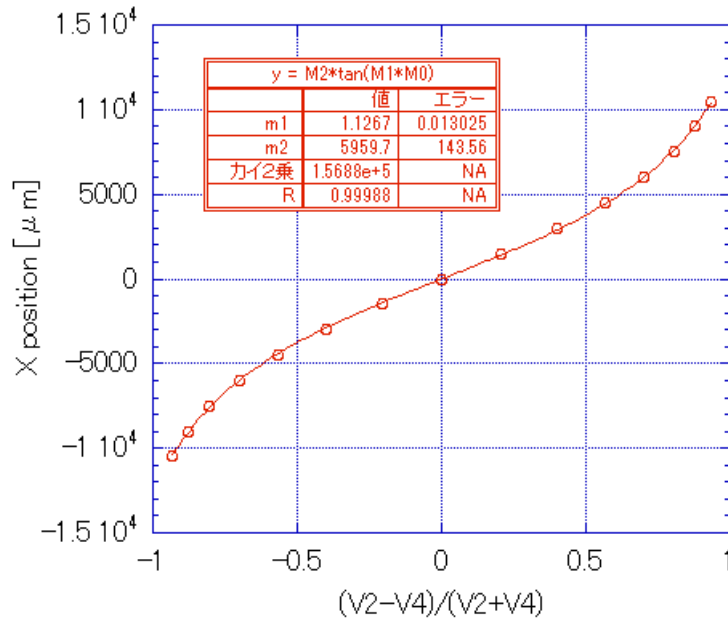


図 A-11 : BPM モデル計算

図 A-11 より

$$X = 5959.7 \times \tan(1.1267 \times \frac{V2 - V4}{V2 + V4}) [\mu m]$$

となることが分かったので、

$$X = \frac{ADC2_{corr} - ADC4_{corr}}{ADC2_{corr} + ADC4_{corr}}, Y = \frac{ADC3_{corr} - ADC1_{corr}}{ADC3_{corr} + ADC1_{corr}}$$

とすると、最終的なビーム位置は以下の式で計算される。

$$X_{corr} = 5959.7 \times \tan(1.1267 \cdot X), Y_{corr} = 5959.7 \times \tan(1.1267 \cdot Y)$$

このモデルで使用したアンテナの太さが有限であるので、表面において電荷再配分効果が生じ、正確なビーム位置推定式に影響を及ぼすことが考えられる。この効果は文献 [29]によると、以下の式で見積られる。

$$\frac{\sigma}{\delta} = 1 - \frac{R_{wire}^2}{R_{BPM}^2}$$

このとき  $\sigma$  は BPM 中心からアンテナ中心までのオフセット量であり、 $\delta$  は BPM 中心から電荷再配分の効果によって電氣的中心がアンテナ中心からずれた量を含むオフセット量である。 $R_{wire}$  と  $R_{BPM}$  はそれぞれアンテナ半径と BPM 半径である。このモデルにおいてアンテナ内導体の半径が 0.635 mm, BPM の半径が 15 mm であり、アンテナ表面での電荷の再配分の効果はオフセット 10.5 mm で 19  $\mu m$  のシフトを与える。

また、ビーム位置モニターの分解能について、ペDESTALカウNトの揺れを検出回路のノイズによる揺れ  $\angle V$  と解釈し、ビーム信号があるときの検出 ADC カウNトを信号強度とし、これらを S/N 比とし

て、ビーム位置の分解能 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ を次式で計算した。 $R$ はBPMの中心から電極までの内半径であり、12 mmである。

$$\begin{aligned}
\Delta X &= \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial(ADC2)}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial(ADC4)}\right)^2} \cdot \Delta(ADC2) \\
&= \sqrt{\left(\frac{R(ADC4)}{((ADC2) + (ADC4))^2}\right)^2 + \left(\frac{-R(ADC2)}{((ADC2) + (ADC4))^2}\right)^2} \cdot \Delta(ADC2) \\
&= \frac{R\sqrt{(ADC2)^2 + (ADC4)^2}}{((ADC2) + (ADC4))^2} \cdot \Delta(ADC2) [\text{mm}] \\
\Delta Y &= \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial(ADC1)}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial(ADC3)}\right)^2} \cdot \Delta(ADC1) = \frac{R\sqrt{(ADC1)^2 + (ADC3)^2}}{((ADC1) + (ADC3))^2} \cdot \Delta(ADC1) [\text{mm}]
\end{aligned}$$

実際の数値を代入するとMB03の分解能はx方向18  $\mu\text{m}$ 、y方向14  $\mu\text{m}$ と求められた。MB-04も同様の分解能である。

## 付録B. set0～set9 でのダイポールマグネット電流値とビーム通過位置の測定データ

第6章で測定した10回のビーム掃引(set0～set9)でのダイポールマグネット電流値(ST2-X, ST2-Y)に対するMB03およびMB04でのビーム通過位置を表B-1～表B-10にまとめた。set0～set4はST2-Xのダイポールマグネット電流値を変え、x方向にビーム軌道を変化させたときのデータであり、それぞれの掃引で異なるST2-Yの電流値をもつ。set5～set9はST2-Yのダイポールマグネット電流値を変え、y方向にビーム軌道を変化させたときのデータであり、それぞれの掃引で異なるST2-Xの電流値をもつ。

表 B-1 : set0 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	2.48	-1.018	1003.5	-11.137	-6493.2	33.074
2	2.48	-1.018	943.4	-115.08	-6043.2	17.686
3	2.38	-1.015	906.26	-61.873	-6051.1	49.108
4	2.38	-1.018	900.16	-155.95	-5580.5	108.89
5	2.281	-1.018	925.1	-105.44	-5505.7	36.987
6	2.281	-1.018	871.51	-165.23	-4898.6	60.685
7	2.181	-1.018	950.88	15.792	-4658.3	57.935
8	2.181	-1.018	922.1	35.584	-3985.6	3.1223
9	2.081	-1.015	952.98	156.59	-3937.3	-15.607
10	2.079	-1.015	891.89	173.71	-3305.6	54.954
11	1.979	-1.018	908.84	125.72	-3376	55.312
12	1.979	-1.018	902.86	113.53	-2683.4	59.275
13	1.879	-1.018	901.73	198.52	-2634.9	55.05
14	1.879	-1.018	907.34	47.922	-2820.9	73.976
15	1.879	-1.018	889.8	64.108	-2254.7	18.356
16	1.782	-1.018	901.27	-27.879	-2388.2	71.483
17	1.782	-1.018	857.67	63.914	-2229	43.157
18	1.782	-1.018	781.05	67.621	-1619.4	43.483
19	1.68	-1.018	819.87	73.033	-1664.5	48.855
20	1.68	-1.018	802.28	22.524	-1680.2	60.523
21	1.58	-1.018	785.94	11.941	-1117.9	28.288
22	1.58	-1.015	801.57	-1.1663	-1191.8	36.6
23	1.577	-1.015	736.12	95.149	-1032.9	66.615
24	1.577	-1.018	740.24	89.797	-607.49	54.341
25	1.48	-1.018	728.44	139.63	-525.47	55.694
26	1.48	-1.018	722.87	61.039	-566.43	42.509
27	1.48	-1.018	710.41	77.842	-11.238	103.26
28	1.38	-1.018	706.95	2.3103	-49.912	71.415
29	1.38	-1.018	674.39	111.48	577.1	68.599
30	1.281	-1.018	713.04	45.061	575.71	85.751
31	1.281	-1.018	664.26	74.75	1241.5	110.67
32	1.181	-1.018	630.34	73.004	1213.5	78.388
33	1.181	-1.018	575.47	148.57	1879.1	104.98
34	1.081	-1.018	579.55	141.06	1814.1	105.92
35	1.081	-1.018	543.61	76.878	2310.5	81.607

36	0.981	-1.018	516.02	102.01	2338.2	60.047
37	0.981	-1.018	432.94	125.27	2852.9	77.217
38	0.882	-1.015	413.63	53.714	2792.1	22.719
39	0.882	-1.018	406.29	10.664	2766	64.077
40	0.882	-1.018	364.52	-41.975	3363.6	71.489
41	0.782	-1.018	373.45	-29.782	3325	84.346
42	0.782	-1.015	349.89	-37.953	3343.6	65.985
43	0.782	-1.018	363.43	-63.032	3917.9	79.93
44	0.682	-1.018	376.78	58.254	4001.8	53.829
45	0.682	-1.018	364.76	52.903	4057.9	75.13
46	0.582	-1.018	312.29	9.0314	4694.1	51.431
47	0.582	-1.018	318.22	-73.922	4596.1	73.353
48	0.582	-1.018	321.03	79.969	4696.5	15.311
49	0.582	-1.018	312.26	-63.604	5302.6	48.143
50	0.48	-1.015	284.56	17.384	5314.8	65.116
51	0.48	-1.018	285.17	9.1631	5260.9	57.331
52	0.48	-1.018	264.77	-42.808	5873	9.4147
53	0.383	-1.018	246.27	-41.102	5937.7	61.337

---

表 B-2 : set1 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	2.577	-0.855	1141.9	60.155	-6130.7	686.48
2	2.48	-0.855	1121.9	25.017	-6093.8	714.7
3	2.48	-0.855	1127.6	91.511	-5509.6	800.37
4	2.383	-0.855	1121.2	148.15	-5482.8	766.56
5	2.38	-0.855	1157.1	188.58	-5442.3	877.46
6	2.38	-0.855	1128.3	188.72	-4801.9	1029.9
7	2.281	-0.855	1113.4	263.31	-4681.5	1066.5
8	2.281	-0.855	1104.7	240.04	-4740	1008.6
9	2.281	-0.855	1086.3	204.4	-4175	1016.7
10	2.181	-0.855	1088.6	214.6	-4179.4	1014.1
11	2.181	-0.855	1092.9	131.52	-4239.6	968.66
12	2.081	-0.855	1035	254.82	-3547.7	947.49
13	2.081	-0.853	1044.6	183.3	-3632.3	944.88
14	1.979	-0.855	995.97	160.6	-3102.8	952.28
15	1.979	-0.855	986.78	232.98	-2976.7	963.23
16	1.879	-0.855	884.94	351.62	-2346.4	1008.4
17	1.879	-0.855	961.71	238.73	-2471.6	953.29
18	1.782	-0.855	911.32	252.47	-1823.9	1022.6
19	1.782	-0.855	910.99	268.58	-1855.8	1009.8
20	1.68	-0.855	891.97	191.49	-1370.3	1040.8
21	1.68	-0.855	865.86	165.85	-1357.8	981.25
22	1.68	-0.855	899.85	204.79	-1418	992.89
23	1.68	-0.855	833.9	143.64	-786.78	977.41
24	1.58	-0.855	807.73	200.21	-849.18	946.83
25	1.58	-0.855	837.38	169.25	-834.71	975.6
26	1.58	-0.855	816.64	219.2	-249.29	1008.7
27	1.48	-0.855	807.2	175.64	-278.13	957.96
28	1.48	-0.855	723.27	220.49	316.42	979.12
29	1.38	-0.855	743.58	268.98	345.12	988.48
30	1.38	-0.855	780.96	173.83	256.76	1005.3
31	1.38	-0.855	699.41	170.53	972.55	1005.3
32	1.281	-0.855	721.87	156.5	846.83	1011.6
33	1.281	-0.855	687.36	210.17	1454	1029.9
34	1.181	-0.855	659.43	227.38	1547.1	1011
35	1.181	-0.855	669.48	196.69	2021.7	1041.6

36	1.081	-0.855	629.42	308.31	2127	972.96
37	1.081	-0.855	621.25	207.05	2609.4	1000.1
38	0.981	-0.855	618.87	129.94	2577.1	941.22
39	0.981	-0.855	642.81	169.96	2549.1	1009.6
40	0.882	-0.855	553.69	127.98	3174.4	908.28
41	0.882	-0.855	582.95	58.381	3126.9	938.78
42	0.882	-0.855	522.95	172.45	3734.4	915.8
43	0.782	-0.855	529.93	42.992	3616.7	877.52
44	0.782	-0.855	496.03	-48.793	3388.9	821.17
45	0.685	-0.855	442.82	102.1	4168.8	847.54
46	0.685	-0.855	433.59	175.16	4345	846.45
47	0.685	-0.853	456.44	178.47	4289.1	864.54
48	0.685	-0.855	398.26	113.03	4928.4	819.17
49	0.582	-0.855	376.42	122.62	4783.6	807.25
50	0.582	-0.855	327.48	30.526	4592.5	779.24
51	0.582	-0.855	264.62	23.008	5269.6	773.24
52	0.48	-0.855	270.12	-79.981	5172.4	790.29
53	0.483	-0.855	230.86	-11.183	5879.4	764.98
54	0.383	-0.855	271.22	-14.748	5913.9	734.36
55	0.383	-0.855	239.55	84.642	6006	741.16
56	0.283	-0.855	225.81	-6.7782	6493.3	698.46

---

表 B-3 : set2 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	2.577	-0.656	1082.9	58.23	-5902.7	1597.3
2	2.48	-0.656	1072.8	102	-5932.8	1587.7
3	2.48	-0.656	1067.9	5.5425	-5892.3	1559.2
4	2.48	-0.656	1060.1	36.35	-5480.6	1675
5	2.38	-0.656	1025.4	19.503	-5363.9	1590.1
6	2.383	-0.656	1028.5	39.565	-5393.5	1638.2
7	2.281	-0.656	994.75	90.465	-4796.1	1746.7
8	2.281	-0.656	1000.8	-37.368	-4854	1735.8
9	2.281	-0.656	918.29	-40.129	-4259.4	1744.7
10	2.181	-0.656	957.73	-22.039	-4279.1	1792.8
11	2.181	-0.656	957.78	-44.646	-4270.9	1749.7
12	2.079	-0.656	929.15	19.259	-3671.2	1844.9
13	2.079	-0.656	942.63	89.348	-3571.2	1868.9
14	2.079	-0.656	932.9	60.059	-3063.9	2001.9
15	1.979	-0.656	949.07	93.954	-2917.4	2017.4
16	1.882	-0.656	919.77	30.696	-2369.5	2136.5
17	1.882	-0.656	932.85	25.85	-2408.2	2121.9
18	1.879	-0.656	860.02	124.57	-1728.5	2096
19	1.782	-0.656	876.04	68.236	-1817.1	2054.8
20	1.782	-0.656	819.01	111.22	-1833.4	2083.4
21	1.782	-0.656	801.38	86.711	-1233.2	2045.6
22	1.68	-0.656	826.93	36.301	-1367	2076.7
23	1.68	-0.656	798.94	50.104	-717.76	2141.7
24	1.58	-0.656	818.76	83.864	-587.44	2319.9
25	1.58	-0.656	821.36	111.59	-551.55	2356.4
26	1.58	-0.656	783.77	70.635	-102.98	2340.3
27	1.48	-0.656	786.68	70.126	-88.578	2348
28	1.48	-0.656	790.33	56.6	-125.79	2314.6
29	1.38	-0.656	704.29	178.13	507.77	2253.3
30	1.38	-0.656	727.32	150.67	462.45	2198
31	1.281	-0.656	679.18	99.241	1024.4	2295.3
32	1.181	-0.656	690.49	128.3	1644.1	2323.2
33	1.081	-0.656	662.23	93.116	2219.8	2414.4
34	0.981	-0.656	634.73	85.373	2752.4	2391.3
35	0.981	-0.656	589.87	128.15	2858.1	2447.4



36	0.882	-0.656	506.02	142.57	3540.2	2291.5
37	0.882	-0.656	564.43	98.54	3509.7	2408.4
38	0.882	-0.656	501.93	154.54	4119.4	2272.8
39	0.782	-0.656	496.14	194.51	4078	2222.8
40	0.782	-0.656	517.12	106.17	4000	2228.2
41	0.782	-0.656	482.04	152.62	4631.2	2145.1
42	0.685	-0.656	492.26	128.41	4597.3	2083
43	0.682	-0.656	427.27	105.07	5173.7	2048.8
44	0.582	-0.656	450.8	143.19	5286.6	2025.1
45	0.58	-0.656	455.82	37.526	5193.4	2031.9
46	0.582	-0.656	412.22	121.33	5774	1897.5
47	0.483	-0.656	395.71	206.43	5837.3	1933.4
48	0.483	-0.656	388.98	203.39	5850.7	1848.5
49	0.483	-0.656	345.42	203.56	6460.8	1746.2
50	0.383	-0.656	361.44	131.79	6345.4	1688.3
51	0.383	-0.656	299.2	196.17	6293.3	1672.5

---

表 B-4 : set3 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	2.58	-1.218	1153.5	217.13	-6232	-735.69
2	2.48	-1.218	1125	249.56	-6254.8	-697.99
3	2.48	-1.218	1129.6	277.67	-6113.4	-717.19
4	2.38	-1.218	1069.8	309.16	-5432.2	-765.14
5	2.38	-1.218	1121.3	327.72	-5548.2	-737.1
6	2.38	-1.218	1068.2	461.81	-4911.4	-746.61
7	2.281	-1.218	1063.8	330.41	-4803.3	-723.93
8	2.281	-1.218	1114.5	189.63	-5026.9	-736.75
9	2.181	-1.218	1018.7	308.68	-4399.7	-824.29
10	2.181	-1.218	998.38	202.49	-4519.8	-817.1
11	2.079	-1.218	961.74	163.65	-4007.1	-903.82
12	2.081	-1.218	954.63	163.98	-4049.5	-874.76
13	1.979	-1.218	901.8	200.04	-3359.6	-922.33
14	1.979	-1.218	855.58	242.04	-3332.4	-926.17
15	1.979	-1.218	862.13	268.22	-2714.6	-943.35
16	1.879	-1.218	847.72	219.91	-2745.4	-915.23
17	1.879	-1.218	884.14	247.3	-2785.5	-944.4
18	1.879	-1.218	839.2	206.99	-2124.8	-951.92
19	1.782	-1.218	824.18	251.44	-2229.4	-947.11
20	1.779	-1.218	756.39	185.47	-1719.3	-976.05
21	1.68	-1.218	708.57	172.46	-1790.9	-978.41
22	1.68	-1.218	685.1	24.392	-1877.2	-936.31
23	1.68	-1.218	687.88	34.945	-1392.7	-994.94
24	1.58	-1.218	675.14	80.939	-1310.8	-983.33
25	1.58	-1.218	697.11	181.56	-1163.3	-1007
26	1.58	-1.218	635.06	143.69	-601	-1004.8
27	1.48	-1.218	661.88	171.39	-684.06	-1025.4
28	1.48	-1.218	646.76	161.16	-636.51	-1001.2
29	1.38	-1.218	637.52	128.8	-81.422	-1027.5
30	1.38	-1.218	632.03	210.59	23.626	-1028.8
31	1.281	-1.218	584.01	197.57	526.24	-1013.4
32	1.281	-1.218	593.89	192.21	518.49	-979.65
33	1.181	-1.218	560.57	196.96	1095.2	-1008.3
34	1.181	-1.218	572.92	117.46	1075.2	-988.14
35	1.081	-1.218	536.95	118.4	1669.3	-1012.3

36	1.081	-1.218	531.57	208.46	1666.3	-1005.2
37	0.981	-1.218	476.2	166.28	2340.4	-1007.9
38	0.981	-1.218	495.58	216.23	2263.2	-949.62
39	0.981	-1.218	512.75	195.62	2245.4	-976.75
40	0.984	-1.218	443.36	24.145	2627.2	-992.51
41	0.882	-1.218	424.15	283.94	2993.4	-955.75
42	0.882	-1.218	461.31	243.62	2985.1	-989.55
43	0.882	-1.218	425.38	239.62	3532.1	-970.73
44	0.782	-1.218	460.49	254.46	3578.5	-925.08
45	0.782	-1.218	456.59	265.46	4422.6	-844.12
46	0.685	-1.218	457.24	328.2	4439.7	-831.58
47	0.682	-1.218	492.47	371.42	4411.1	-801.9
48	0.685	-1.218	445.54	295.51	4979.2	-831.35
49	0.582	-1.218	414.43	294.48	5150.9	-820.62
50	0.582	-1.218	414.95	226.42	4988.7	-844.78
51	0.582	-1.218	395.52	222.74	5596.3	-862.17
52	0.483	-1.218	426.91	200.29	5598.1	-834.28
53	0.48	-1.218	397.63	234.06	5620	-782.71
54	0.383	-1.218	384.48	259.81	6320.1	-712.41

表 B-5 : set4 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	2.577	-1.417	1163.6	340.07	-6029	-1250.8
2	2.48	-1.417	1168.8	395.83	-6033.3	-1258.9
3	2.48	-1.417	1127.3	448.04	-5997.6	-1365.1
4	2.38	-1.417	1128	383.99	-5421.5	-1389.8
5	2.38	-1.417	1106.3	448.88	-5354	-1394.3
6	2.38	-1.417	1112.6	375.73	-5334.5	-1361
7	2.38	-1.417	1092.4	398.86	-4735.8	-1334.3
8	2.281	-1.417	1074.2	410.5	-4846	-1132.2
9	2.081	-1.417	963.61	392.03	-2971.7	-1523.8

表 B-6 : set5 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	1.278	-0.417	672.76	42.788	1137.3	3690.2
2	1.278	-0.42	713.41	53.012	1046.2	3127.6
3	1.278	-0.42	682.14	59.474	1114.7	3163.1
4	1.278	-0.616	689.93	78.184	1091.8	2639.7
5	1.278	-0.616	691.18	120.3	1137.1	2710.2
6	1.278	-0.616	698.08	120.15	1077.1	2184.9
7	1.278	-0.819	696.08	169.31	1062.9	1546.2
8	1.278	-0.819	698.6	183.88	1008.9	988.32
9	1.278	-0.918	681.79	216.33	969.52	888.09
10	1.278	-0.918	716.49	76.392	821.99	892.5
11	1.278	-0.918	662.02	197.9	955.63	285.87
12	1.278	-1.018	671.62	192.61	889.44	254.48
13	1.278	-1.021	690.51	133.44	858.07	209.28
14	1.278	-1.018	696.07	321.1	875.76	-308.86
15	1.278	-1.12	685.87	297.24	864.75	-302.41
16	1.278	-1.12	680.84	270.73	910.81	-276.39
17	1.278	-1.22	694.99	240.94	813.88	-854.15
18	1.278	-1.22	680.58	357.55	913.25	-828.61
19	1.278	-1.22	684.05	334.31	925.63	-1327.9
20	1.278	-1.22	680.21	357.08	907.01	-1365.1
21	1.278	-1.32	682.99	357.43	862.66	-1368.2
22	1.278	-1.32	674.7	419.33	895.49	-1924.6
23	1.278	-1.32	690.18	434.72	836.29	-1931.6
24	1.278	-1.42	704.54	373.63	885.43	-1922.3
25	1.278	-1.519	713.76	421.41	832.69	-2450
26	1.278	-1.519	697.51	524.59	874.45	-2406.3
27	1.278	-1.619	736.32	486.59	907.69	-2913.9
28	1.278	-1.617	691.97	534.23	1030.2	-2726.8
29	1.278	-2.021	697.93	656.18	902.45	-5272.2
30	1.275	-2.021	765.56	615.13	789.65	-5244.7

表 B-7 : set6 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	1.076	0.06	672.13	-140.64	2063.5	5714.6
2	1.076	-0.021	623.66	-115.69	2168.1	5693.7
3	1.076	-0.021	663.03	-106.33	2130.8	5202.4
4	1.076	-0.12	635.46	-28.497	2243.1	4711.5
5	1.076	-0.22	645.55	-44.349	2165	4679.6
6	1.076	-0.22	617.02	-25.823	2179	3988.9
7	1.076	-0.22	598.87	-27.611	2062.2	3888.5
8	1.076	-0.32	622.14	-49.261	2028.9	3360.5
9	1.076	-0.42	616	-6.1687	2115.7	3377.3
10	1.076	-0.42	566.2	64.549	2228.4	3316.9
11	1.076	-0.42	600.62	73.021	2197.9	2941.5
12	1.076	-0.519	615.71	48.6	2152.9	2953.2
13	1.076	-0.519	642.15	2.2716	2131.5	2964.7
14	1.076	-0.517	635.57	65.871	2182.1	2428.6
15	1.078	-0.616	597.44	78.914	2169.7	2447.7
16	1.076	-0.616	636.03	92.069	2101.5	1753.2
17	1.076	-0.719	596.91	111	2098.1	1820
18	1.076	-0.719	617.89	19.821	1963.7	1734.5
19	1.076	-0.719	572.51	156.39	1970.9	1198.1
20	1.076	-0.819	558.76	1.5197	1795.5	1160
21	1.076	-0.819	576.69	41.866	1902.6	1198.9
22	1.076	-0.819	563.18	217.46	1994.2	627.39
23	1.076	-0.918	565.31	113.49	1864.2	644.54
24	1.076	-0.918	544.92	55.986	1865.8	629.94
25	1.076	-1.018	531.64	200.32	1975.8	101.79
26	1.076	-1.018	568.33	175.28	1931.5	119.92
27	1.076	-1.018	576.53	203.08	1875.6	-382.13
28	1.076	-1.018	547.28	312.9	2054	-392.74
29	1.076	-1.12	589.14	271.06	1933	-387.7
30	1.076	-1.12	594.42	250.18	1896.5	-943.68
31	1.076	-1.12	544.3	351.89	2063.4	-893.71
32	1.076	-1.22	534.34	327.32	1993.4	-929.27
33	1.076	-1.218	592.87	375.68	1952.4	-1401.7
34	1.076	-1.32	556.56	342.61	2002.6	-1449.4
35	1.076	-1.32	539.71	443.7	1975	-1464.8

36	1.076	-1.32	539.96	377.48	1871.7	-2028.4
37	1.076	-1.42	553.57	319.39	1846	-2004.1
38	1.076	-1.42	567.72	353.8	1941.1	-2066.2
39	1.076	-1.42	562.58	403.74	1827.4	-2542
40	1.076	-1.522	525.82	501.24	1917.8	-2581.8
41	1.076	-1.519	544.97	451.98	2017.6	-2504.6
42	1.076	-1.519	562.41	574.59	2004.3	-3085.6
43	1.076	-1.619	564.71	547.92	1992.1	-2992.7
44	1.076	-1.619	587.29	630.32	2075.2	-3001.5
45	1.076	-1.722	618.86	537.9	1970.4	-3533.3
46	1.076	-1.722	614.98	546.16	1957.8	-3566.8
47	1.076	-1.722	605.22	595.32	1975.8	-4121.2
48	1.076	-1.824	615.95	566.76	2020	-4062
49	1.076	-1.824	610.3	545.08	1873.5	-4114
50	1.076	-1.821	597.53	668.97	1912.5	-4824.5
51	1.076	-1.921	593.99	627.63	1858.4	-4794.9
52	1.076	-1.921	605.18	636.23	1892.4	-4748.4
53	1.076	-1.921	541.11	733.14	1863.2	-5446.8
54	1.076	-2.021	602.21	635.7	1791.6	-5375.7
55	1.076	-2.021	615.01	617.24	1700.5	-6002.1
56	1.076	-2.021	592.84	654.71	1731.5	-6004.9
57	1.076	-2.121	579.83	642.34	1709.8	-6046.7
58	1.076	-2.22	601.64	744.47	1743.5	-6466.4
59	1.076	-2.22	567.36	757.34	1773.1	-6489.9

---

表 B-8 : set7 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	0.876	0.16	509.57	-161.63	3047.8	5971.5
2	0.876	0.16	551.07	-215.93	3021.1	5985.5
3	0.876	-0.021	561.92	-152.72	3239.6	5698.2
4	0.876	-0.021	547.15	-149.47	3357.9	5340.3
5	0.876	-0.12	580.41	-97.678	3202.9	5192
6	0.876	-0.12	536.34	-128.87	3333	5150.3
7	0.876	-0.22	513.81	-9.6068	3400.4	4634.4
8	0.876	-0.22	533.81	94.041	3461.3	4129.5
9	0.876	-0.32	509.44	68.777	3468.6	4122.5
10	0.876	-0.42	555.71	52.57	3467.7	3563.3
11	0.876	-0.42	553.35	56.895	3486.3	3598.5
12	0.876	-0.42	531.23	42.384	3475.1	3039.7
13	0.876	-0.519	552.66	79.121	3428.2	3043.7
14	0.876	-0.519	563.06	130.23	3462.6	3035.1
15	0.876	-0.517	555.61	179.13	3585.5	2470.8
16	0.876	-0.616	553.11	139.9	3437.7	2424.6
17	0.874	-0.616	546.69	200.14	3521.2	2519.3
18	0.876	-0.616	537.4	169.51	3571.6	1999
19	0.876	-0.719	546.51	164.23	3475.9	1967
20	0.876	-0.719	554.65	223.01	3569.3	1450.3
21	0.876	-0.719	570.17	161.85	3498.2	1485.2
22	0.876	-0.819	567.53	211.33	3461	1449.4
23	0.876	-0.819	548.83	247.47	3617.9	972.4
24	0.876	-0.918	529.48	247.7	3621.1	992.99
25	0.876	-0.918	590.85	220.47	3491.9	989.86
26	0.876	-0.918	545.89	242.43	3550.4	489.28
27	0.876	-1.021	557.9	332.45	3514.6	432.35
28	0.876	-1.021	551.93	261.93	3488.9	322.82
29	0.876	-1.021	559.04	224.5	3266	-305.79
30	0.876	-1.12	563.94	187.78	3263.5	-314.39
31	0.876	-1.12	564.09	278.05	3189.2	-869.64
32	0.876	-1.22	570.35	194.46	3123.5	-900.16
33	0.876	-1.22	529.04	366.85	3261.4	-935.34
34	0.876	-1.22	541.29	313.3	3212.1	-1398.5
35	0.876	-1.32	535.47	290.15	3194	-1424.9

36	0.876	-1.32	564.41	325.32	3153.3	-1427.4
37	0.876	-1.32	526.64	355.99	3146.5	-1945.6
38	0.876	-1.422	549.18	380.89	3110.1	-1953.6
39	0.876	-1.42	501.44	408.19	3246.4	-1967.1
40	0.876	-1.519	563.92	520.79	3172.3	-2438.6
41	0.876	-1.519	532.08	549.54	3205.6	-2468.4
42	0.876	-1.519	546.47	549.88	3252.6	-2976.7
43	0.876	-1.519	510.18	515.55	3216.7	-2909.8
44	0.876	-1.617	535.54	548.86	3173.5	-2977.6
45	0.874	-1.619	538.15	575.88	3158.7	-3533.5
46	0.876	-1.619	509.44	644	3151.5	-3547.2
47	0.876	-1.722	510.28	641.15	3149.7	-3549.6
48	0.876	-1.722	528.08	667.26	2996.5	-4138.8
49	0.876	-1.821	535.36	636.85	3072	-4108.6
50	0.876	-1.821	527.31	571.14	2983.2	-4114.5
51	0.876	-1.821	547	647.21	2894	-4753.4
52	0.876	-1.921	537.39	680.07	3018.5	-4670.9
53	0.876	-1.921	530.86	633.8	2964.1	-4612.5
54	0.876	-1.921	536.02	723.79	2934.8	-5294.3
55	0.876	-2.021	546.94	737	2926.3	-5226.2
56	0.876	-2.021	510	756.87	3015.2	-5180.5
57	0.876	-2.021	542.05	706.38	2705.3	-5872.9
58	0.876	-2.121	545.31	733.55	2691.7	-5949.3
59	0.876	-2.121	522.83	673.55	2605.4	-6013.4

---



表 B-9 : set8 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	1.477	0.259	717.18	-241.06	48.48	6414.8
2	1.477	0.16	665.9	-214.23	129.74	6413.5
3	1.477	0.16	696.83	-230.85	55.096	6343.5
4	1.477	0.16	719.87	-177.52	52.002	6037.1
5	1.477	0.06	686.51	-153.6	104.62	6008.8
6	1.477	0.063	717.51	-74.343	61.665	5181.6
7	1.477	0.063	728.95	-69.291	54.911	5424.4
8	1.477	-0.021	734.19	-165.86	18.343	5477.3
9	1.477	-0.021	709.43	-185.52	-12.679	5389.7
10	1.477	-0.021	724.4	-127.39	-75.655	4917.8
11	1.477	-0.123	683.27	-150.69	-5.5495	4822.7
12	1.477	-0.12	716.18	-126.02	-67.081	4889
13	1.477	-0.12	707.05	12.546	32.08	4390.8
14	1.477	-0.22	733.59	-87.708	39.498	4423
15	1.477	-0.22	709.53	13.086	-43.717	3855.4
16	1.477	-0.32	770.61	-70.687	-99.261	3949
17	1.477	-0.32	738.32	6.3594	32.546	4035.5
18	1.477	-0.32	794.35	64.229	36.255	3556.3
19	1.477	-0.42	761.94	36.926	34.939	3557.9
20	1.477	-0.42	756.3	44.951	46.154	3577.3
21	1.477	-0.42	766.57	-11.332	-49.999	2978.2
22	1.477	-0.519	781.18	85.356	-20.458	2982.9
23	1.477	-0.517	743.13	92.489	40.782	2946.9
24	1.477	-0.519	790.09	132.83	-102.97	2451.1
25	1.477	-0.616	785.23	87.057	-100.99	2391.1
26	1.477	-0.616	737.94	123.44	-8.0118	1955.7
27	1.477	-0.719	746.56	124.28	-63.43	1920.6
28	1.48	-0.819	757.59	156.35	-74.709	1407.6
29	1.477	-0.819	763.26	154.55	-78.911	1360.5
30	1.477	-0.819	798.12	177.36	-177.66	856.27
31	1.477	-0.918	812.48	158.12	-183.44	890.04
32	1.477	-0.918	763.22	273.19	-76.52	888.34
33	1.477	-0.918	800.28	143.54	-185.6	316.14
34	1.477	-1.021	781.6	215.27	-265.38	311.6
35	1.477	-1.021	798.61	125.38	-415.25	181.68

36	1.477	-1.021	723.13	236.71	-279.53	-384.37
37	1.477	-1.12	740.46	145.46	-401.72	-391.99
38	1.477	-1.12	714.51	243.37	-316.38	-907.36
39	1.477	-1.22	723.11	293.04	-300.42	-943.6
40	1.477	-1.22	731.37	251.34	-436.68	-900.88
41	1.477	-1.22	725.61	313	-397.41	-1459.1
42	1.477	-1.32	747.99	229.62	-436.03	-1502.8
43	1.477	-1.32	707.94	295.82	-402.74	-1476.7
44	1.477	-1.32	743.23	330.69	-392.41	-1954.8
45	1.477	-1.42	737.05	333.03	-348.77	-1995.8
46	1.477	-1.42	785.1	293.94	-339.79	-1967.5
47	1.477	-1.42	745.83	389.72	-335.67	-2543.2
48	1.477	-1.519	753.35	315.99	-465.22	-2556.5
49	1.477	-1.519	725.87	380.13	-416.29	-3168.8
50	1.477	-1.619	726.91	358.74	-474.85	-3162.2
51	1.477	-1.619	705.36	350.49	-461.4	-3219.7
52	1.477	-1.619	713.43	325.99	-483.32	-3829.5
53	1.477	-1.722	649.02	495.28	-329.24	-3823.9
54	1.477	-1.722	655.93	443.36	-506.16	-3818.4
55	1.477	-1.722	635.89	454.57	-479.8	-4411.3
56	1.477	-1.821	676.72	433.7	-452.74	-4411
57	1.477	-1.821	692.73	471.46	-499.55	-4963.2
58	1.477	-1.921	657.8	569.73	-388.8	-5044.5
59	1.477	-1.921	714.71	440.07	-448.74	-5012.7
60	1.477	-1.921	739.21	482.02	-524.33	-5563
61	1.477	-1.921	692.44	514.89	-429.31	-5644.3
62	1.477	-2.021	707.76	506.53	-420.91	-5588.1
63	1.477	-2.021	734.37	541.69	-433.33	-6174.5
64	1.477	-2.121	683.22	637.59	-384.53	-6207.3
65	1.477	-2.121	720.12	576.34	-383.56	-6209

---

表 B-10 : set9 の測定データセット

#	ST2-X [A]	ST2-Y [A]	MB03X [μm]	MB03Y [μm]	MB04X [μm]	MB04Y [μm]
1	1.677	0.259	789.09	-450.92	-942.9	6415.7
2	1.677	0.259	763.84	-274.24	-888.81	6190.3
3	1.677	0.259	764.59	-152.88	-798.79	6091.2
4	1.677	0.16	770.73	-193.51	-891.57	6207.9
5	1.677	0.16	796.16	-198.07	-950.83	5672.3
6	1.677	0.06	764.57	-222.77	-965.38	5741.1
7	1.677	0.06	796.26	-202.12	-1103.5	4905.4
8	1.677	-0.06	693.24	-189.74	-1073.8	5160.6
9	1.677	-0.021	711.3	-255.91	-1262.9	4598.3
10	1.677	-0.12	737.39	-260.83	-1245.5	4662.3
11	1.677	-0.12	710.16	-232.96	-1256	4556
12	1.677	-0.12	690.22	-212.14	-1340.2	4161.7
13	1.677	-0.22	691.29	-147.87	-1297.7	4071.8
14	1.677	-0.22	766.61	-222	-1321.6	4106.1
15	1.677	-0.22	731.97	-166.79	-1308.6	3599.7
16	1.677	-0.32	749.44	-126.67	-1362.7	3631.2
17	1.677	-0.32	764.91	-149.67	-1374.8	3614.2
18	1.677	-0.32	782.67	-206.5	-1463.5	3107.7
19	1.677	-0.42	748.82	-149.09	-1391.3	3106.3
20	1.677	-0.42	762.92	-181.4	-1438.2	3111.4
21	1.677	-0.42	733.3	-187.85	-1484.4	2596.6
22	1.677	-0.519	767.19	-301.27	-1653.2	2623.8
23	1.677	-0.519	758.12	-121.16	-1599	2070.6
24	1.677	-0.616	784.63	-191.85	-1604.8	2107.3
25	1.677	-0.616	779.27	-225.94	-1534.1	2083.8
26	1.677	-0.616	766.61	4.4305	-1391.9	1582.5
27	1.677	-0.719	784.66	72.534	-1383.1	1633.8
28	1.677	-0.719	781.73	109.35	-1222.9	1712.3
29	1.677	-0.819	829.5	158.53	-1249.2	1240.8
30	1.677	-0.819	768.12	270.72	-1180.3	1218.2
31	1.677	-0.819	824.86	213.37	-1275.7	719.33
32	1.677	-0.918	833.99	191.65	-1342.5	688.26
33	1.677	-0.918	835.3	130.09	-1365.5	179.72
34	1.677	-1.018	849.87	142.25	-1494.1	123.61
35	1.677	-1.021	828.36	82.153	-1429.6	157.77

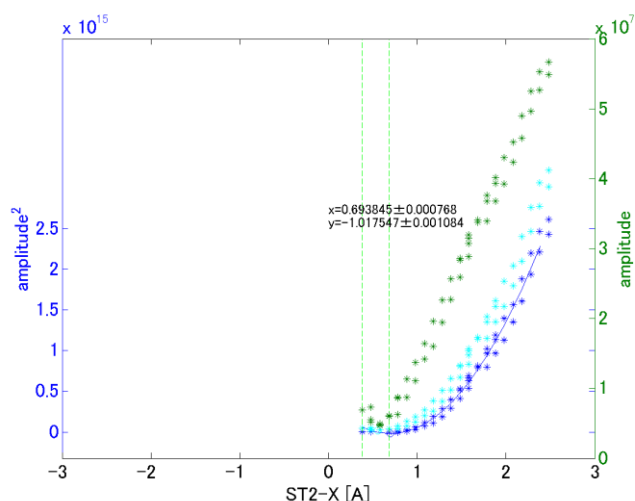
36	1.677	-1.021	844.54	176.46	-1444.9	-364.55
37	1.677	-1.118	855.67	187.62	-1422.7	-293.86
38	1.677	-1.12	866.46	239.48	-1339.7	-267.14
39	1.677	-1.22	861.74	345.21	-1249.3	-625.91
40	1.677	-1.22	883.91	255.49	-1309.9	-633.71
41	1.677	-1.32	846.12	369.72	-1244.7	-1211.2
42	1.677	-1.32	878.86	393.03	-1240.9	-1256
43	1.677	-1.42	853.68	390.01	-1313.4	-1809.9
44	1.677	-1.519	847.3	435.6	-1318.3	-2363.2
45	1.677	-1.519	820.54	526.53	-1227.6	-2285.5
46	1.677	-1.619	846.93	433.5	-1222.1	-2799.9
47	1.677	-1.619	847.9	425.61	-1187.7	-2683
48	1.677	-1.619	828.22	529.71	-1156.7	-3213.3
49	1.677	-1.722	874.18	493.26	-1235.1	-3242.7
50	1.677	-1.722	887.56	560.91	-1153.4	-3801.8
51	1.677	-1.824	894.98	577.25	-1130.5	-3883.6
52	1.677	-1.821	873.03	590.79	-1157.2	-4508.1
53	1.677	-1.921	847.1	609.67	-1146.6	-4581
54	1.677	-1.921	846.8	592.8	-1088	-4666.1
55	1.677	-1.921	845.06	594.48	-1094.4	-5246.4
56	1.677	-2.021	845	555.5	-1178.2	-5337.2
57	1.677	-2.021	847.99	601.45	-1117.1	-5278.8
58	1.677	-2.021	822.92	675.46	-1086.3	-5908.1
59	1.677	-2.121	830.6	668.45	-1022.3	-5906
60	1.677	-2.121	825.01	739.83	-1035.9	-6417.8
61	1.677	-2.22	859.39	680.15	-1048.9	-6398.1

---

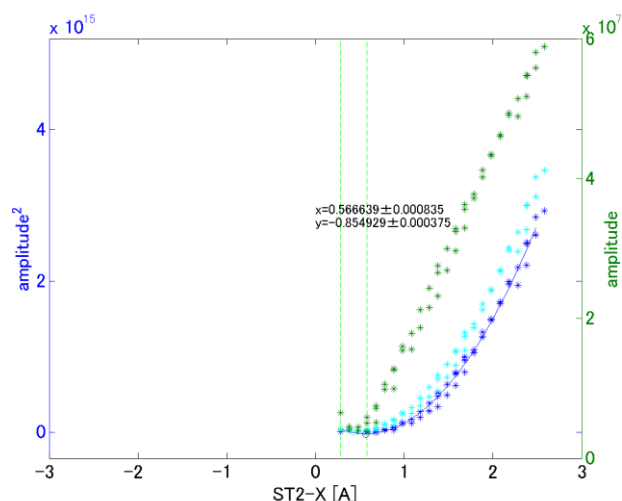
## 付録C. 局在モード取得データの二次関数フィット

6.5 節にて実施した局在モードの電氣的中心を通るときのダイポールマグネット電流値を求めるための、ダイポールマグネット電流値に対する局在モードの振幅の二乗のフィットを図 C-1 と図 C-2 に示す。図 C-1 は 2277.2 MHz の set0~set9 のフィットの様子であり、図 C-2 は 2314.4 MHz のものである。図中の緑の点の縦軸は右側であり、局在モードの振幅を示している。水色と青の点の縦軸は左側であり、それぞれ一度目の 2 次関数でのフィットと最終（2 度目）の 2 次関数フィットを示す、緑波線の間は  $c$  を求めた範囲である。

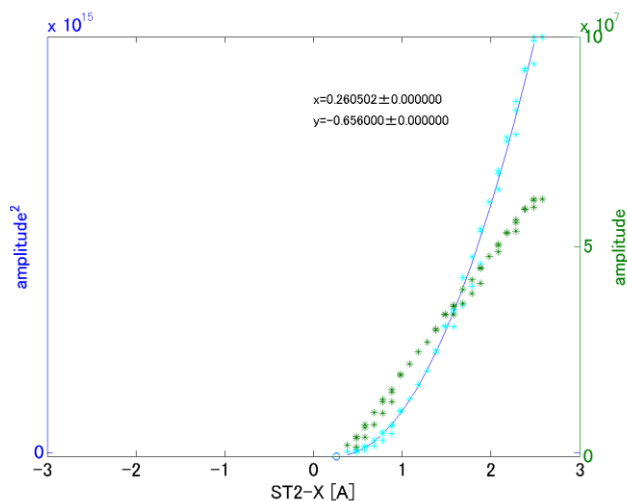
2277.2 MHz -set0



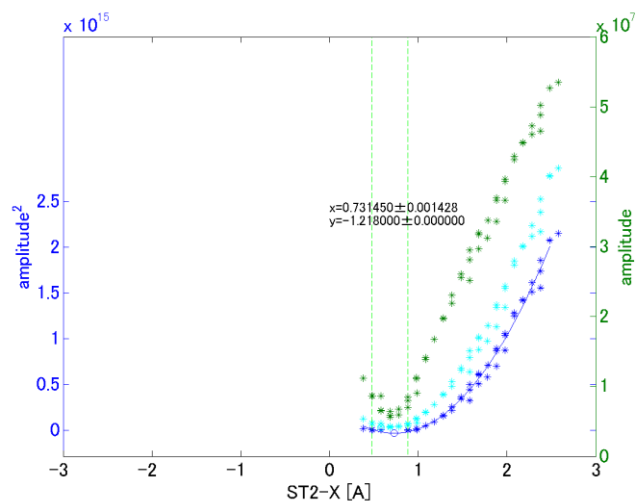
2277.2 MHz -set1



2277.2 MHz -set2



2277.2 MHz -set3



2277.2 MHz -set4

2277.2 MHz -set5

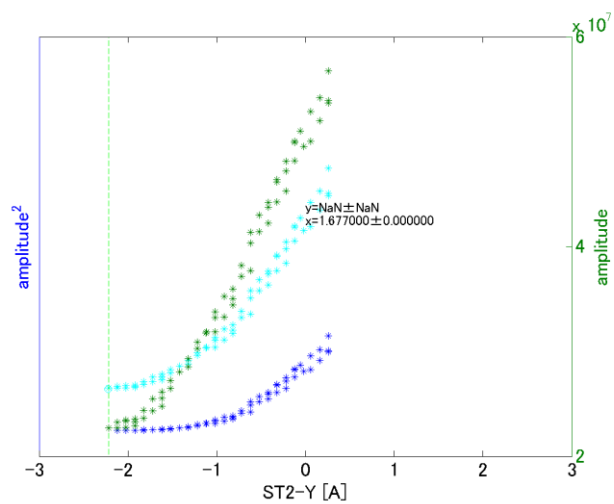
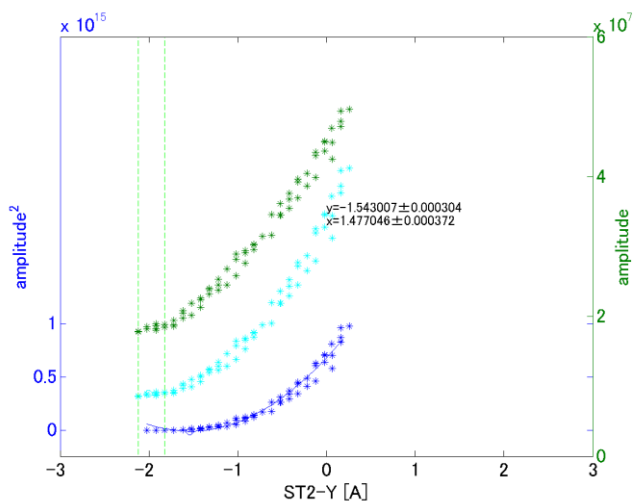
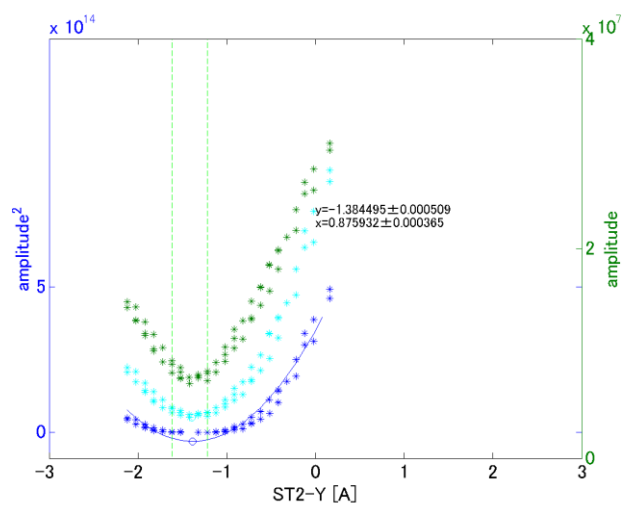
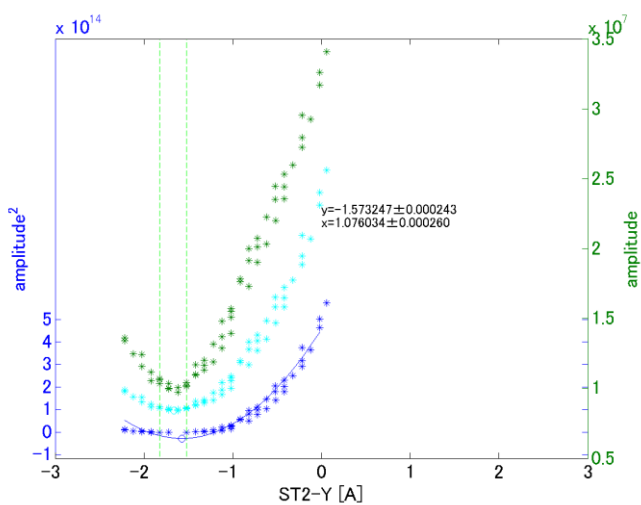
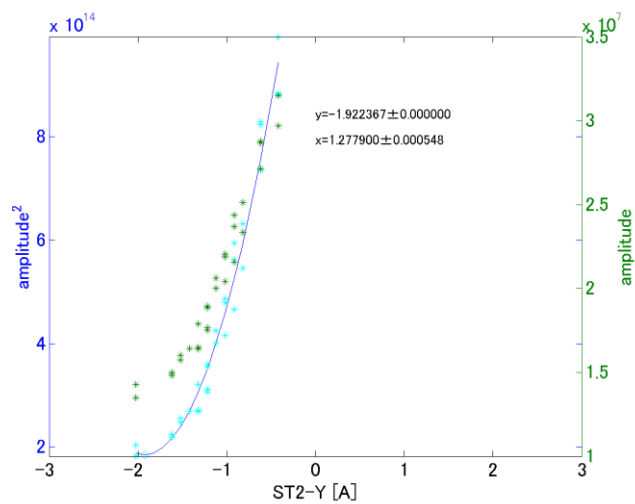
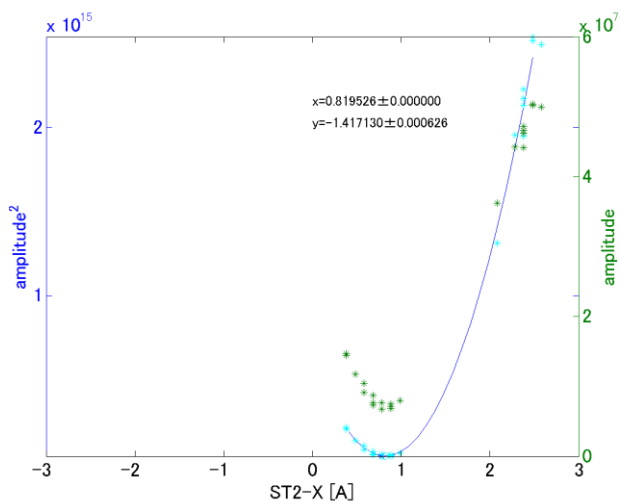
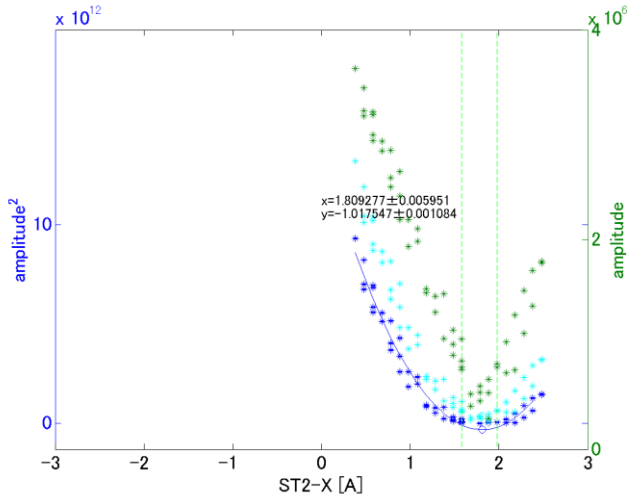


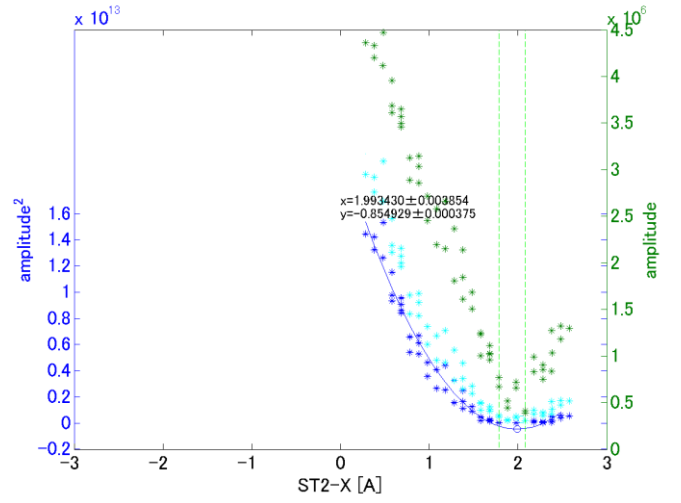
図 C-1 : 2277.2 MHz の二次関数フィット

2314.4 MHz -set0

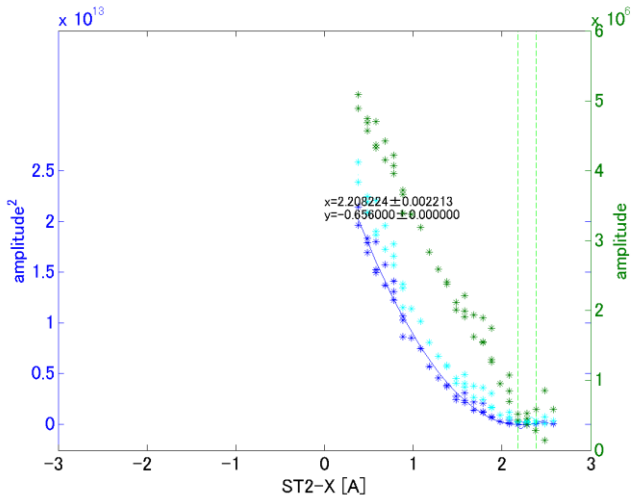
2314.4 MHz -set1



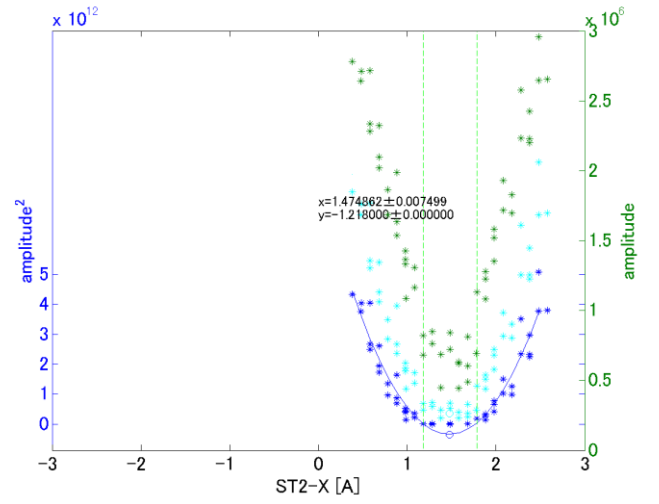
2314.4 MHz -set2



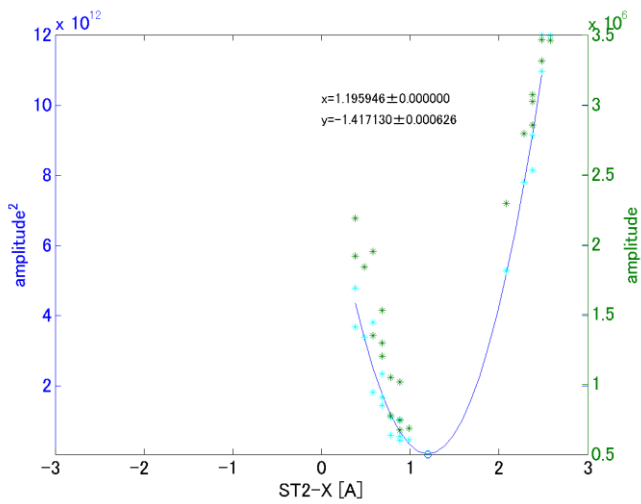
2314.4 MHz -set3



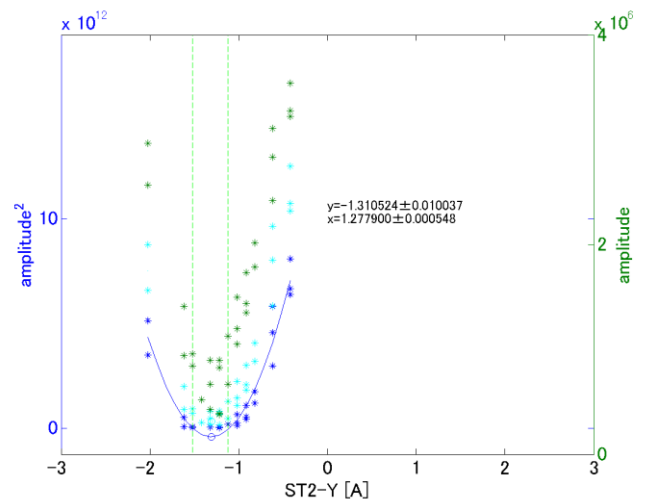
2314.4 MHz -set4



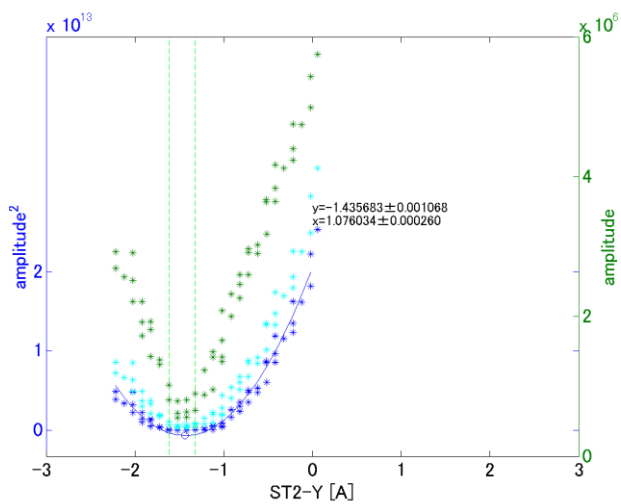
2314.4 MHz -set5



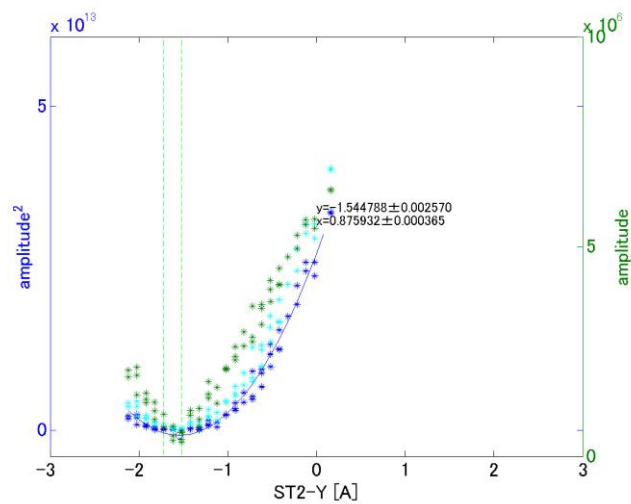
2314.4 MHz -set6



2314.4 MHz -set7



2314.4 MHz -set8



2314.4 MHz -set9

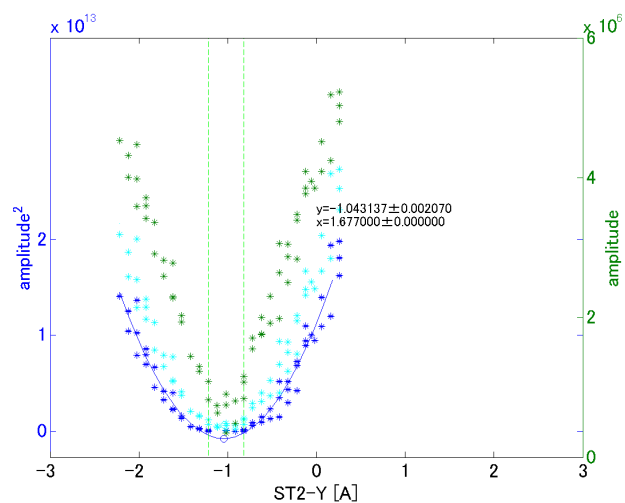
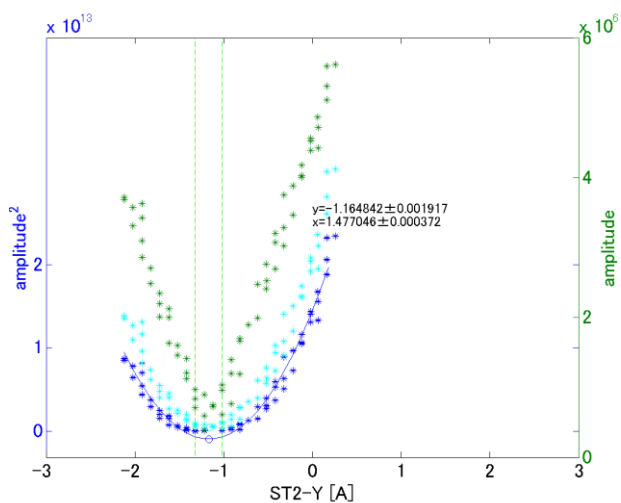


図 C-2 : 2314.4 MHz の二次関数フィット



## 付録D. 1 回目の電氣的中心を求める試行での GPT による 82 回目のビーム軌道推定計算の結果

7.2.2 で実施した 1 回目の電氣的中心を求める試行での, set0~set9 のすべてのセットでの MB03 と MB04 で算出されたビーム位置と実際のビーム位置との間の二乗の差  $s^2 = \sum_{n=1} \sum_{i=3,4} \left\{ (x_{MB0i}^{mea} - x_{MB0i}^{cal})^2 + (y_{MB0i}^{mea} - y_{MB0i}^{cal})^2 \right\}$  が最小  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  となった 82 回目のビーム軌道の計算結果を示す。

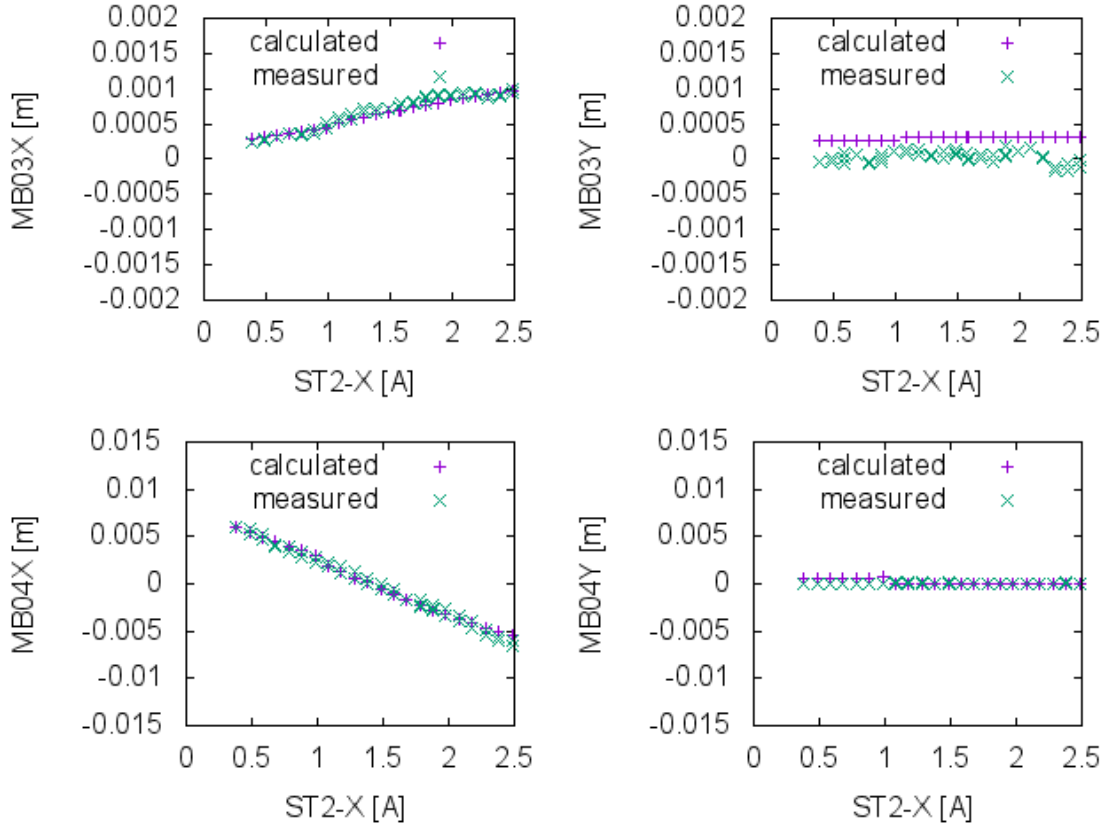


図 D-1 : set0 のビーム掃引計算

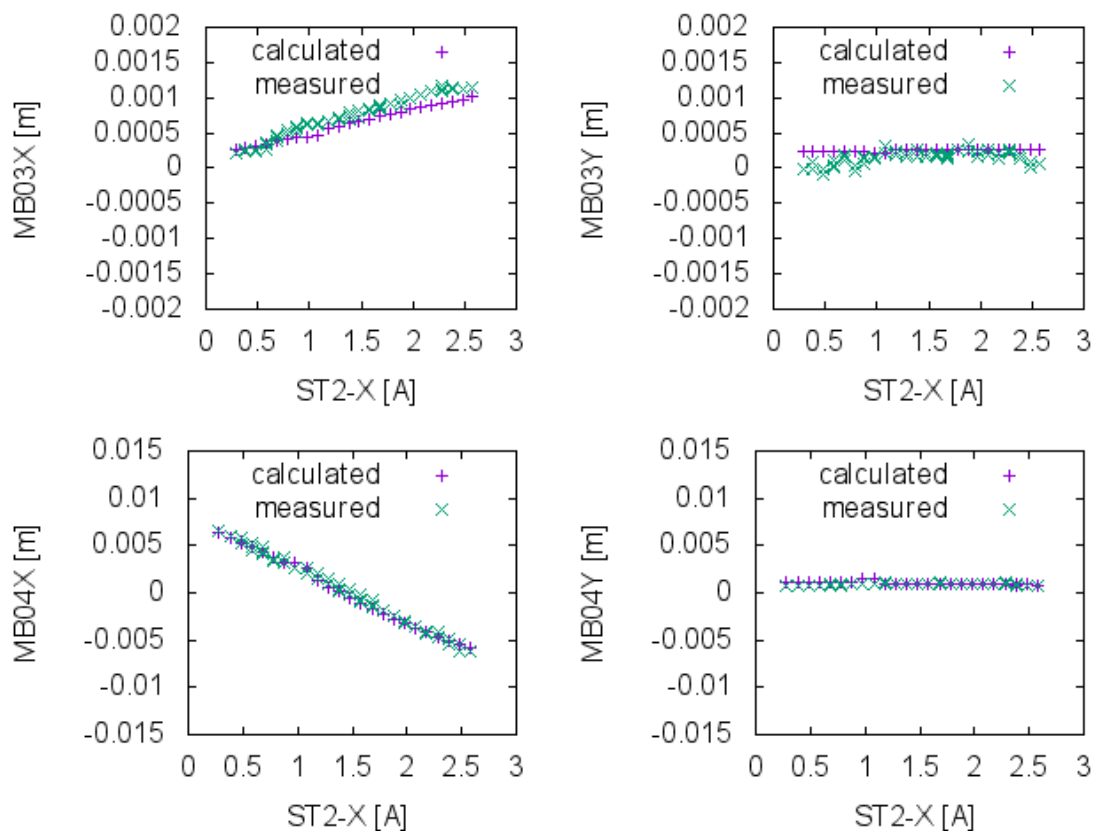


図 D-2 : set1 のビーム掃引計算

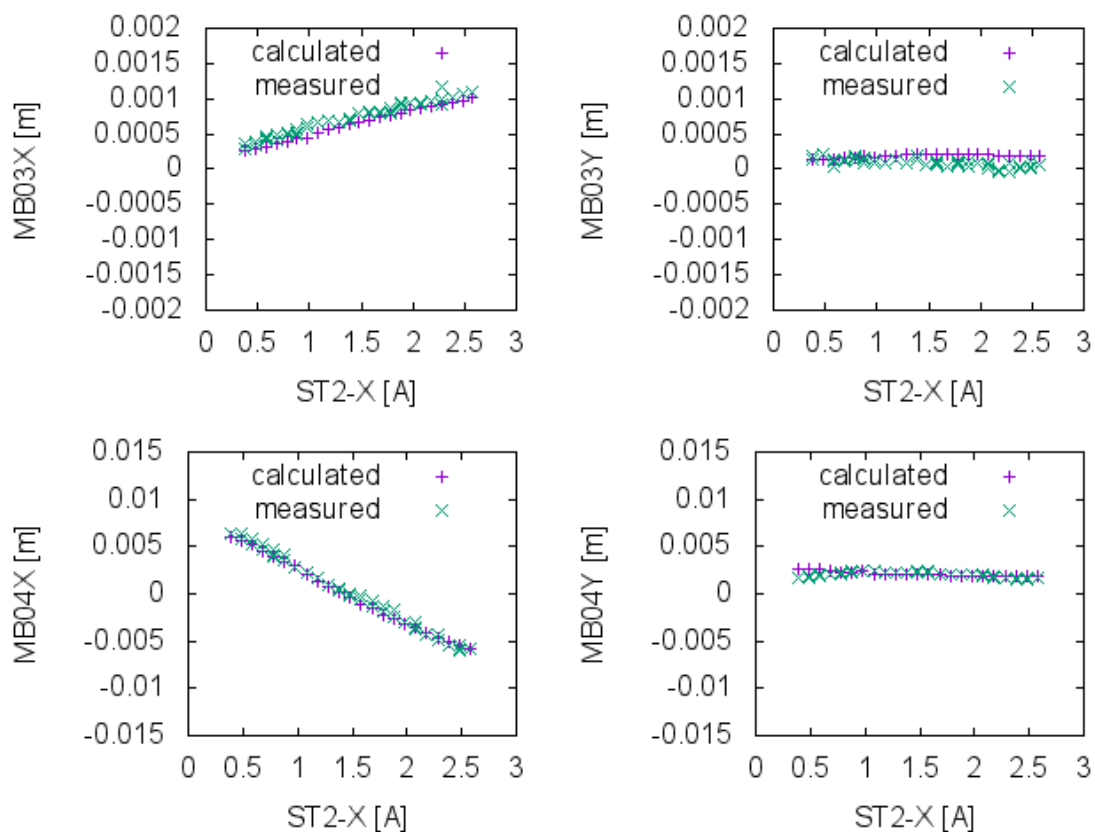


図 D-3 : set2 のビーム掃引計算

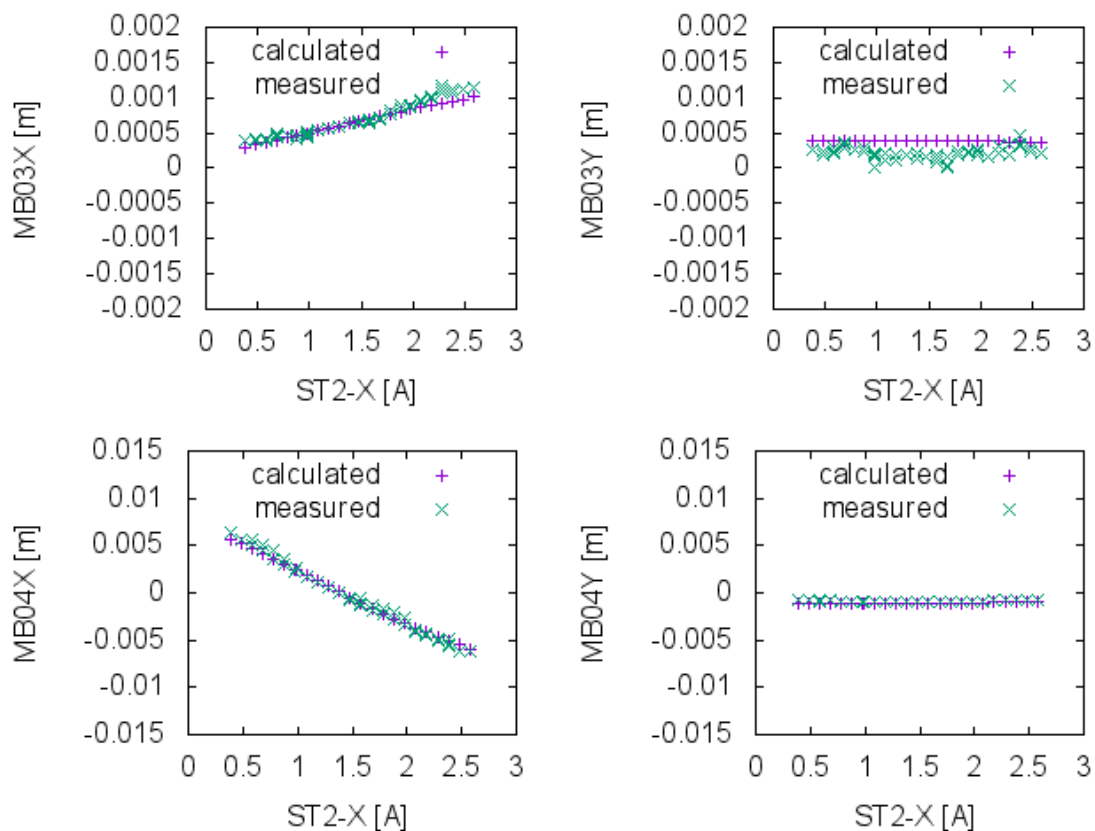


図 D-4 : set3 のビーム掃引計算

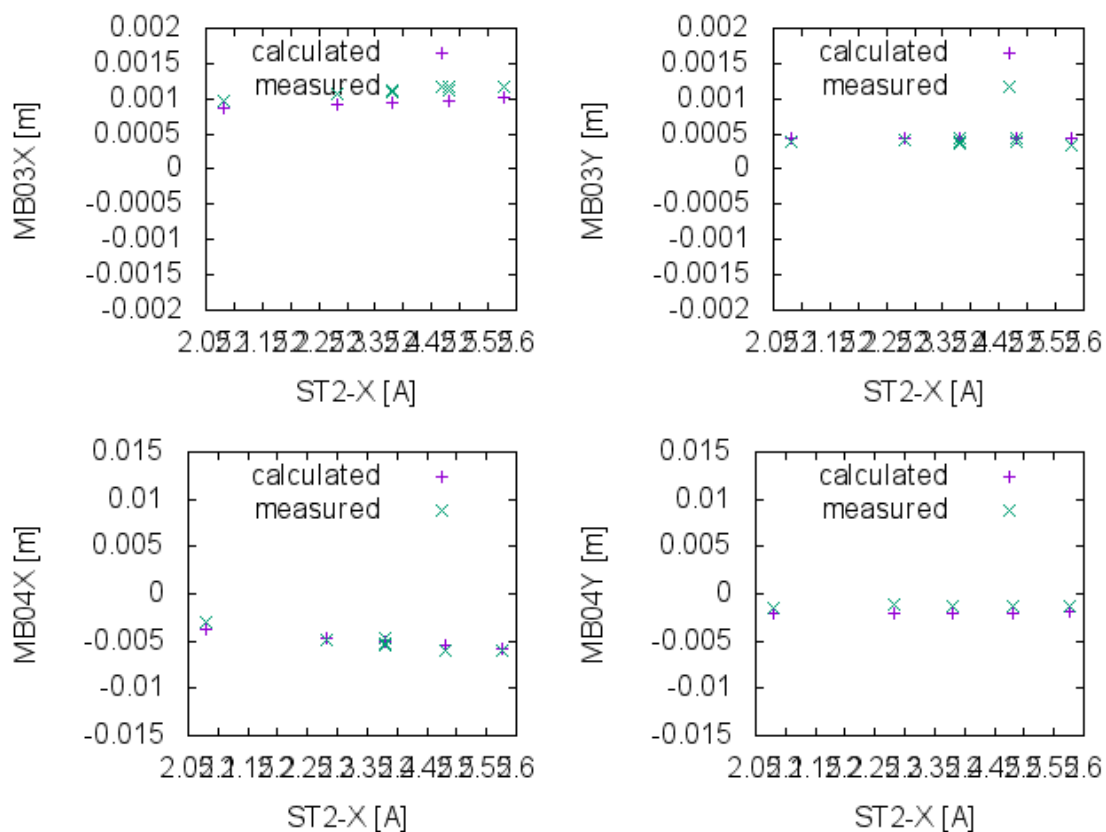


図 D-5 : set4 のビーム掃引計算

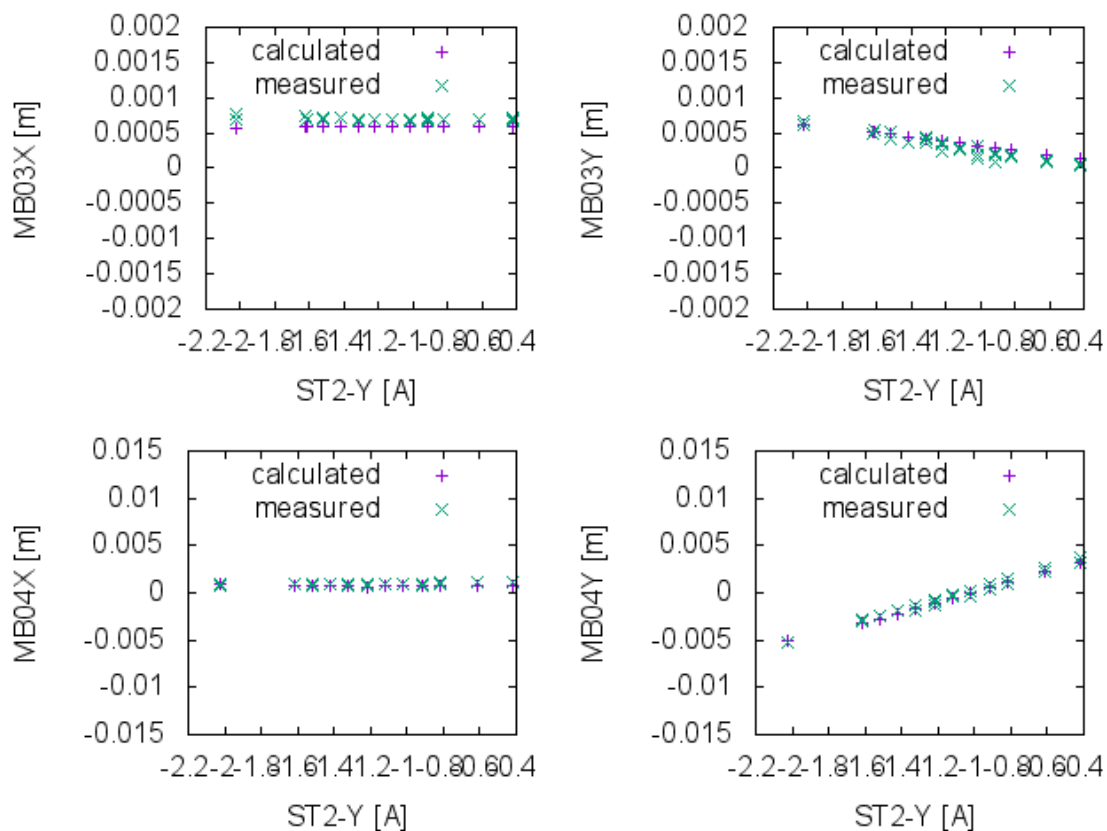


図 D-6 : set5 のビーム掃引計算

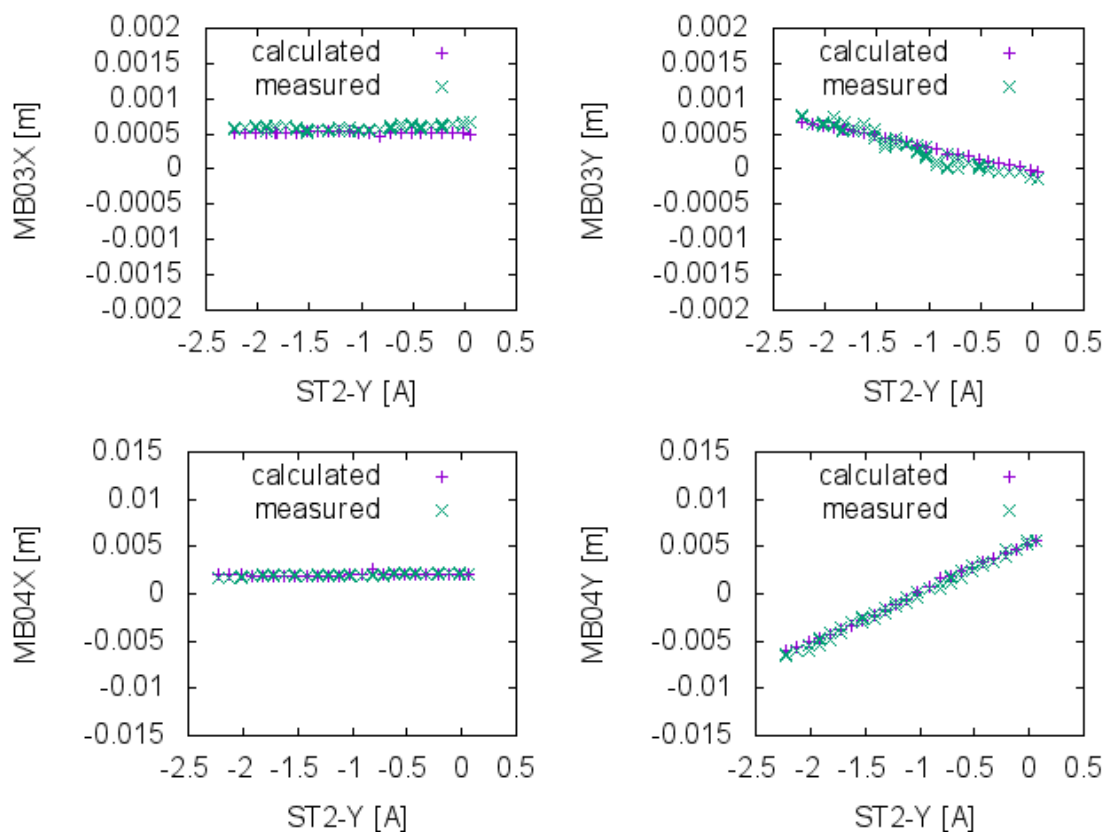


図 D-7 : set6 のビーム掃引計算

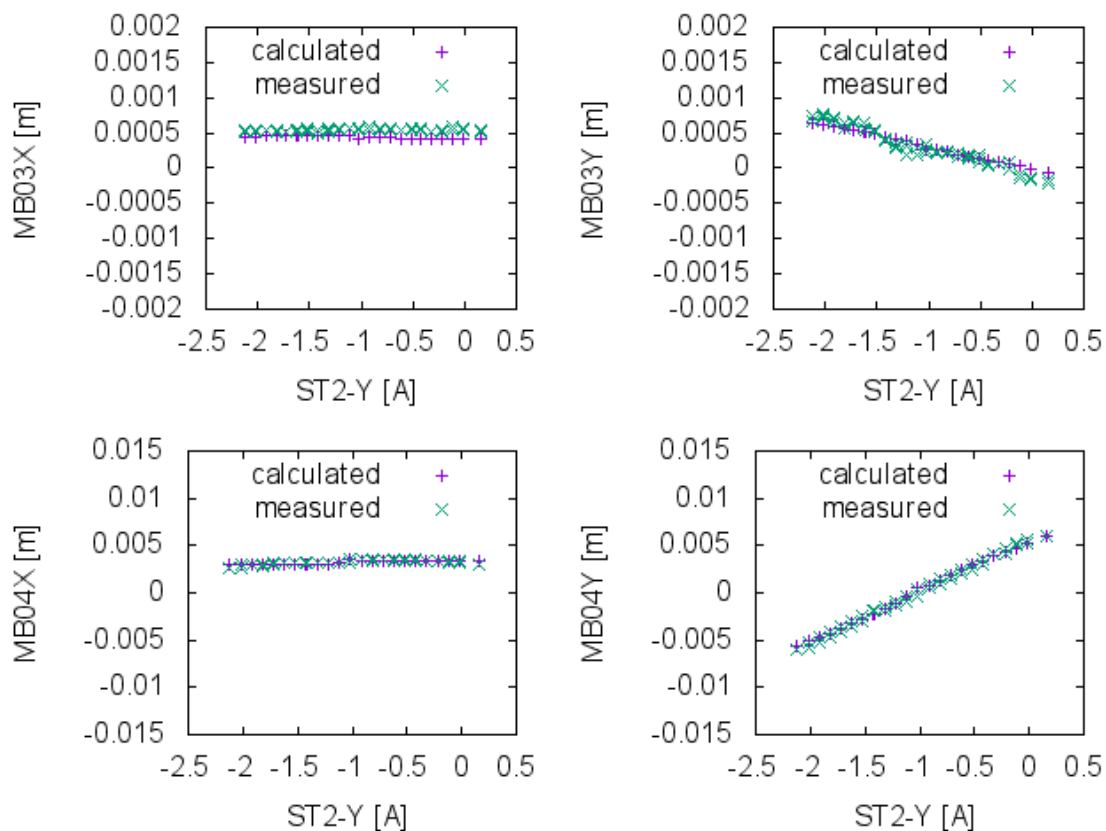


図 D-8 : set7 のビーム掃引計算

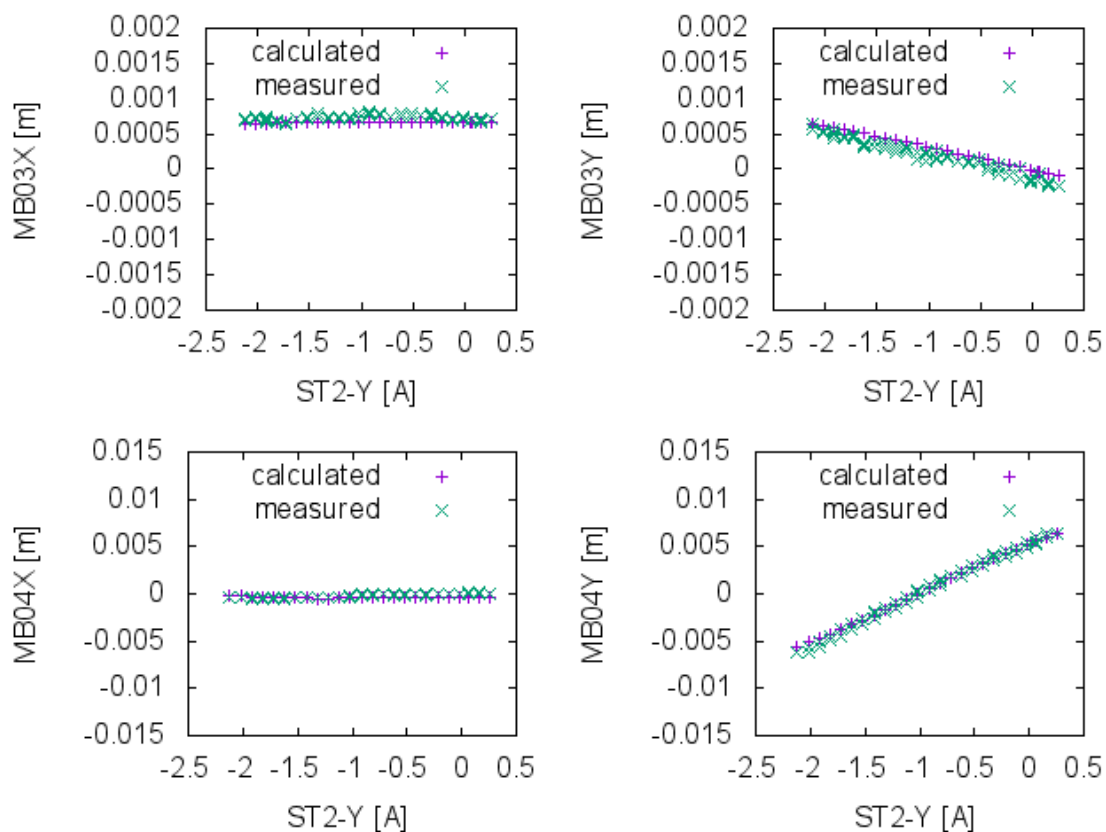


図 D-9 : set8 のビーム掃引計算

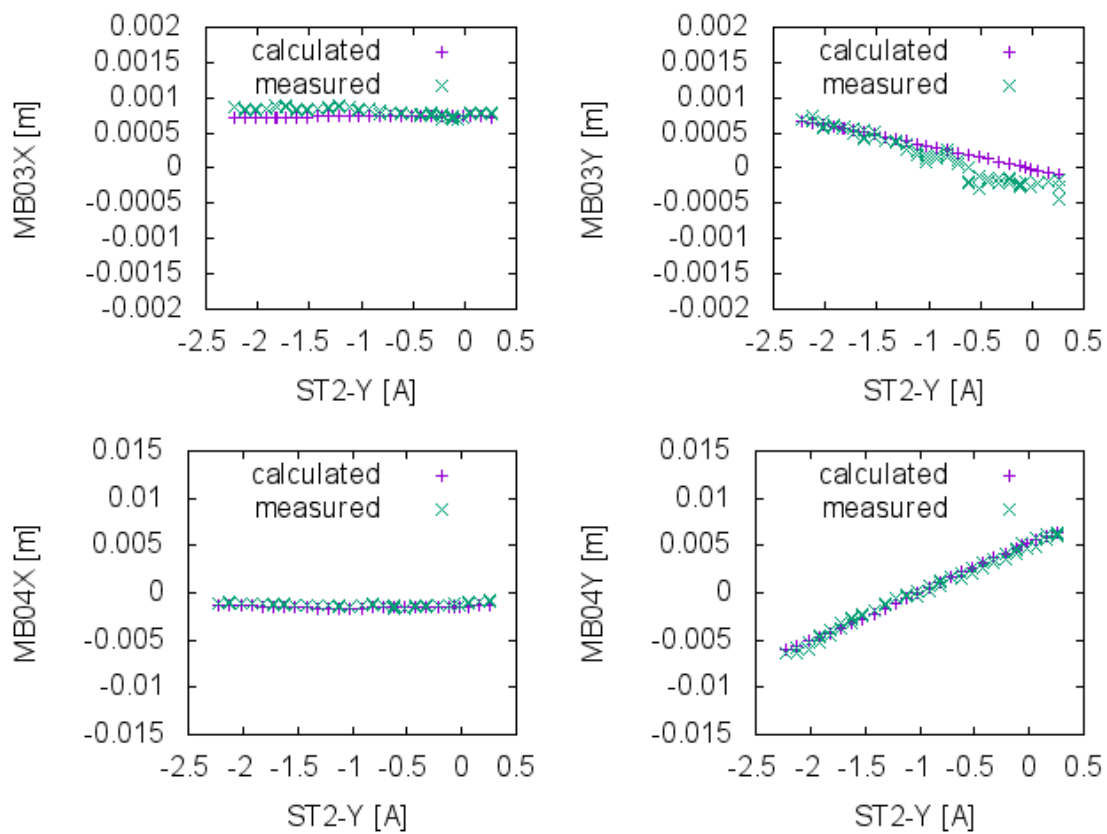


図 D-10 : set9 のビーム掃引計算

## 謝辞

本研究に関して終始ご指導を頂きました指導教官である早野仁司教授に深く感謝しております。副指導教官であった渡邊謙助教に各種の測定時の細かなご指導をいただき感謝しております。本論文の審査過程において、数々のご助言とご指導くださいました久保浄教授、肥後寿泰教授、梅森健成准教授、宮島司准教授、理化学研究所・放射光科学総合研究センターの大竹雄次氏に深く感謝申し上げます。さらに、本論文の方針決定に関わるご助言・ご指導をくださいました諏訪田剛准教授、阪井寛志准教授に深く感謝申し上げます。

STF と量子ビームグループの皆様に加速器建設，運転，この研究への支援を感謝致します。

本研究は JSPS 科研費 JP26400300 と総合研究大学院大学のサポートを受けたものです。STF 加速器の運転は文部科学省委託研究「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」事業によってサポートされました。

総合研究大学院大学在学中にはインターンシッププログラムにて，本研究に関連した高調波モードの測定を DESY と FNAL にて実施しました。DESY では，ビーム誘起高調波モードの測定を Nicoleta Baboi, Thomas Wamsat, Liangliang Shi 各氏のご協力のおかげで行うことができました。FNAL の測定では Eddy Nathan 氏にお世話になりました。

総合研究大学院大学在学当時の加速器科学専攻長 生出勝宣教授，LC 推進室室長 山本明特別教授および量子ビームプロジェクトリーダー 浦川順治教授のサポートに感謝致します。

現在の勤務先である茨城工業高等専門学校の校長先生はじめ教職員の皆様には，本研究に取り組めるようご配慮いただきました。深く感謝申し上げます。

最後に，長い間支えてくれた家族と友人に感謝申し上げます。

## 引用文献

- [1] “Deutschlands größtes Beschleunigerzentrum - Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY,” [オンライン]. Available: <https://www.desy.de/>.
- [2] “FLASH website,” [Online]. Available: <http://flash.desy.de/>.
- [3] “国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター X 線自由電子レーザー施設 SACLA,” [オンライン]. Available: <http://xfel.riken.jp>.
- [4] “3次元測定器 FARO Laser Tracker | ターゲット | 3次元測定の FARO ファロージャパン,” [オンライン]. Available: <http://www.faro.com/ja-jp/products/metrology/faro-laser-tracker/targets>.
- [5] J. H. Burge et al., "Use of a commercial laser tracker for optical alignment," in *Proc. of SPIE Vol. 6676* 66760E-12.
- [6] K. Tsuchiya et al., "Capture cavity cryomodule for quantum beam experiment at KEK superconducting RF test facility," in *AIP Conf. Proc.*, Anchorage, Alaska, USA, 2013.
- [7] N. Baboi, G. Kreps, G. Devanz, O. Napoly and R. G. Paparella, "Preliminary Study on HOM-based Beam Alignment in the TESLA Test Facility," in *LINAC2004*, Lubeck, Germany, 2004.
- [8] S. Molloy et al., "High precision superconducting cavity diagnostics with higher order mode measurements," 10.1103, PhysRevSTAB.9.112802, 2006.
- [9] S. Molly et al., "High Precision SC Cavity alignment Measurements with Higher Order Modes," SLAC-PUB-12349, Care-Report-2006-SRF, 2007.
- [10] S. Pei, Z. Li, K. Bane and J. Smith, "TTF HOM Data Analysis with Curve Fitting Method," in *EPAC2008*, Genoa, Italy, 2008.
- [11] P. Zhang, *Beam Diagnostics in Superconducting Accelerating Cavities*, Switzerland: Springer International Publishing, 2013.
- [12] K. Watanabe, PhD thesis, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), <http://ci.nii.ac.jp/naid/5000000446916>, 2008.
- [13] M. Ross and ..., "Cavity Alignment Using Beam Induced Higher Order Modes Signals in the TTF Linac," in *PAC2005*, Knoxville, Tennessee, 2005.
- [14] R. Wanzenberg, "Monopole, Dipole and Quadrupole Passbands of the TESLA 9-cell Cavity," *TESLA 2001-33*, 2001.
- [15] H. Padamsee, J. Knobloch, T. Hays, "RF Superconductivity for Accelerator," New York, John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 130-133.
- [16] J. Delayen, "Cavity Fundamentals," 著: *7th Linear Collider School*, Indore, India, 2012.
- [17] W. K. H. Panofsky and W. A. Wenzel, "Some Considerations Concerning the Transverse Deflection of Charged Particles in Radio-frequency Fields," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 27, p. 967, 1956.
- [18] J. Urakawa, "Compact X-ray source at STF (Super Conducting Accelerator Test Facility)," *J. Phys.*, vol. 357, no. 012035, 2012.
- [19] H. Shimizu et al., "X-ray generation by inverse Compton scattering at the superconducting RF test facility," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 772, pp. 26-33, 2015.
- [20] M. Kuriki et al., "1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photocathode Radio Frequency



- Gun and Superconducting Accelerator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 056401, 2013.
- [21] S. Kashiwagi et al., "Development of a Photocathode RF Gun for the L-band Linac at ISIR," in *IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010.
- [22] J. Baehr et al., "Behavior of the TTF2 RF Gun with long pulses and high repetition rates," *TESLA Note*, 2003-33, 2003.
- [23] Y. Yamamoto et al., *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 729, pp. 589-595, 2013.
- [24] K. Hiroaki et al., "STF での S1 グローバルのための低電力高周波系の構成," 著: 第8回日本加速器学会年会, つくば, 2011.
- [25] M. Omet et al., "Development and Test of a Fully Automated PkQI Control Procedure at KEK STF," in *IPAC2013*, Shanghai, China, 2013.
- [26] "The International Linear Collider Technical Design Report," 2013.
- [27] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, T. Shisihido and H. Hayano, "New HOM coupler design for ILC superconducting cavity," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 595, pp. 299-311, 2008.
- [28] ANSYS HFSS, "ANSYS HFSS website," [Online].  
Available: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Signal+Integrity/ANSYS+HFSS>.
- [29] 諏訪田剛, "電子線形加速器の基礎 7.ビーム計測Ⅱ," 著: *OHO* テキスト, 2002.
- [30] Tesla Technology Collaboration, "SRF Accelerator in operation, in construction or under design in Europe," [Online].  
Available: [http://tesla-new.desy.de/sites/site\\_tesla/content/e163749/e163751/infoboxContent163765/SRFAccelerators.pdf](http://tesla-new.desy.de/sites/site_tesla/content/e163749/e163751/infoboxContent163765/SRFAccelerators.pdf). [Accessed 29 10 2014].
- [31] A. Burrill, "SRF Challenges for Energy Recovery Linacs," in *SRF2013*, Paris, France, 2013.
- [32] C. E. Reece, "SRF Challenges for Improving Operational Electron Linacs," in *SRF2011*, Chicago, IL, USA, 2011.
- [33] W. Singer, J. Iversen, A. Matheisen, H. Weise and P. Michelato, "The Challenge and Realization of the Cavity Production and Treatment in Industry for the European XFEL," in *SRF2013*, Paris, France, 2013.
- [34] A. Crawford, R. Eichhorn, F. Furuta et al., "The Joint High Q0 R&D Program for LCLS-II," in *IPAC2014*, Dresden, Germany, 2014.
- [35] "CST MICROWAVE STUDIO®," © 2015 CST Computer Simulation Technology AG., [オンライン].  
Available: <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>.
- [36] AET, INC., "[http://www.aetjapan.com/english/software.php?Accelerators\\_Design=GPT](http://www.aetjapan.com/english/software.php?Accelerators_Design=GPT)," 2016. [オンライン].