

平成28年度 修士論文

T2K実験のためのJ-PARC MRにおける 多電極ビームモニターの開発

京都大学大学院理学研究科

物理学・宇宙物理学専攻

物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

中西芳枝

Abstract

長基線ニュートリノ振動実験 T2K では、茨城県東海村にある加速器施設 J-PARC で生成したミュオン型、または反ミュオン型ニュートリノビームを 295km 先の岐阜県飛騨市に位置する大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデに打ち込み、ニュートリノ振動現象の観測を行っている。ニュートリノ振動モードのうち、ミュオン型ニュートリノの消失事象と電子型ニュートリノの出現事象、加えてそれらの反粒子モードの観測により、ニュートリノ振動のパラメータを測定する。現在の実験目標は、測定精度を向上し、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いを見ることにより、レプトンセクターでの CP 対称性の破れを 3σ で発見することである。測定精度の向上に向けた重要課題の一つとして、ニュートリノの生成源である J-PARC Main Ring Synchrotron(MR) の陽子ビーム強度向上が挙げられる。ターゲットに照射する陽子数を増やすことが、ニュートリノイベント数の向上、統計誤差の削減に直結するためである。

J-PARC MR では現状のパワー 435kW から 750kW への増強が計画されている。ビーム強度向上に伴って問題となるのは、リング周回中に生じるビームロスである。加速器の運転において、陽子ビームが真空パイプにぶつくと、その周辺機器が放射化し、維持保守、改善が困難になる。そのため、ある閾値以上のビームロスが生じた場合、ビーム強度を減らさざるを得ないことから、陽子ビームを監視・制御しビームロスを減らすことが重要である。特に、J-PARC 3 段階加速の最終段である MR へ入射する時のビームの形状は、その後の MR 内でのビームの動きを決定するという点から精密な制御が必要である。ビーム位置が理想的な入射位置からずれていると、その後周回中に振動が大きくなりビームロスが生じる。また、入射時のビームの広がりが理想値と異なると、その後の周回中にビームの広がりが増大するため、ビームハローがパイプにぶつかり、大きなビームロスを引き起こす原因となる。現状では、入射直後に置かれたビーム位置モニターで入射直後のビームの位置を観測している。さらなる入射制御の精度向上に向け、我々はビーム広がり指標であるビームの 4 重極モーメントを観測するための多電極ビームモニターを開発し、MR ヘインストールした。製作したモニターは、短冊形電極と電極埋め込み用の溝が掘られたパイプによって構成されており、16本の電極によってビームの位置・広がり情報を含んだ電磁場をピックアップするものである。

本論文では、まず第 1 章でニュートリノ振動について、続く第 2 章で T2K 実験についての説明を行う。第 3 章で J-PARC についての紹介と現状、ビーム強度向上に向けた課題を述べる。第 4 章ではビームロスの抑制に重要な入射制御について記載し、ビームモニターの観点からみた入射調整の

現状と課題について述べる。第5章ではピックアップモニターでビームのサイズ測定をする原理について述べ、既存の4電極ビームモニターを用いたビームの4重極モーメントの観測結果を報告する。また、4重極モーメント測定の応用として行った、4極キッカーによるビーム応答測定の結果について述べる。第6章では、ビームサイズの測定に向けて行った新たな16電極ピックアップの開発について説明する。第7章では、開発したモニターの実用化に向けた今後の展望について述べる。

目次

第1章	ニュートリノ振動	7
1.1	ニュートリノについて	7
1.2	ニュートリノ振動	7
1.2.1	ニュートリノ振動の理論～2世代の場合～	7
1.2.2	ニュートリノ振動の理論～3世代の場合～	8
1.3	ニュートリノ振動研究の現状	10
1.3.1	ニュートリノ振動の発見	10
1.3.2	ニュートリノ振動パラメータの測定	11
1.3.3	質量階層性	11
第2章	T2K 実験について	13
2.1	T2K 実験の概要	13
2.2	実験装置	14
2.2.1	J-PARC ニュートリノビームライン	14
2.2.2	検出器	16
2.3	T2K 実験の現状	21
第3章	J-PARC	25
3.1	J-PARC 概要	25
3.1.1	Linac	27
3.1.2	RCS	29
3.1.3	MR	30
3.2	J-PARC 大強度化	32
3.2.1	J-PARC 大強度化に向けた現状	32
3.3	J-PARC の大強度化に伴うビームロス	34
3.4	J-PARC MR のビームモニター	35
3.5	J-PARC MR のモニターの課題	36

第 4 章	入射調整	38
4.1	入射調整の一般論	38
4.1.1	Hill's equation	38
4.1.2	チューン	40
4.1.3	入射マッチングの概要	40
4.1.4	入射ミスマッチによるビームロス	40
4.2	入射ミスマッチの観測	41
4.3	入射調整に対するビームモニターの課題	42
第 5 章	4 電極ピックアップでのビームの 4 重極モーメント測定	44
5.1	はじめに	44
5.2	ピックアップの概要	44
5.3	ピックアップの原理	45
5.4	4 重極モーメント測定 of 原理	45
5.5	ビームサイズの算出	48
5.6	入射ミスマッチ測定	49
5.6.1	測定方法	49
5.6.2	結果	51
5.6.3	考察	52
5.6.4	まとめ	54
5.7	4 極キッカーによるビーム応答測定	54
5.7.1	測定の動機	54
5.7.2	測定の概要	55
5.7.3	測定原理・方法	56
5.7.4	データ処理方法	61
5.7.5	結果	61
5.7.6	考察	65
5.7.7	まとめ	65
5.7.8	今後の展望	66
第 6 章	16 電極ピックアップの開発	67
6.1	要求性能	67
6.2	多電極モニターの先行研究	67

	5
6.3 多電極モニターの原理	68
6.4 設計	69
6.4.1 境界要素法を用いた特性インピーダンス計算	70
6.4.2 境界要素法の精度	71
6.4.3 境界要素法によるビーム位置・4重極モーメントの計算	72
6.5 製作	75
6.6 ベンチテスト	78
6.6.1 電極のインピーダンス測定	78
6.6.2 ワイヤー法を用いた位置感度測定	79
6.6.3 ネットワークアナライザを用いた周波数特性測定	83
6.7 インストール	84
6.8 ビーム応答試験	86
6.8.1 測定方法	86
6.8.2 結果	88
6.9 16電極ピックアップに関するまとめ	94
第7章 今後の展望	96
7.1 キャリブレーション	96
7.2 処理回路の製作	97
7.3 ビームテスト	98
7.4 まとめ	99
第8章 結論	101
付録A 用語説明	102
A.1 ハーモニックナンバー	102
A.2 トランジションエネルギー	102
A.3 フィラメンテーション	103
A.4 速い取り出し・遅い取り出し	106
A.5 多重入射	107
A.6 Closed Orbit Distortion/ベータトロロン振動	107
A.7 共鳴線	107
付録B 4極キッカーによるビームの共鳴	109

付録 C 要求性能	110
付録 D 電極数による双極子モーメントと 4 重極モーメントの高次項成分について	111
付録 E S パラメータ	112
付録 F 境界要素法	113
F.1 境界要素法とは	113
F.2 境界要素法による特性インピーダンスとビームカップリング係数の導出	114
付録 G 16 電極ビームモニターの試作機について	116

第1章 ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノについて

ニュートリノは中性レプトンであり、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノの3世代とその反粒子が存在する。これらは電子、ミューオン、タウオンと対をなしている。1930年にヴォルフガング・パウリによりその存在仮説が提唱され [1]、1956年にフレデリック・ライネスとクライド・コーワンの原子炉を用いた実験により、その存在が証明された [2]。その後、レーダーマン、シュワルツ、シュタインパーガーによってミューオンニュートリノ (ν_μ) が発見された。さらに2000年にはDONUT実験により、タウニュートリノが直接観測された。また、LEPの実験 [3] により、弱い相互作用をする軽いニュートリノは3世代であることがわかっている。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノは弱い相互作用しかせず、素粒子物理学の標準模型においては質量の持たないものとされている。1962年、牧二郎、中川昌美、坂田昌一はニュートリノが質量を持ち、時間発展とともにそのフレーバーを変えるニュートリノ振動という現象を理論的に提唱した [4]。

1.2.1 ニュートリノ振動の理論 ~ 2世代の場合 ~

3世代での混合を考える前に、簡単のため2世代の場合を考える。フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は、質量固有状態の混合状態 $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ として表されると考える。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1(0)\rangle \quad (1.2)$$

と表される。ただし、 E_i 、 p_i は ν_i のエネルギー、運動量を表す。ニュートリノは相対論的 ($E_i \gg m_i$) であるため、距離 L 進んだ時、 $t = L/c$ 、 $p_1/c = \sqrt{E_1^2 - m_1^2} \simeq E_1 - \frac{m_1^2}{2E_1}$ より、 $E_1 t - p_1 x \simeq \frac{m_1^2 L}{2E_1}$ となるので、フレーバー固有状態の時間発展は

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} |\nu_1(0)\rangle \\ e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

となる。したがって、最初に $|\nu_\alpha\rangle$ だったものが L 進んだ後 $|\nu_\beta\rangle$ として観測される確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 \\ &= \sin^2\theta \sin^2\left(\frac{(m_1^2 - m_2^2)L}{4E}\right) \\ &= \sin^2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{12}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]}\right) \end{aligned} \quad (1.4)$$

である。ここで、 $m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$ とした。また、 ν_α のままである確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = |\langle \nu_\alpha(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 \quad (1.5)$$

$$= 1 - \sin^2\theta \sin^2\left(\frac{(m_1^2 - m_2^2)L}{4E}\right) \quad (1.6)$$

$$= 1 - \sin^2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{12}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]}\right) \quad (1.7)$$

となる。

1.2.2 ニュートリノ振動の理論～3世代の場合～

実際にはニュートリノは3世代であるため、前節の理論では不十分である。3世代の場合は、クォークでの混合を表す Kobayashi-Maskawa 行列 [5] と同様に、Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS)

行列

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

を用いて

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.10)$$

とかける。ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ である。 θ_{ij} は質量の固有状態 ν_i と ν_j の混合角である。 δ_{CP} は複素位相である。この δ_{CP} が0でない場合、PMNS 行列は虚部を含み CP 対称性の破れを生むため、CP 位相と呼ばれている。

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} \exp\left(-i\frac{m_i^2 L}{2E}\right) |\nu_i(0)\rangle \\ &= \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* \exp\left(-i\frac{m_i^2 L}{2E}\right) |\nu_\beta(0)\rangle \end{aligned} \quad (1.11)$$

を用いて、2世代の場合と同様に振動確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij} L}{4E}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij} L}{2E}\right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

また、反ニュートリノモードでの振動確率は、 U_{ab} を U_{ab}^* に置き換えることで得られる。

$$\begin{aligned} P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij} L}{4E}\right) \\ &\quad - 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij} L}{2E}\right) \end{aligned} \quad (1.13)$$

CP 対称性が保存している場合は、一般に次の等式が成り立つ。

$$P(\nu_{\alpha,L} \rightarrow \nu_{\beta,L}) = P(\bar{\nu}_{\alpha,R} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta,R}) \quad (1.14)$$

ニュートリノ・反ニュートリノの振動確率の差は

$$A_{CP}^{\alpha\beta} = P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}) - P(\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}) = 4 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \quad (1.15)$$

である。したがって $U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}$ が虚部を持つ場合、CP 対称性が破れている。

第2世代、第3世代の場合の議論から、ニュートリノ振動はニュートリノが有限の質量を持ち、弱い相互作用の固有状態と質量固有状態が異なり、さらに3つの質量固有状態が1つに縮退していない場合に起こることがわかる。振動確率は3つの混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} と2つの独立な質量二乗差 Δm_{ij}^2 ならびに1つの位相 δ_{CP} によって記述される。

1.3 ニュートリノ振動研究の現状

1.3.1 ニュートリノ振動の発見

1998年にスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの天頂角分布の測定から、ニュートリノ振動が初めて観測され [6]、KEK からスーパーカミオカンデにニュートリノを発射する K2K 実験により、その存在が確立された。(図 1.1 参照) [7]2010年には OPERA 実験を実施する研究チームにより初めて $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動現象を確認したと発表された [8]。(図 1.2 参照)

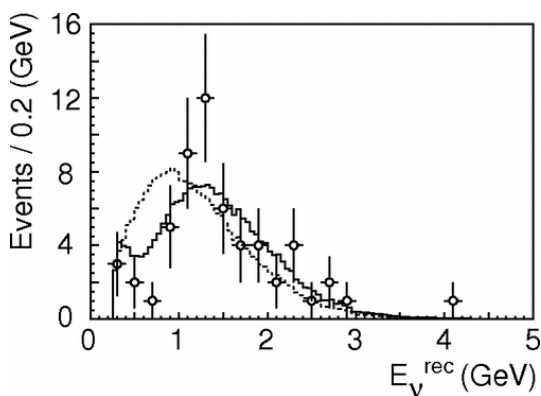


図 1.1: K2K 実験の最終結果 [7]

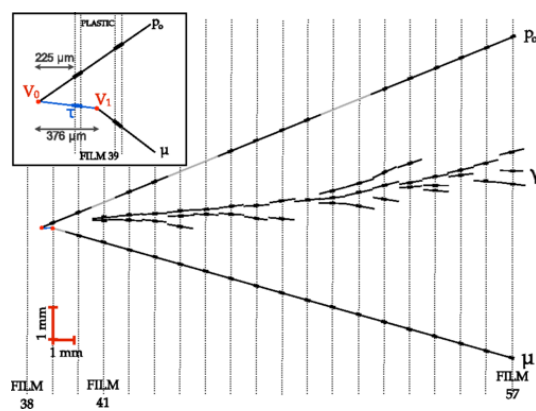


図 1.2: オペラ実験にて初めて観測されたタウニュートリノ出現事象 [8]

1.3.2 ニュートリノ振動パラメータの測定

ニュートリノ振動が確率されてからは、ニュートリノ振動パラメータを測定する研究が盛んに行われている。3世代ニュートリノ振動パラメータ測定の現状は表 1.1[9] のようになっている。表 1.1[9] にはニュートリノ振動のパラメータのベストフィット値と 3σ の値が書かれている。ただし、 δ_{CP}/π については 3σ でなく 2σ の値である。() 内の値は質量が逆階層性になっている場合であり、つまり、数値は $m_1 < m_2 < m_3$ に、(数値) は $(m_3 < m_1 < m_2)$ に対応している。また、 $m_1 < m_2 < m_3$ の場合は $\Delta m^2 = \Delta_{31}^2 - \Delta m_{21}^2/2 > 0$ 、 $m_3 < m_1 < m_2$ の場合は $\Delta m^2 = \Delta_{31}^2 + \Delta m_{21}^2/2 < 0$ と定義されている。

パラメータ	best-fit	3σ
$\Delta m_{12}^2 [10^{-5}eV^2]$	7.37	6.93 - 7.97
$ \Delta m^2 [10^{-3}eV^2]$	2.50 (2.46)	2.37 - 2.63 (2.33 - 2.60)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.297	0.250 - 0.354
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 > 0$	0.437	0.379 - 0.616
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 < 0$	0.569	0.383 - 0.637
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 > 0$	0.0214	0.0185 - 0.0246
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 < 0$	0.0218	0.0186 - 0.0248
δ_{CP}/π	1.35 (1.32)	(0.92 - 1.99) ((0.83 - 1.99))

表 1.1: ニュートリノ振動のパラメータ [9]

θ_{12} 、 Δm_{12}^2 は、スーパーカミオカンデ [10]、SNO による太陽ニュートリノ観測 [11]、KAMLAND [12] での原子炉ニュートリノ観測で測定されている。 θ_{23} 、 Δm_{23}^2 は、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測 [13]、K2K 実験 [14]、MINOS 実験 [15]、T2K 実験 [16] においてミューオンニュートリノ消失によって測定されている。 θ_{13} は、2010 年ごろまでは Chooz 実験 [17] によって上限値が与えられていたのみであったが、2011 年に T2K 実験により初めて $\theta_{13} \neq 0$ が報告された。2012 年に DayaBay、RENO、Double Chooz 実験の原子炉実験によって θ_{13} が求められ、2014 年には T2K 実験によって加速器ニュートリノによる電子ニュートリノ出現モードから θ_{13} が求められた。

1.3.3 質量階層性

ニュートリノ質量の絶対値はわかっていない。また、質量の固有状態の質量階層が順階層、逆階層 (図 1.3) のどちらなのかは未だ解明されていない。ニュートリノ振動実験によってニュートリノの性質は着実に明らかになってきているが、この質量階層性の問題や、ニュートリノがマヨラナ粒子か

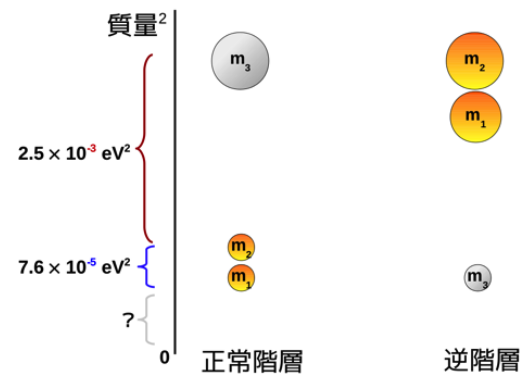


図 1.3: 質量階層性 [18]

ディラック粒子かなど、未解決の問題が残っている。また、 δ_{CP} の測定によるレプトンセクターでの CP 対称性の破れの検証は宇宙の物質優勢宇宙の謎を解明する手がかりになる可能性があり、物理学における重要課題の 1 つである。

第2章 T2K実験について

2.1 T2K実験の概要

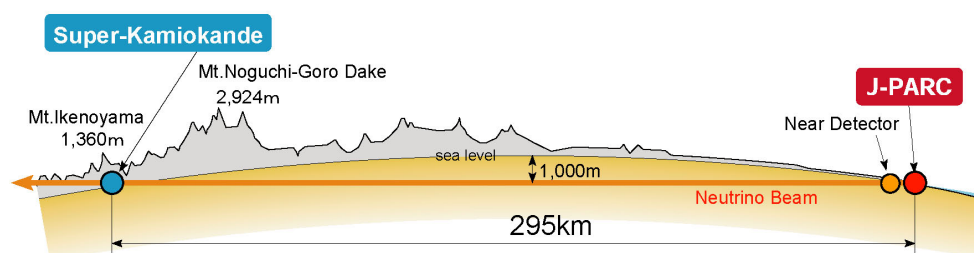


図 2.1: T2K 実験のニュートリノビーム

東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験、T2K 実験 [19] は 2009 年 4 月に開始した加速器型長基線ニュートリノ実験である。(図 2.1) 茨城県東海村に新しく建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC の 30GeV 陽子シンクロトロンからの大強度陽子ビームを炭素標的に当ててミュニュートリノビームもしくは反ミュニュートリノビームを生成し、岐阜県飛騨市に位置するスーパーカミオカンデの方へ出射している。地中を飛行している間のニュートリノ振動現象を観測するため、生成点直後に設置された前置検出器と 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に位置する後置検出器スーパーカミオカンデでニュートリノを検出している。(図 2.2)



図 2.2: 実験施設の位置

2.2 実験装置

2.2.1 J-PARC ニュートリノビームライン

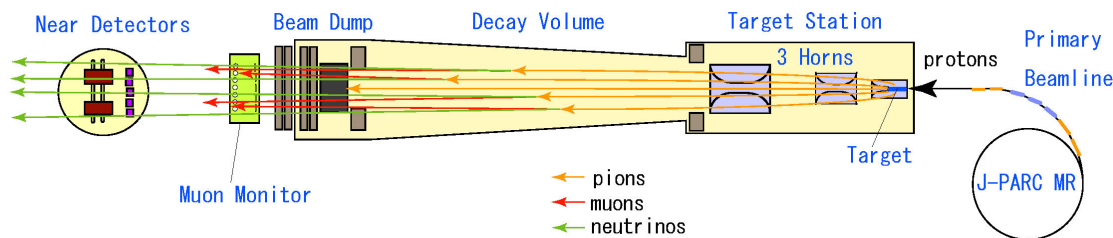


図 2.3: ニュートリノビーム生成過程

図 2.3 のように、J-PARC MR を出射した陽子ビームはニュートリノビームラインを經由して、グラファイト標的に照射される [20]。その標的で生成された π 中間子が飛び散るのを防ぐために電磁ホーンを用いている。電磁ホーンはアルミニウム合金の同軸構造となっており、ターゲットの周囲に作り出されたトロイダル磁場によって荷電粒子である π 中間子を前方に収束させる装置である。収束された π 中間子は Horn の下流に配置された Decay Volume で

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

と崩壊し、ミューニュートリノビームが生成される。 π^+ 、 π^- のどちらを収束させるかはホーン電流の向きを変えることで制御している。その下流の Beam Dump では崩壊しなかった π 中間子やビームに含まれる陽子、低エネルギーミューオンが吸収される。生成されたニュートリノビームは、off-axis 法と呼ばれる方法を用いて検出される。(図 2.4)

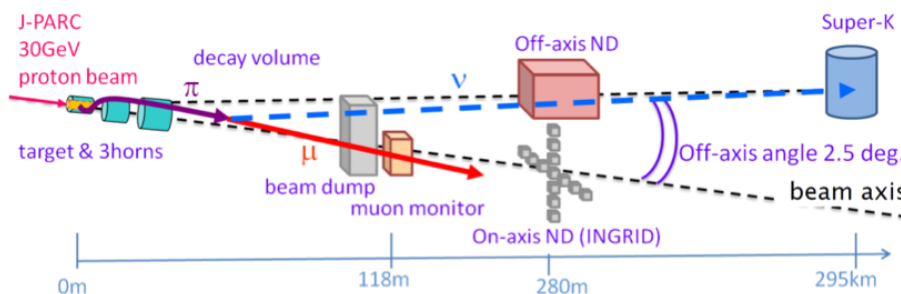


図 2.4: off-axis の概略図

off-axis 法とは、ニュートリノの中心軸、つまり π 中間子の収集軸を検出器の方向からずらす方法

である。これにより、幅の狭いエネルギー分布のニュートリノビームを得ることができ、またそのエネルギー分布のピーク値をニュートリノ振動確率の高いエネルギー領域に合わせることができる。 π 中間子の崩壊によって生成されるニュートリノのエネルギーは式 2.3 と表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.3)$$

ただし、ニュートリノと親粒子 π 中間子の進行方向の成す角を θ 、 π 中間子の質量、エネルギー、運動量を m_π 、 E_π 、 p_π とする。

式 2.3 より、 $\theta = 0$ (on-axis) の時 E_ν は p_π に比例するのに対し、off-axis の場合は図 2.5 のように、 π 中間子の運動量分布のバラつきに対するニュートリノのエネルギー分布の依存度が低いため、on-axis に比べ off-axis の方がニュートリノのエネルギーを単色に絞りやすいという特徴がある。

$$\frac{1.27\Delta m_{12}^2[eV^2]295[km]}{E_\nu[GeV]} = \frac{(2n-1)\pi}{2} \quad (n \text{ は正の整数}) \quad (2.4)$$

式 2.4 は T2K 実験におけるミューニュートリノの振動確率が最大となる条件である。この条件を満たす E_ν のうち最大のエネルギーは 0.7GeV である。T2K 実験では、図 2.6 のように、この最大エネルギー付近にピークをもつ off-axis 角 2.5° を採用している。また、信号に用いているのは荷電準弾性散乱 (CCQE)¹ でありこのエネルギー領域ではバックグラウンドとなる高エネルギーニュートリノによる π_0 を生成する反応を減少させることができる。

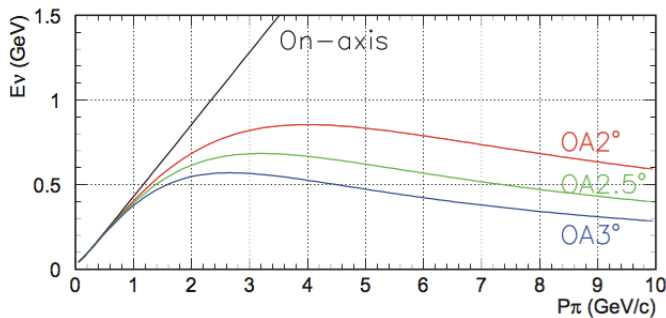


図 2.5: π 中間子の運動量とニュートリノエネルギーの関係

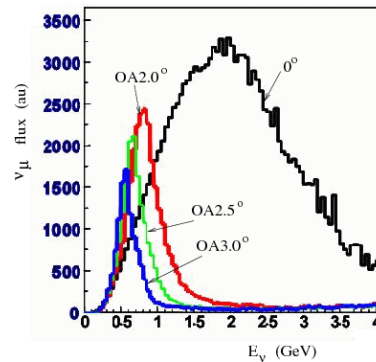


図 2.6: off-axis angle=0.0°、2.5°、3.0° におけるニュートリノエネルギー [21]

¹CCQE 反応: $\nu_l + n \rightarrow l + p$

2.2.2 検出器

off-axis ニュートリノビームを観測しているのは、前置検出器 ND280 と後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) である。また、ビームの安定性確認のため on-axis ビームの観測もしている。on-axis 検出器には、ミューオンビームの観測に用いている MUMON、ニュートリノビームの観測を行う INGRID がある。

2.2.2.1 off-axis 前置検出器

off-axis 検出器は以下に挙げる複数の装置から構成される検出器である。(図 2.7) スーパーカミオカンデの方向へ向かうニュートリノビームのフラックス、エネルギースペクトラム及び反応断面積を測定している [22]。

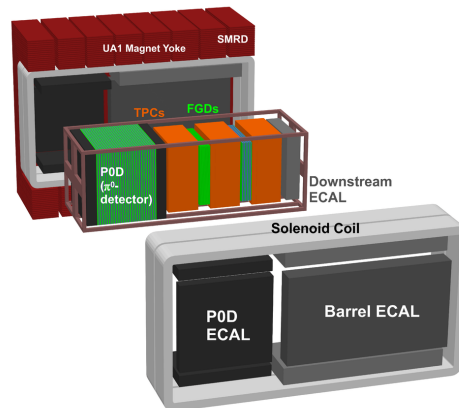


図 2.7: off-axis 検出器:ND280

* UA1 Magnet

0.2T の磁場により荷電粒子の飛跡を曲げるための大型常伝導ダイポール電磁石。

* POD (π_0 Detector)

最上流に設置された π_0 を生成するニュートリノ反応の測定に特化した検出器。鉛薄膜とシンチレータと水標的層のサンドイッチ構造。

* FGD (Fine Grained Detector)

セグメント化されたシンチレータからなる飛跡検出器。ニュートリノ標的となり、反応点付近の粒子を検出する。2 台のモジュールから構成され、後方のモジュールは水のニュートリノ反応断面積を測定するためにシンチレータと水標的層のサンドイッチ構造となっている。

* TPC (Time Projection Chamber)

読み出しに MicroMEGAS¹ を採用したタイムプロジェクションチェンバー。ニュートリノ反応で生成された荷電粒子の飛跡の曲がり具合から、その運動量を測定し、また dE/dx から粒子識別をする。3 台のモジュールから構成され、2 台の FGD の前後と間に配置される。

* ECAL (Electromagnetic CALorimeter)

UA1 Magnet 内側の最外層に位置し、P0D、TPC、FGD で起こったニュートリノ反応で生成される電子や γ が引き起こす電磁シャワーを捕え、そのエネルギーを測定する検出器。鉛層とシンチレータ層から構成される。

* SMRD (Side Muon Range Detector)

UA1 Magnet の鉄層のギャップにシンチレータを設置した検出器。大角度で散乱され、TPC に入射しなかったミュオンの飛程を測定し、エネルギーを再構成する。

2.2.2.2 off-axis 後置検出器:スーパーカミオカンデ

後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) は、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山の地下 1000m に位置する大型水チェレンコフ検出器である。(図 2.8) 50 キロトンの超純水を蓄えたタンクと、その内部に設置された 11200 本の 20 インチ光電子増倍管、1885 本の Veto 用光電子増倍管で構成されている。有効質量は全体の 45%にあたる 22.5 キロトンである。

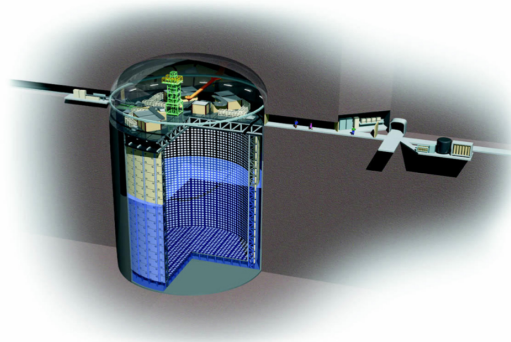


図 2.8: SK の概略図

ニュートリノが弱い相互作用によりタンク中の水と反応し、荷電粒子が生成される。この荷電粒子の相対論速度が $\beta > \frac{1}{n}$ (n は水の屈折率, $\beta = v/c$) となるとき $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$ となる方向に円錐状

¹ガス検出器であり、増幅領域が短く応答時間が早いことが特徴である。

のチェレンコフ光が放射される。水タンクの壁に設置された光電子増倍管でチェレンコフリングを観測する。このリングから粒子の種類、生成点、エネルギー、運動方向を再構成する。このようにして、SK ではミューニュートリノ消失事象・電子ニュートリノ出現事象についてのイベント数、エネルギー分布、運動量・散乱角分布を観測している。SK でのシグナルが J-PARC からのニュートリノ由来のものが識別するために、ニュートリノが J-PARC から出射された時刻と SK で観測された時刻の差がニュートリノの飛行時間と等しいイベントを選択している。J-PARC と SK の時刻同期には GPS を用いている。ニュートリノの相互作用には様々なモードがある。その中の CCQE 反応 ($\nu_l + n \rightarrow l + p$) を T2K 実験の信号事象として選択している。CCQE 反応は、2 対散乱の運動学的関係式 2.5 からニュートリノのエネルギーを再構成することができるためである [23]。

$$E_\nu = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_\mu + 2(m_n - E_b)E_\mu}{2(m_n - E_b - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu)} \quad (2.5)$$

ミュオンから放射されるチェレンコフ光は明瞭な 1 つのリング (図 2.9) を形成するのに対し、電子の方は電磁シャワーを起こすため不明瞭なリング (図 2.10) を形成する。SK では電子・ミュオンの誤識別の比率が 1% 程度と優れた識別能力を持っている [22]。

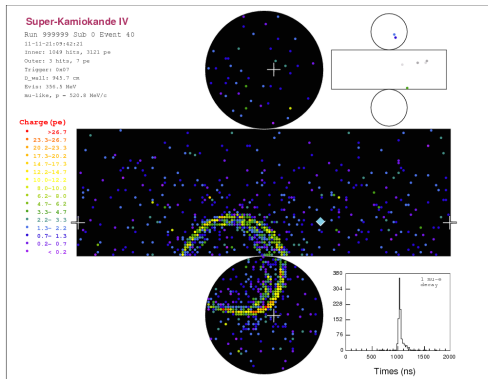


図 2.9: スーパーカミオカンデでの μ イベント (シミュレーション) による明瞭なリング

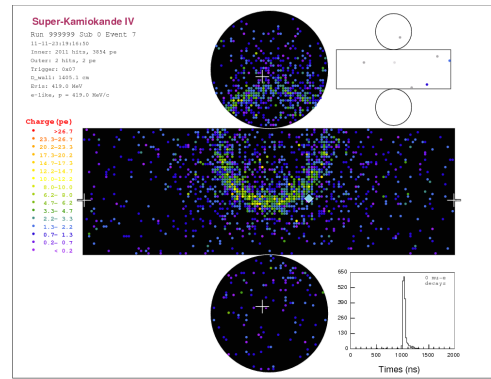


図 2.10: スーパーカミオカンデでの電子イベント (シミュレーション) による不明瞭なリング

2.2.2.3 on-axis ミューオンモニター:MUMON

ミューオンモニター、MUMON は、ビームダンプ直後に設置されており、 π 中間子の崩壊に伴い生成されるミューオンのうち、ビームダンプを通過した高いエネルギーを持つミューオンのプロファイル測定を行う検出器である。(図 2.11) 他の検出器と異なり、MUMON ではミューオンビームのプロファイルを各バンチ¹ 毎に、つまりリアルタイムに測定できる。系統誤差削減の観点からミューオンビームを 1mrad 以内で測定することが求められている。MUMON は標的の 118m 下流に位置することから、11cm の精度でビーム中心を測定することが要求されており、現状では 3cm という十分な精度での測定が実現されている。(図 2.12) MUMON はシリコン PIN フォトダイオードとイオンチェンバーという 2 つの独立した検出器で構成されているため、2 種類の測定からクロスチェックを行うことができ、また 1 方の故障にも対応することができる。上流側に 150cm×150cm の範囲内に 49ch のシリコン PIN フォトダイオードが等間隔に配置されている。下流側には、同じく 150cm×150cm の範囲内に 7 本のイオンチェンバーが 25cm 間隔で配置されている [22][24]。

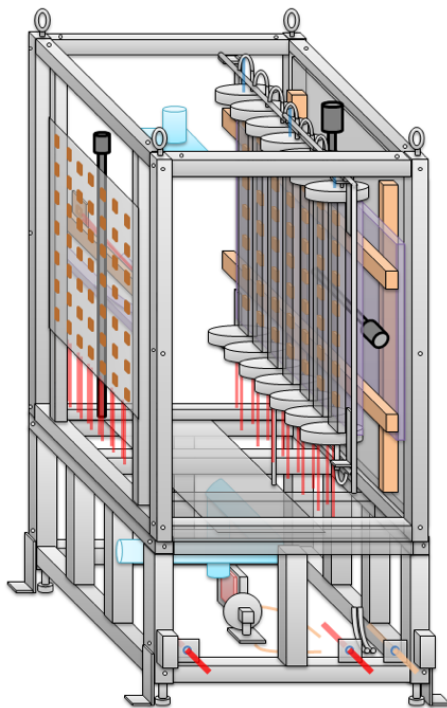


図 2.11: MUMON の概略図 (左が上流)

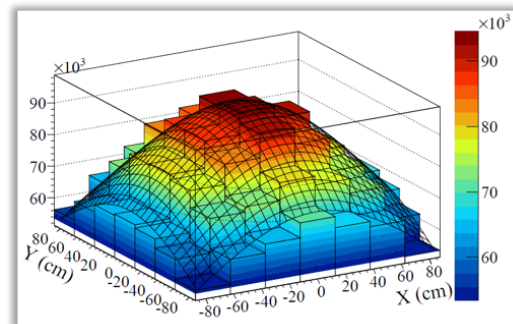


図 2.12: MUMON の Si 検出器で観測したビームプロファイル

¹加速器リング内の陽子はバンチとよばれる塊を形成している。1バンチずつニュートリノターゲットへ出射される。

2.2.2.4 on-axis 前置検出器:INGRID

INGRID とは、on-axis に置かれたニュートリノビームの方向、イベントレートを高精度で監視できる検出器である。十字に配置された縦型モジュール7台、横型モジュール7台と非十字モジュール2台の計16台の同一モジュールからなる。十字に伸びるモジュール列により縦横10mをカバーしている。(図2.13)各モジュールは鉄の層9層とシンチレータ層11層のサンドイッチ構造(図2.14)となっており、重さは約7トンである。鉄がニュートリノ標的となり、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子をシンチレータで検出し、各モジュールでのニュートリノ反応数からニュートリノビーム中心を測定する。図2.15にINGRIDによって観測したビームプロファイルを示した。図2.16はon-axis 検出器と off-axis 検出器の位置関係を示している。

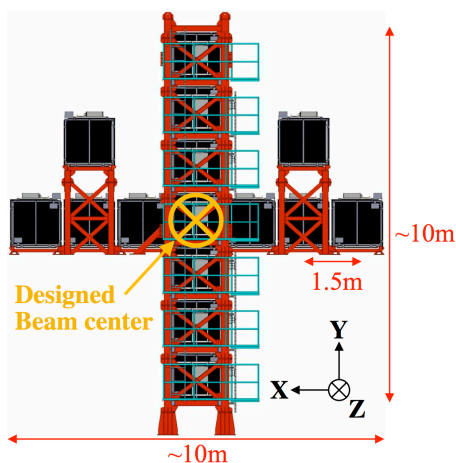


図 2.13: INGRID 概略図。

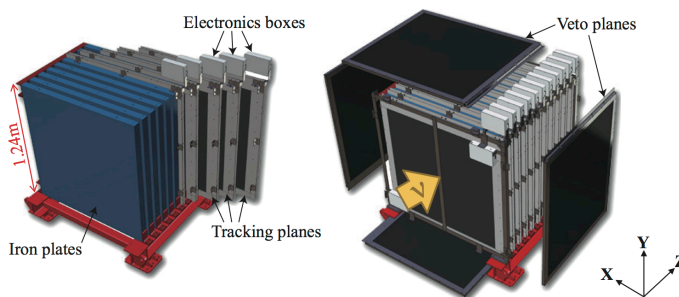


図 2.14: INGRID モジュールの構造

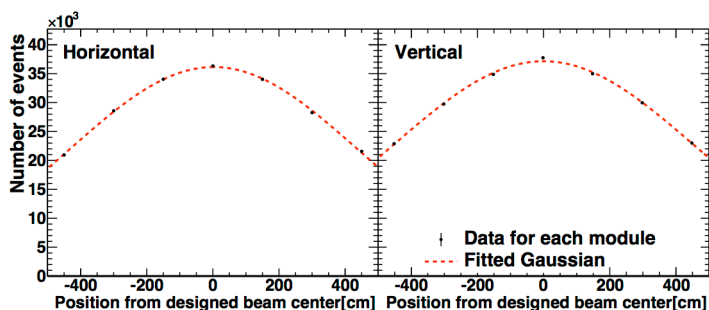


図 2.15: INGRID によるビームプロファイルの観測

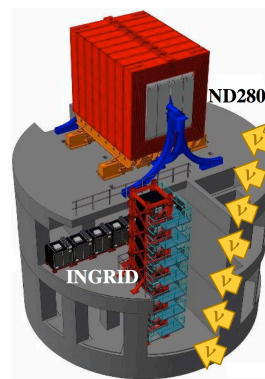


図 2.16: on-axis 前置検出器と off-axis 前置検出器の配置の概略図

2.3 T2K 実験の現状

T2K 実験では、2013 年までにミューニュートリノから電子ニュートリノが出現することを確立し、2014 年から 2016 年に反ニュートリノビームの振動現象の観測を行ってきた [25]。データの統計量は POT(Protons-On-Target) という単位で表しており、これはターゲットに当たった陽子の数を数えたものである。3 年間でためた反ニュートリノの積分陽子数は 7.471×10^{20} POT で、2013 年までにためたニュートリノビームでのデータ量 7.482×10^{20} POT とほとんど同じ数である。 15×10^{20} POT 分の全データの結果を図 2.17 に示した。 μ -like sample はミューニュートリノ消失現象探索のためのミューニュートリノの観測数を指しており、事象数は 135 イベントであった。反ミューニュートリノの事象は 66 イベントあった。また、電子ニュートリノ出現事象は 32 イベントであった。一方で反ニュートリノ出現事象は 4 イベントであった [26]。

Normal hierarchy						
Beam mode	Sample	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = +\pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$	Observed
neutrino	μ -like	135.8	135.5	135.7	136.0	135
neutrino	e -like	28.7	24.2	19.6	24.1	32
antineutrino	μ -like	64.2	64.1	64.2	64.4	66
antineutrino	e -like	6.0	6.9	7.7	6.8	4
Inverted hierarchy						
Beam mode	Sample	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = +\pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$	Observed
neutrino	μ -like	135.1	135.3	135.0	134.8	135
neutrino	e -like	25.4	21.3	17.1	21.3	32
antineutrino	μ -like	63.8	64.0	63.8	63.7	66
antineutrino	e -like	6.5	7.4	8.4	7.4	4

図 2.17: $\delta_{CP} = -\pi/2, 0, +\pi/2, \pi$ について、順階層・逆階層それぞれの場合の SK で観測を期待される事象数と T2K の Run1-7c (2016 年夏までの全データ) で実際に観測された事象数。期待される事象数は、 $\sin^2 \theta_{13} = 0.0217$, $\sin^2 \theta_{23} = 0.528$, $\Delta m_{32}^2 (\Delta m_{13}^2) = 2.509 \times 10^{-3} eV^2/c^4$, $\sin^2 \theta_{12} = 0.846$, $\Delta m_{21}^2 = 7.53 \times 10^{-5} eV^2/c^4$ と仮定したもの。

振動解析の結果が図 2.18 と図 2.19 と図 2.20 である。 ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ の消失事象を解析した結果、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.532$, $\Delta m_{32}^2 = 2.545 \times 10^{-3} [eV^2/c^4]$ になった。(図 2.18) $\sin^2 \theta_{13}$ については、図 2.20 のように原子炉での測定が高精度である。その原子炉での結果を含めた δ_{CP} が図 2.19 と図 2.20 の右図である。CP 位相の 90% の信頼領域は、順階層で $[-179^\circ, -22^\circ]$ 、逆階層で $[-120^\circ, -42^\circ]$ であった [27]。

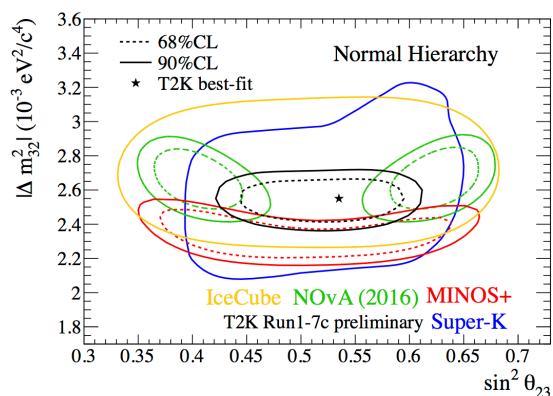


図 2.18: T2K 実験のデータから明らかになった Δm_{32}^2 - $\sin^2 \theta_{23}$ 領域における最尤推定点 (黒点) と信頼領域 (黒線)。比較のため、IceCube(黄線), NO ν A(緑線), MINOS+(赤線), Super-K(青線) の結果が示されている。

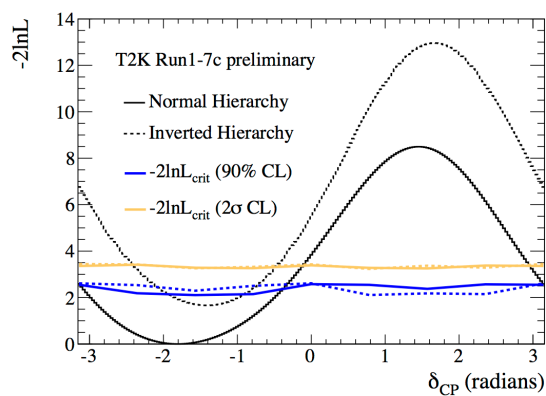


図 2.19: T2K 実験のデータから明らかになった δ_{CP} の $\Delta\chi^2$ の分布。原子炉実験で得られた $\sin^2 \theta_{13}$ を用いて制限をつけている。Feldman-Cousins 法を用いて得られた 90%信頼領域 (青) と 2σ 信頼領域 (黄) も示した。

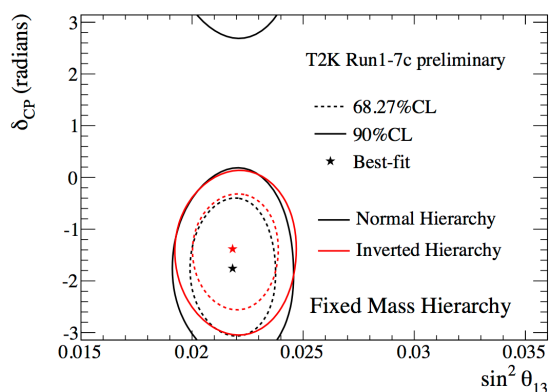
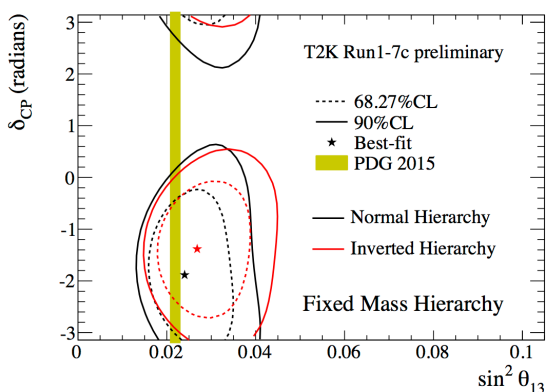


図 2.20: δ_{CP} - $\sin^2 \theta_{13}$ 領域における最尤推定点 (点) と信頼領域 (線)。順階層の場合 (黒) と逆階層の場合 (赤) を分けて示している。左図は T2K のデータのみを用いた結果で、黄色の影は原子炉実験の結果 $\sin^2 \theta_{13} = 0.085 \pm 0.005$ を表している。右図は T2K のデータに原子炉実験の結果を含めた値である。

T2K 実験の次なる目標は、CP の破れを 3σ の精度で発見することである。この目標を達成すべく、以下のものを課題として成し遂げようとしている [25]。

- ・ MR の強度向上。

現状の 435kW から 1.3MW への増強を目指す。ビームの強度向上に伴う取得 POT の量のシナリオを図 2.21 に示した。

- ・ 電磁ホーン電流の増強。

標的で生成された π 中間子を収束している電磁ホーンの電流を現状の 250kA から 320kA に増強し、ニュートリノの収集量を 10% 増やす。

- ・スーパーカミオカンデにおける事象収集率向上。

スーパーカミオカンデの事象選択アルゴリズムを改良し、使用可能なデータ量を 40% 増やす。

- ・系統誤差の削減。

現在約 6%の系統誤差を 2/3 の 4%に削減する。

これらの Upgrade 計画が成功した場合の測定パラメータの感度が図 2.22 と図 2.23 である。

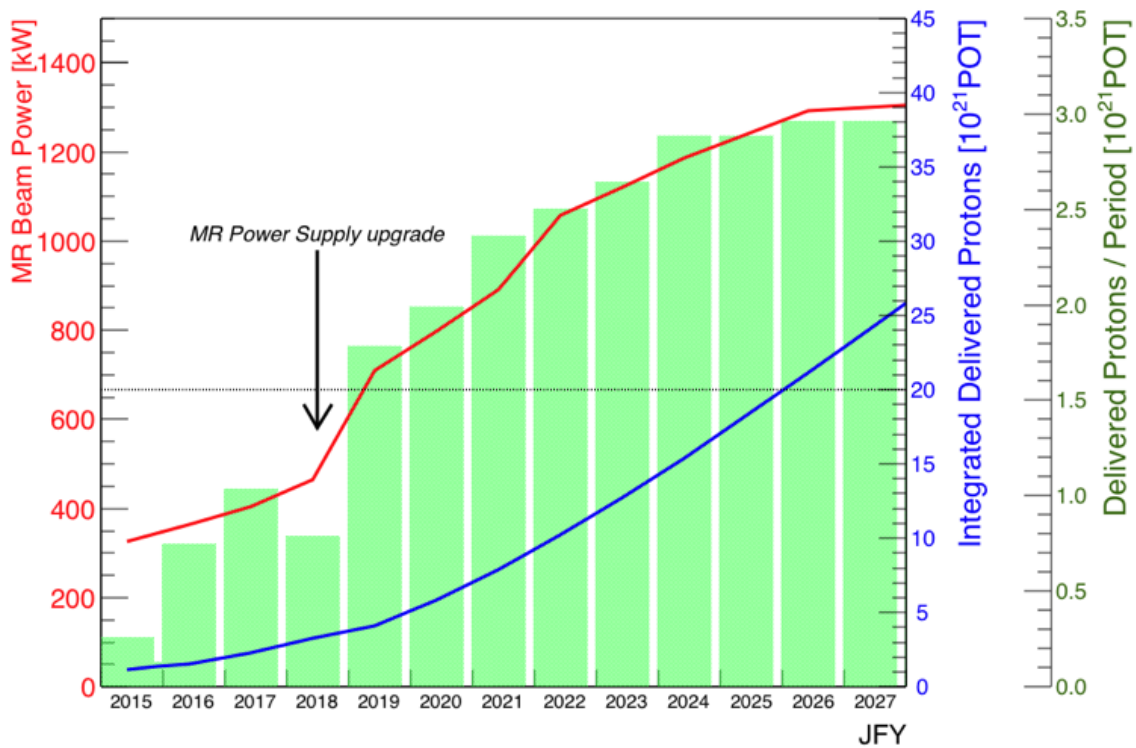


図 2.21: MR のビーム強度と POT の向上計画

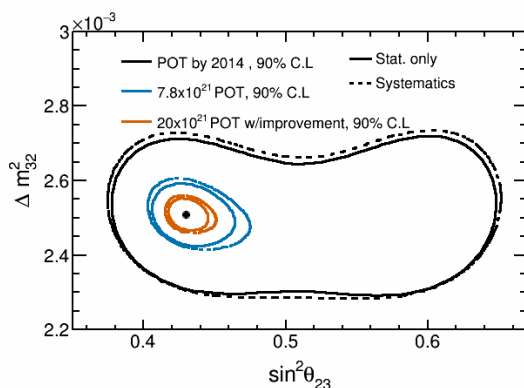


図 2.22: Δm_{32}^2 と $\sin^2 \theta_{23}$ の 90% C.L. の感度。 $\sin^2 \theta_{23} = 0.43$ を仮定している。橙線は T2K Phase 2 の最大積算データ量 20×10^{21} POT で、取得データのうち有効な統計データを 50% 増やすよう改善したと仮定したものである。

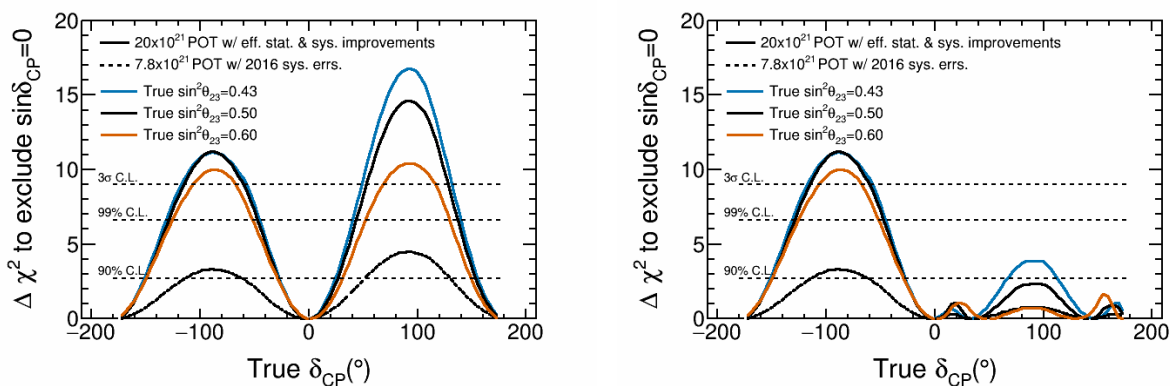


図 2.23: T2K Phase 2 の δ_{CP} 感度。順階層を仮定している。 $\sin^2 \theta_{23}$ (0.43, 0.5, 0.63) の場合の示している。左図は質量順序が決まった場合。右図は質量順序が決まっていないままの場合。

特に MR の強度向上は T2K 実験の測定精度向上にとって必須課題である。次章では、ニュートリノビームの生成源である大強度陽子ビームを作り出す J-PARC 加速器について、その概要と大強度化に向けた課題を述べる。また MR におけるビームモニターの現状と課題についても記述する。

第3章 J-PARC

3.1 J-PARC 概要

Japan Proton Accelerator Research Complex(J-PARC) は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設で、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) によって建設された。(図 3.1) J-PARC では加速器で加速した陽子を図 3.2 のようにニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設、物質・生命科学実験施設へ供給している。大強度陽子ビーム (図 3.3) を各実験施設内で標的にあて、中性子、ミュオン、K 中間子等様々な二次粒子の大強度ビーム¹ を作り出して実験に利用していることが特徴である。(図 3.4)

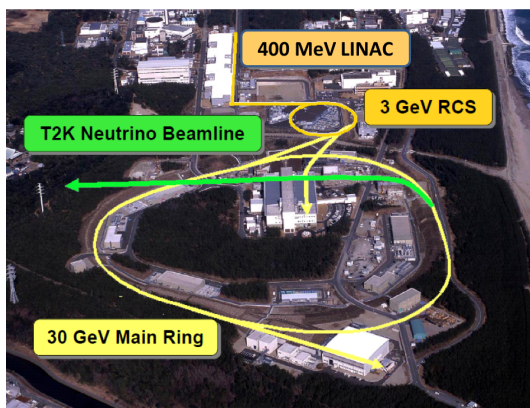


図 3.1: J-PARC 施設

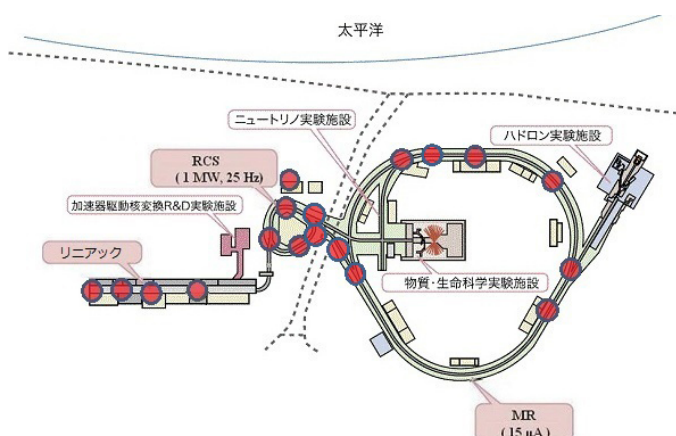


図 3.2: J-PARC の施設概略図

J-PARC の加速器は、400MeV Linac、3GeV RCS(Rapid Cycling Synchrotron)、30GeV MR(Main Ring Synchrotron) の3段階の加速器で構成されている。RCSで加速されたビームは物質・生命科学実験施設またはMRへと輸送される。MRでさらに30GeVまで加速された陽子ビームは、速い取り出しまたは遅い取り出しモード(付録A.4参照)でそれぞれニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設へと出射される。

¹二次粒子の生成数は陽子ビーム強度に比例するため、大強度陽子加速器で大強度二次粒子ビームを生成することができる。

2010年の運転開始から度重なる改良を重ね、順調にビーム強度を上げている。図3.5にその経過を示した。

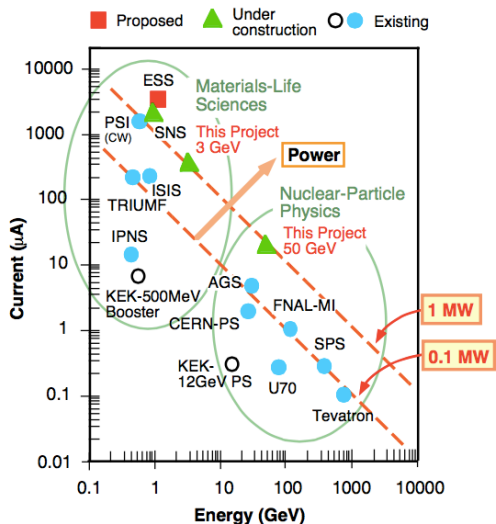


図 3.3: ビーム電流とエネルギーについての J-PARC 加速器と他の加速器との比較

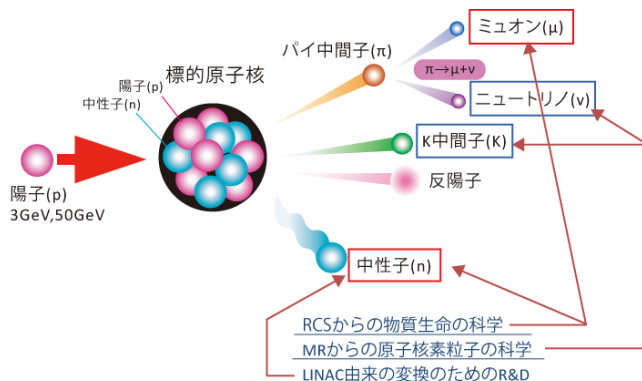


図 3.4: J-PARC で生成されている二次粒子の概念図 [28]

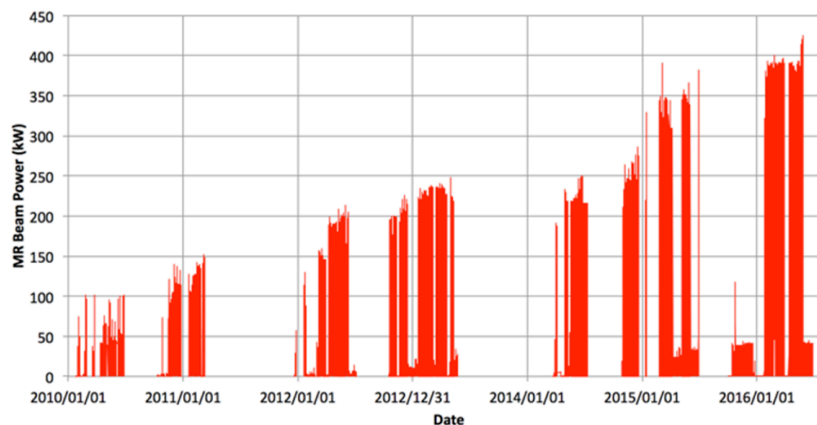


図 3.5: 2016 秋までの MR ビームパワーの推移 [29]

3.1.1 Linac

Linac は J-PARC 加速器における初段の線形加速器であり、負水素イオン源（付録 A.5 参照）、高周波四重極 Linac(RFQ)、ドリフトチューブ Linac(DTL)（図 3.6）、機能分離型ドリフトチューブ Linac(SDTL) から構成されている。（図 3.7）機能分離型ドリフトチューブ Linac の加速エネルギーは設計値が 190MeV、達成値が 181MeV である。2013 年夏に環結合型 Linac(ACS)¹ をインストールし、その翌年 1 月にエネルギー 400MeV を達成した。2014 年の夏には、それまで開発を進めていた新イオン源²[31]、RFQ、改良型 RF チョッパーシステムを導入し、ピーク電流 50mA での運転を実現している³。



図 3.6: J-PARC Linac DTL の様子 [30]

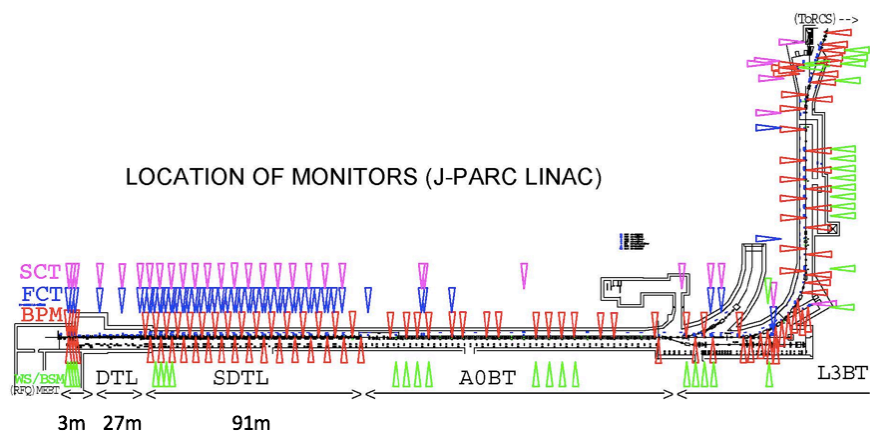


図 3.7: J-PARC Linac の構成図

¹J-PARC が世界で初めて実用化した。

²新型のイオン源にしたことで、それ以前の約 2 倍の陽子数の生成に成功した。

³陽子加速器の性能を表すパラメータはピーク電流・エネルギー・エミッタンスである。ピーク電流とエネルギーの積がビーム強度である。2 次粒子の数はビーム強度に比例するため、加速器の性能を表すパラメータとして扱われている。

パラメータ	デザイン値	2016年時点での値
イオン源粒子	H^-	H^-
エネルギー	400MeV	181MeV→400MeV(2013年に達成)
周波数 (RFQ、DTL、SDTL)	324MHz	324MHz
Repetition Raate	50Hz	50Hz(RCSへは25Hz、残りはADSへ)
Macro Pulse Length	500 μ s	500 μ s
Chopping Rate	56%	56%
Peak Current	50mA	30mA→50mA(2014年に達成)
Total Length	249m	248m

表 3.1: J-PARC Linac のパラメータ

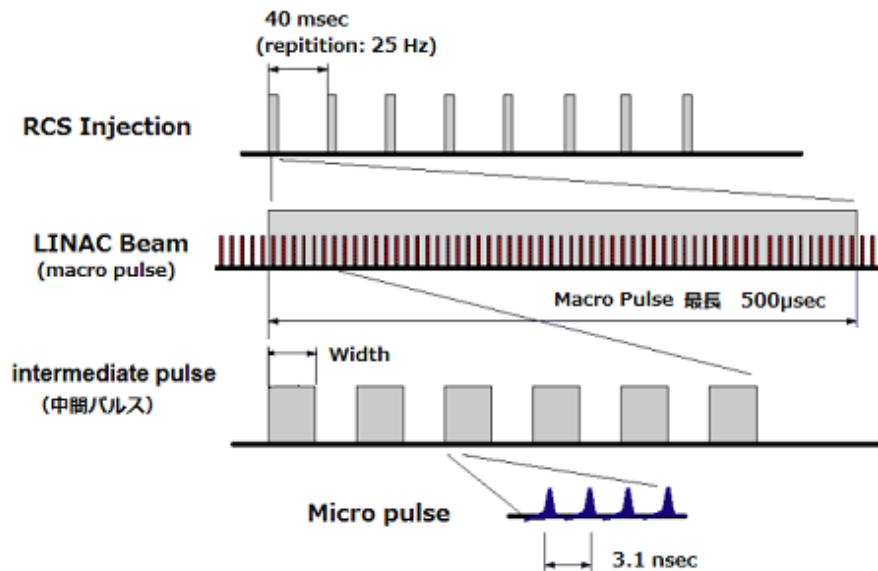


図 3.8: Linac から RCS へ入射する際のバンチ形成の仕組み [28]

加速器内でビームは高周波電場がつくる安定領域に陽子が詰め込まれ、バンチと呼ばれる状態になっている。Linac の場合、324MHz で 3.1ns 毎に加速され Macro Pulse を形成する。(図 3.8) この Macro Pulse を 500 μ s 程度の長さをひとかたまりとし、その塊を 40ms 周期で RCS へ入射している [28]。

3.1.2 RCS

RCSとは、J-PARCにおけるLinac後段のシンクロトロンで、陽子ビームを3GeVまで加速させる。3回対称性をもつおむすび型の構造となっている。(図3.9) RCSの各パラメータを表3.2に記した。RCSへの入射方法の特徴としてあげられるのが、多重入射方式とペインティング入射方式である。多重入射とは、周回中のバンチに対し多周回にわたり重ねて入射をする方式のことで、大電流ビームを生成できるという利点をもつ。RCSにおいては、Linacで加速された負水素イオンはRCS入射直前の荷電変換膜¹を通過し、陽子に変換される。

ペインティング入射とは、入射の位置や運動量を時間変化させてLinacからのエミッタンスの小さいビームを縦方向・横方向²に一様に分布させ、粒子分布が密になるのを防ぐ入射方式を指す。これにより、空間電荷効果³の低減が期待される。横方向のペインティング入射により、入射時はエミッタンスが 216π mm mradと大きいのが、加速中のadiabatic dumping⁴の効果により 36π mm mradまで小さくなる。

さらにRCSでは、磁性合金を用いた加速空洞(MA空洞)⁵を使用しており、従来のフェライト空洞⁶に比べて数倍の加速電圧(430kV)を作り出すことに成功した。加速されたビームはパルス偏向電磁石⁷によって物質生命科学実験施設(MLF)かMRへ振り分けられる。RCSでは一度に2バンチ加速でき、8バンチ加速をするMRへは4回にわたり入射を行う。(図3.10)

パラメータ	デザイン値	2016年時点での値
周長	348.333m	348.333m
平均半径	55.44m	55.44m
入射エネルギー	0.4GeV	0.4GeV
出射エネルギー	3.0GeV	3.0GeV
出力ビームエネルギー	1MW	1MW
周回周期(入射時/出射時)	1.629 μ s/1.196 μ s	1.629 μ s/1.196 μ s
周波数	25Hz	25Hz
平均電流	333 μ A	333 μ A

表 3.2: J-PARC RCS のパラメータ

¹膜厚約 $1\mu\text{m}$ の炭素性薄膜。電子を2個剥ぎ取られ陽子に変わる。

²縦方向はビームの進行方向を指す。横方向は縦方向に垂直な方向を指す。

³荷電粒子間のクーロン斥力によりビームを発散させる力が生じること。

⁴エミッタンスはビームの運動量に反比例するため、加速によりエミッタンスが小さくなる。このことをadiabatic dumpingと呼ぶ。

⁵ファインメットという特殊なテープをコイル状に巻いたMA空洞[32]

⁶イオン加速器においてはフェライトを用いた加速空洞がよく使用される。

⁷電磁石が励磁したときにビームはMRへ行き、磁場が0のときはMLFへ振り分けられる。



図 3.9: RCS

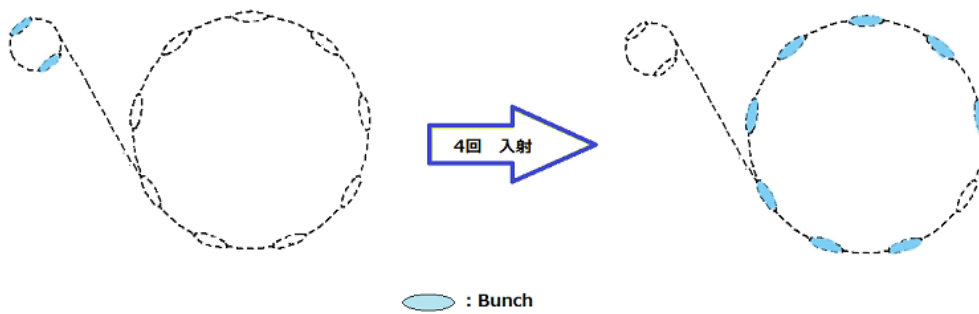


図 3.10: RCS から MR へ入射する際のバンチ形成の仕組み [28]

3.1.3 MR

MR は J-PARC における三段目の加速器 Main Ring Synchrotron の略称で、図 3.11 のような 3 回対称性をもつおむすび型のシンクロトロンである。周長は 1567.5m で 1 つのアーチ部¹の長さは 406.4m、直線部の長さは 116.1m である。3 つの直線部はそれぞれ、入射部及びコリメータ、遅い取り出し部、RF cavity 及び速い取り出し部と住み分けがなされている。ビームは MR 前段の RCS から 3-50BT と呼ばれている輸送ラインを通して MR へ入射される。入射の際、入射セプトムマグネット¹で軌道を変え、周回軌道へビームを移動している。ハーモニックナンバー (付録 A.1 参照) は 9

¹加速器の曲線部。偏向電磁石により軌道を曲げている。MR には 3箇所ある。

で、その内の8バンチにビームを入射(図3.12)し、9台の加速空洞により陽子を30GeVにまで加速している。

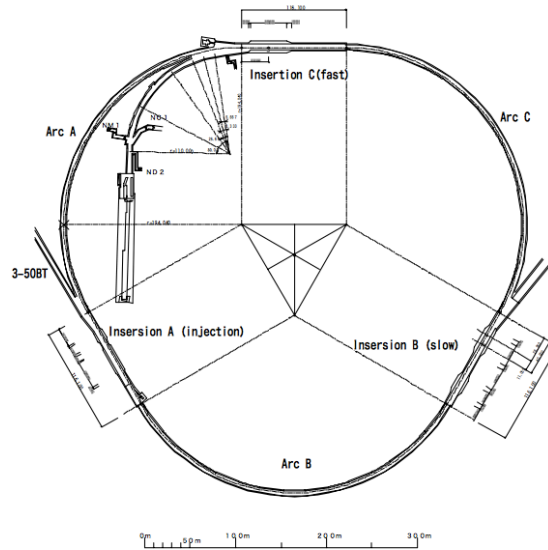


図 3.11: MR トンネル内構造 [33]

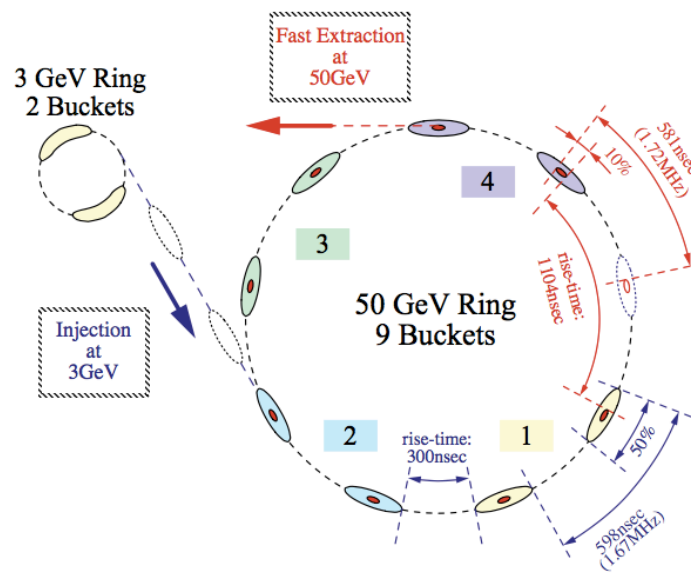


図 3.12: MR のバンチ構造 [33]

MRの各パラメータを表3.3に記した。加速してエネルギーが大きくなる途中、トランジションエネルギー(付録A.2参照)を通過すると、縦方向の収束力がなくなってしまい、加えて安定同期位

相の移動がおこるためビームロスの原因となる。MR ではトランジションエネルギーが虚数になるラティスを選んでおり、加速中にトランジションエネルギーを通過しないようにしている [34]。

パラメータ	デザイン値	2017年現在
周長	1567.5m	1567.5m
平均半径	249.475m	249.475m
入射エネルギー	3GeV	3GeV
出射エネルギー	50GeV	30GeV
ハーモニックナンバー	9	9
バンチ数	8	8
典型的な transition gamma		j31
RF Voltage	280kV	240kV
速い取り出しの繰り返し周期	2.83s ¹	2.48s
速い取り出しのチューン (horizontal, vertical)	(22.3, 17.3~22.3)	(21.35, 21.43)
ビームインテンシティ	3.3 × 10 ¹⁴ ppp	

表 3.3: J-PARC MR のパラメータ

3.2 J-PARC 大強度化

3.2.1 J-PARC 大強度化に向けた現状

現在 J-PARC MR では順調にビーム強度を上げており、2016 年夏季シャットダウン前のランで、ビームパワーがおおよそ 390kW、終盤には 425kW での運転を達成した。典型的なビームで、入射時 2.7×10^{13} protons / bunch、加速後 2.15×10^{14} ppp であった。² その後 10 月 26 日に運転を再開し、2017 年 1 月現在で図 3.13 のように 450kW 前後の安定的な出力に成功している [35]。

現在の目標は、2019 年に速い取り出しでのビームパワーを 750kW まで上げることである。ビームパワーは、以下の式 3.1 で表される。

$$\text{Beam power} = 30[\text{GeV}] \times \frac{(\text{The number of proton per pulse}) \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]}{(\text{Repetition cycle})} \quad (3.1)$$

式 3.1 から明らかなように、ビームの繰り返し周期³(図 3.14) を短くし、単位時間あたりの出射回数が増やすことで強度の大幅アップが実現できるため、繰り返し周期を 2.48s から 1.3s に変更する予定である [60]。速い繰り返し周期での運転に向け次のような改良を行った。まず、それまで 315kV の

¹0.17 s(Injection)+1.96s(Acceleration)+0.7 s(Decreasing Field)=2.83s

²ppp は protons per pulse の略。8 バンチ分を 1pulse と表現している。

³ビームの入射、加速、取り出しの一連の操作の周期

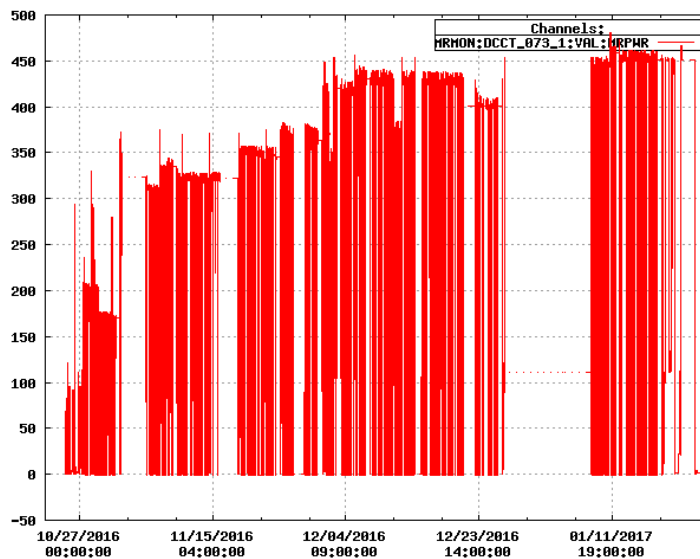


図 3.13: 2016 秋以降の MR ビームパワー [36]

加速電圧であった RF キャビティ を 1.3s 運転での要求性能 540kV を超える 602kV の RF キャビティ に取り替えた。また、新たな QFR マグネット⁴ 電源を D1 電源棟にインストールした。磁場シールドの装備により周回ビームに対する漏れ磁場の影響が 1mTm から 0.1mTm に改善した入射セプタム マグネット⁵ 及びその電源のインストールも完了した。RCS の 1MW 出力達成に応じて、バンチ当たりより多くの陽子ビームを加速できるよう、2016 年秋からは図 3.15⁶ のように MR のベータトロン チューンを (22.40, 20.75) から (21.35, 21.43) に変更した。さらに長期的には、ビームの粒子数を現状の 2×10^{14} ppp から、およそ 3×10^{14} ppp に増やすことで、ビームパワー 1.3kW を目指している。

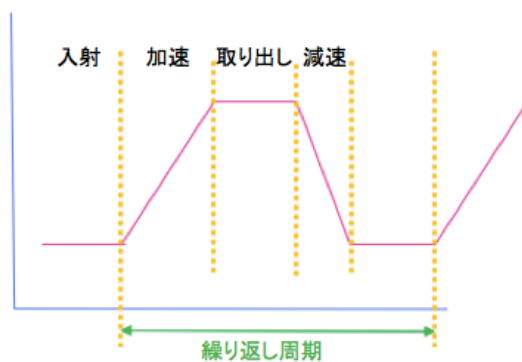


図 3.14: 繰り返し周期の説明

⁴収束型 4 極マグネット

⁵MR への入射の際に 3-50BT の最下流、MR の直前に設置した。

⁶共鳴線については付録 A.7 参照

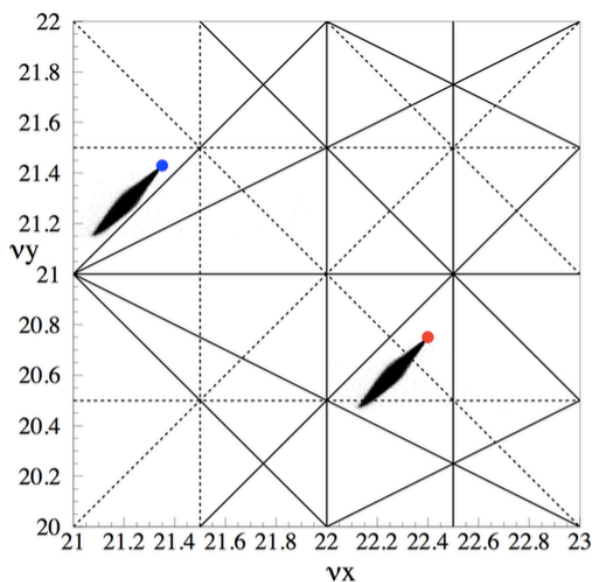


図 3.15: 共鳴線とチューンスプレッドの関係 [29]。実線は 3 次共鳴線で、点線は半整数及び線形結合共鳴線である。380kW における空間電荷効果によるチューンスプレッドの広がり黒塗で表している。赤点はベータトロンチューン (22.40,20.75)、青点は (21.35,21.43) に対応している。

3.3 J-PARC の大強度化に伴うビームロス

前節で述べたように、ビームの強度向上のため加速器のアップグレードが進行中である。強度を上げるに従ってビームロスが増大するという問題が懸念されている。典型的には、現状の運転で、入射の間に 170W、加速開始から 0.12 秒間に 417W のロスを引き起こしている [29]。さらに、ビーム強度の増強によってビームロスの増大が予想される。RCS からの入射陽子の増加はビームロスの指数関数的増加を、MR 繰り返し周期短縮はビームロスの線形増加を招く [37]。

ビームロスの問題点には 2 つの側面がある。1 つ目はビーム自体の粒子数が減少すること、2 つ目は周辺機器を放射化することである。実質的には後者が特に問題となっている。加速器内の残留放射線量がある程度以上になると、トンネル内での維持保守・開発改善作業が困難になる。そのため、ある閾値以上のビームロスが生じた場合、ビーム強度を減らしての運転が余儀なくされる。J-PARC MR では、過度な放射化を未然に防ぐため、毎週のメンテナンス日にトンネル内線量測定が行われており、運転中はビームロスモニターで損失量が許容範囲に収まっているかを監視している。大強度での安定的なビーム運転のためにも、強度増強に伴うビームロスをいかに抑えるかが現在の J-PARC MR における重要な課題である。

3.4 J-PARC MRのビームモニター

ビームロス対策、ビーム制御のためには、まずビームを観測し、ビームの情報を得ることが基本である。J-PARC MRにはさまざまなモニターが設置され、ビームを観測している。表3.4はMRに配置されているモニターの一覧である。ビームの電流値を測定する Direct-Current Current Transformer(DCCT)、Fast Current Transformer(FCT) や、ビームロス量を測定する Beam Loss Monitor(BLM)、ビームのプロファイルを測定する Ion Profile Monitor(IPM) や、位置を測定する Beam Position Monitor(BPM) などがある。

BPMとは、真空パイプ内側に電極を取り付けたビーム非破壊型¹モニターである。ビーム通過時に電極に誘導される信号を観測する。J-PARC MRには2016年11月時点で186台設置されている。これらのBPMは、Closed Orbit Distortion(付録A.6参照)の測定、ベータatron周波数の測定、Chromaticityの測定、ターン²毎のビームの位置測定に用いられビームロスの軽減に貢献している。J-PARC MRでは基本的には電極数が2つ、もしくは4つのものを使用しており、電極の形状は求められる性能によって様々である。例えば tapered coupler BPMは、電極を指数関数型にすることで、高周波1GHzまでの感度を持っており、ビームの高周波成分を観測することに成功している³[48]。また、ダイアゴナルカット BPMでは、ビーム位置測定時の歪みを抑えている⁴。

ビームプロファイルを観測できるモニターは、Flying wire monitorと Ion Profile Monitor(IPM)である。Flying wire monitor(FWM)とは、数m/sの速さでビームを横切るようワイヤを動かし、ワイヤによる散乱粒子をシンチレータとPMTで測定するモニターである[63]。J-PARC MRでは直径 $7\mu\text{m}$ のカーボンワイヤを使用し、5m/sで移動させていた。しかし、ビーム強度 4.4×10^{13} protons/2bunchesに耐えられずワイヤが切れてしまうという問題が発生したため、この強度以上の大強度下での使用は難しい状況である。現在は低い強度でのみ使用しており、ビームパラメータの一つであるエミッタンスの測定等に使われている。Ion Profile Monitor(IPM)とは、1方向のプロファイルを測るビーム非破壊型モニターである[62]。ビームが通過時、残留ガスがイオンと電子に電離する。この2次粒子を電場で誘導し、到達位置と信号の大きさを測定している。ビームの大強度化に伴い、ビーム自身が電場を歪ませ、正確な位置情報が失われるという問題が生じている。電荷収集電場と平行にガイド磁場を印加し、電子をトラップして歪みを改善する方法を現在研究中である[38]。

¹非破壊型モニターとは、名前の通りビームを直接破壊しないモニターである。一方のビーム破壊型モニターとは、直接ビームに物質を当て、相互作用によりビームを観測するモニターである。例えばビーム進行方向に対して垂直に蛍光板を配置するビームプロファイルモニターは破壊型である。

²1ターンとは、ビームがMRリングを1周することを意味している。

³tapered coupler BPMでバンチ内ビーム位置を観測し、フィードバックシステムによりビーム位置の補正をしている。

⁴第6章に図で示すように、通常のストリップライン BPMでビームを測定した時、算出位置と実際の位置が非線形である。一方ダイアゴナルカット型のBPMは算出位置と実際の位置が線形に応答する。

モニター名	台数
DCCT	2
FCT	7
WCM	2
BPM	186
16 electrode monitor	1
taperd-coupler BPM	2
BLM(proportional)	238
BLM(ionization)	36
BLM(scintillator)	2
SSEM/MRPM(for SX)	1
IPM	3
Flying wire monitor	2
Stripline kicker	4

表 3.4: MR 中の monitor 一覧 (2016 年秋)

3.5 J-PARC MR のモニターの課題

ビームモニターも大強度に対応してアップグレードしている。J-PARC MR のモニターにおける最近の改良点を以下に挙げる [39]。

- ・ 大強度化に伴うビームロスの増加に対応できるよう、BLM の信号処理回路がより広範囲な電圧が測定でき、速い処理のできるものに置き換えた。
- ・ 大強度化に伴いビーム広がりが大きくなるため、Wall Current Monitor をアパーチャー $\phi 134$ のものから $\phi 165$ のものにとりかえた。
- ・ アポートするビーム量がビームダンプ¹ の許容量を超えていないか監視するため、アポートラインに Fast Current Monitor を加えた。

ビームモニターにおける現状課題は以下の通りである [39]。

- ・ ビームロスの評価に有用な DCCT のデジタル信号処理回路により生じている誤差の改善が必要である。
- ・ 電極のバラつきが小さくなるような改良型テーパードカップラー型 BPM を開発中である。
- ・ 大強度下でビームサイズの測定ができるモニターの開発が必要である。

¹各実験施設へビームを送らない場合にビームを捨てるための場所

いずれも重要な課題であるが、ここでは課題の3つ目に着目したい。

ビームサイズはビームの状態をあわらず重要なパラメータである。また、ビームロス削減の観点からも重要な測定項目の一つである。次章では、まず、ビームのサイズ測定とビームロスに関係づけるビームの入射制御についての説明をする。続く第5章で、ビームサイズに関する量である4重極モーメント²の4電極ビームモニターを用いた測定について述べる。第6章では4重極モーメント測定のために新規開発した多電極のビームモニターについて記述する。

²詳細は第5章で説明する。

第4章 入射調整

本章では、まず初めに入射調整についての概要を述べる。続いて、J-PARC MR での入射調整の現状・今後の課題について説明する。

4.1 入射調整の一般論

入射調整の説明のため、ビームの基本的な運動についてはじめに説明する。

4.1.1 Hill's equation

加速器内の粒子は、Hill's 方程式

$$x''(s) + K(s)x(s) = 0 \quad (4.1)$$

にしたがって運動する [42]。ここで s はビーム進行方向の位置、 $K(s)$ は 4 重極マグネットなどの外力である。解

$$x(s) = \sqrt{\beta(s)}\epsilon \cos[\phi(s) + \phi_0] \quad (4.2)$$

を Hill's 方程式に代入し解くことで、関係式

$$\phi' = \frac{1}{\beta} \quad (4.3)$$

が得られる。この関係式を用いることで、粒子の位置と軌道角は

$$x = \sqrt{\beta(s)}\epsilon \cos[\phi(s) + \phi_0] \quad (4.4)$$

$$x' = -\sqrt{\frac{\epsilon}{\beta(s)}} \sin[\phi(s) + \phi_0] + \frac{\beta'(s)}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\beta(s)}} \cos[\phi(s) + \phi_0] \quad (4.5)$$

と表せる。また、位置1と2の位置・軌道角の関係は

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_a^{(12)} & m_b^{(12)} \\ m_c^{(12)} & m_d^{(12)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = M_{21} \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

とトランスフォーマトリクス M_{21} を用いて記述できる。トランスフォーマトリクス M_{21} は

$$M_{21} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}}(\cos \theta + \alpha_1 \sin \theta) & -\frac{(1+\alpha_2\alpha_1)\sin \theta + (\alpha_2 - \alpha_1)\cos \theta}{\sqrt{\beta_2\beta_1}\sin \theta} \\ \sqrt{\beta_2\beta_1}\sin \theta & \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}(\cos \theta - \alpha_2 \sin \theta) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

で表される行列である。ここで、 α 、 β 、 γ は Twiss パラメータである。また、 $\theta = \phi(s_2) - \phi(s_1)$ とした。ただし、Twiss パラメータは以下の関係式を満たす。

$$\gamma = \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \quad (4.8)$$

式 4.5 より、ビームはある位置 $s = s_0$ において、位相空間上で図 4.1 の楕円を描く。この楕円の面積がエミッタンス ϵ である。また、

$$x_{max} = \sqrt{\beta_x \epsilon_x} \quad (4.9)$$

$$x'_{max} = \sqrt{\gamma_x \epsilon_x} \quad (4.10)$$

である。

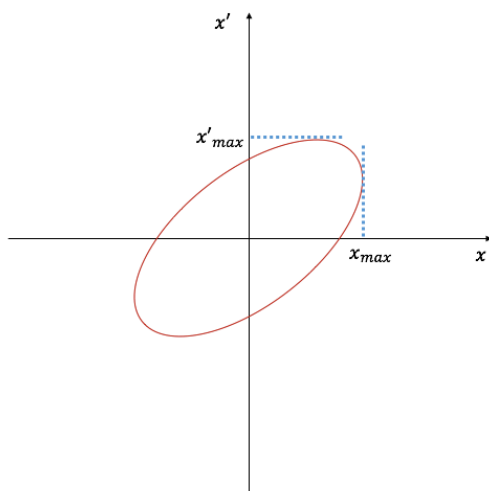


図 4.1: 位相空間上のビーム

4.1.2 チューン

$$\phi' = \frac{1}{\beta} \quad (4.11)$$

を積分することでベータトロン振動の位相の進みを以下のように表せる。

$$\phi = \int_{s_0}^s \frac{1}{\beta} ds + \phi_0 \quad (4.12)$$

ここで s は縦方向の位置を表す。

チューンとは、粒子が一周する間のベータトロン振動の振動数である。

$$\nu_{x,y} = \frac{1}{2\pi} \int_{s_0}^s \frac{1}{\beta_{x,y}} ds + \phi_0 \quad (4.13)$$

x 方向の振動の振動数を ν_x 、 y 方向の振動の振動数を ν_y と表した。

4.1.3 入射マッチングの概要

ビームを加速器へ入射する時、下流側の加速器のアクセプタンスに収まるように上流側でビームを調整する必要がある。ビームの Twiss パラメータ・エミッタンスを後段の加速器に合わせることをマッチングといい、光学パラメータが設計値と一致していない状態のことを入射ミスマッチと呼ぶ。後段の加速器周回中にビームのエンベロップが設計と異なる振動をしないよう、入射マッチングを行う [40]。式 4.10 よりビームを特徴づけるパラメータは ϵ 、 β 、 γ である。ただし、関係式 4.8 があるので、 β 、 γ のかわりに α を用いることもできる。このうち ϵ は上段の加速器で決まるパラメータである。ここでは α 、 β 、 ϵ の3つをビームを特徴づけるパラメータとする。後段の加速器の構造にマッチングさせるため、輸送ライン (J-PARC MR と RCS 間の 3-50BT に対応する部分) でビームの α_x 、 β_x 、 α_y 、 β_y 、 α_z 、 β_z を調整する必要がある。

4.1.4 入射ミスマッチによるビームロス

入射のミスマッチは、ビームのハローが形成される原因となることがわかっている。ビームハローとは、ビーム中心から離れたところに形成されるビームの密度の低い部分のことである。このハローを形成する粒子は大きな振幅のベータトロン振動をするため、ビームロスを引き起こす。

4.2 入射ミスマッチの観測

入射ミスマッチ、つまり入射時のビームの位置や広がり与设计値からずれている状態では、図4.2のように、ターン¹毎に同地点で観測したビームの位置・広がりは変化していく。図4.2の上に描かれている円はビームパイプを示している。左図は入射ミスマッチがない場合にビームを同地点で観測したものでターン毎のビームプロファイルを表している。何回周回しても同じ位置に戻ってくることを示している。中央図は入射位置が設計値とずれた場合である。位置の設計値からのずれをダイポールミスマッチと呼ぶ。図ではターン毎にビーム位置が蛇行していく様子を示しており、この振動をダイポール振動と呼ぶ。右図は入射のビームサイズが設計値とずれた場合である。このずれのことを4重極ミスマッチと呼ぶ。図にはターン毎に同地点で観測した横方向のプロファイルが示されている。ターン毎のビームの4重極モーメントが変化していく。これを4重極振動と呼ぶ。ここで、ダイポール、4重極という言葉が出てきた。ダイポールモーメントはビームの重心位置を示し、4重極モーメントはビームサイズの広がりがある方向がx方向、y方向のどちらに偏っているかを示す値である。詳しくは次章で説明する。

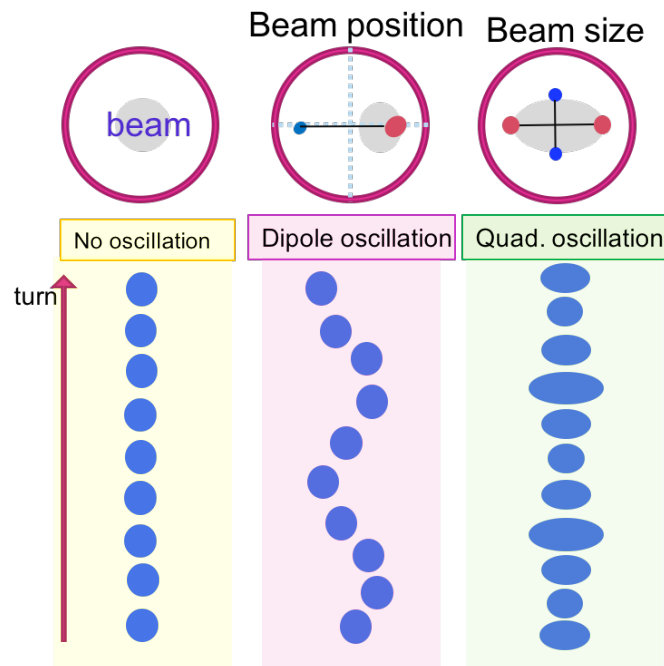


図 4.2: 入射ミスマッチがない場合と位置・4重極モーメントのミスマッチがある場合の、ビームのプロファイルの概念図。ターン毎に同じ位置で観測したビームを表している。

¹ 1ターンとは、ビームがMRリングを1周することを意味している。

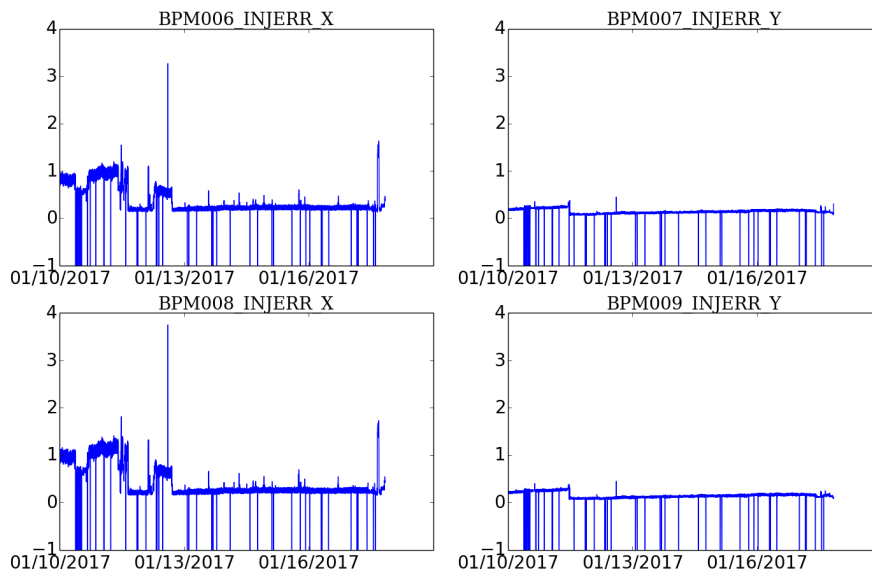


図 4.3: 入射直後の BPM で観測された入射ミスマッチのベータトロン振動の大きさ [mm]。左 2 つが x 方向のベータトロン振動の振幅、右 2 つが y 方向のベータトロン振動の振幅を示す。

RCS から送られてくる陽子ビームは 3-50BT と呼ばれる輸送ラインで軌道補正され、MR に入射される。この入射時のビームの位置や広がりがある後の MR 内周回中のビーム位置・プロファイルを決める。そのため、先に述べたように、入射時のビームの光学パラメータを設計値に合わせる事が重要である。この入射制御の方法であるが、まず第一に、ビームロスモニターを用いて、ビームのロスが少ない設定条件を探す方法がある。第二に、ビームの位置・プロファイルの測定をし、ターン毎に同じ位置・プロファイルになるようにチューニングする方法がある。現在、ビーム位置の測定には、ダイアゴナルカット BPM¹ を使用している。図 4.3 は、入射直後の BPM を用い、入射エラーによる位置の振動を観測したものである [44][45]。横軸は日時、縦軸は入射ミスマッチによるベータトロン振動（付録 A.6 参照）の振幅 [mm] である。4 つのグラフのうち左 2 つが x 方向のベータトロン振動の振幅、右 2 つが y 方向のベータトロン振動の振幅である。x 方向でおよそ 0.2mm 程度、y 方向でおよそ 0.1mm 程度のミスマッチが観測された。

4.3 入射調整に対するビームモニターの課題

前節で述べたように入射直後のビームの位置の観測はダイアゴナルカット BPM を用いて行っている。また、入射調整にはビームのサイズも観測が求められる。ビームサイズ測定に用いられるビー

¹ ストリップライン型・テーパードカプラー型に比べ、位置に対する応答の線形性に優れている。

ムプロファイルモニターは先述の通り FWM と IPM である。ただし、過去には FWM を入射制御に用いていたが、先述の問題により大強度ビームでの使用は難しい状況である。大強度ビーム下でビームのプロファイル測定が可能なモニターは現在 IPM のみである。IPM は、大強度ビーム下で使用できるため入射調整に使用されている。ただ、先述の測定プロファイルの歪みが課題であり、歪みを取り除く研究が現在進行中である。IPM の研究と並行して、ビームサイズの測定のための新たなモニターが求められている。新たなモニターには以下の3点が求められる。

- * 大強度に対する高い耐性をもつこと
- * ビームサイズの観測が可能であること
- * ビーム非破壊型であること

これらを満たすモニターとして、電極数4以上のストリップライン型ピックアップが挙げられる。ピックアップ1台で直接的にサイズを測定することはできないが、ベータ関数が異なる2地点に配置したピックアップ2台を用いることでサイズ測定が可能となる。ピックアップ1台では、次章で説明するビームの4重極モーメントの測定が可能である。次章では、位置測定用モニターとして使用中の電極数4本のピックアップで4重極モーメントを観測することに関して動作原理、4重極モーメントの定義、入射直後の4重極モーメント観測結果、さらに応用的は4重極モーメントの測定についてを述べる。

第5章 4電極ピックアップでのビームの4重極モーメント測定

5.1 はじめに

ビームサイズを観測する方法の一つとして、2台のストリップライン型ピックアップを用いる方法がある。2台のストリップライン型ピックアップでそれぞれビームの4重極モーメント(後述)を測定し、後述の計算方法でサイズを算出する。

原理的に4電極BPMでビームの4重極モーメント測定はできるものの、これまではビーム位置のみを測定していた。そこで、すでにインストールされ位置モニターとして使用中の4電極BPMから用いてビームの4重極モーメントを算出した。本章では、4電極BPMの動作原理、4電極BPMによる4重極モーメント測定の原理、エミッタンスと4重極モーメントの関係について述べる。また、2016年1月に行った入射ミスマッチ測定と4重極モーメント測定の応用的な実験について記す。

5.2 ピックアップの概要

ピックアップとは加速器内を走るビームの位置を測定するための装置であり、真空パイプの中に電極を取り付けた仕様のものが一般的である。ビームがピックアップを通過した時、荷電粒子の集まりであるビームが時間変化する電磁場を作り、電極に電流が流れる。この電流を図5.1のように電極の上流端から読み出す。

ピックアップには、静電誘導型とストリップライン型の2種類がある[46]。静電誘導型は、ビームの電場をピックアップするというものである。ビームが相対論的である場合、ビームが作り出す電磁場は縦方向成分が小さくなり、横方向のみの二次元の電磁場問題に帰着できる。電極が縦方向に短い場合は、ビームが作る電磁を静電場とし、集中乗数回路¹として考えられる。一方で、ストリップライン型の場合は、電極が短冊形で縦方向に長さを持つため、分布乗数回路であり、電極は電磁場の伝送線として働く。

¹回路の空間的広がりを考慮しない回路。一方の分布乗数回路では空間的に広がりを考慮し、電磁波の伝搬速度を考慮する。

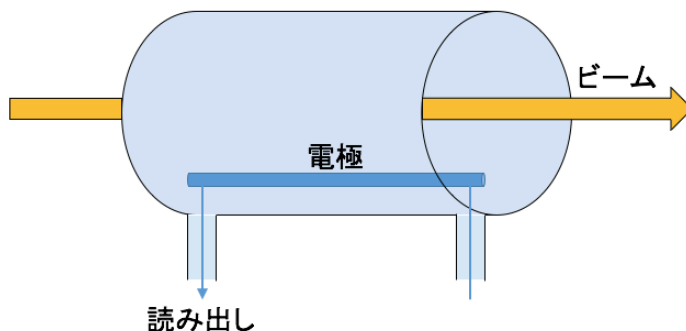


図 5.1: ストリップライン型 BPM の信号読み出しの概念図

5.3 ピックアップの原理

ビームがパイプ内を通過した時のパイプ上極座標 (R, θ) にできる電荷の分布は

$$\hat{\sigma}(R, \theta) = - \int_0^R \int_0^{2\pi} r dr d\phi \frac{\lambda(r, \phi)}{2\pi R} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \cos n(\theta - \phi) \right) \quad (5.1)$$

である。ただし、 $\lambda(r, \phi)$ はビームの電荷分布を表す。ビームの電荷分布がガウシアン分布

$$\lambda(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} \right] \exp \left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (5.2)$$

の場合、

$$\hat{\sigma}(R, \theta) = -\frac{\lambda}{2\pi R} \left[1 + \frac{2}{R} (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) + \frac{2}{R^2} \{ (x_0^2 - y_0^2 + \sigma_x^2 - \sigma_y^2) \cos 2\theta - 2x_0 y_0 \sin 2\theta \} + \dots \right] \quad (5.3)$$

ただし、 x_0, y_0 はビームの x, y 方向の平均位置、 σ_x, σ_y は x, y 方向のビームの平均サイズである。ここでは、 x - y 結合がない場合をのべた²。

5.4 4重極モーメント測定の原理

電荷分布を展開した式 5.3 の各項の係数を以下のように表す。 $n=1$ の項を双極子モーメント、 $n=2$ の項を 4 重極モーメントと呼ぶ。二次元平面上の議論をしているため、それぞれのモーメントは 2

² x - y 結合については参考文献 [47] に詳しい。

つの成分をもつ。4重極モーメントの成分をそれぞれ Q_{normal} と Q_{skew} であらわした。

$$\frac{x_0}{R} = \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \cos \theta / \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \quad (5.4)$$

$$\frac{y_0}{R} = \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \sin \theta / \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \quad (5.5)$$

$$Q_{normal} = \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \cos 2\theta / \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} = \frac{x_0^2 - y_0^2 + \sigma_x^2 - \sigma_y^2}{R^2} \quad (5.6)$$

$$Q_{skew} = \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} \sin 2\theta / \int_0^{2\pi} d\theta \hat{\sigma} = \frac{-2x_0 y_0}{R^2} \quad (5.7)$$

式5.4、5.5より双極子モーメントは位置に比例する。5.6より Q_{normal} には x 、 y 方向のビームサイズと位置が含まれていることがわかる。 Q_{skew} は位置に依存する。今回はビームサイズの情報を含む Q_{normal} が重要な測定量である。近似的に電極に誘導される電荷とパイプ上の誘導電荷が比例する(つまり、 $\hat{\sigma}(R, \theta_i) = K \times V_i$)とあると考えると、電極に誘導される電圧はその電極に誘導される電荷量に比例するため、ビームの平均位置と4重極モーメントは近似的に次のようにして得られる。

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cos \theta}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (5.8)$$

$$D_y = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \sin \theta}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (5.9)$$

$$Q_{normal} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cos 2\theta}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (5.10)$$

$$Q_{skew} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \sin 2\theta}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (5.11)$$

実際には、高次項を含んでいるため、 D_x, D_y は真のビーム重心位置に対し非線形な応答を示す。
 $(D_x \neq \frac{x_0}{R})$

4電極 BPM の場合、上記の近似計算に従うと、位置は以下のように計算できる。

$$D_x = \frac{V_R - V_L}{\sum_{i=1}^4 V_i} \quad (5.12)$$

$$D_y = \frac{V_U - V_D}{\sum_{i=1}^4 V_i} \quad (5.13)$$

4重極成分のノーマル成分は以下の式となる。但し、 V_U, V_D, V_R, V_L は図 5.2 のようにそれぞれ上下左右の電極の電圧を表している。

$$Q_{normal} = \frac{V_U + V_D - V_R - V_L}{\sum_{i=1}^4 V_i} \quad (5.14)$$

ここで、

$$\hat{\sigma}(R, \theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta + a_2 \cos 2\theta + b_2 \sin 2\theta + \dots \quad (5.15)$$

と、係数を $a_i, b_i (i=1, 2, \dots)$ であらわし、式 5.12 を計算すると

$$D_x = \frac{2a_1 + 2a_3 + 2a_5 + 2a_7 + 2a_9 + 2a_{11} + 2a_{13} + 2a_{15} + \dots}{4a_0 + 4a_4 + 4a_8 + 4a_{12} + 4a_{16} + \dots} \quad (5.16)$$

となる。つまり、式 5.12 で求めた双極子モーメントは純粋な位置 a_1/a_0 でなく、式 5.3 の $n > 2$ の項が含まれている。ここでは $n > 2$ の項を高次のモーメントと呼ぶ。ここで4電極で式 5.12 から求めた位置は a_1/a_0 の約 1/2 倍であることに注意したい。

さらに、4重極モーメントについては、真の値が

$$\frac{a_2}{a_0} = 2 \left(\left(\frac{x_0}{R} \right)^2 - \left(\frac{y_0}{R} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{R} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_y}{R} \right)^2 \right) \quad (5.17)$$

であるのに対し、

$$Q_{normal} = \frac{4a_2 + 4a_6 + 4a_{10} + a_{14} \dots}{4a_0 + 4a_4 + 4a_8 + 4a_{12} + \dots} \quad (5.18)$$

というように高次項が含まれる。

通常はこの高次の項が十分に小さいと考え無視するか、測定後の解析によって取り除く工夫をしている。

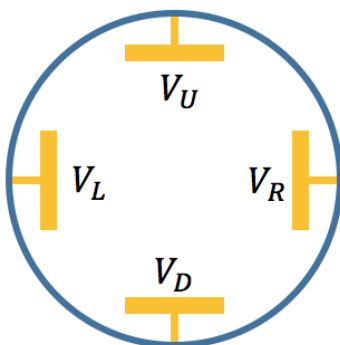


図 5.2: 電極の番号付け

5.5 ビームサイズの算出

式 5.6 より、

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = K_Q \times Q_{normal} - x_0^2 + y_0^2 \quad (5.19)$$

と表せる。ただし、式 5.6 中の $1/R^2$ はモニター固有の係数であるため K_Q とした。ある位置地点のビーム位置と四重極モーメントが測定できれば x 、 y 方向のサイズの二乗の差を求められることがわかる。

さらに、ビームサイズは、beta function β とエミッタンス ϵ を用いて

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\beta_{x,y} \epsilon_{x,y}} \quad (5.20)$$

と表されるので、

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = \beta_x \epsilon_x - \beta_y \epsilon_y \quad (5.21)$$

とかける。したがって、 β の値が異なる 2 地点での $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ がわかれば、連立方程式

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(1)2} - \sigma_y^{(1)2} &= \beta_x^{(1)} \epsilon_x - \beta_y^{(1)} \epsilon_y = l_1 \\ \sigma_x^{(2)2} - \sigma_y^{(2)2} &= \beta_x^{(2)} \epsilon_x - \beta_y^{(2)} \epsilon_y = l_2 \end{aligned}$$

を解くことでエミッタンスを求められる [59]。

$$\epsilon_y = \frac{\beta_x^{(2)} l_1 - \beta_x^{(1)} l_2}{\beta_x^{(1)} \beta_y^{(2)} - \beta_x^{(2)} \beta_y^{(1)}} \quad (5.22)$$

ただし、(1),(2) で位置の区別をした。また位置 (1),(2) でのエミッタンスが等しいと仮定した。

5.6 入射ミスマッチ測定

3.4 節に記述した通り、MR のビームロスを減らすための施策の1つとして、4重極モーメントの入射マッチングを現状より高精度にすることが挙げられる。4重極モーメントを測定できるモニターの1つである4電極BPMを用いて入射直後の四重極モーメントを測定した。

5.6.1 測定方法

RCS から MR へビームを入射した直後のピックアップでターン毎の4重極モーメントを測定した。また、4重極モーメントの測定精度を確認するために、作為的に入射ミスマッチを大きくし、こちらでもターン毎の4重極モーメントを測定した。

入射直後のMR#15地点(図5.3参照)に配置されていたテーパードカップラBPM[48](図5.4)によりビームを観測した。このモニタは高周波まで感度があることが特徴である。ただし、今回このモニターを使用したのは入射直後に配置されていたためである。信号取得にはLECROY製12bitオシロスコープを用いた。ビームは、1バンチを周回させた。バンチ内粒子数は $1.24 \sim 1.27 \times 10^{13}$ protons per bunch、ベータトロンチューンは(22.4, 20.75)、周回周波数は185743.5Hzであった。入射直後のビームの挙動を見るという測定目的から、本測定中はビーム軌道補正のためのFeedbacksystem¹[48]は使用していない。

¹バンチ内の位置の振動を補正するための装置

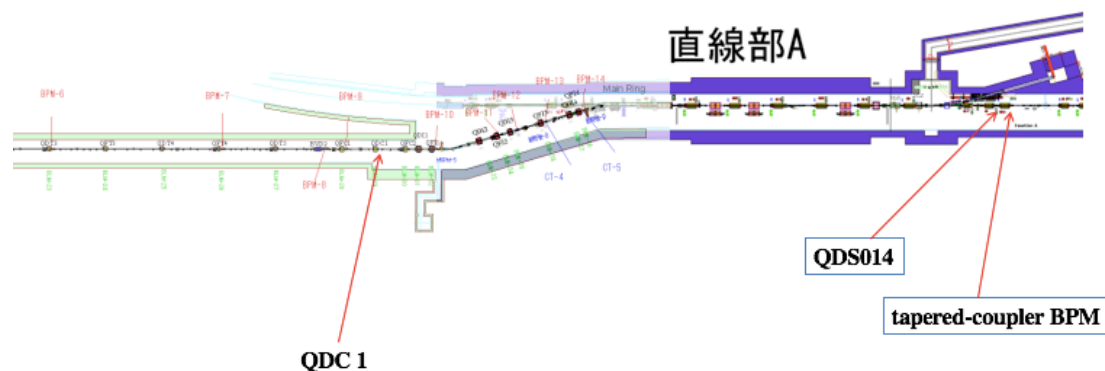


図 5.3: 測定装置付近のトンネル内地図。図 3.11 の左側を拡大したもの。

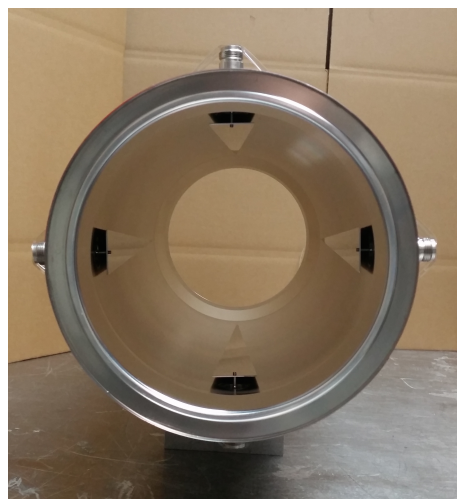


図 5.4: テーパードカップラー型 BPM。2016 年秋にインストールしたもの。実験で使用したものと同様の設計である。

また、入射ミスマッチを故意に作るため、3-50BT¹ の 4 重極マグネット、QDC1 の電流値を 2016 年 1 月通常運転時の 502.71A から 452.44A へ、10%減らすことで、入射時のビームプロファイルを設計値と異なるものにした。図 5.5 が装置のセットアップの概念図である。右側の円はモニターの断面を、黄色の丸はモニターの電極を表している。

¹3-50BT とは RCS と MR をつなぐ輸送ラインを指す。

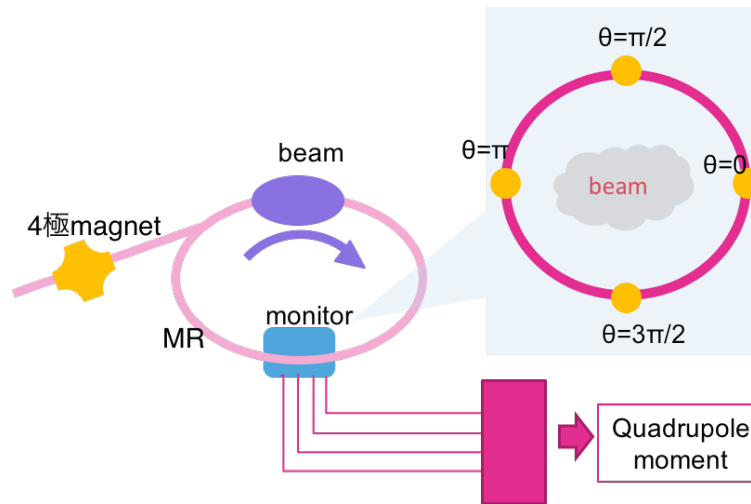


図 5.5: 測定装置のセットアップの概念図

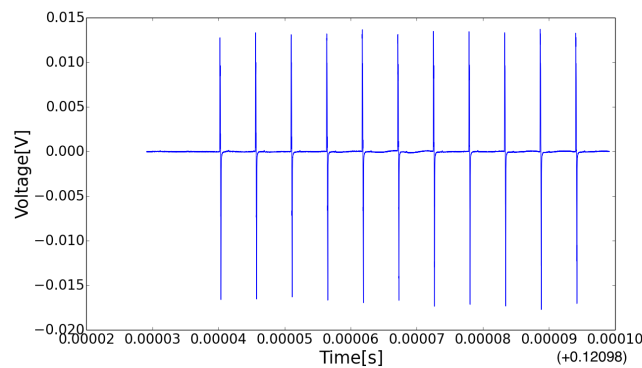


図 5.6: ビーム入射直後の信号

5.6.2 結果

図 5.6 は、取得したデータの一部を拡大したもので、入射時間の 10 マイクロ秒前から、入射時間の 60 マイクロ秒後までの信号である。1つのシグナルが1バンチ¹の信号に対応している。この time domain 信号には高周波ノイズが入っているため、フーリエ変換し信号に対し一番寄与の大きい周波数成分のみを用いる解析方法で S/N をあげた。信号処理は次のように行った。まず、データを1ターン²毎に分割し、1ターン毎にフーリエ変換をした。フーリエ変換後の波形でピークの波高を電極の信号と定義して、1ターン毎に式 5.14 で4重極モーメントを求めた。フーリエ変換後の波形で波高が最大となる周波数を f_{peak} と定義する。この周波数は全データにおいて一致している。図 5.7 は入射直後1バンチ目の信号である。この波形をフーリエ変換したスペクトルが図 5.8 である。

¹ 1バンチとは、1バケツ内に集められた1つの陽子の塊を意味している。

² 1ターンとは、ビームがMRリングを1周することを意味している。

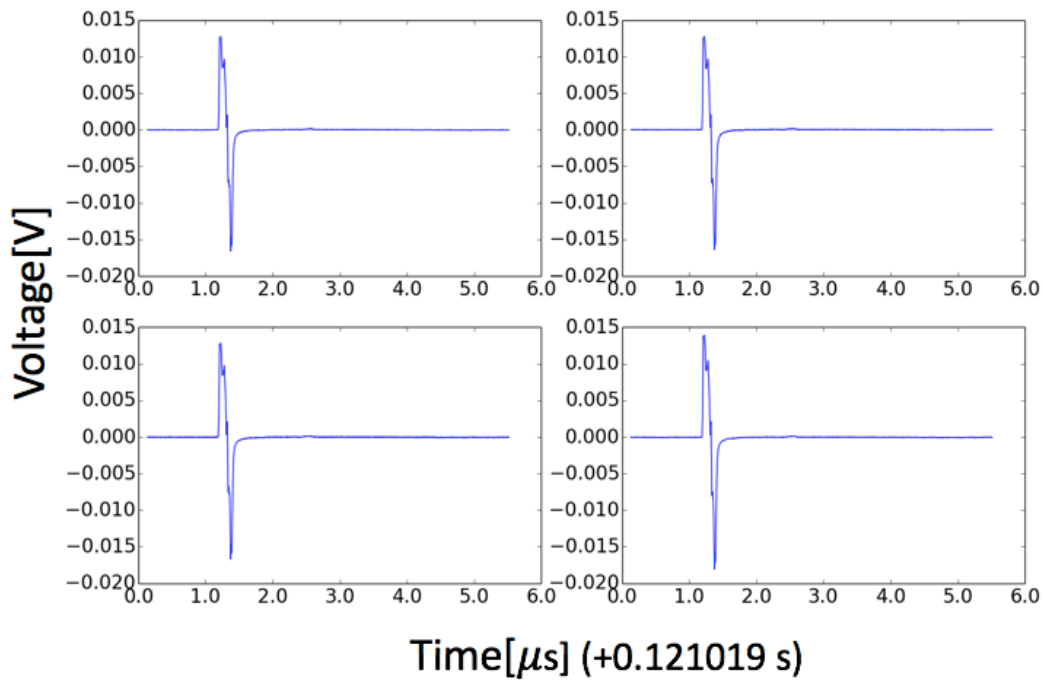


図 5.7: ビーム入射直後の1バンチ目の各電極からの出力信号。

このようにして4重極モーメントを求めプロットしたものが図5.9と図5.10である。縦軸は無次元量である。ここで、1000個のノイズ信号をそれぞれフーリエ変換し、 f_{peak} でのfourier powerを求めた。さらに、fourier powerの二乗平均平方根を誤差とし、誤差の伝播の式から双極子モーメントと4重極モーメントの誤差を求めた。算出した4重極モーメントと誤差の比は $S/N=15(\pm 5)$ であった。

図5.11と図5.12は、4重極モーメントから双極子モーメントの成分を取り除いた、ターン毎のサイズの二乗差 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の振動を表している。縦軸は無次元量である。

5.6.3 考察

故意に入射ミスマッチを作った状態では、入射直後、明らかに4重極モーメントの振動が見られた。一方で、入射マッチングの状態での入射直後の4重極振動は、数十ターン後の振動が落ち着いた時に比べて明確な違いは見られない。したがって、3-50BTの4極マグネットの電流量を10%変化させることで生まれる程度のミスマッチの観測は4極モニターでも可能であることがわかる。一方、キャリブレーションを行っていないため、相対的なビームサイズのx、y方向の大きさの違いはわかるものの、4重極モーメントの絶対的な値 $[mm^2]$ に換算することはできない。したがって本測定で作った程度のミスマッチの状態を観測するのであれば入射制御に用いることは意味をなすが、現在のマッチング条件からさらに良い入射条件の探索するための測定には使用できない。入射のマッチ

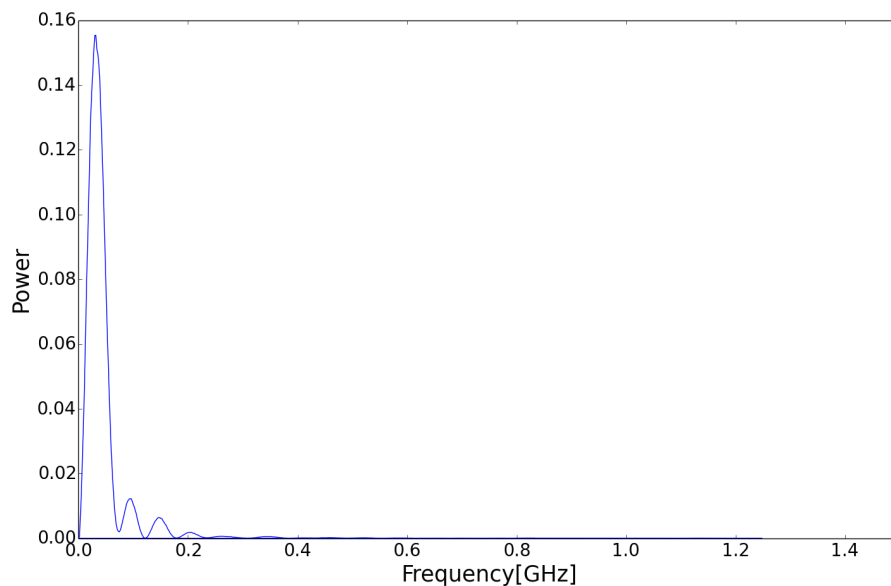


図 5.8: ビーム入射直後の1バンチ目の信号をフーリエ変換したスペクトル

ングの精度をさらに高精度にするためには、より高精度に4重極モーメントを測定できるモニターが必要である。またビームサイズ測定という観点からは、キャリブレーションを行ったモニターで4重極モーメントを観測し、測定結果を絶対値に換算することが求められる。

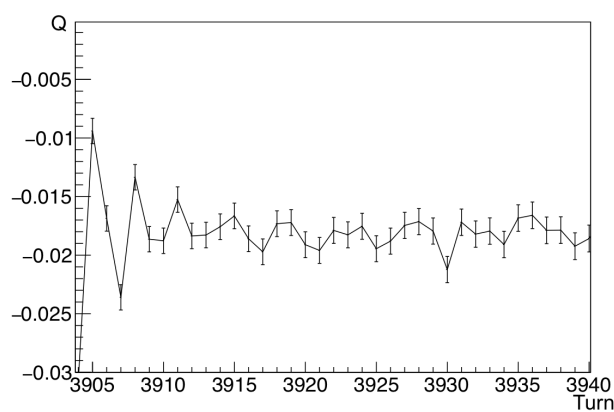


図 5.9: ミスマッチの状態で入射したビームの入射直後の4重極モーメントの振動の様子

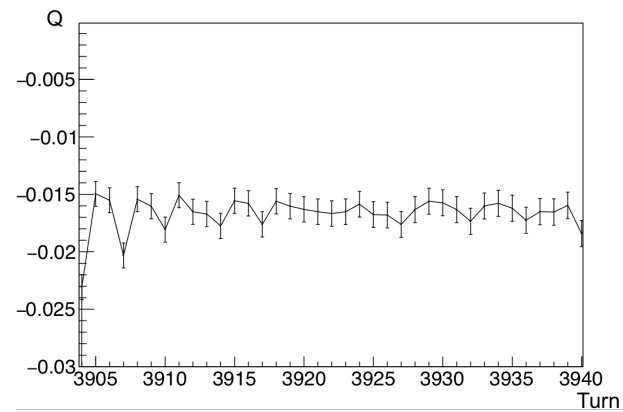


図 5.10: 入射マッチングの状態で入射したビームの入射直後の4重極モーメントの振動の様子

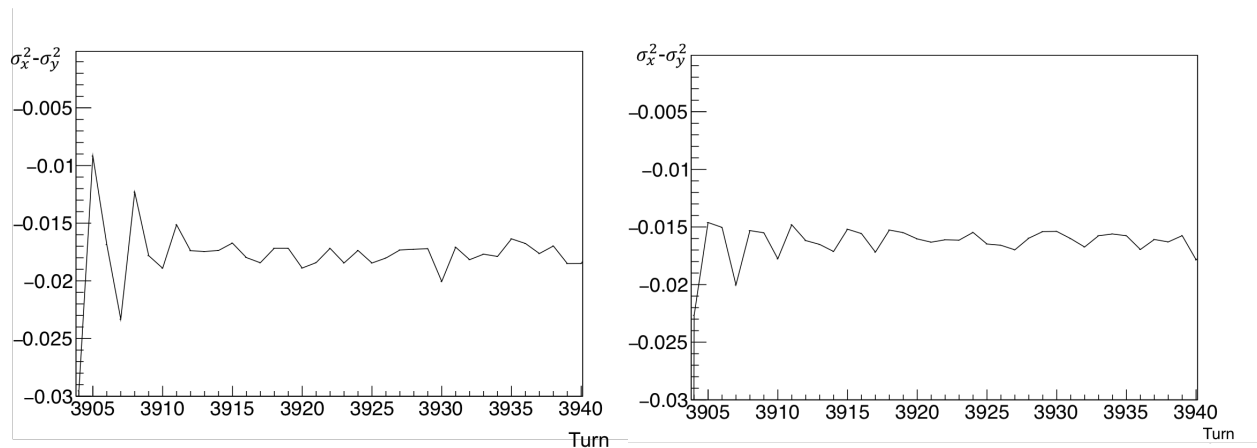


図 5.11: ミスマッチの状態に入射したビームの入射直後の $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の振動の様子
 図 5.12: 入射マッチングの状態に入射したビームの入射直後の $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の振動の様子

5.6.4 まとめ

4電極 BPM を用いて入射直後のビームの4重極モーメントを測定した。4重極モーメントの S/N 比はおよそ 15 であった。入射ミスマッチを故意に作り出した場合には、入射直後の振動が明らかに観測された。現状入射制御がうまくいっていると思われる、条件下 (図 5.12 の条件下) では、Q の振動が明瞭には見られなかった。より精度が良く、またキャリブレーションを行った測定器での測定が求められる。

5.7 4極キッカーによるビーム応答測定

4重極モーメント測定の応用として、4極キックに対するビーム応答試験を行った。

5.7.1 測定の動機

ビームロスの原因の一つとして考えられているのは、空間電荷効果によるインコヒーレントチューンスプレッドである。インコヒーレントチューンスプレッドとは、図 5.13 の赤丸が示すベータトロンチューン¹から、個々の粒子が異なるシフトをし、ベータトロンチューンが図 5.13 のように分布をもつことである。これは、粒子自身が作り出す非線形空間電荷力が引き起こす現象である²。チューン

¹4.1.2 節で述べた。加速器内の磁石の配置によって決まる値でベアチューンと呼ばれている。

²一方、コヒーレントチューンシフトとは、線形空間電荷力により粒子のベータトロンチューンが一様にシフトすることである。

ンの広がり³が共鳴線(付録A.7参照)に触れると、ビームの振動振幅が増大し、ビームロスを誘発する。J-PARC MRでは、チューンの広がりを図5.13のようにシミュレーションによって算出しており[29]、直接測定の方法は現在模索中である。チューンスプレッドを測定によって知ることができれば、より適正な運転パラメータを決めることができる。そこで、チューンスプレッドの直接測定を目標としたビーム試験を試行した。

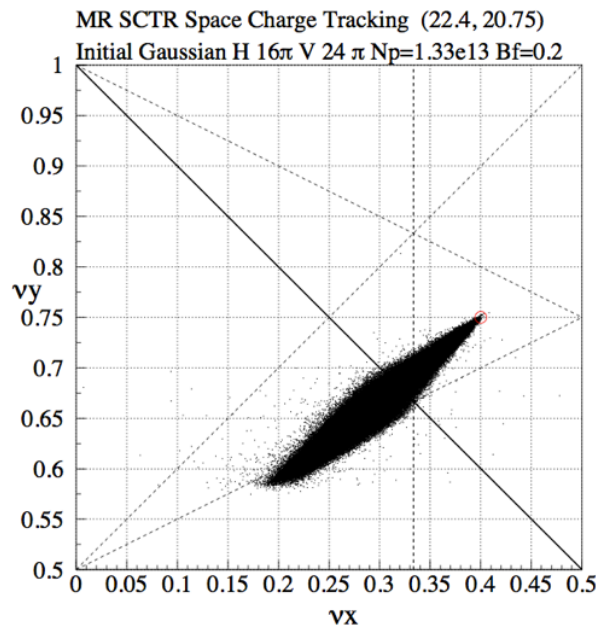


図 5.13: チューンスプレッドのシミュレーション結果。今回の測定の条件下での計算ではない。[60]

5.7.2 測定の概要

まず、4極キッカーでビームを蹴るとビームの4重極モーメントが共鳴を起こす。これは、4極キッカーでビームを蹴ることで、チューンダイアグラム上に共鳴線をつくることを意味している。観測された共鳴の大きさは、共鳴線上の粒子数と関係があると考えられる。キッカーに印加する電圧の周波数を変化することにより、共鳴線の位置を変えることができる。本測定では、さまざまなキッカー周波数に対してビームの共鳴の大きさの違いを観測した。また、チューンスプレッドは粒子の空間電荷力により生まれるもので、粒子数を変えるとチューンスプレッドの大きさや粒子の密度も変化する。ビームの粒子数を変えたことで共鳴の大きさに変化が生じるかの観測も行った。

³チューンの広がりはインコヒーレントチューンスプレッド、コヒーレントチューンシフトが混ざって形成されていると考えられる。

5.7.3 測定原理・方法

入射ミスマッチや、磁場の誤差²の影響などで、理想的なビームの制御ができていない場合、ビームはわずかに4重極振動しながらリング内を周回し始める。そして、徐々に広がり、より大きなビームサイズの定常状態になる。この定常状態のビームに対して、単色周波数のノーマル4極³の外力を加えることで、振動を誘導する。

本測定では、4極キッカーで単色周波数の収束・発散力をビームに与えた。4極キッカーは真空パイプに対向する2枚の電極が貼られた構成となっている。普段ダイポールキッカーとして使用しているものを4極キッカーとして代用した[50]。ダイポールキッカーとして用いる時は、2つの電極に逆位相のRFパワーを送ることで、ビームに横方向の力を加え、ビーム位置(ダイポールモーメント)の制御に用いている。一方で、4極キッカーとして用いる場合には、電極に同位相の信号を送る。図5.14にダイポールキッカーの概念図を示した。キッカーの電極に逆位相の電圧をかけた場合の電気力線が青の点線で表されている。図5.15に4極キッカーの概念図を示した。キッカーの電極に同位相の電圧をかけた場合の電気力線が青の点線で表されている。本測定では、水平方向に電極が付けられている3連のストリップラインキッカーを使用した。(図5.16)

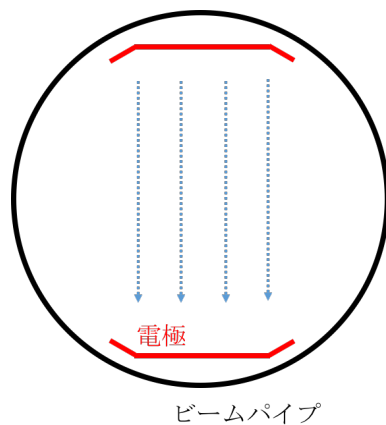


図 5.14: ダイポールキッカーの概念図。

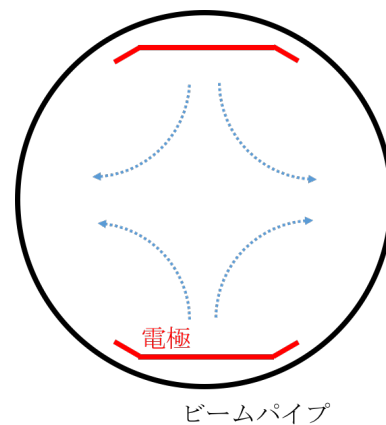


図 5.15: 4極キッカーの概念図。

本測定でのキッカーの設定値を表5.1に示した。

4重極振動の共振周波数と粒子固有のベータatronチューン ν_x 、 ν_y は、近似的に式5.23、5.24のような関係であらわされる[41]。

²磁場の誤差とは、例えばマグネットの配置位置や磁場の大きさなど、実際にリング内に生じる磁場が設計値と異なること。

³ x 、 y 方向の力がそれぞれ x 、 y に比例する。

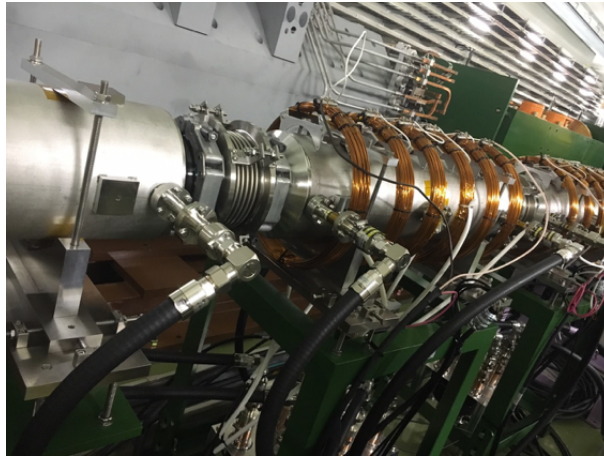


図 5.16: 4 極キッカーの写真。水平方向に飛び出しているケーブルは、パイプの中の水平方向に取り付けられたストリップラインキッカーの電極へとつながっている。

キッカーの最大出力電力	$3kW \times 2$
キッカー RF 周波数	222854 Hz, 215854 Hz, 208854 Hz, 201854 Hz, 194854 Hz, 247615 Hz
Kicker angle (計算値)	$102 \mu \text{ rad} / \text{m} / \text{turn}$

表 5.1: Kicker の設定値

$$2\nu_x = n_x \pm f_{RF}/f_{rev} \quad (5.23)$$

$$2\nu_y = n_y \pm f_{RF}/f_{rev} \quad (5.24)$$

ただし、 $n_{x,y}$ は整数、 f_{RF} はキッカーの RF 周波数、 f_{rev} はビームの周回周波数である。キッカーの RF 周波数と、それに対応するチューン ν_y のうち $20.5 < \nu_y < 20.7$ をみだすものを表 5.2 に対応づけた。この関係式に基づいてチューンダイアグラム上にキッカーの作る共鳴線を描いたものが図 5.17 である。縦軸横軸共に 20 以下の小数部分を表示している。青線・黄線がキッカーによる共鳴線を表している。黄線はキッカーの RF 周波数が 247630Hz の場合である。表 5.2 の ν_y に対応する共鳴線は図 5.17 下方の 5 つの青線と 1 つの黄線である。このチューンダイアグラム上の黒く塗られた領域は、シミュレーションによるチューンスプレッドであるが、本測定の条件で計算されたものではない。バンチングファクターを 0.25 から 0.35 に変えることで ν_x 、 ν_y の分布の広がりがかが約 1.5 倍大きくなるというシミュレーション結果がある [60] ように、ビームの条件によってチューンスプレッドは大きく変わる。そのため本測定でのチューンスプレッドのテールが $n_x=20.5\sim 20.6$ の共鳴線上に

乗っているかをこのシミュレーション結果から推察することはできない。

キッカー RF 周波数	ν_y
222871	20.599
215870	20.581
208870	20.562
201870	20.543
194869	20.524
247630	20.666

表 5.2: キッカー RF 周波数とそれに対応するチューン ν_y

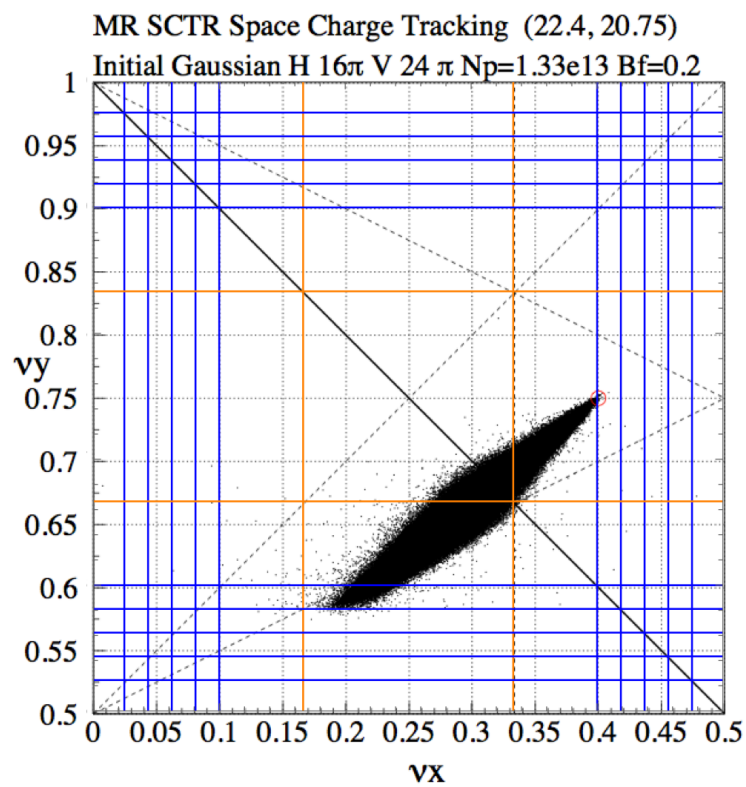


図 5.17: 4極キッカーにより作った共鳴線 (青線・黄線)

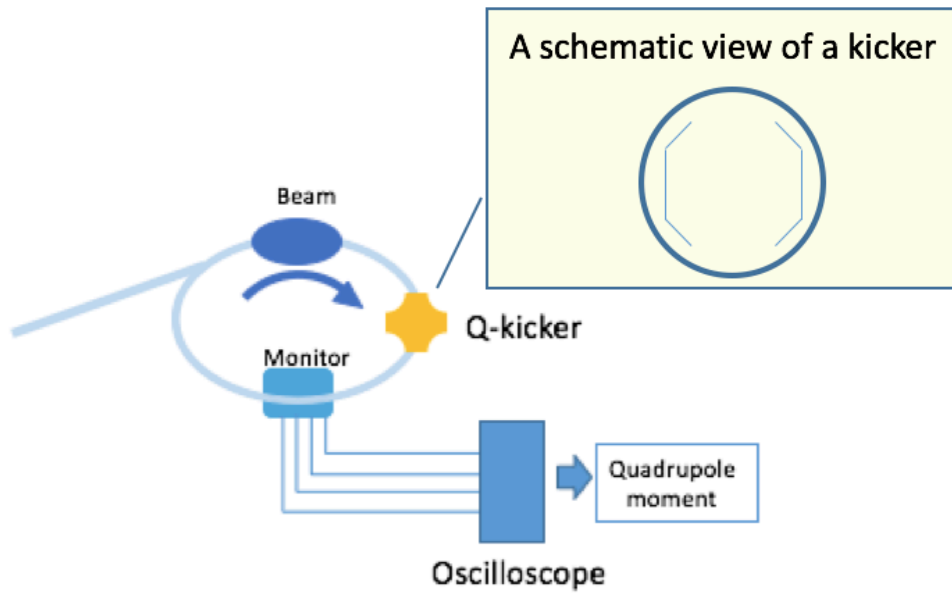


図 5.18: 測定のセットアップ概念図

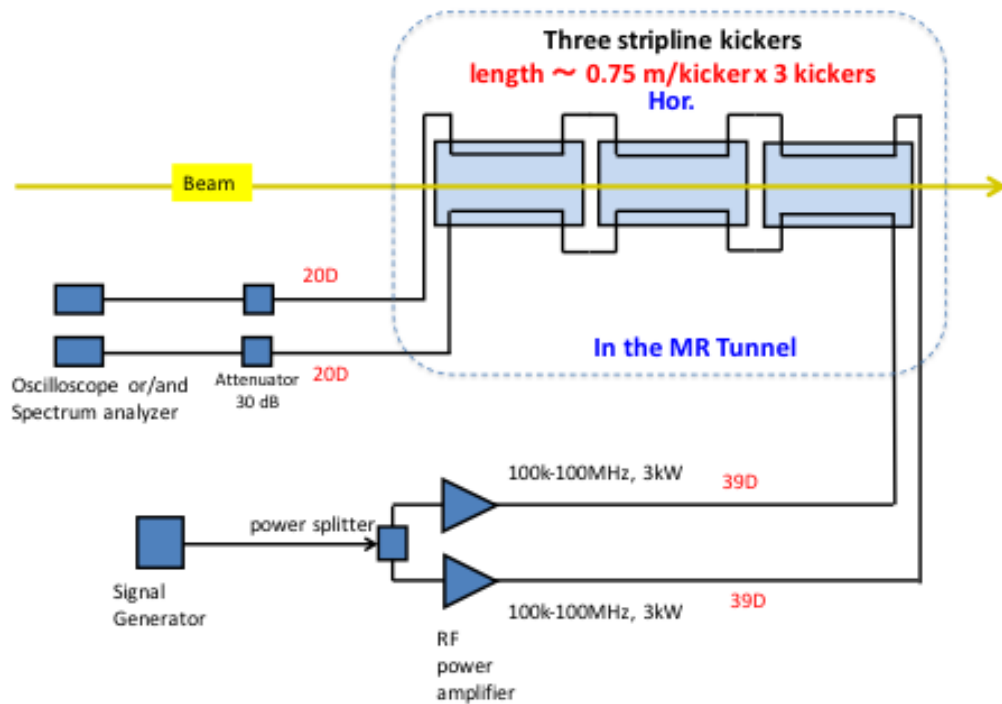


図 5.19: 4極キッカーのセットアップの概念図。

測定のセットアップ全体の概念図を図 5.18 に示した。MR 中に配置された 4 極キッカー（図 5.18

中の Q-kicker) とモニターで MR 周回ビームを観測する。

入射直後のビームは入射 mismatch の影響があるため、キック開始のタイミングは、ビーム入射 1 秒後とした。キッカーへの信号の入力には、図 5.19 のような回路を組んだ。図 5.19 中のオシロスコープはモニターの信号観測用ではなく、正常にキッカーへ電圧を印加できているかを確認するために使用している。パワースプリッタ Mini-circuits ZFSC-2-6+ は同位相の信号を出力する。シグナルジェネレータは Tektronix 製の AFG3252 を用いた。シグナルジェネレータからの信号を増幅するためのアンプに R&K A101 K101- 6565R RF Power Amplifier を用いた。

使用したピックアップは図 5.4 と同じモデルのテーパードコブラ型 BPM である [48]。キック開始 0.04 秒前から 0.2 秒間、オシロスコープ LECROYHDO6104-MS でデータを取得した。サンプリングレートは 2.5×10^8 Hz、ADC bit 数は 12bit である。アテネータは、Bird Electronic Corporation 製の 8329-300 w/Blower を用いた。

測定には表 5.3 のような陽子ビームを使用した。データの測定は同じ条件下、つまりバンチ内粒子数やキッカーの周波数を変えずに 3 度測定を行った。さらに、バンチ内粒子数を 2 度変え、それぞれ 3 回ずつ測定した。J-PARC では、Linac から RCS へ最大で 32 回の多重入射ができる。その入射の回数を変えることでビーム強度を変えることができる。この回数を Thin ratio と呼び、RCS への入射時どれだけビームを間引いたかを表す。本測定では Thin ratio を 16/32, 22/32, 28/32 とした。それぞれに対応する陽子数を表 5.4 に示した。ただし、図 5.20 のように、測定中ビームロスしており、測定開始時と終了時で粒子数が変化していた。Thinning ratio 16/32 で 0.02×10^{13} protons、22/32 で 0.05×10^{13} protons、28/32 で 0.08×10^{13} protons 減少した。

Horizontal tune	22.40
Vertical tune	20.75
周回周波数	185743.5Hz
バンチ内粒子数	$0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}, 1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}, 1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$

表 5.3: ビームパラメータ。バンチ内粒子数は順に Thin ratio が 16/32, 22/32, 28/32 に対応している。括弧内は 3 度の測定での粒子数のばらつきを表している。

Thin ratio	バンチ内粒子数
16/32	$0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}$
22/32	$1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$
28/32	$1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$

表 5.4: Thin ratio とバンチ内粒子数の対応関係

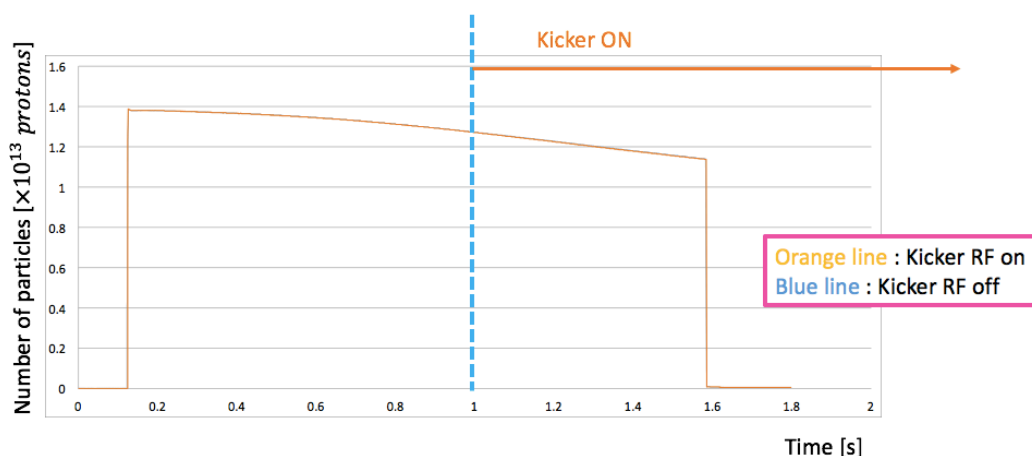


図 5.20: 測定中のビームロス。線が重なっているが、橙線がキッカーでビームを蹴った時、青線がキッカーをオフにし、蹴らずに周回させた場合である。

5.7.4 データ処理方法

データをビームのターン毎、つまり $5.384\mu\text{s}$ 毎に区切り、37147turn 分それぞれの波形をフーリエ変換した。時間枠は $5.384\mu\text{s}$ 、サンプリング周期は 4ns であった。周波数スペクトルのピークをモニターの電極毎に導出した。それぞれのピーク値を V_i とすると、4重極モーメント Q_{normal} が算出できる。ここでは Q と表記する。つまり、

$$Q = \frac{V_U + V_D - V_R - V_L}{\sum_{i=1}^4 V_i}$$

$$\simeq K_Q \times (x_0^2 - y_0^2 + \sigma_x^2 - \sigma_y^2)$$

である。ただし、 K_Q はモニター固有の係数である。

この Q をターン毎、つまり $5.384\mu\text{s}$ 間隔で 29715 ターン 1 分プロットし、さらにフーリエ変換を行った。フーリエ変換に用いたデータの全時間幅は 0.1599s 、したがってフーリエ変換のバンド幅は 6.25Hz である。

5.7.5 結果

キッカー周波数 247615Hz 、バンチの粒子数の条件下での結果を図 5.21 に示す。横軸は周波数 [Hz]、縦軸はフーリエ係数である。 Q をフーリエ変換して得られたピークの周波数は (キックの周波数)-(周回周波数) に対応していると考えられる。図 5.21 の条件下で、予想値は 61879.5Hz であり、測定結果は 61886.8Hz であった。これは 3 度の測定いずれも小数点 2 桁まで一致している。他の 5 つのキッカー

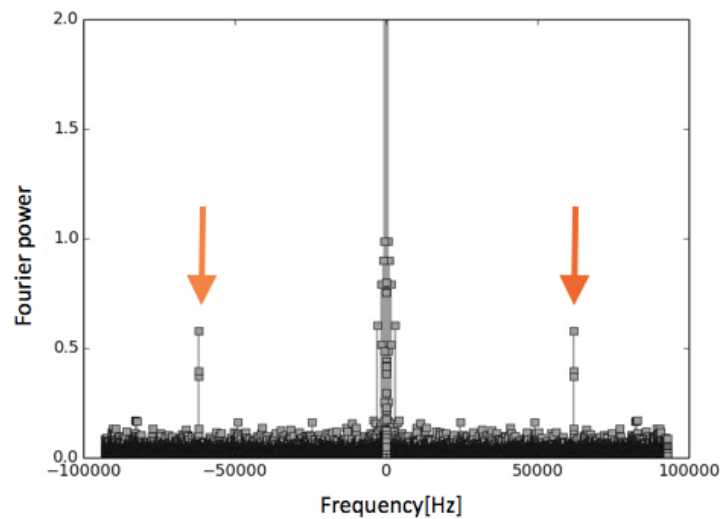


図 5.21: Qkicker によるビーム応答、ターン毎の 4 重極モーメントのフーリエスペクトル

RF 周波数についても比較すると、すべて 7Hz~9Hz だけ予想値を上回る周波数でピークを持った。このずれは、キッカーの RF の不安定性、周回周波数のゆらぎ、フーリエ変換のバンド幅¹~6.25Hz、ビーム光学的効果の単独または複数によるものであると考えられる。このピークでのフーリエ係数はキッカーによって励振した 4 重極振動の振幅に対応している。この値を q_{peak} と定義する。 q_{peak} は共鳴により誘導された 4 重極振動の大きさを示す値である。Thinning ratio 22/32, 28/32 において、キッカー RF が 247615Hz の時、ピークは幅を持っていた。そのため、Thinning ratio 22/32、28/32 において、247615Hz の q_{peak} は、図 5.21 で Fourier Power 0.1 ~ 0.2 に広がっているノイズフロアから突出している、ピークを形成する周波数 4 点での波高の和とした。つまり、最大値をとる周波数とその前後、計 4 点の周波数での波高の和をとった値を q_{peak} とした。

さらに、図 5.21 で観測されたピークが 4 極キックによるビームの共振を表していることを確かめるため、以下の二つの条件でも測定を行った。

- ① ビームを入れずにキッカーをオンにした場合
- ② ビームを入れ、キッカーはオフにした場合

① はキッカーの RF が、パイプを通るなどの予期せぬ経路で電極に伝わっていないかどうかを調べるための測定である。この場合、原理上 Q は分母が 0 となるため意味をもたない値である。電極の信号をフーリエ変換し周波数のスペクトルを確認したが、キッカーの RF 周波数でピークをもっ

¹バンド幅が周波数の分解能として制限をかけている。

ていなかった。このことから、電極の信号のうち、キッカーの信号がビームの共振以外の経路で電極に伝わる成分は無視できるほど小さいことがわかった。

②は、キッカー ON での信号の周波数スペクトルのピークがキッカーによる振動を示しているかを調べるための測定である。図 5.22 が図 5.21 と同様の信号処理を行った結果である。②では、図 5.21 のようなピークは見られなかった。この結果から、図 5.21 などで見られたピークはキッカー RF による共振を示していることがわかった。また、入射直後に生じる自発的な 4 重極振動は、データ測定中は測定感度以下に低減していることがわかった。

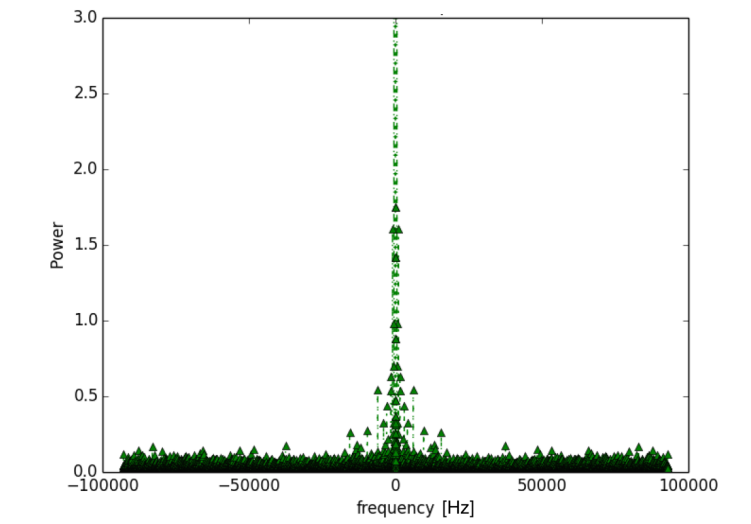


図 5.22: キックしない状態でのビーム応答。ターン毎の 4 重極モーメントのフーリエスペクトル。

Thinning ratio 22/32 (バンチ内陽子数 $1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$) の条件下で測定した q_{peak} のキッカー RF 周波数による変化を図 5.23 に示す。縦軸は q_{peak} 、横軸はキッカー RF の周波数である。これを、同じキッカー RF 周波数での測定の平均を取り、Thinning 28/32、16/32 についても導出した結果が図 5.24 である。さらに横軸を式 5.25 でチューンに直したものが図 5.25 である。縦軸は q_{peak} 、横軸は ν_y である。

$$(f_{RF}/f_{rev} - 1) \times 0.5 + 20.5 = \nu \quad (5.25)$$

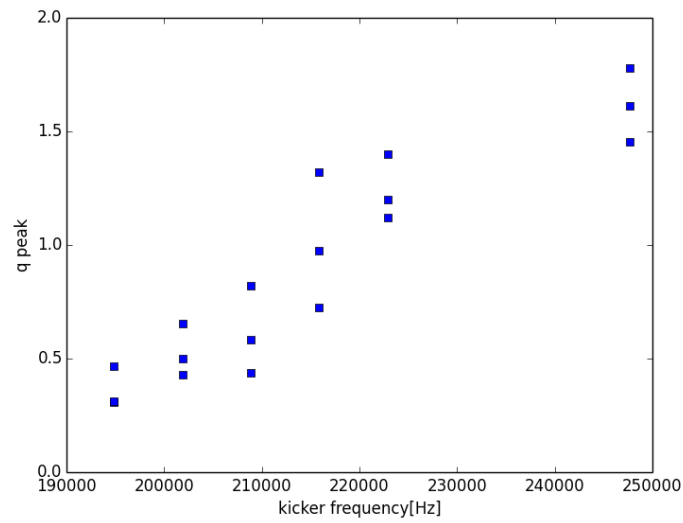


図 5.23: 4重極振動応答の大きさ

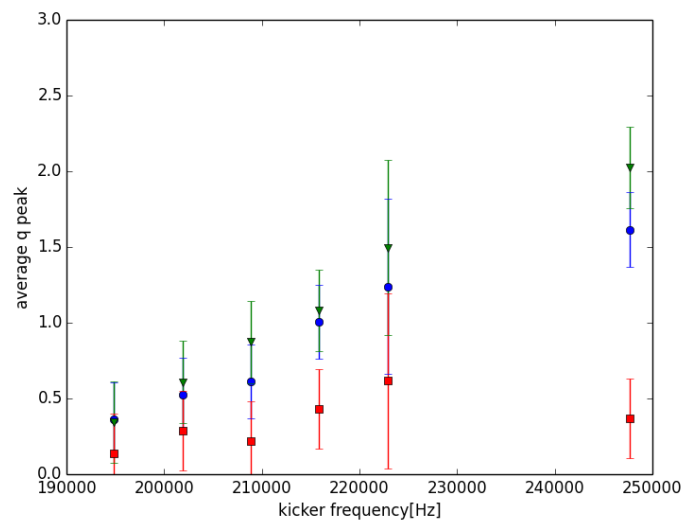


図 5.24: 4重極振動応答の大きさ。赤が粒子数 $0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、青が $1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、緑が $1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$ に対応している。

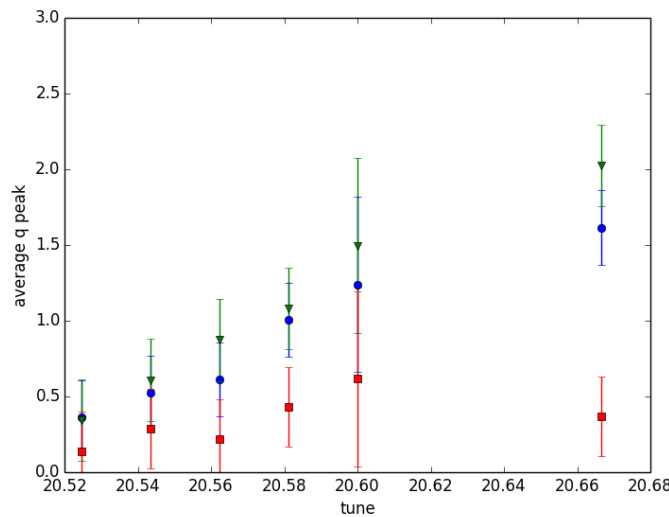


図 5.25: 4重極振動応答の大きさとベータロンチューンの関係。赤が粒子数 $0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、青が $1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、緑が $1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$ に対応している。

5.7.6 考察

q_{peak} は粒子数とキックの周波数に依存していることがわかる。図 5.24 から、 q_{peak} はチューン 20.60 ~ 20.66 付近を中心とした分布をしていることがわかる。このことから、その付近のチューンを中心としたチューンスプレッドを形成していると考察できる。粒子数を多くすると、空間電荷力が大きくなりチューンスプレッドの分布の中心が左下へシフトすると予想できるが [53]、今回の測定結果では q_{peak} の分布が横軸負の方向へシフトしているとは言えない。これは、キッカーの RF 周波数の選択の仕方が粗かったこと、もしくは粒子数の変化が小さかったことが原因として考えられる。Thinning ratio 22/32、28/32 ではデータ取得中のビームロスにより、バンチ内粒子数の増加は 8.6%にとどまった。一方で、図 5.25 での Thinning ratio 16/32 と 22/32 ではバンチ内粒子数が 29%増加している。Thinning ratio 16/32 と 22/32 における q_{peak} のスペクトルのわずかな違いをチューンスプレッドの変化と解釈することもできる。粒子数の変化によりチューンスプレッドの中心が変化と考えられる。しかし、本測定だけでは、 $\nu_y = 20.60 \sim 20.66$ のデータがなく、分布のピークがどこにあるのかはわからない。

5.7.7 まとめ

4極キッカーでビームの4重極モーメントの共鳴を引き起こした。測定では、従来2極キッカーとして使用しているストリップラインキッカーに同位相の RF 電圧を印加し、4極キッカーとして使用

した。キッカーの周波数に対応した振動数の4重極モーメント共鳴が観測できた。また、キッカーの周波数やビームの粒子数を変えることで共鳴の大きさが変化することが観測された。

5.7.8 今後の展望

今回の測定結果とチューンスプレッドの関係を明確にするために、シミュレーションにより、キッカー RF 周波数に対応した粒子の数と共鳴の大きさの関係を調べることが望まれる。また、以下の条件での追測定も必要である。

- * キッカーの周波数をより細かく刻み、測定を行う。

今回の測定でキッカーの周波数による共鳴の大きさの変化が観測された。ただし、今回の測定では 222854Hz~247615Hz の測定を行わなかったため、共鳴が最大となるキッカー周波数はわからなかった。共鳴が最大となるキッカー周波数はコヒーレントチューンシフト後のチューンに対応している可能性がある。したがって、キッカーの周波数をより細かく変え、共鳴が最大となるキッカー周波数を探ることが望まれる。

- * より広範囲の周波数での応答を観測する。

粒子が存在しないであろう領域に共鳴線をつくり、共鳴が観測されるかの観測をする。これは、いわば共鳴のバックグラウンド測定となる。例えば、粒子数を減らして $\nu_y=0.51$ までチューンスプレッドが広がらないようにし、図 5.17 の $\nu_x=0.01, 0.49, \nu_y=0.51, 0.99$ に共鳴線をつくることで、この測定は実現できる。

- * よりダイナミックにビームの粒子数を変えて測定を行う。

今回の測定で粒子数による共鳴の大きさの変化が観測された。粒子数の差をより大きくすれば、粒子数による共鳴の大きさの変化がより明確になると予想できる。

- * より精度のよい四重極モーメント測定のモニターを用いる。

これにより共鳴の大きさの測定精度も上がる。4重極モーメント測定のための新たに開発したモニターについては次章で述べる。

第6章 16電極ピックアップの開発

4重極モーメント測定に優れた特性をもつモニターとして電極数が16のストリップライン型ピックアップを新たに開発した。本章では16電極ピックアップの開発の背景と動作原理についての説明ののち、設計・製作・性能テストについて述べ、MRへのインストール、信号の確認と性能評価について記述する。

6.1 要求性能

新たに開発するモニターは、入射時のビームサイズ mismatches の観測や、エミッタンスの測定に用いるためのものである。IPMによる測定とのクロスチェック、あるいはIPM故障時のスペア用として使用する。したがって、IPMとは異なる動作原理であることが要求される。また、今後のMR大強度化に備えて、大強度陽子ビームに対する耐性が高いもの、またビームロス削減のため非破壊型のもものが望ましい。これらの条件をみたすピックアップ動作原理とするモニターを開発した。また、ストリップラインモニターでは2ないし4本の電極でビーム信号を読み出すものが一般的であるが、節で述べるように、電極数を増やすと4重極モーメントの測定の精度が向上する。これらの背景から多電極ピックアップを製作するに至った。ベータ関数の測定精度が5%であることから、 $\sigma_x = \sqrt{\beta_x \epsilon_x}$ より $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の目標性能を誤差 $1.128 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 以内とする²。

6.2 多電極モニターの先行研究

過去にKEKB入射器に設置された8電極モニターによりビームサイズ測定がなされている[54]。KEKBは電子陽電子加速器であり、水平方向への放射光が放出されやすく、BPM電極を水平方向に配置すると激しく損傷される。そのためBPMを傾け、電極が水平方向に配置されないようにしている。4電極の場合、電極をモニター垂直方向から45度傾けて配置すると、横方向³の垂直・水平方向の位置・4重極モーメントに対する感度が失われる。電極の配置に水平方向を避けつつ、垂直方向・水平方向の4重極モーメントを測定するために、KEKB入射器では電極数を8とし、傾きを垂直方

²ただしこれはサイズを測定することを目標とした場合の精度の目安である。詳しい計算方法は付録C参照のこと。

³ビームの進行方向に垂直な方向。

向から $\pi/8$ とした。4重極モーメントの S/N はおよそ 0.1 であった。これは KEKB 入射器において十分な精度であった。J-PARC においては、放射光の問題は考慮しなくて良いため、モニターを傾けて配置する必要はない。

6.3 多電極モニターの原理

ビーム信号読み出しの原理は前章の4電極ピックアップと同じである。4重極モーメントの測定にあたり、モニターの電極の数を増やした理由は主に以下の2点である。

① オフセットの削減

ビームの4重極モーメントは、N個の電極による信号 V_i を

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos 2\theta}{\sum_{i=1}^N V_i}$$

と処理することで得られる。

以下にさまざまな電極数の場合の4重極モーメントの式を載せる。ただし、 a_i の定義は式 5.15 である。

$$4 \text{ 本} : Q = \frac{4a_2 + 4a_6 + 4a_{10} + 4a_{14} + \dots}{4a_0 + 4a_8 + 4a_{16} \dots} \quad (6.1)$$

$$8 \text{ 本} : Q = \frac{4a_2 + 4a_6 + 4a_{10} + 4a_{14} + \dots}{8a_0 + 8a_8 + 8a_{16} \dots} \quad (6.2)$$

$$16 \text{ 本} : Q = \frac{8a_2 + 8a_{14} + 8a_{18} + \dots}{16a_0 + 16a_{16} + \dots} \quad (6.3)$$

4電極の場合だと、 a_6 以上の高次項が含まれるため、算出位置にオフセットが加わってしまう。8電極モニターの場合、高次項の寄与は4電極の場合と変わらない。一方で、16電極の場合は、 a_{14} 以上の項の寄与のみで、算出した4重極モーメントにのるオフセットが小さい。図 6.1 はシミュレーションで電極にランダムなノイズを発生させた場合に測られる4重極モーメントの分布である。どちらも1つの電極で得られる信号の S/N が 0.01 であるとして計算した。

赤が電極数 16 の場合、青が電極数 4 の場合である。青の中心値と赤の中心値のずれが、高次モーメントによるオフセットである。電極数 4 よりも電極数 16 の方がより真の値に近い 4 重極モーメントを得ることができる。

② ノイズの影響

それぞれの電極に電氣的ノイズがランダムに乗っている場合には、電極の数が多いほど測定精度が上がると考えられる。図 6.1 からわかるように、電極数 4 と比べ電極数 16 の場合の方が 4 重極モーメントの分布のばらつきが小さい。

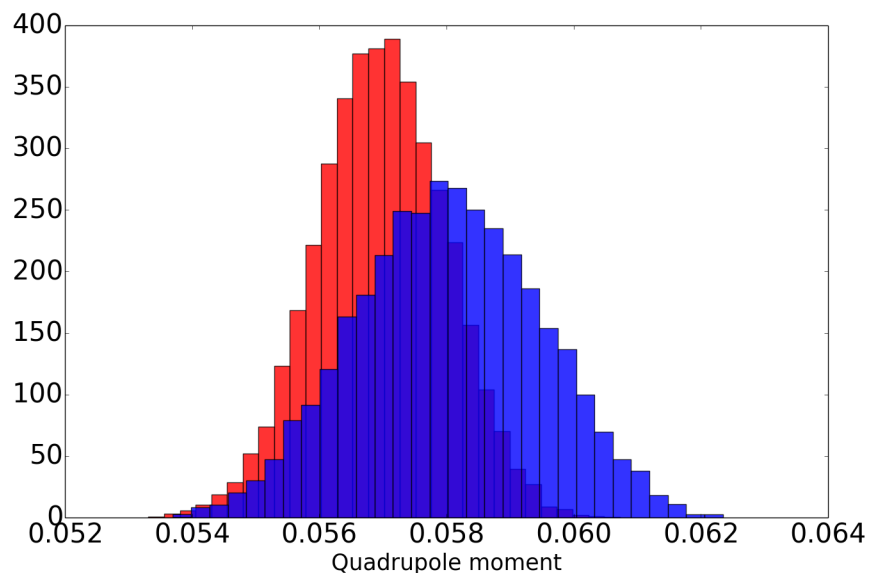


図 6.1: 電極数が 4 (青) の場合と 16 (赤) の場合の算出した 4 重極モーメントの違い。ノイズは信号平均値の $\pm 1\%$ の大きさ。

また、8 つの方向に対して感度があると、原理的には 8 極モーメントまで感度があるため、よりビームプロファイルの測定に近づく。

6.4 設計

前節で述べた理由から、電極の数は 8 本より多いものを考えた。電極数が多い場合、ケーブルの調達や、信号処理に必要な装置の調達など、実際的な問題が多くなる。そのため、今回は、最低限 4 電極のものよりは 4 重極モーメント測定の高次項によるオフセットを減らすことのできる電極数 16 本のモニターを開発した。

電極の数を増やすことで想定された問題点は、電極間の電氣的結合による信号の鈍りである。電極数が増えると電極間距離が短くなる。そのため、ビーム・電極間以外に隣り合った電極間で強い電氣的結合ができ、ビームによって誘導された電荷が隣の電極に誘導電荷を生む。これによりビームによる信号が鈍ることが考えられた。本来は、ビームが誘導した電極上の電荷が電極・パイプ間に電位差を生じさせ、その電位差を測るのが理想的である。このような状態に近づけるために、パイプに溝を掘り、その溝に電極を埋めた。電極・電極間結合は溝によって遮られることで、電極・パイプ間の結合が主になると考えられる。

また、電極の特性インピーダンスは、電極につなぐケーブルに合わせて 50 オームとなるように設計した。電極につなぐケーブルと電極のインピーダンスがマッチングしていると、信号の反射がなくなるためである。電極の特性インピーダンスは次に述べる境界要素法に基づいて計算した。

6.4.1 境界要素法を用いた特性インピーダンス計算

境界要素法を用いて、特性インピーダンスの計算を行った。図 6.2 のように、電極 1 つを 92 個、パイプ全体を 2528 個に分割、合計で 4000 の要素に境界線を分割して計算した。パイプの溝、電極の長さ・厚みを固定し、電極の幅を可変とした。結果が図 6.3 である。直線フィッティングをした結果は

$$(\text{特性インピーダンス } [\Omega]) = 79.6354 - 3.00956 \times (\text{電極幅 } [\text{mm}]) \quad (6.4)$$

となった。式 6.4 より 50 オームとなる電極幅は 9.847mm である。したがって、電極幅は 9.85mm とした。

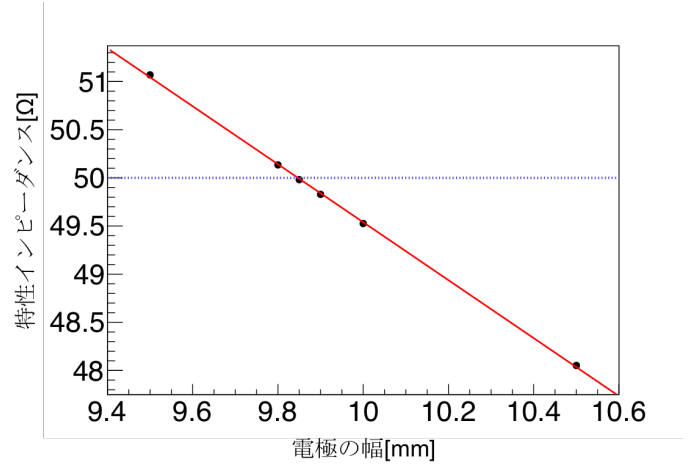
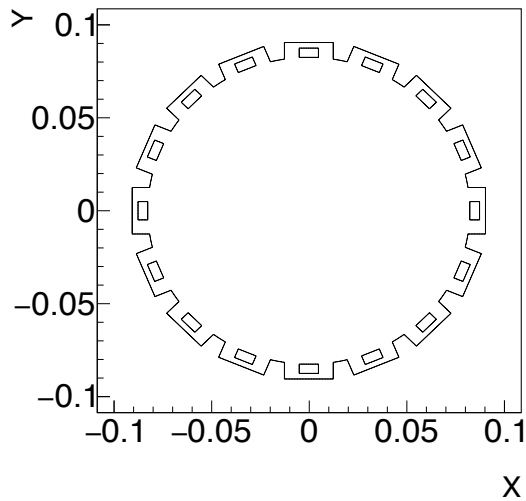


図 6.2: 4000 個の要素に分割した図。各軸の単位は [m]。

図 6.3: 特性インピーダンスと電極幅の関係

6.4.2 境界要素法の精度

境界要素法の要素数による誤差を調べるために、要素数を変えて計算をした。図 6.4 は境界要素法の分割要素数と特性インピーダンスの関係である。要素数が増えるほど近似の精度が良くなり真の値に収束していく。

図 6.4 から、要素数 4000 で算出した特性インピーダンスの誤差は 0.05 オーム程度であるとわかる。式 6.4 から、0.05 オームの誤差は電極幅の誤差 0.016mm に対応することがわかる。したがって、この誤差は、製作誤差 50 μ m、目標誤差 80 μ m (後述) での今回の製作に対して十分な精度をもつことがわかった。

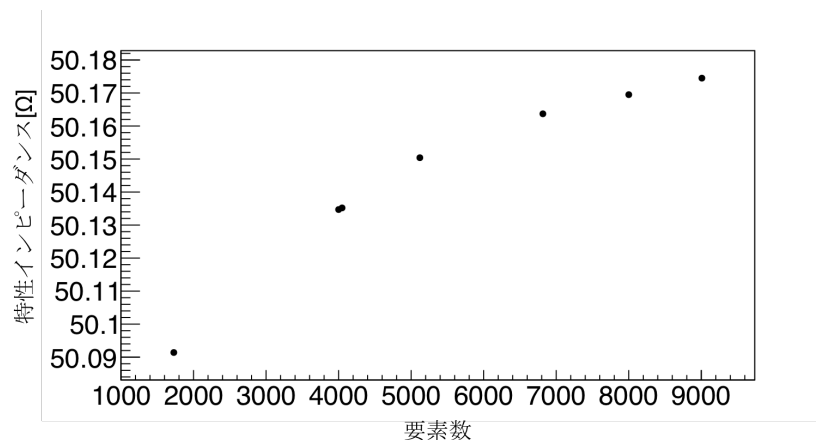


図 6.4: 境界要素法の精度

6.4.3 境界要素法によるビーム位置・4重極モーメントの計算

x、y 方向に 0.01m 間隔でビームの位置を変化させ、それぞれの場合に電極に生じる電荷量からビーム位置を算出した。相対位置 ($D_x = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos \theta}{\sum_{i=1}^N V_i}$, $D_y = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \sin \theta}{\sum_{i=1}^N V_i}$) と絶対位置 [m] を関係づける係数は、0.01 をビーム位置 (0.01, 0) での x 方向の算出位置で除した値とした。そのため、図 6.5、図 6.6 の双方ともに (0.01, 0)、(0, 0.01)、(-0.01, 0)、(0, -0.01) に対する算出位置 (赤三角) が真の位置 (黒点) と一致している。4 電極の場合の位置を図 6.5、16 電極の場合を図 6.6 に示した。4 電極の方は、ビーム位置がビームパイプに近づくにつれて、正確なビーム位置からの歪みが大きくなる。一方で 16 本の電極による位置は歪みが見られない。図 6.7 は、ワイヤーが位置 $y=0$ のときの、x 方向のワイヤー位置と x 方向の算出相対位置の関係を示したものである。横軸の単位は mm で、縦軸は相対的な値のため無次元量である。

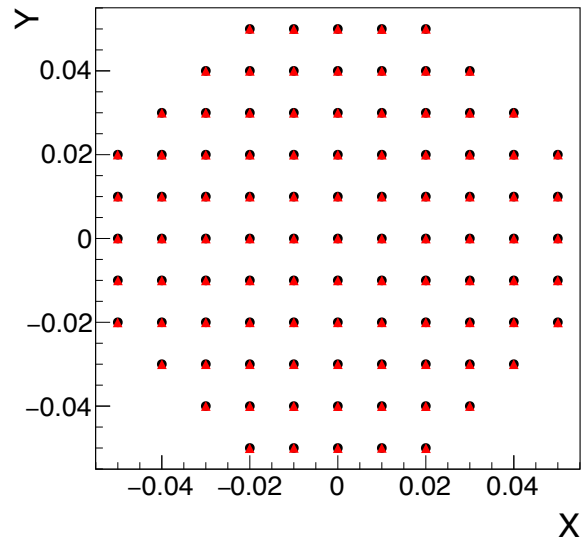
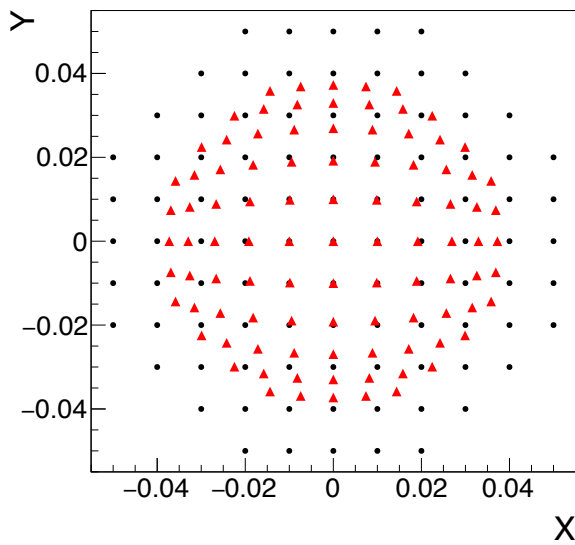


図 6.5: 4本の電極の信号から算出したビーム位置 [m]。赤三角形が算出位置、黒点は設定位置。

図 6.6: 16本の電極の信号から算出したビーム位置 [m]。赤三角形が算出位置、黒点は設定位置。

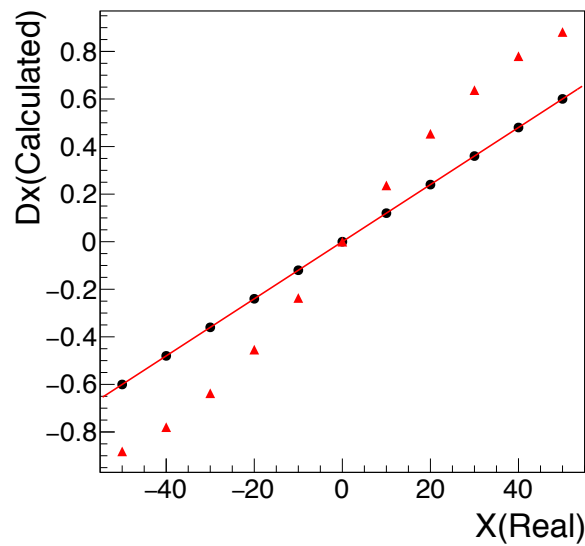


図 6.7: 算出した相対位置

このことから、16電極モニターは位置測定に関して4電極のものより歪みが小さく、 $D_x = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \cos \theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$ 、 $D_y = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \sin \theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$ により算出した位置が実際の位置に対して線形な応答を示す。

16電極の算出位置のフィッティング関数は式6.5である。

$$X(Fit) = 0.0120043 \times X(Real) - 1.09579 \times 10^{-7} \quad (6.5)$$

境界要素法によって見積もられる感度係数は0.0120043[1/mm]となった。

電極数16本の場合にビームサイズを変化させ、電極に誘導される電荷量から四重極モーメントを求めたものが図6.8である。横軸は定めたビームサイズ σ_x 、 σ_y から計算した $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ で、縦軸は境界要素法により算出した電極上の誘導電荷を V_i として $Q = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \cos 2\theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$ により求めた4重極モーメントである。

図6.8から、算出した4重極モーメントが $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ に対し線形であることがわかる。ただし、Qの大きなところでは直線からのずれが見られた。直線近似の1次関数は以下の式である。境界要素法によって見積もられる4重極モーメントの感度係数は140.524[1/m²]となった。

$$(\text{Quadrupole moment}) = 0.000242851 + 140.524 \times (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \quad (6.6)$$

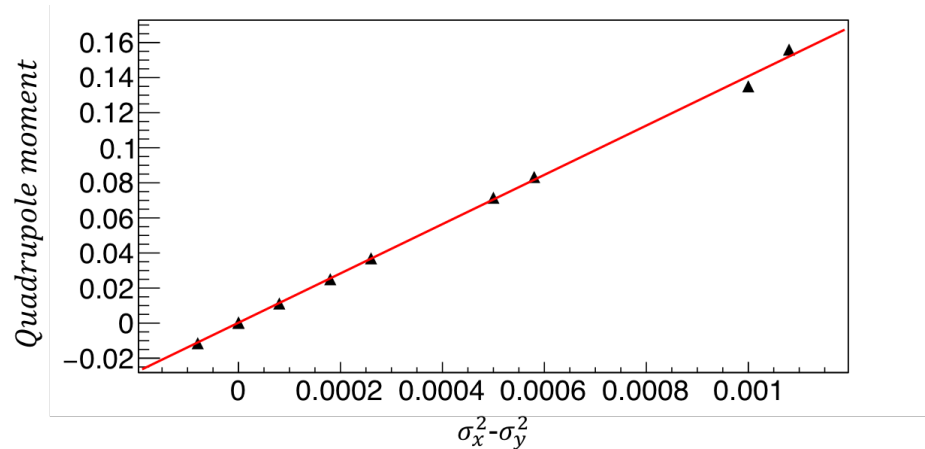


図 6.8: 境界要素法により算出したビームの四重極モーメントとビームサイズの関係。

6.5 製作

モニターの主な仕様値を表 6.1 に記した。モニターは、円筒のパイプに 16 本のステンレス製電極をビーム軸に平行に取り付けたものである。上流端は同軸 N 型真空フィードスルーに接続し、下流端はビームパイプから出るステンレス棒に接着した。株式会社 TOYAMA の製図の一部を図 6.9、図 6.10 に載せた。図 6.9 は 16 電極モニターの外観である。上流端 16 箇所 N 型コネクタが付けられおり、下流端には電極と真空パイプの接続のための電極棒を差す穴があるのがわかる。図 6.10 は 16 電極モニターの横方向の断面図である。16 個の溝が掘られ、その内部に電極が納まっているのがわかる。

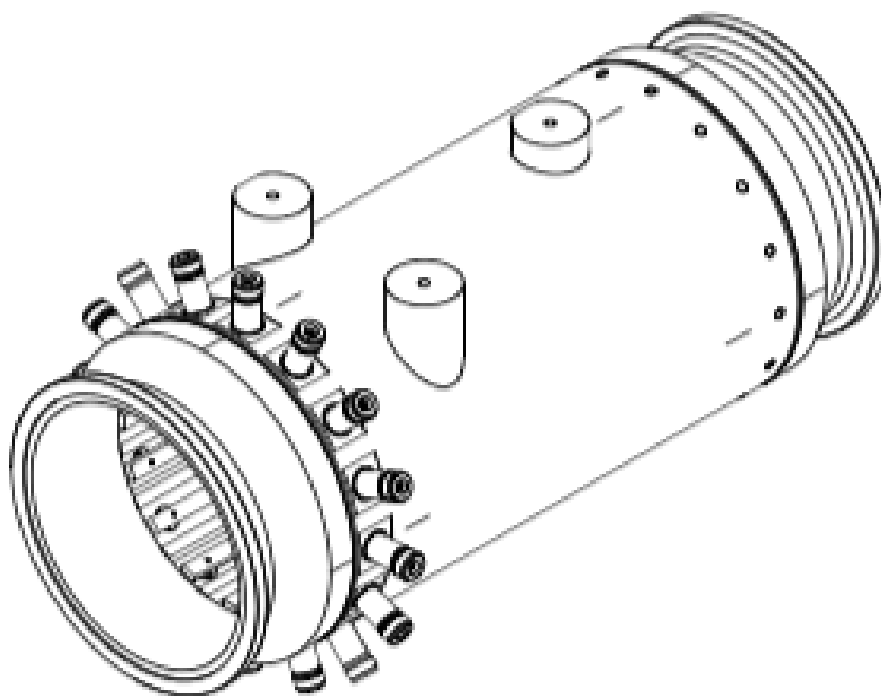


図 6.9: モニターの設計図、外観 (株式会社 TOYAMA 製図)

電極幅	9.85 ± 0.05mm
電極長さ	330.00mm
電極厚み	5.00mm±0.05mm
電極数	16
溝の幅	25.00mm±0.05mm
溝の深さ	90.50mm±0.05mm
ビームパイプの内径	φ165mm
ビームパイプの主な外径	202mm
ビームパイプの長さ	500mm
材質	SUS316L

表 6.1: 電極の主な寸法 (± の後ろの値は目標製作誤差。保証値は 0.08mm。)

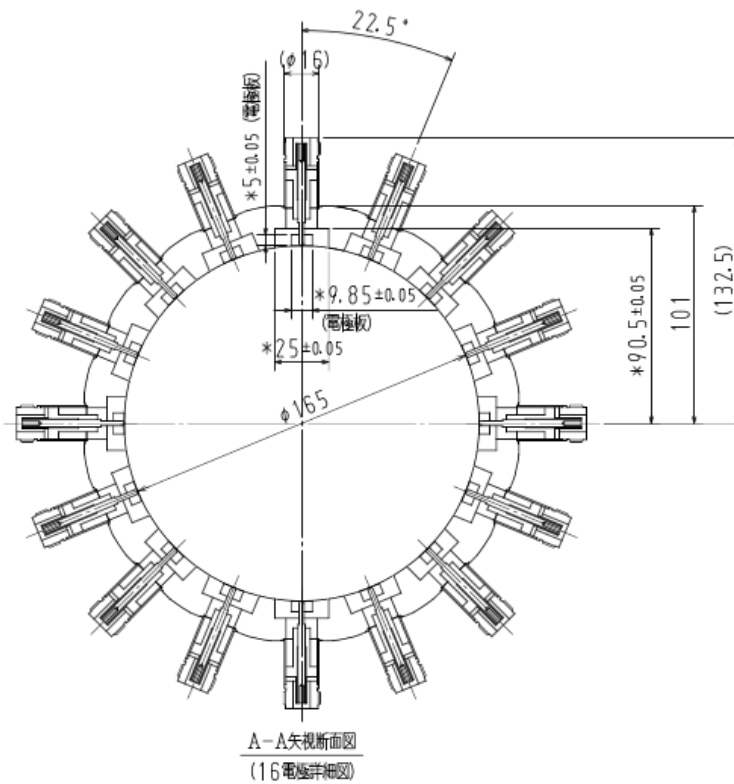


図 6.10: モニターの設計図、断面 (株式会社 TOYAMA 製図)

今回は目標性能を $50\mu\text{m}$ とし、保証値 $80\mu\text{m}$ とした。式 6.4 から、電極幅の製作誤差 $80\mu\text{m}$ は特性インピーダンス 0.24Ω の誤差となる。

電極と溝の位置関係を決定するためには、電極を支える棒と電極をあらかじめ溶接してからパイプに取り付ける方法と、電極が棒の上下にスライドするようにしておき、位置を調節後スポット溶接するという方法がある。前者は棒と電極の接触は問題ないが、位置の微調整ができないという問題があった。後者は位置の精度は前者に比べ良いが接触不良が懸念される。また溶接ひずみによる変形も問題であった。前者の位置精度の不透明さから、本モニターでは後者の位置調整後スポット溶接で固定する方式を採用するに至った。製作時に懸念された問題点は、溝の製作方法である。ワイヤ放電加工でパイプに切り込みを入れた。切り込みの深さの目標精度 $50\mu\text{m}$ を達成できるかの試行では、もとの金属表面が反っていたため深さ方向の目標精度を達成できなかった。実機の加工においては金属表面は精度よく加工して反りをなくした後にワイヤ放電加工をするため、この問題は生じないと思われる。

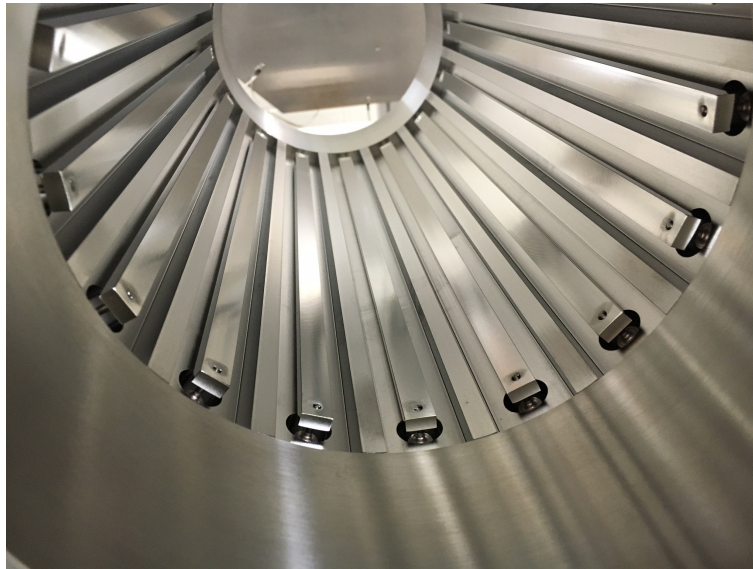


図 6.11: モニターの内部

材質は SUS316L で (比透磁率) < 1.1 のものである¹。表面処理にはバフ研磨、電解研磨を施した。また、100 度以上で 24 時間真空ベーキングを行った。ベーキングとは、金属内部のガスを放出するためにパイプの外側にヒーターを巻いて金属の温度を上げるというものである。真空下で行うため、放射によってのみ熱伝導する。ステンレスの熱伝導が悪いため、パイプ内部の温度上昇が遅く、パイプ内外での温度に大きく差が生じ、熱膨張に差が出る。それ故、電極を支える棒やセラミックが折れてしまうという問題が起きる可能性がある。温度差を減らすために、時間をかけて温度を上げ、

¹SUS316 は SUS304 に比べ耐食性が優れており、さらに SUS316L は耐粒界腐食性に優れている。また SUS316L は硬いため加工に時間が掛かる。

温度上昇をゆるやかにした。

6.6 ベンチテスト

6.6.1 電極のインピーダンス測定

電極の特性インピーダンスを調べるため、TDR を用いて電極の z 方向の特性インピーダンスを測定した。16 個の電極についての結果が図 6.11 である。電極毎にばらつきが見られる。約 51Ω を中心に全体的に 1Ω 程度ばらついており、最大でおよそ 3Ω のばらつきが存在する。このばらつきは、上流端と下流端の電極溶接の部分などで何度も反射した信号によるもの、あるいは、溝や電極の製作誤差に起因しているものと考えられる。

図 6.12 の 6.85×10^{-8} [s] 付近で 50 オームから大きなずれが見られる。これは電極を支えるステンレス棒と電極の溶接が原因であると考えられる。終端はグラウンドである真空パイプに溶接されている。溶接が完全で電極とパイプが導通しているなら、図 6.12 の 7.1×10^{-8} [s] 以降の特性インピーダンスが 0 になる。図 6.12 ではその時刻付近でインピーダンスが急激に小さくなっているが、 0 ではない。このことから、TDR の出力信号は全体的に $+数\Omega$ のオフセットを含んでいるという可能性も考えうる。

電極毎の特性インピーダンスのばらつきは電極のゲインのばらつきにつながるため出力信号に対し補正する必要がある。次に述べるワイヤー法の校正結果を電極より取得した信号に反映することで補正できる。

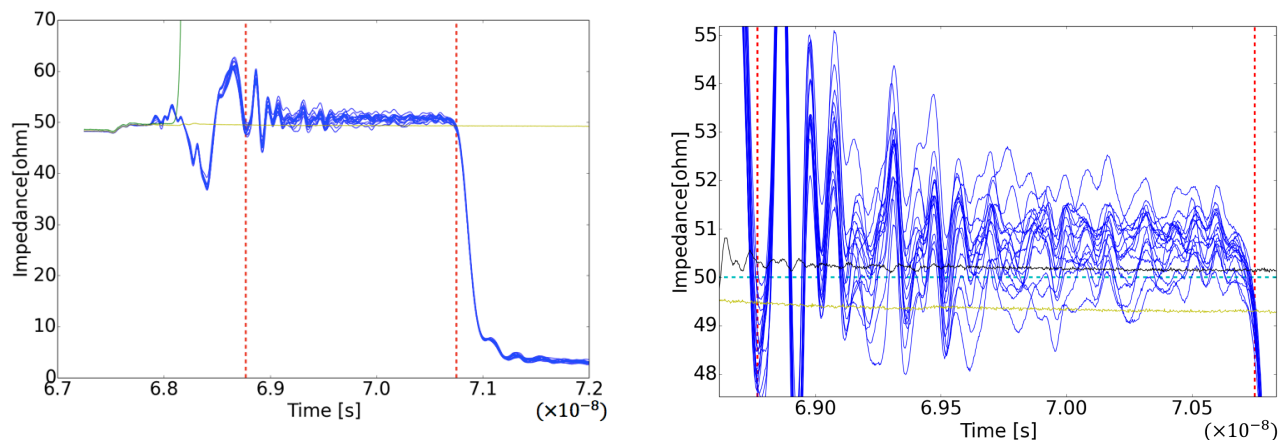


図 6.12: TDR を用いた電極の特性インピーダンス測定結果。緑線は open、黄線は 50 オームターミネートでの測定結果。赤点線の間隔は 1.98 [ns]。右図は左図の拡大図。水色の点線は 50 オームを示す。

6.6.2 ワイヤ法を用いた位置感度測定

6.6.2.1 測定方法

位置による電極の感度測定には、図 6.13 のような BPM 校正装置 [56][57] を用いた。ワイヤをモニターに通し、台に乗せたモニターを動かしてワイヤとモニターの位置関係を変えていく。ワイヤには電流が流れるようになっており、その電流によって電極に生じる電圧を測定した。測定にはネットワークアナライザを使用した。校正台は $30\mu\text{m}$ の精度で測定が可能である。測定周波数帯域は 0.85MHz から 21.25MHz までで、 0.85MHz 間隔に 25 点測定した。ワイヤの配置位置は図 6.14 のように半径 55mm 以内で、 10mm 間隔に 97 点とした。再現性チェックのためにワイヤを 20mm 間隔で移動し、 10mm 間隔のときと同様の周波数帯域で再度測定をした。ワイヤは金メッキピアノ線を用いた。この線の抵抗はポータブル電圧計で簡易的に測った結果、 $1.6(\pm 0.1)\Omega / 215(\pm 1)\text{cm}$ であった。ワイヤにテンションをかけてはるため、ワイヤの端には 3.5kg の重りをつけている。



図 6.13: ワイヤキャリブレーション装置

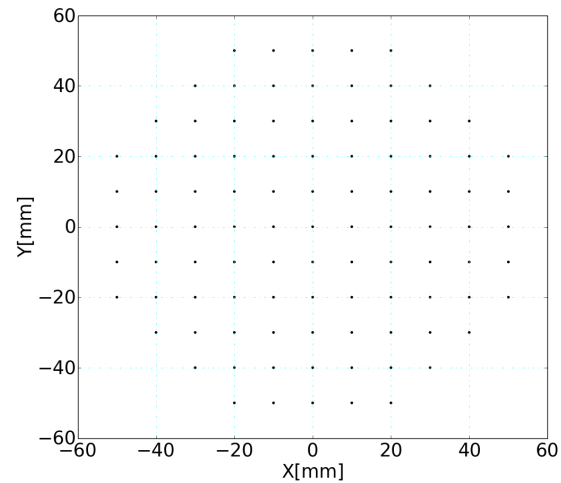


図 6.14: ワイヤ配置位置

6.6.2.2 結果

ポート 1 をワイヤー、ポート 2 を各電極として、各電極の S パラメータ¹S21 を電極の V_i とし、位置を算出したものが図 6.15 である。位置の算出には式 6.7 を用いた。また、電極 1、5、9、13 の 4 つの信号から求めたワイヤ位置を図 6.16 に示した。電極数 4 では位置の歪みが見られるが電極数 16 では位置の歪みは見られない。

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \cos \theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$$

$$D_y = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \sin \theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i} \quad (6.7)$$

¹S21 は、ポート 1 から入射した信号がどれだけの割合でポート 2 から反射されるを示している。S パラメータについての説明は付録 E に記載した。

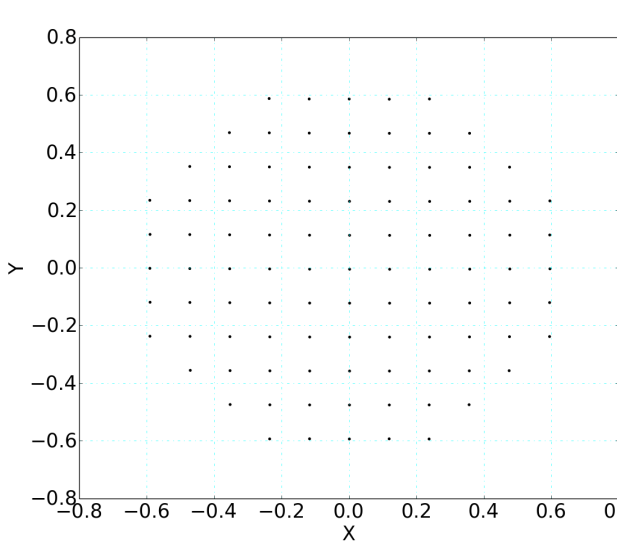


図 6.15: ワイヤキャリブレーション結果
(16電極分の信号から計算したワイヤ位置)

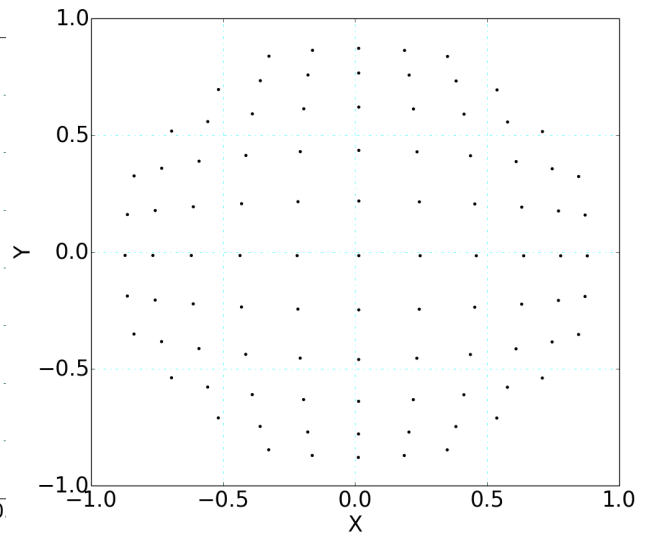


図 6.16: ワイヤキャリブレーション結果
(4電極分の信号から計算したワイヤ位置)

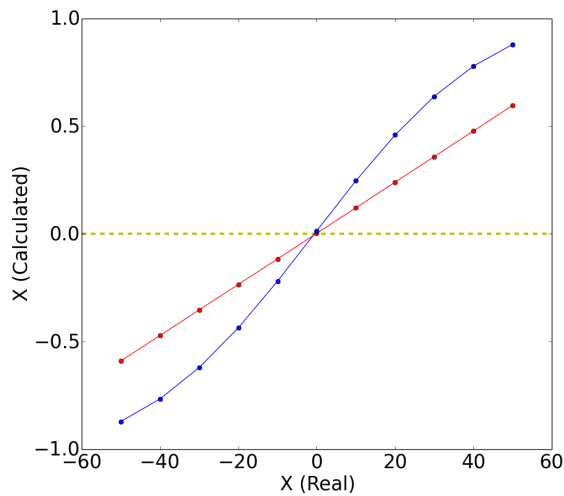


図 6.17: ワイヤ位置が $y=0$ での x 方向の設定位置対算出位置。赤は16本の電極信号から、青は2本の電極信号から算出したもの。

図 6.17 にワイヤ位置 $y=0$ のみを抜き出した測定 x を表示した。図 6.17 の青は2電極の信号を用いて $D_x = \frac{(V_5 - V_{13})}{(V_5 + V_{13})}$ で位置 x を求めた。図 6.17 から、2電極では算出位置に歪み、つまり真の値に対する算出位置の非線形性が生じるのに対し、16電極の方は線形であることがわかる。16電極の算

電極番号	S パラメータ
1	0.043031761
2	0.043501509
3	0.042327667
4	0.042916714
5	0.042949833
6	0.042661879
7	0.04285301
8	0.04255362
9	0.041709542
10	0.041729721
11	0.042741569
12	0.042966741
13	0.044144412
14	0.042973962
15	0.042826294
16	0.043263127

表 6.2: 電極ごとの S パラメータ (5 MHz)

出位置をワイヤー配置位置 $X(\text{Real})$ に対し線形近似したときのフィッティング関数 $X(\text{Fit})$ は式 6.8 である。

$$X(\text{Fit}) = 0.01186 \times X(\text{Real}) + 0.002438 \quad (6.8)$$

ワイヤーキャリブレーションの感度係数は $0.01186[1/\text{mm}]$ である。これは設計誤差を考慮していない境界要素法による感度係数 $0.0120043[1/\text{mm}]$ に対して 1.21% 程度のずれがある。ワイヤーからの出力信号を元に算出した $X(\text{Calculated})$ は $X(\text{Fit})_{-0.0450}^{+0.0347}\text{mm}$ の範囲内であった。この誤差は算出した双極子モーメントと実際の位置の関係を 1 次関数で近似することによって生まれるものである。ワイヤという点電荷に等しいもので算出位置に歪みが生じるということは、ビームのような電荷分布に広がりを持つものだと、それぞれの電荷位置に異なる歪みのファクターがかかるため、平均位置にワイヤで求めた歪みの補正を施しても、真の位置からずれてしまう。一方、ワイヤでの算出位置に歪みがなければこのような問題は起きない。

式 6.8 で 0.002438 のオフセットが乗っていることがわかる。その理由は 2 点考えられる。1 つ目は電極自体が理想的な設計からずれていること、2 つ目はワイヤの位置の配置誤差である。しかし、ワイヤは $1\mu\text{m}$ の精度で固定されている [56] ため、電極の特性のばらつきが起因していると考えられる。実際にワイヤをモニター中心 $(0, 0)$ に配置したときの各電極の S パラメータを表 6.2 に示した。

理想的に電極を 16 回対称に配置できていた場合には各電極からの出力値が同一になる。実際には表 6.2 のようなばらつきが見られた。この結果を補正する必要がある。

6.6.3 ネットワークアナライザを用いた周波数特性測定

高周波 1GHz までの周波数特性を調べるため、図 6.18 のようなテーパ管をモニターの上下流に取り付け、ネットワークアナライザで測定した。テーパ管は内部に導体を取り付けられる仕様になっており、この内部導体に RF を流せるようになっている。ワイヤーではインピーダンスミスマッチにより反射が起こる。一方、テーパ管は特性インピーダンスが 50Ω となるように内導体と外導体の半径が調整されており、信号の反射が小さい。図 6.19 には、ポート 1 をワイヤー、ポート 2 を各電極として、各電極の S_{12} を示している。横軸が周波数 [GHz]、縦軸が透過係数 [dB] である。電極の長さに対応する周波数 465 ~ 472MHz、935 ~ 940MHz で S パラメータが急激に小さくなるのがわかる [48]。 S パラメータが急激に小さくなる周波数は、電極の長さに対応し、信号の伝達時間 $T = 2L/c$ の逆数の整数倍となる。つまり、 $f = n/T$ である。本モニターの電極長 330mm で計算した周波数は $1/T = 505\text{MHz}$ であり、測定した $n=1$ に対応する周波数から 40MHz 程度のずれはあるものの、概ね一致している。また測定結果では、 $n=1$ の周波数の整数倍で再び減衰していることも観測できた。テーパ管の概念図を図 6.20 に示した。



図 6.18: テーパー管を用いた高周波特性測定

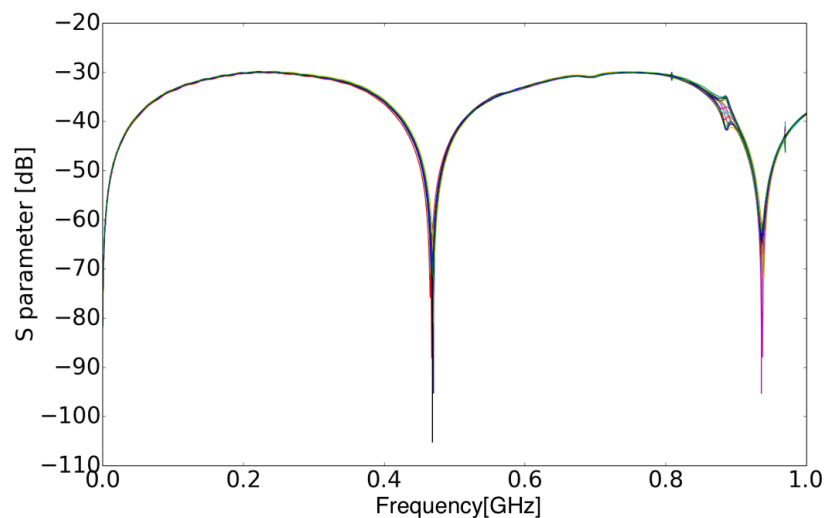


図 6.19: S パラメータ

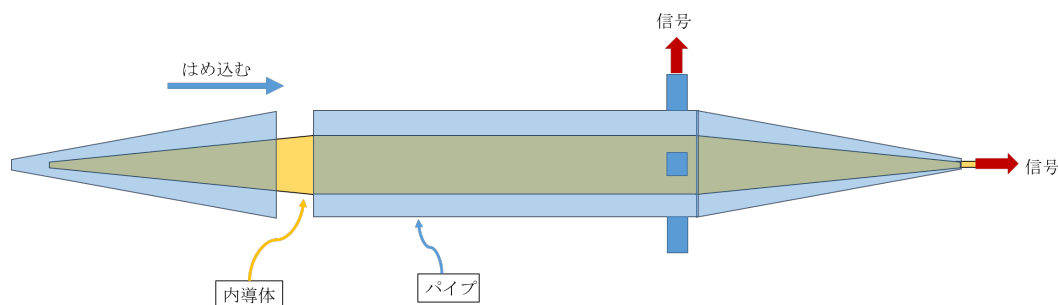


図 6.20: テーパー管の概念図

6.7 インストール

入射直後の MR#15 地点 (図 5.3 参照) にインストールした。インストール前後のビームラインの様子が図 6.21、図 6.22 である。図 6.23 はインストール場所付近のベータ関数の設計値を表している。赤が水平方向、青が垂直方向のベータ関数である。図 6.23 中の 4 重極マグネット QD14 直下流 (6.23 で 102m の場所) に 16 電極ピックアップを配置した。インストール場所にはベータ関数の垂直方向と水平方向の差が大きいところを選んだ。図 6.23 から QD14 直下流でビームサイズが垂直方向に大きく広がっていることがわかる。インストールの手順を以下にまとめた。

(1) 架台の設置

(2) 架台上にモニターを設置

(3) 位置合わせ 1 : 水準器でモニターが回転していないかを確認しつつ、モニター設置上流の Q マグネットに据え置かれたレーザー墨つぼの線と、モニターの垂直方向に引かれた罫書き線を目視で合わせる。

(4) 位置合わせ 2 : レーザー墨つぼのレーザーの線と、モニター設置上下流の Q マグネットの側面に引かれた中心線を目視で合わせる。

(5) 位置合わせ 3 : レーザー線とモニターの垂直方向に引かれた罫書き線が合うようにモニターの位置を調整する。

(6) 真空引き

(7) 測定 : レーザートラッカーでモニターの設置位置を正確に測定する。

レーザートラッカーにより測定したモニター設置位置の結果を表 6.3 に記した。

基準座標軸は上下流の 4 極マグネットに据え置かれた台座を基準に定めた。原点は、モニターより下流側の QDS014 のトラッカー台座とした。座標 (x, y, z) は、 x が縦方向のビーム進行方向、 y が横方向のリング円周の中心方向、 z が横方向の垂直方向である。

レーザートラッカーによる測定の結果、設計値からのずれは 2mm 以内に収まっていることがわ

位置	測量値 [mm]	設計値 [mm]
下流	(1476.525, -0.873, -452.062)	(1475, 0, -450)
上流 内側	(1316.487, 59.145, -451.634)	(1315, -60, -450)
上流 外側	(1316.534, -60.829, -451.775)	(1315, +60, -450)

表 6.3: monitor の位置測量結果

かった。また、モニター全体として x, y, z 方向へのずれがあるのとは別に、 z 方向に回転しており、上流での垂直方向のずれが 0.3mm、つまり、下流側がおよそ 0.1 度垂直下向きに傾いていることがわかった。 z 方向の回転は 4 重極モーメントの測定に影響を与えるため校正方法について検討が必要である。

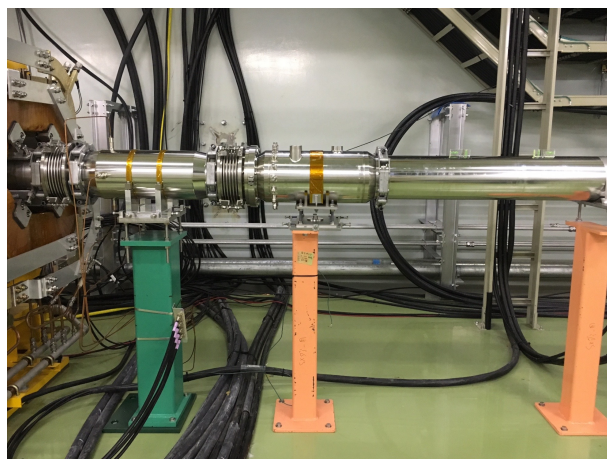


図 6.21: インストール前のビームラインの様子 図 6.22: インストール後のビームラインの様子

J-PARC MR では、地上の電源棟でモニター信号の取得・処理をしている。そのため、地下のリング内から地上に約 300m のケーブルが必要である。今回は、以前別のモニターで使用していたケーブルを再利用した。また、ノイズフィルターとして、モニター直前にコモンモードチョークをつないだ。ケーブルの終端は 4 チャンネルオシロスコープ 4 台につないだ。ケーブル終端とモニターの導通チェックのため、図 6.24 のセットアップを組み、TDR でモニターから反射された信号を観測し、導通を確認した。この時、signal generator からの信号を入れた電極の 1 つ隣と 2 つ隣からの信号も観測した。結果、図 6.25 のように 5V の入射波に対して、4V の反射波が観測された。図 6.25 の黄色線の負の波形が反射波を示している。1 つ隣の電極からは 4mV (図 6.25 の赤・青色線)、2 つ隣の電極からは 1mV 程度の大きさの信号が見られた。

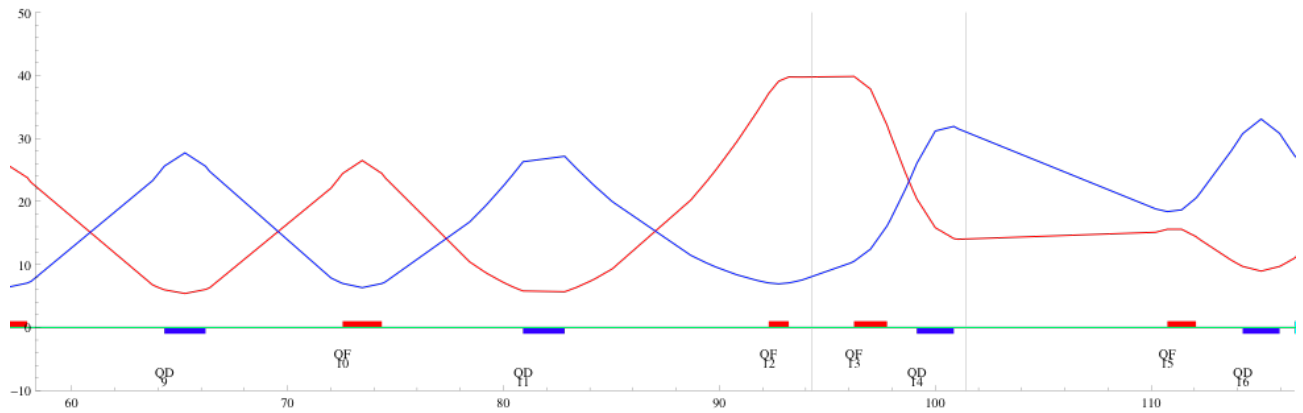


図 6.23: インストール場所付近のベータ関数（設計値）。赤が水平方向、青が垂直方向。

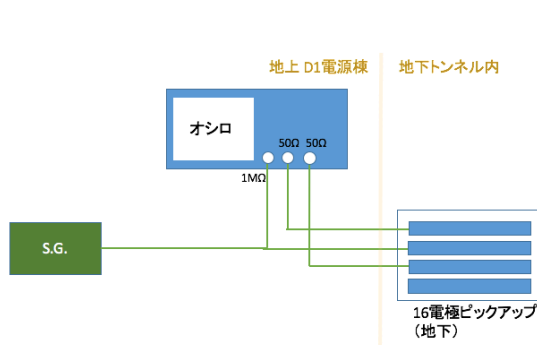


図 6.24: 導通チェックのためのセットアップ

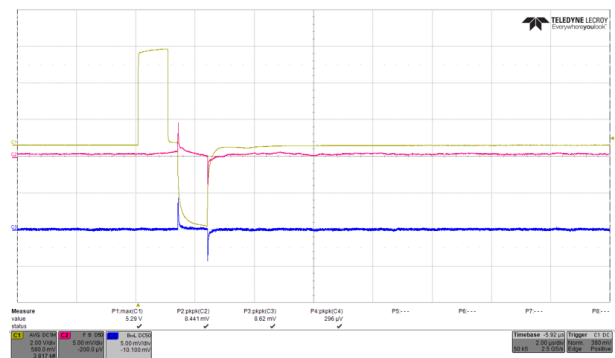


図 6.25: 導通チェック時の波形

6.8 ビーム応答試験

ニュートリノへの連続運転中、16電極ピックアップから正常に信号を取得できるかを確認し、信号のS/Nを調べるために、ビーム入射直後と加速終了のタイミングで周回ビームからの信号を取得した。

6.8.1 測定方法

MR周回中のビームの信号を12bitオシロスコープ3台(LECROY HDO6104、HDO6034、HDO4034)と8bitオシロスコープ1台(Wave pro715zi)を用いて測定した。オシロスコープの設定でbandwidth20MHzのフィルターを掛け、250MS/sで50ms間、信号取得した。データ取得のタイミング

を図 7.1 の黄色で塗られた領域で示した。K3¹ の 5ms 前から K4² の 5ms 後までの 50ms 間と、P3³ の 45ms 前から P3 の 5ms 後までの 50ms 間である。入射直後のビームは位置の振動が大きいことから、K3 直後を選んだ。また、加速後のビームは波形が鋭く波高が高いため、信号を見やすいと考えられる P3 直前を選んだ。オシロスコープに入力するトリガー信号は P1⁴ タイミングと同期しており、オシロスコープの Delay 時間を 101ms と 151ms とした。オシロスコープの設定状況を表 6.4 に示した。

	12bit オシロスコープ	8bit オシロスコープ
vertical gain[V]	2.500000×10^{-4}	2.774330×10^{-4}
horizontal gain[ns]	4.0	4.0
horizontal offset[s](Delay101、K3 付近のデータ)	7.600000×10^{-2}	7.600000×10^{-2}
horizontal offset[s](Delay1511、P3 付近のデータ)	1.486000	1.486000

表 6.4: オシロスコープの設定

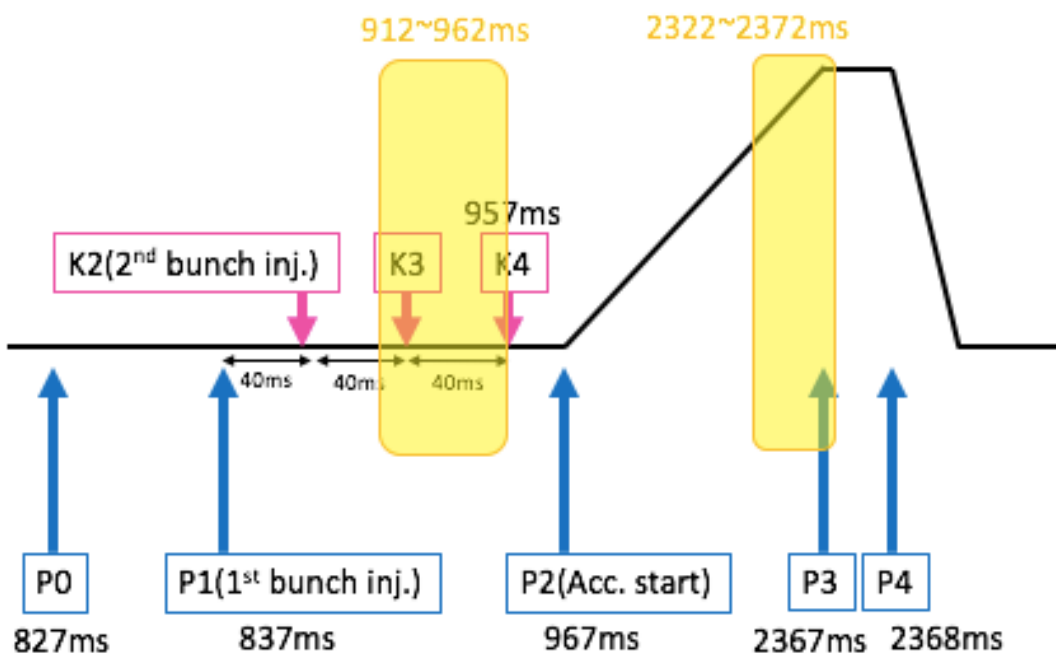


図 6.26: MR の繰り返し周期の図によるデータ取得タイミングの説明図。黄色の領域がデータ取得の時間領域。

¹RCS から 2 バンチずつ全 4 回入射をする。そのうちの 3 回目の入射タイミングを意味している。
²RCS から 2 バンチずつ全 4 回入射をする。そのうちの 4 回目の入射タイミングを K4 と呼んでいる。
³ビームの取り出しタイミングを P3 と呼んでいる。
⁴1 回目のビーム入射タイミング K1 と同じ時刻を表している。

6.8.2 結果

図 6.27 は全 16 電極からの信号である。全電極から信号を取得できていることが確認された。

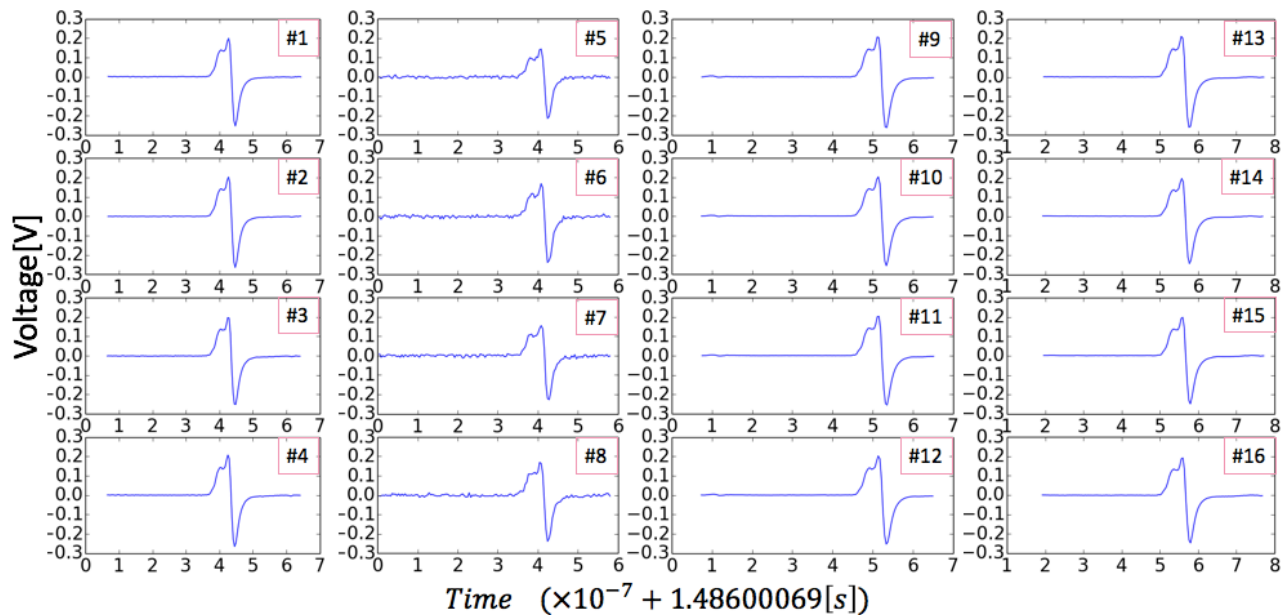


図 6.27: 16 電極分の信号

取得したデータの波形を図 6.28~6.33 に示した。図 6.28、図 6.29 は取得した全 50ms 間の信号を示している。図 6.28 では、3 回目の入射直後 0.081s と 4 回目の入射直後 0.121ms で信号が大きくなっているのがわかる。図 6.29 では、P3 直後の 1531s から信号波高が約 0V に急落しており、このタイミングに陽子ビームがニュートリノ実験施設へ取り出されたことがわかる。図 6.30 は K3 直前の 1 パルス分の波形である。4 バンチの信号が観測された。一方、図 6.31 は P3 直後の 1 パルス分の波形で、8 バンチ観測された。図 6.32 は K3 直前の、図 6.33 は P3 直前のバンチ波形である。K3 直前の波形はフィラメンテーション（付録 A.3 参照）の効果でぎざぎざしているのが見える。図 6.33 は信号が鋭く波高が入射直後の約 10 倍となっている。図 6.34 は図 6.28 のうちの K3 直後を狭い時間範囲で表示したものである。0.02V 程度の波高の信号と 0.04V 程度の波高の信号が交互に見られ、時間が経過するにつれて 0.02V に減衰していく様子が見られる。0.02V 程度の信号は K1、K2 で入射されたバンチによる信号（図 6.30）で、K3 で入射されたばかりの信号の波高が約 0.04V である。K3 で入射された信号が波高約 1/2 に減衰していくことがわかる。これは、ビームロスに起因すると考えられる。

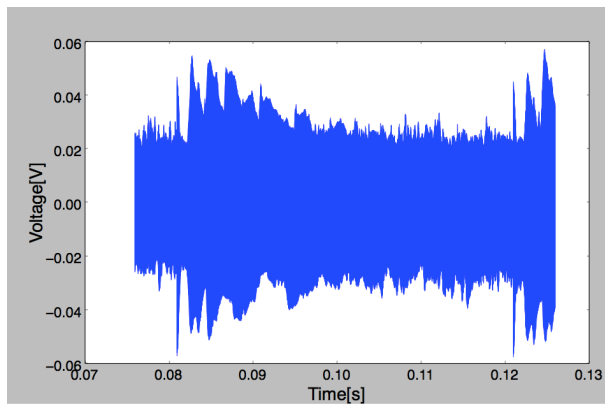


図 6.28: 16 電極モニターによって取得した K3 直前の 50ms 分の信号

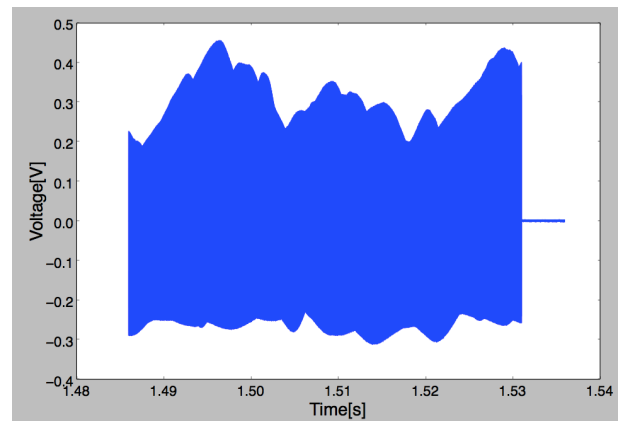


図 6.29: 16 電極モニターによって取得した P3 直前の 50ms 分の信号

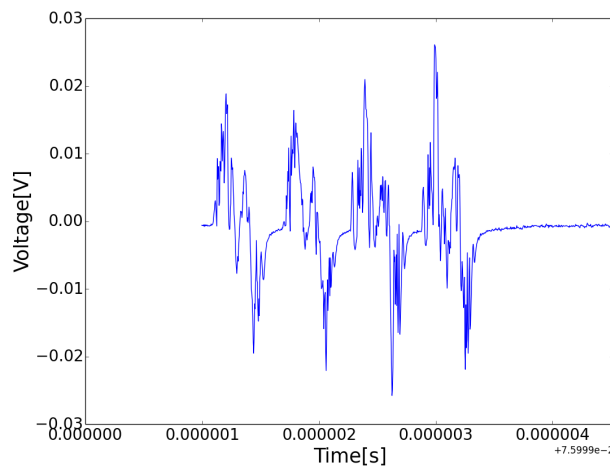


図 6.30: 16 電極モニターによって取得した K3 直前の 1 ターン分の信号

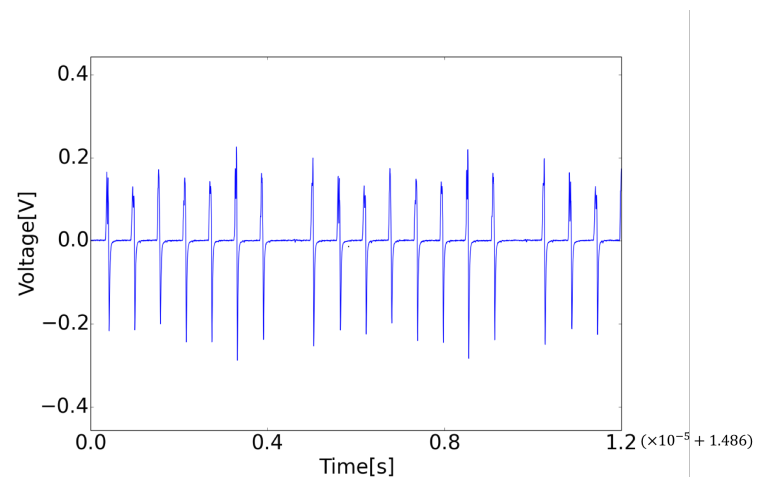


図 6.31: 16 電極モニターによって取得した P3 直前の 1 ターン分の信号

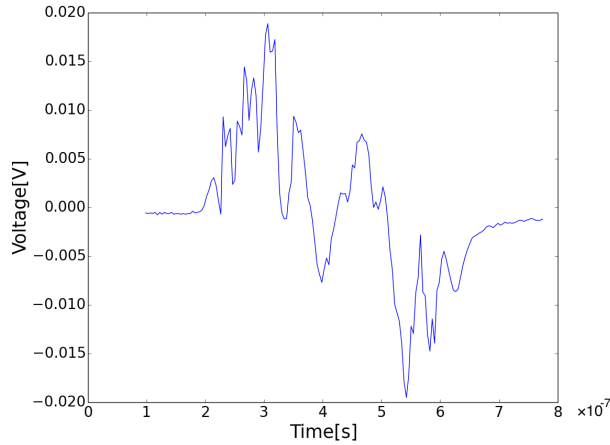


図 6.32: 16 電極モニターによる K3 直前の 1 バンチ分の信号

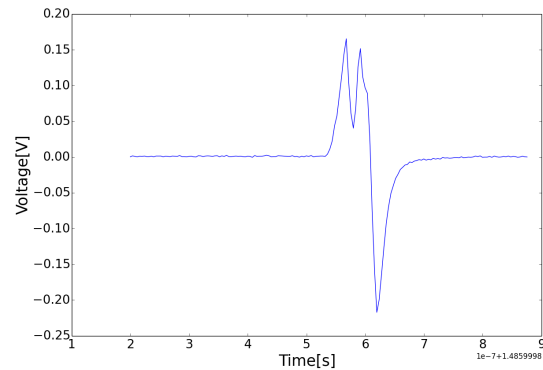


図 6.33: 16 電極モニターによる P3 直前の 1 バンチ分の信号

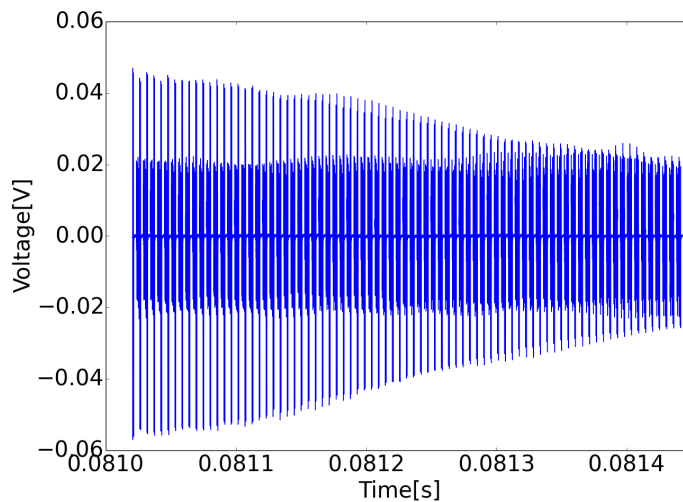


図 6.34: K3 直後の信号。一部拡大図。

信号の S/N 比は表 6.5 のようになった。12bit のオシロスコープとテーパードカップラー BPM で入射直後のビーム (4.5×10^{13} protons/8bunchs) を測定したときの S/N 比は 67.6 であった。S/N 比はバンチ内粒子数やデータ所得のタイミングによって変わるが、表 6.5 の 12 ビットの値はテーパードカップラー BPM の場合と比較して妥当であると考えられる。

信号をパルス (8 バンチ) 毎にフーリエ変換し、そのフーリエスペクトルの波高の最大値をその電極の信号として位置・四重極モーメントを算出したものを図 6.35~ 図 6.38 に示した。図 6.35、6.36

オシロスコープの分解能	K4 直後	P3 直前
12bit	57.8	159.3
8bit	9.37	16.2

表 6.5: 生データの S/N ratio。Signal の大きさは、1 ターンの peak to peak について 30turn 分 (1turn=9 バケツ) の平均を取った。Noise の大きさは 2.24 マイクロ秒のノイズ部分を 4 分割し、1 パートごとに peak to peak を出し 4 つの平均をとった。

は K3 直後、図 6.37、図 6.38 は P3 直前である。K3 直後の波形では K3 で入射した 2 バンチ毎に、P3 直後のデータでは 1 パルス毎にフーリエ変換を行った。図 6.35 の D_x 、 D_y では入射直後に比較的大きな信号が見られる。これは入射直後にビーム位置が振動することと一致している。また、 D_y 、 Q ではターンを重ねる毎に値が小さくなっていくのがわかる。この理由はわからないが、データの処理方法に問題が残っている。正しく D_x 、 D_y 、 Q を求めるためには、ワイヤーキャリブレーションの結果を用いて、まずは電極ごとの出力信号のばらつきを補正し、算出した双極子モーメントと 4 重極モーメントに感度係数かける必要がある。この補正を行った上で再度 D_y 、 Q の減少について議論する必要がある。この補正の方法については次章で述べる。

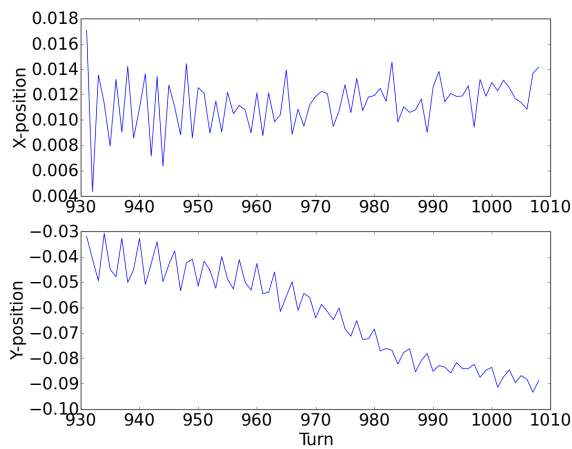


図 6.35: K3 直後のデータから算出した D_x 、 D_y

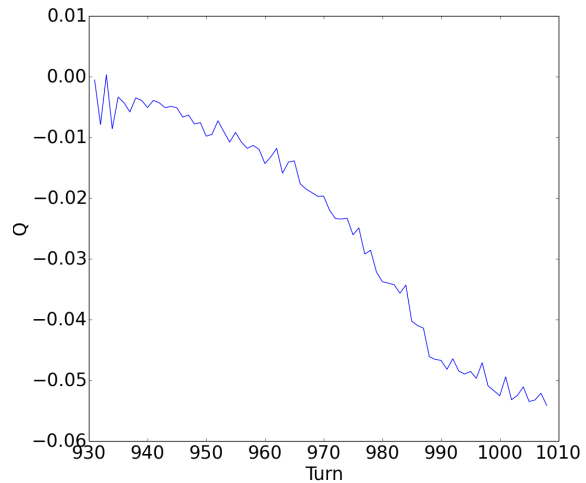


図 6.36: K3 直後のデータから算出した Q

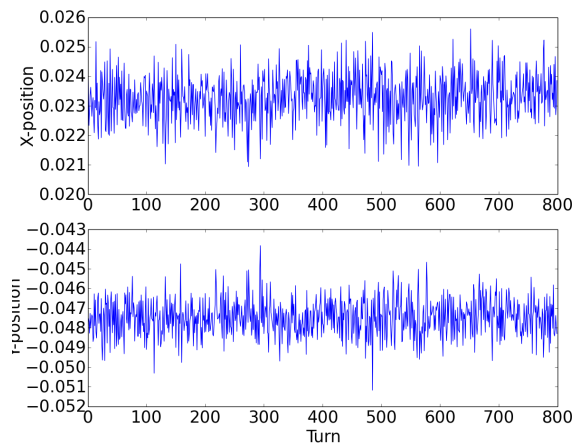


図 6.37: P3 直前のデータから算出した D_x 、 D_y

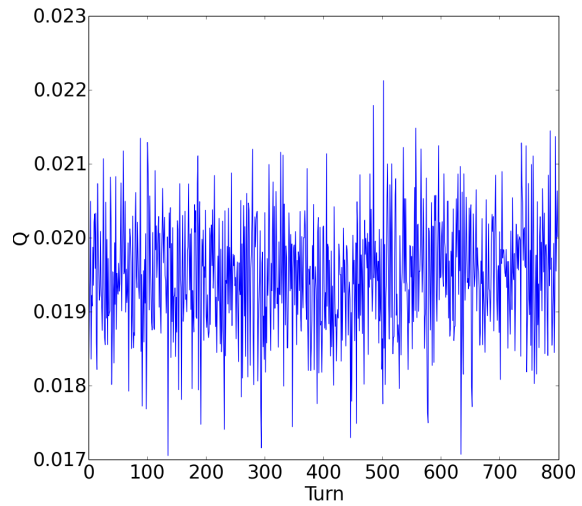


図 6.38: P3 直前のデータから算出した Q

6.8.2.1 4 重極モーメントの測定誤差の見積もり

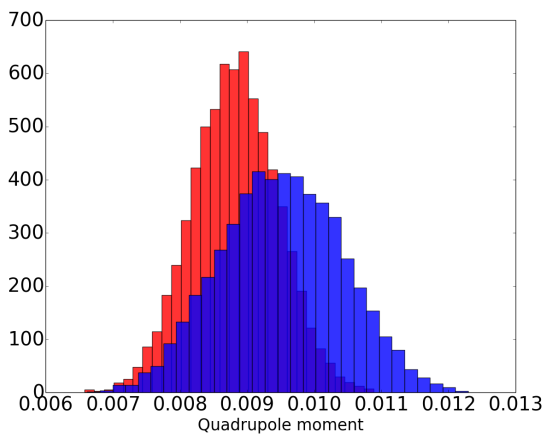


図 6.39: ビームサイズが x 方向 41mm、y 方向 39mm の場合の算出した四重極モーメントのヒストグラム。4 電極の場合が青、16 電極の場合が赤。

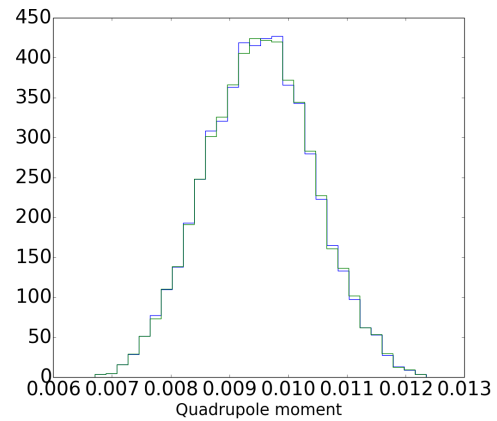


図 6.40: ビームサイズが x 方向 41mm、y 方向 39mm の場合に算出した四重極モーメントのヒストグラム。4 電極の場合が青、8 電極の場合が緑。

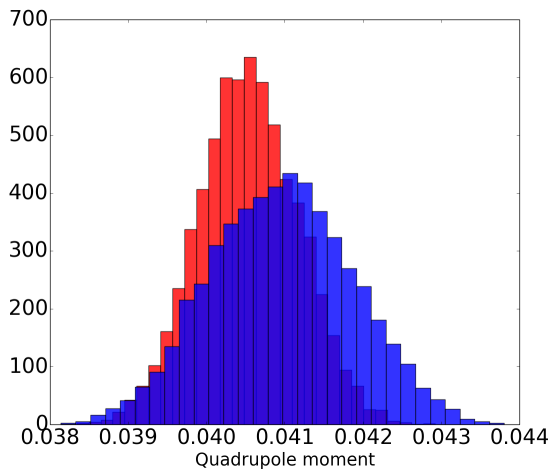


図 6.41: ビームサイズが x 方向 45mm、y 方向 35mm の場合に算出した四重極モーメントのヒストグラム。4 電極の場合が青、16 電極の場合が赤。

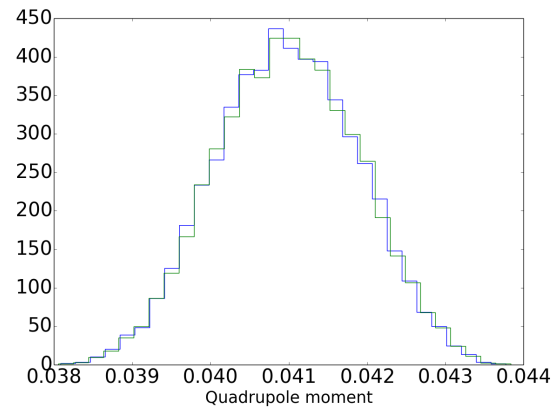


図 6.42: ビームサイズが x 方向 45mm、y 方向 35mm の場合に算出した四重極モーメントのヒストグラム。4 電極の場合が青、8 電極の場合が緑。

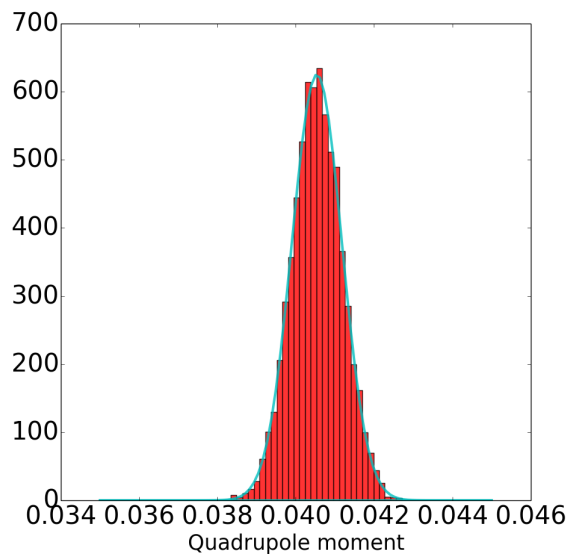


図 6.43: フィッティングの様子。緑線がフィッティング関数ガウシアンを表している。

電極幅 9.85mm、他の寸法はモニターの仕様と同様の垂直方向のモニター断面に対し、先述の境界要素法を用いて、電極上の誘導電荷密度を計算し、それを用いて電極の本数と誤差の関係を調べた。ビーム電荷は x、y 方向にガウシアン分布で、 $\sigma_x = 41\text{mm}$ 、 $\sigma_y = 39\text{mm}$ の場合と、 $\sigma_x = 45\text{mm}$ 、

電極数	(wx,wy)=(41,39)		(wx,wy)=(45,35)	
電極数	中心値	σ	中心値	σ
16	0.00881	0.00063	0.0405	0.00063
8	0.00952	0.00092	0.0409	0.00089
4	0.00952	0.00089	0.0409	0.00090

表 6.6: 電極の数と算出した 4 重極モーメントの平均値と標準偏差

$\sigma_y = 35\text{mm}$ の場合について計算した¹。また、要素数 4000 個で計算した。製作した 16 電極ビームモニターの P3 直前での S/N=159.3 であったので、境界要素法で求めた電極に誘導される電荷密度 σ を中心として、 $\sigma \pm \frac{\sigma}{159.3}$ の範囲でランダムに 100000 回振り、その都度 $Q_{normal} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cos 2\theta}{\sum_{i=1}^n V_i}$ の計算を行った。その結果をヒストグラムにしたものが図 6.39~6.42 である。さらにこれらのヒストグラムの中心値と σ を表 6.6 に載せた。電極数が 16 の場合は 4 の場合や 8 の場合に比べ中心値が負の方向へシフトしており、標準偏差はおよそ 30% 小さくなっている。電極数が 4 の場合と 8 の場合で中心値・標準偏差ともに差異がない。したがって、電極数が 4 のモニターと 8 のモニターでは、四重極モーメント測定に関して性能に差異がないことがわかる。

この算出した 4 重極モーメント Q は、ビーム重心が $(0, 0)$ であることから、 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ に比例していると近似できる。電極数が 16 の場合のビーム幅 $(wx,wy)=(41,39)$ (単位は mm) の比例係数は $K=55.1$ 、 $(wx,wy)=(45,35)$ (単位は mm) では $K=50.6$ であった。したがって、表 6.6 の σ を単位 m^2 に換算すると、 $(wx,wy)=(41,39)$ で $\sigma = 1.14 \times 10^{-5}[m^2]$ 、 $(wx,wy)=(45,35)$ で $\sigma = 1.24 \times 10^{-5}[m^2]$ となる。これらは要求性能として設定した $1.128 \times 10^{-4}[m^2]$ 以下である。

6.9 16 電極ピックアップに関するまとめ

ビームのサイズ測定、入射マッチング精度向上のために、ビームの多重極モーメントを測定できる 16 本の電極を取り付けたストリップライン型ピックアップを開発した。目標性能は $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の誤差 $1.128 \times 10^{-4}[m^2]$ 以下である。

数値計算の結果、4 電極のモニターに比べ、16 電極モニターは、位置測定の線形性に優れ、また算出した 4 重極モーメントに加わるオフセット（高次モーメントの効果）が小さくなり、誤差も小さくなることがわかった。また、4 重極モーメントの感度係数は $140.524[1/m^2]$ であることがわかった。

実際に製作した 16 電極モニターで位置感度測定・高周波帯域での感度測定・電極の特性インピーダンスの測定を行った。位置感度測定の結果、感度係数は $0.01186[1/\text{mm}]$ となった。

その後、MR 入射直後ヘインストールした。測定の結果設置位置が z 方向に回転していることが確

¹典型的なビームサイズが 40mm

認された。この校正方法について今後検討が必要である。

実際に16本の電極全てから信号が観測できることを確認した。簡易的に、陽子ビームでの測定データから、双極子モーメントと4重極モーメントを計算した。正確な計算には電極からの出力に対して次章で触れる補正を行う必要がある。

信号のS/Nから見積もった、算出した4重極モーメントの誤差が約 $1.2 \times 10^{-5} [m^2]$ で目標の誤差の範囲内であった。

第7章 今後の展望

本章では、16 電極ビームモニターの実用化に向けた課題と展望を述べる。

7.1 キャリブレーション

算出できる 4 重極モーメントは $Q = \frac{\sum_{i=1}^{16} g_i V_i \cos 2\theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i} = K_Q \times (\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + x_0^2 - y_0^2) +$ (高次モーメント) である。感度係数 K_Q がわかれば相対値としての 4 重極モーメントではなく、絶対値として算出できる。したがって、 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ を知るためには、位置 x_0 、 y_0 や高次モーメント、感度係数 K_Q 、電極ごとのゲインの比 g_i を考慮する必要がある。そのためのキャリブレーション方法をいかに述べる。まず、6.6.2 節で行ったワイヤーキャリブレーションにおける電極の出力信号は近似的に以下のようにあらわせる [64]。

$$\begin{aligned}
 V(R, \theta) &\simeq \frac{J_{wire}(R, \theta)}{\int_0^{2\pi} J_{wire}(R, \theta) d\theta} \\
 &= 1 + 2\frac{x_w}{R} \cos \theta + 2\frac{y_w}{R} \sin \theta \\
 &\quad + 2\frac{x_w^2 - y_w^2}{R^2} \cos 2\theta + 4\frac{x_w y_w}{R^2} \sin 2\theta \\
 &\quad + 2\frac{x_w^3 - 3x_w y_w^2}{R^3} \cos 3\theta + 2\frac{-3x_w^2 y_w + y_w^3}{R^3} \sin 3\theta \\
 &\quad + 2\frac{x_w^4 - 6x_w^2 y_w^2 + y_w^4}{R^4} \cos 4\theta + 8\frac{x_w^3 y_w - x_w y_w^3}{R^3} \sin 4\theta + \dots
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C} \begin{pmatrix} 1 \\ x_w \\ y_w \\ x_w^2 - y_w^2 \\ x_w y_w \\ x_w^3 - 3x_w y_w^2 \\ \dots \end{pmatrix} \tag{7.2}$$

したがって、各電極からの出力電圧 V_i は上記のように表せる。ただし、 C は $N \times M$ の行列、 N は電極数、 M は考慮するモーメントの次数、 V は 16 成分のベクトルである。ワイヤーキャリブレーションでのワイヤー配置位置 x_w 、 y_w と出力電圧 V_i から、97 個の式 7.2 がわかっている。このデータから C の各要素を求められる。求めた C を出力電圧 V に作用させる計算を下記の処理回路に含めて 4 重極モーメントを求める必要がある。

7.2 処理回路の製作

現在、16 電極モニターの信号取得にはオシロスコープを用いている。地上の J-PARC D1 電源棟に設置しているオシロスコープまでの信号処理は数 100m の同軸ケーブルを使用しており、同軸ケーブルが拾うノイズが S/N 劣化の原因の一つとなっている。そのため、アナログ信号を地下で処理しデジタル信号にすればノイズが削減できると考えられる。また、今回の測定ではオシロスコープでの 1 電極あたりのデータ量 250MS/s で 50ms のデータ、 $12.5\text{MS} \times 2\text{B} = 25\text{MB}$ であった。信号取得前に FPGA 等を用いてデジタル処理を行うことはデータ量削減の観点からも有意義である。また、デジタル化に加えて 4 重極モーメントの計算処理をおこなえばリアルタイムで 4 重極モーメントの測定をすることができ、ビームチューニングの際に役立つ。したがって前節でのべたキャリブレーションも含めて計算を自動処理できる回路の設計が今後の課題の一つである。第 6 章の結果から、処理回路の ADCbit 数は 12bit が望ましい。

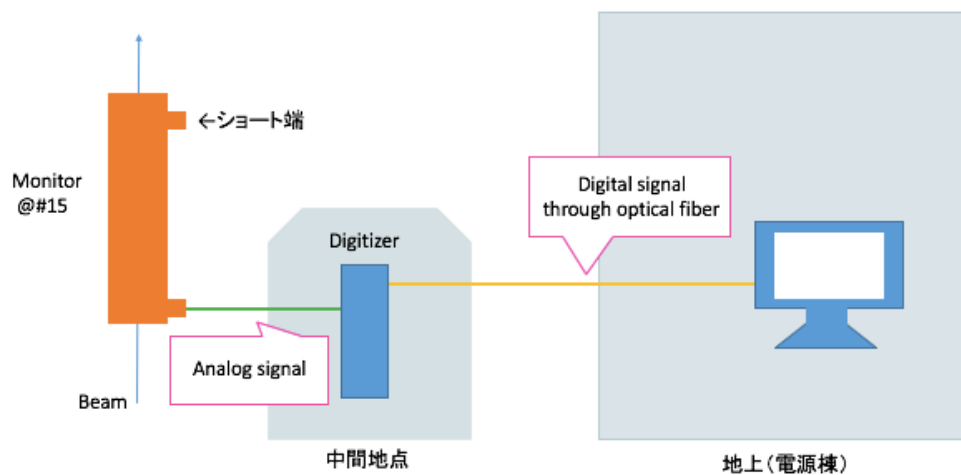


図 7.1: テータ取得の全体概念図

7.3 ビームテスト

今後のビーム試験で以下の測定に取り組みたい。

Beam Based Alignment

16 電極ビームモニターを位置測定に用いる場合、6.6 節に記した 16 電極モニター自体の性能に加えて、加速器中の設置位置が設計値と異なるため、算出位置にオフセットが加わる。モニター設置位置の誤差は、レーザートラッカーを用いた測量により、6.7 で述べた結果となった。さらに精度の良い測量には、Beam Based Alignment という方法が有効である。Beam Based Alignment とは、4 重極マグネットの磁場の大きさを変化させたときのビーム応答を観測し、4 重極マグネットの中心に対するモニター中心のずれを調べる方法である。磁場変化に対してビーム位置が変わらないとき、そのビームは 4 重極マグネットの中心を通っている。4 重極マグネットの中心とビーム位置 4 重極マグネットの中心とモニターの中心を関係づけることができ、モニターによる算出ビーム位置を 4 重極マグネットの座標に補正できる。

3BPM 法によるモニターの位置測定精度の見積もり

3BPM 法とは、3 台のモニターでビーム位置を観測し、モニターの測定精度を調べる方法である。実際のビームの測定誤差は電荷分布に広がりがあるため、ベンチテストでの見積もりには限界がある。そのため、ビームの信号を用いて誤差の測定を行う。しかし、ビームを何度も同じ状態にし多数回測定を行うことはできない。したがって、複数のモニターで同じビームを測定し、それらの信号を照らし合わせることで誤差を見積もる 3BPM 法が有効である。地点 1・地点 2 の位置 x と軌道の傾き x' の関係は、トランスファーマトリクス M_{12} 、 M_{23} を用いて以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_a^{(12)} & m_b^{(12)} \\ m_c^{(12)} & m_d^{(12)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = M_{12} \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

地点 2・地点 3 の位置と運動量の関係は、

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_a^{(23)} & m_b^{(23)} \\ m_c^{(23)} & m_d^{(23)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = M_{23} \begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

である。これを解くと

$$x_3 = -\frac{m_b^{(23)}}{m_b^{(12)}}x_1 + \frac{m_b^{(12)}m_a^{(23)} + m_b^{(23)}m_d^{(12)}}{m_b^{(12)}}x_2 \quad (7.5)$$

$$= Ax_1 + Bx_2 \quad (7.6)$$

ここで、係数を A,B に置き換えた。この $x_{1,2,3}$ の測定誤差、つまり 3 体の BPM の分解能 σ が同じであれば、N 回の測定結果 $(x_{1,n}, x_{2,n}, x_{3,n})$ ($n=1,2,\dots,N$) を用いて、

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{3,n} - (Ax_{1,n} + Bx_{2,n}))^2}{1 + A^2 + B^2}} \quad (7.7)$$

により分解能が求まる。今回の状況では、3BPM 法に用いられるモニターは 2 つの 4 電極 BPM と 16 電極ビームモニターであり、3 つのモニターの分解能が同じでない。4 電極 BPM の測定位置を (x_1, x'_1) 、 (x_2, x'_2) 、分解能を σ 、16 電極ビームモニターの測定位置を (x_3, x'_3) の分解能を $k\sigma$ とすると、

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_3 - (Ax_1 + Bx_2n))^2}{k^2 + A^2 + B^2}} \quad (7.8)$$

である。これにより、位置測定の精度が調べられる。

4 極キッカーによるビームの応答測定

4 電極 BPM で行った試験結果では測定項目が不十分であった。16 電極ビームモニターで再度測定を行いたい。詳細は 5.7 参照。

16 電極ピックアップによるビームの多重極モーメント応答測定

16 電極ピックアップではビームの 8 極モーメントまで測定可能である。多重極モーメント測定に取り組み、よりビームプロファイルに近い測定を行いたい。

7.4 まとめ

16 電極モニターの入射調整での実用化にむけた課題は以下の通りである。

まず、信号処理の観点から、取得した信号を 4 重極モーメント及びエミッタンスに換算するため、キャリブレーション結果を組み入れた 4 重極モーメントの導出を行う。さらに信号処理回路の製作をする。

次に、モニター自体の性能を評価するため、Beam based alignment でモニターと4極マグネットの位置関係を測定する。さらに3 BPM 法により製作したモニターの位置測定精度を調べる。

実用化が実現したのちは、入射調整時のビームの位置と4重極モーメントの測定に用いる。また、2台目の16電極ピックアップの開発、もしくは4電極BPMを2台用いてビームのサイズ・エミッタンス測定を行う。加えて、4極キッカーによるビーム応答測定、ビームの多重極モーメント測定に取り組む。

第8章 結論

T2K 実験ではニュートリノ振動現象の観測している。現在はレプトンセクターでの CP 対称性の破れを発見すべく、測定精度向上に取り組んでいる。特に、MR のビーム強度向上は T2K 実験にとって必須課題である。現在 MR は 750kW での運転に向け調整を行っている。大強度化に伴い問題となるビームロスを低減するため、ビームサイズの観測可能なモニターが必要である。大強度ビームに耐えうる非破壊型モニターとして、ピックアップモニターでのサイズ測定に着手した。既に位置モニターとして使用中の 4 電極の BPM で入射ミスマッチの観測を行った。その結果、入射ミスマッチ時のビームの 4 重極振動が観測された。また、4 重極モーメント測定の応用的試験として、4 極キッカーによるビーム応答を観測した。その結果、ビームが 4 極キッカーに反応し、4 重極モーメントの共鳴が引き起こされていることがわかった。この共鳴の大きさと、チューンスプレッドとの対応付けのため、シミュレーションによる数値計算や追測定をすることが今後の課題である。

既に使用中の 4 電極モニターでは、キャリブレーションのためのベンチテストを行っていないために絶対的なビームサイズの測定はできない。そこで新たにビームの 4 重極モーメント測定のためのピックアップモニターを開発した。開発したモニターは電極数が 16 本で電極を溝に埋め込んでいることを特徴とする。原理的に多電極のモニターでは多重極モーメントの測定が可能で、4 電極のモニターよりも 4 重極モーメントの測定精度が良いことがわかっている。数値計算の結果、電極数 4 本の場合と比較して電極数 16 本のモニターでは 4 重極モーメント測定の測定精度が向上し、オフセットとして乗る高次モーメントの寄与が小さいことが確認できた。また、位置測定にも適していることがわかった。製作後、モニターの特性評価のため、位置感度測定等を行った。その後 MR の入射直後ヘインストールした。16 本の電極全てから信号を読み出すことに成功した。今後はモニターの実用化に向けて信号の校正、処理回路の製作を行う予定である。

付録 A 用語説明

A.1 ハーモニックナンバー

粒子が加速器リングを周回しているとき、周期 T_0 として周回周波数は $f_0 = 1/T_0$ である。加速電場の位相 δ が $\delta = \delta_p$ のときに粒子がその加速電場の地点を通過するとする。粒子が通過する度に加速電場の周波数が同じ位相 δ_p であれば、加速し続けることができる。したがって、加速電場の周波数 f_{RF} は $f_{RF} = h \times f_0$ を満たせば良い。この整数 h がハーモニックナンバーである。つまり、 T_0 の間に同様に加速できるタイミングが h 回存在するということである。

A.2 トランジションエネルギー

粒子は、高周波電圧 $V(t) = V_0 \sin \omega t$ によって加速される。ある荷電粒子が加速空洞を通過する時の高周波電圧の位相を ϕ_s とする。粒子は上で述べたように $f_{RF} = h \times f_0$ を満たして周回しているため、一周回転した後の同地点の高周波電圧の位相は ϕ_s である。このような粒子を同期粒子と呼ぶ。実際のビームには多くの粒子が含まれており、位相にはばらつきがある。同期粒子が運動量 p_s で周長 C の周回軌道を運動しているとする。同期位相の付近の粒子は、運動量 $p_s + \Delta p$ を持ち、周長 $C + \Delta C$ を走るとする。運動量のずれと周長のずれは

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha_p \frac{\Delta p}{p} \quad (\text{A.1})$$

という関係で表せる。係数 α_p は momentum compaction factor と呼ばれ、加速器中の磁場により決まる量である。運動量は $p = m_0 \gamma \beta c$ で表せる。運動量のずれは $\Delta p = m_0 \beta c \Delta \gamma + m_0 \gamma c \Delta \beta$ である。

$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p}$ である。以上の関係式と $f = \frac{v}{C}$ から、周回周期と運動量のずれが関係づけられる。

$$\frac{\Delta T_{rev}}{T_{rev}} = -\frac{\Delta f_{rev}}{f_{rev}} \quad (\text{A.2})$$

$$= \frac{\Delta C_{rev}}{C_{rev}} - \frac{\Delta v_{rev}}{v_{rev}} \quad (\text{A.3})$$

$$= \left(\alpha_p - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p} \quad (\text{A.4})$$

$$= \eta \frac{\Delta p}{p} \quad (\text{A.5})$$

ここで、 η はスリッページと呼ばれる係数である。 $\eta > 0$ の時は $\Delta p > 0$ の粒子は同期粒子よりも遅く周回する。 $\eta < 0$ の時は $\Delta p > 0$ の粒子は同期粒子よりも速く周回する。このスリッページが 0 となる γ をトランジションエネルギーと呼ぶ。粒子のエネルギーが加速中トランジションエネルギーを通過すると、縦方向の収束力がゼロになりバンチ構造が失われる。そのためこのエネルギーを避けるように加速器の設計がなされる。[34]

A.3 フィラメンテーション

トランジションエネルギーの説明に引き続き、フィラメンテーションも縦方向の粒子の運動にまつわる現象である。フィラメンテーションの理解のため、まず RF によって縦方向の位相空間に作られるポテンシャルについて定性的に考える。[42] 定量的な議論は [34] を参照していただきたい。RF ポテンシャルが図 A.1 の上図のような場合、粒子は下図の位相空間で青線上を辿る。図 A.2 は $\phi_s = 0$ の場合である。下図の一番外側の青線がセパトロクスと呼ばれる RF バケツである。RF を印加するとこの RF バケツが生成され、バンチ化が実現する。

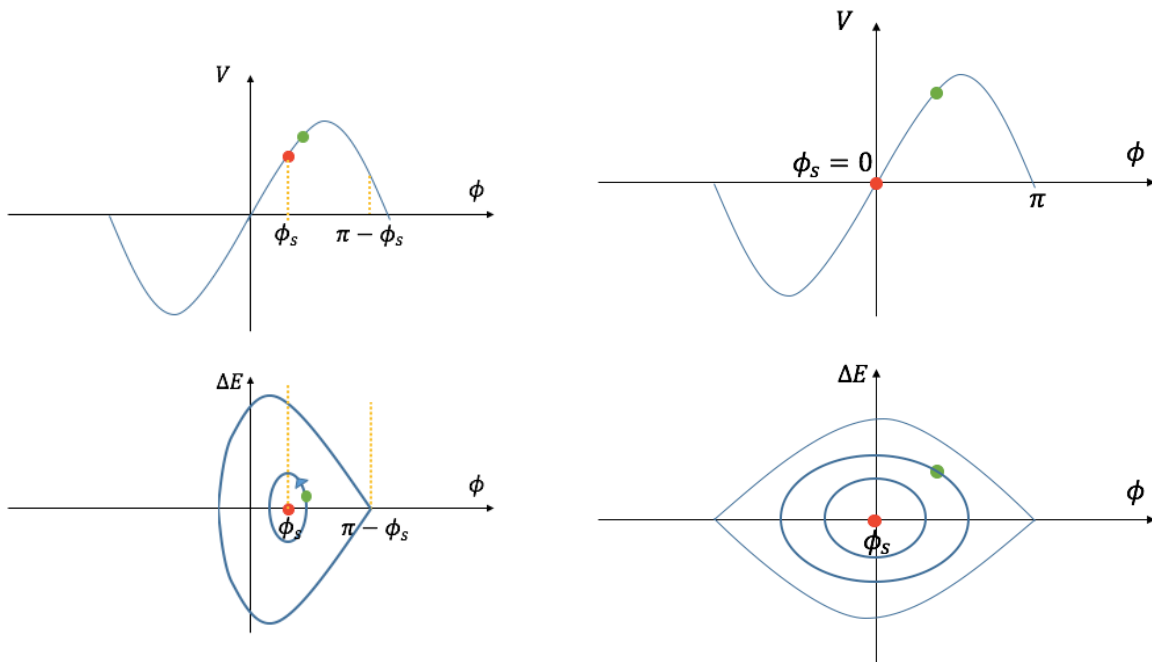


図 A.1: RF ポテンシャル中の粒子の運動の概念図。 図 A.2: RF ポテンシャル中の粒子の運動の概念図。
 $\phi_s = 0$ の場合。

この位相空間上で粒子が図 A.3 の黄丸 1 の粒子は黄丸 2、黄丸 3、黄丸 4 という軌道を進る。バンチの重心の位相は phase 方向への射影なので、位置の振動がみられる。また、粒子の位相空間上の分布が図 A.4 の場合、黄色の楕円で示された動きをする。phase 方向への影をすると 4 重極振動として観測されることがわかる。入射時に位相空間上でのバケツとマッチしていると、図 A.5 のようにバンチの振動は観測されない。

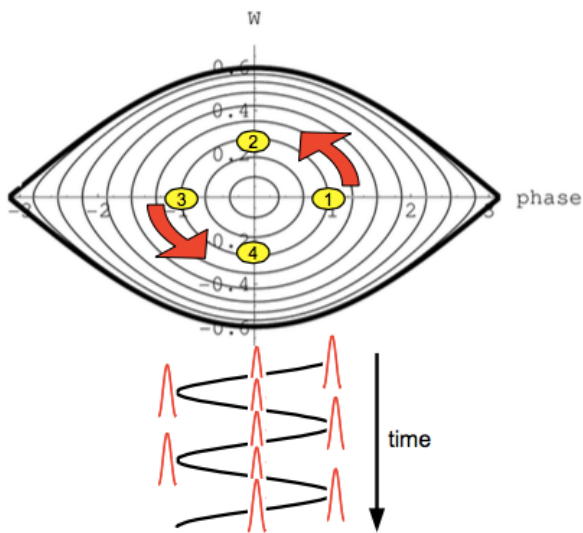


図 A.3: 位相空間上のダイポール振動の概念図。
[34] より転載。

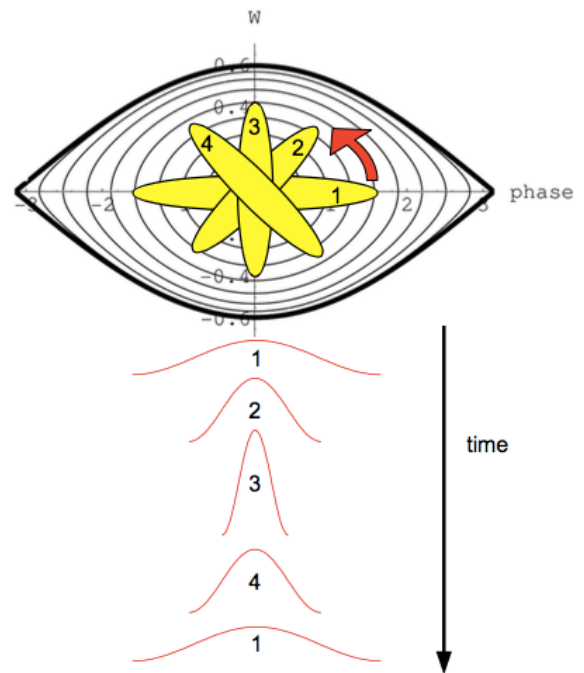


図 A.4: 位相空間上の4重極振動の概念図。
[34] より転載。

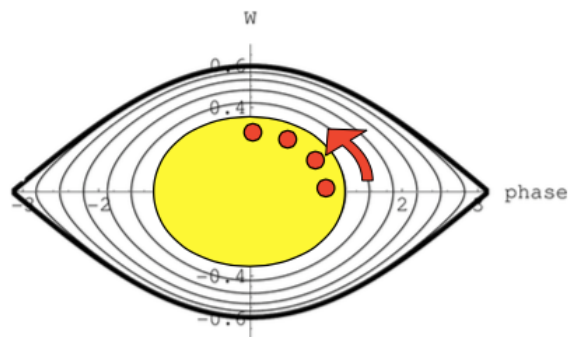


図 A.5: 位相空間上の入射マッチングの概念図。 [34] より転載。

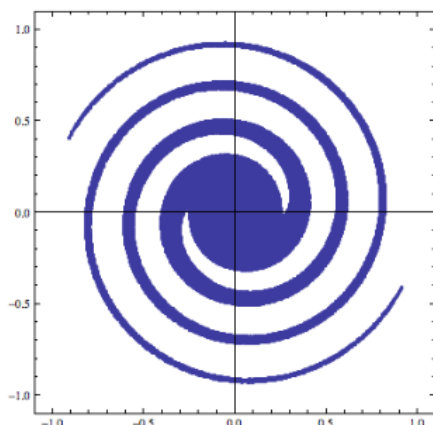


図 A.6: 位相空間上のフィラメンテーションの図。外山氏のスライドより転載。

図 A.4 の場合は、フィラメンテーションという現象がおきる。振幅の大きい粒子は回転運動が遅く、図 A.6 のように位相空間上で渦を巻き、6.32 のように観測される。

A.4 速い取り出し・遅い取り出し

J-PARC MR では、加速後の陽子の利用方法に応じて、2種類の陽子ビームの取り出し方法を使い分けている。ニュートリノ実験施設へは速い取り出しモード (Fast eXtraction mode, FX) で、ハドロン実験施設へは遅い取り出しモード (Slow eXtraction mode, SX) でビームを出力している。ハドロン実験施設での実験では、二次粒子 1 つ 1 つについて、粒子識別や運動量測定を行う。この測定に用いる検出器の動作限界は 10MHz 程度であり、その検出限界を超えると測定効率が落ち、ワイヤーチェンバーなどの場合は破壊されることもありうる。そのため、ハドロン実験施設へは MR 中で陽子ビームが一周する間に取り出してしまうのではなく、取り出しに約 2 秒かけた SX mode を採用している。一方で、ニュートリノ実験施設では陽子ビームを検出困難なニュートリノの生成に用いているため、単位時間あたりの取り出し陽子数をできるだけ増やすという要請がある。そのため、30GeV 加速後の 8 バンチ陽子ビームを約 $5\mu s$ の間に取り出す FX mode を採用している。遅い取り出しモードでは、まずバンブ電磁石によりビームを横水平方向に移動する。次に共鳴 6 極電磁石でベータトロン振動の安定領域を狭め、不安定領域に入った粒子の振動振幅を増大させる。横水平方向に広がったビームの端を静電セプタムによって削りとり、さらにセプタム電磁石で軌道を曲げ、ハドロン施設へと輸送する。[61]

A.5 多重入射

J-PARC RCS では多重入射方式で大電流ビームを生成する。多重入射において、イオン源から入射される粒子とリング周回中の粒子は、入射前の位置・運動量（位相空間の初期座標）が異なるため、入射後電磁石で軌道を揃える必要がある。入射前後で粒子の電荷が同じであると、電磁石によって受ける力も同じであるため入射後に軌道を揃えることができない。他方、電荷が逆符号を持つ場合、電磁石による力も反対方向で、入射前に位相空間座標が異なっていたものを同一にすることができる。

A.6 Closed Orbit Distortion/ベータトロン振動

円形加速器では、磁場が設計値通りであれば、粒子はエネルギーに応じてある一定の閉軌道（Closed Orbit）を周回する。現実には誤差があり、閉軌道からのずれ（Closed Orbit Distortion）が存在する。閉軌道の周りを振動することをベータトロン振動と呼ぶ。

A.7 共鳴線

実際の加速器では偏向磁石や4極電磁石の作る磁場に誤差がある。粒子のチューンが整数の場合、図 A.7 のように磁場に誤差のある地点を通るとターン毎に同じ影響を受ける。振動振幅が増大しつづけて、ビームロスに繋がる。チューンが半整数の場合も同様である。半整数共鳴の様子を図 A.8 に示した。

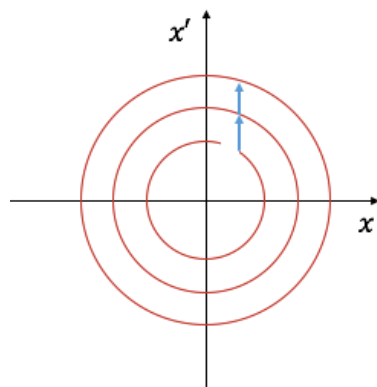


図 A.7: 位相空間上の整数共鳴の様子。

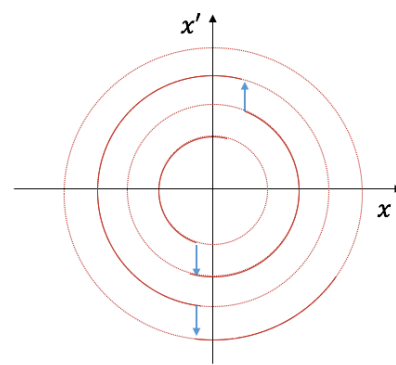


図 A.8: 位相空間上の半整数共鳴の様子。

ビームのチューン分布はチューンダイアグラムと呼ばれる ν_x 、 ν_y の図で表されることが一般的である。チューンスプレッドが整数・半整数共鳴の条件 $\nu_{x,y} = n$ 、 $\nu_{x,y} = n/2$ にかからないように調整されている。また、非線形磁場が存在すると、

$$k\nu_x + l\nu_y = n \quad (\text{A.6})$$

の条件で共鳴を引き起こす。これらの共鳴条件をチューンスプレッド上で表した線が共鳴線である。

付録B 4極キッカーによるビームの共鳴

式 4.1 の Hill の方程式では外力 $K(s)$ の項のみ考慮した。実際には、荷電粒子自身が作り出す空間電荷力も考慮しなければならない。K-V 分布¹で縦軸方向に円筒状で一様な場合を仮定する。空間電荷力は位置に比例するため、

$$x'' + \left(K_x(s) - \frac{2K_{sc}}{a(a+b)} \right) x = 0 \quad (\text{B.1})$$

と表せる [41]。ここでビームが横方向に x 方向 a 、 y 方向 b の楕円形を仮定した。Floquet 変換により、 $x = w_x e^{i\psi(s)}$ と変換すると、

$$w_x'' + \left(K_x - \frac{2K_{sc}}{a(a+b)} \right) w_x - \frac{1}{w_x^3} = 0 \quad (\text{B.2})$$

というエンベロップ方程式が導かれる。ここで $\psi_x'' = \frac{1}{w_x^2}$ を用いた。第 5 章で測定をした 4 重極モーメントの共鳴は、エンベロップがキッカーによる外力 $f_{kick}x$ により共振している現象であると考えられる。式 B.1 にキッカーによる外力を加えて解くことでキッカーによる共振周波数が得られる。

¹K-V 分布とは、ビームの電荷分布が一様であること。

付録C 要求性能

要求性能の導出方法を記述する。beta 関数の値は他のモニターで 5%の精度で測定されている。beta 関数の測定によって Q の測定に制限がかかる。

$$Q = \sigma_x^2 - \sigma_y^2 \quad (\text{C.1})$$

$$= \epsilon_x \beta_x - \epsilon_y \beta_y \quad (\text{C.2})$$

誤差の伝播式より、

$$\sigma_Q^2 = \epsilon_x^2 \sigma_{\beta_x}^2 + \epsilon_y^2 \sigma_{\beta_y}^2 \quad (\text{C.3})$$

$$= \epsilon_x^2 (\beta_x \times 0.05)^2 + \epsilon_y^2 (\beta_y \times 0.05)^2 \quad (\text{C.4})$$

典型的なビームサイズは 40mm であることから、 $\sqrt{\epsilon_x \beta_x} \sim \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \sim 40\text{mm}$ とすると、 $\sigma_Q = 0.04^2 \times 0.05 \times \sqrt{2} = 1.128 \times 10^{-4} [1/m^2]$ がベータ関数測定時の誤差による Q の精度の制限となることがわかる。したがってこの値以下の精度はピックアップモニターに必要ないと考えられる。

付録D 電極数による双極子モーメントと4重極モーメントの高次項成分について

Dipole moment は

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \cos \theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$$

で、

$$4 \text{ 本} : D_x = \frac{2a_1 + 2a_3 + 2a_5 + 2a_7 + 2a_9 + 2a_{11} + 2a_{13} + 2a_{15} + \dots}{4a_0 + 4a_4 + 4a_8 + 4a_{12} + 4a_{16} \dots}$$

$$8 \text{ 本} : D_x = \frac{4a_1 + 4a_7 + 4a_9 + 4a_{15} + 4a_{17} \dots}{8a_0 + 8a_8 + 8a_{16} \dots}$$

$$16 \text{ 本} : D_x = \frac{8a_3 + 8a_{15} + 8a_{17} + \dots}{16a_0 + 16a_{16} + \dots}$$

Sextupole moment は

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{16} V_i \cos 3\theta}{\sum_{i=1}^{16} V_i}$$

で、

$$4 \text{ 本} : S = \frac{2a_1 + 2a_3 + 2a_5 + 2a_7 + 2a_9 + 2a_{11} + 2a_{13} + 2a_{15} + \dots}{4a_0 + 4a_4 + 4a_8 + 4a_{12} + 4a_{16} \dots}$$

$$8 \text{ 本} : S = \frac{4a_3 + 4a_5 + 4a_{11} + 4a_{13} + \dots}{8a_0 + 8a_8 + 8a_{16} \dots}$$

$$16 \text{ 本} : S = \frac{8a_3 + 8a_{13} + 8a_{19} + \dots}{16a_0 + 16a_{16} + \dots}$$

付録E Sパラメータ

2つのポートを持つ回路について考える。図E.1のようにそれぞれのポートからの入射波と反射波を $V_{1,2in,out}$ とする。このとき書きポートにつながる回路（伝送線路）の特性インピーダンスを Z_0 とすると、

$$\begin{aligned} a_1 &= V_{1,in}/\sqrt{Z_0} = I_{1,in}\sqrt{Z_0} \\ b_1 &= V_{1,out}/\sqrt{Z_0} = I_{1,out}\sqrt{Z_0} \\ a_2 &= V_{2,in}/\sqrt{Z_0} = I_{2,in}\sqrt{Z_0} \\ b_2 &= V_{2,out}/\sqrt{Z_0} = I_{2,out}\sqrt{Z_0} \end{aligned}$$

である。このとき、Sパラメータは以下のように定義される。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

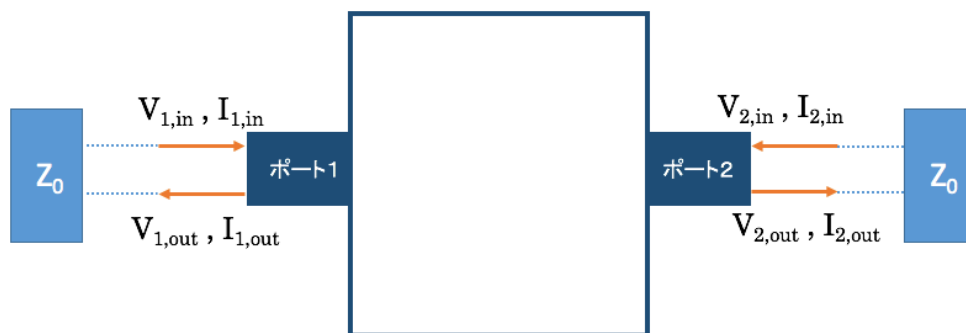


図 E.1: 2つのポートを持つ回路

付録F 境界要素法

F.1 境界要素法とは

境界要素法とは、図 F.1 のように Poisson 方程式に課されている境界条件の境界を小さな線要素に分割することで、境界上の積分を和に直して数値計算をする数値解析手法である。

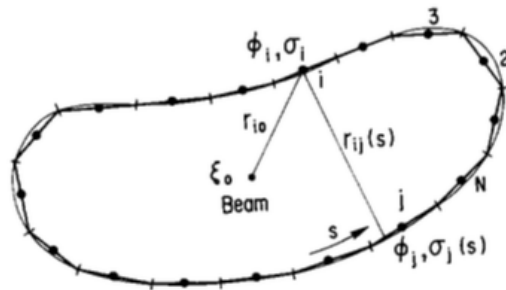


図 F.1: 境界要素法での要素分割 [55]。

境界要素法の要素数を M とする。 i 番目の要素のポテンシャルは

$$\phi_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{s_j} G_{ij} \xi_j ds_j + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} G_{i0} \xi_0 \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (\text{F.1})$$

とかける。ここで ξ_0 はビームの線電荷密度分布、 ξ_j は要素 j に誘導される線電荷密度分布、 s_j は j 番目の要素の位置を表す。第一項の積分は j 番目の要素の端から端までを積分範囲とする。 G_{ij}, G_{i0} は以下のようなグリーン関数である。

$$G_{ij} = \ln 1/r_{ij} \quad (\text{F.2})$$

$$G_{i0} = \ln \frac{1}{r_{i0}} \quad (\text{F.3})$$

G の積分について、要素が十分多い場合、積分範囲において被積分関数は定数と近似できる。この

近似を式 F.1 の第一項に適用すると

$$\phi_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \xi_j \int_{S_j} G_{ij} ds_j + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} G_{i0} \xi_j \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (\text{F.4})$$

ビームパイプ表面でのポテンシャル $\phi_i = 0$ という境界条件のもとで、要素 j に誘導される電荷量 q_j を求めることができる。

F.2 境界要素法による特性インピーダンスとビームカップリング係数の導出

$$\phi_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} G_{ij} q_j + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} G_{i0} \xi_j \quad (\text{F.5})$$

G_{ij} は $M \times M$ 行列 G の i 行 j 列の要素, G_{i0} は要素数 M のベクトル G_0 の要素である。

式 F.5 を行列やベクトル表示すると各要素における静電ポテンシャルは

$$2\pi\epsilon_0 \phi = Gq + G_0 \xi_0 \quad (\text{F.6})$$

行列 G の逆行列を左から作用すれば

$$q = 2\pi\epsilon_0 G^{-1} \phi - G^{-1} G_0 \xi_0 \quad (\text{F.7})$$

電極 $n(n=1, \dots, N)$ に誘導される、単位長さあたりの全電荷量を σ_n とおくと

$$\begin{aligned}
 \sigma_n &= \sum_{i \in n} q_i \\
 &= \sum_{i \in n} (2\pi\epsilon_0 G^{-1}\phi - G^{-1}\mathbf{G}_0\xi_0) \\
 &= \sum_{i \in n} (2\pi\epsilon_0 \sum_{j=1}^M (G^{-1})_{ij}\phi_j - \sum_{j=0}^M (G^{-1})_{ij}G_{j0}\xi_0) \\
 &= \sum_{i \in n} (2\pi\epsilon_0 \sum_{m=1}^N \sum_{j \in m} (G^{-1})_{ij}\phi_j - \sum_{j=0}^M (G^{-1})_{ij}G_{j0}\xi_0) \\
 &\quad (\because \phi = 0 \text{ on the pipe surface}) \\
 &= 2\pi\epsilon_0 \sum_{m=1}^N \sum_{i \in n} \sum_{j \in m} (G_{ij}^{-1}V_m) - \sum_{i \in n} \sum_{j=0}^M (G^{-1})_{ij}G_{j0}\xi_0 \\
 &\quad (\because \phi_j = \phi_l = V_m \text{ on } j, l \in m)
 \end{aligned}$$

m は電極の番号である。ここで

$$C_{nm} = 2\pi\epsilon_0 \sum_{i \in n} \sum_{j \in m} G_{ij}^{-1} \quad (\text{F.8})$$

$$C_{n0} = \sum_{i \in n} \sum_{j=0}^M (G^{-1})_{ij}G_{j0} \quad (\text{F.9})$$

とすると、電極上の誘導電荷は以下のように表される。

$$\sigma_n = \sum_{m=1}^N C_{nm}V_m - C_{n0}\xi_0$$

ゆえにビームの電荷と導体に誘導される電圧の関係式は式 F.10 のようになる。(C_0 は C_{n0} を要素にもつ N 行のベクトル)

$$\mathbf{V} = C^{-1}\boldsymbol{\sigma} + C^{-1}\mathbf{C}_0\xi_0 \quad (\text{F.10})$$

付録G 16電極ビームモニターの試作機について

加速器にインストールする実機の製作に先駆け、大気中で性能をテストするための試作機を製作していた。この試作機の特徴は、(1) ネジ切りされた棒によって電極が支えられていること(2) 電極間カップリングの影響を見るために電極を溝から出してより中心に近ずけた状態で電極を固定できるよう、電極をささせる棒が溝から飛び出している。(2) 上下流どちらからも信号読み出しできる仕様になっていること(実機とは違いショートターミネートされていない。)(3) 電極の幅が実機と異なる(境界要素法の計算を間違えており、特性インピーダンスおよそ52オームの設計になっていた。)(4) 電極の中間地点の位置にも電極をささせる穴が開いており、ボタン電極をつけられる設計になっている。この試作機での試験はさらなる活用法があるはずである。ボタン電極での性能をテストしたり、ストリップライン以外の形状の電極を埋め込んでみる¹などが考えられる。また、このモニターについて三次元有限要素法を用いた周波数特性の計算を行った。その結果は次のものである。ビーム電流の最大値40A、バンチ幅200ns($\sim 10^{13}$ ppb)を仮定した。

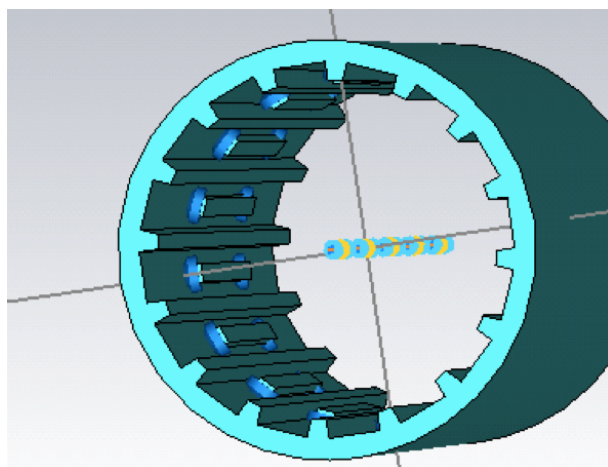


図 G.1: CST のシミュレーションのイメージ

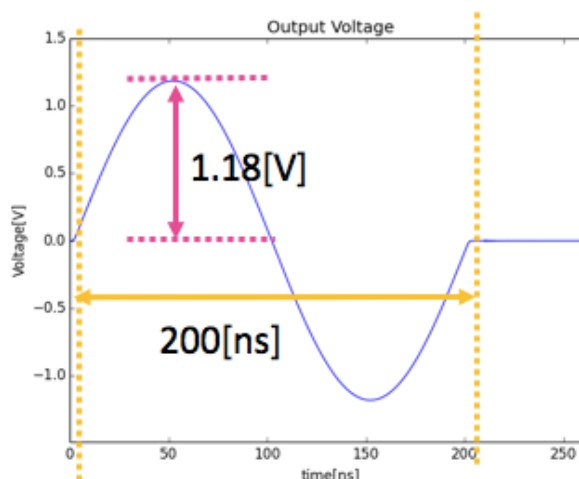


図 G.2: CST で計算した信号波形

¹現在テーパード型のを検討中

謝辞

修士課程の2年間を支えてくださった皆様に深く感謝申し上げます。

まず、J-PARCでの研究の機会、学会での発表の機会など、様々な経験をさせてくださった中家さんに心よりお礼申し上げます。おかげさまでたくさんの経験ができ、濃密な2年間をすごすことができました。進路について悩んだ時いつも真摯に相談にのってくださり、お知り合いや本を紹介してくださったことも感謝しております。この研究室での2年間が有意義な時間になったのは中家さんというすばらしい教授に出会えたからだと思います。ありがとうございました。

市川さんには、研究についてのアドバイスを多くいただきました。また、私の今後を真剣に慮っていただき、ためになる漫画やユニークな生き物図鑑を差し入れていただいたこと、深く感謝しております。いただいた本は生涯大切にする所存です。東海村では、研究面だけでなく生活面も気にかけていただき、ありがとうございました。

また、J-PARCでの研究の場を与えていただいた小関さんにもお世話になりました。時折かけてくださるお言葉が研究の励みになりました。

加速器研究を始めるにあたり、ゼロから丁寧に指導をしてくださった外山さんには、頭が下がる思いでいっぱいです。研究に対する姿勢も学ばせていただきました。大変な時にいつもポジティブな激励をしていただいたおかげで数々の局面を乗り越えられました。心から感謝申し上げます。ビームモニターのプロフェッショナルである外山さんのもとで研究をさせていただけたことを誇りに思います。

J-PARCの研究者の皆様、温かく見守り、応援していただき、ありがとうございました。特にモニターグループの岡田さん、久保木さんには研究面で世話になりました。

モニターの製作をくださった清和製作所の皆様、株式会社トヤマの皆様にも深く御礼申し上げます。

研究室の林さん、京都大学の事務室の皆様、J-PARCのドミトリーの職員の方々、警備員の方々、J-PARC ユーザーズオフィスの皆様、CCRの秘書の皆様にもお世話になりました。いつも温かいお言葉をかけていただき、ありがとうございました。

研究や東海村での生活を支えてくださった仲村さんには、たくさんご迷惑をかけてしまいました。手が焼ける後輩だったと思います。東海村での研究を始めた時から、修士論文を書き終える今日まで、いい時も悪い時も、一貫して面倒をみてくださいました。研究面でたくさんのアドバイスをい

ただき、ミューモンの作業では何もわからない私に一から教えてくださりました。休日には慣れない東海村での生活を気遣って茨城観光に連れて行ってくださいました。思い出を書きだすときりありませんが本当にありがとうございました。東海村でお世話になった古賀さん、林野さん、金さん、細見さん、竹馬さん、原田くん、宇野くんもありがとうございました。

京大高エネスタッフ・先輩後輩の皆さんもありがとうございました。特にばんさんには謝辞に名前を載せるという交換条件があったとはいえ、修士論文の製本を全面的に手伝っていただきましたこと心よりお礼申し上げます。

また、研究室の同期の皆さんのおかげで、京都でたくさんのいい思い出ができました。皆で過ごした時間は最高に楽しかったです。

最後に、2年間支えてくれた家族・親族のみなさん、そして大切な友人たちに感謝の意を表して、御礼の言葉を締めくくらせていただきます。

皆様本当にありがとうございました。

目 次

1.1	K2K 実験の最終結果 [7]	10
1.2	オペラ実験にて初めて観測されたタウニュートリノ出現事象 [8]	10
1.3	質量階層性 [18]	12
2.1	T2K 実験のニュートリノビーム	13
2.2	実験施設の位置	13
2.3	ニュートリノビーム生成過程	14
2.4	off-axis の概略図	14
2.5	π 中間子の運動量とニュートリノエネルギーの関係	15
2.6	off-axis angle=0.0°, 2.5°, 3.0° におけるニュートリノエネルギー [21]	15
2.7	off-axis 検出器:ND280	16
2.8	SK の概略図	17
2.9	スーパーカミオカンデでの μ イベント (シミュレーション) による明瞭なリング	18
2.10	スーパーカミオカンデでの電子イベント (シミュレーション) による不明瞭なリング	18
2.11	MUMON の概略図 (左が上流)	19
2.12	MUMON の Si 検出器で観測したビームプロファイル	19
2.13	INGRID 概略図。	20
2.14	INGRID モジュールの構造	20
2.15	INGRID によるビームプロファイルの観測	20
2.16	on-axis 前置検出器と off-axis 前置検出器の配置の概略図	20
2.17	$\delta_{CP} = -\pi/2, 0, +\pi/2, \pi$ について、順階層・逆階層それぞれの場合の SK で観測を期待される事象数と T2K の Run1-7c (2016 年夏までの全データ) で実際に観測された事象数。期待される事象数は、 $\sin^2 \theta_{13} = 0.0217$, $\sin^2 \theta_{23} = 0.528$, $\Delta m_{32}^2 (\Delta m_{13}^2) = 2.509 \times 10^{-3} eV^2/c^4$, $\sin^2 \theta_{12} = 0.846$, $\Delta m_{21}^2 = 7.53 \times 10^{-5} eV^2/c^4$ と仮定したもの。	21

2.18	T2K 実験のデータから明らかになった Δm_{32}^2 - $\sin^2 \theta_{23}$ 領域における最尤推定点 (黒点))と信頼領域 (黒線)。比較のため、IceCube(黄 線), NO ν A(緑線), MINOS+ (赤線), Super-K (青線) の結果が示されている。	22
2.19	T2K 実験のデータから明らかになった δ_{CP} の $\Delta\chi^2$ の分布。原子炉実験で得られた $\sin^2 \theta_{13}$ を用いて制限をつけている。 Feldman- Cousins 法を用いて得られた 90%信頼領域 (青) と 2σ 信頼領域 (黄) も示した。	22
2.20	δ_{CP} - $\sin^2 \theta_{13}$ 領域における最尤推定点 (点) と信頼領域 (線)。順階層の場合 (黒) と 逆階層の場合 (赤) を分けて示している。左図は T2K のデータのみを用いた結果で、 黄色の影は原子炉実験の結果 $\sin^2 \theta_{13} = 0.085 \pm 0.005$ を表している。右図は T2K の データに原子炉実験の結果を含めた値である。	22
2.21	MR のビーム強度と POT の向上計画	23
2.22	Δm_{32}^2 と $\sin^2 \theta_{23}$ の 90% C.L. の感度。 $\sin^2 \theta_{23} = 0.43$ を仮定している。橙線は T2K Phase 2 の最大積算データ量 20×10^{21} POT で、取得データのうち有効な統計データ を 50% 増やすよう改善したと仮定したものである。	24
2.23	T2K Phase 2 の δ_{CP} 感度。順階層を仮定している。 $\sin^2 \theta_{23}$ (0.43, 0.5, 0.63) の場合 の示している。左図は質量順序が決まった場合。右図は質量順序が決まっていな いままの場合。	24
3.1	J-PARC 施設	25
3.2	J-PARC の施設概略図	25
3.3	ビーム電流とエネルギーについての J-PARC 加速器と他の加速器との比較	26
3.4	J-PARC で生成されている二次粒子の概念図 [28]	26
3.5	2016 秋までの MR ビームパワーの推移 [29]	26
3.6	J-PARC Linac DTL の様子 [30]	27
3.7	J-PARC Linac の構成図	27
3.8	Linac から RCS へ入射する際のバンチ形成の仕組み [28]	28
3.9	RCS	30
3.10	RCS から MR へ入射する際のバンチ形成の仕組み [28]	30
3.11	MR トンネル内構造 [33]	31

付録 G	16 電極ビームモニターの試作機について	121
3.12	MR のバンチ構造 [33]	31
3.13	2016 秋以降の MR ビームパワー [36]	33
3.14	繰り返し周期の説明	33
3.15	共鳴線とチューンスプレッドの関係 [29]。実線は 3 次共鳴線で、点線は半整数及び線形結合共鳴線である。380kW における空間電荷効果によるチューンスプレッドの広がりを黒塗で表している。赤点はベータトロンチューン (22.40,20.75)、青点は (21.35,21.43) に対応している。	34
4.1	位相空間上のビーム	39
4.2	入射ミスマッチがない場合と位置・4 重極モーメントのミスマッチがある場合の、ビームのプロファイルの概念図。ターン毎に同じ位置で観測したビームを表している。	41
4.3	入射直後の BPM で観測された入射ミスマッチのベータトロン振動の大きさ [mm]。左 2 つが x 方向のベータトロン振動の振幅、右 2 つが y 方向のベータトロン振動の振幅を示す。	42
5.1	ストリップライン型 BPM の信号読み出しの概念図	45
5.2	電極の番号付け	48
5.3	測定装置付近のトンネル内地図。図 3.11 の左側を拡大したもの。	50
5.4	テーパードカプラー型 BPM。2016 年秋にインストールしたもの。実験で使用したものと同様の設計である。	50
5.5	測定装置のセットアップの概念図	51
5.6	ビーム入射直後の信号	51
5.7	ビーム入射直後の 1 バンチ目の各電極からの出力信号。	52
5.8	ビーム入射直後の 1 バンチ目の信号をフーリエ変換したスペクトル	53
5.9	ミスマッチの状態に入射したビームの入射直後の 4 重極モーメントの振動の様子	53
5.10	入射マッチングの状態に入射したビームの入射直後の 4 重極モーメントの振動の様子	53
5.11	ミスマッチの状態に入射したビームの入射直後の $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の振動の様子	54
5.12	入射マッチングの状態に入射したビームの入射直後の $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の振動の様子	54

5.13 チューンスプレッドのシミュレーション結果。今回の測定の条件下での計算ではない。 [60]	55
5.14 ダイポールキッカーの概念図。	56
5.15 4 極キッカーの概念図。	56
5.16 4 極キッカーの写真。水平方向に飛び出しているケーブルは、パイプの中の水平方向 に取り付けられたストリップラインキッカーの電極へとつながっている。	57
5.17 4 極キッカーにより作った共鳴線（青線・黄線）	58
5.18 測定のセットアップ概念図	59
5.19 4 極キッカーのセットアップの概念図。	59
5.20 測定中のビームロス。線が重なっているが、橙線がキッカーでビームを蹴った時、青 線がキッカーをオフにし、蹴らずに周回させた場合である。	61
5.21 Qkicker によるビーム応答、ターン毎の 4 重極モーメントのフーリエスペクトル	62
5.22 キックしない状態でのビーム応答。ターン毎の 4 重極モーメントのフーリエスペクト ル。	63
5.23 4 重極振動応答の大きさ	64
5.24 4 重極振動応答の大きさ。赤が粒子数 $0.99(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、青が $1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、 緑が $1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$ に対応している。	64
5.25 4 重極振動応答の大きさとベータトロンチューンの関係。赤が粒子数 $0.99(\pm 0.01) \times$ 10^{13} 、青が $1.28(\pm 0.01) \times 10^{13}$ 、緑が $1.39(\pm 0.02) \times 10^{13}$ に対応している。	65
6.1 電極数が 4（青）の場合と 16（赤）の場合の算出した 4 重極モーメントの違い。ノイ ズは信号平均値の $\pm 1\%$ の大きさ。	69
6.2 4000 個の要素に分割した図。各軸の単位は [m]。	71
6.3 特性インピーダンスと電極幅の関係	71
6.4 境界要素法の精度	72
6.5 4 本の電極の信号から算出したビーム位 置 [m]。赤三角形が算出位置、黒点は設定位置。	73
6.6 16 本の電極の信号から算出したビーム位 置 [m]。赤三角形が算出位置、黒点は設定位置。	73
6.7 算出した相対位置	73
6.8 境界要素法により算出したビームの四重極モーメントとビームサイズの関係。	74
6.9 モニターの設計図、外観（株式会社 TOYAMA 製図）	75
6.10 モニターの設計図、断面（株式会社 TOYAMA 製図）	76

付録 G	16 電極ビームモニターの試作機について	123
6.11	モニターの内部	77
6.12	TDR を用いた電極の特性インピーダンス測定結果。緑線は open、黄線は 50 オームターミネートでの測定結果。赤点線の間隔は 1.98[ns]。右図は左図の拡大図。水色の点線は 50 オームを示す。	78
6.13	ワイヤキャリブレーション装置	79
6.14	ワイヤ配置位置	80
6.15	ワイヤキャリブレーション結果 (16 電極分の信号から計算したワイヤ位置)	81
6.16	ワイヤキャリブレーション結果 (4 電極分の信号から計算したワイヤ位置)	81
6.17	ワイヤ位置が $y=0$ での x 方向の設定位置対算出位置。赤は 16 本の電極信号から、青は 2 本の電極信号から算出したもの。	81
6.18	テーパ管を用いた高周波特性測定	83
6.19	S パラメータ	83
6.20	テーパ管の概念図	84
6.21	インストール前のビームラインの様子	85
6.22	インストール後のビームラインの様子	85
6.23	インストール場所付近のベータ関数 (設計値)。赤が水平方向、青が垂直方向。	86
6.24	導通チェックのためのセットアップ	86
6.25	導通チェック時の波形	86
6.26	MR の繰り返し周期の図によるデータ取得タイミングの説明図。黄色の領域がデータ取得の時間領域。	87
6.27	16 電極分の信号	88
6.28	16 電極モニターによって取得した K3 直前の 50ms 分の信号	89
6.29	16 電極モニターによって取得した P3 直前の 50ms 分の信号	89
6.30	16 電極モニターによって取得した K3 直前の 1 ターン分の信号	89
6.31	16 電極モニターによって取得した P3 直前の 1 ターン分の信号	89
6.32	16 電極モニターによる K3 直前の 1 バンチ分の信号	90

6.33	16 電極モニターによる P3 直前の 1 バンチ分の信号	90
6.34	K3 直後の信号。一部拡大図。	90
6.35	K3 直後のデータから算出した D_x 、 D_y	91
6.36	K3 直後のデータから算出した Q	91
6.37	P3 直前のデータから算出した D_x 、 D_y	92
6.38	P3 直前のデータから算出した Q	92
6.39	ビームサイズが x 方向 41mm、y 方向 39mm の場合の算出した四重極モーメントの ヒストグラム。4 電極の場合が青、16 電極の 場合が赤。	92
6.40	ビームサイズが x 方向 41mm、y 方向 39mm の場合に算出した四重極モーメントの ヒストグラム。4 電極の場合が青、8 電極の 場合が緑。	92
6.41	ビームサイズが x 方向 45mm、y 方向 35mm の場合に算出した四重極モーメントの ヒストグラム。4 電極の場合が青、16 電極の 場合が赤。	93
6.42	ビームサイズが x 方向 45mm、y 方向 35mm の場合に算出した四重極モーメントの ヒストグラム。4 電極の場合が青、8 電極の 場合が緑。	93
6.43	フィッティングの様子。緑線がフィッティング関数ガウシアンを表している。	93
7.1	データ取得の全体概念図	97
A.1	RF ポテンシャル中の粒子の運動の概念図。	104
A.2	RF ポテンシャル中の粒子の運動の概念図。 $\phi_s = 0$ の場合。	104
A.3	位相空間上のダイポール振動の概念図。 [34] より転載。	105
A.4	位相空間上の 4 重極振動の概念図。 [34] より転載。	105

付録 G 16 電極ビームモニターの試作機について	125
A.5 位相空間上の入射マッチングの概念図。	
[34] より転載。	105
A.6 位相空間上のフィラメンテーションの図。外山氏のスライドより転載。	106
A.7 位相空間上の整数共鳴の様子。	107
A.8 位相空間上の半整数共鳴の様子。	107
E.1 2つのポートを持つ回路	112
F.1 境界要素法での要素分割 [55]。	113
G.1 CST のシミュレーションのイメージ	116
G.2 CST で計算した信号波形	116

表 目 次

1.1	ニュートリノ振動のパラメータ [9]	11
3.1	J-PARC Linac のパラメータ	28
3.2	J-PARC RCS のパラメータ	29
3.3	J-PARC MR のパラメータ	32
3.4	MR 中の monitor 一覧 (2016 年秋)	36
5.1	Kicker の設定値	57
5.2	キッカー RF 周波数とそれに対応するチューン ν_y	58
5.3	ビームパラメータ。バンチ内粒子数は順に Thin ratio が 16/32, 22/32, 28/32 に対応している。括弧内は 3 度の測定での粒子数のばらつきを表している。	60
5.4	Thin ratio とバンチ内粒子数の対応関係	60
6.1	電極の主な寸法 (\pm の後ろの値は目標製作誤差。保証値は 0.08mm。)	76
6.2	電極ごとの S パラメータ (5 MHz)	82
6.3	monitor の位置測量結果	85
6.4	オシロスコープの設定	87
6.5	生データの S/N ratio。Signal の大きさは、1 ターンの peak to peak について 30turn 分 (1turn=9 バケツ) の平均を取った。Noise の大きさは 2.24 マイクロ秒のノイズ部分を 4 分割し、1 パートごとに peak to peak を出し 4 つの平均をとった。	91
6.6	電極の数と算出した 4 重極モーメントの平均値と標準偏差	94

参考文献

- [1] W.Pauli, Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930)
- [2] F.Reines and C.L.Cowan et al. "Detection of the Free Antineutrino " *Phys. Rev.* 117 (1960)
- [3] The ALEPH Collaboration, the DELPHI Collaboration, the L3 Collaboration, the OPAL Collaboration, the SLD Collaboration, the LEP Electroweak Working Group and the SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups, "Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance " *Phys. Rept.* 427, 257 (2006)
- [4] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. "Remarks on the unified model of elementary particles " *Prog. Theor. Phys.* Vol. 28, p. 870 (1962)
- [5] M.Kobayashi, T. Maskawa "CP-violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction " *Prog.Theor. Phys.* 49, 652 (1973)
- [6] Y.Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation ", *Phys. Rev. Lett.* 93, 101801 (2004)
- [7] E.Aliu et al. [K2K Collaboration], "Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment ", *arXiv:hep-ex/0411038* (2005)
- [8] N.Agafonova et al. [OPERA collaboration], "Observation of a first candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam ", *Phys. Lett.* B691 (2010)
- [9] Particle Data Book 2016
- [10] S.Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande-I data ", *Phys. Lett.* B 539 (2002)
- [11] S.N.Ahmed et al. [The SNO collaboration], "Measurement of the Total Active 8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity ", *Phys.Rev.Lett.*92,181301 (2004)

- [12] T.Araki et al. [The KamLAND collaboration], "Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion ", Phys.Rev.Lett.94,081801 (2005)
- [13] Y.Ashie et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys.Rev. D 71, 112005 (2005)
- [14] M.H.Ahn et al. [K2K Collaboration], "Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment ", Phys. Rev. D 74, 072003 (2006)
- [15] P.Adamson et al. (MINOS Collaboration), "Measurement of the Neutrino Mass Splitting and Flavor Mixing by MINOS ",Phys. Rev.Lett. 106, 181801 (2011)
- [16] K.Abe et al., Phys.Rev.Lett., 112, 181801 (2014)
- [17] M.Apollonio et al. (Chooz Collaboration), Eur. Phys. J. C 27, 331 (2003)
- [18] <http://www.hyper-k.org/physics/phys-hierarchy.html>
- [19] Y.Itow et al. "The JHF-Kamioka neutrino project " arXiv:hep-ex/0106019 (2001)
- [20] A.Ichikawa et al., "T2K 実験ニュートリノ生成機器", 高エネルギーニュース (2010)
- [21] T2K Collaboration (Yury Kudenko (Moscow, INR) for the collaboration), "The Near neutrino detector for the T2K experiment" (2008)
- [22] 木河達也,"T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究", Kyoto Univ., Master thesis (2011)
- [23] 亀田純,"T2K 実験 ν_μ 消失モードの最新解析結果", 高エネルギーニュース (2014)
- [24] 村上明, "ミューオンビームモニター及びニュートリノビームモニター による T2K 実験ニュートリノビームの評価", Kyoto Univ., Master thesis (2010)
- [25] A.Ichikawa et al.,"T2K 実験 2016 年夏のハイライト", 高エネルギーニュース, Volume35, p.129-p.136 (2016)
- [26] 素核研研究活動報告 (2) ニュートリノグループ (2016)
- [27] K.Iwamoto, on behalf of the T2K Collaboration," Recent Results from T2K and Future Prospects",38th International Conference on High Energy Physics 3-10 August 2016,Chicago, USA (2016)
- [28] <http://j-parc.jp/public/Acc/ja/>

- [29] S.Igarashi, "ニュートリノの加速器実験 T2K J-PARC ACCELERATOR BASED NEUTRINO EXPERIMENTS T2K J-PARC", 第 13 回日本加速器学会年会 (2016)
- [30] <http://j-parc.jp/Acc/ja/equipment.html>
- [31] 森下卓俊, "J-PARC リニアックのアップグレード", 高エネルギーニュース (2015)
- [32] 山崎良成 et al, "J-PARC 加速器", 高エネルギーニュース (2005)
- [33] Accelerator Technical Design Report for J-PARC March 2003 (<http://hadron.kek.jp/accelerator/TDA/tdr2003/index2.html>)
- [34] 田村文彦, "J-PARC シンクロトロン RF 調整", 高エネルギー加速器セミナー OHO (2010)
- [35] <http://www.t2k.org/meet/collab/201609/talks/thuram/jparc>
- [36] <http://www-cont.j-parc.jp/archive/ArchiveDataClient>
- [37] Y.Sato, "BEAM DYNAMICS SIMULATIONS OF J-PARC MAIN RING FOR FAST EXTRACTION OPERATION: BENCHMARKS AND KEYS FOR UPGRADE PLAN BY HIGHER REPETITION", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [38] 佐藤健一郎, "大電流ビームを作る-J-PARC のビームコミッショニング -ビームモニター 2 : ビームプロファイルモニタ ", 高エネルギー加速器セミナー OHO (2010)
- [39] T.Toyama, "Status of J-PARC Beam Monitor", FNAL mini workshop, 発表スライド (2016)
- [40] 池上雅紀, "入射器施設の概要", 高エネルギー加速器セミナー OHO (2001)
- [41] L.Smith, "Effect of gradient errors in the presence of space-charge forces ", Pros.Int.Conf. on High-Energy Accelerators, Dubna, p.897 (1963)
- [42] E.Wilson, "an introduction to PARTICLE ACCELERATORS", OXFORD UNIVERSITY PRESS (2001)
- [43] S.Igarashi, "BEAM PROFILE MEASUREMENT USING FLYING WIRE AT THE J-PARC MR", 第 7 回加速器学会年会 (2010)
- [44] S.Hatakeyama et al., "A Phase Space Monitoring of Injected Beam of J-PARC MR", Proc. 2nd Int. Symp. Science at J-PARC Unlocking the Mysteries of Life, Matter and the Universe, JPS Conf. Proc. 8, 012001 (2015)

- [45] S.Hatakeyama et al., "A SYSTEM FOR MONITORING OF THE TRANSVERSE INJECTION ERROR AND BETATRON TUNE IN J-PARC MR", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2010, Himeji, Japan (2010)
- [46] T.Toyama, "ビームインストルメント", 高エネルギー加速器セミナー OHO (2009)
- [47] K.Ohmi et al., "SPACE CHARGE EFFECTS in J-PARC MR: LATTICE X-Y COUPLING", 第9回日本加速器学会年会 (2012)
- [48] K.G.Nakamura, " T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC MR Intra-bunch Feedback System の開発 ", Kyoto Univ., Master thesis (2015)
- [49] T.Koseki et al., " Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron ", Prog. Theor. Exp. Phys. 02B004 (2012)
- [50] T.Toyama and M.Okada, " The Kick Angle Calibration of the Exciter in the J-PARC MR ", TUP077, in these proceedings.
- [51] <http://j-parc.jp/public/Acc/ja/bunch/inac2rcs.html>
- [52] 三浦孝子 et al., " KEK-PS 主リングにおける横方向四極モードの測定 ", The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003.
- [53] R.Bar, " Measurement of space-charge-induced frequency shifts of quadrupolar beam oscillations in the SIS ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 415, pp.460-463 (1998)
- [54] 諏訪田剛 et al., " ストリップライン多電極を用いたビームサイズ計測への応用 ", 第23回リニアック技術研究会予稿集 (2003)
- [55] T. Shintake et. al., " SENSITIVITY CALCULATION OF BEAM POSITION MONITOR USING BOUNDARY ELEMENT METHOD ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A254,146-150 (1987)
- [56] K.Hanamura, "DEVELOPMENT OF CALIBRATION SYSTEM FOR BPM AT J-PARC 50GEV SYNCHROTRON", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, August 2-4, 2006, pp.466-468 (2016)

- [57] T.Miura, "Calibration of Beam Position Monitor for J-PARC Main Ring Synchrotron", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (2006)
- [58] <http://www.abel-s.co.jp/mame/kenma.html>
- [59] 加速器のビームモニター, S.Hiramatsu, High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Page 139-143 (2004)
- [60] S. Igarashi, "Towards 0.75 MW MR FX MR Upgrade Plan", The Accelerator Technical Advisory Committee(ATAC) for the J-PARC Project (2014)
- [61] R.Muto, "J-PARC メインリングにおける遅い取り出し", 高エネルギー加速器セミナー OHO (2010)
- [62] K.Sato et al., "Development of IPM for J-PARC MR", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Japan (2009)
- [63] S.Igarashi et al., "FLYING WIRE BEAM PROFILE MONITORS AT THE J-PARC MR", Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan (2012)
- [64] T.Toyama, "A MULTI-CONDUCTOR TRANSMISSION LINE MODEL FOR THE BPMS", IPAC2014, Dresden, Germany (2014)