

T2K 実験における陽子ビーム位置モニターの位置分解能
に関する研究

首都大学東京大学院 理工学研究科物理学専攻 博士前期課程2年
高エネルギー実験研究室

佐々木 慎之介

2018年1月10日

概要

T2K 実験は大強度陽子加速器 J-PARC により生成されたニュートリノビームを、ターゲットから 280m の位置にある前置検出器 ND280 と 295km の位置にある後置検出器 SuperKamiokande で検出し、ニュートリノ振動を測定する長基線ニュートリノ実験である。現在は、ニュートリノと反ニュートリノでのニュートリノ振動の測定の比較からレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見を目指し、ビームの強度の増強を図っている。

ビーム強度増加に伴い、陽子ビームをターゲットへ輸送するニュートリノビームラインでも大強度ビームに対応する必要が求められる。ニュートリノビームラインには現在静電誘導型ビーム位置モニター (ESM) が 21 台設置されている。この ESM は、陽子ビームによって上下左右 4 つの電極に誘起された電荷を用いてビーム中心位置を測定しているため、ビームロスを生じない非破壊型のモニターとなっている。ESM がビーム中心位置を常時測定することにより、大強度ビームを安全かつ安定的にターゲットに運ぶことが出来る。また、ビームロスを生じないモニターであるため、ビーム強度増加に伴い重要度はさらに増す。

しかしながら、現在 ESM の位置分解能がどの程度なのかは正確にはわかってはいない。また、ターゲット直前の ESM ではターゲットからの電子の散乱によるノイズが混入し、位置分解能を下げていることがわかってる。ESM ではビームの位置をモニターするとともに、ターゲット直前の ESM は陽子ビームのターゲットへの入射角の測定に用いられている。よって、位置分解能が良くなることにより、実験精度の向上やビームによるターゲットの破損のリスクの軽減などが期待される。

そこで現在のビームデータをもとに ESM の位置分解能を調べ、正確な位置分解能の見積もりを行った。その結果、水平方向では概ね 0.1mm 程度、垂直方向ではターゲット直前のものを除き概ね 0.01mm 程度の位置分解能を得た。この見積りには、リファレンスとなるモニターの位置の不定性およびビーム軌道の不定性が含まれており、水平方向の位置分解能には特に後者が大きく寄与していると考えられる。さらに、前述の通りターゲット直前の ESM についてターゲットから散乱された電子によるノイズの影響を調べた。これを軽減するため、ESM の波形情報を用いたデジタルフィルターを設置し、位置分解能の改良を試みた。

また、T2K のニュートリノビームラインにはビームプロファイルモニターとして Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) が 19 台設置されている。SSEM は金属薄膜のストリップが並んだ構造をしており、ビームがストリップを通過すると二次電子が放出される。それを測定することによりビームプロファイルを測定している。また、SSEM は上記の通りビームと直接相互作用

するため、ビームロスを生じる。これを避けるために SSEM はビームラインから出し入れできるように駆動装置がついている。

ニュートリノビームラインの超伝導ビームラインでは液体ヘリウムを用いて冷却をしている。よって SSEM の駆動装置では、超低温に対応する必要がある。しかし、現在駆動装置に用いられているオイルレスワッシャーでは耐久性に問題があることがわかっている。そこで、超低温でもスムーズに動きかつ耐久性に問題がないようにベアリング部を改良し、その試験を行った。試験の結果、動作に問題のないベアリングを採用し、インストール後のビーム運転に於いても問題なく動作していることを確認した。

目次

第 1 章 序論	13
1.1 ニュートリノについて	13
1.1.1 ニュートリノの発見	13
1.1.2 ニュートリノ振動	14
1.2 ニュートリノ振動実験について	17
1.2.1 原子炉ニュートリノ実験	18
1.2.2 加速器ニュートリノ実験	20
第 2 章 T2K 実験	24
2.1 T2K 実験の概要	24
2.2 目的と特徴	25
2.3 大強度陽子加速器 J-PARC	26
2.4 ニュートリノビームライン	27
2.4.1 一次ビームライン	30
2.4.2 陽子ビームモニター	30
2.4.3 二次ビームライン	33
2.5 前置検出器	35
2.5.1 ND280	36
2.5.2 INGRID	38
2.6 後置検出器	39
2.6.1 スーパーカミオカンデ	39
第 3 章 本研究の目的	41
第 4 章 ビーム位置モニターの位置分解能の検証と改良	42
4.1 ビーム位置モニター ESM について	42
4.2 ビームプロファイルモニター SSEM について	46
4.3 ESM の位置分解能の検証	47
4.3.1 ESM の位置分解能の検証方法	47
4.3.2 ESM の位置分解能の検証結果とその評価	62

4.4	ESM5 の位置分解能	65
4.5	デジタル信号処理を用いたターゲット付近の ESM の分解能の改良	75
4.5.1	ESM4 と ESM20 の信号波形の比較	76
4.5.2	ウィナーフィルタについて	80
4.5.3	ウィナーフィルタの制作	80
4.6	ビームを用いた改良後の位置分解能の評価	86
第 5 章	超伝導ビームライン用ビームプロファイルモニター駆動装置の改良	89
5.1	ビームプロファイルモニター SSEM の駆動装置について	89
5.2	超伝導ビームラインの SSEM 駆動装置の問題	90
5.3	超伝導ビームライン用の SSEM 駆動装置のベアリングの耐久テスト	95
5.3.1	室温でのテストのセットアップ	98
5.3.2	超低温でのテストのセットアップ	100
5.3.3	ニードルベアリングのテスト	100
5.3.4	セラミックベアリングのテスト	103
5.4	ビームラインへのインストール	106
第 6 章	結論	108

目 次

1.1	標準模型	13
1.2	質量階層	16
1.3	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 [7]	17
1.4	Double Chooz 実験	18
1.5	Double Chooz 実験の検出器	19
1.6	Daya Bay 実験の配置図	20
1.7	NOvA 実験の俯瞰図	21
1.8	NOvA 実験の検出器	22
1.9	検出器の構造	22
2.1	T2K 実験の概要	24
2.2	T2K 実験の俯瞰図	24
2.3	J-PARC の鳥瞰図	26
2.4	陽子ビームの構造	27
2.5	ニュートリノビームライン	28
2.6	Off-Axis Beam	29
2.7	ニュートリノビームのエネルギーと角度の関係	29
2.8	一次ビームライン	30
2.9	CT	31
2.10	BLM	32
2.11	OTR	32
2.12	ターゲットステーション及び二次ビームライン	33
2.13	ターゲット	34
2.14	ミュオンモニター	35
2.15	前置検出器	36
2.16	ND280	37
2.17	INGRID	38
2.18	スーパーカミオカンデ	39
2.19	スーパーカミオカンデで観測したニュートリノ事象のイベント	40

4.1	ESM	42
4.2	ESM の模式図	42
4.3	ESM と SSEM のビームライン上の配置図	43
4.4	傾いて取り付けられた ESM の模式図	44
4.5	ESM の水平方向の電極の差の積分波形	45
4.6	ESM の水平方向の電極の和の積分波形	45
4.7	SSEM	46
4.8	SSEM の原理	46
4.9	SSEM16 の垂直方向のビームプロファイル	47
4.10	SSEM 挿入時の ESM の波形	48
4.11	SSEM19X と SSEM1X の相関	49
4.12	SSEM19X と SSEM2X の相関	49
4.13	SSEM19X と SSEM3X の相関	49
4.14	SSEM19X と SSEM4X の相関	49
4.15	SSEM19X と SSEM5X の相関	50
4.16	SSEM19X と SSEM6X の相関	50
4.17	SSEM19X と SSEM7X の相関	50
4.18	SSEM19X と SSEM8X の相関	50
4.19	SSEM19X と SSEM9X の相関	50
4.20	SSEM19X と SSEM1X0 の相関	50
4.21	SSEM19X と SSEM1X1 の相関	51
4.22	SSEM19X と SSEM1X2 の相関	51
4.23	SSEM19X と SSEM14X の相関	51
4.24	SSEM19X と SSEM15X の相関	51
4.25	SSEM19X と SSEM16X の相関	51
4.26	SSEM19X と SSEM17X の相関	51
4.27	SSEM19X と SSEM18X の相関	52
4.28	SSEM19Y と SSEM1Y の相関	52
4.29	SSEM19Y と SSEM2Y の相関	52
4.30	SSEM19Y と SSEM3Y の相関	52
4.31	SSEM19Y と SSEM4Y の相関	52
4.32	SSEM19Y と SSEM5Y の相関	53
4.33	SSEM19Y と SSEM6Y の相関	53
4.34	SSEM19Y と SSEM7Y の相関	53

4.35 SSEM19Y と SSEM8Y の相関	53
4.36 SSEM19Y と SSEM9Y の相関	53
4.37 SSEM19Y と SSEM1Y0 の相関	53
4.38 SSEM19Y と SSEM11Y の相関	54
4.39 SSEM19Y と SSEM1Y2 の相関	54
4.40 SSEM19Y と SSEM1Y4 の相関	54
4.41 SSEM19Y と SSEM1Y5 の相関	54
4.42 SSEM19Y と SSEM16Y の相関	54
4.43 SSEM19Y と SSEM17Y の相関	54
4.44 SSEM19Y と SSEM18Y の相関	55
4.45 ESM1X と SSEM1X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.46 ESM2X と SSEM2X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.47 ESM3X と SSEM3X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.48 ESM5X と SSEM4X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.49 ESM6X と SSEM6X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.50 ESM7X と SSEM7X のビーム中心の差のヒストグラム	56
4.51 ESM8X と SSEM8X のビーム中心の差のヒストグラム	57
4.52 ESM10X と SSEM10X のビーム中心の差のヒストグラム	57
4.53 ESM11X と SSEM11X のビーム中心の差のヒストグラム	57
4.54 ESM13X と SSEM12X のビーム中心の差のヒストグラム	57
4.55 ESM15X と SSEM14X のビーム中心の差のヒストグラム	57
4.56 ESM17X と SSEM15X のビーム中心の差のヒストグラム	58
4.57 ESM18X と SSEM16X のビーム中心の差のヒストグラム	58
4.58 ESM19X と SSEM17X のビーム中心の差のヒストグラム	58
4.59 ESM20X と SSEM18X のビーム中心の差のヒストグラム	58
4.60 ESM21X と SSEM19X のビーム中心の差のヒストグラム	58
4.61 ESM1Y と SSEM1Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.62 ESM2Y と SSEM2Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.63 ESM3Y と SSEM3Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.64 ESM5Y と SSEM4Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.65 ESM6Y と SSEM6Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.66 ESM7Y と SSEM7Y のビーム中心の差のヒストグラム	59
4.67 ESM8Y と SSEM8Y のビーム中心の差のヒストグラム	60
4.68 ESM10Y と SSEM10Y のビーム中心の差のヒストグラム	60

4.69 ESM11Y と SSEM11Y のビーム中心の差のヒストグラム	60
4.70 ESM13Y と SSEM12Y のビーム中心の差のヒストグラム	60
4.71 ESM14Y のビーム中心のヒストグラム	60
4.72 ESM15Y と SSEM14Y のビーム中心の差のヒストグラム	60
4.73 ESM17Y と SSEM15Y のビーム中心の差のヒストグラム	61
4.74 ESM18Y と SSEM16Y のビーム中心の差のヒストグラム	61
4.75 ESM19Y と SSEM17Y のビーム中心の差のヒストグラム	61
4.76 ESM20Y と SSEM18Y のビーム中心の差のヒストグラム	61
4.77 ESM21Y と SSEM19Y のビーム中心の差のヒストグラム	61
4.78 水平方向の ESM の位置分解能	63
4.79 垂直方向の ESM の位置分解能	63
4.80 ESM2 でのビーム中心のぼらつき	64
4.81 ESM1 の水平方向のビームのぼらつき	65
4.82 ESM2 の水平方向のビームのぼらつき	65
4.83 ESM3 の水平方向のビームのぼらつき	65
4.84 ESM4 の水平方向のビームのぼらつき	65
4.85 ESM5 の水平方向のビームのぼらつき	66
4.86 ESM6 の水平方向のビームのぼらつき	66
4.87 ESM7 の水平方向のビームのぼらつき	66
4.88 ESM8 の水平方向のビームのぼらつき	66
4.89 ESM1 の垂直方向のビームのぼらつき	66
4.90 ESM2 の垂直方向のビームのぼらつき	66
4.91 ESM3 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.92 ESM4 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.93 ESM5 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.94 ESM6 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.95 ESM7 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.96 ESM8 の垂直方向のビームのぼらつき	67
4.97 水平方向の ESM5 と ESM1 のビーム中心位置の相関	68
4.98 水平方向の ESM5 と ESM2 のビーム中心位置の相関	68
4.99 水平方向の ESM5 と ESM3 のビーム中心位置の相関	68
4.100 水平方向の ESM5 と ESM4 のビーム中心位置の相関	68
4.101 水平方向の ESM5 と ESM5 のビーム中心位置の相関	68
4.102 水平方向の ESM5 と ESM6 のビーム中心位置の相関	68

4.103	水平方向の ESM5 と ESM7 のビーム中心位置の相関	69
4.104	水平方向の ESM5 と ESM8 のビーム中心位置の相関	69
4.105	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM1 のビーム中心位置の相関	69
4.106	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM2 のビーム中心位置の相関	69
4.107	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM3 のビーム中心位置の相関	69
4.108	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM4 のビーム中心位置の相関	69
4.109	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM5 のビーム中心位置の相関	70
4.110	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM6 のビーム中心位置の相関	70
4.111	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM7 のビーム中心位置の相関	70
4.112	垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM8 のビーム中心位置の相関	70
4.113	プログラム改良後の ESM1 の水平方向のビームのばらつき	71
4.114	プログラム改良後の ESM2 の水平方向のビームのばらつき	71
4.115	プログラム改良後の ESM3 の水平方向のビームのばらつき	71
4.116	プログラム改良後の ESM4 の水平方向のビームのばらつき	71
4.117	プログラム改良後の ESM5 の水平方向のビームのばらつき	72
4.118	プログラム改良後の ESM6 の水平方向のビームのばらつき	72
4.119	プログラム改良後の ESM7 の水平方向のビームのばらつき	72
4.120	プログラム改良後の ESM8 の水平方向のビームのばらつき	72
4.121	プログラム改良後の ESM1 の垂直方向のビームのばらつき	72
4.122	プログラム改良後の ESM2 の垂直方向のビームのばらつき	72
4.123	プログラム改良後の ESM3 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.124	プログラム改良後の ESM4 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.125	プログラム改良後の ESM5 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.126	プログラム改良後の ESM6 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.127	プログラム改良後の ESM7 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.128	プログラム改良後の ESM8 の垂直方向のビームのばらつき	73
4.129	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM1 のビーム中心位置の相関	74
4.130	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM2 のビーム中心位置の相関	74
4.131	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM3 のビーム中心位置の相関	74
4.132	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM4 のビーム中心位置の相関	74
4.133	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM5 のビーム中心位置の相関	74
4.134	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM6 のビーム中心位置の相関	74
4.135	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM7 のビーム中心位置の相関	75
4.136	プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM8 のビーム中心位置の相関	75

4.137ESM5 の位置分解能改良後の垂直方向の位置分解能	75
4.138ESM4 の波形取得回路	76
4.139FADC で取得した ESM4 の波形	77
4.140FADC で取得した ESM20 の波形	77
4.141オシロスコープで取得した ESM4 の 4 電極合算波形	78
4.142オシロスコープで取得した ESM4 の 4 電極それぞれの波形	78
4.143FADC とオシロスコープの波形の比較	79
4.144 極間の波形の比較	79
4.145ESM4 と ESM20 の相互相関関数	81
4.146ESM20 から ESM4 の波形を引いて得たノイズ波形	82
4.147第 8 バンチの直後のノイズ波形	82
4.148ESM4 の積分波形	83
4.149ノイズ信号の積分波形	84
4.150ESM4 の信号のパワースペクトル	85
4.151ノイズ信号のパワースペクトル	85
4.152ウィナーフィルタの周波数特性	86
4.153フィルタ適用前の ESM20 の波形	87
4.154フィルタ適用後の ESM20 の波形	87
4.155ESM の水平方向の電極の和の積分波形	87
5.1 常伝導ビームラインの SSEM 駆動装置	90
5.2 超伝導区画の駆動装置のマイクロスイッチ周辺	90
5.3 超伝導ビームライン用 SSEM 駆動装置のベアリング	91
5.4 SSEM 11 の駆動装置に使われていたベアリング	91
5.5 SSEM 10 における駆動の悪化の時間変化 縦軸はマイクロスイッチに接触してから離れるまでのモーターの回転数	92
5.6 SSEM 11 における駆動の悪化の時間変化	93
5.7 ステンレスのワッシャーを取り付けたベアリング	93
5.8 SSEM 12 における駆動の悪化の時間変化	94
5.9 SSEM 13 における駆動の悪化の時間変化	94
5.10 スタンダードベアリング	95
5.11 ニードルベアリング	96
5.12 ニードルベアリングの取り付け	96
5.13 セラミックベアリング	97
5.14 SSEM 駆動装置テストのセットアップ	97

5.15 SSEM 駆動装置テストのセットアップ 2	98
5.16 室温テストのセットアップ	99
5.17 マイクロスイッチ	99
5.18 超低温テストのセットアップ	100
5.19 セラミックベアリングの状態	105
5.20 新たにデザインされたホルダーブロック	105

第1章 序論

1.1 ニュートリノについて

ニュートリノはレプトン的一种、スピン1/2のフェルミオンであり、Majorana粒子かDirac粒子であると考えられている。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 (ν_τ) の3種類のフレーバーが存在し、電荷を持たず、弱い相互作用のみに反応する。標準模型から初めは質量がゼロと考えられていたが、後の研究によって僅かながら質量が存在することが明らかになった。



図 1.1: 標準模型

1.1.1 ニュートリノの発見

ニュートリノは、 β 崩壊の理論的矛盾を解決するために1930年 Pauliによって初めに提唱された素粒子である [1]。 β 崩壊では原子核が陽子と電子に崩壊すると考えられていたが、これではエネルギー保存則と角運動量保存則が成り立たなくなってしまう。中性子の β 崩壊が

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- \quad (1.1)$$

のような反応だとすると、崩壊前のスピン角運動量は $\pm \frac{1}{2}\hbar$ だが崩壊後のスピン角運動量は $\hbar, 0, -\hbar$ のいずれかとなり、角運動量は保存されていない。

そこで、スピン $\frac{1}{2}$ で中性の粒子を仮定し、その粒子が β 崩壊で放出されているとした仮説がもたらされた。この仮定された粒子は中性の小さいものという意味で Fermi によってニュートリノと名付けられた。

その後ニュートリノは 1953 年に Reines, Cowan 等によって初めて実験的に確認がされた [2]。この実験は、原子炉で生成される中性子過剰核の β 崩壊から、以下のような反応が起きると考え、その検証を行ったものである。



また、反ニュートリノの検出には陽子標的として水を用いて、以下のような反応を利用した。



そして実験の結果、中性子と陽電子が検出され、ニュートリノの存在が実験的に示された。

上記の実験で検出されたニュートリノは 1.2 式からもわかるように電子と共に発生している。その後、同じように μ 粒子と共に発生するニュートリノ [4] や τ 粒子と共に発生するニュートリノが発見され [5]、それぞれ共に発生する粒子の名前から電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ と名付けられた。

1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノの重要な性質としてニュートリノ混合というものがある。アメリカの Homestake 実験や日本の Kamiokande 実験などでは共に太陽ニュートリノの検出を行っていたが、両実験に於いて太陽から放出されている電子ニュートリノの観測量が標準太陽模型から導かれる理論値よりも遥かに下回るという現象が確認された。これを太陽ニュートリノ問題という。

ニュートリノに質量があった場合、ニュートリノ混合というものが起こることが 1962 年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一らによって理論的に提案された [3]。ニュートリノは標準模型に於いては質量を持たないとされている。しかし、このニュートリノ混合ではニュートリノが質量を持ち、弱い相互作用の（フレーバーの）固有状態と質量の固有状態とが混合される状態を仮定する。今、フレーバー固有状態を $\nu_\alpha (\alpha = e, \mu, \tau)$ 、質量固有状態を $\nu_i (i = 1, 2, 3)$ と表すとフレーバー固有状態と質量固有状態の関係はユニタリ行列 U を用いて以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ここで、 U は牧-中川-坂田-ポンテコルボ (MNSP) 行列と呼ばれ、以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.5)
\end{aligned}$$

ここで、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ である。 θ_{ij} はそれぞれの固有状態 ν_i と ν_j の混合角であり、 δ は CP 位相と呼ばれ、 $\delta = 0$ でなければ、CP 対称性が破れているということになる。

ニュートリノ混合がニュートリノにあると、ニュートリノ振動という現象が現れる。これはニュートリノが空間を伝搬していく際に、ニュートリノ混合によってそのフレーバーの種類が変化していくというもので、その変化の確率が振動として現れるためニュートリノ振動と呼ばれている。ニュートリノは空間を伝搬していく際は、フレーバー固有状態ではなく、エネルギー固有状態として振る舞う。すると空間を伝搬する際に位相差が生じる。再び、他の物質と相互作用をしフレーバー固有状態となるとフレーバーの混合の比率が変化して、ニュートリノの種類が変わってしまう事が起こる。

ここからニュートリノ振動の振動確率の式を導出する。 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ の遷移ではエネルギーを E 、距離を L とすると振動確率は

$$\begin{aligned}
P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{k>j} \Re [U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{4E} \right) \\
&\quad + 2 \sum_{k>j} \Im [U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin \left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} \right) \quad (1.6)
\end{aligned}$$

となる。また、遷移しない確率 ($\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha$ となる確率) は

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha}(L, E) = 1 - 4 \sum_{k>j} |U_{\alpha k}|^2 |U_{\alpha j}|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{4E} \right) \quad (1.7)$$

となる。 Δm_{kj}^2 は質量の二乗差である。ニュートリノ振動の測定からは質量自体ではなく質量の二乗差の絶対値しかわからない。よって、質量の二乗差は図 1.2 のように 2つの階層が考えられる。図 1.2 の左の階層を正常階層 (Normal Hierarchy)、右の階層を逆階層 (Inverted Hierarchy) という。

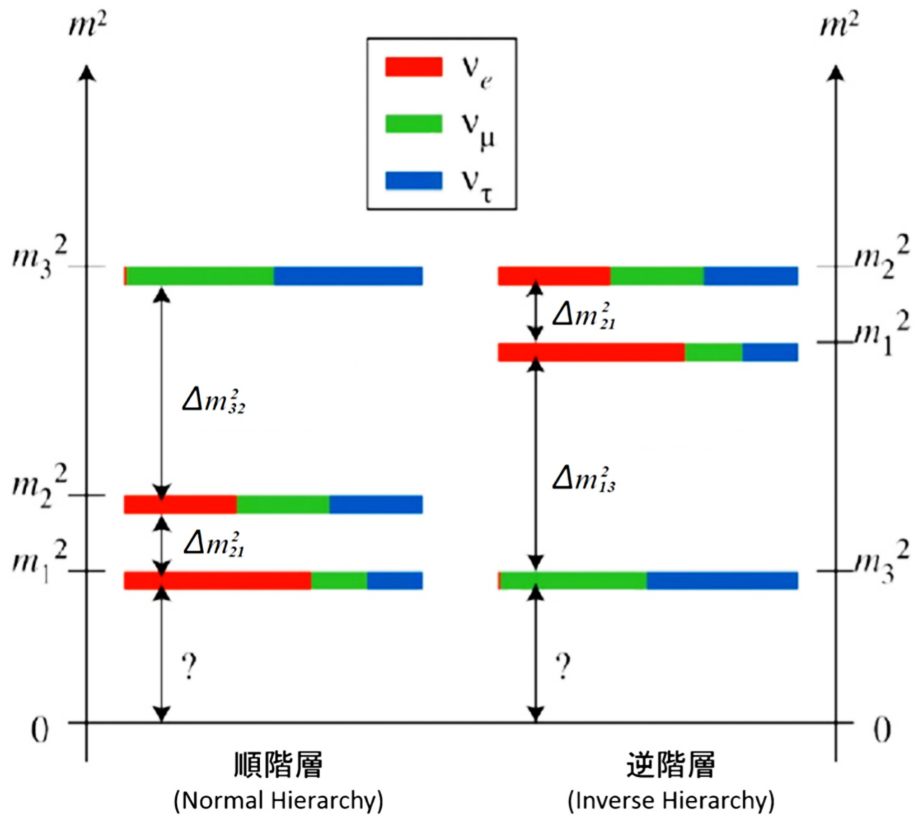


図 1.2: 質量階層

その後、スーパーカミオカンデに於いて大気ニュートリノの測定でニュートリノ振動が実験的に確認された [6]。スーパーカミオカンデではニュートリノのフレーバーや方向を捉える事ができ、大気ニュートリノの観測からニュートリノの欠損がニュートリノ振動の理論予測と一致し、ニュートリノ振動が実際に起こっていることが証明された。ニュートリノ振動が最初に確認されたのは始めに問題になっていた太陽ニュートリノではなく、大気ニュートリノである。図 1.3 にスーパーカミオカンデで捉えた大気ニュートリノの天頂角分布を示した。実線がニュートリノ振動を無視した理論値であり、破線はニュートリノ振動を考慮した場合の理論値である。破線が実験値のプロットと一致しているのがよく分かる。のちに、太陽ニュートリノ問題も同様に、ニュートリノ振動によるものであることが確認された。

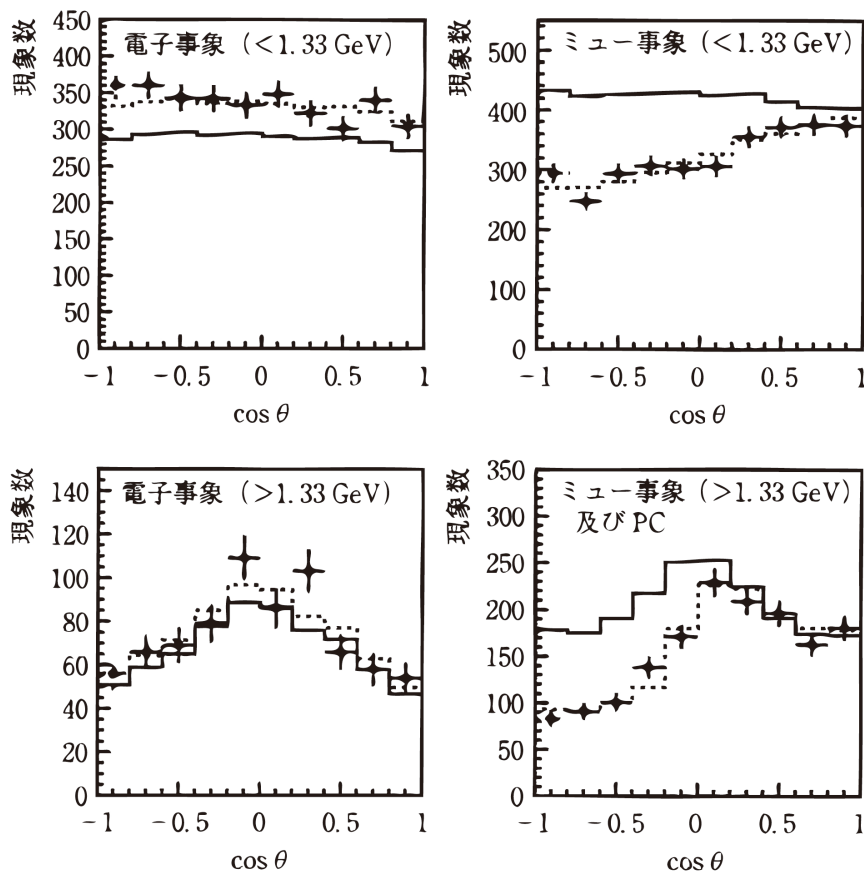


図 1.3: スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの天頂角分布 [7]

ニュートリノ振動が実験的に確認されて以降は、ニュートリノ振動のパラメータも測定されており、 θ_{12} と θ_{23} は検証されており、次章では主に θ_{13} の測定や CP 位相に関する実験を紹介していく。

1.2 ニュートリノ振動実験について

ニュートリノ振動における混合角や質量二乗差、CP 位相などのパラメータを測定する実験には大きく分けて原子炉から発生するニュートリノを用いる原子炉ニュートリノ実験と加速器で生成したニュートリノを用いる加速器ニュートリノ実験の 2 種類がある。ここでは、 θ_{13} の測定や CP 位相の破れに関する原子炉ニュートリノ実験と加速器ニュートリノ実験それぞれの代表的な実験を、本論文で扱う T2K 実験を除いていくつか紹介していくことにする。

1.2.1 原子炉ニュートリノ実験

原子炉ニュートリノ実験はその名の通り、原子炉での β 崩壊によって生成される反電子ニュートリノを用いてニュートリノ振動を測定する実験である。

Double Chooz 実験

Double Chooz 実験はフランスの Chooz 原子力発電所で行われている実験であり、ニュートリノ振動の混合角 θ_{13} の精密測定を目的としている。実験は図 1.4 のように 2 つの検出器が用いられており、前置検出器は原子炉から 400m、後置検出器は原子炉から 1km の位置に設置されている。実験は 2011 年 4 月より測定が開始され、当初は後置検出器のみで行われていた。そして、2015 年 1 月より前置検出器と後置検出器の 2 つの検出器を用いて測定が開始された。



図 1.4: Double Chooz 実験

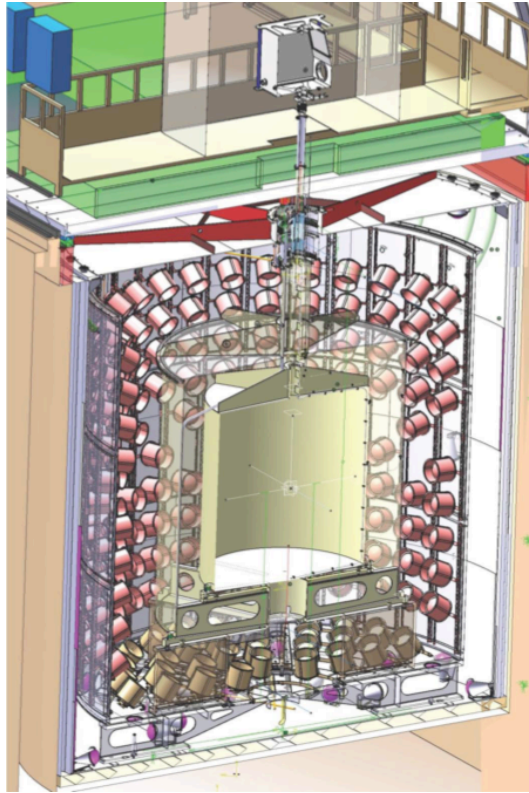


図 1.5: Double Chooz 実験の検出器

各検出器は図 1.5 のようになっている。内部検出器、内部ミュオン検出器、外部ミュオン検出器によって構成されており、内外のミュオン検出器は宇宙線を検出するのに用いられ、内部検出器によって原子炉からの反電子ニュートリノを測定している。内部検出器は中央に Gd 入りの液体シンチレータであるニュートリノターゲット層があり、その外側にニュートリノターゲット層の端で起きた反応を捉えるガンマキャッチャー層がある。内部検出器の最外殻には PMT が 390 本設置されたバッファ層がありニュートリノ反応で生成された光子を捉える。

この 2 つの検出器を用いて、反電子ニュートリノを測定し反電子ニュートリノがどれほど消滅したかによって混合角 θ_{13} を測定している。2016 年 7 月には $\sin^2 2\theta_{13} = 0.9119 \pm 0.016$ という結果を得た [8]。

Daya Bay 実験

Daya Bay 実験は 2011 年より中国で行われている実験であり、ニュートリノ源として大亜湾原子力発電所と嶺澳原子力発電所の原子炉の計 6 基が使われている。検出器は前置検出器、後置検出器が各 4 つずつあり、図 1.6 のようになっている。

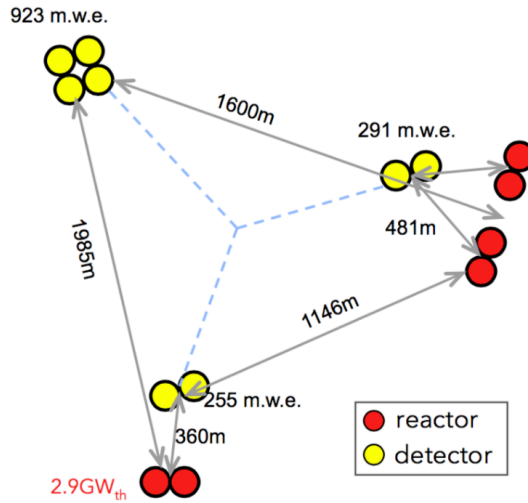


図 1.6: Daya Bay 実験の配置図

Daya Bay 実験の結果は 2016 年に

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.027(stat.) \pm 0.0019(syst.) \quad (1.8)$$

$$|\Delta m_{ee}|^2 = (2.50 \pm 0.06(stat.) \pm 0.06(syst.)) \times 10^{-3} eV^2 \quad (1.9)$$

と得られている [9]。

1.2.2 加速器ニュートリノ実験

加速器ニュートリノ実験は原子炉ニュートリノ実験がニュートリノ源として既存の原子炉を利用していたのに対して、ニュートリノ源を作るための加速器を用意し、加速器で作られたニュートリノを測定することによってニュートリノ振動のパラメータを測定する実験である。

K2K 実験

K2K 実験は本論文で論じる T2K 実験の前身として行われていた実験であり、世界で初めて行われた長基線ニュートリノ実験である。K2K 実験は KEK To Kamioka の略となっていて、その名の通り、つくば市にある KEK から 250km 離れた神岡鉱山にあるスーパーカミオカンデまでニュートリノを飛ばし、測定を行うという実験である。

T2K 実験と同様にミューニュートリノビームを KEK の加速器で生成し、ターゲットから 300m 離れた前置検出器とターゲットから 250km 離れた後置検出器であるスーパーカミオカンデの 2 つ

で測定を行う。そして、ミューニュートリノがどのくらい消滅したかを測定し、ニュートリノ振動の確認を行った。K2K 実験ではニュートリノ振動が起こっていないことが 4.3σ で否定できる結果が得られた [10]。

NO ν A 実験

NO ν A 実験はアメリカで行われてる長基線ニュートリノ実験であり、フェルミ国立加速器研究所の加速器で生成されたミューニュートリノを同じくフェルミ国立加速器研究所に設置された前置検出器と 810km 離れたアッシュリバーにある後置検出器によって測定を行いニュートリノ振動のパラメータの検証や、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見を目指し実験が行われている。



図 1.7: NO ν A 実験の俯瞰図

NO ν A 実験の検出器は図 1.8 のように棒状のプラスチックのセルが水平垂直方向に交互に並んだ構造をしている。これらのセル一つ一つは図 1.9 のように中に液体シンチレータと WLS ファイバーが入っていて、ファイバーは APD へとつながっている。また、ニュートリノビームは後述する T2K 実験と同様に Off-Axis ビームを採用しており、Off-Axis の角度は 14mrad となっている。

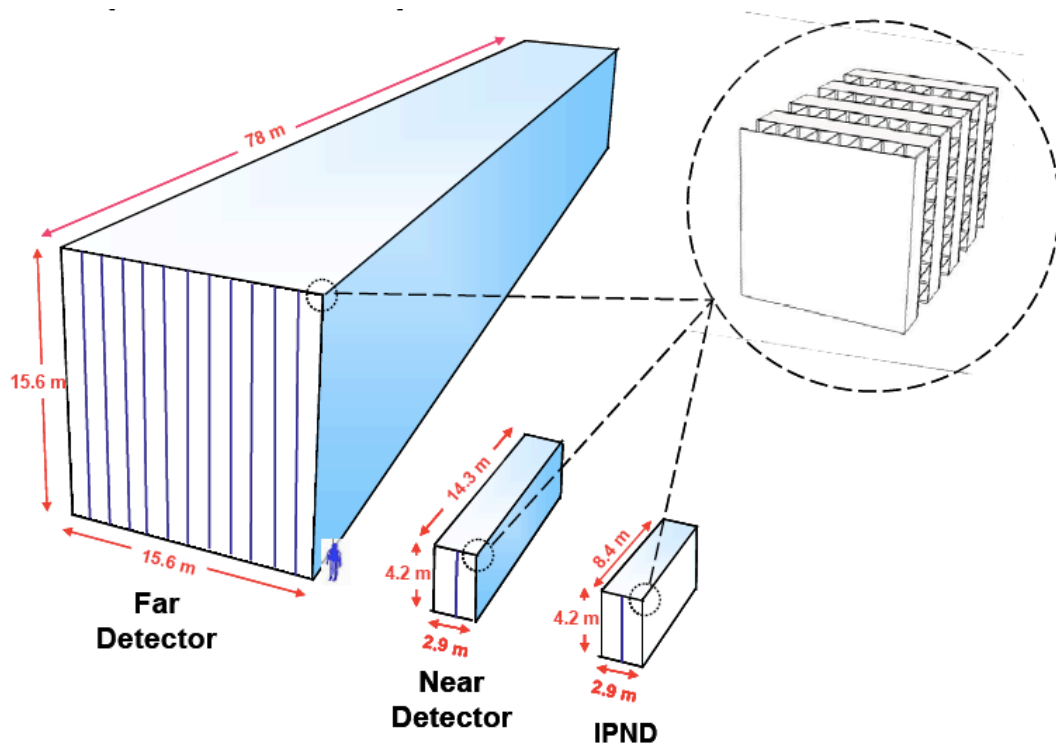


図 1.8: NOvA 実験の検出器

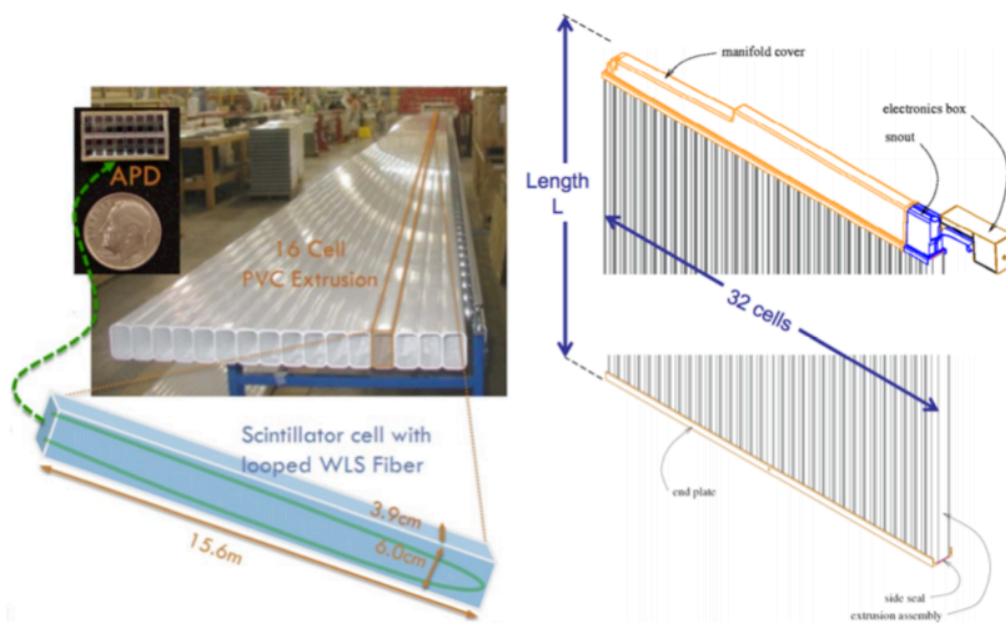


図 1.9: 検出器の構造

2017年3月の結果では、CP 対称性の破れを 90 % C.L. で支持しており、また逆階層かつ Lower

Octant($\theta_{23} < \frac{\pi}{4}$) である可能性を 93 % C.L. で否定している [11]。

第2章 T2K 実験

2.1 T2K 実験の概要

T2K 実験は 2009 年より開始された長基線ニュートリノ実験であり、K2K 実験の後継として行われた実験である。この実験ではニュートリノビームを茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器 J-PARC により生成し、ターゲットから 280m の位置にある前置検出器 ND280 と 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にある後置検出器スーパーカミオカンデを用いて検出を行い、ニュートリノ振動を測定している。

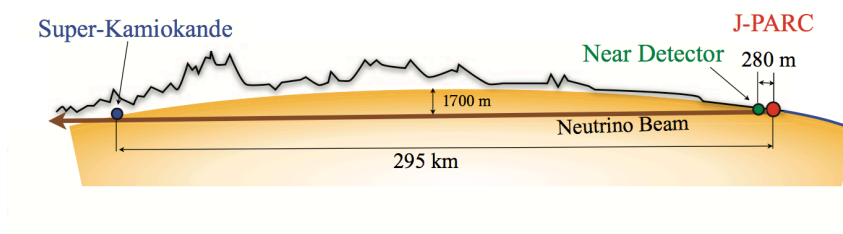


図 2.1: T2K 実験の概要

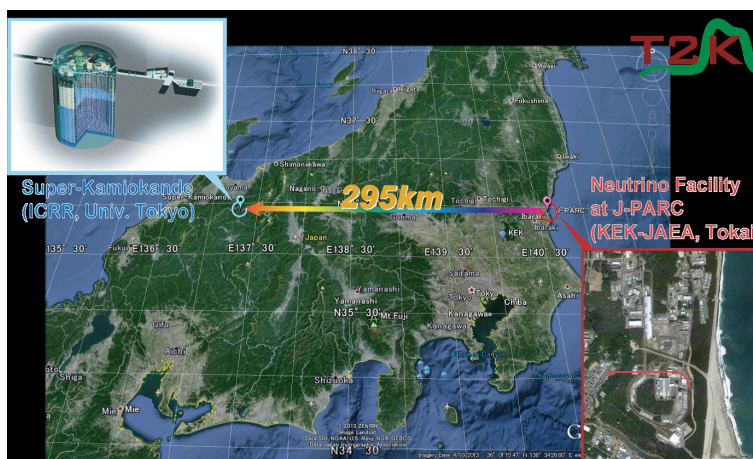


図 2.2: T2K 実験の俯瞰図

2.2 目的と特徴

T2K 実験ではミューニュートリノ及び反ミューニュートリノビームを用いて電子ニュートリノ出現事象及びミューニュートリノ消滅事象の測定から、混合角 θ_{23} や Δm^2 の測定、また混合角 θ_{13} の精密測定などを行い、現在ではニュートリノビームと反ニュートリノビームの測定からレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見を主な目的として、実験を行っている。2013 年には世界初となるニュートリノ振動における電子ニュートリノ出現事象の観測に成功 [12] し、2017 年には CP 位相に 95 % C.L. で制限を与えた [13]。

ミューニュートリノ消滅事象の検出では以下の式より、 Δm_{32}^2 及び θ_{23} の測定を行なっている。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2 2\theta_{23} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}\right) \quad (2.1)$$

また、電子ニュートリノ出現事象では以下の式より、 θ_{13} の精密測定を行なっている。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}\right) \quad (2.2)$$

また CP 位相は、以下の式を用いてニュートリノと反ニュートリノの振動の比較を行い検証している。CP 対称性の破れを求める式は

$$x = \frac{2\sqrt{2}G_F N_e E}{\Delta m_{31}^2}, \quad \alpha = \left| \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \right| \sim \frac{1}{30}, \quad \Delta = \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \quad (2.3)$$

とおくと、それぞれ

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2[(1-x)\Delta]}{(1-x)^2} \quad (2.4)$$

CP violating

$$- \alpha \sin \delta_{CP} \sin^2 2\theta_{12} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{23} \sin \Delta \frac{\sin[x\Delta]}{x} \frac{\sin[(1-x)\Delta]}{(1-x)} \quad (2.5)$$

CP conserving

$$\alpha \cos \delta_{CP} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{23} \cos \Delta \frac{\sin[x\Delta]}{x} \frac{\sin[(1-x)\Delta]}{(1-x)} \quad (2.6)$$

$$+ O(\alpha^2) \quad (2.7)$$

と表される。ここで、 G_F はフェルミ結合定数、 N_e 物質中の電子数密度である。

2.3 大強度陽子加速器 J-PARC

大強度陽子加速器 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県那珂郡東海村にあり、全長 330m の線形加速器 LINAC(Liner Accelerator)、周長 350m のシンクロトロン RCS(Rapid-Cyelling Synchrotron)、周長 1570m のシンクロトロン MR(Main Ring) の3つのからなる加速器実験施設である。

陽子を加速する流れとしては、まず水素ガスから水素化物イオン (H^-) を発生し、それを LINAC で 400MeV まで加速する。その後、RCS に入る時に炭素薄膜を通して電子を剥ぎ取られ陽子のみになる。この陽子を RCS で 3GeV まで加速し、それが最終的に MR で 30GeV まで加速する。MR で加速された陽子は早い取り出しによってニュートリノビームラインへ、遅い取り出しによってハドロン実験施設へ送られている。

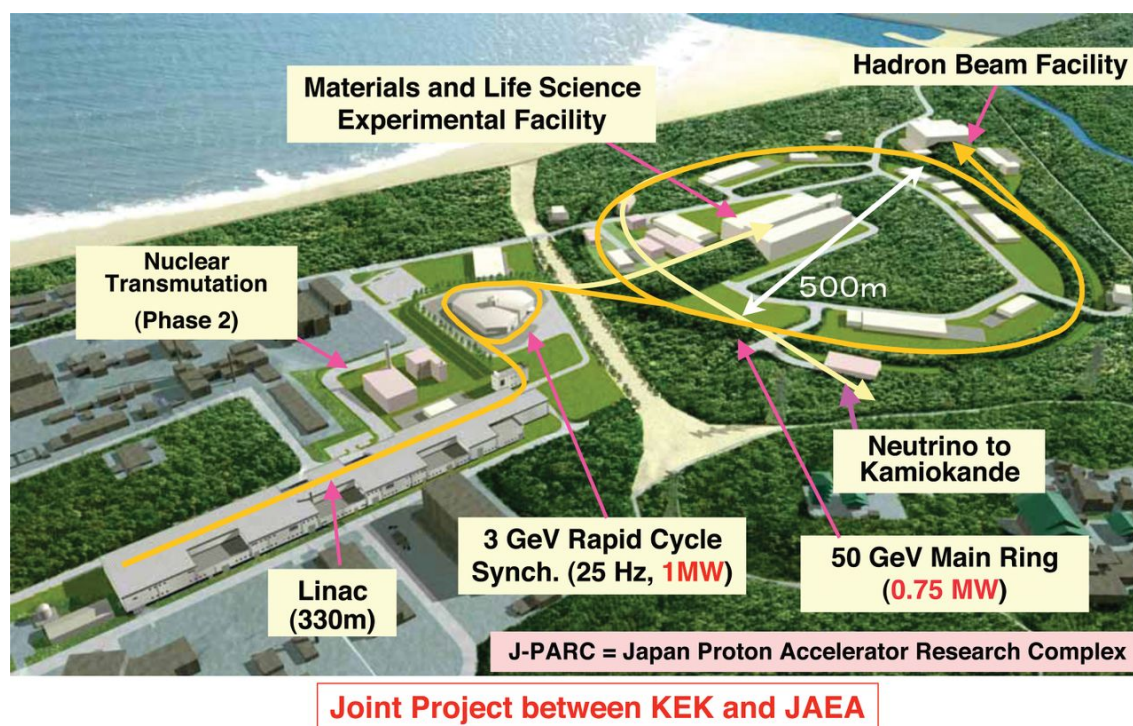


図 2.3: J-PARC の鳥瞰図

J-PARC のビームは 1 スピルに 8 バンチが含まれており、スピル間隔は 2.48s である。ビームの構造は以下の図 2.4 のようになっている。またビーム強度は現在 475kW となっており、1MW 以上を目指してビーム強度の増強を図っている。

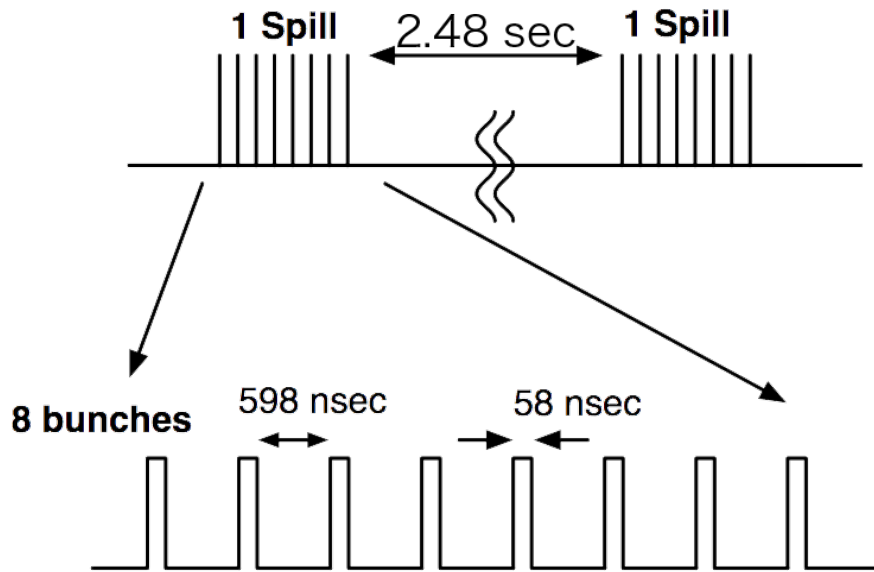


図 2.4: 陽子ビームの構造

2.4 ニュートリノビームライン

ニュートリノビームラインは T2K 用に作られた J-PARC の MR から入射した陽子ビームからニュートリノビームを生み出しているビームラインであり、大きく一次ビームラインと二次ビームラインに分かれている。

一次ビームラインは MRS からきた陽子ビームをターゲットまで輸送するビームラインであり、後述する様々なビームモニターが設置されている。一方二次ビームラインはターゲットで発生した π 中間子が崩壊し、そこからニュートリノのみを前置及び後置検出器へ送るためのビームラインである。

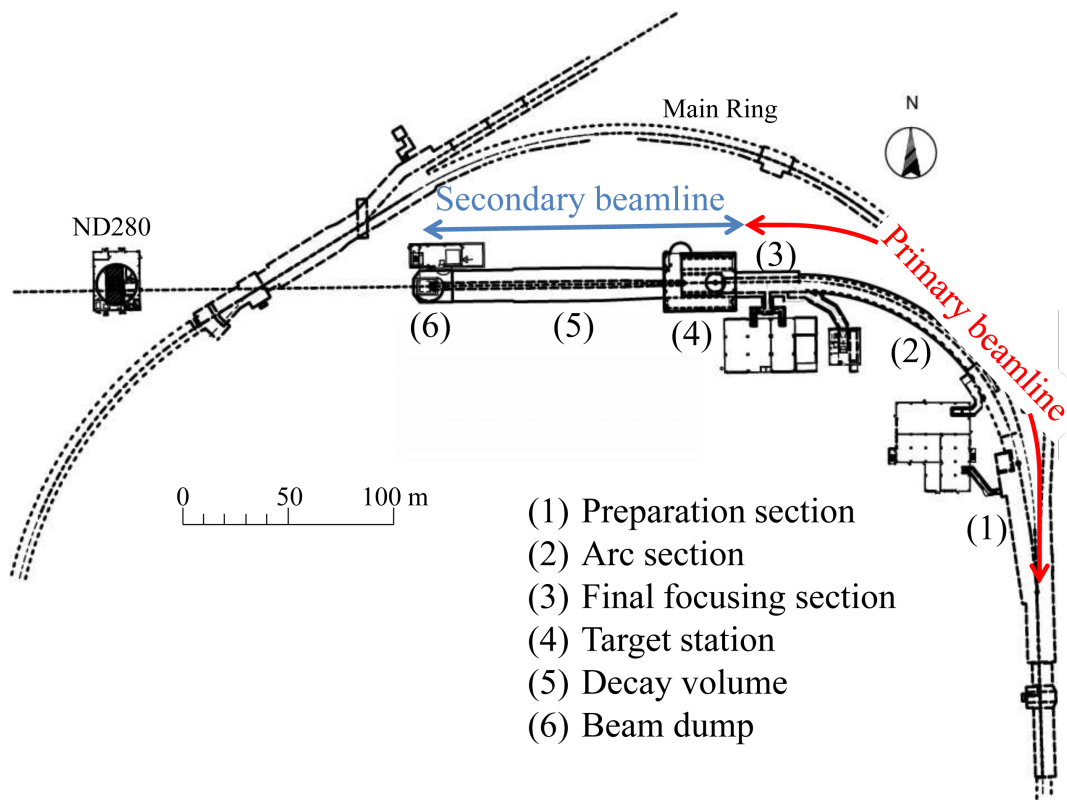


図 2.5: ニュートリノビームライン

MR から送られてきた陽子ビームは一次ビームラインを通り、ターゲットに衝突し、 π 中間子を生成する。その π 中間子が後述の崩壊トンネルで以下のように崩壊し、ミューニュートリノが発生する。



また、T2K 実験の特徴として、Off Axis Beam を世界で初めて採用した点があげられる。これは図 2.6 にあるようにニュートリノビームの中心軸を検出器であるスーパーカミオカンデの方向から僅かにずらすというものである。ニュートリノビームのエネルギーと Off Axis の角度は以下のような関係式によって表され、この角度を調整することによりエネルギーの値を変えることができる。また、図 2.7 にあるように角度によってエネルギー分布の鋭さを変えることもできる。そのため、T2K 実験ではニュートリノビームのエネルギーがニュートリノ振動が最大になり、その上エネルギーの広がり少なくなるように Off Axis の角度を 2.5 度とし、ニュートリノビームのエネルギーが 0.6GeV になるようにした。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.10)$$

なお、ここで E_ν はニュートリノビームのエネルギー、 E_π, p_π はそれぞれ π 中間子のエネルギーと運動量、 m_π, m_μ はそれぞれ π 中間子と μ 粒子の質量である。

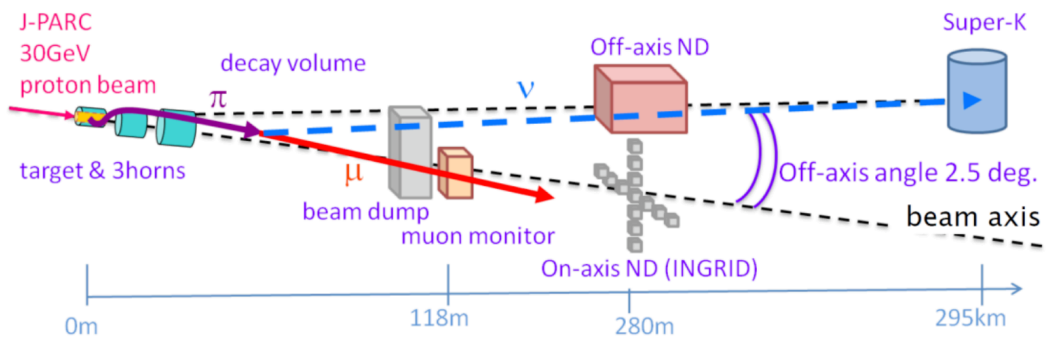


図 2.6: Off-Axis Beam

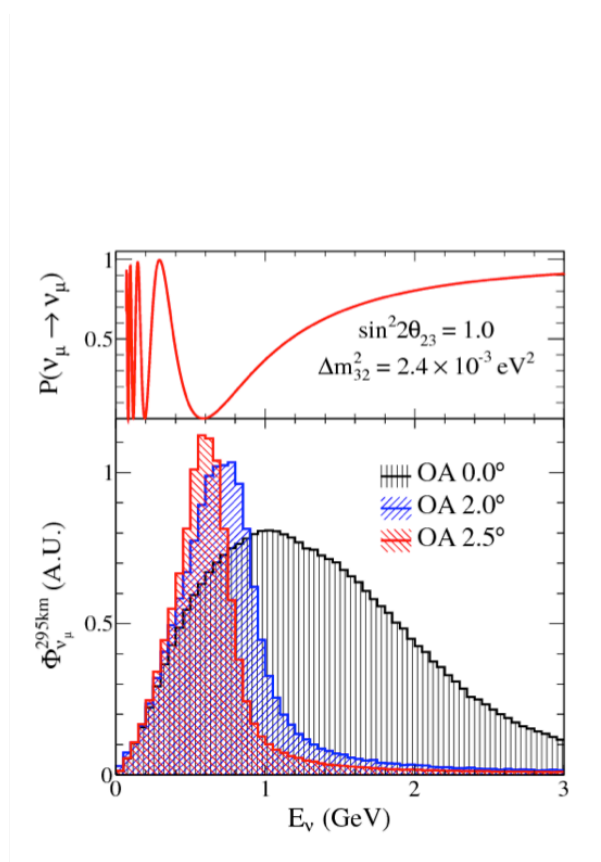


図 2.7: ニュートリノビームのエネルギーと角度の関係

以後、ニュートリノビームラインの装置の詳細を記述していく。

2.4.1 一次ビームライン

一次ビームラインは陽子ビームを 90° 曲げてスーパーカミオカンデの方向へと向きを調整し、ターゲットまで輸送をするためのビームラインである。図 2.8 にあるように一次ビームラインは大きく分けて、MR から陽子ビームが入射をする Preparation Section、陽子ビームを曲げるための Arc Section、最終的にターゲットへとビームを収束させる Final Focusing Section の 3つの区間に分かれている。このうち Preparation Section と Final Focusing Section は常伝導電磁石が、Arc Section は超伝導電磁石が用いられている。

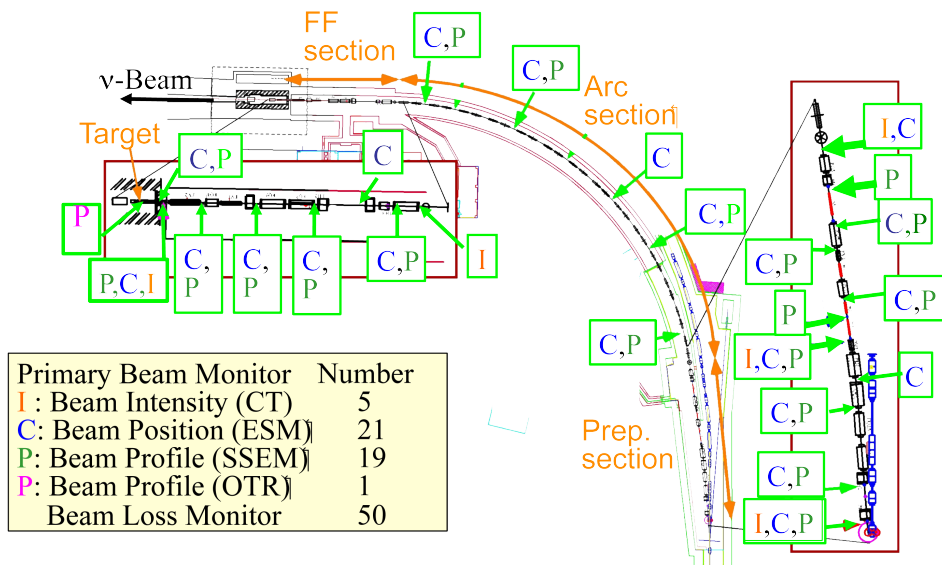


図 2.8: 一次ビームライン

2.4.2 陽子ビームモニター

前述の通り、一次ビームラインには陽子ビームをモニターする様々なモニター装置がある。ここではそれらを紹介していく。一次ビームラインにはビーム強度モニター (CT) が 5 台、ビーム位置モニター (ESM) が 21 台、ビームプロファイルモニター (SSEM) が 19 台、ビームロスモニター

(BLM) が 50 台、そしてビームプロファイルモニターである OTR が 1 台設置されている。それぞれの配置は図 2.8 のようになっている。

ビーム強度モニター CT

CT(Current Transformer) は一次ビームラインに 5 台設置されているビーム強度モニターである。配置は図 2.8 のようになっている。ビーム強度を測定し、ビームの安定性、輸送効率や POT(Proton on Target) の計算に用いられている。CT はトロイダルコイルを用い強磁性体をコアとした電流トランスとなっており、そこにビームが通過することによってビームが一次電流となり、トランスに二次電流が発生する。このトランスに発生した信号の電圧 V はビームの電流を I 、抵抗を R 、コイルの巻数を N とすると $V = \frac{IR}{N}$ となる。よって信号電圧がビームの電流に比例するため、それによってビーム強度が測れるというわけである。また、CT はビームの時間構造を測定することも可能である。



図 2.9: CT

ビーム位置モニター ESM

ESM(Electrostatic Monitor) は一次ビームラインに 21 台設置されているビーム位置モニターであり、ビーム重心の位置を測定している。ESM の原理や詳しい説明は後述するので、ここでは省く。

ビームプロファイルモニター SSEM

SSEM(Secondary Segmented Emission Monitor) は一次ビームラインに 19 台設置されているビームプロファイルモニターであり、ビームの幅、ビームの位置などを測定している。SSEM の原理や詳しい説明は ESM と同様に後述するので、ここでは省く。

ビームロスモニター BLM

BLM(Beam Loss Monitor) は一次ビームラインに 50 台設置されているモニターである。陽子ビームのロスを測るモニターであり、ビーム量の減少やビームライン機器の放射化を測定するのに用いられている。検出にはアルゴンベースのガスが封入されているワイヤープロポーションアルカウンターが用いられている。これによって放射線のエネルギーを測定し、そこからビームロスを求めている。

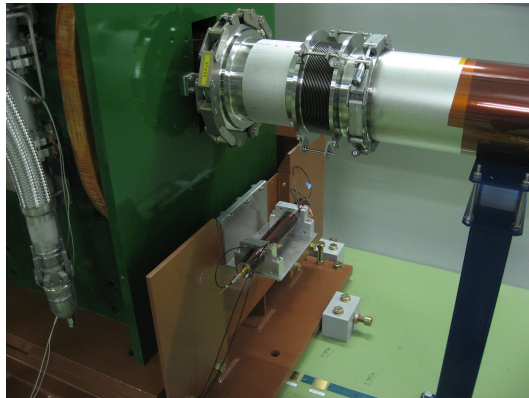


図 2.10: BLM

ビームプロファイルモニター OTR

OTR(Optical Transition Radiation Monitor) は一次ビームラインの最下流付近に 1 台設置されているビームプロファイルモニターである。図 2.11 のように 8 つのスロットルがあり、それぞれにフォイルがついている。フォイルはビームに対して 45 度傾いて取り付けられており、ビームがフォイルを通過する際に発生する遷移放射をミラーを用いて CCD カメラへ届け、CCD カメラを用いて測定をしている。このカメラに入射した光の強度からビームの形状などのビームプロファイルを求めることができる。

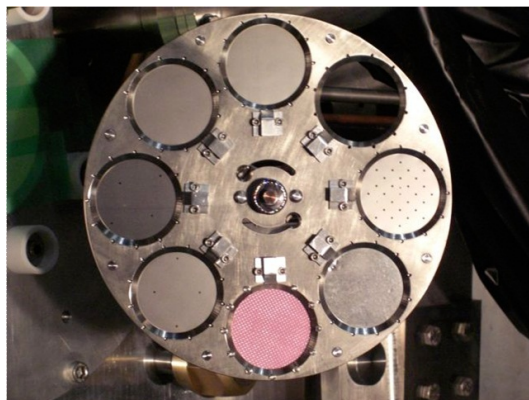


図 2.11: OTR

2.4.3 二次ビームライン

二次ビームラインでは、ターゲットから発生した π 中間子が崩壊する崩壊トンネルや磁場をかけ π 中間子を前方へと収束させる電磁ホーン、ニュートリノとともに発生する μ 粒子をモニターするミュオンモニター、ニュートリノ以外の粒子を吸収しニュートリノのみのビームを作るビームダンプなどがある。以下、図 2.12 に二次ビームラインの概要図を示す。

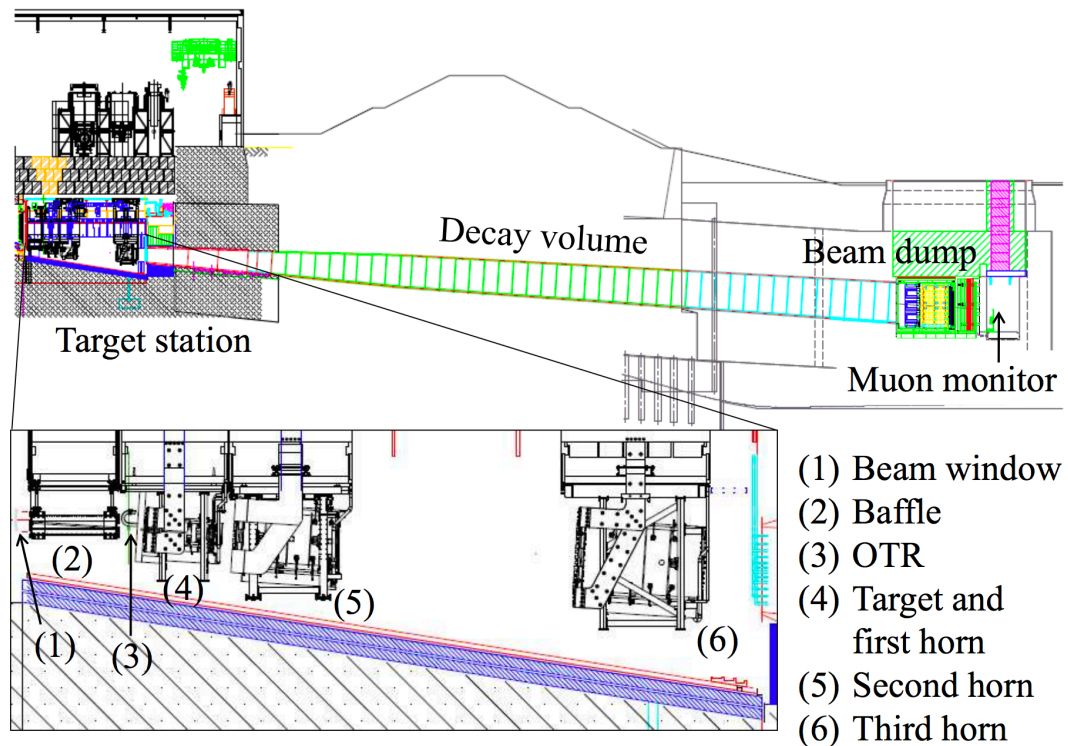


図 2.12: ターゲットステーション及び二次ビームライン

ターゲット

π 中間子を生成するターゲットには直径 26mm, 長さ 91.4cm の炭素ロッドが使われている。また、ターゲットは高温になるため、これを冷却するため、ターゲットの入っている容器はヘリウムガスによって冷却されている。

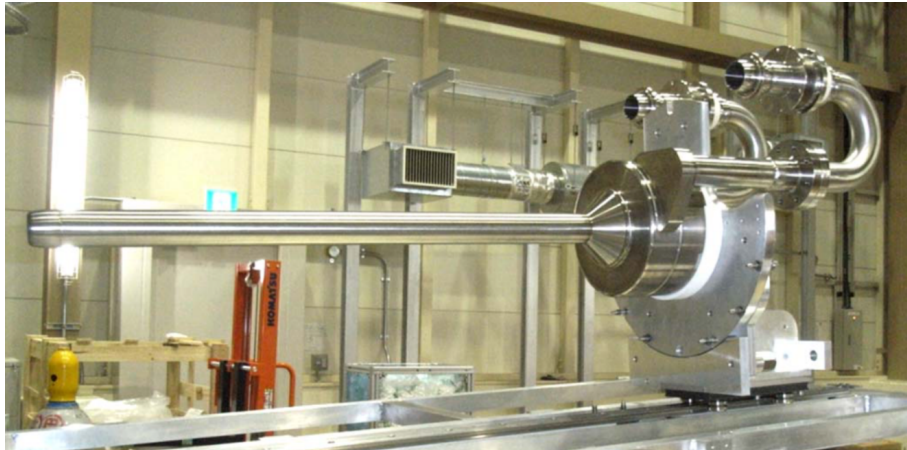


図 2.13: ターゲット

電磁ホーン

ニュートリノをスーパーカミオカンデへ集中して送るため、電磁ホーンによってターゲットで発生した π 中間子を前方へ収束させている。電磁ホーンはアルミニウム合金で出来ており、これに電流を流すことによって π 中間子を収束させるための磁場を内部に作る。電磁ホーンは第一ホーンから第三ホーンまでがあり、第一ホーンはターゲットの周り、第二、第三ホーンはターゲットの後ろに設置されており、それぞれ長さが1.5m, 2m, 2.5mとなっている。3つの電磁ホーンには $\pm 250\text{kA}$ の電流がかけられており、電流の向きによって π^- を前方へ送るか π^+ を前方へ送るかを決めることができる。これにより式2.8のようにニュートリノをスーパーカミオカンデへ送るか式2.9のように反ニュートリノをスーパーカミオカンデに送るかを選択できる。

崩壊トンネル

崩壊トンネルはその名の通り、 π 中間子がニュートリノと μ 粒子へと崩壊するトンネルである。長さは96mあり、ヘリウムガスによって満たされている。スーパーカミオカンデへと送られるニュートリノビームはここで生成される。

ビームダンプ

ビームダンプは、崩壊トンネルの下流にあり、ここで崩壊せずに残った π 中間子などのハドロンを吸収し、 $5\text{GeV}/c$ 以上のエネルギーを持った μ 粒子のみを通過させる。

ミュオンモニター

ミュオンモニターは、ターゲットから 118m の位置にある検出器で、その名の通り μ 粒子を検出するモニターである。 μ 粒子の方向や強度を測定することにより、ニュートリノビームの方向を測定している。ミュオンモニターはシリコン PIN フォトダイオードとイオンチェンバーの 2 つの検出器からなっており、ビームの上流側にシリコン PIN フォトダイオード、下流側にイオンチェンバーが設置されている。



図 2.14: ミュオンモニター

2.5 前置検出器

T2K 実験の前置検出器はターゲットから 280m の位置にあり、Off Axis Beam を検出する ND280 と On Axis Beam を検出する INGRID の 2 つの検出器から成り立っている。

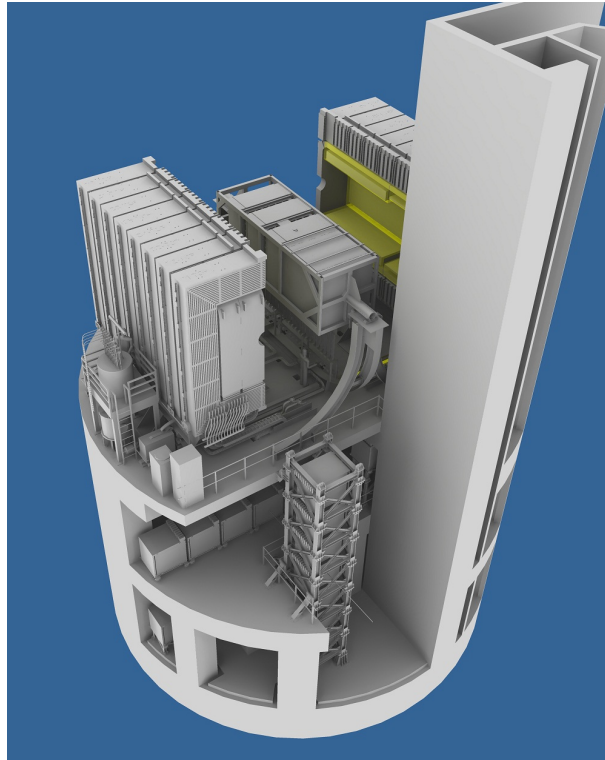


図 2.15: 前置検出器

2.5.1 ND280

ND280 [15] はスーパーカミオカンデへと向かう Off Axis のニュートリノビームを測定している検出器で、ニュートリノ振動を起こす前のニュートリノのフラックスやエネルギースペクトルを測定している。ND280 は図 2.16 のように、P0D(Pi-zero Detector)、TPC(Time Projection Chamber)、FGD(Fine Grained Detector)、ECAL(Electromagnetic Calorimeter)、SMRD(Side Muon Range Detector) の検出器がソレノイド電磁石に囲まれている。このマグネットは CERN の UA1 実験で使われてたものが転用されており、検出器全体に 0.2T の磁場をかけている。以下でそれぞれの検出器について述べる。図 2.16 では左側がターゲット側のビーム上流、右側がビーム下流となっている。

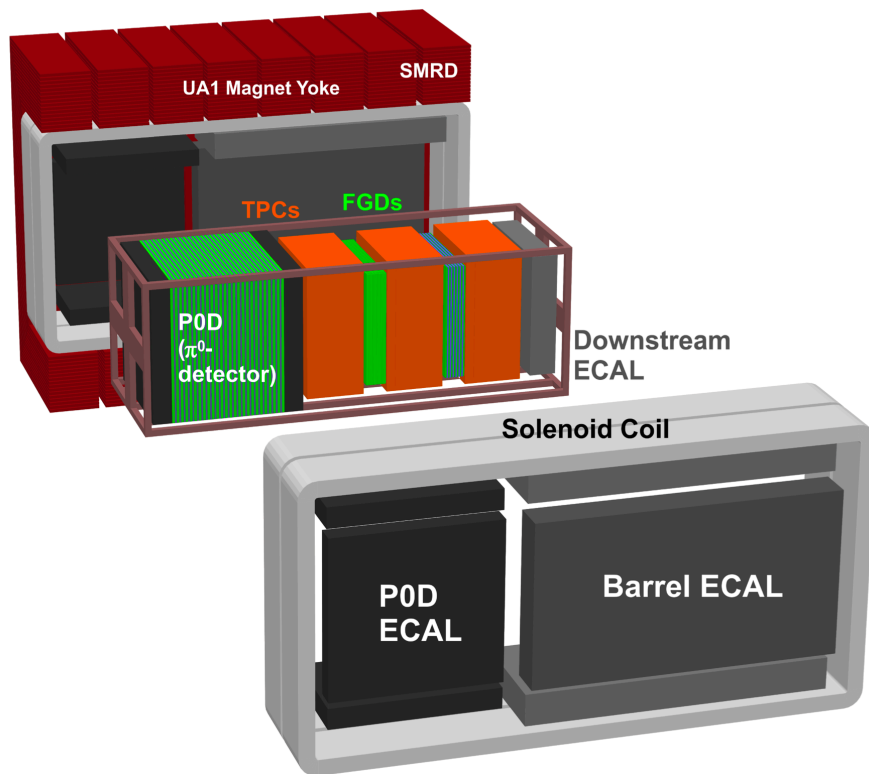


図 2.16: ND280

- P0D(Pi-zero Detector)

P0D は最上流にある検出器で π^0 生成の反応を測定している。x 方向 y 方向に並べたプラスチックシンチレータ、鉛層、水ターゲットを交互に配置した構造になっており、 π^0 生成断面積が測定できる。

- TPC(Time Projection Chamber)

T2K 実験では 3 台の TPC が用いられており、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子が磁場によって曲げられる曲率より運動量を測定している。運動量からニュートリノのエネルギーを再構成できる。またエネルギー損失を測ることもできるため、そこから荷電粒子の種類の識別も行なっている。

- FGD(Fine Grained Detector)

FGD はニュートリノの反応点の検出と低エネルギー粒子のトラッキング、識別を目的とした検出器である。この検出器は棒状のシンチレータを x 方向 y 方向それぞれに並べた構造をしており、それを積層構造にして荷電粒子の飛跡を側面、上面の二次元イメージとして記録できる。

- ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

ECALはマグネット内の最外殻に存在し、上記のマグネット内の検出器で起こったニュートリノ反応による電子や γ 線のエネルギーを測定する検出器である。ECALは抽出型のシンチレータを用いており、最下流にあるDS-ECA(Down Stream ECAL)、P0Dの側面に設置されているP0D-ECAL、TPCとFGDの側面に設置されているBarrel-ECALによって成り立っている。

- SMRD(Side Muon Range Detector)

SMRDは ν_μ の荷電カレント反応から、ニュートリノのエネルギースペクトルを求めるための検出器である。マグネットヨークの間にプラスチックシンチレータが設置されている。

2.5.2 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) [16]はビームの中心軸方向であるOn Axisビームを測定する前置検出器で、ニュートリノビームの方向や安定性を測定している検出器である。構造としては図2.17の右図のようなモジュールが左図のようにビームの中心軸を中心に14台が十字状に並べた形をしている。一つ一つのモジュールは鉄ターゲット9枚とトラッキングプレート11枚が交互に並んでいる構造になっているトラッキングプレートはそれぞれX方向Y方向に並べられた2層のプラスチックシンチレータで出来ている。

ニュートリノと鉄ターゲットとの荷電カレント反応により、 μ 粒子が発生する。それをトラッキングプレートで検出し、ニュートリノビームの中心を再構成することによってニュートリノビームの方向を測定している。



図 2.17: INGRID

2.6 後置検出器

後置検出器としてはスーパーカミオカンデが用いられている。

2.6.1 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ [?] は地表から 1000m の地下にあるタンクに 5 万トンの純水と 11,129 本の 20inch の光電子増倍管、1885 本の Veto 用の光電子増倍管からなる水チェレンコフ検出器であり、ターゲットから Off Axis ビームの方向に 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に位置する。

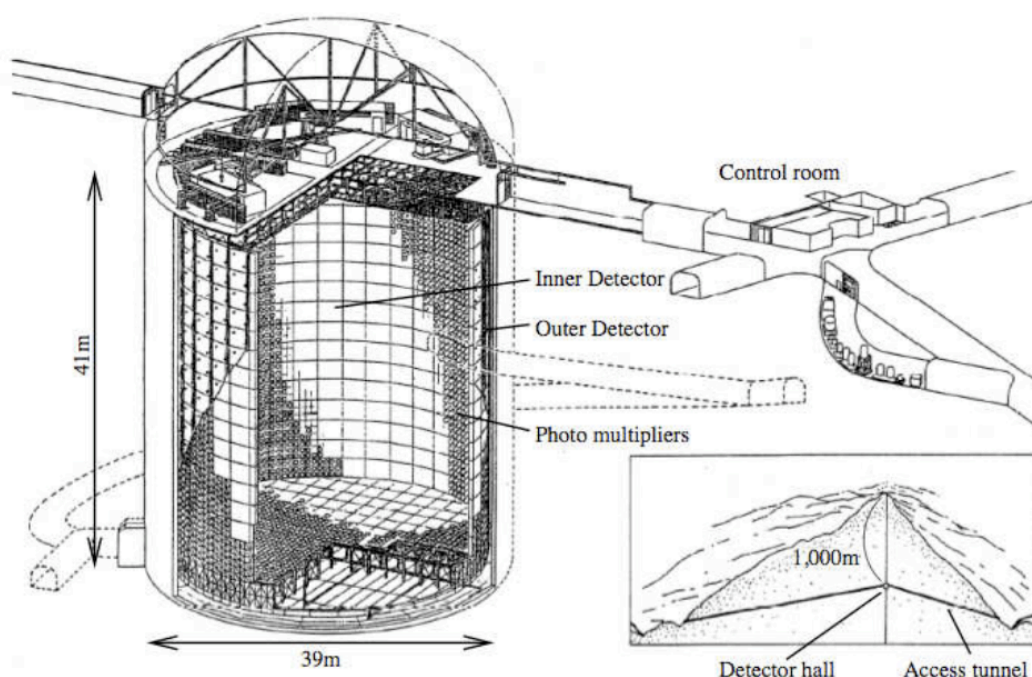


図 2.18: スーパーカミオカンデ

ニュートリノがターゲットである水にぶつかり、荷電粒子が生成されると円錐状のチェレンコフ光が放射される。放射されたチェレンコフ光は、タンクの壁面に設置された光電子増倍管によってリングイメージとして検出され、このリングから飛来したニュートリノの種類、方向、生成点、エネルギーなどを再構成している。また、J-PARC で生成されたニュートリノかどうかを識別するために、GPS(Global Positioning System) を用いてニュートリノビームが J-PARC で発射された時刻とスーパーカミオカンデで検出した時刻を計測しており、その時刻の差とニュートリノビームの飛行時間からイベントの識別を行っている。

図 2.19 はニュートリノが観測されたときのイベントディスプレイの図だが、左の図 2.19a のようにミューニュートリノ事象ではリングの像がシャープに検出できる。一方、電子ニュートリノの

場合は電子が電磁シャワーを起こすため、右の図 2.19b のようにリングは広がりを持った不明瞭な形になる。スーパーカミオカンデはこのリングのイメージの違いによりミューニュートリノ事象と電子ニュートリノ事象の区別を行っている。

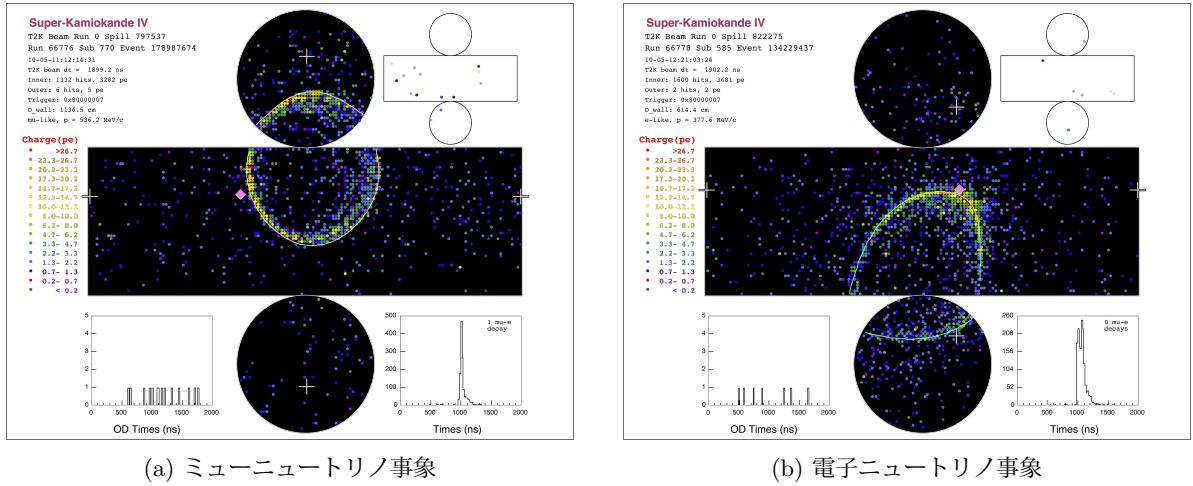


図 2.19: スーパーカミオカンデで観測したニュートリノ事象のイベント

第3章 本研究の目的

T2K 実験では、レプトンセクターに於ける CP 対称性の破れの発見を目指しており、多くの統計量を必要としている。そのため J-PARC の陽子ビームの大強度化が進められており、ニュートリノビームライン上の陽子ビームモニターも大強度ビームに対応する必要がある。ビーム位置モニター ESM は陽子ビームの位置を常時測定しているモニターであり、大強度化に伴うビームによる機器の破損や事故のリスクの回避に役立ち、陽子ビームをターゲットまで安定的に運ぶのに必要な装置である。また、ESM は静電誘導型であり、ビームロスを生じずに陽子ビームの位置を測定することができるため、大強度ビームに伴いより重要性が増す。特に、最下流の ESM では SSEM、OTR と共にターゲットへのビームの入射角を測定している。

一方で現在 ESM の位置分解能は正確に把握されておらず、どの程度の精度でビーム中心位置を測定できるのかが分かっていない。そのため、まず現在の ESM の位置分解能を求め、陽子ビームの位置がどれほど正確に測定できているかを調べる。

J-PARC の RCS と MR をつなぐビームラインである 3-50BT にはニュートリノビームラインで使われている ESM と同じ形状のビーム位置モニターが使用されており、このビーム位置モニターでは位置分解能が、 $100\mu\text{m}$ 以下を達成している [18]。故に、ニュートリノビームラインの ESM でも少なくとも $100\mu\text{m}$ 以下の位置分解能は得られると考えられる。そこで、位置分解能の検証に加え、検証結果から位置分解能の改良も試みる。

以前より、位置分解能が悪いと推定されている ESM もあり、これは最下流付近の ESM である。最下流付近の ESM はターゲットやビームウィンドウなどから散乱された電子によるノイズが混入するため、それにより位置分解能の悪化が推測されてる。また、これらの ESM は前述の通りターゲットへの入射角の測定に用いられており、またターゲットにビームが当たる角度によってはターゲットの破損につながることもあるため、これらの ESM の位置分解能の改良は入射角の測定の精度向上につながり、ターゲット破損のリスクの回避にもつながる。

第4章 ビーム位置モニターの位置分解能の検証と改良

4.1 ビーム位置モニター ESM について

ESM(Electrostatic Monitor) は前述の通り、一次ニュートリノビームラインにあるビーム位置モニターで、全部で 21 台が設置されている。配置は図 4.3 のようになっており、以後の説明では最上流を ESM1、最下流を ESM21 として上流から番号を振ることにする。

ESM はビームパイプの内側の上下左右の 4 方向に長方形の電極のプレートが取り付けられている構造になっている。図 4.1 が ESM の内側の写真となっており、模式図化すると図 4.2 のようになる。一枚の電極プレートはビームパイプの 80° の範囲を覆っており、ESM のビーム方向の長さは設置されている場所によって異なり、125mm、160mm、210mm の 3 種類が存在する。これは単純にスペース上の都合により変えてあるだけで、125mm の ESM は常伝導区間にある ESM1 ESM10 と ESM16 20 の 15 台、210mm の ESM は超伝導区間にある ESM11 ESM15 の 5 台、そしてターゲット直前の ESM である ESM21 は唯一 160mm の長さとなっている。

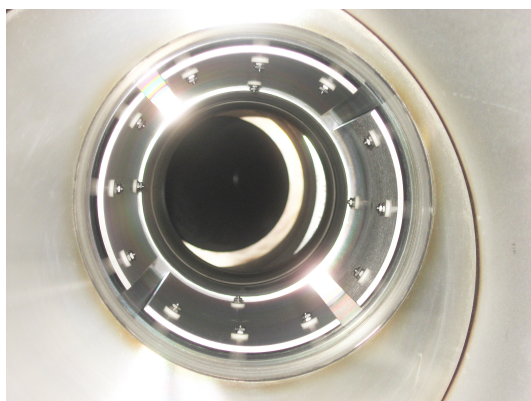


図 4.1: ESM

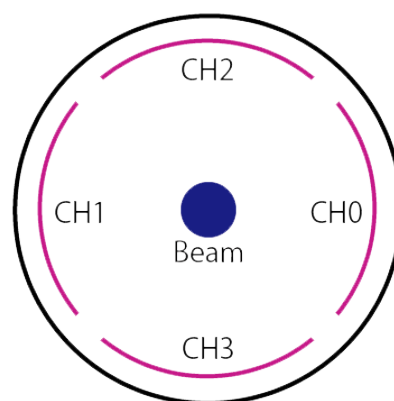


図 4.2: ESM の模式図

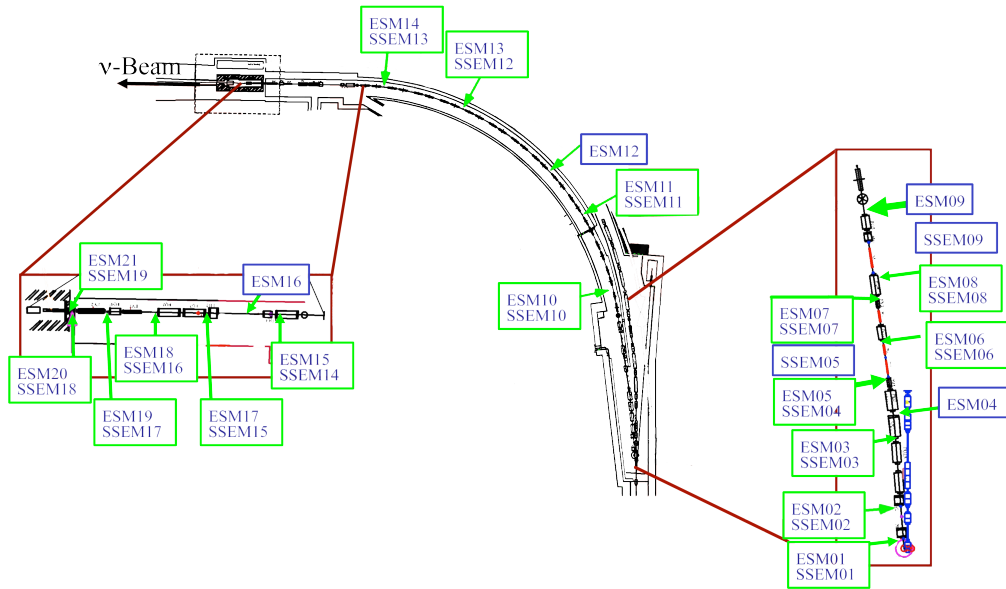


図 4.3: ESM と SSEM のビームライン上の配置図

また、ESM4、ESM5、ESM19、ESM20 はビーム軸を回転軸として 45° 傾いて取り付けられており、例えば垂直方向では図 4.4 のように上半分にある 2 枚の電極と下半分の 2 枚の電極をそれぞれ上下の電極として位置を測定している。これは、かつて ESM の電極プレートの子端子部分に陽子ビームがぶつかって真空がリークをしたことがあるためである。その対策としてこれらのベンディング・マグネットの前後にある ESM に関して水平方向にプレートが来ないようにし、仮に陽子ビームがぶつかってもリークしないような設計となっている。

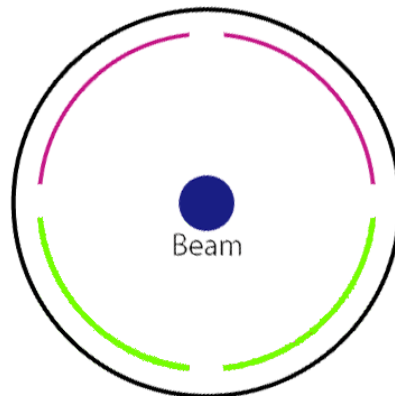


図 4.4: 傾いて取り付けられた ESM の模式図

陽子ビームが ESM の中を通過すると、陽子ビームによって電極に電荷が誘起され、それぞれの電極に誘起された電荷量の差からビーム重心の位置を求めることが出来る。具体的には、例えば水平方向だと近似的に図 4.2 のチャンネル番号を用いて 4.1 式のようになる。

$$x \propto \frac{CH0 - CH1}{CH0 + CH1} \quad (4.1)$$

ESM で得られた電気信号は積分アンプを通され、水平方向同士の差（図 4.2 の CH0-CH1）と和（CH0+CH1）、垂直方向の同士の差（CH2-CH3）と和（CH2+CH3）のデータとしてビット数 12bit、サンプリングレート 160MHz の FADC を用いて取得している [14]。ビーム中心位置の測定にはこの波形のそれぞれのバンチのピークの位置が用いられている。ESM で取得した積分波形は、差が図 4.5、和が図 4.6 のようになっている。図 4.5 では左右の電極の差の波形となっており、波形の 8 個あるピークそれぞれが各バンチの信号に対応しており、プラスとマイナスの両方に存在するのはビームの中心位置がビームパイプの中心の左右どちらを通ったかによるものである。一方、図 4.6 は左右の電極の和となっており、この波形プラス方向のピークとなっている。

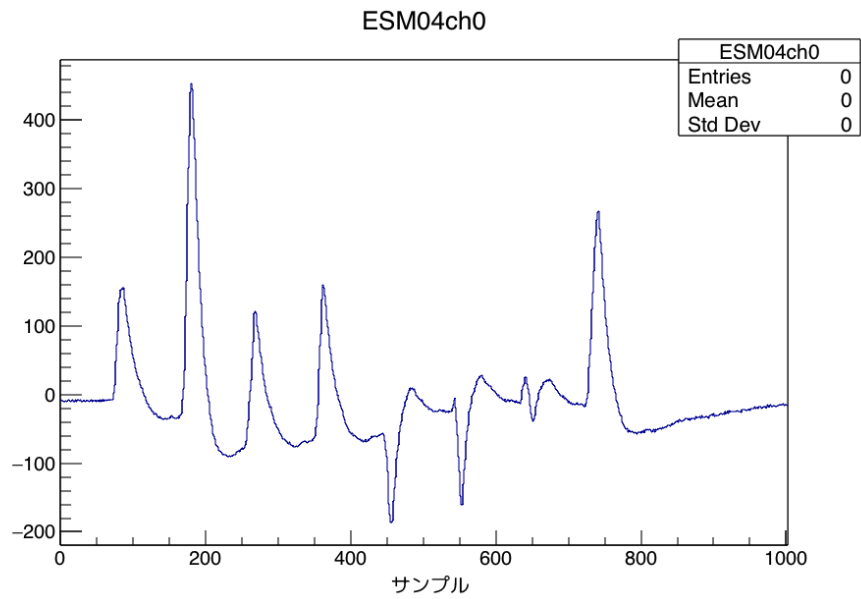


図 4.5: ESM の水平方向の電極の差の積分波形

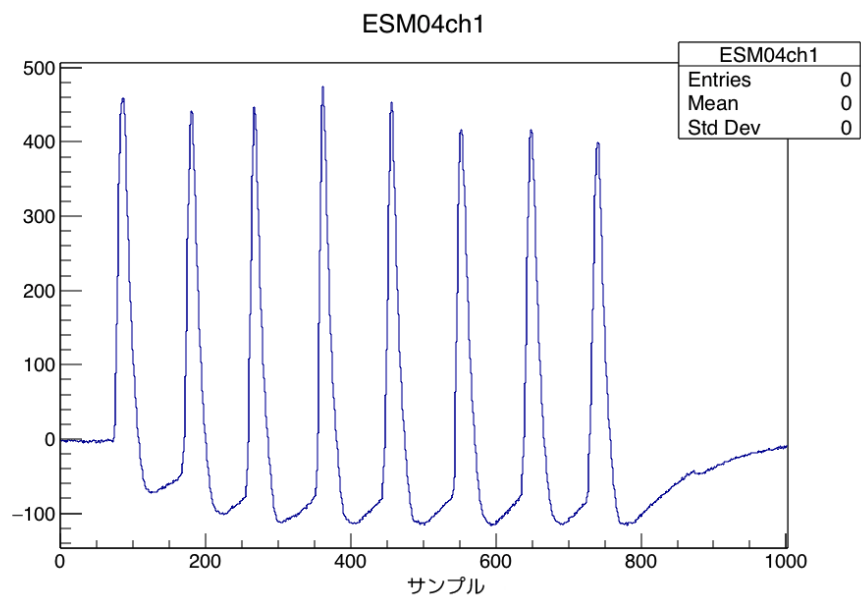


図 4.6: ESM の水平方向の電極の和の積分波形

また、設計時の位置分解能の要求は $450\mu\text{m}$ [14] となっている。しかし、前述の通り現在の位置分解能は明らかになっていないため、以下で明らかにしていく。

4.2 ビームプロファイルモニター SSEM について

陽子ビームの中心位置を測定しているもう一つのモニターとして、SSEMがある。

SSEM(Secondary Segmented Emission Monitor)は前述の通り、一次ビームラインに19台設置されているビームプロファイルモニターである。配置は図4.3のようになっており、ESM同様に上流からSSEM1～SSEM19と番号が振られている。

SSEMはストリップ上にチタンの薄膜が並んであり、それをビームが通過することにより2次電子が放出され、それを測定することにより、ビームの幅やビーム位置を測定している。チタン薄膜は厚さ $5\mu\text{m}$ 、幅2mm, 3.5mm, 5mmの3種類のストリップで1mm間隔で22本が並んでいる。ビーム中心の位置は各ストリップの二次電子の量をガウス関数でfitすることにより $10\mu\text{m}$ 程度の位置分解能が得られる[14]。原理を図4.8に示した。

また、図4.9はSSEMで測定したビームプロファイルの一例である。各ストリップの値が青い横棒で示してあり、それをガウス関数でフィットしている。このフィット感数から、ビームの幅やビーム中心位置を求めることができる。

SSEMは上記の通りESMより良い位置分解能でビーム中心の位置を測定できる。しかし、一方でビームと直接相互作用するためビームロスが多く生じる。そのため、SSEMでの測定はPhysics Runの直前に行うビームチューニングのみであり、定常運転の物理測定ではビームラインの外へ引き出せるようになっている。実際のPhysics Runでは最下流にあるSSEM19のみがビームラインの中に残っており、ビームプロファイルの測定をしている。この駆動機構については後に詳しく述べる。



図 4.7: SSEM

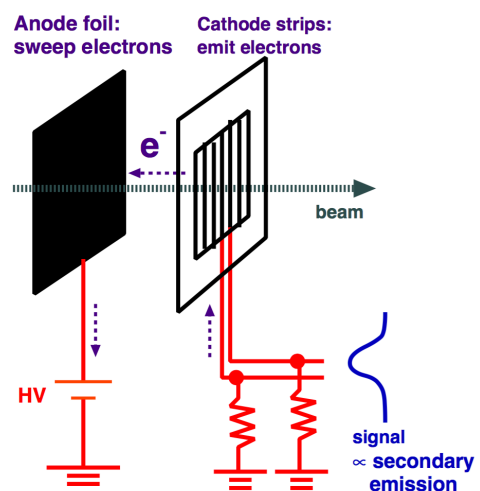


図 4.8: SSEM の原理

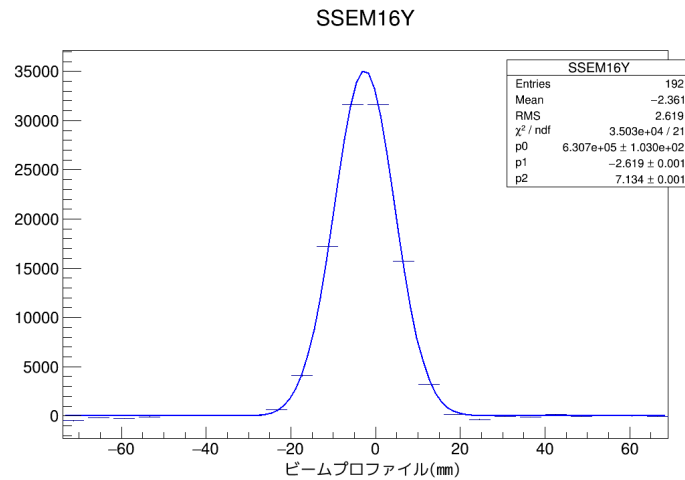


図 4.9: SSEM16 の垂直方向のビームプロファイル

4.3 ESM の位置分解能の検証

ここでは、ESM の位置分解能の検証方法と検証過程及び、その結果としての現在の ESM の位置分解能の推定値について述べていく。

4.3.1 ESM の位置分解能の検証方法

位置分解能を調べるには、実際の正確な位置に対して測定結果のバラつきがどの程度であるかがわかれば良い。そこで、ESM の位置分解能を求めるにあたっては SSEM で測定されたビーム中心を利用する。前述の通り、殆どの SSEM と ESM はペアとなっており、SSEM の位置分解能は $10\mu\text{m}$ 程度と分かっている。また想定される ESM の位置分解能よりも良いため、SSEM で測定されたビーム中心を正確なビーム中心と仮定する。そして、その値と ESM で測定されたビーム中心とを比較することによって、ESM の位置分解能を検証する。

しかし、ESM と SSEM でのビーム中心の測定値を直接的に比較することはできない。前述の通り、SSEM は全ての Run で稼働しているわけではなく、SSEM19 以外は Physics Run 直前のビームチューニング時の 50 スピル（以後、便宜上 SSEM Run と呼ぶことにする）のみでしかインストールされていない。一方 ESM は、SSEM Run では、SSEM にビームが当たることにより、電子が散乱されノイズとなってしまい、その影響で測定が行えない。この時の ESM の波形は図 4.10 のようになる。前述の図 4.5 と比べるとバンチの形が完全になくなってしまっているのがわかる。

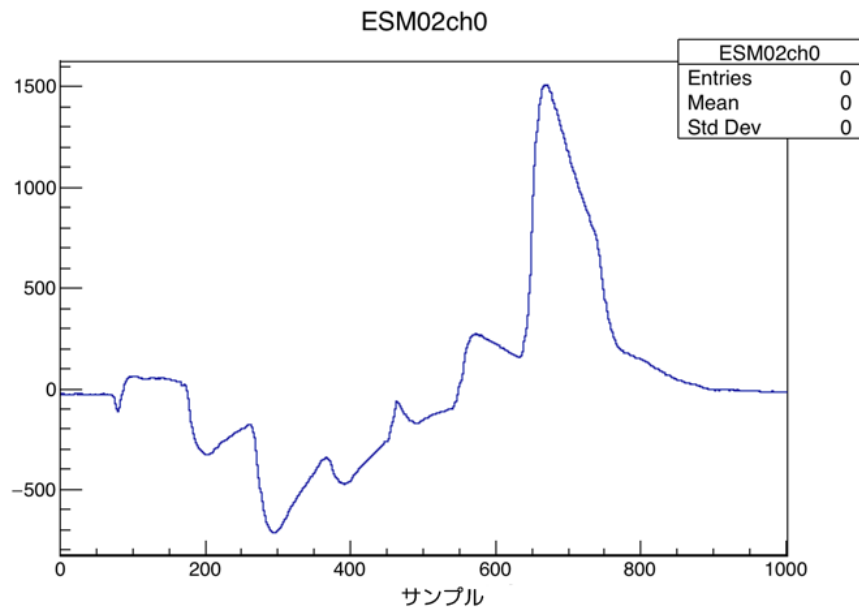


図 4.10: SSEM 挿入時の ESM の波形

また、以上より ESM と SSEM の測定状況を表 4.1 にまとめた。

表 4.1: Run の種類と ESM、SSEM の測定状態

	SSEM Run	Physics Run
Run の特徴	Physics Run 前の 50 スピルのみ	物理測定時の Run
ESM	未測定	測定
SSEM1-18	測定	未測定
SSEM19	測定	測定

表 4.1 からわかるように、ESM と SSEM は SSEM19 を除いて同時測定を行うことが出来ない。そこで、両者の比較をするためにどちらの Run でも測定を行っている SSEM19 を基準として利用する。

以下に簡単にその方法をまとめる。なお、以下の過程では特記がない限り、説明として Physics Run として 2017 年 3 月 17 日の Run730029 を SSEM Run としてその直前の Run730028 を用いることにする。

1. SSEM Run に於いて、50 スピル分の SSEM19 とその他の SSEM それぞれの相関を求める。
2. 求めた相関を Physics Run の SSEM19 でのビーム中心に適用させ、Physics Run での SSEM19 のビーム中心から他の SSEM のビーム中心を再構成する。
3. 再構成された SSEM のビーム中心の値に対して、それとペアとなっている ESM のビーム中心の値のばらつきを調べ、位置分解能を得る。

まずは SSEM Run にて、SSEM19 とその他の SSEM の相関を求めると水平方向は図 4.11~ 図 4.27 垂直方向は図 4.11~ 図 4.27 のようになる。また以下では水平方向の SSEM の SSEMnX (n は SSEM の番号)、垂直方向の SSEM を SSEMnY と表す。これらをそれぞれ一次関数で Fit し、SSEM19 との相関を求めた。水平方向では図 4.22 と図 4.23 をみると SSEM12,SSEM14 と SSEM19 の相関のみが逆相関となっている。垂直方向では特に SSEM19 から離れている上流の SSEM との相関ははっきりとはみられない。しかし、Fit 関数の傾きをみてみるとわかるが、ビームのばらつきが垂直方向ではかなり少なく、殆ど傾きがゼロであり、SSEM19 でのビーム位置によらず殆ど定数とみなせる場合が多い。

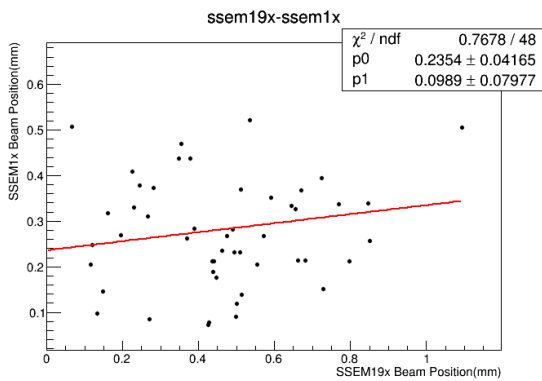


図 4.11: SSEM19X と SSEM1X の相関

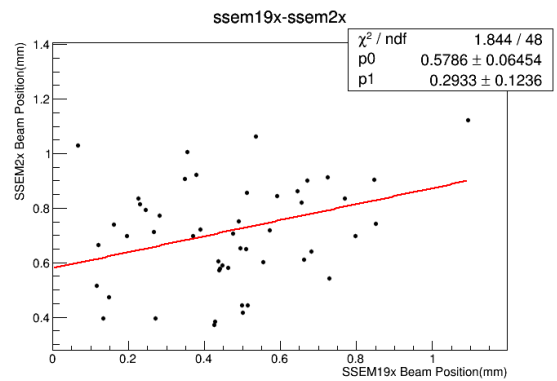


図 4.12: SSEM19X と SSEM2X の相関

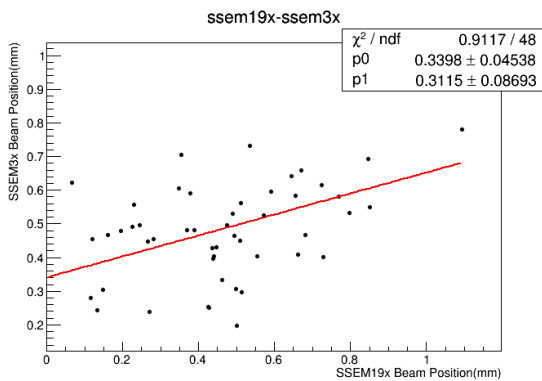


図 4.13: SSEM19X と SSEM3X の相関

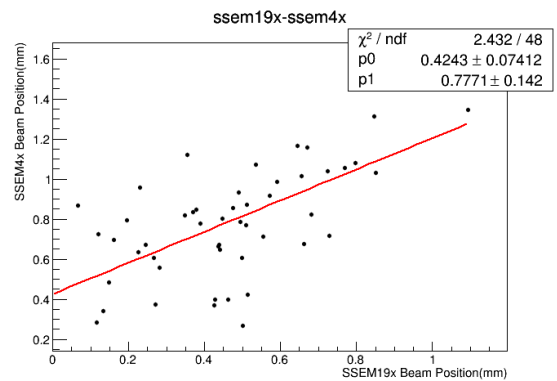


図 4.14: SSEM19X と SSEM4X の相関

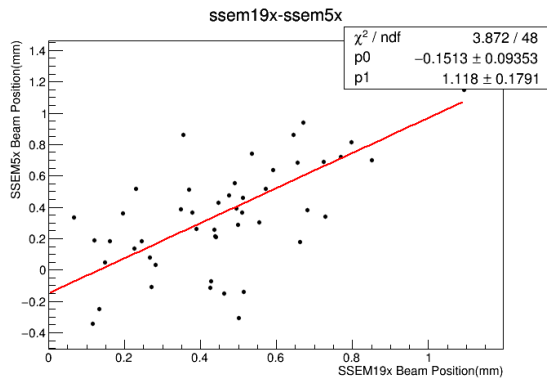


図 4.15: SSEM19X と SSEM5X の相関

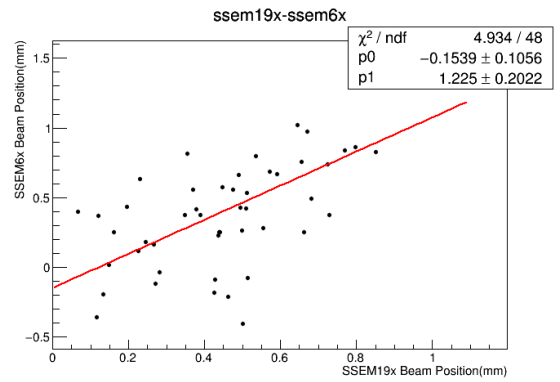


図 4.16: SSEM19X と SSEM6X の相関

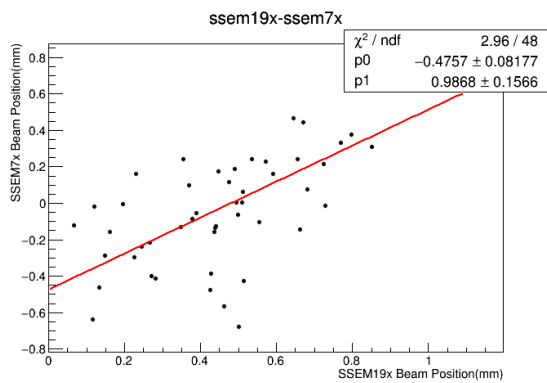


図 4.17: SSEM19X と SSEM7X の相関

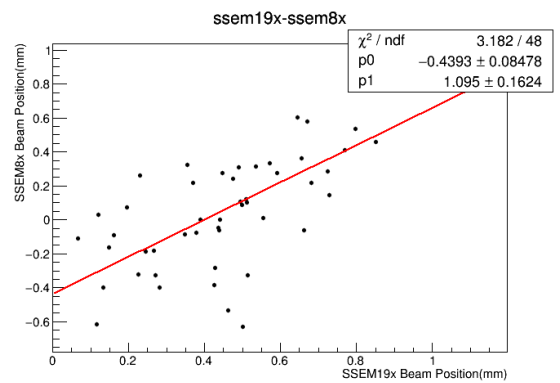


図 4.18: SSEM19X と SSEM8X の相関

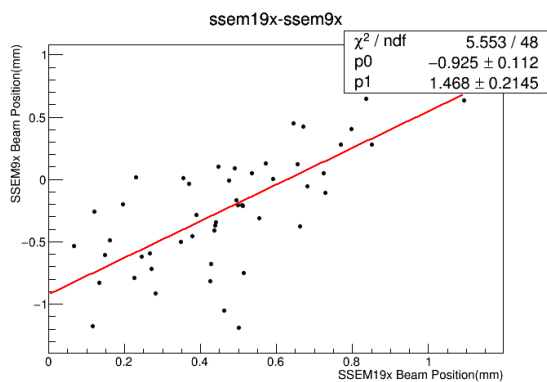


図 4.19: SSEM19X と SSEM9X の相関

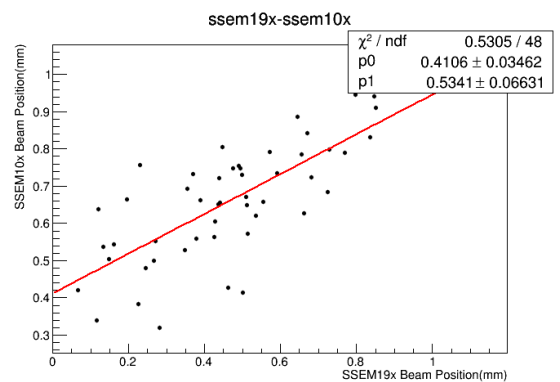


図 4.20: SSEM19X と SSEM10X の相関

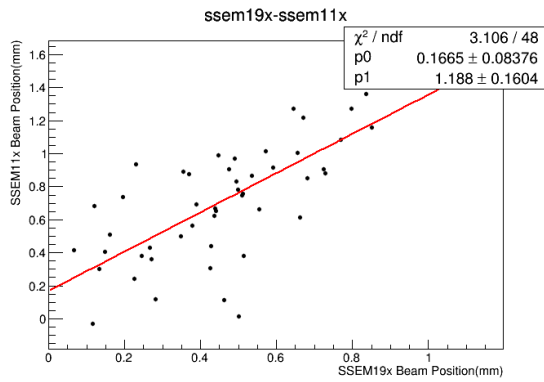


図 4.21: SSEM19X と SSEM11X の相関

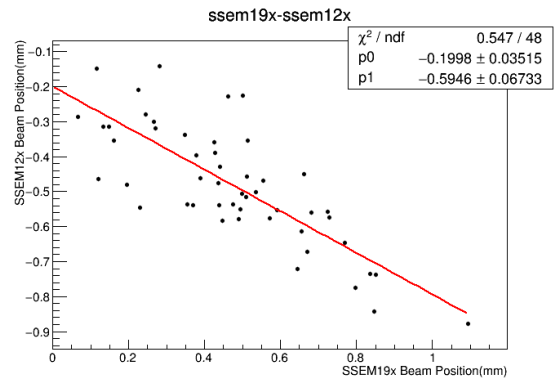


図 4.22: SSEM19X と SSEM12X の相関

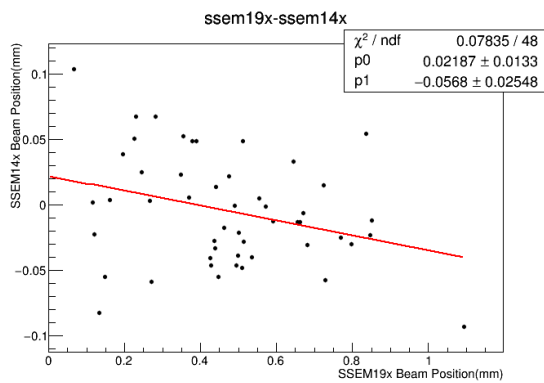


図 4.23: SSEM19X と SSEM14X の相関

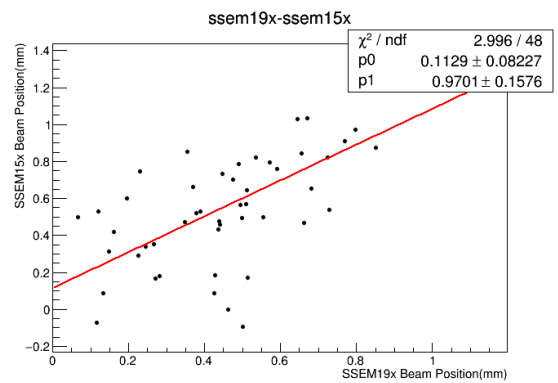


図 4.24: SSEM19X と SSEM15X の相関

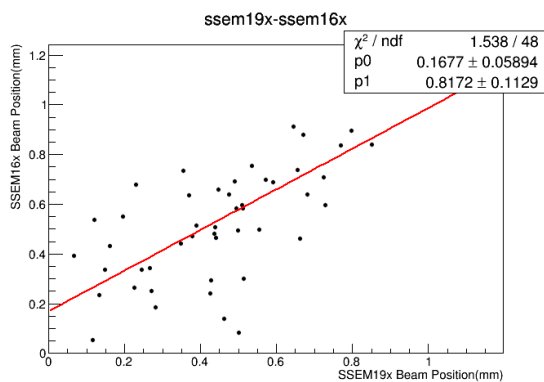


図 4.25: SSEM19X と SSEM16X の相関

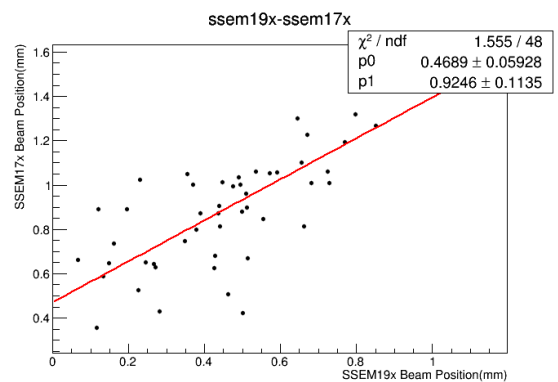


図 4.26: SSEM19X と SSEM17X の相関

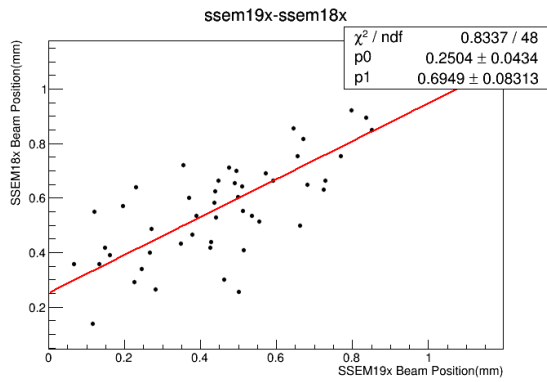


図 4.27: SSEM19X と SSEM18X の相関

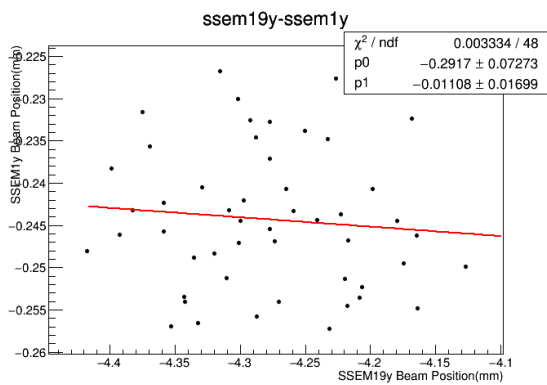


図 4.28: SSEM19Y と SSEM1Y の相関

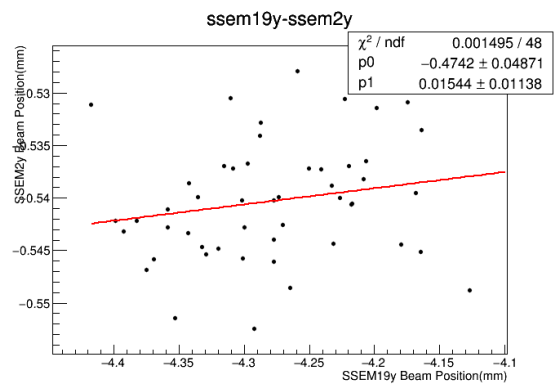


図 4.29: SSEM19Y と SSEM2Y の相関

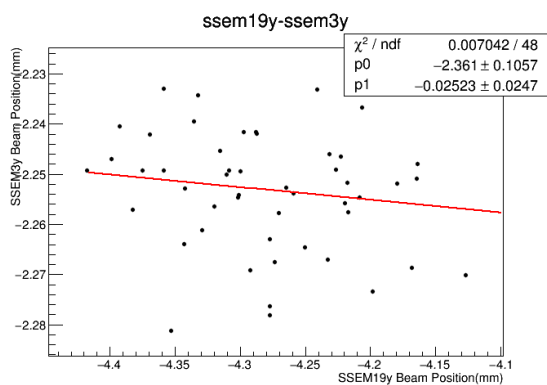


図 4.30: SSEM19Y と SSEM3Y の相関

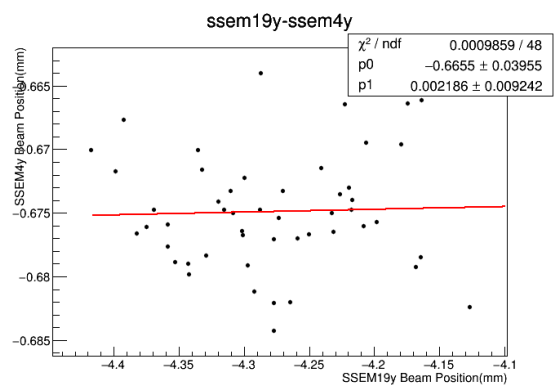


図 4.31: SSEM19Y と SSEM4Y の相関

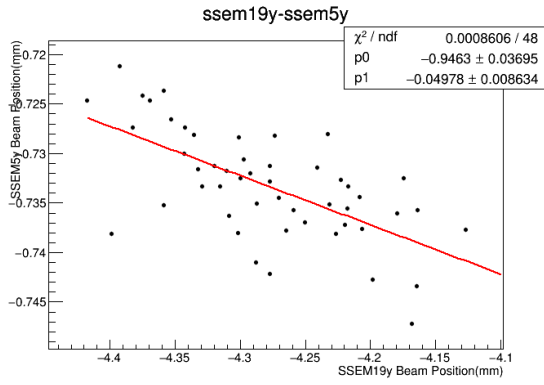


図 4.32: SSEM19Y と SSEM5Y の相関

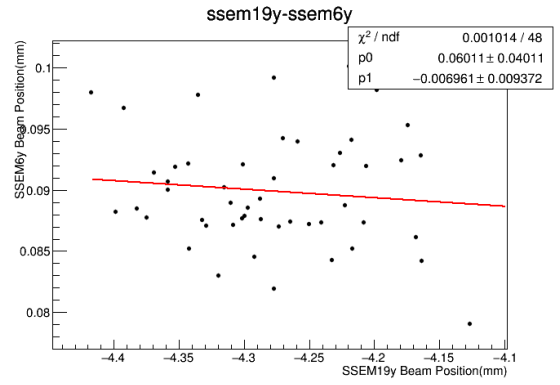


図 4.33: SSEM19Y と SSEM6Y の相関

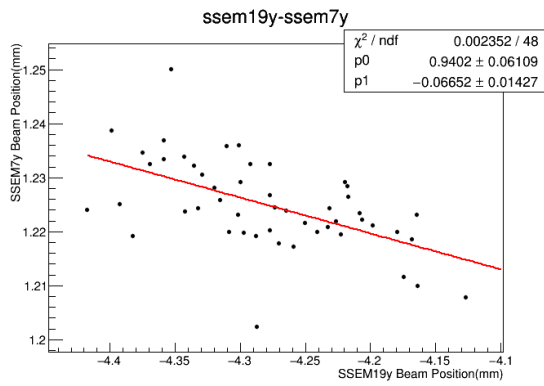


図 4.34: SSEM19Y と SSEM7Y の相関

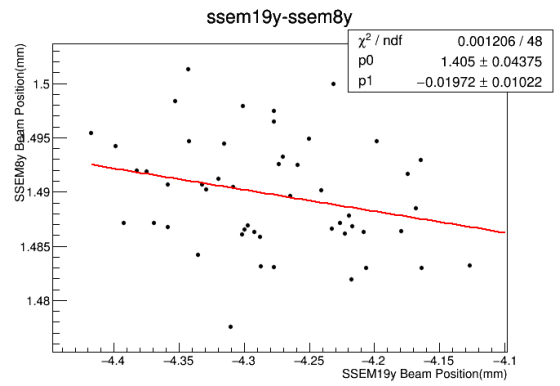


図 4.35: SSEM19Y と SSEM8Y の相関

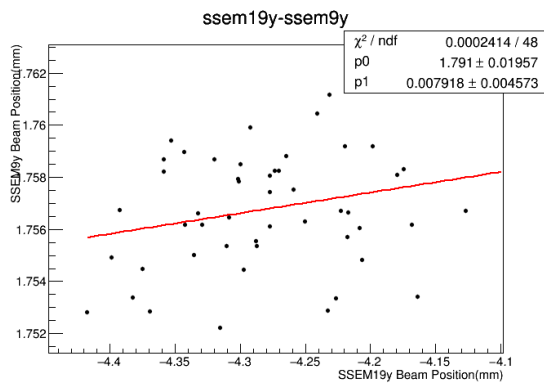


図 4.36: SSEM19Y と SSEM9Y の相関

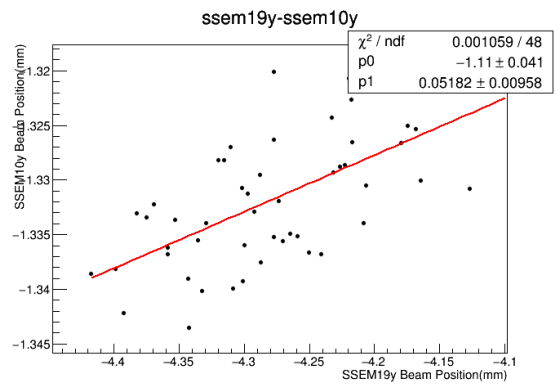


図 4.37: SSEM19Y と SSEM10Y の相関

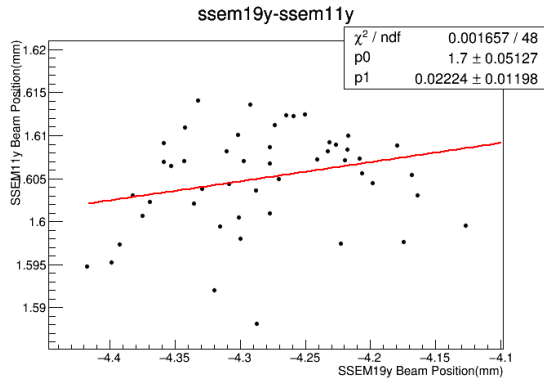


図 4.38: SSEM19Y と SSEM11Y の相関

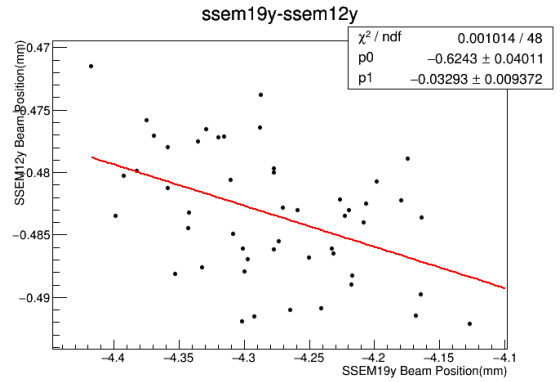


図 4.39: SSEM19Y と SSEM12Y の相関

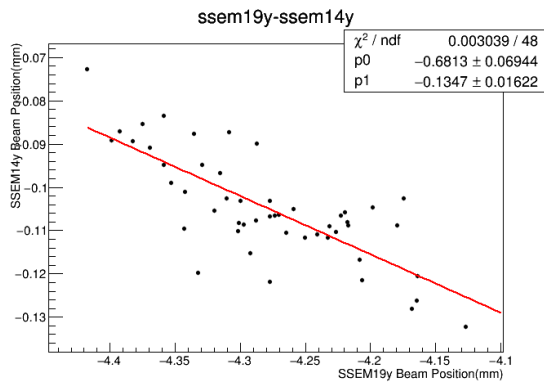


図 4.40: SSEM19Y と SSEM14Y の相関

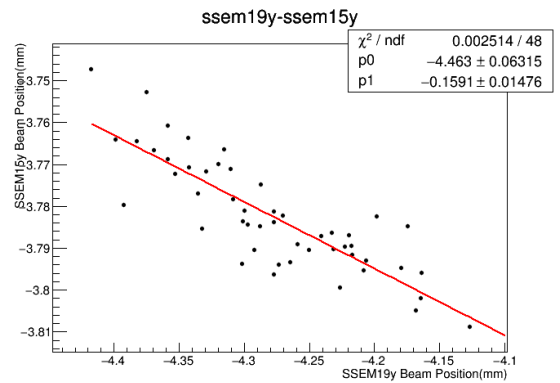


図 4.41: SSEM19Y と SSEM15Y の相関

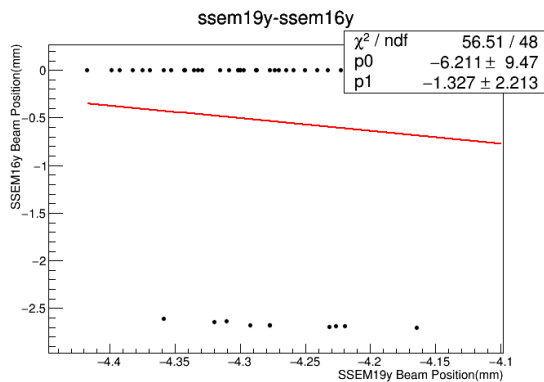


図 4.42: SSEM19Y と SSEM16Y の相関

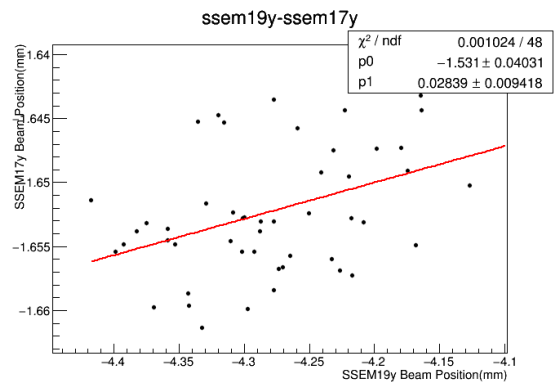


図 4.43: SSEM19Y と SSEM17Y の相関

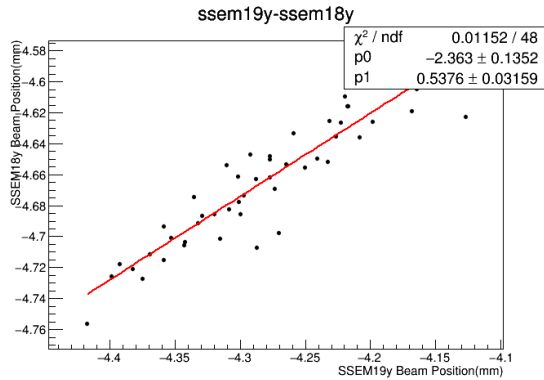


図 4.44: SSEM19Y と SSEM18Y の相関

なお、SSEM19 と SSEM13 の相関のグラフがないのはこの Run の時点では SSEM13 は後述の駆動装置のトラブルにより駆動していないためである。また、図 4.42 を見ると、ESM16 の値が正常に取得できていないことがわかる。これは、SSEM でビーム強度が高すぎる場合に、値が 0 になってしまうおプログラム上の問題が起こっていたためである。そのため、後述の ESM の位置分解能の解析には（そちらでは値が正常であったため）バンチ平均ではなく、第 1 バンチのデータを用いた。

次に、求めた 1 次関数を用いて Physics Run の SSEM19 から仮想的に Physics Run における他の SSEM の位置でのビーム中心を再構成する。これは SSEM Run のようにスピル数に大きく制約がないため、1000 スピル分のデータを用いた。例えば、SSEM Run である SSEM のビーム中心 S_{sr} と SSEM19 のビーム中心 $S19_{sr}$ に a と b を定数として相関が式 4.2 のように求まったとする。すると、Physics Run での同じ SSEM のビーム中心 S_{phy} は Physics Run での SSEM19 のビーム中心 $S19_{phy}$ を用いて、式 4.3 のように求まる。

$$S_{sr} = aS19_{sr} + b \quad (4.2)$$

$$S_{phy} = aS19_{phy} + b \quad (4.3)$$

そして、求めた Physics Run での SSEM のビーム中心とそれとペアとなっている ESM のビーム中心の差を求め、ヒストグラムにしたものが図 4.45～図 4.77 である。ヒストグラムをガウス関数で Fit し、 σ を求め、その値を ESM の位置分解能とした。また、図 4.70 の SSEM19 との相関が得られていない SSEM13 は後述するが、垂直方向では ESM のビームのばらつきと位置分解能に違いが大きくないため、SSEM の値を引かず、ESM のビームのばらつきのみヒストグラムとなっている。

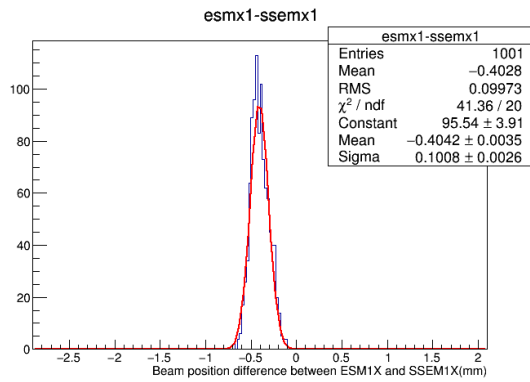


図 4.45: ESM1X と SSEM1X のビーム中心の差のヒストグラム

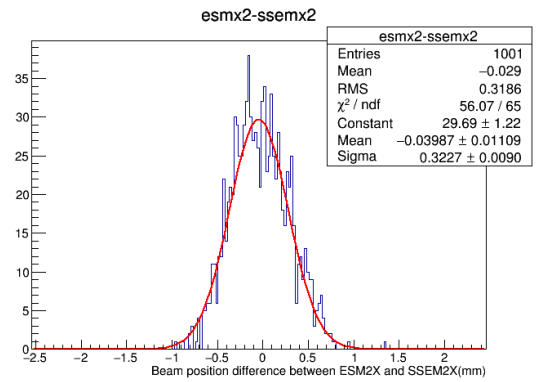


図 4.46: ESM2X と SSEM2X のビーム中心の差のヒストグラム

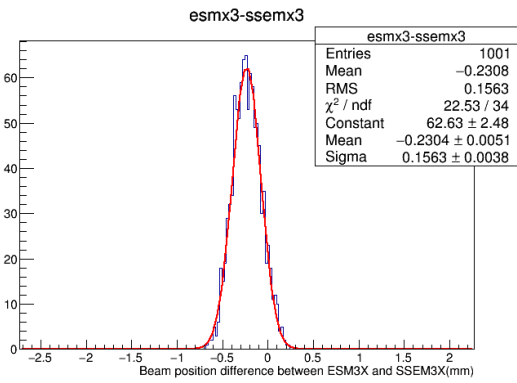


図 4.47: ESM3X と SSEM3X のビーム中心の差のヒストグラム

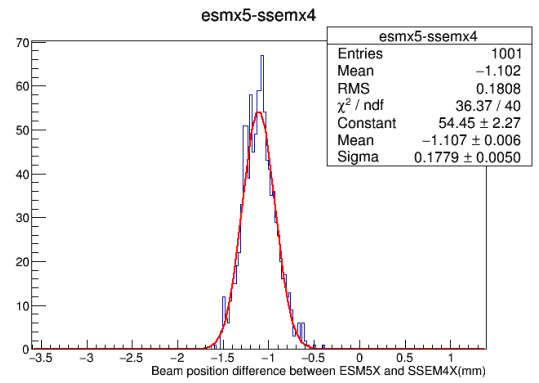


図 4.48: ESM5X と SSEM4X のビーム中心の差のヒストグラム

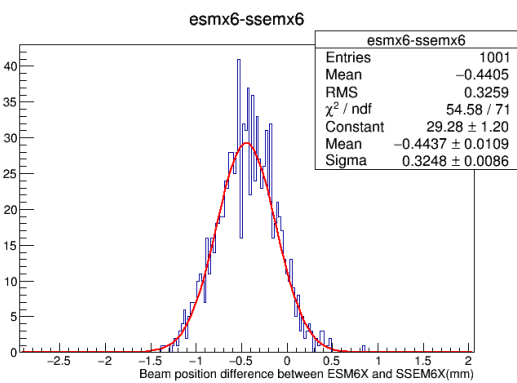


図 4.49: ESM6X と SSEM6X のビーム中心の差のヒストグラム

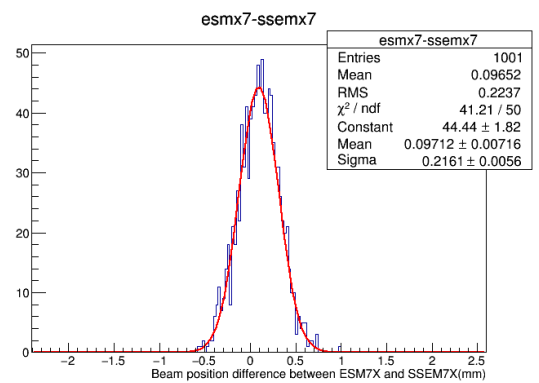


図 4.50: ESM7X と SSEM7X のビーム中心の差のヒストグラム

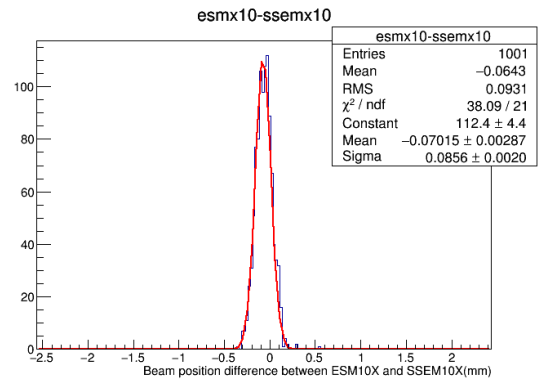
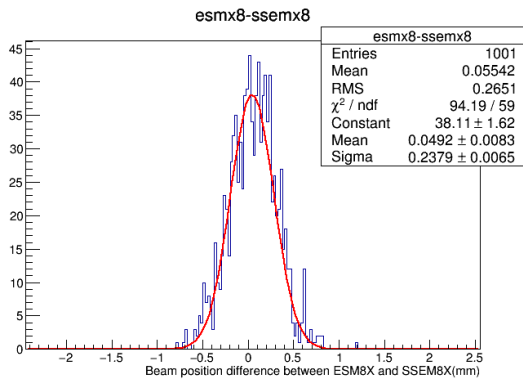


図 4.51: ESM8X と SSEM8X のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.52: ESM10X と SSEM10X のビーム中心の差のヒストグラム

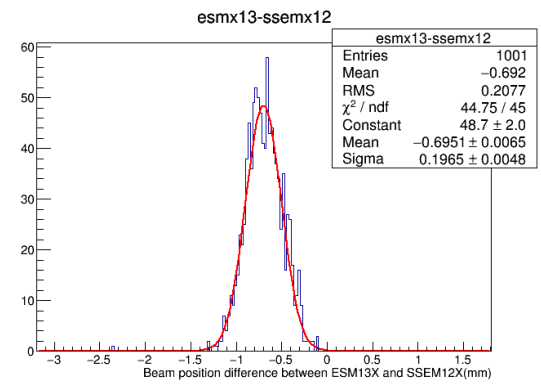
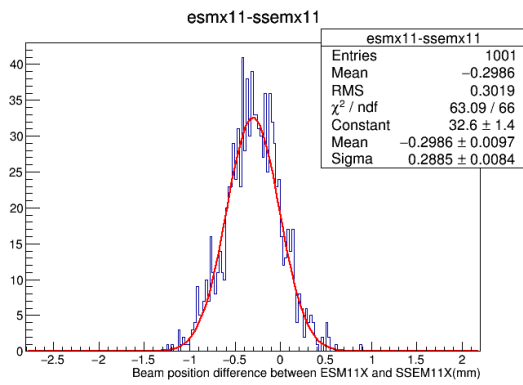


図 4.53: ESM11X と SSEM11X のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.54: ESM13X と SSEM12X のビーム中心の差のヒストグラム

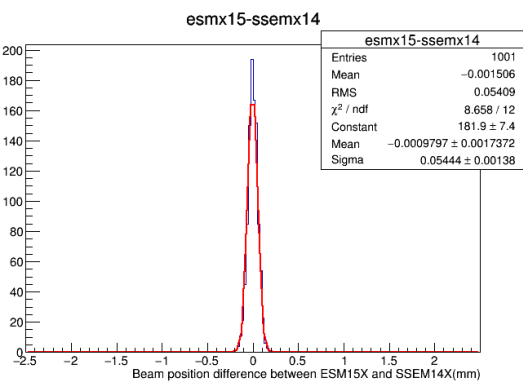


図 4.55: ESM15X と SSEM14X のビーム中心の差のヒストグラム

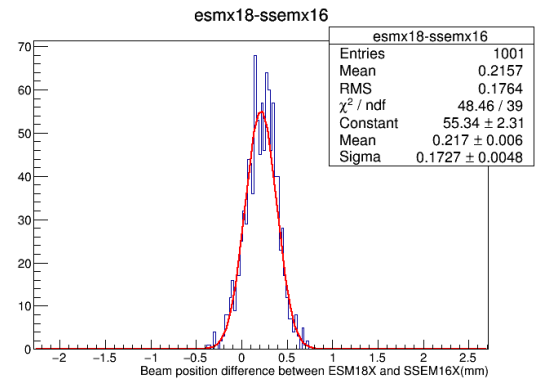
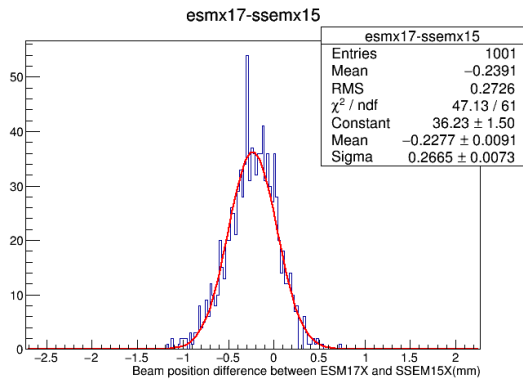


図 4.56: ESM17X と SSEM15X のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.57: ESM18X と SSEM16X のビーム中心の差のヒストグラム

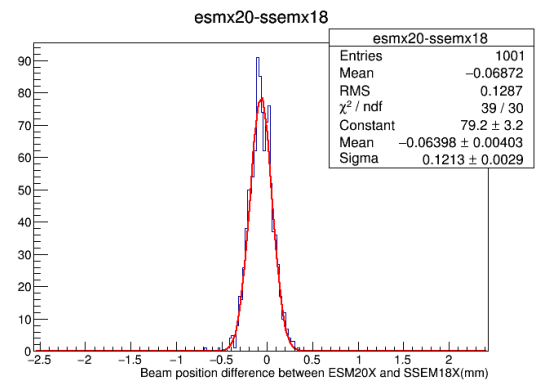
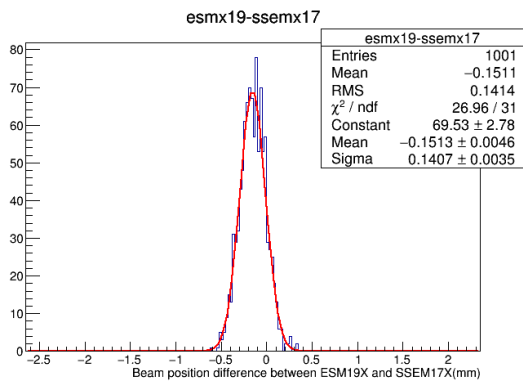


図 4.58: ESM19X と SSEM17X のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.59: ESM20X と SSEM18X のビーム中心の差のヒストグラム

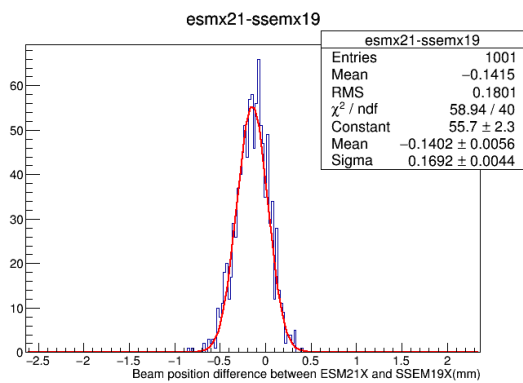


図 4.60: ESM21X と SSEM19X のビーム中心の差のヒストグラム

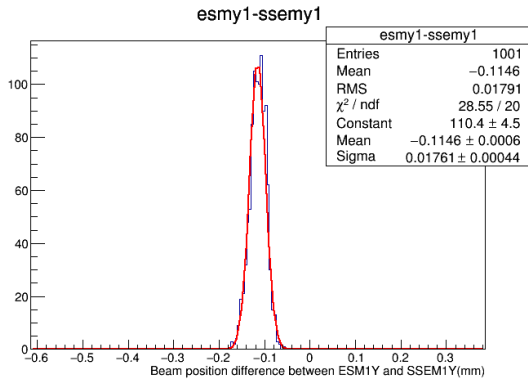


図 4.61: ESM1Y と SSEM1Y のビーム中心の差のヒストグラム

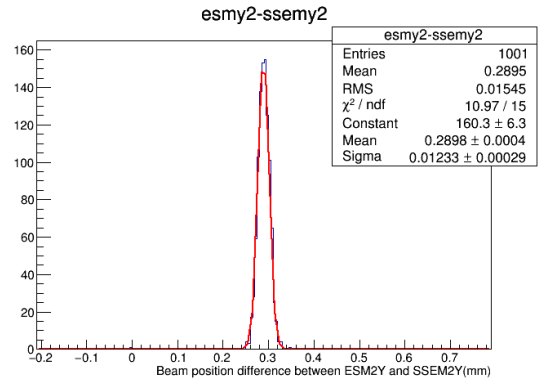


図 4.62: ESM2Y と SSEM2Y のビーム中心の差のヒストグラム

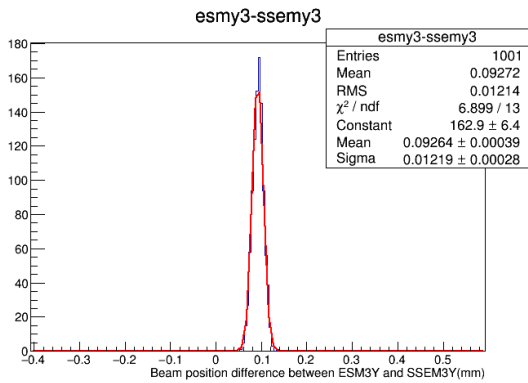


図 4.63: ESM3Y と SSEM3Y のビーム中心の差のヒストグラム

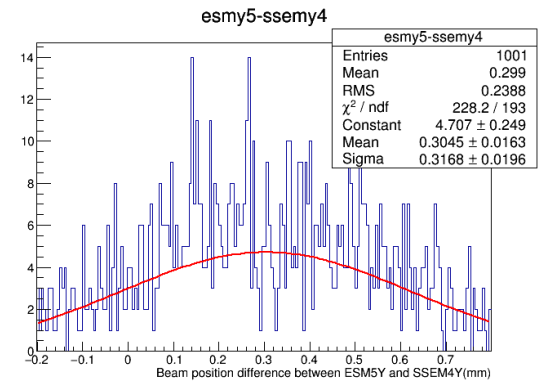


図 4.64: ESM5Y と SSEM4Y のビーム中心の差のヒストグラム

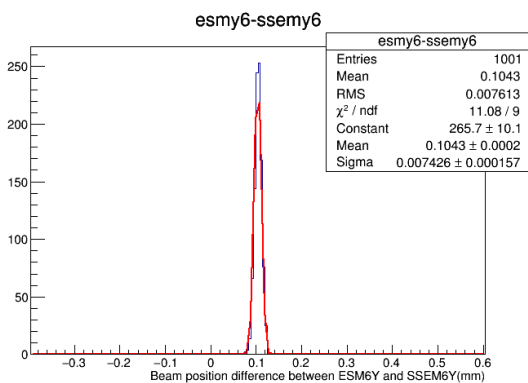


図 4.65: ESM6Y と SSEM6Y のビーム中心の差のヒストグラム

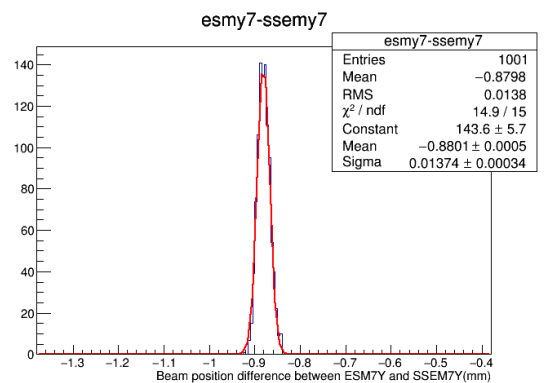


図 4.66: ESM7Y と SSEM7Y のビーム中心の差のヒストグラム

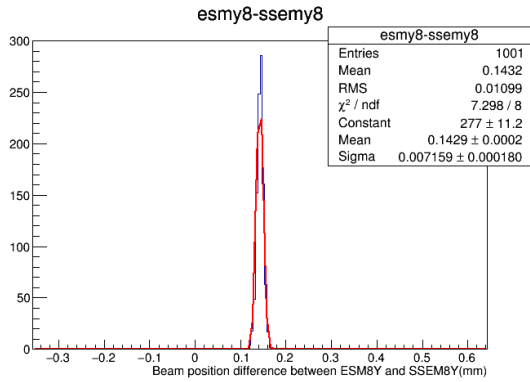


図 4.67: ESM8Y と SSEM8Y のビーム中心の差のヒストグラム

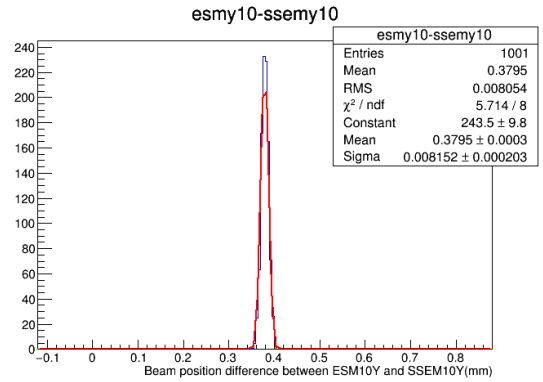


図 4.68: ESM10Y と SSEM10Y のビーム中心の差のヒストグラム

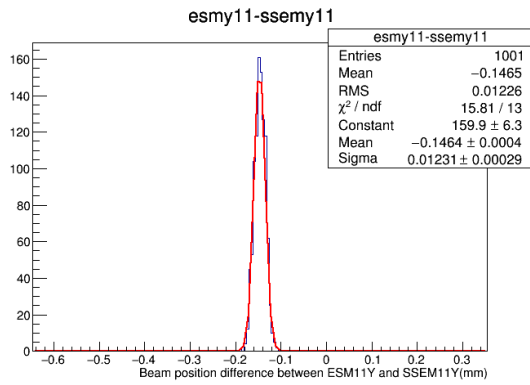


図 4.69: ESM11Y と SSEM11Y のビーム中心の差のヒストグラム

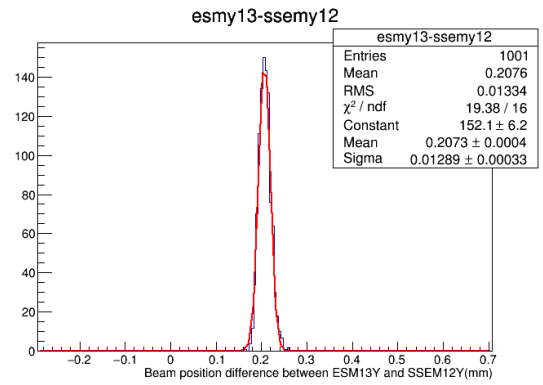


図 4.70: ESM13Y と SSEM12Y のビーム中心の差のヒストグラム

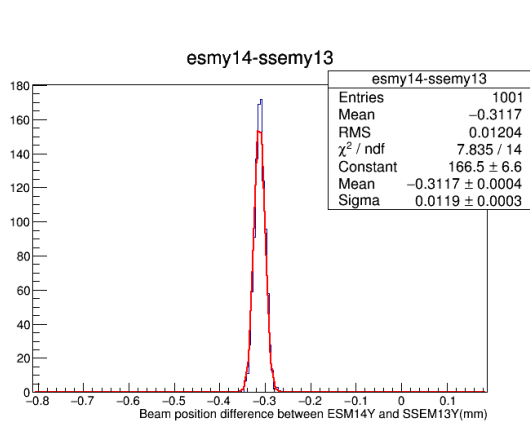


図 4.71: ESM14Y のビーム中心のヒストグラム

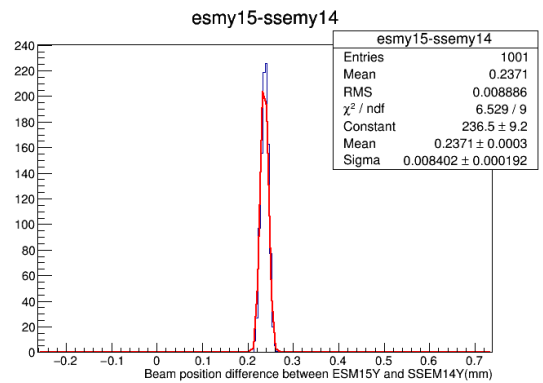


図 4.72: ESM15Y と SSEM14Y のビーム中心の差のヒストグラム

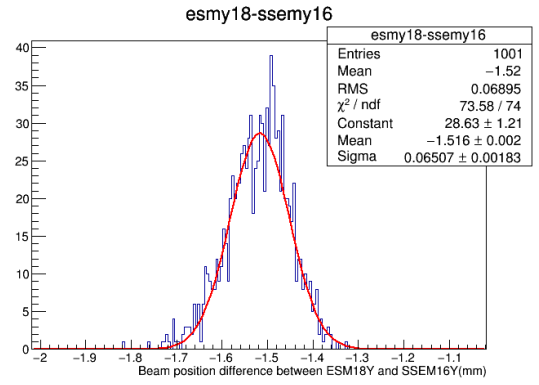
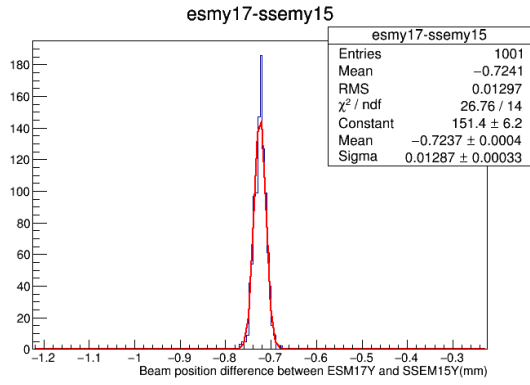


図 4.73: ESM17Y と SSEM15Y のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.74: ESM18Y と SSEM16Y のビーム中心の差のヒストグラム

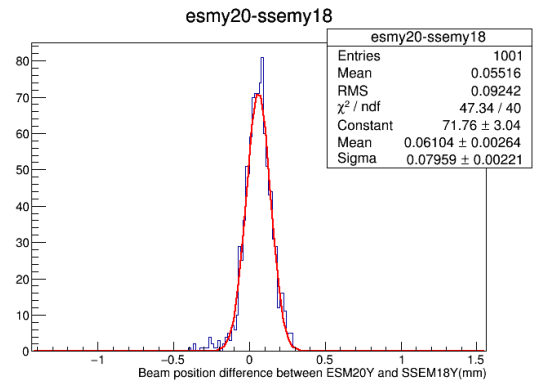
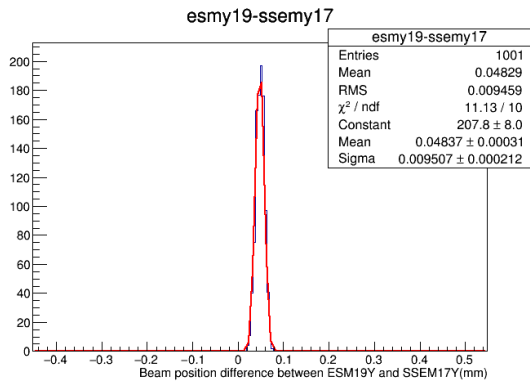


図 4.75: ESM19Y と SSEM17Y のビーム中心の差のヒストグラム
 図 4.76: ESM20Y と SSEM18Y のビーム中心の差のヒストグラム

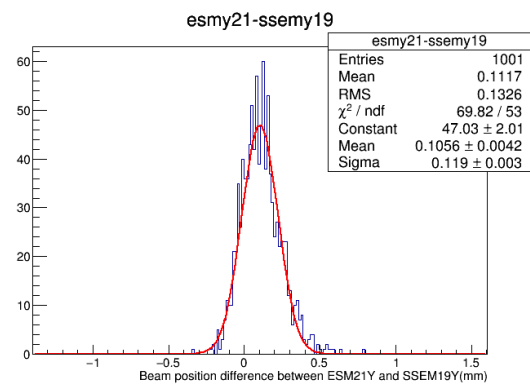


図 4.77: ESM21Y と SSEM19Y のビーム中心の差のヒストグラム

4.3.2 ESM の位置分解能の検証結果とその評価

図 4.45～図 4.77 を Fit したガウス関数の σ から ESM の位置分解能を求めると表 4.2 の様な値となった。また、これをグラフにすると水平方向は図 4.78、垂直方向は図 4.79 のようになった。

表 4.2: ESM の位置分解能

ESM	水平方向の位置分解能 (mm)	垂直方向の位置分解能 (mm)
1	0.101	0.0176
2	0.323	0.0123
3	0.156	0.0122
5	0.178	0.318
6	0.325	0.00743
7	0.216	0.0137
8	0.239	0.00716
10	0.0856	0.00815
11	0.288	0.0123
13	-	0.0129
14	0.112	0.0119
15	0.0544	0.00840
17	0.266	0.0129
18	0.173	0.0651
19	0.141	0.00951
20	0.121	0.0796
21	0.169	0.119

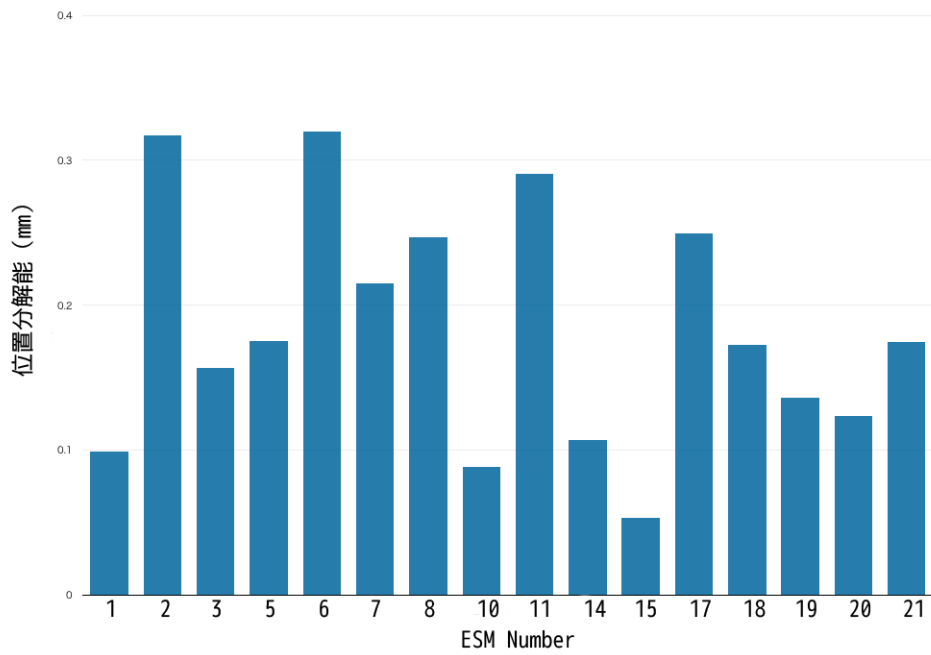


図 4.78: 水平方向の ESM の位置分解能

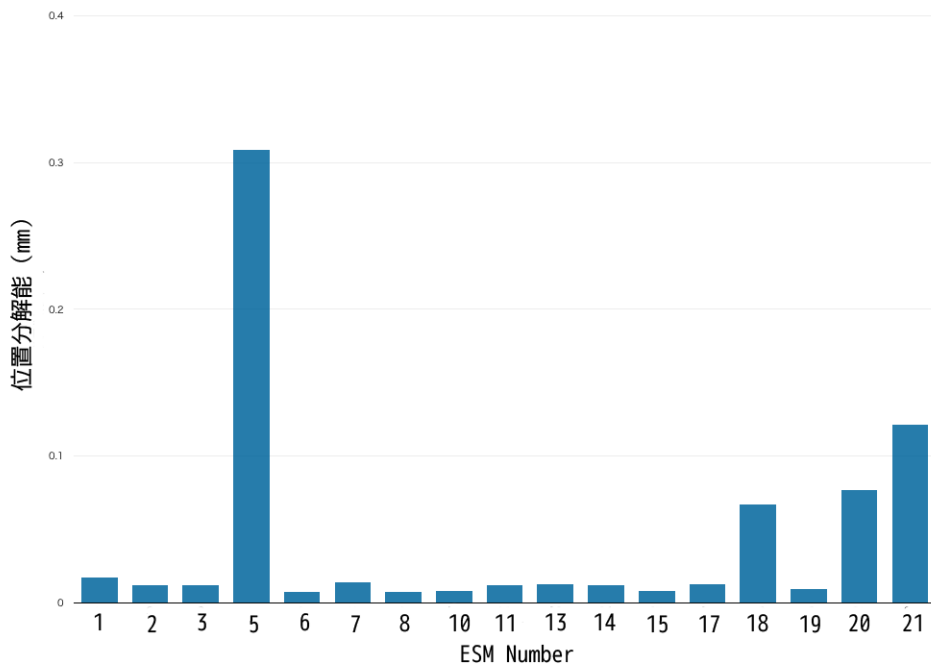


図 4.79: 垂直方向の ESM の位置分解能

水平方向と垂直方向を見比べると、全体的に水平方向の位置分解能が悪いことがわかる。これはそもそも水平方向のビームの位置のバラつきが大きいことに寄与する。今回の位置分解能の導出方法は、SSEM と ESM の中心の比較を SSEM19 のビーム中心のみを基準に用いて行っており、SSEM19 のビーム中心のみに依存している。しかし、例えばあるショットと別なショットで SSEM1 では違う軌道を通ったにも関わらず、SSEM19 では同じ軌道を通ったような状況も考えられる。事実、SSEM 同士の相関のグラフでも相関に幅があることはグラフをみてもわかる。そのため、この SSEM の相関のバラつきが ESM の位置分解能の値に混入してしまい、水平方向の ESM の位置分解能の悪化につながっている。一方で垂直方向ではビームの位置のばらつきが非常に小さいため、殆ど位置分解能そのままとなっていると考えられる。以下図 4.80 に ESM の水平方向、垂直方向、ビーム中心の分布の一例を載せる。ここから水平方向と垂直方向のビーム中心のバラつきが大きく違うことがわかる。

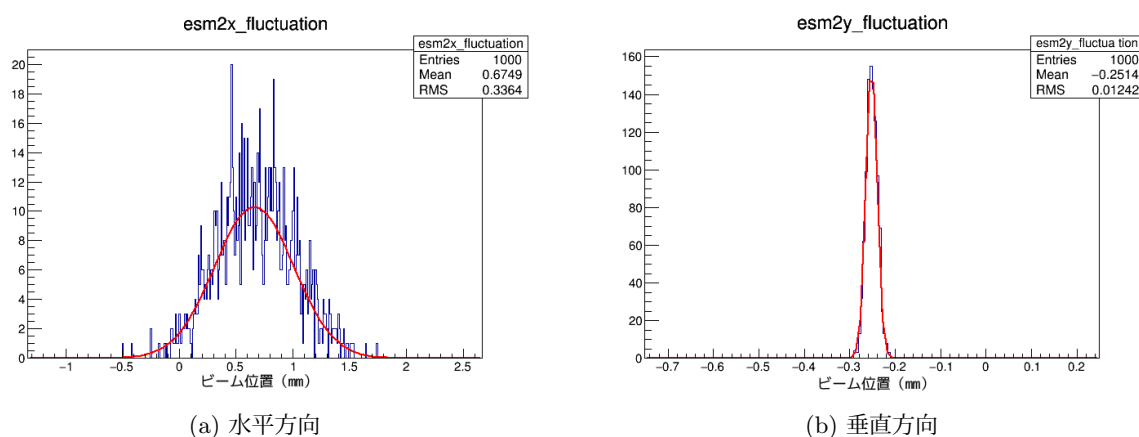


図 4.80: ESM2 でのビーム中心のばらつき

よって以降、位置分解能の評価には垂直方向の ESM の位置分解能を用いることにする。

図 4.79 からわかるように、大体の ESM では位置分解能は $10\mu\text{m}$ オーダーの非常に良い値となっている。しかし、ESM5, ESM18, ESM20, ESM21 では他と比べ位置分解能が良くない。このうち、ESM5 と ESM18 の位置分解能については ESM の解析プログラムの問題であり、これの解決については次説で詳しく説明をする。また、ESM20 と ESM21 については前述の通り、電子の散乱によるノイズの影響と考えられる。これについても後の節で説明する。

位置分解能の悪化が見られる ESM5, ESM18, ESM20, ESM21 を除いてみると、垂直方向で位置分解能の平均値は 0.011mm となっており、当初の想定より、大幅に位置分解能が良いという結果になった。

今回の位置分解能の検証では、予想よりも遥かに良い位置分解能が得られた。これについて明確な原因を挙げるのは難しいが、比較となる J-PARC 3 - 50BT に設置された ESM とは読み出しエレクトロニクスが異なっており、ニュートリノのビームライン上の ESM は読み出し回路での差分

の計算及び、増幅や波形整形などが効率的に行われていることを示していると考えられる。

4.4 ESM5 の位置分解能

ESM5 の位置分解能の悪化の原因はプログラム上の問題であり、それを修正することにより、他の ESM と同程度の位置分解能になった。ここでは、そのプログラム上の原因及び改良について述べる。

以下図 4.81~ 図 4.96 に上流にある ESM で測定されたビーム中心位置のばらつきを示す。これを見ると、水平方向では ESM4 と ESM5 が他の ESM に比べて極端にビーム中心位置のばらつきが少なく、逆に垂直方向では ESM4 と ESM5 のビーム中心位置のバラつきが極端に大きい。

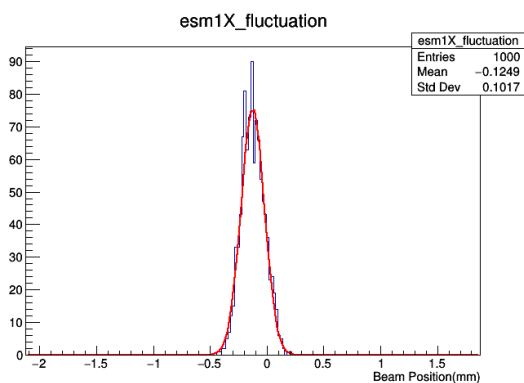


図 4.81: ESM1 の水平方向のビームのばらつき

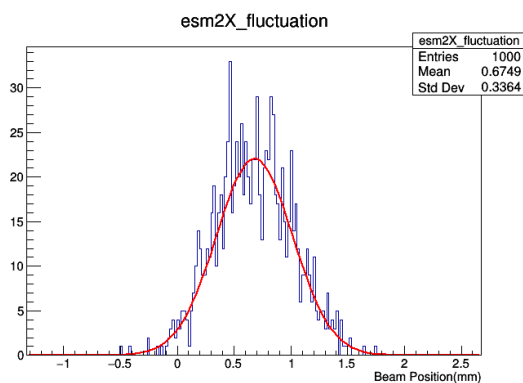


図 4.82: ESM2 の水平方向のビームのばらつき

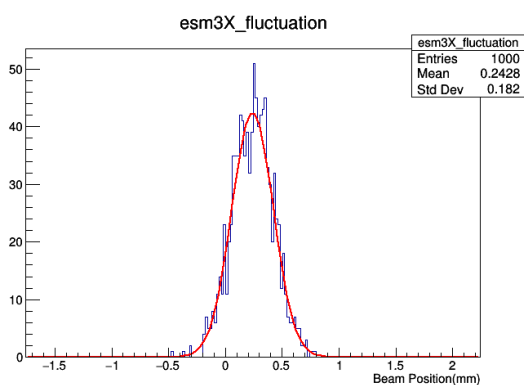


図 4.83: ESM3 の水平方向のビームのばらつき

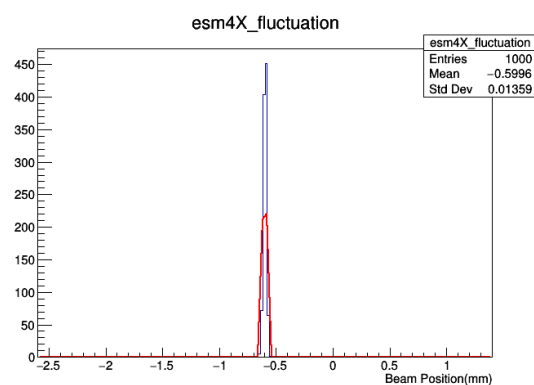


図 4.84: ESM4 の水平方向のビームのばらつき

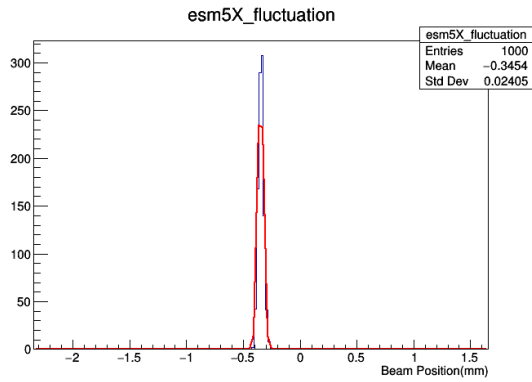


図 4.85: ESM5 の水平方向のビームのばらつき

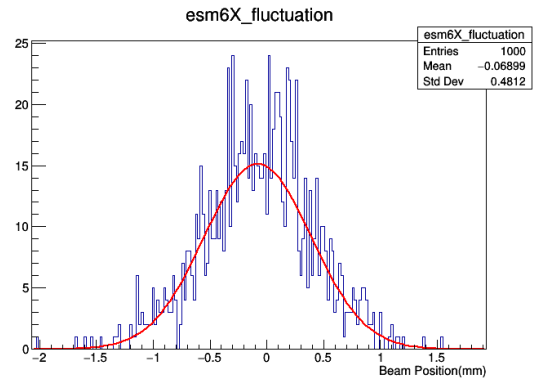


図 4.86: ESM6 の水平方向のビームのばらつき

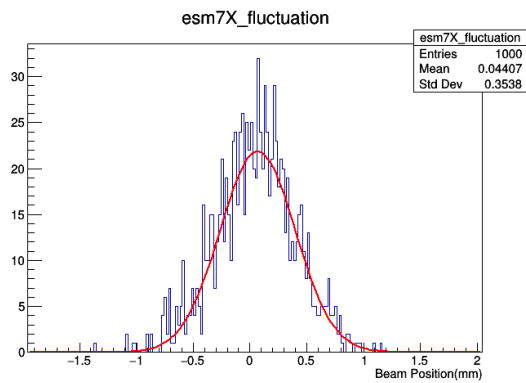


図 4.87: ESM7 の水平方向のビームのばらつき

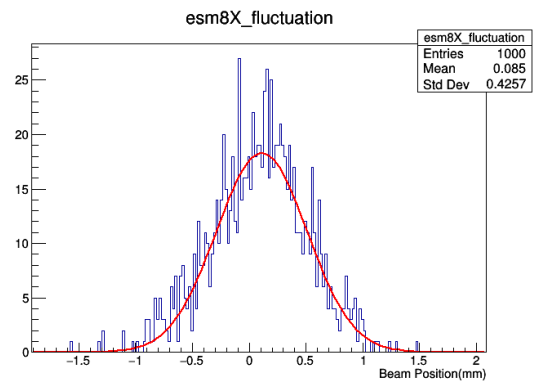


図 4.88: ESM8 の水平方向のビームのばらつき

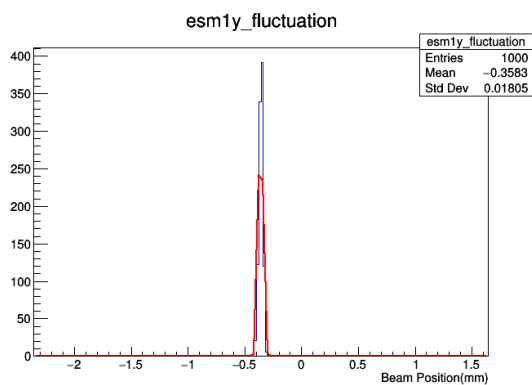


図 4.89: ESM1 の垂直方向のビームのばらつき

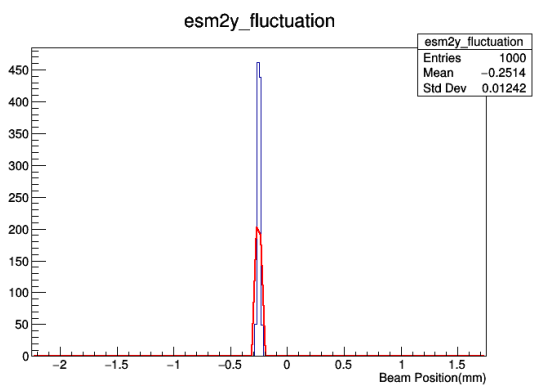


図 4.90: ESM2 の垂直方向のビームのばらつき

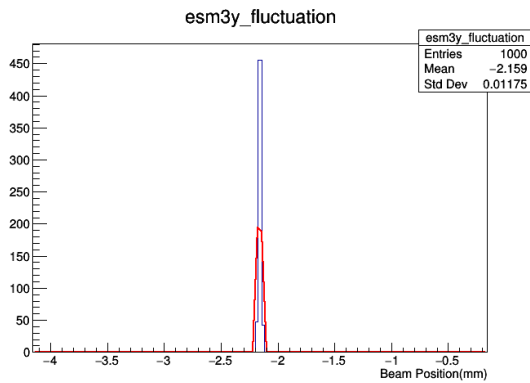


図 4.91: ESM3 の垂直方向のビームのばらつき

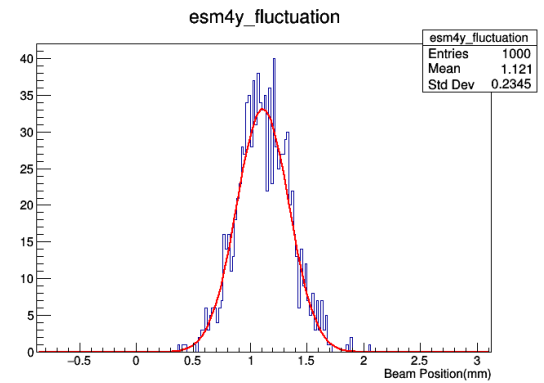


図 4.92: ESM4 の垂直方向のビームのばらつき

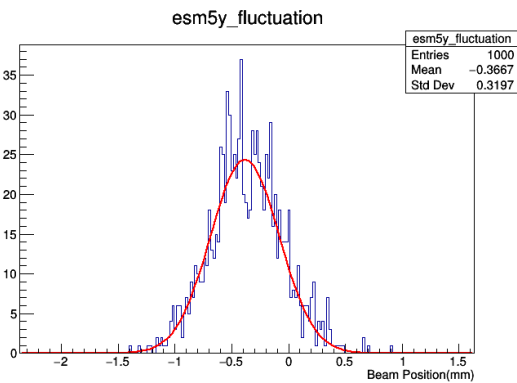


図 4.93: ESM5 の垂直方向のビームのばらつき

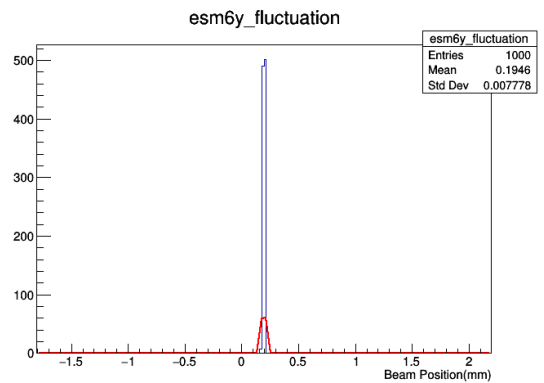


図 4.94: ESM6 の垂直方向のビームのばらつき

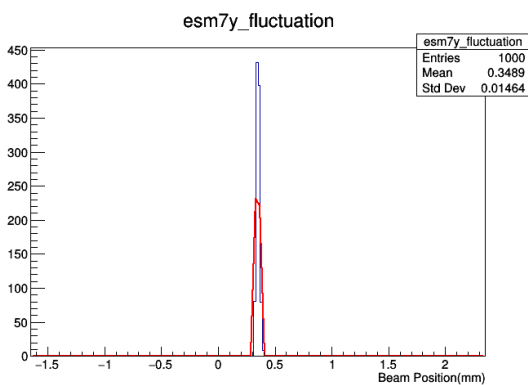


図 4.95: ESM7 の垂直方向のビームのばらつき

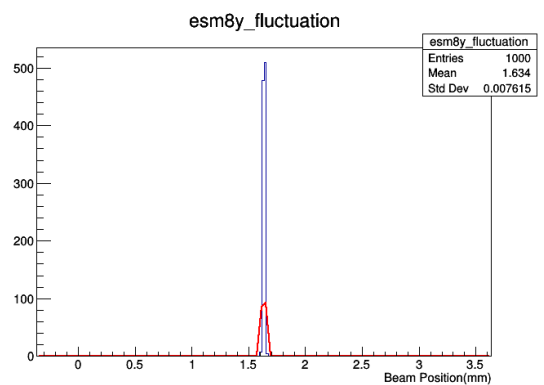


図 4.96: ESM8 の垂直方向のビームのばらつき

また、水平方向の ESM5 と上流の他の ESM のビーム中心位置の相関を調べると以下の図 4.97～図 4.104 のようになり、殆ど相関を示していないことがわかる。一方、垂直方向の ESM5 のビーム中心位置と水平方向の他の上流の ESM の相関が、図 4.105～図 4.112 である。こちらは相関があることがわかる。今示したのは ESM5 と他の ESM の相関のみであるが、ESM4 でも同様の傾向が

見られる。また、垂直方向の相関に関してはビームが殆どバラついていないことから、ESM 同士の相関はあまりみられない（これは前述の垂直方向方向の SSEM の相関と同様である）。

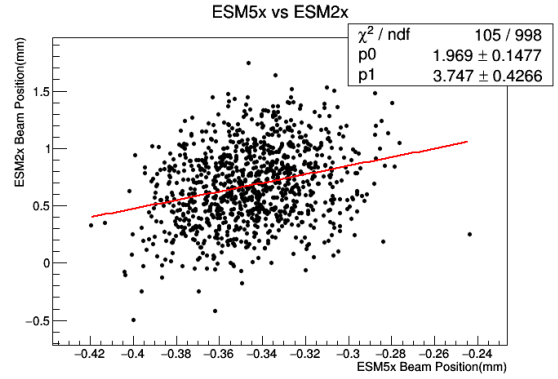
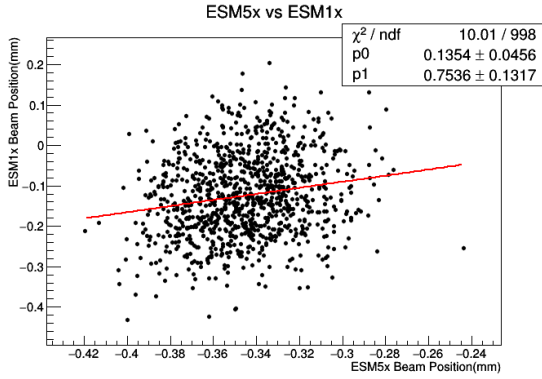


図 4.97: 水平方向の ESM5 と ESM1 のビーム中心位置の相関

図 4.98: 水平方向の ESM5 と ESM2 のビーム中心位置の相関

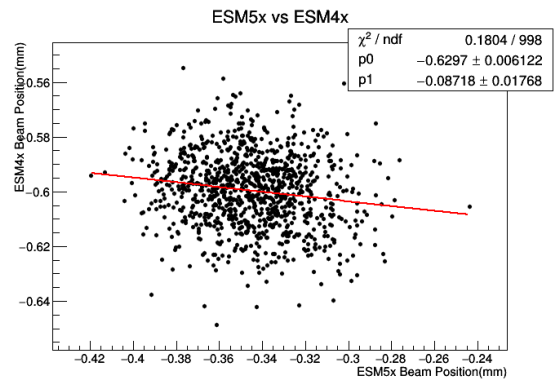
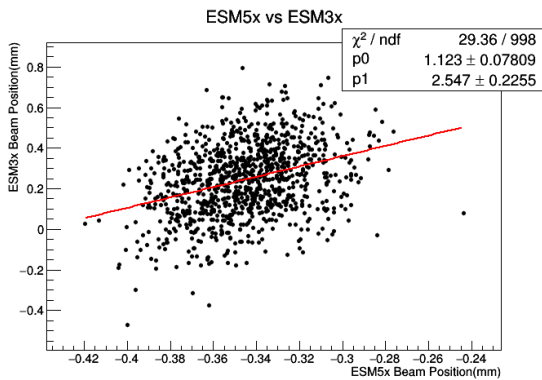


図 4.99: 水平方向の ESM5 と ESM3 のビーム中心位置の相関

図 4.100: 水平方向の ESM5 と ESM4 のビーム中心位置の相関

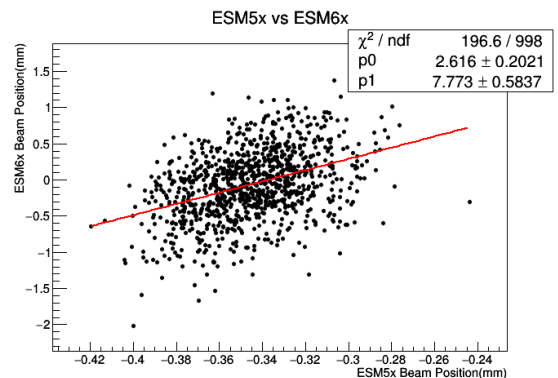
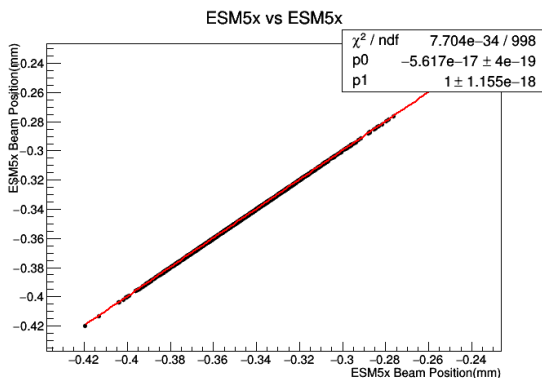


図 4.101: 水平方向の ESM5 と ESM5 のビーム中心位置の相関

図 4.102: 水平方向の ESM5 と ESM6 のビーム中心位置の相関

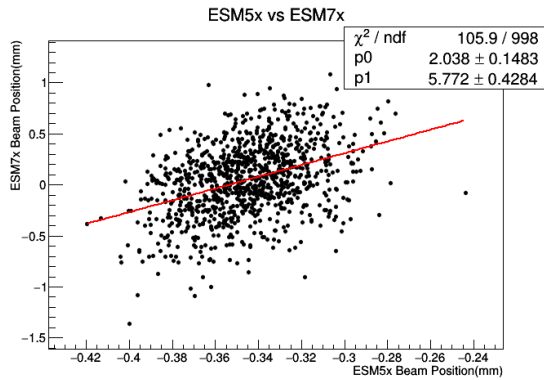


図 4.103: 水平方向の ESM5 と ESM7 のビーム中心位置の相関

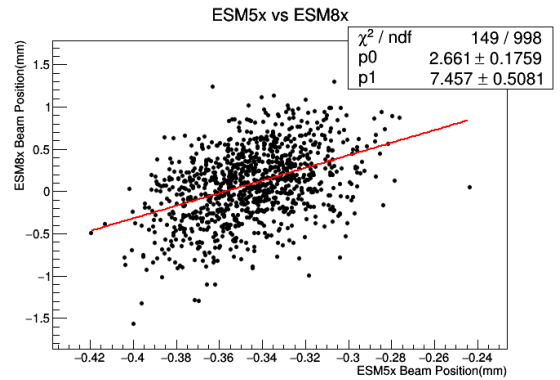


図 4.104: 水平方向の ESM5 と ESM8 のビーム中心位置の相関

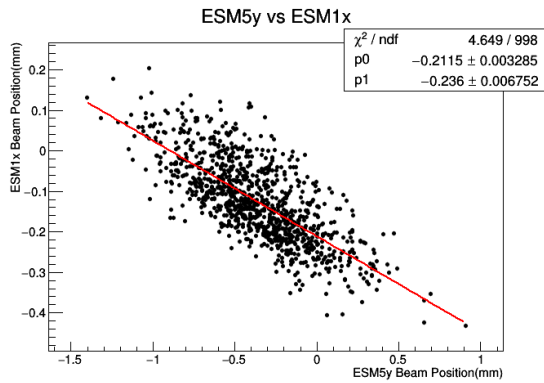


図 4.105: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM1 のビーム中心位置の相関

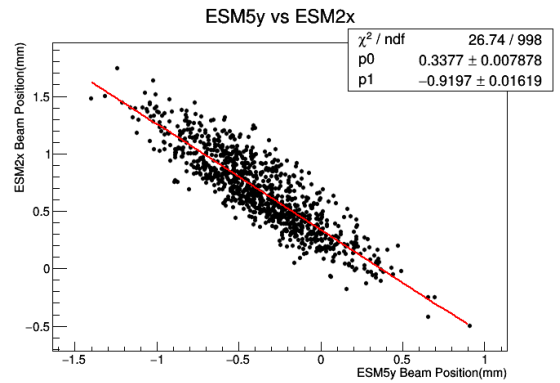


図 4.106: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM2 のビーム中心位置の相関

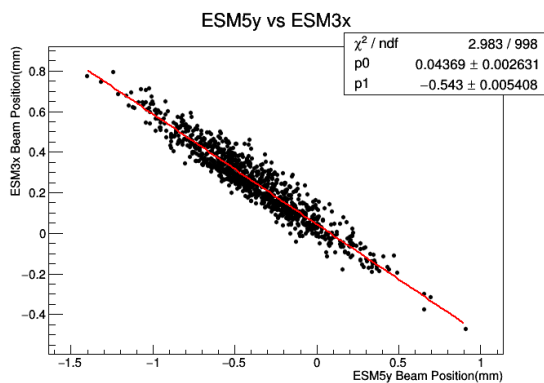


図 4.107: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM3 のビーム中心位置の相関

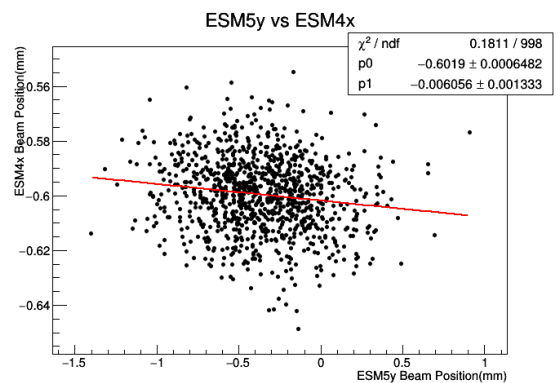


図 4.108: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM4 のビーム中心位置の相関

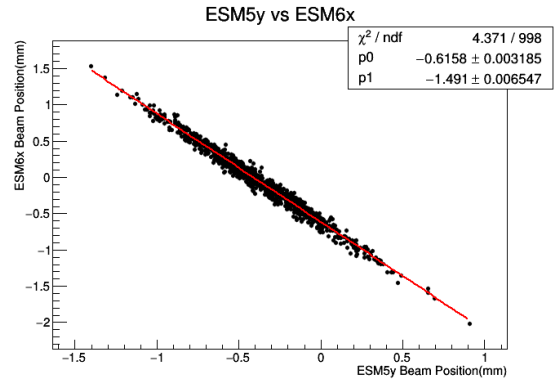
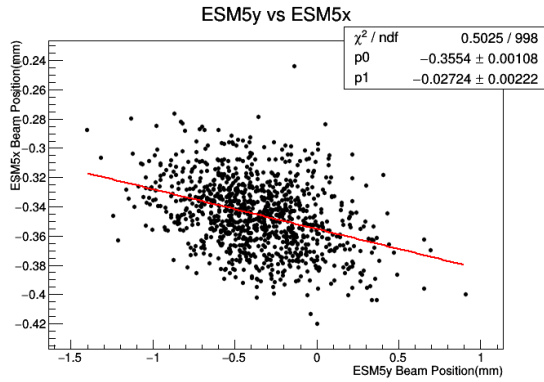


図 4.109: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM5 の 図 4.110: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM6 の
 ビーム中心位置の相関 ビーム中心位置の相関

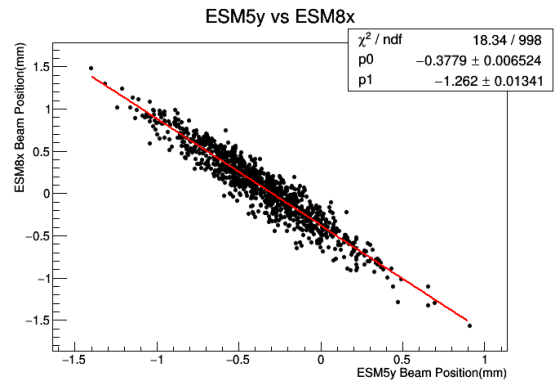
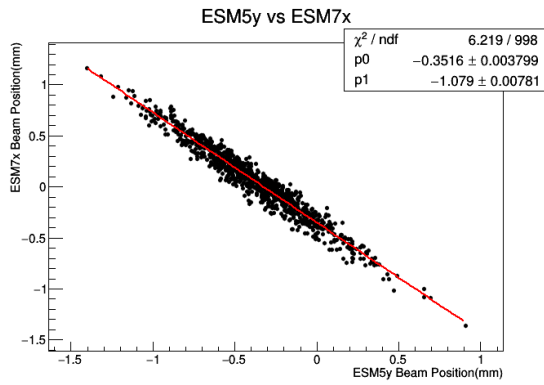


図 4.111: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM7 の 図 4.112: 垂直方向の ESM5 と水平方向の ESM8 の
 ビーム中心位置の相関 ビーム中心位置の相関

上記から、当初、ESM4 及び ESM5 では水平垂直の配線が逆になっていると考えた。しかし、ESM5 (ESM4) は 45° 傾いて取り付けられている ESM である。そこで、ESM4 及び ESM5 の解析プログラムを調べてみると、45° 傾いた電極から水平垂直のビーム中心位置を導出する式が以下のようにになっていた。ここで、 bc_{this} 、 bc_{other} はそれぞれの方向のビーム中心位置、 sl と of はそれぞれスロープとオフセット、 dp と sp はそれぞれ電極に誘起された電圧の差と和のピーク値である。

$$bc_{this} = sl \frac{dp}{sp} + of \quad (4.4)$$

$$bc_{other} = sl_{other} \frac{dp}{sp} + of_{other} \quad (4.5)$$

$$bc = bc_{other} \sin\left(-\frac{\pi}{4}\right) + bc_{this} \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) \quad (4.6)$$

この式だと 45° 傾いたままの状態でもオフセットが設定されている。しかし、このオフセットは

水平垂直に対して設定されたオフセットであるため、これではオフセットの値がずれてしまう。そこで、プログラムを書き換え、以下のような式を用いるようにした。

$$bc_{this} = \frac{dp}{sp} \tag{4.7}$$

$$bc_{other} = \frac{dp}{sp} \tag{4.8}$$

$$bc = sl(bc_{other} \sin(-\frac{\pi}{4}) + bc_{this} \cos(-\frac{\pi}{4})) + of \tag{4.9}$$

このように改良を行い、再びビーム中心位置のばらつきと相関を調べると、ESM4 と ESM5 のばらつきは他の ESM と同程度となり、水平方向同士の相関が得られた。

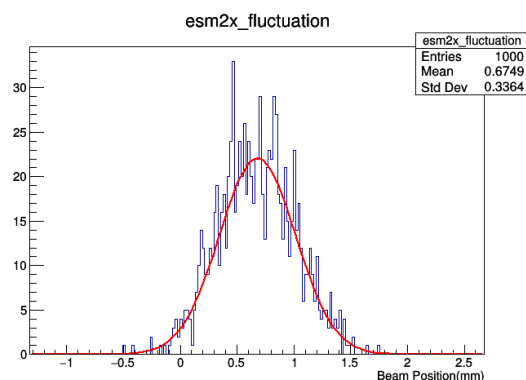
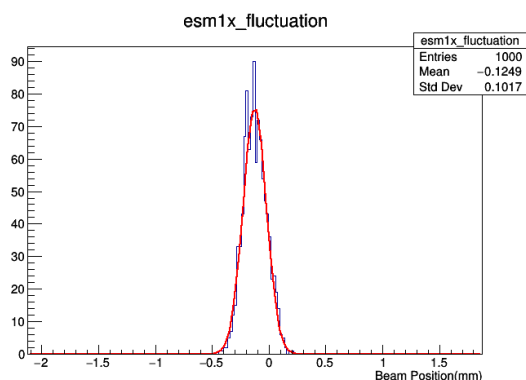


図 4.113: プログラム改良後の ESM1 の水平方向のビームのばらつき

図 4.114: プログラム改良後の ESM2 の水平方向のビームのばらつき

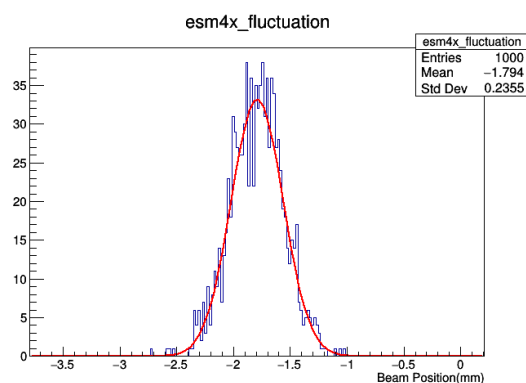
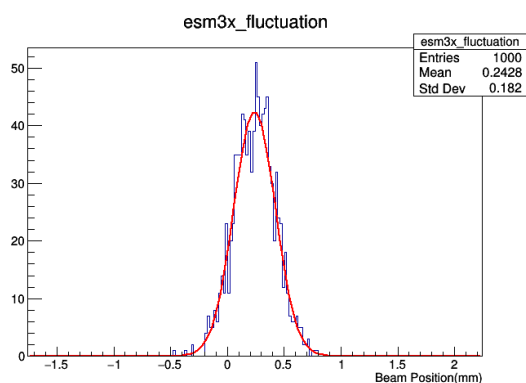


図 4.115: プログラム改良後の ESM3 の水平方向のビームのばらつき

図 4.116: プログラム改良後の ESM4 の水平方向のビームのばらつき

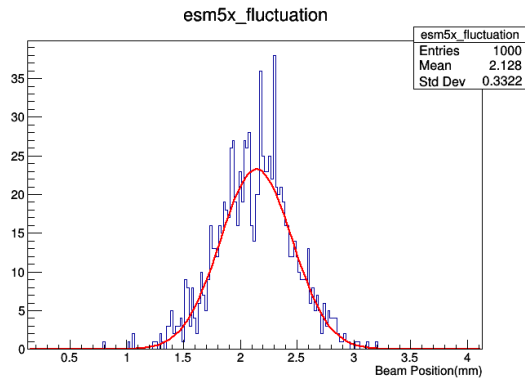


図 4.117: プログラム改良後の ESM5 の水平方向のビームのばらつき

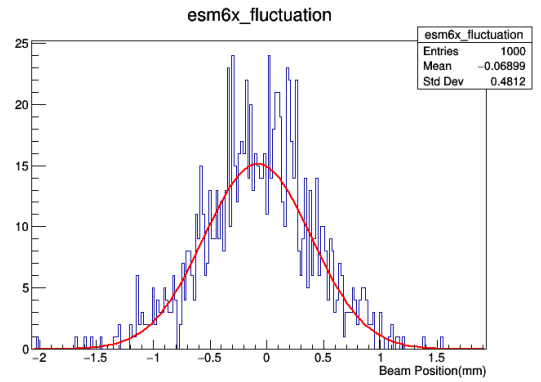


図 4.118: プログラム改良後の ESM6 の水平方向のビームのばらつき

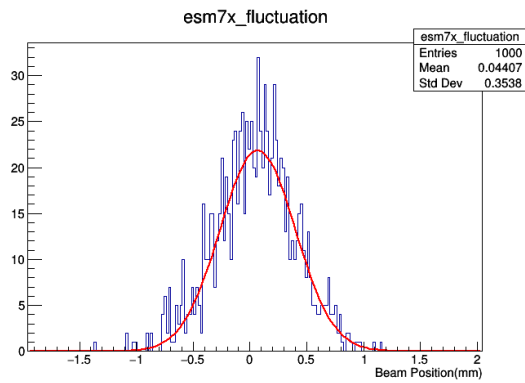


図 4.119: プログラム改良後の ESM7 の水平方向のビームのばらつき

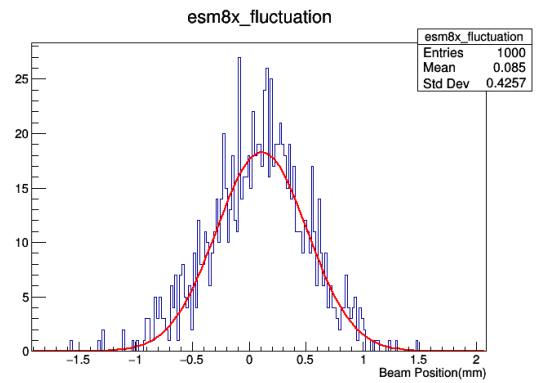


図 4.120: プログラム改良後の ESM8 の水平方向のビームのばらつき

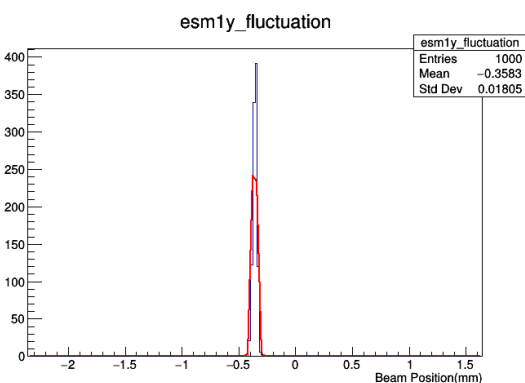


図 4.121: プログラム改良後の ESM1 の垂直方向のビームのばらつき

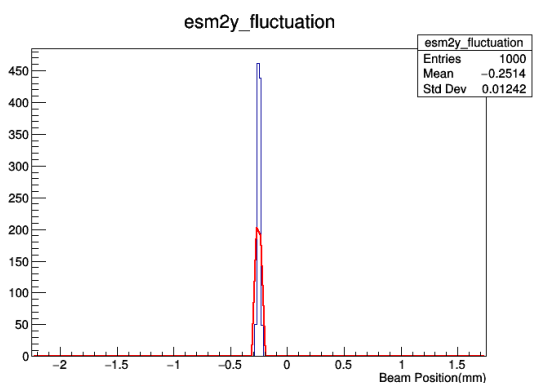


図 4.122: プログラム改良後の ESM2 の垂直方向のビームのばらつき

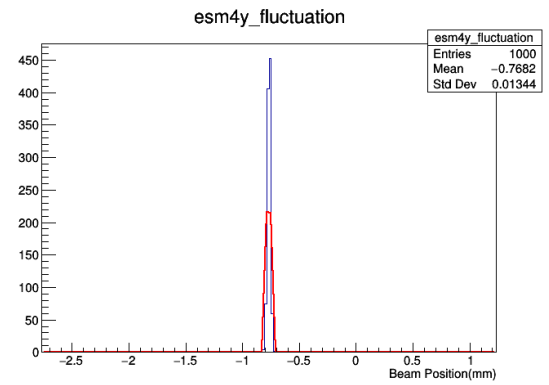
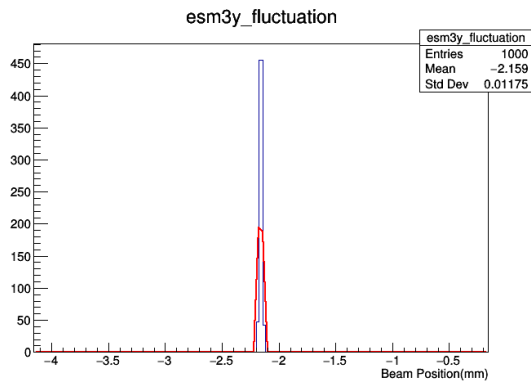


図 4.123: プログラム改良後の ESM3 の垂直方向のビームのばらつき

図 4.124: プログラム改良後の ESM4 の垂直方向のビームのばらつき

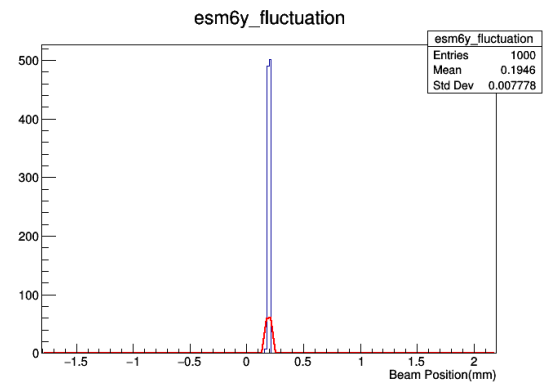
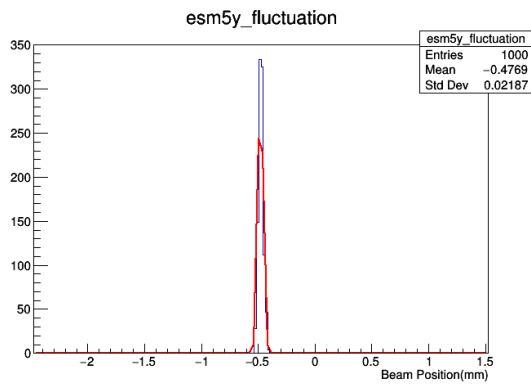


図 4.125: プログラム改良後の ESM5 の垂直方向のビームのばらつき

図 4.126: プログラム改良後の ESM6 の垂直方向のビームのばらつき

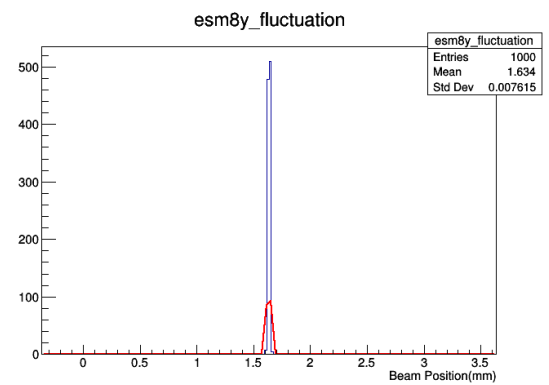
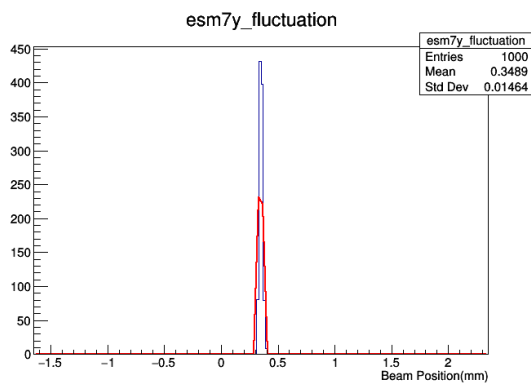


図 4.127: プログラム改良後の ESM7 の垂直方向のビームのばらつき

図 4.128: プログラム改良後の ESM8 の垂直方向のビームのばらつき

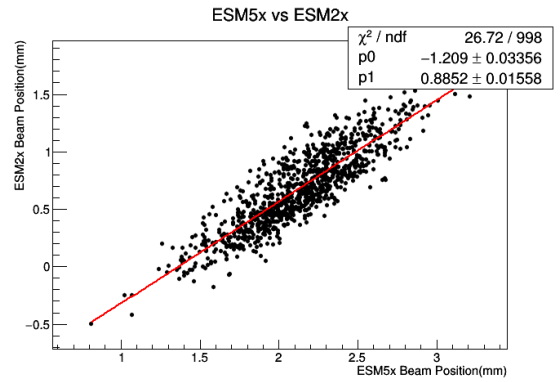
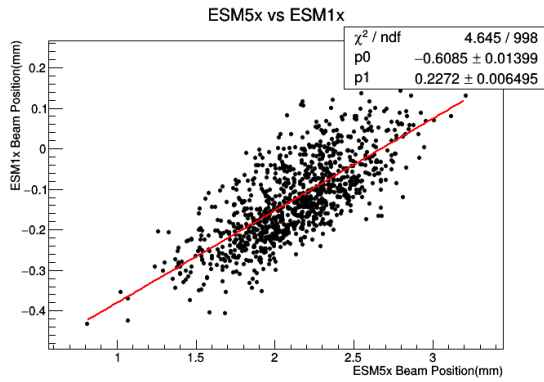


図 4.129: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM1 のビーム中心位置の相関

図 4.130: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM2 のビーム中心位置の相関

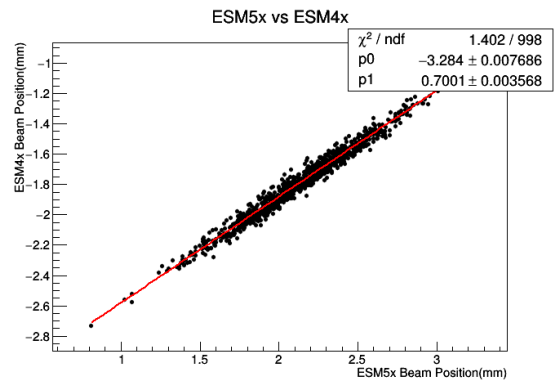
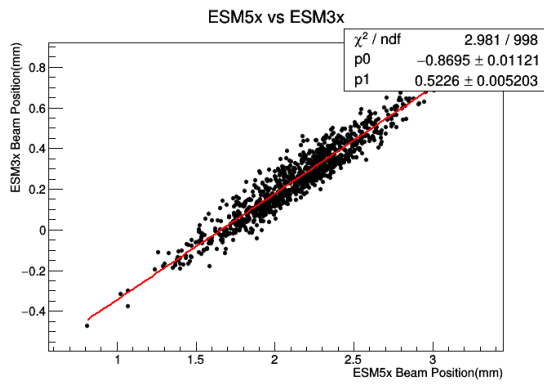


図 4.131: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM3 のビーム中心位置の相関

図 4.132: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM4 のビーム中心位置の相関

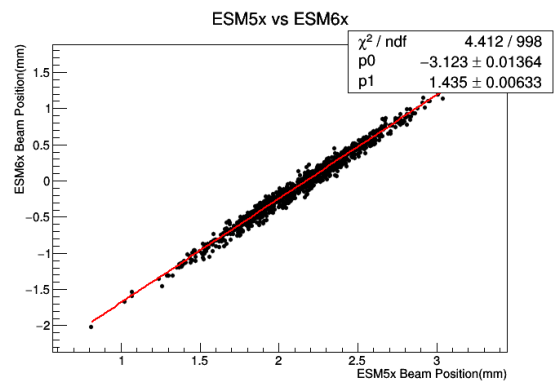
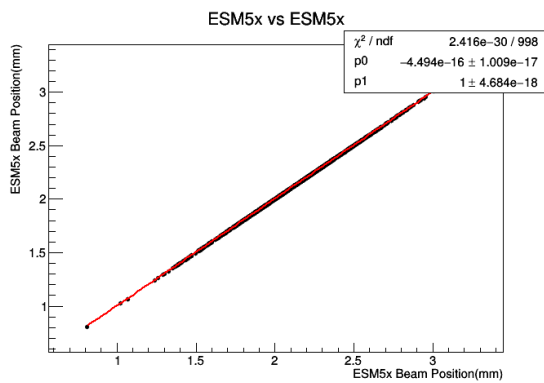


図 4.133: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM5 のビーム中心位置の相関

図 4.134: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM6 のビーム中心位置の相関

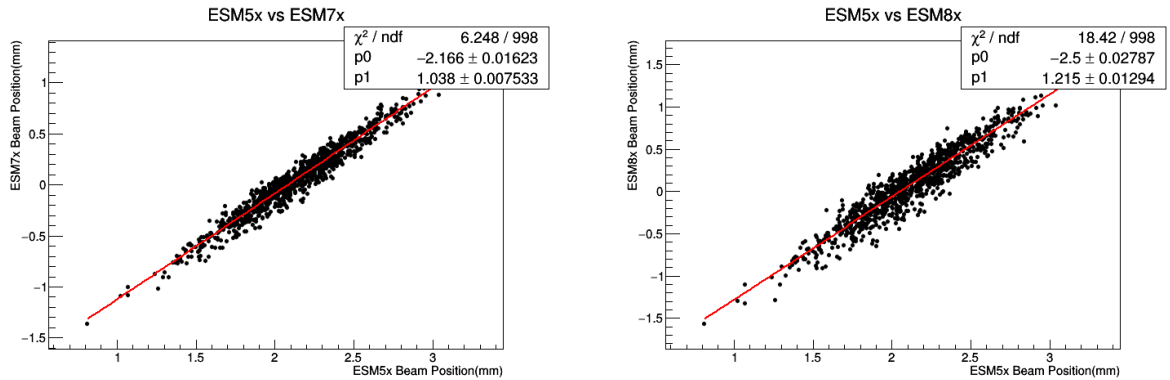


図 4.135: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM7 のビーム中心位置の相関
 図 4.136: プログラム改良後の水平方向の ESM5 と ESM8 のビーム中心位置の相関

また、この修正を行った後再度 ESM の位置分解能を求めると、以下のように ESM5 の位置分解能は他の ESM と同程度となった。

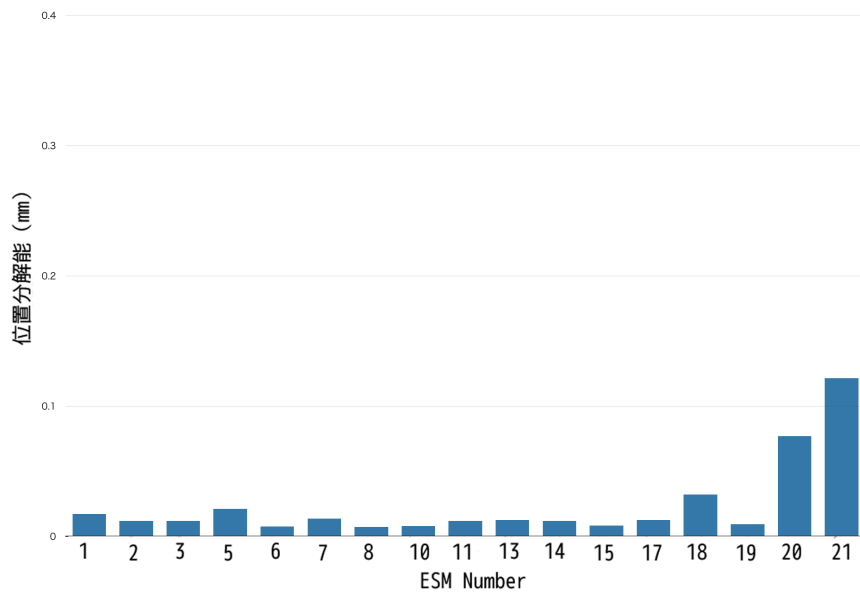


図 4.137: ESM5 の位置分解能改良後の垂直方向の位置分解能

4.5 デジタル信号処理を用いたターゲット付近の ESM の分解能の改良

前述の通り、ESM20 と ESM21 の位置分解能の悪化の原因は電子の散乱によるノイズと考えられる。そこで、ESM20 の電子散乱によるノイズを減らすため、デジタルフィルタの制作を行った。フィルタはウィナーフィルタと呼ばれる、ノイズ混入前の信号とノイズ信号からを用いて作るフィ

ルタを採用した。そして、ESMの上流のノイズ混入前と下流の混入後の信号を比較し、ノイズ信号を取り出してそれを用いた。

4.5.1 ESM4 と ESM20 の信号波形の比較

ESMは基本的に積分波形のみを取得しているため、ノイズ信号の取り出しが出来ない。しかし、ESM4 と ESM20 に関しては積分前の生の波形を取得している。ESM4 ではノイズが混入しておらず、ESM20 ではノイズが混入しているため、今回フィルタを作るにあたってはこの波形の違いを利用した。

この ESM4 と ESM20 の生信号は図 4.138 のような回路を通して、ビット数 12bit、サンプリング周波数 160MHz の FADC で取得されている。FADC で取得している信号は ESM の 4 つの電極の合算値であり、図 4.138 にあるようにそれぞれの電極から来た信号が回路に入り、オペアンプで信号を足し合わせている。また、回路から FADC には 3 本のケーブルが出ているが、これはそれぞれ 2ns ずつずれた信号となっており、これらを用いることによりサンプリング周波数を 3 倍の 480MHz にしている。また、図 4.138 中の U、D はそれぞれ上下、L、R はそれぞれ左右の電極を表している。

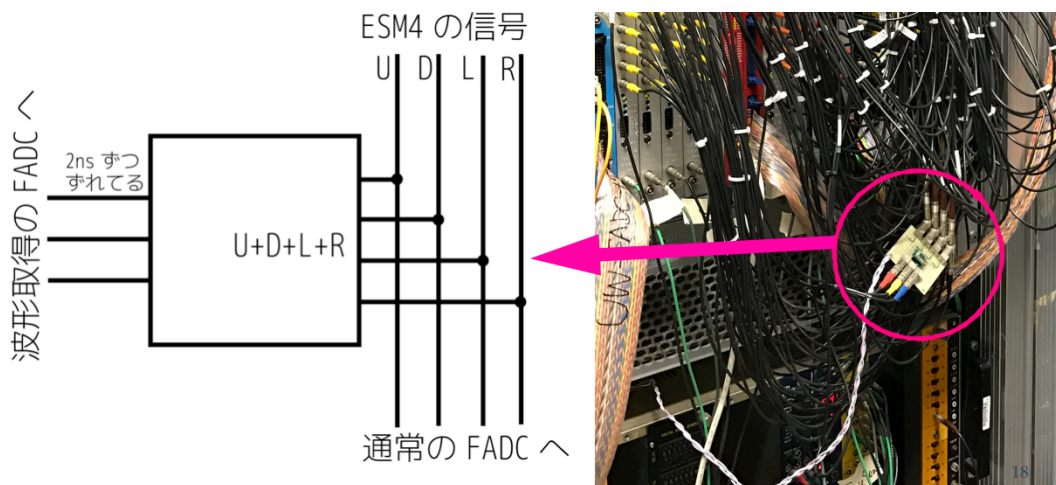


図 4.138: ESM4 の波形取得回路

これにより、取得した ESM4 と ESM20 の波形が以下の図 4.139 と図 4.140 である。図を見てわかるように、ESM4 の波形に対し、ESM20 ではノイズが混入している事がわかる。

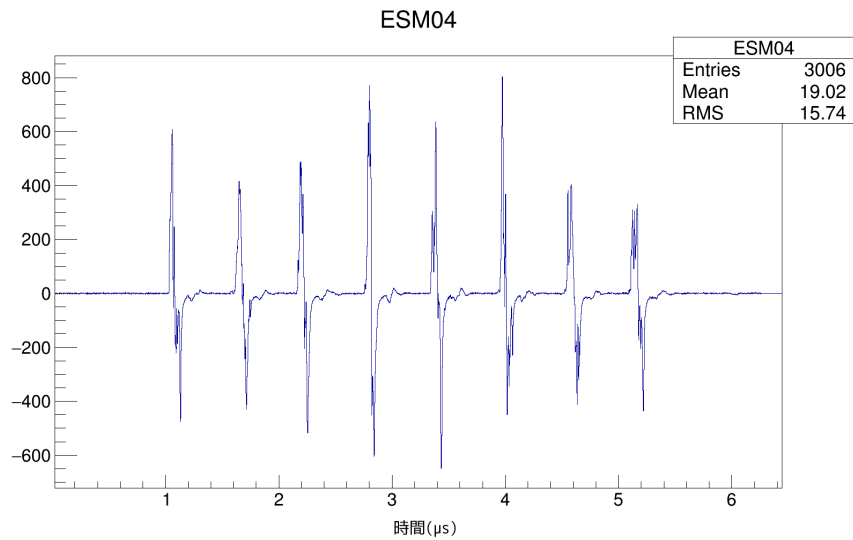


図 4.139: FADC で取得した ESM4 の波形

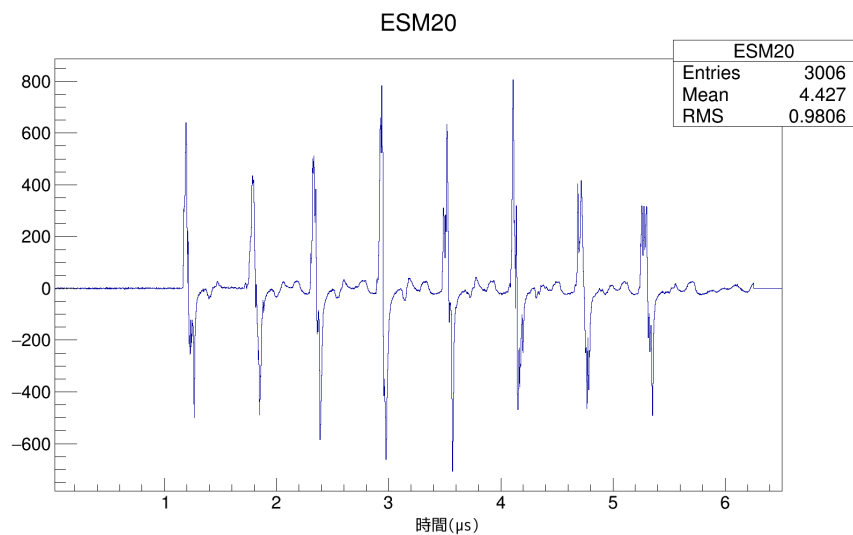


図 4.140: FADC で取得した ESM20 の波形

また、この生信号のデータは今まで何かに使われていたわけではないため、この波形が正常に取得できているか、また電極による波形に違いがないかを確認する必要がある。そのため、ESM4 に於いてオシロスコープで波形を取得し、比較を行った。オシロスコープは FADC との波形の比較のため、回路から FADC につながるケーブルを一つ取り外して取り付けした場合と、ESM の 4 つの電極の信号をそのまま取得するために、生波形取得のための回路へとつながるケーブルからオシロスコープへと繋げた場合の接続を行った。

以下にそれぞれの波形のオシロスコープの画像を載せる。

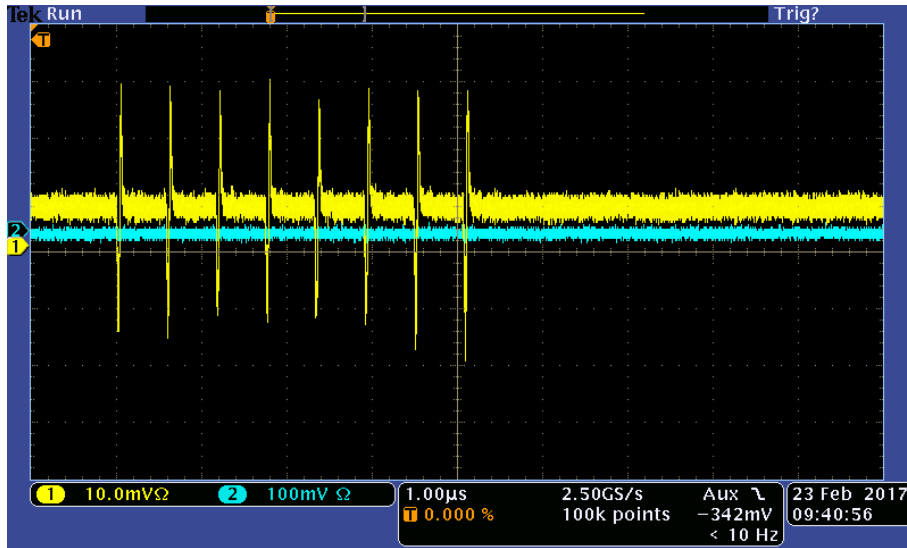


図 4.141: オシロスコープで取得した ESM4 の 4 電極合算波形

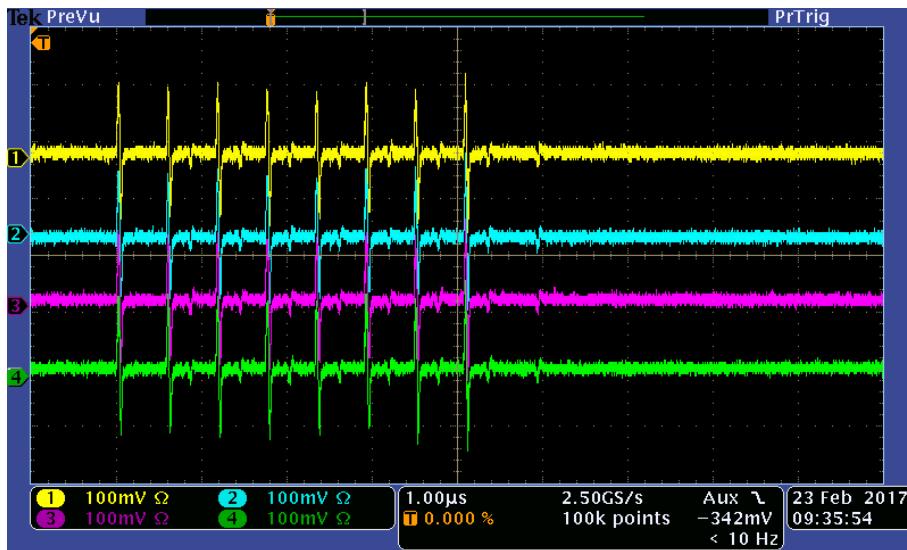


図 4.142: オシロスコープで取得した ESM4 の 4 電極それぞれの波形

そして、この図 4.141 のオシロスコープで取得した波形と図 4.139 の FADC で取得した波形を比較したものが、図 4.143 である。青線が FADC でのデータであり、赤線がオシロスコープでのデータである。両者の波形はよく一致していることがわかり、FADC で波形が問題なく取得できていることがわかった。なお、FADC の波形が歯抜けのような形でところどころ値が殆ど 0 になっているのは、FADC で取得してる時間差がある 3 つのケーブルの 1 本を抜いてオシロスコープに挿しているため、その分のデータが抜け落ちているためである。

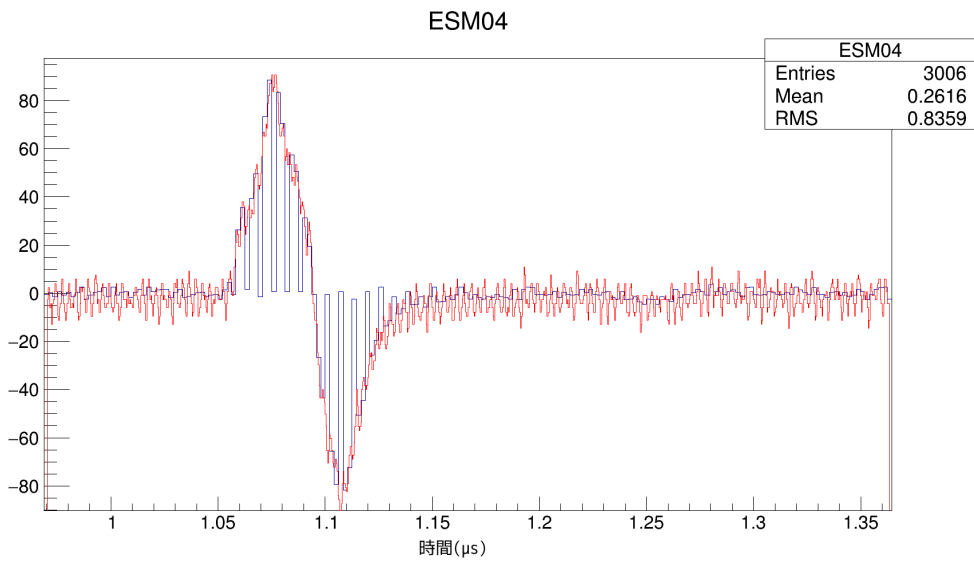


図 4.143: FADC とオシロスコープの波形の比較

次に、4つの電極の間に波形の違いがないかどうかを調べるため、4つの電極の波形を比較した。それが図 4.144 である。赤、緑、青、黒それぞれが各電極に対応している。図 4.144 からこれも波形に違いはみられず、フィルタの制作の際、4極の合算の信号を用いても問題がないことが確認できた。

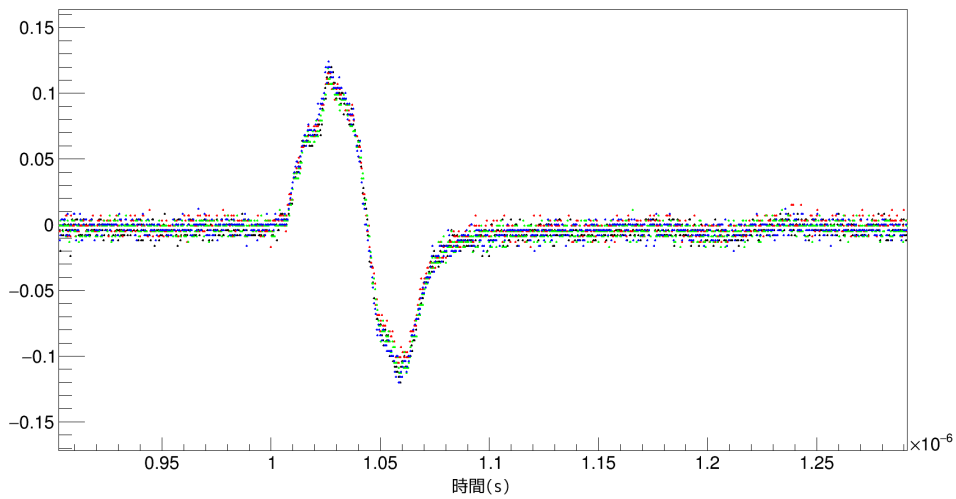


図 4.144: 4 極間の波形の比較

4.5.2 ウィナーフィルタについて

ウィナーフィルタ [20] はノイズ混入前の信号波形とノイズ信号の波形を利用して、ノイズが混入した信号からノイズを取り除くフィルタであり、フィルタの周波数特性は以下の式 4.10 で得られる。ここで $P_s(\omega)$ はノイズ混入前の信号のパワースペクトル、 $P_n(\omega)$ はノイズ信号のパワースペクトルである。

$$H(\omega) = \frac{P_s(\omega)}{P_s(\omega) + P_n(\omega)} \quad (4.10)$$

ここで、ノイズ信号の波形は元信号の波形と相関がないことが仮定されている。

4.5.3 ウィナーフィルタの制作

ウィナーフィルタは前述の通り、ノイズ混入前の信号のパワースペクトルとノイズ信号のパワースペクトルがあれば制作ができる。今回、ノイズ混入前の信号は ESM4 の信号そのものであり、既に波形情報は得られている。そこで、まずノイズ信号の波形情報を得る。

ノイズ信号の波形は ESM20 の波形から ESM4 の波形を引き、ノイズ信号を取り出す。この時波形の時間軸を合わせるため、相互相関関数を用いた。信号のサンプルを n 、そこからのズレを m とすると、信号 $x(n)$ と信号 $y(n)$ の相互相関関数 $\phi_{xy}(m)$ は

$$\phi_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+m) \quad (4.11)$$

となる。ここで N は全サンプル数である。この相互相関関数では 2 つの波形がどれほど類似しているかを表しており、ESM20 と ESM4 をの相互相関関数を求めると図 4.145 のようになる。横軸は波形の時間軸のズレを表しており、ここでこの波形のピークの位置が最も波形が一致している点となる。よってピークの位置のサンプル値分だけ波形をずらして ESM20 から ESM4 の波形を引けば良い。

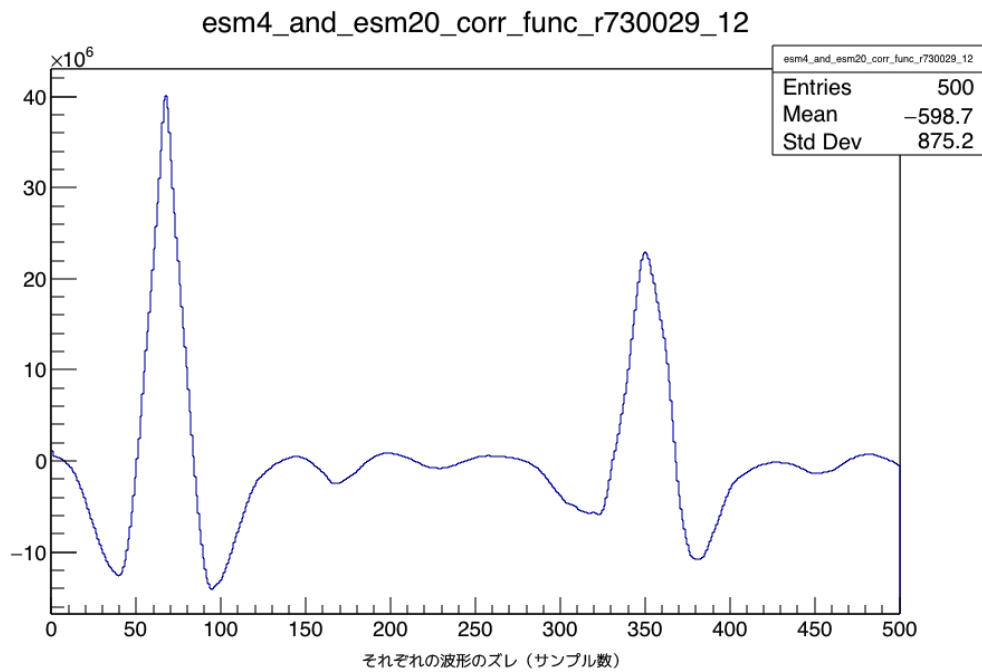


図 4.145: ESM4 と ESM20 の相互相関関数

その結果が図 4.146 である。しかし、それだけだと図 4.146 の様にビーム信号の波形も残ってしまうため、第 8 バンチの後にあるノイズ信号部分、正確には信号の後半 400 サンプル分を取り出し、それを使用した (図 4.147)。

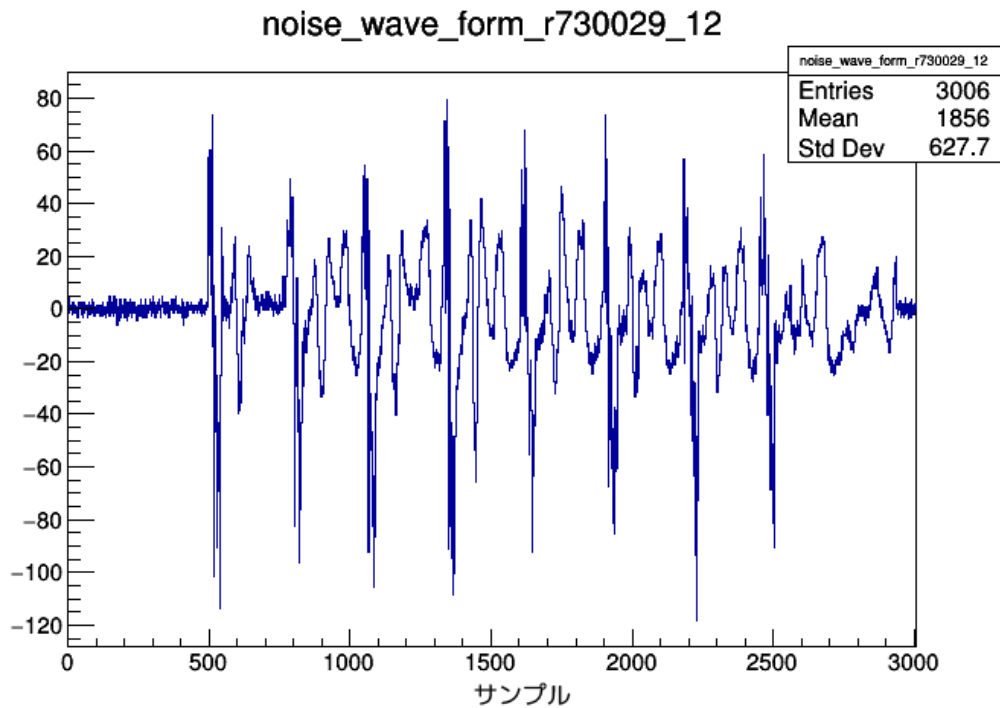


図 4.146: ESM20 から ESM4 の波形を引いて得たノイズ波形

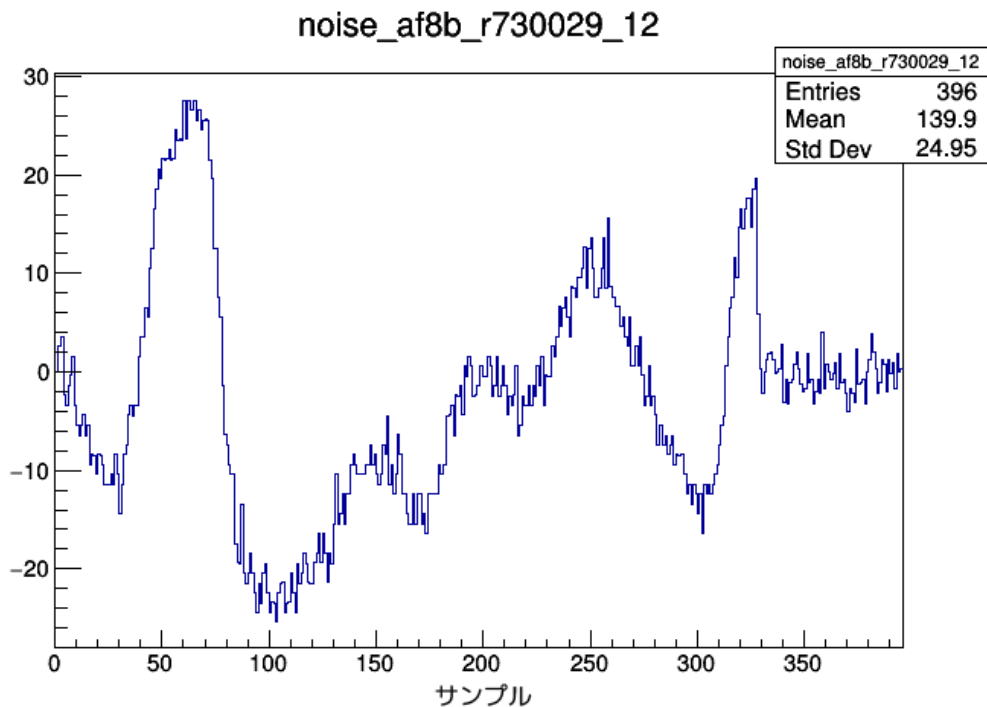


図 4.147: 第 8 バンチの直後のノイズ波形

こうして、ESM4 の波形は図 4.139、ノイズ信号の波形は図 4.147 の様に得られた。しかし、フィ

ルタを掛ける信号は ESM20 の積分波形となる。そのため、これらの波形も積分をする必要がある。それぞれ積分したのが以下の波形である。

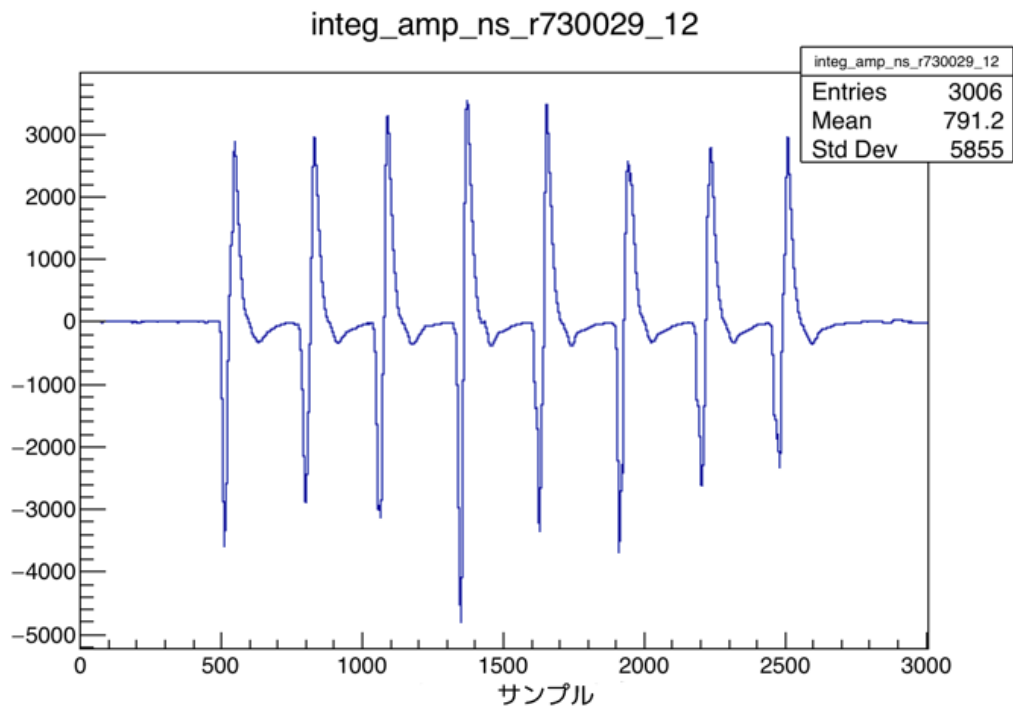


図 4.148: ESM4 の積分波形

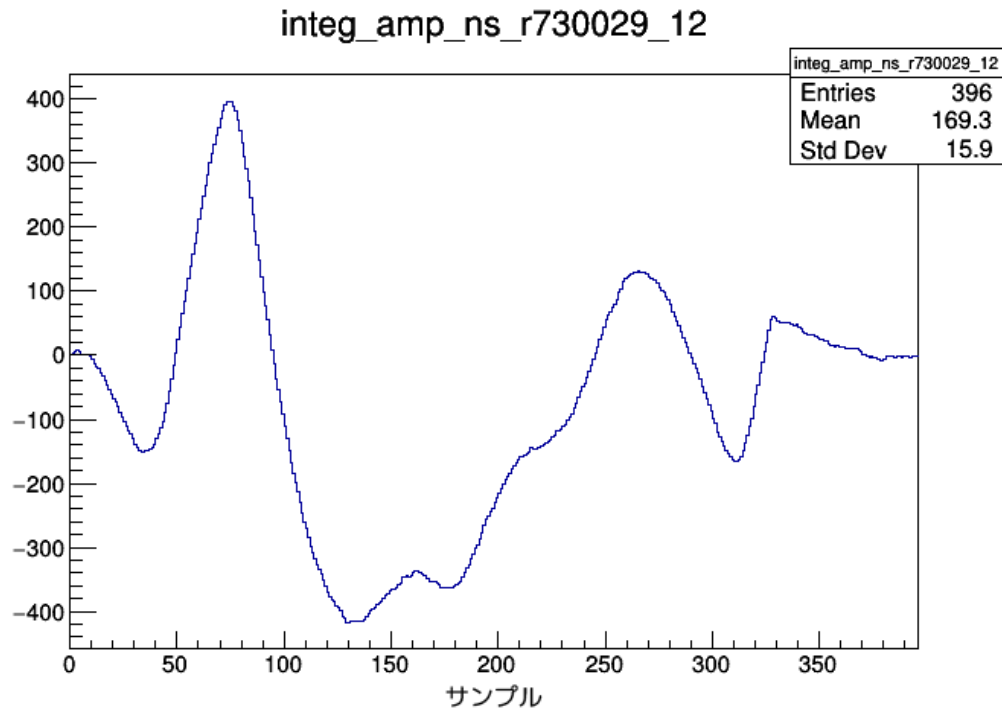


図 4.149: ノイズ信号の積分波形

この積分された波形を離散フーリエ変換（DFT）し、それぞれの波形のパワースペクトルを得る。しかし、DFT ではサンプリング周波数のサンプリング定理により、サンプリング周波数の 2 倍以上の周波数（ナイキスト周波数）に於いて、正確な変換が行えないことがわかっている。そのため、アンチエイリアスフィルタとして、サンプリング周波数の 2 倍である 960MHz 以上をカットするローパスフィルタをそれぞれの波形に掛けた。また、DFT では波形が繰り返している波形と仮定されて変換されるため、波形の両端の値が一致する必要がある。そのため、それぞれの波形に以下の数式で示されるハニング窓 [19] と呼ばれる窓関数を掛け、両端が 0 になるようにした。ここで、 $\alpha = 0.54$ 、 n はサンプル、 N は総サンプル数である。

$$\omega(n) = \alpha - (1 - \alpha) \cos \frac{2\pi n}{N - 1} \quad (4.12)$$

これらの処理の後、DFT を行うと ESM4 の信号は図 4.150、ノイズ信号は図 4.151 のようになった。

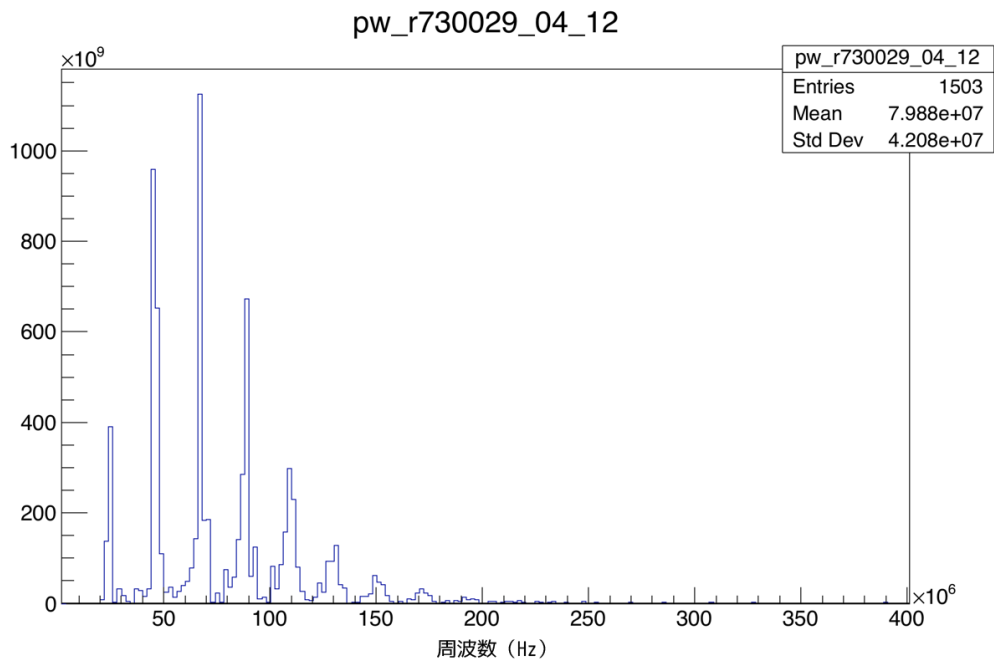


図 4.150: ESM4 の信号のパワースペクトル

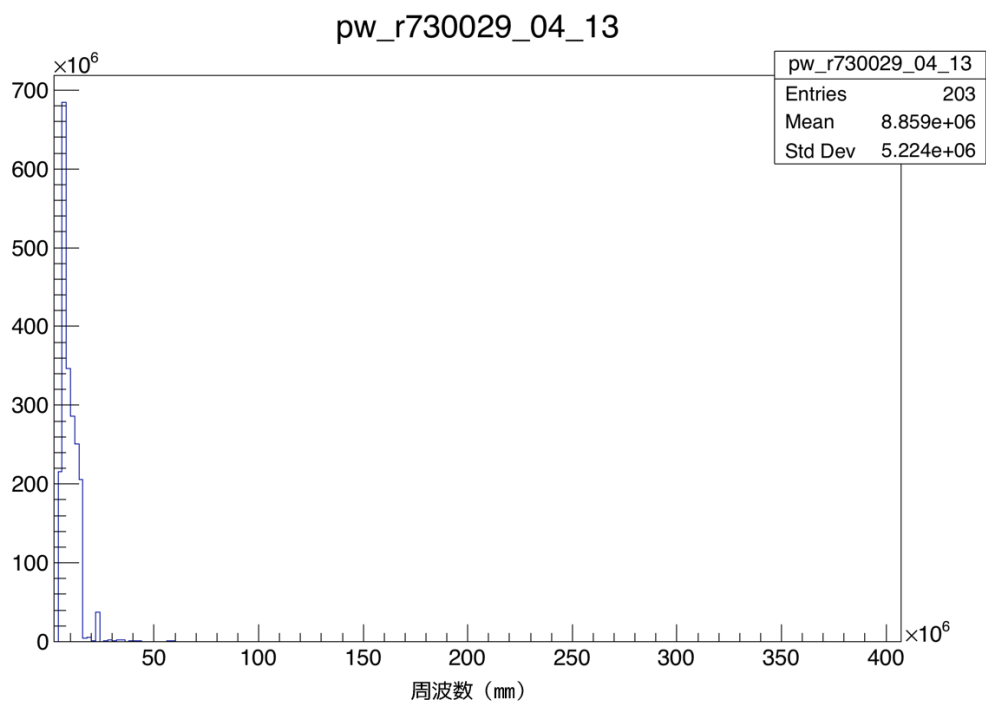


図 4.151: ノイズ信号のパワースペクトル

これらをそれぞれサンプルごとに式 4.10 の $P_s(\omega)$ と $P_n(\omega)$ に代入して計算し、ウィナーフィルタの周波数特性を得た、実際に得た周波数特性は以下の図 4.152 のようになった。

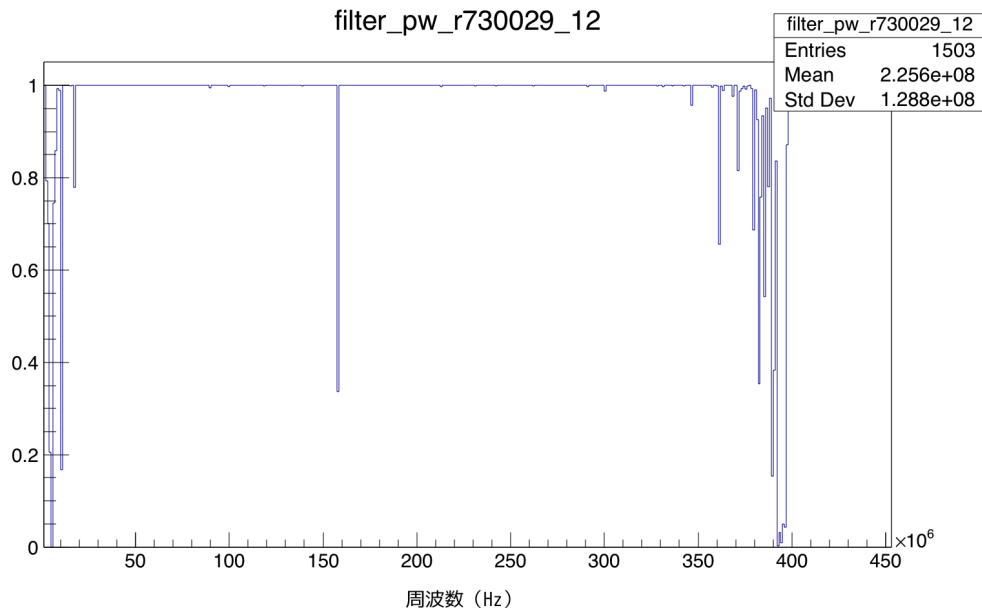


図 4.152: ウィナーフィルタの周波数特性

4.6 ビームを用いた改良後の位置分解能の評価

前節で求めたフィルタを実際のビームの ESM で取得した波形に適用し、ESM20 の垂直方向の位置分解能が変化したかを調べる。前節では一つのスピルの例のみを示してフィルタの周波数特性を得た。しかし、実際にはスピルごとに ESM4 とノイズ信号のパワースペクトルを計算し、スピルごとのフィルタの周波数特性を得て、スピル毎に適用させる。フィルタの適用は、実際にフィルタを適用させる ESM20 の垂直方向の電極の差及び和の積分波形のパワースペクトルをまず得る。これは前節で行ったように、アンチエイリアスフィルタと窓関数を通した後 DFT を行った。そして、サンプルごとにパワースペクトルに対してフィルタの周波数特性を掛け合わせ、フィルタを適用させる。ただし、ESM20 の波形のサンプリング周波数が 160MHz に対して、フィルタのサンプリング周波数は 480MHz とサンプリング周波数が違うため、フィルタのサンプリング周波数を 1/3 に落として ESM20 の波形のサンプリング周波数と一致させた。ESM20 のフィルタ適用前後の波形が以下の図 4.153、図 4.154 である。

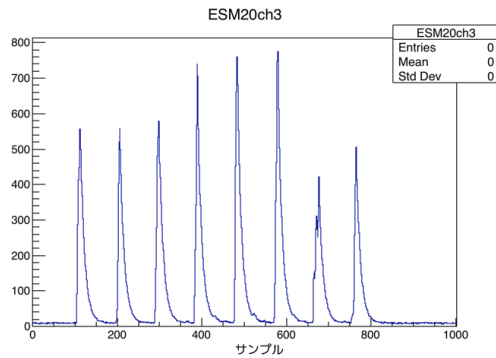


図 4.153: フィルタ適用前の ESM20 の波形

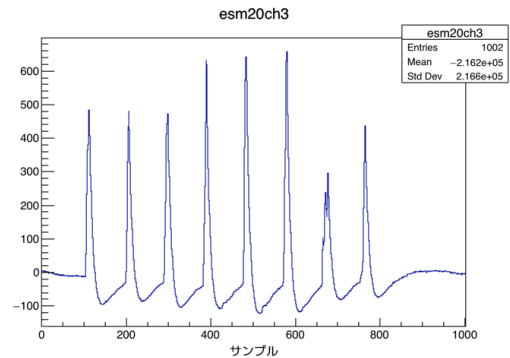


図 4.154: フィルタ適用後の ESM20 の波形

一見すると左のフィルタ適用前の方が形がきれいに見えるが、この波形は積分アンプに通さるため、右図のようにバンチの波形とその後のマイナスになってる部分の面積が足して 0 となる必要がある。よって、左のフィルタ適用前の波形は正常ではない。図 4.155 は ESM4 の波形だが、ESM20 ではフィルタ適用後、よりこのような波形に近くなっていることがわかる。

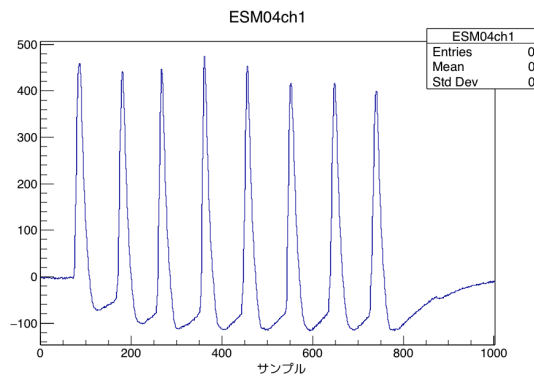


図 4.155: ESM の水平方向の電極の和の積分波形

このフィルタ適用後の波形データ 1000 スピル分を用いて、ESM20 の位置分解能を求めてみると、0.071mm となった。元のフィルタ適用前の ESM20 の位置分解能が 0.080mm 程度であったので若干改善が見られた。

ウィナーフィルタを用いた ESM20 の位置分解能の改良では、ノイズを減らすことが出来、位置分解能に改善が見られた。わずかとは言え位置分解能に改善が見られたので、今回制作したウィナーフィルタは ESM20 のノイズを除去するフィルタとしては有効であることがわかった。しかしながら、他の ESM の位置分解能と比べると十分とは言えず、ノイズを完全に除去するには至っていない。今後、ノイズをより高精度で取り出すことができれば、より位置分解能を改善することができると考えられる。今回はノイズ信号として、第 8 バンチ後のノイズ信号のみを使用しフィルタの作成を行った。そのため、ノイズ信号のサンプル数が少なく、ノイズ除去として不十分だった

可能性が考えられる。また、今回フィルタに使用した波形は4つ全ての電極を足し合わせた波形である。そのため、フィルタは全電極に同じようにノイズが混入していると仮定してノイズを除去しており、電極ごとの違いが考慮されていない。しかし、現実には電極ごとに混入するノイズの波形は異なるはずである。よって、それぞれの電極ごとの波形データを取得し、ノイズを解析すれば、より位置分解能が改善すると思われる。

今回は、ESM20 のみに関してフィルタを制作し、適用させたがノイズを減らせることを確認できたので、同様の方法で ESM21 に対してのフィルタを作ることも可能である。ただし、現段階では ESM21 では生波形の取得を行っていないため、波形取得用の FADC を設置する必要がある。

第5章 超伝導ビームライン用ビームプロファイ ルモニター駆動装置の改良

5.1 ビームプロファイルモニター SSEM の駆動装置について

ビームプロファイルモニター SSEM には前述の通り、ビームラインから出し入れをする駆動装置が取り付けられている。駆動装置は図 5.1 のようになっている、ステッピングモーターにより駆動が行われている。

実際の駆動の流れは次のとおりである。例えば、SSEM を取り出す際には図 5.1 にある 4 つのマイクロスイッチのうち一番右側のマイクロスイッチに丸で囲ってあるようにパーツが触れるとマイクロスイッチが押され、駆動は一旦停止する。そしてマイクロスイッチからパーツが離れるまで逆方向に駆動し、マイクロスイッチから完全に離れた位置で完全に停止する。逆にビームラインに入れる際には図 5.1 の最も左側のマイクロスイッチに触れるまでモーターは稼働することになる。また、後述の問題によって駆動装置が壊れてしまうのを避けるため、マイクロスイッチにパーツが触れてから、逆方向に稼働するのは最大 4000Pulse というリミットが設けられている。

また、常伝導区画の SSEM の駆動装置は図 5.1 の丸で囲ってあるところのように、マイクロスイッチを押すための台座側のパーツは台形のブロックとなっている。また、超伝導区画の駆動装置では図 5.2 で丸で囲ってあるところにあるようにネジが使われている。

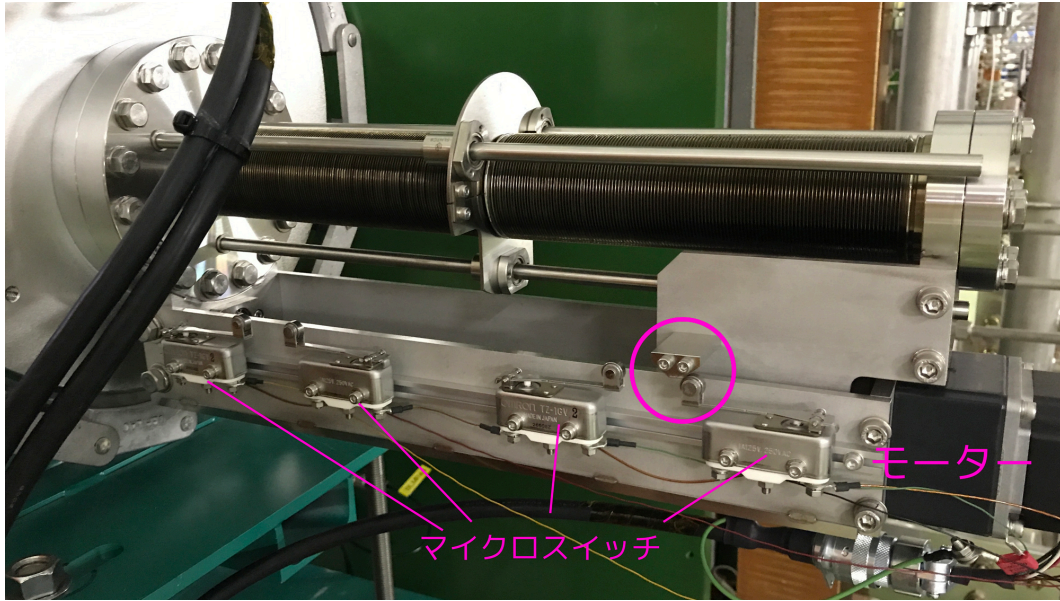


図 5.1: 常伝導ビームラインのSSEM 駆動装置

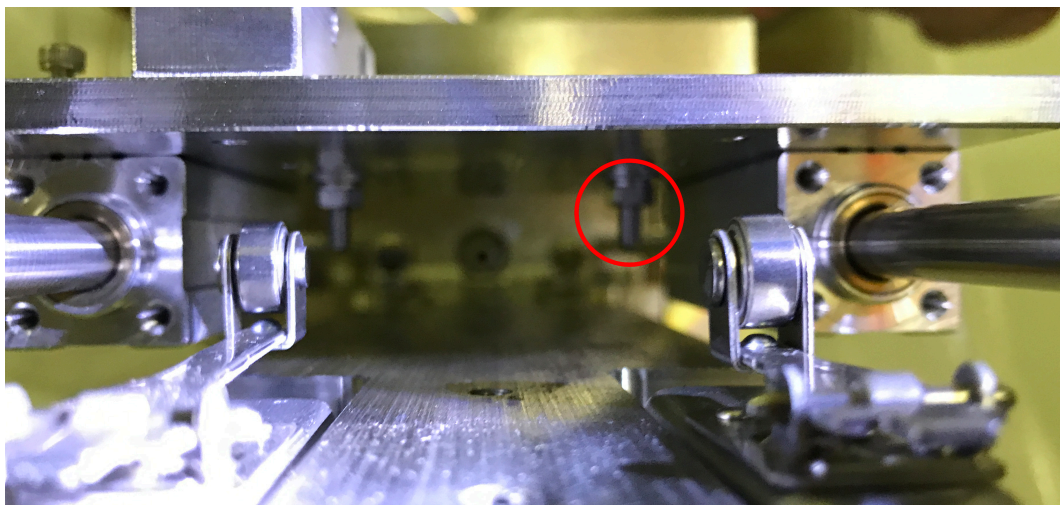


図 5.2: 超伝導区画の駆動装置のマイクロスイッチ周辺

また、図 5.1 は常伝導ビームラインにある SSEM の駆動装置だが、超伝導ビームラインにあるものも基本的には同じ仕組みである。しかし、超伝導ビームラインでは駆動装置自体もビームパイプの中に入っている形（図 4.7 及び、図 5.3 参考）となっている。

5.2 超伝導ビームラインのSSEM 駆動装置の問題

SSEM10, 11, 12, 13 の 4 台の SSEM はニュートリノビームラインのアーケセクションに設置されている。この区画では超伝導磁石が使われているため、ビームライン自体が液体ヘリウムによって

冷却されおり、また駆動装置自体もビームラインの中に設置されている。そのため、SSEMの駆動装置も真空かつ超低温で駆動するような設計が求められる。

図 5.3 で赤く示されてるところには軸受のためのベアリングが設けられているが、このベアリングも液体ヘリウムの温度でスムーズに動作する必要があるため、グリスを使用しない（グリスを使用すると凍ってしまうため）オイルレスベアリングが用いられている。しかし、図 5.4 にあるように、このベアリングでは駆動を繰り返すうちに摩耗してしまうという問題があった。

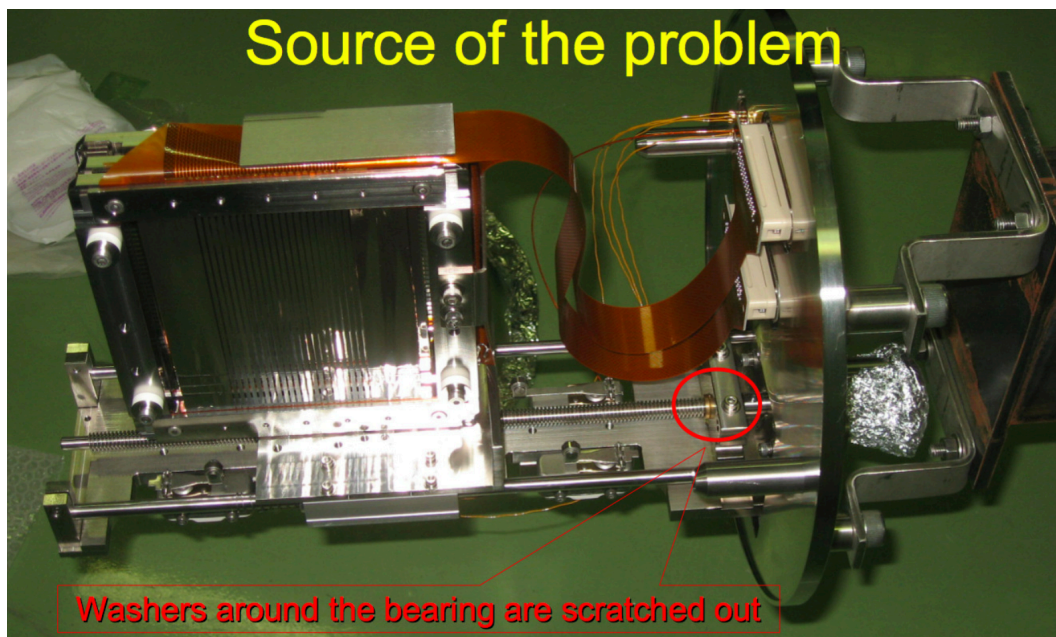


図 5.3: 超伝導ビームライン用 SSEM 駆動装置のベアリング



(a)



(b)

図 5.4: SSEM 11 の駆動装置に使われていたベアリング

この問題は程度の違いこそあるが、アークセクションにある全て SSEM で起こっていて、実際に駆動の悪化が確認されている。摩耗がひどくなってしまうと SSEM が完全に駆動できなくなってしまう可能性も考えられる。以下にそれぞれの SSEM の駆動装置の状態の変化について詳しく述べていく。

SSEM10

図 5.5 は SSEM10 の駆動の悪化具合を示しており、横軸が時間、縦軸がマイクロスイッチに一度あたってから再びマイクロスイッチを離れるまでのモーターの回転数を表している。図 5.5a が SSEM を内側（インストール側）のマイクロスイッチのグラフであり、図 5.5b が外側（取り出す側）のマイクロスイッチのグラフである。双方のグラフを見てわかるように、時間が経つごとにマイクロスイッチが離れるまでのモーターの回転数が増えている事がわかる。これは、前述のベアリングが摩耗したことにより、隙間ができてしまったことによるものである。

SSEM10 の駆動装置は 2009 年のビームスタート時から徐々に駆動が悪化し始め、2016 年に入ってから急激に悪化していることがわかる。

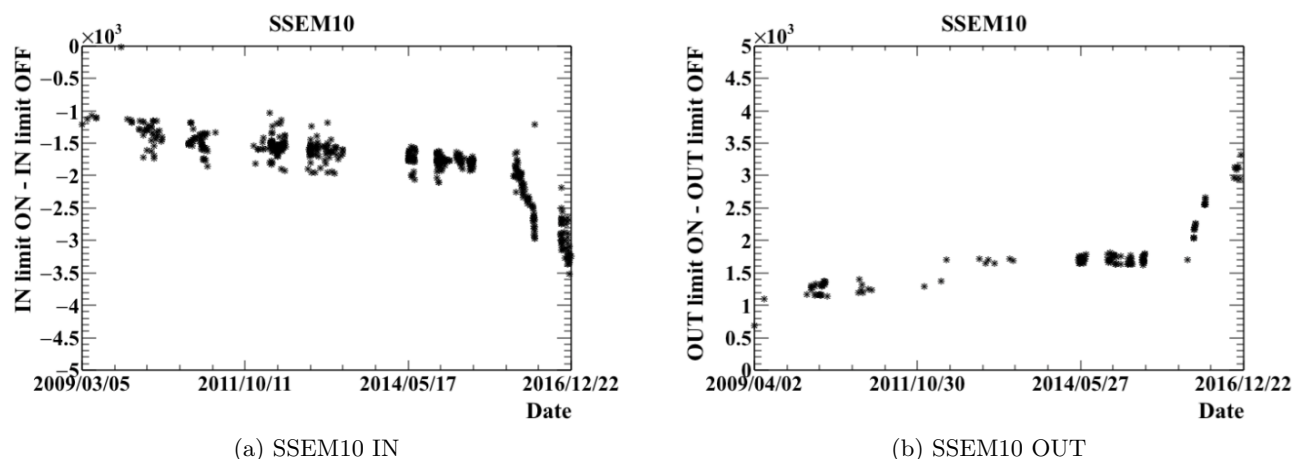
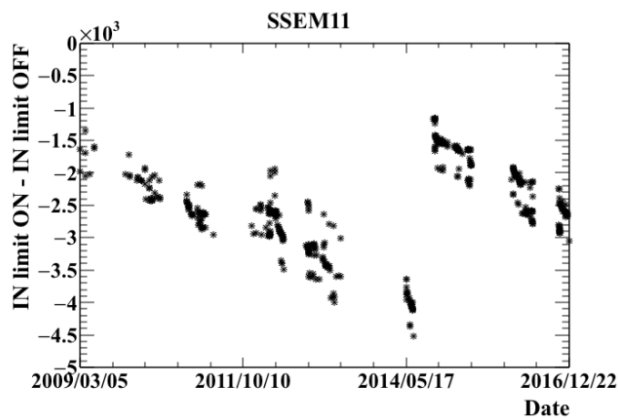


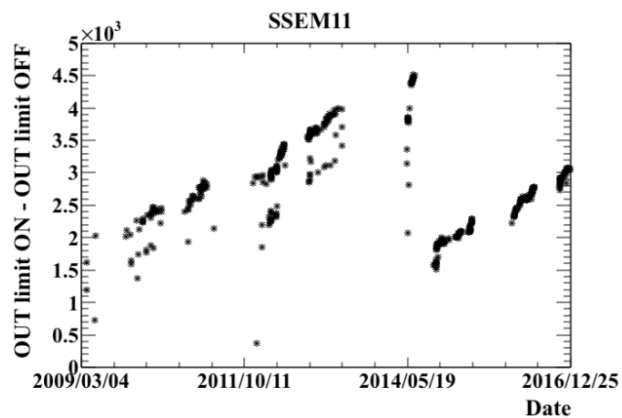
図 5.5: SSEM 10 における駆動の悪化の時間変化
縦軸はマイクロスイッチに接触してから離れるまでのモーターの回転数

SSEM11

SSEM11 の駆動装置に関しても、図 5.6 からわかるように、ビームスタート時から駆動が悪化していていることがわかる。SSEM11 及び SSEM12 は 2014 年夏に図 5.7 のように摩耗した分を補う形でステンレス製のワッシャーが取り付けられる改良が行われた。そのため、図 5.6 のグラフでもその時期に一度改善していることが見て取れる。しかし、グラフを見てわかるように改良後も時間が経つごとに摩耗が進んでいっているため、根本的な解決にはなっていない。



(a) SSEM11 IN



(b) SSEM11 OUT

図 5.6: SSEM 11 における駆動の悪化の時間変化

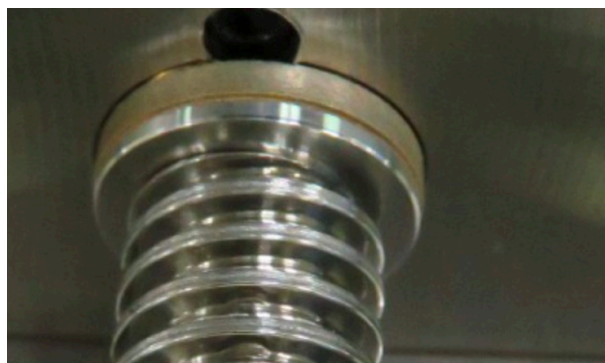
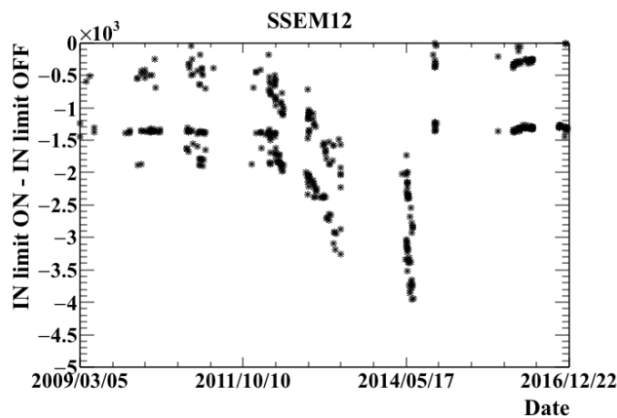


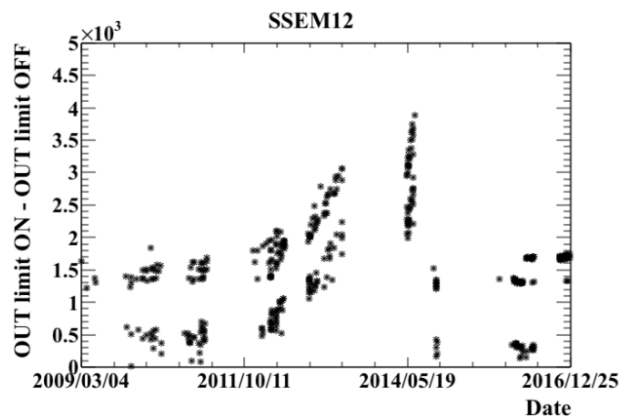
図 5.7: ステンレスのワッシャーを取り付けたベアリング

SSEM12

SSEM11 のところで述べたように、SSEM12 の駆動装置に関しても 2014 年に図 5.7 のように削れてしまった部分のかさ増しにより強靱なステンレス製のワッシャーを取り付ける改良作業を行っている。他の SSEM の駆動装置同様ビームスタート時から摩耗は進み駆動が悪化していつていること図 5.8 のグラフからもわかる。しかし、SSEM11 と違い、こちらでは 2014 年夏の改良以降、駆動が悪化している様子はみられず摩耗も進んでいないと考えられる。同じ改良を施した SSEM11 の駆動装置と SSEM12 の駆動装置でなぜこのような違いが起こったのかは明らかになってはいない。



(a) SSEM12 IN

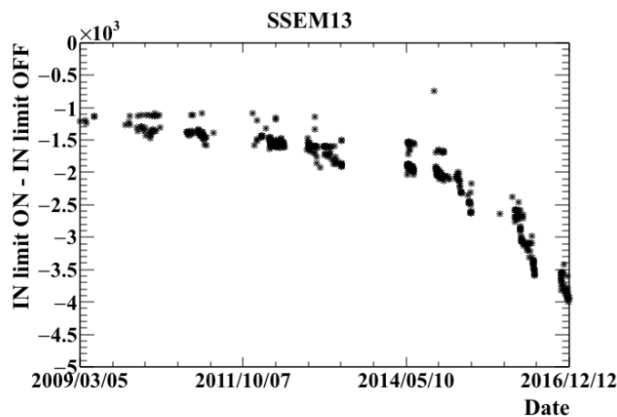


(b) SSEM12 OUT

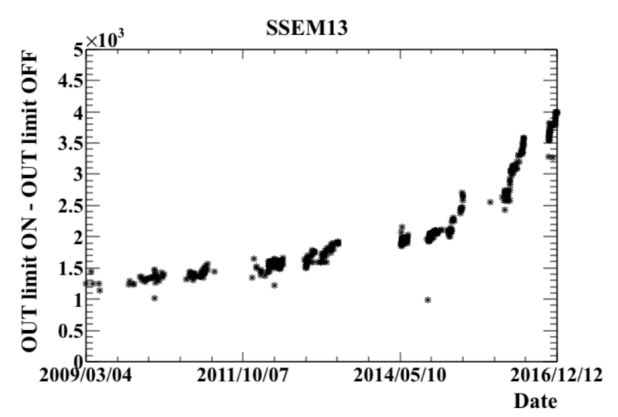
図 5.8: SSEM 12 における駆動の悪化の時間変化

SSEM13

SSEM13 の駆動装置は SSEM10 の駆動装置と同様、途中で改良等の作業を行っていないため、ビームスタート時から駆動が悪化し続けていることが、図 5.9 のグラフからもわかる。図 5.9 をみると、2016 年 12 月には SSEM13 の駆動装置はマイクロスイッチに触れてから離れるまでのモーターの回転数が 4000pulse に達してしまっていることがわかる。前述の通り、この時の最大の回転数が 4000pulse に設定されているので、これ以上摩耗すると SSEM13 では SSEM のインストールや取り出し作業が行えなくなってしまう。そのため、2016 年 12 月から、SSEM13 の測定での使用は中止され常時取り出された状態となっている。



(a) SSEM13 IN



(b) SSEM13 OUT

図 5.9: SSEM 13 における駆動の悪化の時間変化

以上のように、超伝導ビームラインの SSEM の駆動装置のベアリングの摩耗はどれも進んでおり、このまま駆動装置を使い続けると超伝導ビームライン上の全ての SSEM のが使えなくなって

しまうという状態であった。そのため、現在使用しているベアリングに代わる超低温で駆動ができ、かつ摩耗しないようなベアリングが必要である。次節以降でそのための新しいベアリングを用意し、それが実際に使用可能かどうかを調べるために行ったテストとその結果について述べる。

5.3 超伝導ビームライン用のSSEM 駆動装置のベアリングの耐久テスト

今回、SSEM の駆動装置のためにテストしたベアリングはスタンダードベアリング (図 5.10)、ニードルベアリング (図 5.11)、セラミックベアリング (図 5.13) の 3 種類である。以下にそれぞれのベアリングの特徴を述べる。

スタンダードベアリングは文字通り、一般的に使用されるタイプのベアリングである。一般的に売られているものであり既存のベアリングが固定されている金属ブロックの内径ともサイズはちょうどよい (図 5.10 参考) ため、既存のものがそのまま使えるが、真空や超低温化での駆動は行う前提のものではないため、そのような環境下での駆動の保証は得られない。また、後述するが、時間の都合上、結果的にこのベアリングに対してのテストは行っていない。

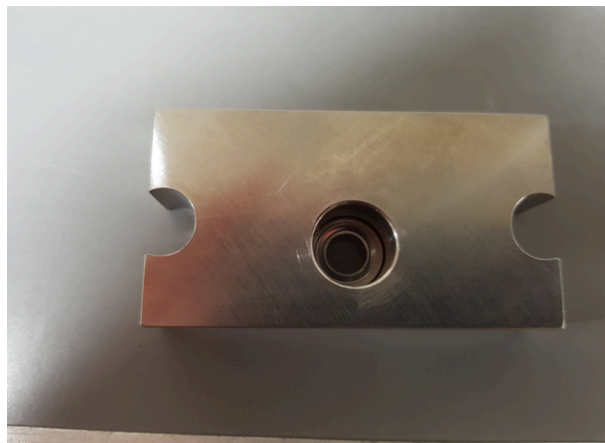


図 5.10: スタンダードベアリング

ニードルベアリングは図 5.11 のように、軸受にステンレス製の細いニードルがついている。このパーツをワッシャーで挟むことによって、ニードルが回転しベアリングとして機能するものである。このベアリングは常伝導区画に設置されている SSEM 駆動装置で 10 年程度使われているものであり、(少なくとも常温下では) 耐久性の保証はされている。しかし、軸受に使われている黒いパーツの素材がメーカー側の仕様として記載されておらず不明であり、またプラスチックの可能性が高いため、超低温下での動作に関して疑問が残る。また、サイズが既存のブロックに対しては大きすぎるため、図 5.12 のようにブロックを挟み込む形で取り付ける必要がある。



図 5.11: ニードルベアリング



図 5.12: ニードルベアリングの取り付け

セラミックベアリングはその名の通りセラミックで出来ているベアリングで、図 5.13 のように内外2つのセラミックのパーツが回転するというものである。このセラミックベアリングはそもそもグリスを使わない設計のため、真空内での動作には問題がない。また、セラミックという素材の特性上温度変化にも強いいため、超低温下でも動作には問題がないと予測される。しかし、セラミックは壊れやすい素材のため、金属ブロックの熱収縮などによって、壊れてしまう可能性が懸念される。また、セラミックベアリングはサイズが既存のブロックの内径に対して大きいため、新たにセラミックベアリング用の金属ブロックを用意をした。

後述するが、実際にビームラインにインストールしたベアリングはセラミックベアリングである。

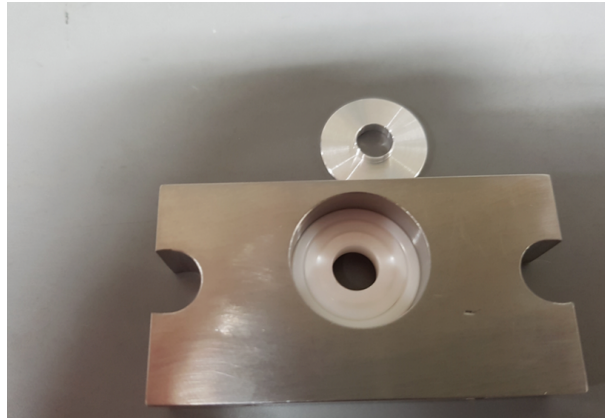


図 5.13: セラミックベアリング

以上3つのベアリングを実際の超伝導ビームラインに設置されている駆動装置と同じテスト用の駆動装置に取り付け、常温下での真空中と超低温下での真空中の2つの条件の元に駆動実験を行い、動作に問題がないかをテストした。

図 5.14 及び図 5.15 は実験に用いたテスト用の駆動装置である。図 5.14 にてステージと書かれているものは SSEM が載っているステージのことで、今回のテストでは SSEM 自体がなくてもテストの結果に影響がないため SSEM は取り外されている。また、図 5.15 でわかるように、今回のテストではマイクロスイッチは外側の2つのみを取り付けてある。図 5.15 で丸で囲まれているのがベアリングと金属のホルダーブロックである。この写真ではニードルベアリングが取り付けられている。また、図 5.14 の右上に写っている装置はモーターのコントローラーなどで写真には写っていないが、ここから更に PC に繋がっていて、モーター（駆動装置）を PC で動作させる事ができるようになっている。

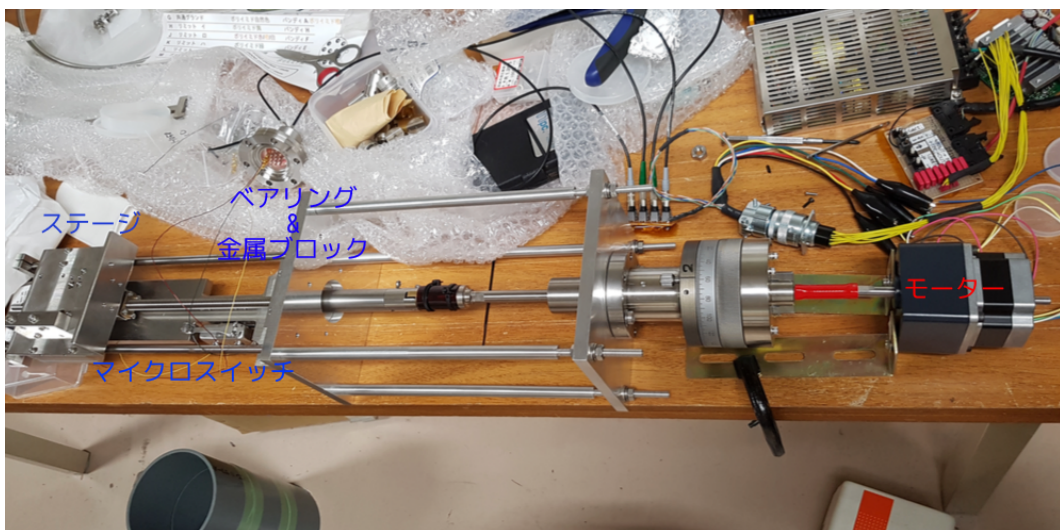


図 5.14: SSEM 駆動装置テストのセットアップ

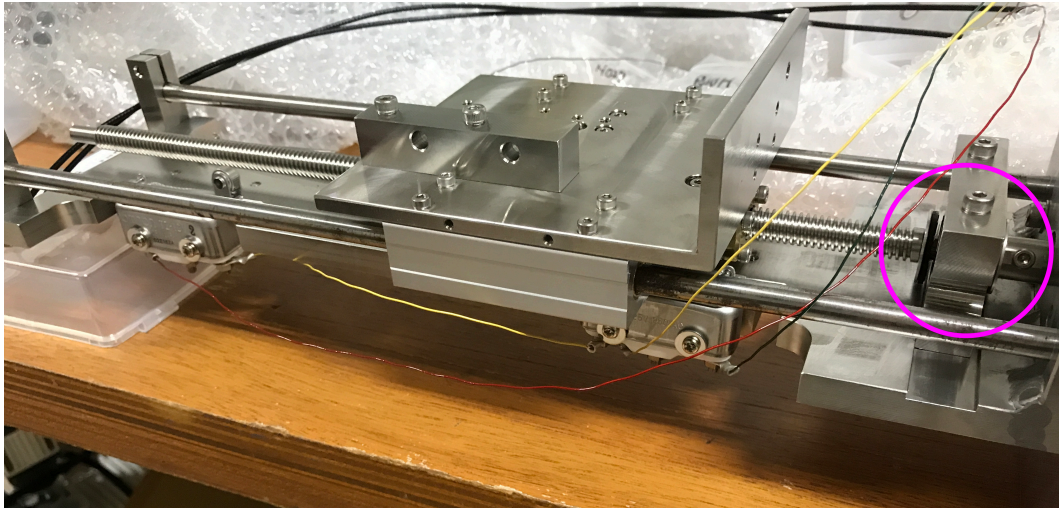


図 5.15: SSEM 駆動装置テストのセットアップ 2

5.3.1 室温でのテストのセットアップ

以下の図 5.16 に室温での実験装置を載せた。写真の通り、駆動装置を縦にして真空槽に入れて、ロータリーポンプを用いて真空を得た。また、マイクロスイッチは垂直に立てて使用することを想定されていない。駆動装置を縦にしてしまうとマイクロスイッチのスイッチ部分が起き上がってしまい、そのまま駆動させるとスイッチの破損につながる。そのため、図 5.17 のようにスイッチの可動域を狭めるようにワッシャーを噛ませる処理を行った。



図 5.16: 室温テストのセットアップ

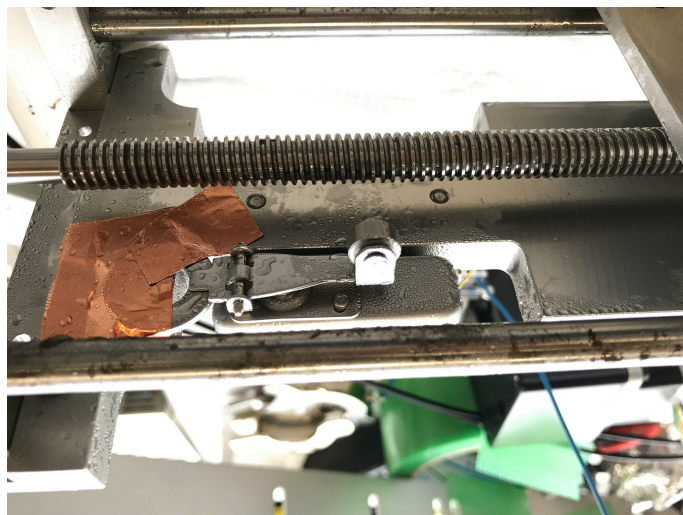


図 5.17: マイクロスイッチ

以上のようなセットアップでそれぞれのベアリングのテストを行った。以下にそれぞれの実験と

その結果について述べる。また、前述の通り、時間の都合上スタンダードベアリングでのテストは行わなかった。

5.3.2 超低温でのテストのセットアップ

超低温でのテストは図 5.18 のように、室温下でのテストで用いた真空槽ごと液体窒素が入った容器に漬け、冷却をするという形で行った。SSEM の駆動装置を設計した当初の冷却試験でも似たようなセットアップで実験が行われている。その時のデータから 1 時間程度冷却を行えば、内部の駆動装置まで完全に冷却されるということがわかっているため、今回はそのデータを参考に液体窒素に完全に浸してから一時間で完全に冷却が完了するという想定で実験を行った。



図 5.18: 超低温テストのセットアップ

5.3.3 ニードルベアリングのテスト

ニードルベアリングは前述の通り、ブロックの穴に対して大きいため、ブロックを両側から挟む形で固定をした（図 5.11, 図 5.12）。

室温下でのテスト

また、真空槽の真空は 3.5 4.0Pa 程度となった。テストでは出し入れをそれぞれ、23 回行った。以下の表 5.1 にそれぞれの駆動にかかった時間を載せる。

表 5.1: ニードルベアリング室温テストの詳細

回数	インストール時の 駆動時間 (秒)	取り出し時の 駆動時間 (秒)
1	68	65
2	68	68
3	68	68
4	68	68
5	68	68
6	69	67
7	69	68
8	69	68
9	69	67
10	69	68
11	69	68
12	68	67
13	68	68
14	85	78
15	68	69
16	70	69
17	69	69
18	69	69
19	70	68
20	69	69
21	70	69
22	69	68
23	70	67

14 回目では取り出しとインストール時の両方で時間が長くなっているが、この時はモーターのシャフトと駆動装置のシャフトを繋いでいたゴムチューブが滑り、駆動時間が長くなってしまったものである。それ以外では基本的に駆動時間、駆動ともに安定しており、駆動に関してトラブルは見受けられなかった。また、実験後に取り出したニードルベアリング、ブロックに摩耗の形跡はみられず、少なくとも室温下ではニードルベアリングの使用には問題がないと考えられる。

超低温下でのテスト

超低温下でのテストは前述の通り、駆動装置を真空にし、液体窒素中で一時間で冷却が完了するものとして、実験を行った。真空は液体窒素に浸ける前が 6Pa 程度、漬けてからは 7.8Pa 程度で、冷却が完了すると 6.8Pa 程度となった。なお、冷却前や冷却中も駆動テストを行い、その様子も調べた。詳細は以下の表 5.2 にまとめてある。

表 5.2: ニードルベアリング超低温テストの詳細

回数	状態	インストール時の 駆動時間 (秒)	取り出し時の 駆動時間 (秒)
1	冷却前	80	未計測
2	冷却前	83	未計測
3	冷却前	84	未計測
真空槽を開封			
4	冷却前	81	82
5	冷却前	81	未計測
駆動装置側のマイクロスイッチを押すネジの長さを変更			
6	冷却前	75	75
7	冷却前	76	71
8	冷却中	75	76
9	冷却中	76	77
10	冷却中	77	スタック
11	冷却中	-	76 (二回目)
12	冷却中	76	スタック
13	冷却済み	-	77 (二回目)
14	冷却済み	76	スタック
15	冷却済み	-	77 (二回目)
16	冷却済み	77	77
17	冷却済み	78	スタック
18	冷却済み	-	78
19	冷却済み	未計測	未計測
21	冷却済み	スタック	-
22	冷却済み	スタック	-
23	冷却済み	スタック	-

一部、時間が未計測となっているが、一度停止したあと逆回転してもマイクロスイッチから離れず強制終了に至った測定である。そのため、駆動時間が正確に出せず、未計測とした。一度目の真空槽の開封ではその原因を特定できなかったが、その後 SSEM のテーブル側のネジが長すぎてマイクロスイッチが深く押されることになり、規定の回転数である 4000Pulse を超えてもマイクロスイッチが押されたままになってしまっていたことがわかり、ネジの長さを調整した。

冷却中に一回、冷却後に3回取り出し時にスタックし駆動しなくなったもののもう一度やると取り出すことが出来たため、テストを継続している。最後は3回連続でスタックしたため、実験継続不能と判断し、実験を中断した。

実験終了後、モーターを外し、駆動装置のトルクを測ってみると手で回すのが困難なほどであり、トルクメーターのリミットである $240\text{mN}\cdot\text{m}$ を超えており計測はできなかった。これらの結果から、ニードルベアリングは超低温下での使用は不可能とわかった。

液体窒素から取り出したあと、ニードルベアリングを取り外してみると、危惧されていた軸受の破損など大きく変わった点は見受けられなかった。しかし、ニードルベアリング単体を液体窒素に浸してみると、軸受からニードルが脱落することが確認された。これは軸受に対して金属のニードルの熱収縮性が高いためであり、実験中も軸受からニードルが脱落し、中で引っかかって駆動に問題が起きたと推測される。

5.3.4 セラミックベアリングのテスト

セラミックベアリングは既存のブロックの内径よりも大きく、また構造上ニードルベアリングのように両側から挟むということが出来ないため、図 5.13 のように内径の大きいブロックを用意した。

室温下でのテスト

ニードルベアリングと同じ条件でテストを行った。詳細は以下の表 5.3 のとおりである。駆動回数が少ないのは時間がなく、またセラミックベアリングはセラミックという素材の特性から温度変化に強いことがわかっていたので室温テストを個別に行わず、超低温テストの直前のみで行ったためである。なお、真空は 8Pa 程度であった。

表 5.3: セラミックベアリング室温テストの詳細

回数	インストール時の 駆動時間 (秒)	取り出し時の 駆動時間 (秒)
1	78	80
2	78	79

また、上記の問題以外で駆動自体はなされたが、その動きはスムーズではなく、何かが引っかかっているような動きとなった。この原因や詳細については、後述の超低温下でのテストの部分でまとめて記述する。

超低温下でのテスト

超低温テストは、前述の室温テストの続きとしてそのまま液体窒素に浸して行ったものである。表 5.4 に詳細を載せた。真空は冷却中が 5.1Pa 程度、冷却後が 5.8Pa 程度であった。

表 5.4: セラミックベアリング超低温テストの詳細

回数	状態	インストール時の 駆動時間 (秒)	取り出し時の 駆動時間 (秒)
1	冷却中	78	79
2	冷却中	78	80
3	冷却中	77	78
4	冷却済み	78	79
5	冷却済み	77	79
6	冷却済み	77	スタック
7	冷却済み	-	75 (二回目)
8	冷却済み	78	スタック
9	冷却済み	-	78 (二回目)
10	冷却済み	77	79
11	冷却済み	77	スタック
12	冷却済み	-	77 (二回目)
13	冷却済み	77	79
14	冷却済み	77	79
15	冷却済み	77	79
16	冷却済み	77	79
17	冷却済み	77	79

セラミックベアリングに於いても、3 回ほどスタックがあったがいずれも 2 回目には駆動しており、最終的に動かなくなるということにはなかった。しかし、前述の室温でのテスト同様、駆動は特に SSEM を取り出す際にスムーズではなく、何かがこすれるような音が常にしているという状態であった。テスト終了後セラミックベアリングを取り出し、確認したところ、ベアリング自体に変化はなかった。ただし、セラミックベアリングとブロックの内径との間に僅かに隙間があり、また厚さもセラミックベアリングのほうが薄いため、ブロックにちゃんとベアリングが固定されていないという状態になっていた。そのため、図 5.19 のように回転するたびにブロックからセラミックベアリングが外側に飛び出してしまい、動きがスムーズでなくなっていたとわかった。この時のトルクを測定すると、どちらの方向でもおよそ 120mN・m となっており、やや高い値が計測された。

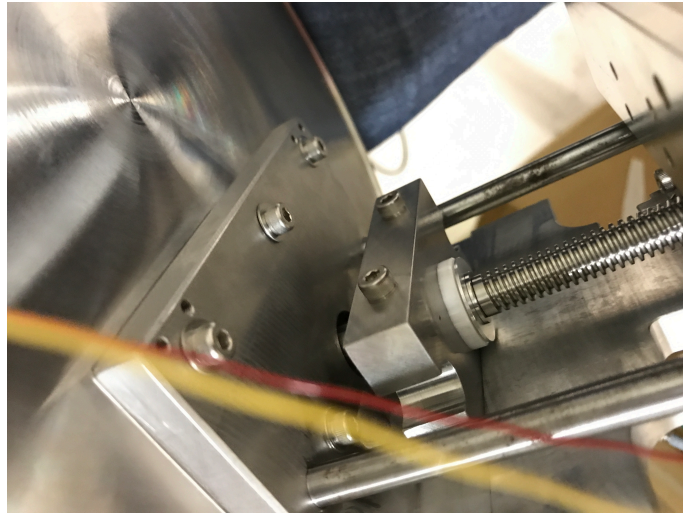


図 5.19: セラミックベアリングの状態

この問題は、セラミックベアリングがしっかりとブロックに固定されていれば起こらないと推測できる。そのため、セラミックベアリングを固定しているブロックを図 5.20 のように改良した。これはブロックを 3 重構造にし、ブロックの内側にセラミックベアリングを閉じ込め、両側から別なプレート状のパーツで挟み込み、セラミックベアリングがブロックの外へ飛び出すことのないようになっている。



図 5.20: 新たにデザインされたホルダーブロック

図 5.20 のブロックに変更した後、再度超低温テストを行った。詳細を以下の表にまとめた。

表 5.5: セラミックベアリング改良型ホルダーブロックの超低温テストの詳細

回数	状態	インストール時の 駆動時間 (秒)	取り出し時の 駆動時間 (秒)
1	冷却前	-	75
2	冷却前	77	74
3	冷却前	77	スタック
4	冷却前	-	75 (二回目)
5	冷却前	77	75
6	冷却前	76	75
7	冷却前	76	76
8	冷却前	76	75
9	冷却中	77	74
10	冷却中	76	75
11	冷却中	76	75
12	冷却中	75	75
13	冷却中	75	75
14	冷却済	75	78
15	冷却済	77	未計測
16	冷却済	81	未計測
17	冷却済	76	未計測
18	冷却済	89	-

最後の3回続いている取り出し時の未計測は、駆動終了時に一度マイクロスイッチに当たったもののそこから逆回転させた時にマイクロスイッチから離れず、強制終了させたものである。また、実験終了後に駆動装置のトルクを調べると、外側（SSEMを取り出した側）のマイクロスイッチ付近のみでトルクが高いことが確認された。しかし、それ以外の部分での駆動はスムーズだったため、ベアリングやブロックの問題ではないと考えられ、その後のチェックでSSEMの台座のマイクロスイッチを押すためのネジが長すぎたためだとわかった。

時間の都合上、これ以上超低温下でのテストが継続不能であった。上記の実験でセラミックベアリングの駆動に問題がないことはわかったが、熱収縮を殆どしないセラミックベアリングが熱収縮がある金属の中に入っているため、超低温下に於いて、金属ブロックの熱収縮によりセラミックベアリングが破壊されてしまう可能性がある。そのため、セラミックベアリングを取り付けたホルダーのブロックごと液体窒素に浸して、問題がないことを確認した。

5.4 ビームラインへのインストール

以上のテストを踏まえ最終的に、摩耗の深刻だったSSEM11とSSEM13のみにセラミックベアリングを導入した。ビーム稼働後、SSEM13に関しては別件のトラブル（駆動装置の制御システ

ム)により駆動しないという事態もあったが、それらも修復されセラミックベアリングをインストールした SSEM11、SSEM13 共に安定的に稼働している。実際に導入したセラミックベアリングがビームラインの中の駆動装置でどの程度摩耗しないかについては、現段階ではビームラインにインストールしてから時間があまり経っていないため、評価は出来ない。

第6章 結論

本研究では、今まで明らかになっていなかった ESM のビーム中心の位置分解能を SSEM で測定されたビーム中心位置の値との比較を行い、検証を行った。その結果、水平方向ではビーム自体のばらつきが位置分解能の測定結果に混入し、位置分解能が悪化しているように見えたが、垂直方向では ESM の位置分解能が得られた。位置分解能は J-PARC のビームラインである 3-50BT に設置されている同型のビーム位置モニタの位置分解能の測定結果から、特別な要因（例えば ESM20 にみられるようなノイズなど）がなければ $100\mu\text{m}$ 以下にはなるはずという推定があった。しかし、実際に垂直方向の ESM の位置分解能を求めてみると平均として $10\mu\text{m}$ 程度という予想より 1 桁程度良い値となった。

また、ESM5 については位置分解能が極端に悪かったが、これはプログラム上の問題であり、それを加療することによって他の ESM と同程度の値に戻った。ESM20 と ESM21 は当初予想されたように、電子の散乱によるノイズが入り、位置分解能が悪化していた。このうち、ビームのターゲットへの入射角の測定に利用され、より大強度でのビーム運転に重要となる ESM20 に関してはウィナーフィルタを用いてノイズの除去を試みた。その結果、 $9\mu\text{m}$ 程度位置分解能がよくなった。

また超伝導区画の SSEM の駆動装置のベアリングとして、ニードルベアリングとセラミックベアリングの超低温下での駆動テストを行い、ビームラインに導入可能かどうかをテストした。結果、セラミックベアリングが超低温下での駆動に適していることがわかった。そして、超伝導区画の SSEM である SSEM10、SSEM11、SSEM12、SSEM13 のうち、駆動装置のベアリングの摩耗が深刻だった SSEM11 と SSEM12 に関して、ベアリングをセラミックベアリングに交換し、現在も順調に駆動が行われている。長期的な摩耗具合や駆動の安定性に関してはまだ確定的な評価は行えないが、残りの SSEM10 と SSEM13 の駆動装置も来夏にはセラミックベアリングに換装する予定である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多数の方にご指導、ご協力をいただきましたことをこの場を借りて感謝を申し上げます。

指導教官である角野秀一准教授には、T2K 実験への参加の機会を下さり、また研究において数多くの助言やご指導をいただきました。深く感謝を申し上げます。住吉孝行教授、汲田哲郎助教には、本修士論文や学会発表資料などの助言や添削を丁寧にしていただけただけなことや数多くの助言をくださったことを感謝いたします。浜津良輔客員准教授、千葉雅美客員助教、松原綱之特任准教授には他の実験グループでの視点でのアドバイスやご指導を頂きました。研究室の先輩である米永匡伸氏には研究内外において様々なアドバイスをいただきました。感謝いたします。

T2K 実験グループにおきましては、研究に際し、様々な助言やご指導、そして実験に協力していただいた高エネルギー加速器研究機構の Megan Friend 助教、坂下健研究機関講師、藤井芳昭教授に深く感謝いたします。

また、研究室の同期である市川星磨君、野口光太君、吉岡輝昭君には同期として苦楽を共にし、充実した研究生生活をおくることが出来ました。後輩である柿本詩織さん、小西達也君、為近彩智さん、吉川広陽君、栗田口唯人君、西諒真君、柳田大健君には楽しい研究生生活を遅らせてもらいました。皆様に心より感謝を申し上げます。

最後に、充実した研究生生活を送れたのは、日々の生活面を支援して下さった母親のおかげです。深謝いたします。

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] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. "Remarks on the unified model of elementary particles" Prog. Theor. Phys. Vol. 28, p. 870 (1962)
- [4] Leon M. Lederman, "Observations in particle physics from two neutrinos to the standard model", science.244.4905.664 (1988)
- [5] K. Kodama et al. [DONUT Collaboration], "Observation of Tau Neutrino Interactions", Phys. Lett. B504:218-224 (2001)
- [6] Y.Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation", Phys. Rev. Lett. 93, 101801 (2004)
- [7] 山田作衛他編, "素粒子物理学ハンドブック", 朝倉書店 (2010)
- [8] CERN-EP Seminar on 20 September 2016; <https://indico.cern.ch/event/548805/> (2016)
- [9] F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration], "Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment", Phys. Rev. D 95, 072006 (2017)
- [10] M. H. Ahnet et al. [The K2K Collaboration], "Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment", Phys.Rev.D74:072003 (2006)
- [11] P. Adamson et al. [The NOvA Collaboration], "Constraints on Oscillation Parameters from ν_e Appearance and ν_μ Disappearance in NOvA", Phys. Rev. Lett. 118, 231801 (2017)
- [12] The T2K Collaboration "Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam" Phys.Rev.Lett. 112, 061802 (2014)
- [13] T2K presents hint of CP violation by neutrinos; <http://t2k-experiment.org/ja/2017/08/t2k-2017-cpv/>

- [14] 柴田政宏、Nicholas C.Hastings、石井孝信、角野秀一 “T2K 実験の陽子ビームモニター” 高エネルギーニュース 28-4 (2010)
- [15] 青木茂樹、中家剛、塚本敏文、”T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis” 高エネルギーニュース 29-2 (2010)
- [16] 南野彰宏、大谷将士, “T2K 実験ニュートリノビームモニター (INGRID)” 高エネルギーニュース 29-1, 10 (2010)
- [17] Y.Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “The Super-Kamiokande detector” Nucl. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [18] 手島昌己、外山毅、花村幸篤、 “J-PARC 3-50BT のビーム位置モニタの測定精度の改善” Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2013)
- [19] 萩原将文 『デジタル信号処理 (第2版)』 (森北出版, 2015)
- [20] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling (丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠訳) ”Numerical Recipes in C (日本語版)” (技術評論社, 2004)