

2023 年度 修士論文

T2K 実験ニュートリノビーム運転における  
ミューオンモニターの研究  
(Study of the muon monitor for neutrino-beam operation  
in the T2K experiment)

大阪公立大学大学院理学研究科  
物理学専攻  
高エネルギー物理学研究室

博士課程（前期課程）2 年  
学籍番号 BHB22044

川村 悠馬

2024 年 2 月 1 日

## 概要

ニュートリノは標準模型に含まれる素粒子の一つで、 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  の 3 種類存在する。それぞれニュートリノの質量固有状態が重なり合ったものであり、これをフレーバーと呼ぶ。ニュートリノは飛行中にフレーバーが変化するニュートリノ振動現象を起こす。T2K(Tokai to Kamioka) 実験は 2009 年から行われている長基線ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成したニュートリノを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデで観測することでニュートリノ振動確率を精密測定する。ニュートリノビームは J-PARC で加速した陽子ビームを炭素標的と衝突させて生じる荷電パイオンを特殊な電磁石 (電磁ホーン) で収束、崩壊させて生成する。このニュートリノビームの位置や角度を監視するために T2K 実験のビームライン上には、陽子ビームモニターとニュートリノビームモニター、ミュオンモニターを設置している。ミュオンモニター (MUMON) は、J-PARC でニュートリノを生成する過程で発生するミュオンを観測することで間接的にニュートリノをモニターする検出器である。ニュートリノより反応断面積が大きいミュオンを検出するため、ニュートリノビームをリアルタイムでモニタリングできる。MUMON は炭素標的よりも下流におけるニュートリノを即時解析できる唯一のモニターであり、T2K 実験において極めて重要な検出器である。T2K 実験ではデータの統計量を増やすために、ハイパーカミオカンデの建設と J-PARC のビームアップグレードが計画されている。J-PARC のビームアップグレードに伴い、MUMON に到来するミュオンフラックスも増加するため、現在 MUMON では半導体検出器 (Si) の放射線劣化やガス検出器 (IC) の線形性の悪化などが課題となっている。

2023 年の T2K 実験では陽子ビームを 1.36 秒間隔で打ち出し、ビーム強度は 760 kW に到達、電磁ホーンの電流値が +320 kA で運転された。これらのビームアップグレードによって、1 パルスあたりのミュオンフラックスが過去最大となり、IC は信号収量やミュオンビームプロファイルが不安定だという結果が得られた。Si の動作は MUMON で要求される測定精度を保っていたが放射線劣化への対策は Si の交換以外に無く、将来強度のミュオンフラックスでは約 30 日の連続運転で交換が必要になると予想されている。これにより、Si は MUMON での継続的な稼働について課題がある。

MUMON ではビームアップグレードに伴う課題の解決策として、十分な測定精度と高い放射線耐性を持った新しい検出器である電子増倍管 (EMT) の開発を行った。EMT の性能は J-PARC での測定と東北大学電子光理学研究センターでの実験により、MUMON の要求精度を十分に満たしていることがわかっている。他にも EMT には初期不安定性と呼ばれる信号不安定性があり、その原因としてダイノードの材料であるアルカリ金属やアンチモン安定化に伴う信号の低下と温度依存性があることがわかっている。

2023 年の T2K 実験でも MUMON に EMT を設置し、EMT の動作をミュオンビームを用いて測定した。MUMON はエンクロージャーと呼ばれるアルミの箱の中に Si と IC が取り付けられており、EMT はエンクロージャー内部の Si の真上に 7 個、エンクロージャー外部の IC 側の外壁に 2 個設置した。Si の真上に取り付けた EMT はミュオンビームを測定することに成功しエンクロージャー内部でも十分に動作していたが、EMT のゲインの HV 依存性がビームプロファイルの測定に有意に影響している結果が得られた。したがって今後 EMT を運用する際の課題として、ビーム強度ごとの印加電圧の設定や EMT のゲインの個体差を較正する方法などが残っている。エンクロージャー外部の EMT は、エンクロージャー内部の EMT と信号安定性を比較するために設置した。その結果、MUMON 外部の EMT にはビーム運転開始の数日間、信号収量 (EMT/CT, EMT/Si) が 1% 程度低下することが分かった。エンクロージャー内部の EMT にはこれらの振る舞いが確認されなかったため、今回測定した EMT の初期不安定性は EMT 周囲の温度変化やミュオンの揺らぎなどが原因である可能性が高いと考えられる。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	ニュートリノ振動実験	3
第 2 章	Tokai to Kamioka 実験 (T2K 実験)	6
2.1	概要	6
2.2	J-PARC	6
2.3	T2K ビームライン	8
2.4	T2K 実験の将来計画	15
第 3 章	ミュオンモニター (MUMON)	16
3.1	MUMON の概要	16
3.2	Si PIN photo diode (Si)	17
3.3	Ionization Chamber(IC)	20
3.4	MUMON キャリブレーション	21
3.5	MUMON ビームプロファイル測定	25
3.6	ビームアップグレードの影響	25
第 4 章	T2K Run12, Run13 の MUMON の測定	27
4.1	概要	27
4.2	MUMON の波形	28
4.3	ミュオンプロファイル	29
4.4	MUMON のヒストリープロット	30
4.5	T2K 実験 ビームスキャン	32
第 5 章	Electron Multiplier Tube(EMT)	37
5.1	EMT の概要	37
5.2	EMT の先行研究	40
5.3	EMT の放射線耐性	44
5.4	EMT の線形性	46
5.5	EMT の信号安定性	47
第 6 章	T2K Run12, Run13 EMT の測定	52
6.1	セットアップ	52

---

6.2	EMT の波形	55
6.3	EMT の一次元ミュオンプロファイル	61
6.4	EMT の信号安定性	65
第 7 章	結論	70
	謝辞	72
	引用文献	73

# 目次

1.1	ミューオンニュートリノの荷電カレント反応のファインマンダイアグラム.	4
1.2	スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測結果.	5
2.1	T2K 実験の概要図.	6
2.2	J-PARC の概要図.	7
2.3	J-PARC の陽子ビームの構造.	8
2.4	T2K ビームラインの全体図.	9
2.5	T2K 実験陽子モニター.	10
2.6	2 次ビームラインの模式図.	10
2.7	ニュートリノ振動確率とエネルギー分布.	12
2.8	パイオンの崩壊の模式図 (左). パイオンとニュートリノのエネルギーの関係 (右).	12
2.9	INGRID の概要図. 右側は INGRID を構成するモジュールの内部構造である.	13
2.10	ND280 の概要図.	14
2.11	スーパーカミオカンデ内水槽の写真.	14
2.12	スーパーカミオカンデで検出されたニュートリノ事象.	15
3.1	ミューオンモニターの概要図.	16
3.2	MUMON 付近の構造物の概要図.	17
3.3	MUMON Si の写真.	18
3.4	MUMON で使用している Si PIN フォトダイオード本体の写真.	18
3.5	各 MR Run の Si/IC の信号比.	19
3.6	ミューオン照射量と Si のリーク電流の相関図.	19
3.7	IC の写真. 1 本の管に 7 個のセラミックプレートが入っている.	20
3.8	IC の空間電荷効果.	21
3.9	IC のパイルアップ.	21
3.10	エレキキャリブレーションのパルス波.	22
3.11	エレキキャリブレーションの結果.	23
3.12	IC の架台を動かして取得した 9 カ所のミューオンプロファイル.	24
4.1	低強度 (約 3 kW) の Si の波形.	28
4.2	低強度 (約 3 kW) の IC の波形.	28
4.3	高強度 (710 kW) の Si の波形.	28
4.4	高強度 (710 kW) の IC の波形.	28
4.5	低強度の Si のミューオンプロファイル.	29

4.6	低強度の IC のミュオンプロファイル. . . . .	29
4.7	高強度の Si のミュオンプロファイル. ビーム強度は 710 kW, 8 バンチ, ホーン電流 320 kA である. . . . .	29
4.8	高強度の IC のミュオンプロファイル. . . . .	29
4.9	T2K Run13 の Si yield. 縦軸は Si/CT05 (nC/10 <sup>12</sup> ppp) を表す. ppp は proton per pulse の略称. . . . .	30
4.10	T2K Run13 の IC yield. 縦軸は IC/CT05 (nC/10 <sup>12</sup> ppp) を表す. . . . .	30
4.11	T2K run13 の MUMON X-center. . . . .	31
4.12	T2K Run13 の MUMON Y-center. . . . .	31
4.13	T2K run13 の MUMON X-sigma. . . . .	31
4.14	T2K Run13 の MUMON Y-sigma. . . . .	31
4.15	T2K Run13 のホーン電流. . . . .	32
4.16	ホーン電流と MUMON Y-center の相関図. 12/8–12/9 の 600 kW 連続運転の一部. . . . .	32
4.17	ホーン電流と MUMON Y-center の相関図. 12/20–12/22 の 710 kW 連続運転の一部. . . . .	32
4.18	陽子ビーム X-center vs MUMON X-center. . . . .	33
4.19	陽子ビーム Y-center vs MUMON Y-center. . . . .	33
4.20	ビームスキャンで用いる SSEM19 から MUMON までの各装置の構造. . . . .	33
4.21	T2K Run5, Run6 のビームスキャンの結果. . . . .	34
4.22	ビーム上流から見たバッフルと炭素標的の概要図. . . . .	34
4.23	陽子ビームの X-center とミュオンビームの X-center の関係. . . . .	35
4.24	陽子ビームの Y-center とミュオンビームの Y-center の関係. . . . .	35
4.25	陽子ビームの X-center とミュオンビームの X-sigma の関係. . . . .	35
4.26	陽子ビームの Y-center とミュオンビームの Y-sigma の関係. . . . .	35
4.27	JNUBEAM を用いたビームスキャンのシミュレーション結果. . . . .	36
5.1	EMT とブリーダー回路の写真. . . . .	37
5.2	EMT による信号増倍の模式図. . . . .	38
5.3	EMT のブリーダー回路の模式図. . . . .	38
5.4	2017 年, T2K run8 の MUMON 外部 EMT の配置図. . . . .	41
5.5	2018 年, T2K run9 の MUMON 外部 EMT の配置図. . . . .	41
5.6	2021 年, T2K run11 の MUMON 外部 EMT の配置図. . . . .	42
5.7	EMT のセットアップの写真. . . . .	42
5.8	ELPH 研究施設の概要. . . . .	43
5.9	第 3 回電子ビームテストのセットアップの写真. . . . .	43
5.10	EMT と Si の放射線劣化の測定結果. . . . .	44
5.11	J-PARC ミュオンビームテストで測定された EMTP6A と EMTP5A の波形. . . . .	45
5.12	EMTC3 のビーム強度スキャンの結果. . . . .	46
5.13	EMTC4 のビーム強度スキャンの結果. . . . .	46
5.14	ELPH 電子ビームテストの線形性測定の結果. . . . .	47
5.15	EMTC3 の信号収量と時間関数のプロット (2017, Run8). . . . .	48
5.16	EMTP5B の信号収量と時間関数のプロット. . . . .	48
5.17	ELPH 電子ビームテストで測定された EMT の温度依存性. . . . .	49
5.18	MRRun78, Run79 の EMTP5B/CT のヒストリープロット. . . . .	50

---

6.1	2023 年, T2K Run12, Run13 の EMTwall の配置図. . . . .	52
6.2	内部 EMT のセットアップの写真. . . . .	53
6.3	セットアップ完了後の EMT の写真. . . . .	54
6.4	J-PARC の測定で使用した EMT の電源. . . . .	55
6.5	T2K Run12 で測定した 1.5 kW 程度の EMT44 の波形. . . . .	56
6.6	T2K Run13, physics run(1.5 kW, +320 kA) の EMT の波形. EMT には-800 V, 5 倍のアンプがかかっている. Si には-80 V, 0 dB のアッテネータがかかっている. . . . .	57
6.7	T2K Run13, physics run(550 kW, +320 kA) の EMT の波形. . . . .	58
6.8	T2K Run13, physics run(600 kW, +320 kA) の EMT の波形. . . . .	59
6.9	T2K Run13, physics run(710 kW, +320 kA) の EMT の波形. . . . .	60
6.10	T2K Run13, 各強度 (550 kW, 600 kW, 710 kW) における EMT と Si のミュオンプロファイルの比較. . . . .	61
6.11	T2K Run13, 低強度 (3 kW) における EMT と Si のミュオンプロファイルの比較. . . . .	62
6.12	3 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. . . . .	63
6.13	550 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. . . . .	63
6.14	600 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. . . . .	64
6.15	710 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. . . . .	64
6.16	T2K Run13, 全期間の温度計のヒストリープロット. . . . .	65
6.17	T2K Run13, EMTwall/CT のヒストリープロット. . . . .	66
6.18	T2K Run13, EMTwall/Si のヒストリープロット. . . . .	67
6.19	T2K Run13, EMT/Si のヒストリープロット. . . . .	68
6.20	T2K Run13, EMT/Si のヒストリープロット. . . . .	69

# 表目次

1.1	Particle Data Group がまとめているニュートリノ振動パラメータの測定結果 (2023).	3
2.1	T2K 実験におけるラン番号と J-PARC におけるラン番号の対応表.	7
2.2	T2K Run1 から T2K Run13 までのビームオフセットの推移. T2K Run11 のビーム運転以降, メンテナンスのために陽子ビームモニターを入れ替えたため T2K Run12 のビームオフセットは評価が完了していない.	9
3.1	キャリブレーションのパラメータのオーダー.	22
3.2	各条件下で予想されるビーム運転時のミュオンフラックス.	25
5.1	各世代のブリーダー回路と使用年.	39
5.2	各世代のブリーダー回路の配分電圧比.	39
5.3	各世代のブリーダー回路のキャパシタンス.	40
6.1	T2K Run13 の EMT のキャリブレーションコンスタント.	53
6.2	電源 RPH-034 のつまみ操作による供給電圧の測定.	54
6.3	電源 RPH-034 の Ethernet 操作による供給電圧の測定.	55
6.4	ビーム強度と EMT HV のビーム運転ランごとの一覧.	56
6.5	ミュオンプロファイルの中心値分布の平均値に関する表.	62



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 ニュートリノ

ニュートリノは素粒子の一つであり、素粒子とは物質を構成する最小単位である。素粒子の理解を進めることで、自然の法則を学ぶことができる。この章では素粒子の一つであるニュートリノのニュートリノ振動現象について述べる。素粒子は標準模型の中で分類されており、物質粒子、ゲージ粒子、ヒッグス粒子の 3 種類ある。標準模型の中で物質を構成する物質粒子はクォークとレプトンと呼び、ゲージ粒子と相互作用を起こす。ゲージ粒子はグルーオン、Z ボソン、W ボソン、フォトンの 4 種類あるとされており、相互作用は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用の 4 種類である。この標準模型の中でニュートリノはレプトンに分類され、ウィークボソン (Z ボソン、W ボソン) と弱い相互作用を起こす素粒子である。ニュートリノは 1930 年に Pauli によって検出されにくい中性粒子としてその存在が予言された [1]。Pauli はこの粒子をニュートロンと呼んだが、1933 年に Fermi によりニュートリノを含んだモデルが作られ、粒子の名前もニュートロンからニュートリノと呼ばれるようになった。1950 年に Reines と Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノを検出し、その検出感度が理論予測と一致したことからニュートリノの存在が確認された [2]。

ニュートリノは質量固有状態が重なり合って、3 種類のフレーバーが存在している。それぞれ電子ニュートリノ、ミューオンニュートリノ、タウニュートリノである。ニュートリノは電荷が 0 であるため直接検出することができない。したがってニュートリノの検出には原子核と散乱して生成される荷電レプトンを利用する手法が取られている。

### 1.2 ニュートリノ振動

1962 年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一がニュートリノは質量を持ち、各フレーバーのニュートリノが異なる質量固有状態の重ね合わせであるとすれば時間発展と共にそのフレーバーを変えるという理論を提唱した [3]。このニュートリノが飛行中にフレーバーを変える現象をニュートリノ振動と呼ぶ。1998 年にスーパーカミオカンデ実験グループによりニュートリノ振動が観測され、ニュートリノに質量があることが確認された [4]。ニュートリノの質量固有状態を  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ )、フレーバーの固有状態を  $|\nu_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) とする。各フレーバーのニュートリノが異なる質量固有状態の重ね合わせであるとき、以下の線形結合で表せる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\text{PMNS}}^{\alpha i} |\nu_i\rangle, \quad (1.1)$$

$U_{\text{PMNS}}$  は 3 行 3 列のユニタリー行列で Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) と呼び、以下のように表す。

$$\begin{aligned}
U_{\text{PMNS}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ 0 & 1 & 0 \\ s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & S_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{\text{CP}}} & C_{13}c_{23} \end{pmatrix}, \tag{1.2}
\end{aligned}$$

ここで,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  と  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  である.  $\theta_{ij}$  は質量固有状態の混合角,  $\delta_{\text{CP}}$  は CP 対称性の破れの度合いを示す複素位相を表している.  $\delta_{\text{CP}} \neq 0, \pi$  のとき PMNS 行列は虚数部分を含むことになり, これが CP 対称性の破れを生むため  $\delta_{\text{CP}}$  は CP 位相角とも呼ぶ.

真空の場合, 時刻  $t$  におけるニュートリノの質量固有状態は式 (1.3) のシュレディンガー方程式から導かれる.

$$i \frac{d}{dt} |\nu_i(t)\rangle = \mathcal{H} |\nu_i(t)\rangle = E_i |\nu_i(t)\rangle, \tag{1.3}$$

$$|\nu_i(t)\rangle = \exp(-iE_i t) |\nu_i\rangle, \tag{1.4}$$

ここで  $\mathcal{H}$  はハミルトニアン,  $E_i$  は質量固有状態のエネルギーである.

ある時刻  $t$  におけるフレーバー固有状態  $|\nu_\alpha\rangle$  は,  $U_{\text{PMNS}}^{\alpha i} = U_{\alpha i}$  とすると次のように書ける.

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} \exp(-iE_i t) |\nu_i\rangle. \tag{1.5}$$

ニュートリノ質量が小さく光速に近い速度で飛行している場合, 近似式  $E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E}$ , (ここで  $p_i$  と  $m_i$  は質量固有状態の運動量と質量を表し,  $p_i \sim p$ ,  $E_i \sim E$  とする) を用いて次のように表せる.

$$\begin{aligned}
|\nu_\alpha(t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} \exp(-ipt) \exp\left(-\frac{im_i^2 t}{2E}\right) |\nu_i\rangle \\
&= \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} \exp(-ipt) \exp\left(-\frac{im_i^2 t}{2E}\right) U_{\beta i}^\dagger |\nu_\beta\rangle. \tag{1.6}
\end{aligned}$$

このとき, フレーバーの遷移確率  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$  は次のように計算される.

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\
&= \left| \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} \exp(-ipt) \exp\left(-\frac{im_i^2 t}{2E}\right) U_{\beta i}^\dagger \right|^2 \\
&= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \exp\left(-\frac{i(m_i^2 - m_j^2)t}{2E}\right) \\
&= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \exp\left(-\frac{i\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \\
&= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \\
&\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger) \sin \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}, \tag{1.7}
\end{aligned}$$

ここで,  $t$  は移動距離  $L = ct$  (ニュートリノは相対論的粒子とする) に置き換え, ユニタリー条件  $\sum_i U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} = \delta_{\alpha\beta}$  を用いた. また,  $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$  を質量二乗差と呼ぶ. この式からニュートリノ振動は少なくとも2つの質量が縮退しておらず, 混合がゼロでない場合 ( $U \neq I$ ) のみ起きると言える.

真空中のニュートリノ振動は3つの混合角 ( $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ ) と質量二乗差 ( $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$ ), CP 位相角 ( $\delta_{CP}$ ) のそれぞれのパラメータにわけられる. ただしこの形式論は物質中の振動の場合について修正する必要がある [5, 6]. 過去20年間に於いてニュートリノ振動パラメータは様々なニュートリノ源から測定されている. 例えば, 大気ニュートリノや太陽ニュートリノ, 原子炉ニュートリノ, 加速器ニュートリノである. 質量固有状態のオーダーは,  $\Delta m_{32}^2 > 0$  か  $\Delta m_{32}^2 < 0$  か定まっていない. 前者をニュートリノ質量順階層 (Normal neutrino mass ordering: NO), 後者をニュートリノ質量逆階層 (Invert neutrino mass ordering: IO) といい, ニュートリノを取り巻く未解決問題の一つである. Tokai to Kamioka 実験やスーパーカミオカンデなどの実験では NO の可能性が支持されている [7, 8, 9]. CP 位相角はまだ観測されていないが T2K 実験の結果は  $\delta_{CP} = 90\%$  以上の信頼度で除外している.

表 1.1 は最新のニュートリノ振動パラメータの測定結果 [10] をまとめたものである.

表 1.1: Particle Data Group がまとめているニュートリノ振動パラメータの測定結果 (2023).

振動パラメータ	PDG2023
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.307 \pm 0.013$
$\sin^2 \theta_{23}$ (IO)	$0.534^{+0.021}_{-0.024}$
$\sin^2 \theta_{23}$ (NO)	$0.547^{+0.018}_{-0.024}$
$\sin^2 \theta_{13}$	$(2.20 \pm 0.07) \times 10^{-2}$
$\Delta m_{21}^2$	$(7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2$
$\Delta m_{32}^2$ (IO)	$(-2.519 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{eV}^2$
$\Delta m_{32}^2$ (NO)	$(2.437 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{eV}^2$
$\delta_{CP}$	$1.23 \pm 0.21 \pi \text{rad}$

式 (1.7) において,  $\frac{E}{L} \gg \Delta m_{21}^2$  の場合に  $\Delta m_{21}^2$  の項を無視できる. したがって,  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  の遷移確率は以下ようになる [11].

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{13} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right), \quad (1.8)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right). \quad (1.9)$$

2章で述べる T2K 実験ではニュートリノの飛行距離  $L$  が 295 km である. この場合ニュートリノのエネルギーを 0.6 GeV 程度にすることでミューオンニュートリノへの遷移確率  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  が最大になることが式 (1.8) から計算できる.

### 1.3 ニュートリノ振動実験

電荷が 0 であるニュートリノを直接観測することはできないため, 物質との相互作用を介して生成される粒子を検出することでニュートリノを間接的に観測する手法が用いられる. ニュートリノはウィークボソンの交換を介して物質の原子核と弱い相互作用を起こす. ウィークボソンの種類 ( $W^\pm$  と  $Z^0$ ) に応じて相互作用が変わり, それぞれ荷電カレント (Charged current: CC) 反応と中性カレント (neutral current: NC) 反応と呼ぶ.  $\sim 1 \text{GeV}$  程度のエネルギー領域のニュートリノでは荷電カレント準弾性散乱反応 (CC Quasi Elastic interaction: CCQE) が支配的であ

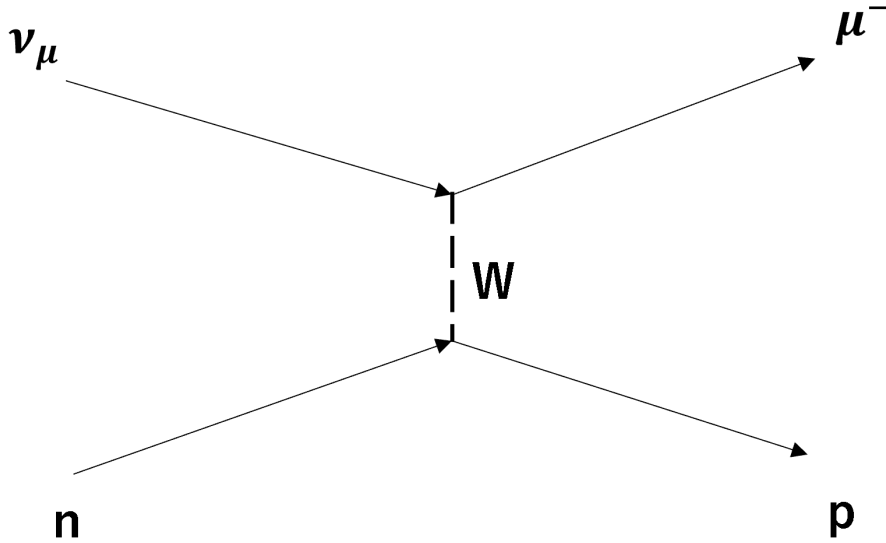


図 1.1: ミューオンニュートリノの荷電カレント反応のファインマンダイアグラム.

る. CCQE 反応は式 (1.10) のようなニュートリノと核子の 2 体反応である. 図 1.1 に CCQE 反応のファインマンダイアグラムを示す.

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (1.10)$$

ここで  $l$  は荷電レプトン,  $\nu_l$  はニュートリノの各フレーバー,  $n$  は中性子,  $p$  は陽子である. CC 反応の場合, 荷電レプトンの生成に伴う運動量の移動のため, 相互作用は弾性ではなく準弾性 (CCQE) と呼ばれている. 後述するスーパーカミオカンデや T2K 実験では CCQE 反応を利用した手法を用いてニュートリノを観測している.

### 1.3.1 スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測

大気ニュートリノとは宇宙線が大気と衝突して生成されるハドロン (例えば  $\pi$  中間子) とミューオンが  $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu, \mu \rightarrow e + \nu_e$  のように大気中で崩壊してできる電子ニュートリノやミューオンニュートリノのことである.

大気ニュートリノを岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデを用いて観測する実験が行われ, 1998 年にニュートリノ振動が発見された [12]. スーパーカミオカンデはニュートリノと水中の核子との相互作用する CCQE 反応によって発生する荷電レプトンが発する光 (チェレンコフ光) を捕らえてニュートリノを観測している. スーパーカミオカンデはニュートリノが飛来した方向を求めることが可能で, スーパーカミオカンデの真上から飛来するニュートリノと地球の反対側で発生しスーパーカミオカンデの真下から飛来するニュートリノの観測数を比較し, ニュートリノ振動を測定した. 式 (1.7) よりニュートリノ振動確率はニュートリノエネルギーと飛行距離で表されるため, ニュートリノ質量があると仮定した場合, ニュートリノの観測数は異なることが予想される.

図 1.2 に電子ニュートリノとミューオンニュートリノの観測数の天頂角分布を示す. 実際の  $\mu$ -like の観測数がニュートリノ振動があると仮定した場合の予測と一致しているように見えることから, ニュートリノ振動 ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ) の発見となった.

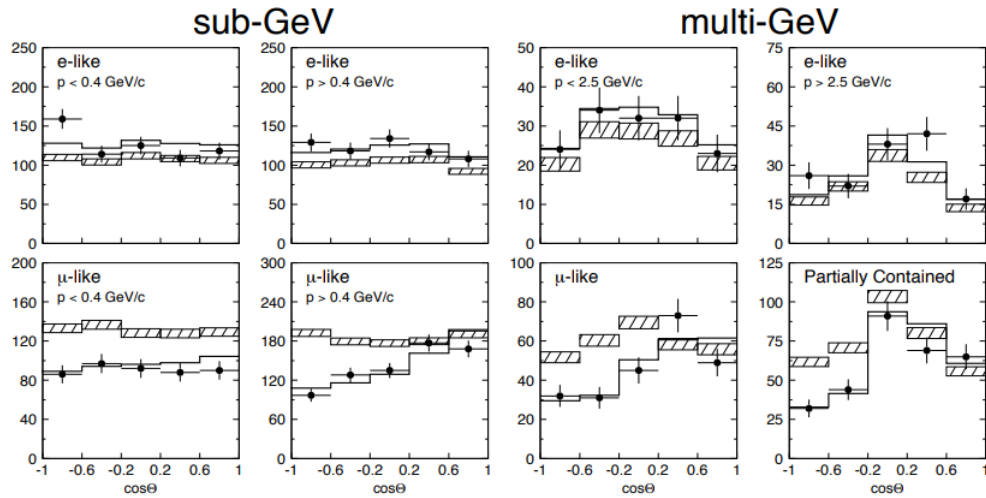


図 1.2: スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測結果 [12]. 縦軸は事象数, 横軸は天頂角 ( $\cos \theta$ ) 分布を示す.  $\cos \theta = 1, -1$  はそれぞれニュートリノが真上と真下から飛来したことを表す. 黒点は実際の測定結果, 斜線部はニュートリノ振動がないと仮定したときの予測結果, 実線部はニュートリノ振動があると仮定したときの予測結果を示す.

### 1.3.2 KEK to Kamioka 実験 (K2K 実験)

K2K 実験は T2K 実験の前身にあたる実験であり, カミオカンデ実験が示唆した大気ニュートリノのニュートリノ振動をきっかけとして計画された [13]. 茨城県の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12 GeV 陽子シンクロトロンで加速した陽子をパイ中間子生成標的へ入射, 電磁ホーンと呼ばれる特殊電磁石によって集束し, パイ中間子の崩壊によって生じるニュートリノを 250 km 離れたスーパーカミオカンデに打ち込む実験である. 1999 年から 2004 年まで使用され, 加速器によって生成された直後のニュートリノ特性について測定され, スーパーカミオカンデでの測定と比較することでニュートリノ振動の研究を行うことを可能にした. K2K 実験からニュートリノの生成元を茨城県東海村の J-PARC のメインリングシンクロトロンへと移設し, 高エネルギーかつ高密度の加速器ニュートリノにアップグレードした実験が T2K 実験 (Tokai to Kamioka 実験) である.

## 第 2 章

# Tokai to Kamioka 実験 (T2K 実験)

### 2.1 概要

T2K 実験とは茨城県東海村にある日本陽子加速器研究機構（通称:J-PARC）と岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデで行われている全長 295 km に渡る長基線ニュートリノ振動実験である (図 2.1).

T2K 実験の目的はニュートリノ振動の精密測定により,  $\Delta m_{23}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{23}$  をそれぞれ  $10^{-4} \text{eV}^2$ ,  $10^{-2}$  の精度で求めることである. さらにミューオンニュートリノと反ミューオンニュートリノのニュートリノ振動を比較し, CP 対称性の破れの度合いを示す複素位相  $\delta_{\text{CP}}$  を測定することである.

T2K 実験は 2009 年にビーム運転を開始し, 現在 2023 年は 13 回目の物理ラン (T2K Run13) の前半が行われている途中である. T2K 実験のラン番号は T2K 実験側と J-PARC 側で命名規則が異なるため, 対応表を表 2.1 に示す. T2K 実験では夏のメンテナンス期間を挟むとラン番号を変え, J-PARC では線形加速器のイオン源を変更するとラン番号を変えている.



図 2.1: T2K 実験の概要. 295 km は J-PARC でニュートリノを生成する炭素標的からの距離である.

### 2.2 J-PARC

J-PARC とは LINAC (Linear Accelerator), RCS (Rapid-Cycling Synchrotron), MR (Main Ring) で構成される大強度陽子加速器施設 (図 2.2) である. LINAC で  $\text{H}^-$  イオンを 400 MeV に加速, RCS で陽子に変換して 3 GeV まで加速した後, MR に入射する. T2K 実験で用いる陽子ビームは MR で 30 GeV まで加速, T2K ビームラインのパイ中間子生成標的に入射される. J-PARC で生成される陽子ビームは 1 スピル (パルス) の中に 8 つのバンチ (束)

表 2.1: T2K 実験におけるラン番号と J-PARC におけるラン番号の対応表. T2K Run9 と Run10 は MR Run79 の期間中に夏季メンテナンスを挟んでいるためラン番号が切り替わっている.

年月	T2K 実験ラン番号	J-PARC ラン番号
2010/1–2010/6	T2K Run1	MR Run33–MR Run34
2010/11–2011/3	T2K Run2	MR Run36–MR Run38
2011/12–2012/6	T2K Run3	MR Run39–MR Run43
2012/10–2013/3	T2K Run4	MR Run44–MR Run49
2014/5–2014/6	T2K Run5	MR Run55–MR Run56
2014/10–2015/6	T2K Run6	MR Run58–MR Run63
2016/1–2016/3	T2K Run7	MR Run66–MR Run68
2016/10–2017/4	T2K Run8	MR Run70–MR Run74
2017/10–2018/3	T2K Run9	MR Run76–MR Run79
2018/10–2020/2	T2K Run10	MR Run79– MR Run84
2021/3–2021/4	T2K Run11	MR Run86
2023/4	T2K Run12	MR Run90
2023/11–2023/12	T2K Run13	MR Run91

の構造をしており, 1 スピルの幅は 4100 ns で取り出されている (図 2.3). 1 スピル当たりの間隔は繰り返し周期 (repetition cycle) といい T2K Run11 までは 2.48 s/spill, T2K Run12 以降は 1.36 s/spill である.

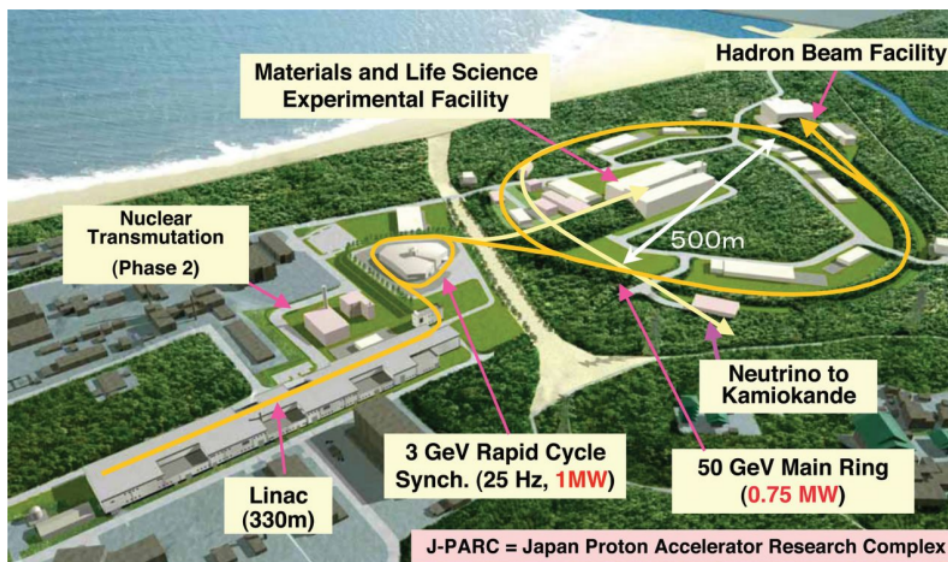


図 2.2: J-PARC の概要図. 3 基の陽子加速器と T2K ビームラインの他に, 物質・生命科学実験施設やハドロン実験施設などの研究施設がある. 50 GeV の記載は MR 設計時の値で実際は 30 GeV のシンクロトロンである.[14]

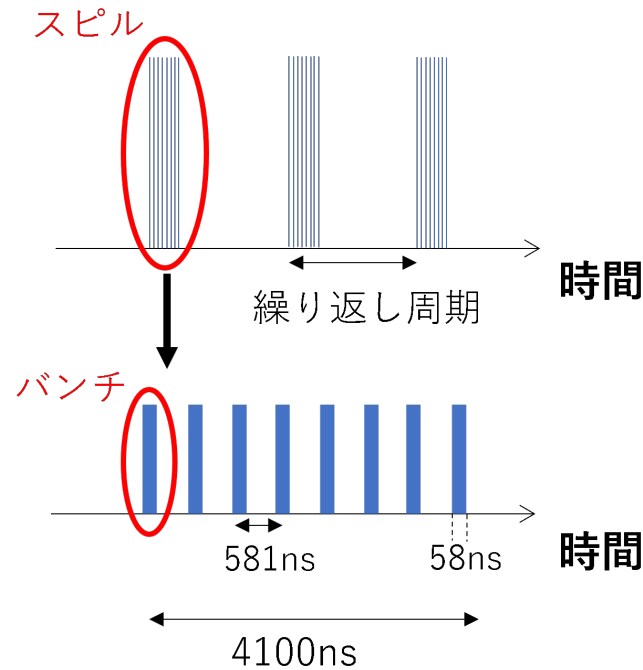


図 2.3: J-PARC の陽子ビームの構造.

## 2.3 T2K ビームライン

T2K ビームラインは J-PARC で加速した陽子ビームを炭素標的に衝突させ、最終的にミューオンニュートリノをスーパーカミオカンデまで打ち出すビームラインのことである。このビームラインはターゲットステーションから上流と下流でそれぞれ 1 次ビームラインと 2 次ビームラインに分類される (図 2.4)。

1 次ビームラインは陽子ビームを電磁石で調整しながら 2 次ビームラインの炭素標的中心まで送る構造で、陽子ビームモニターを用いてビームを監視している。1 次ビームラインの最下流にある陽子ビームモニターと 2 次ビームラインの間には距離があるため、1 次ビームラインと 2 次ビームラインの陽子ビームモニターの位置を合わせることは困難でありオフセットが存在する。これをビームオフセットと呼び、T2K 実験では陽子ビームの垂直方向にビームオフセットがあることがわかっている。2 次ビームラインの陽子ビームモニターは標的が近く合わせる事が容易なため、このビームオフセットは主に 1 次ビームラインの陽子ビームモニターに適用される。

各検出器のメンテナンス等の理由で入れ替えがあるたびにビームオフセットは変化してきた。これまでの T2K Run ごとにビームオフセットをまとめたものを表 2.2 に示す。

### 2.3.1 陽子ビームモニター

T2K ビームライン上には陽子ビームの位置や角度をモニターする検出器が設置されている。T2K 実験で用いている陽子ビームモニターは、Current Transformer (CT), Electrostatic Monitor (ESM), 19 Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM19), Beam Loss Monitor (BLM), Optical Transition Radiation Monitor (OTR モニター) の 5 つである (図 2.5)。

CT は、強磁性体のトロイダルコアとそれにコイルを巻いた構造をしており、陽子ビームの強度とビームタイミングを測定する。CT のコアの内側を荷電粒子が通過したときに発生する一次磁束により、コアに巻かれたコイルに誘



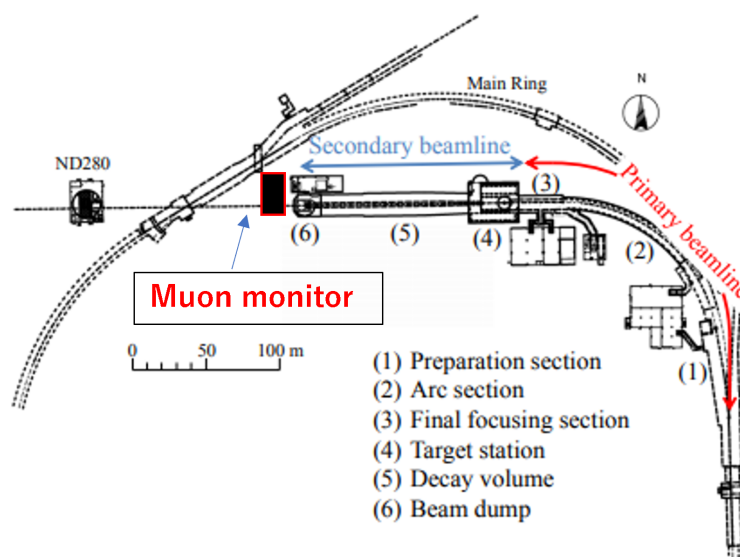


図 2.4: T2K ビームラインの全体図 [15]. 1 次ビームラインは主に陽子ビームの軌道を調整するエリアで, Final Focus section 以降の 2 次ビームラインはニュートリノビームを生成するエリアになっている. 最終的にニュートリノは前置検出器を通して神岡へ撃ち込まれる.

表 2.2: T2K Run1 から T2K Run13 までのビームオフセットの推移. T2K Run11 のビーム運転以降, メンテナンスのために陽子ビームモニターを入れ替えたため T2K Run12 のビームオフセットは評価が完了していない.

T2K Run#	ビームオフセット
1-2	$(-5.57 \pm 1)$ mm
3-4	$(-2.93 \pm 1)$ mm
5-11	$(-4.5 \pm 1)$ mm
12-	—mm

導電流が流れ, 二次電流として取り出す. この動作原理により, CT はビームの電流を削らずに測定できる. T2K ビームラインに 5 台設置され, 炭素標的に照射した陽子数の算出や陽子ビームのタイミングの測定に用いられる.

ESM は, ビーム軸周りの四方に電極が設置されており, 上下と左右のそれぞれの電極の誘起信号を比較して陽子ビームの位置を測定する. CT と同様に陽子ビームと非接触に陽子ビームを測定できる検出器である.

SSEM19 は, 2 枚のチタン薄膜をビーム軸に対して垂直平面に設置して, 陽子ビームの水平方向と垂直方向の位置を測定する. チタン薄膜に入射した陽子から放出される二次電子を検出する. CT や ESM と異なり陽子ビームをチタン薄膜に当てて直接測定するため, ビーム強度を削りビームロスが発生させる. そのため, T2K 実験の連続運転の際には 1 次ビームラインの最下流の SSEM19 以外はビームライン上から取り除かれる.

BLM は, Ar と CO<sub>2</sub> の混合ガスで満たされたワイヤー比例計数管で, 陽子ビームのビームロスを測定する.

OTR は, 2 次ビームラインに設置されている陽子モニターで, 金属膜をビームが通過する際に生じる遷移光を測定し, 陽子ビームの 2 次元プロファイルを測定する. 遷移光は鏡を用いて地上まで輸送され, CCD カメラで測定している. 陽子ビームの 2 次元プロファイルの射影をそれぞれガウス関数でフィッティングし, 陽子ビームの中心位置とシグマを算出する.

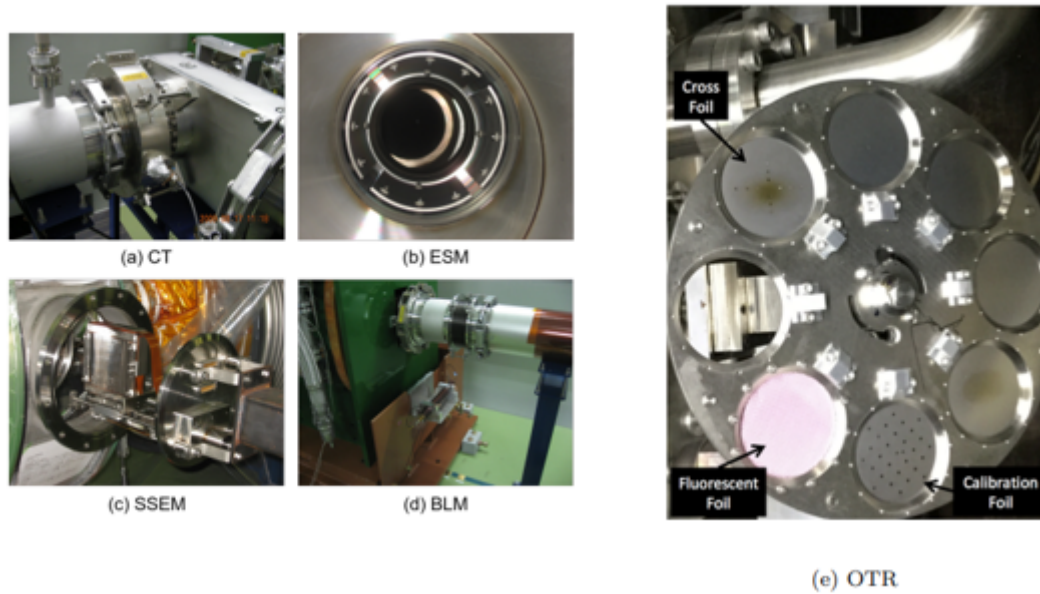


図 2.5: T2K 実験で使用している陽子モニター. (a)–(d) の陽子モニターは 1 次ビームラインで用いられ, (e) の OTR のみ 2 次ビームラインの炭素標的の直前に設置されている.

### 2.3.2 2 次ビームライン

2 次ビームラインはバッフル (コリメータ), OTR, 炭素標的, 電磁ホーン, ディケイボリューム, ビームダンプ, ミューオンモニターで構成されている (図 2.6).

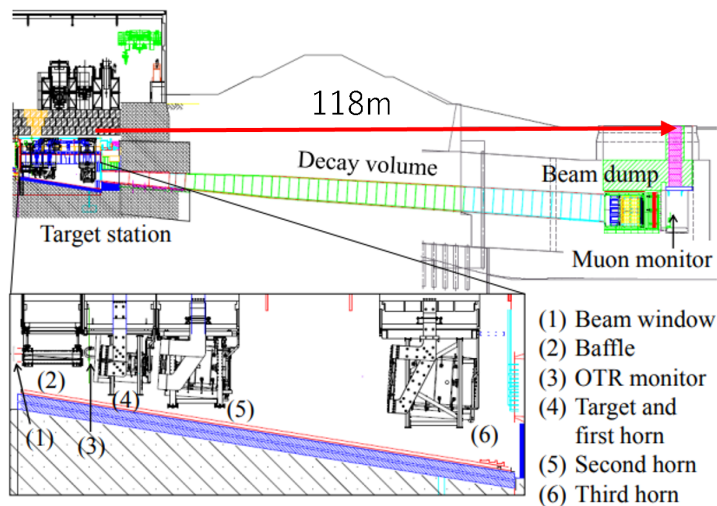


図 2.6: 2 次ビームラインの模式図 [16]. バッフル直前のビーム窓からミューオンモニターまでが 2 次ビームラインである.

1 次ビームラインから輸送された陽子ビームはバッフルを通り, 炭素標的と衝突, 生成されるハドロンの中からパイ中間子のみを電磁ホーンで収束し, ディケイボリュームと呼ばれる真空のトンネルに送られる. パイ中間子は

ミューオンとミューオンニュートリノに崩壊し、ビームダンプを通過して前置検出器やスーパーカミオカンデに向けて打ち出される。

バッフルは、長さ 1.7 m、幅 0.3 m、高さ 0.4 m の炭素ブロックである。中心に直径 30 mm の陽子ビームが通るための穴があけられている。OTR の直前に設置されていて、陽子ビームがビーム中心を大きく外れた時に下流の OTR や電磁ホーンなどの機器を保護するためのコリメータとして機能する。

炭素標的は、長さ 91.4 cm、直径 2.6 cm の円筒形のグラファイト棒である。標的内の炭素原子核と陽子の核破砕反応を起こして、多くのハドロンを放出する。

電磁ホーンは、陽子ビームと炭素標的の衝突によって生成される荷電パイオンを収束させ、ニュートリノフラックスを増大するための特殊な電磁石である。2 次ビームライン上に 3 台設置されており、3 台の電源からそれぞれのホーンへ  $\pm 320$  kA の電流を供給できる。一次電磁ホーンの内部には炭素標的が取り付けられており、ビームタイミングに合わせてホーンに印加される電流によって作り出される磁場を受けて、荷電パイオンは軌道を曲げられる。電磁ホーンの電流の正負によって収束させる荷電パイオンを選択でき、電流値が正の時は  $\pi^+$  を収束し、電流値が負の時は  $\pi^-$  を収束する。これらのモードをそれぞれフォワードホーンカレント (FHC) とリバースホーンカレント (RHC) といふビーム運転時に選択される。

ディケイボリウムは、荷電パイオンをミューオンとミューオンニュートリノに崩壊するまで飛行させるための He ガスが充填された長さ 94 m のトンネルである。

ビームダンプは、炭素と鉄のブロックとコンクリートの壁で作られたビームを吸収し止める装置である。ディケイボリウムの終点に設置され、ニュートリノと高エネルギーのミューオン以外の粒子を吸収する役割がある。

ミューオンモニターは、ビームダンプを貫通した高エネルギーのミューオンを測定し、ミューオンニュートリノを間接的に観測する検出器である。ビームダンプの後方に設置された炭素標的の下流で最も近い距離に配置されたビームモニターであり、ニュートリノビームを監視する極めて重要な検出器である。ミューオンモニターについては 3 章で詳細を述べる。

### 2.3.3 オフアクシス法

T2K 実験ではニュートリノの中心軸 (荷電パイオンの収束軸) をスーパーカミオカンデの方向から  $2.5^\circ$  ずらして打ち出している。これはビームに角度をつけることによって、打ち出されるニュートリノのエネルギー領域を狭くすることができるためである。この方法をオフアクシス法といい、1995 年に BNL-E889 グループにより発表されたものである [17]。図 2.7 下部にビーム角度  $0.0^\circ$ ,  $2.0^\circ$ ,  $2.5^\circ$  における 295 km 飛行したミューオンニュートリノのフラックスを示す。ビーム中心に比べて  $2.5^\circ$  傾けた場合の方がより狭いエネルギー領域でミューオンニュートリノのフラックスが集中している。したがって、オフアクシス法はニュートリノエネルギー領域を狭め、ニュートリノ振動のパラメータ ( $\theta_{23}$  と  $\Delta m_{32}^2$ ) の精密測定に重要な手法である。また 1 章の式 (1.9) から、飛行距離 295 km の場合ニュートリノ振動確率 ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ) が最小になるニュートリノエネルギーは 0.6 GeV 程度である (図 2.7 上部のグラフ)。T2K ビームラインにより生成されるニュートリノは荷電パイオンの二体崩壊から生成されるため、ビーム軸から  $\theta$  ずれた方向のニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  は次の式 (2.1) で表せる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.1)$$

ここで  $m$  は質量、 $p$  は運動量、添え字は粒子の種類である。

図 2.8 にパイオンとニュートリノのエネルギーの関係を示す。ニュートリノ振動の確率を最小にする 0.6 GeV 程度のニュートリノを選択し、かつニュートリノのエネルギー領域を狭くするために T2K 実験のオフアクシス法には  $2.5^\circ$  が用いられている。

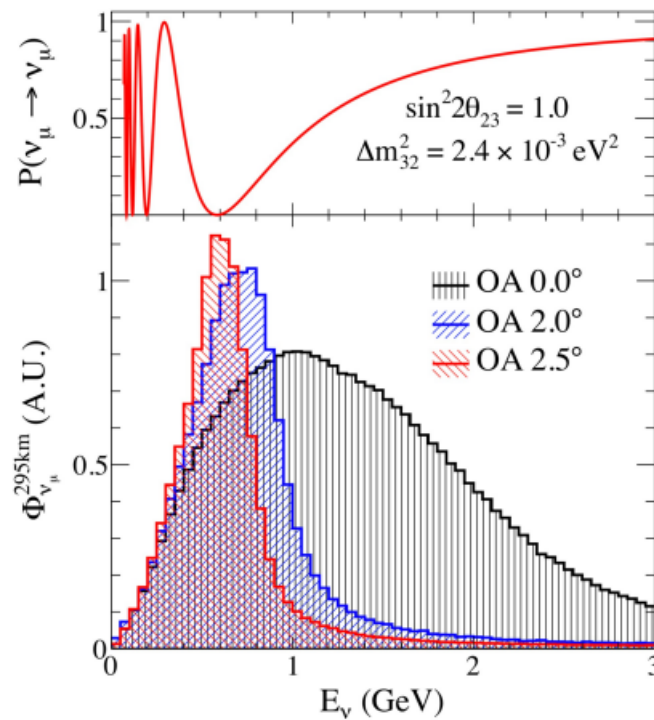


図 2.7: 295 km 飛行したミュオンニュートリノの振動確率 (上部) とエネルギー分布 (下部)[18]. 上部のグラフは  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  の振動確率を示す. 下部のグラフはオフアキス ( $0.0^\circ$ ,  $2.0^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ) のニュートリノエネルギーとフラックスの関係を示す.

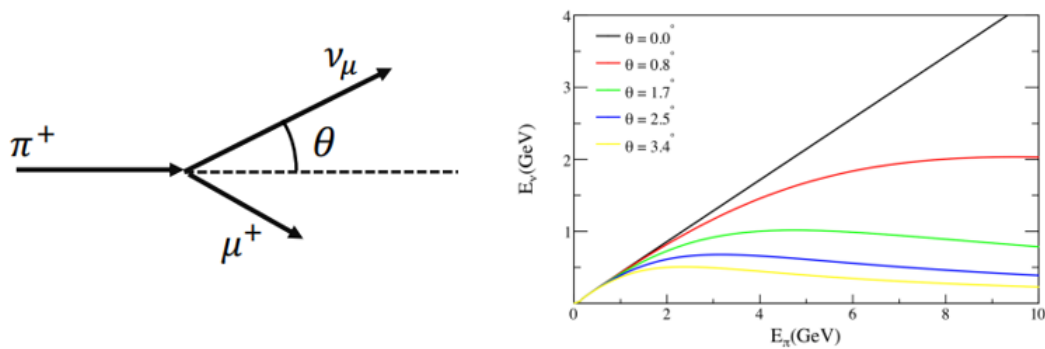


図 2.8: パイオンの崩壊の模式図 (左). パイオンとニュートリノのエネルギーの関係 (右)[19].

### 2.3.4 前置検出器

炭素標的から 280 m 後方には INGRID (Interactive Neutrino GRID) と ND280 (Near Detector 280m) と呼ばれる 2 つの前置検出器が置かれていて、それぞれ異なるニュートリノモニターとして用いられる。ニュートリノモニターはニュートリノのビーム情報を直接監視することができるが、ニュートリノの反応断面積の低さのため十分な統計が得られるまでデータを蓄積する必要がある。そのためリアルタイムでのニュートリノの監視にはミュオンモ

ニターを用いており、時間をかけて直接観測を行うニュートリノモニターと相補的な関係である [18]. T2K 実験では陽子ビームモニター、ニュートリノモニター、ミューオンモニターを用いてビームを常時監視しながら実験を行う。

INGRID は鉄ターゲット 9 枚とシンチレータなどで構成されたトラッキングプレート 11 枚からなるモジュールが縦横に 7 台、非直交の位置に 2 台の計 16 台設置されたニュートリノモニターである (図 2.9). 各モジュールの大きさは  $b\text{degree}$  (オン軸) が来るように設置されていて、オン軸のエネルギー領域でニュートリノを測定する. INGRID にミューオンニュートリノが入射すると鉄原子の中性子と荷電カレント反応を起こし、ミューオンと陽子を放出する. エネルギー損失の大きい陽子は鉄ターゲット層で止まるが、ミューオンはトラッキングプレートを貫通するため、その軌跡を捕らえることでニュートリノイベントを同定する. これを各モジュールで行い、ニュートリノイベント数分布を測定、ニュートリノのビームプロファイルを再構成する. ビームプロファイルからビーム中心の  $(x,y)$  を決定し、ニュートリノのビーム方向を監視する.

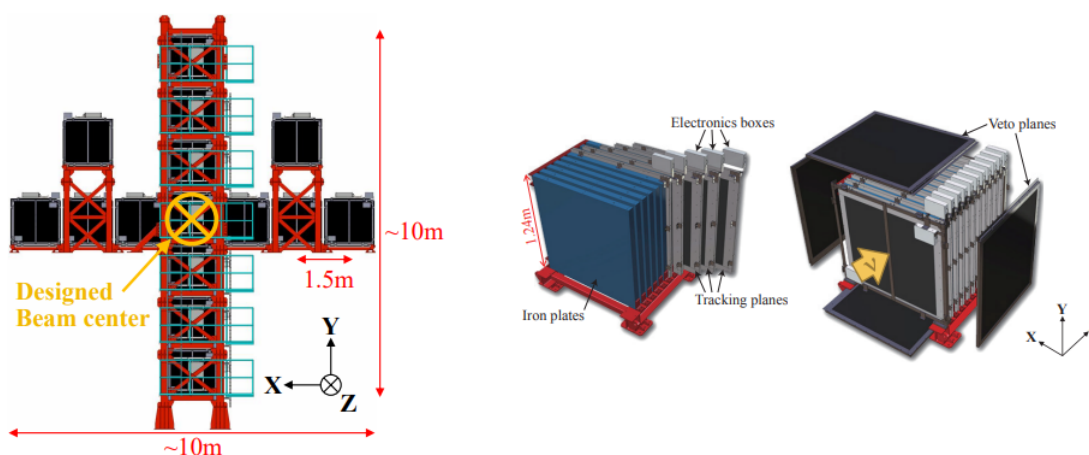


図 2.9: INGRID の概要図. 右側は INGRID を構成するモジュールの内部構造である.

ND280 はニュートリノビームの特性や反応断面積を理解するために作られたニュートリノ測定器である. 主にビームフラックス, エネルギースペクトル, ニュートリノの種類, ニュートリノ反応断面積の研究を目的としている. ビームに対してオン軸に設置されている INGRID に対して, ND280 はオフ軸に設置されている. 図 2.10 は ND280 の構造である. 実験のバックグラウンドの主な原因である中性カレント  $\pi^0$  生成反応を測定する  $\pi^0$  検出器 (POD: Pi 0 Detector), 粒子のトラッキングを行う TPC (Time Projection Chamber), 高解像度ニュートリノ反応点検出器 (FGD: Fine Grained Detector), 電磁カロリメータ (ECAL: Electromagnetic Calorimeter) とそれらを覆う大型中空電磁石 (UA1 Magnet), ミューオン飛程検出器 (SMRD: Side Muon Range Detector) で構成されている. ND280 にニュートリノが入射すると最上流の POD か FGD でニュートリノ反応を起こし, 後段の TPC や FGD, 最下流の ECAL で生成された粒子を測定している.

### 2.3.5 後置検出器

炭素標的から 295 km 後方にはスーパーカミオカンデが置かれていて, T2K 実験のニュートリノの後置検出器として用いられている. スーパーカミオカンデは, 直径, 高さが約 40 m の円筒形水タンクで, 5 万トンの超純水 (0.03% のガドリニウム) の大型チェレンコフ光検出器 (図 2.11) である. 外水槽と内水槽の二重構造をしており, それぞれの壁面には電子増倍管 (PMT: Photo Multiplier Tube) が取り付けられていて, 主にニュートリノ反応によって生成さ

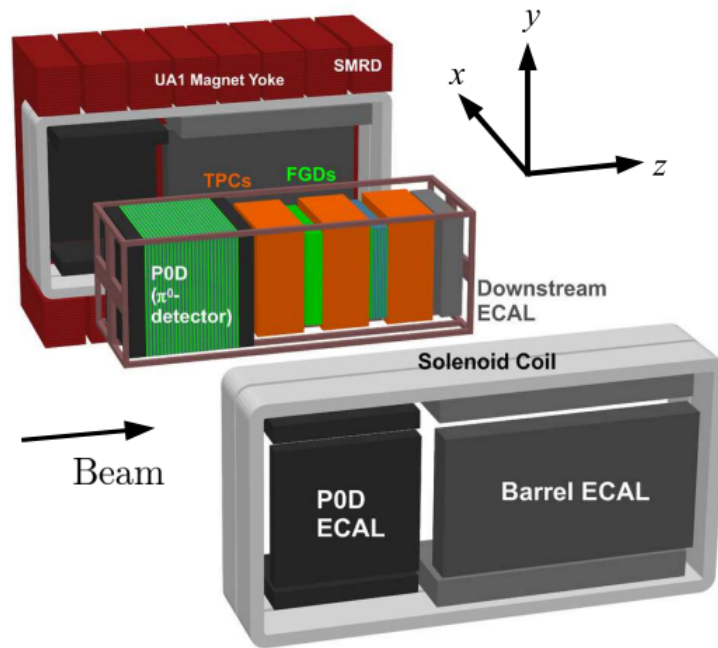


図 2.10: ND280 の概要図 [20].

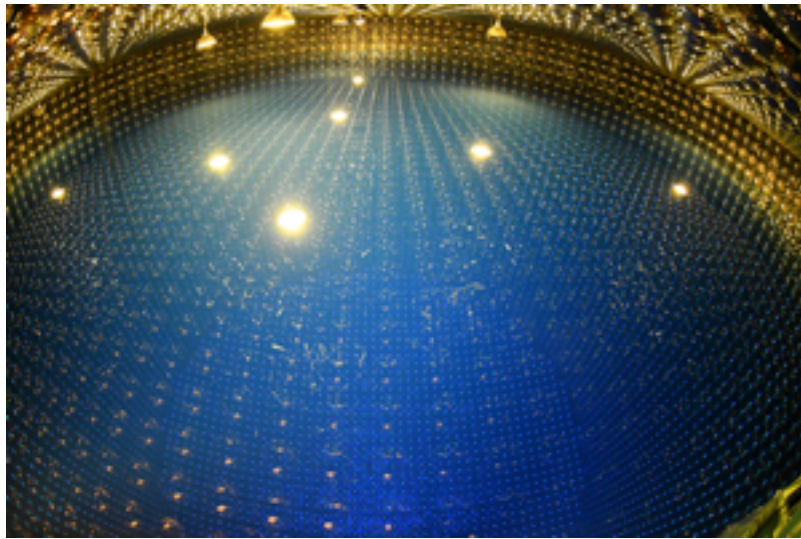


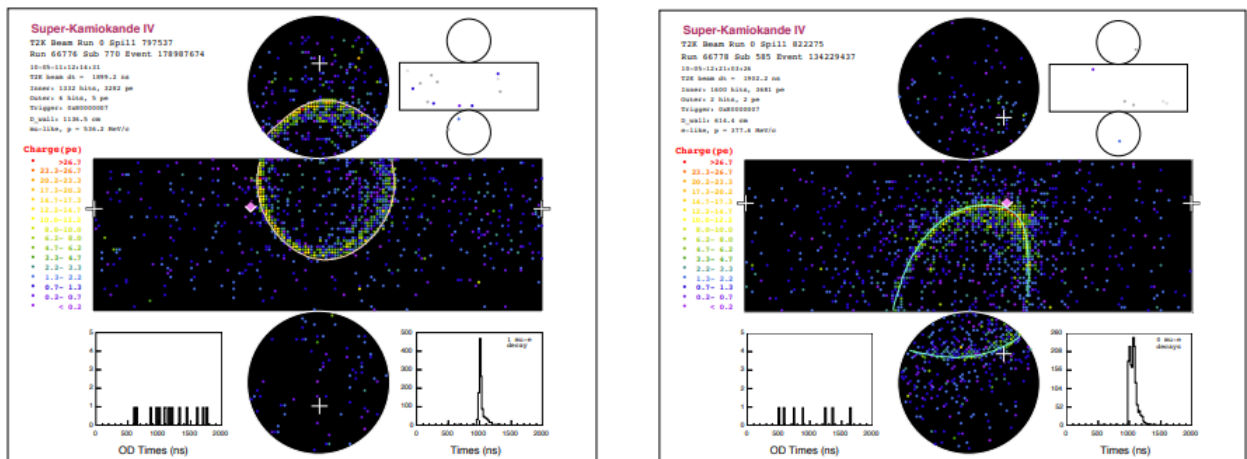
図 2.11: スーパーカミオカンデ内水槽の写真. [21]

れる荷電レプトンのチェレンコフ光を検出する。

スーパーカミオカンデに入射したニュートリノは水中の陽子または中性子と CCQE 反応 ( $\nu_l + n \rightarrow l^- + p, \bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n$ ) を起こし荷電レプトン ( $e, \mu$ ) を生成する。他にも核子  $N$  と相互作用する CC1 $\pi$  反応 ( $\nu_l + N \rightarrow l^- + N' + \pi$ ) を起こし、パイ中間子 ( $\pi, \pi^+, \pi^-$ ) を生成するイベントもあるがスーパーカミオカンデでは除外されている。荷電粒子が水中の光速より大きい速度で運動する際に発する光をチェレンコフ光と呼び、スーパーカミオカンデではニュートリノ相互作用によって生成された荷電レプトンのチェレンコフ光を検出し、ニュートリノイベントを観測している。しかし、宇宙線ミュオンや地中からスーパーカミオカンデに入ってくるミュオン、大気ニュートリノなども

測定してしまうため、外水槽と内水槽のイベントを監視し、同時に測定された事象などはバックグラウンドとして除外している。

T2K 実験では前置検出器の ND280 とスーパーカミオカンデのニュートリノ事象数を比較して、ニュートリノ振動の測定を行っている。そのため、電子ニュートリノとミューオンニュートリノの事象を区別する必要があるが、スーパーカミオカンデはこの要求を満たしている。電子ニュートリノは CCQE 反応で電子を生成する。電子は水中で電磁カスケードシャワーを起こすため、チェレンコフ光のリングが図 2.12 のようにぼやけて見える。これを利用してスーパーカミオカンデではニュートリノ事象の区別をしている。ここでタウニュートリノは T2K 実験のビームエネルギー 600 MeV では、タウ粒子の質量 1.8 GeV より小さいためスーパーカミオカンデで生成されず測定できない。したがって T2K 実験ではタウニュートリノへの振動の測定には、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  事象と消失したミューオンニュートリノの数を比較している。



(a) ミューオンと判定された信号

(b) 電子と判定された信号

図 2.12: スーパーカミオカンデで検出されたニュートリノ事象 [20].

## 2.4 T2K 実験の将来計画

実験が開始された 2010 年から 2023 年 12 月までに J-PARC で  $4.01989 \times 10^{21}$  個の陽子が生成され、ニュートリノとなってスーパーカミオカンデに打ち出された。T2K 実験では FHC モード (ニュートリノ)、RHC モード (反ニュートリノ) の測定により、CP 対称性の破れの兆候が見えつつある。ここからはニュートリノ振動パラメータのさらなる精密測定が課題であり、そのために実験の統計量の増大を目標にしている。これに向けて神岡側ではハイパーカミオカンデの建設による、ニュートリノ反応体積の増加と検出器である光電子増倍管の改良を計画している。一方で、東海側は建設までの間に J-PARC 陽子ビームの大強度化による 1 日当たりのニュートリノフラックスの増加を計画しており、ビーム強度は 500 kW から 1.3 MW、繰り返し周期は 2.48 秒から 1.16 秒、ホーン電流は 250 kA から 320 kA へのアップグレードが段階的に進行中である。

## 第 3 章

# ミュオンモニター (MUMON)

### 3.1 MUMON の概要

MUMON は T2K ビームラインの 2 次ビームラインに設置されているミュオン検出器 (図 3.1) である。ビームラインで生成されたパイオンが崩壊してできるミュオンを測定することでニュートリノを間接的に監視できる。

2 章で示したように T2K 実験ではビーム角度とニュートリノエネルギー分布には相関があるため, J-PARC から打ち出されるニュートリノ角度を監視することは重要であり, T2K で目標とする測定精度には 1 mrad 以下の精度でニュートリノビーム角が安定している必要がある。T2K から MUMON への要請は以下の 6 つであり, MUMON はこれを満たした検出器で構成されている必要がある [22]。

1. ミュオンを測定し, ニュートリノビーム強度を 3% 以下の精度でモニターする。
2. ニュートリノビームの方向を 0.25 mrad 以下の精度でモニターする。これはミュオンの中心を 3 cm の精度で測定することに相当する。
3. ミュオンを 1 バンチずつ測定する。

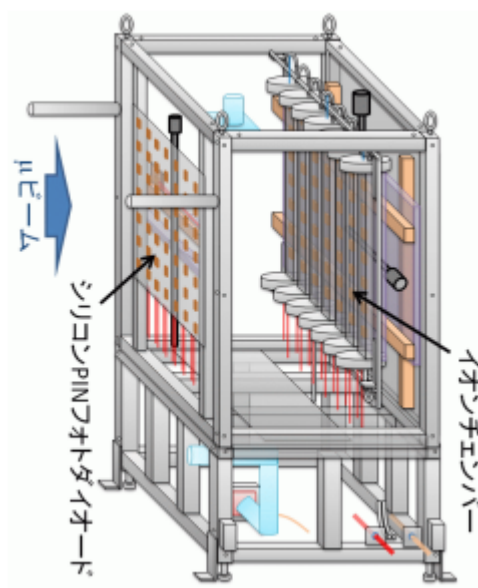


図 3.1: ミュオンモニターの概要図。



4.  $10^5 - 10^7$  muons/cm<sup>2</sup>/bunch のミュオンフラックスを測定する.
5. 放射線劣化や放射化に耐性がある.
6. 修理にかかる時間が最小限で、安定的に稼働する.

MUMON は要求 3. を満たしているため、解析結果をビーム運転中に即座に反映することができる。したがって MUMON の反応と陽子ビームモニターの反応を随時監視し、ビームの強度や位置、タイミングなどを比較することでニュートリノビームの異常を発見することができる。MUMON は炭素標の後、リアルタイムでビームを監視できる唯一のモニターであり、T2K 実験において極めて重要な検出器である。

MUMON に到来するミュオンはビームダンプを貫通するような 5 GeV/c を超える高エネルギーで、1 スピルあたり  $10^7$  個 /cm<sup>2</sup> のミュオンが到来する。ミュオンビーム中心付近のシグマは約 1 m のガウス分布に近く、ミュオンプロファイルを構成するために MUMON は 150cm × 150cm の平面を覆うように構成されている。

MUMON はエンクロージャと呼ばれる箱の中にある 2 種類の検出器で構成されており、検出器の信号読み出しや HV の供給は地下にあるケーブルパネルを通して行い、地上の DAQ (Data Acquisition) で信号解析をしている。地下の MUMON 本体に関わるエリアを MUMON-pit、地上の MUMON-DAQ に関わるエリアを MUMON-hut と呼ぶ (図 3.2)。MUMON を構成する検出器は半導体検出器の SIPIN フォトダイオード (Si) とガス検出器のイオンチェンバー (IC) である。本章では MUMON の検出器や MUMON のキャリブレーション、ミュオンプロファイル測定について述べる。

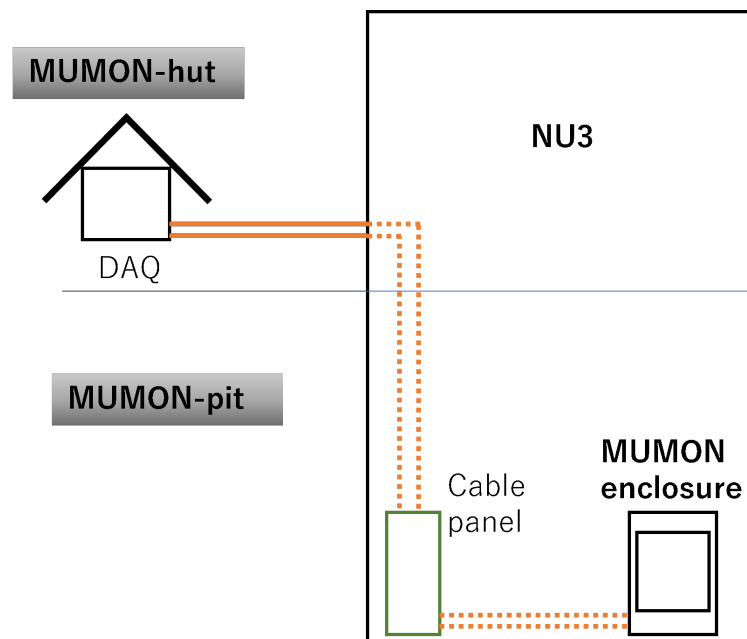


図 3.2: MUMON 付近の構造物の概要図。地上の MUMON-hut から NU3(ニュートリノ第 3 設備棟)の地下へケーブルとガス管が繋がられている。

### 3.2 Si PIN photo diode (Si)

浜松ホトニクス社の Si PIN フォトダイオード (S3590-08) を使用している。Si の有感面積は 10 mm × 10 mm、空乏層の厚さは 30 μm である。図 3.3 のように 25 cm 間隔に 7 × 7 個並べて取り付けられている。各チャンネルには番号が割り振られており、ミュオンビームの上流から見て右下が Si1-1, 右上が Si1-7, 左下が Si7-1, 左上が Si7-7 で

ある。MUMON には 49 個の Si とは別に可動ステージ上にも Si があり、キャリブレーション時の参照用 Si として用いるため ref-Si と呼んでいる。ref-Si は他のすべての Si の真上に移動でき<sup>\*1</sup>、測定したそれぞれの電荷量の比を算出する。Si の本体 (図 3.4) はアルミケースの中に Si 用の治具で固定されている。このアルミケースは MUMON の構造物から発生するミュオンや電子などを防ぐために取り付けられている。



図 3.3: Si の写真.Si の本体はアルミケースで覆われている。右下の可動ステージ上に ref-Si が取り付けられている。

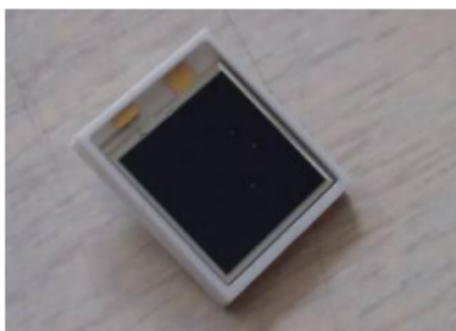


図 3.4: MUMON で使用している Si PIN フォトダイオード本体の写真。

Si に荷電粒子が入射すると半導体の各層のいたるところで電子-ホール対生成が起き、半導体内の電場により電子とホールがドリフトする。検出器に供給した電圧により、このドリフト速度を加速させゲインを大きくすることができる。Si は IC と比べて安価で、信号応答の良い検出器であり将来強度の 1.3 MW のビーム運転時のミュオンフ

<sup>\*1</sup> MUMON に到来するミュオンは MUMON に対して垂直方向に傾いているため、実際には各 Si の真上ではなく数 mm 下側に位置して、ミュオンビーム角の影響を考慮して設計されている。

ラックスでも線形性を保つ検出器だが、半導体検出器の特性である放射線損傷が課題である。図 3.5 に T2K Run8 の Si/IC の信号の比の変化を示す。約 5.5 ヶ月の間で  $7.17 \times 10^{20}$  個の陽子が打ち出された。これをミュオン数に換算すると、 $7.63 \times 10^{13}$  muons/cm<sup>2</sup> である。この時 IC の信号収量は  $\pm 0.2\%$  で安定していて、Si/IC は 1.2% 低下したため Si の放射線劣化が確認できる。Si の放射線劣化は Si のリーク電流を測定することで、劣化の程度を求めることができる。図 3.6 に照射ミュオン数と Si のリーク電流の相関図を示す。Si のリーク電流のしきい値は 3000  $\mu\text{A}$  に設定されており、1 チャンネルあたり  $\sim 60 \mu\text{A}$  のリーク電流を超えると電源が停止する。このしきい値を超えた時、もしくは超える前に交換することで Si の放射線劣化を防いでいる。リーク電流を照射ミュオン数で求めると  $8.7 \times 10^{13} \mu/\text{cm}^2$  である。さらにビーム運転日数に換算すると 500 kW、+250 kA のビーム運転で 90 日程度であり、Si は交換が必要なほど放射線損傷を受ける。

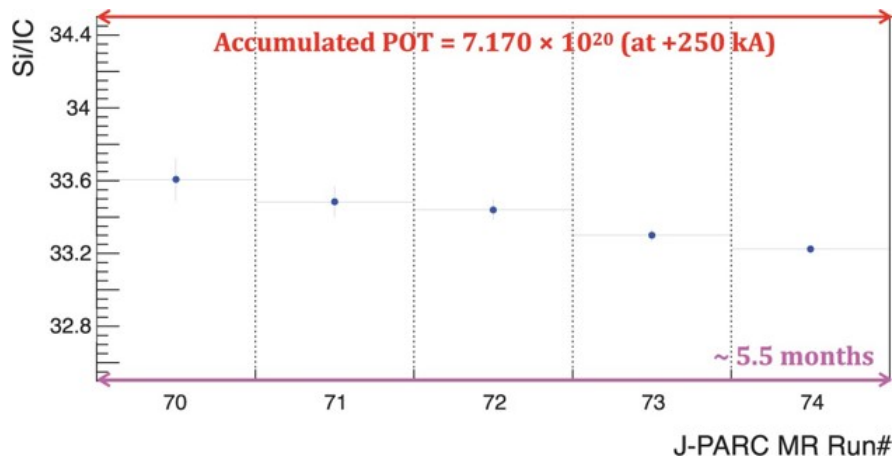


図 3.5: 各 MR Run における Si/IC の信号比。このときビーム強度は 300 kW から 450 kW でホーン電流 +250 kA で運転していた。約 5.5 ヶ月のビーム運転期間で  $7 \times 10^{20}$  POT の累積に対して、Si/IC が 1.2% 低下している [23]。

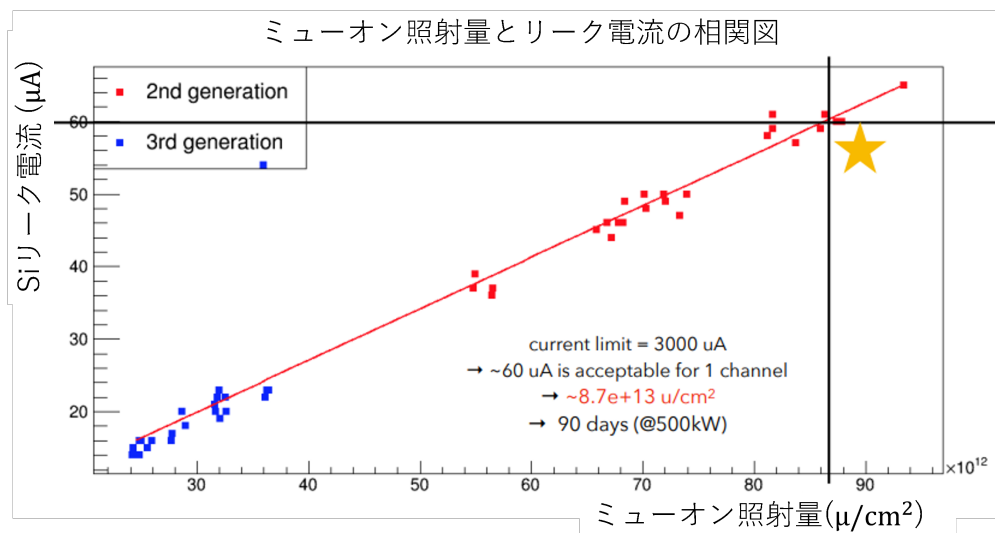


図 3.6: 第 2 世代と第 3 世代の Si で測定したミュオン照射量と Si のリーク電流の相関図。横軸は 1cm<sup>2</sup> あたりのミュオン数を示す。縦軸は 1 チャンネルあたりの Si のリーク電流を示す。

将来の 1.3 MW、320 kA によるビーム運転では Si は 30 日程度で交換が必要になることが予想されている。1 回

の T2K ビーム運転期間は 1 ヶ月から 4 ヶ月程度であるため、途中で Si の交換をすることは困難である\*<sup>2</sup>。この問題は MUMON 開発当初から憂慮されていて、より放射線耐性の高い代替検出器の研究、開発が行われている。

MUMON では一度に半分の Si を交換しており、これまでに 6 度 SI を交換した。2023 年現在では第 5 世代と第 6 世代の SI を利用しており、T2K Run13 終了時点のリーク電流は 1 チャンネルあたり 3  $\mu\text{A}$  程度である\*<sup>3</sup>。

### 3.3 Ionization Chamber(IC)

IC は図 3.7 のように 7 本の管が並べてあり、管の中には 7 個のセラミックプレートが入っている。Si と同様に  $7 \times 7$  のミュオンプロファイルを測定する構造になっており、チャンネル分布も Si と同様である。IC は全体が架台に繋がっていて、中心を含めて 10 箇所位置に移動することができる。IC は MUMON で使用されているガス検出器である。荷電粒子がガスを電離させて発生するイオンを IC の管内部に配置しているセラミックプレートで読み取る仕組みになっている。IC に充填させているガスは  $\text{Ar} + \text{N}_2$  か  $\text{He} + \text{N}_2$  の 2 種類を使用していたがビーム強度との兼ね合いにより現在は  $\text{He} + \text{N}_2$  を使用している。IC は放射線によって信号が劣化しない検出器だが、空間電荷効果やパイルアップなどガスの種類によっていくつか課題がある。



図 3.7: IC の写真。1 本の管に 7 個のセラミックプレートが入っている。

Ar の場合、空間電荷効果により信号の線形性が保てなくなり将来強度のビームでは MUMON の要求を満たせな

\*<sup>2</sup> T2K のビーム運転中、MUMON は強い放射線にさらされ放射化してしまうためビーム運転後や週に 1 度のメンテナンス日であっても MUMON の内部に入ることは難しい。したがって MUMON の長期間の運用を保つことができなくなる。ただし、ケーブル類をまとめているパッチパネルは MUMON から少し離れた位置にあるためサーベイの結果によっては入域が許可される。

\*<sup>3</sup> T2K Run13 終了後、2 週間以上経過した後の測定でありビーム運転中の測定結果とは異なる可能性がある。一方で、総陽子数から換算するとこれまで交換してきた Si は  $\sim 10^{21}$  POT だったのに対して、今回の Si はどちらの世代も  $\sim 10^{20}$  POT であり、まだ交換が必要なほど劣化はしていないと推察される。

くなる (図 3.8). 空間電荷効果とは荷電粒子が生成した大量イオンによって電場が発生し、イオンのドリフトを妨げ本来の信号より低い値として出力される現象のことである. IC の場合, 1 スピル当たりのミュオンフラックスが  $\sim 2.18 \times 10^7$  muons/cm<sup>2</sup>/spill(400 kW) あたりを超えると信号収量が低下し始める.

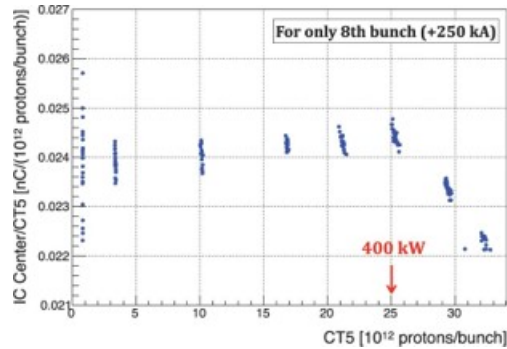


図 3.8: 各陽子数における IC (Ar)/CT の信号収量の変化 [23]. このときのホーン電流は +250 kA.

He は Ar より軽いいため空間電荷効果を抑制できるが, 軽くなったイオンの影響で信号のパイルアップが発生する (図 3.9). パイルアップとは 1 つ目の信号に 2 つ目の信号が入り込み, 元の信号を評価できなくなる現象のことである. IC では 340 kW あたりでパイルアップが既に見えており, 将来強度の 1.3 MW に対して課題となっている. また He 気体で出力される信号は Ar 気体から出力される信号よりゲインが 10 分の 1 になり, T2K のビームチューニングで使われるような数 kW 程度の低強度ビームでは IC のミュオンプロファイルを取得することができない.

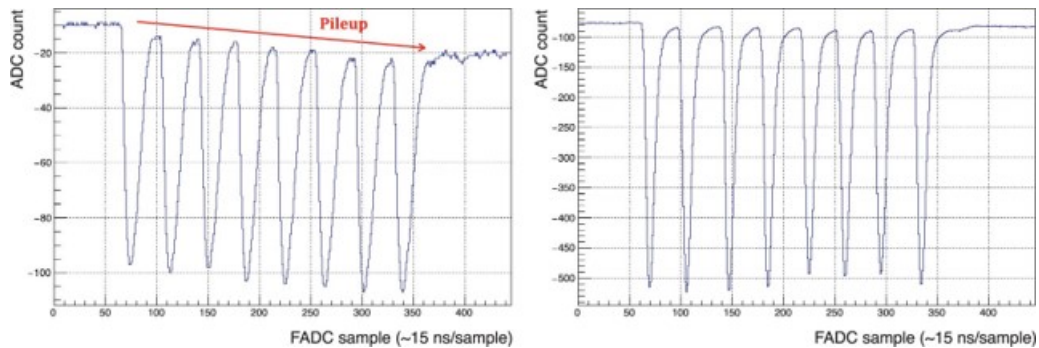


図 3.9: 左図: ホーン電流 +250 kA, 340 kW における IC(He) の 1 スピル当たりの波形.

右図:-250 kA, 480 kW における IC(Ar) の 1 スピル当たりの波形. [23]

ビームの大強度化に伴い, IC のガスが Ar では MUMON の要求を満たすことができなくなるため現在では He を使用し, 低強度ビームのミュオンプロファイルの測定には IC を用いず Si のみでモニターしている.

### 3.4 MUMON キャリブレーション

ミュオンの強度は  $7 \times 7$  個の検出器で測定したミュオンプロファイルの総電荷量である. MUMON の要求 2. を満たすためには各検出器が 4% 以上の精度でミュオン強度を測定する必要があるため, MUMON ではビーム運転毎にキャリブレーションを行っている. 1 度の T2K 物理ランに MUMON のキャリブレーションは 2 種類行われ, ミュオンを必要としないエレキキャリブレーションとミュオンを用いるセンサーキャリブレーションである. 本節では各検出器の各キャリブレーションについて述べる.

### 3.4.1 MUMON のエレキキャリブレーション

エレキキャリブレーションはパルスジェネレータを用いて、MUMON-pit のケーブルパネルから数種類の波高をもつパルス波を送り MUMON-hut の FADC でデータを取得する。取得したパルス波を積分して得られる積分値 (adc count) を用いてエレキキャリブレーションを行う。図 3.10 に FADC の積分値の分布と各波高をガウス関数でフィットした結果を示す。また、パルスジェネレータで送る波高はオシロスコープを用いて測定し、そこから各波高の電荷量 (pC) を計算することができる。各波高の電荷量と積分値をプロットしたものを図 3.11 に示す。ここに 1 次関数 ( $y = ax + b$ ) でフィットして得られる傾きの逆数 ( $1/a$  (pC/adc count)) がエレキキャリブレーションのパラメータである。

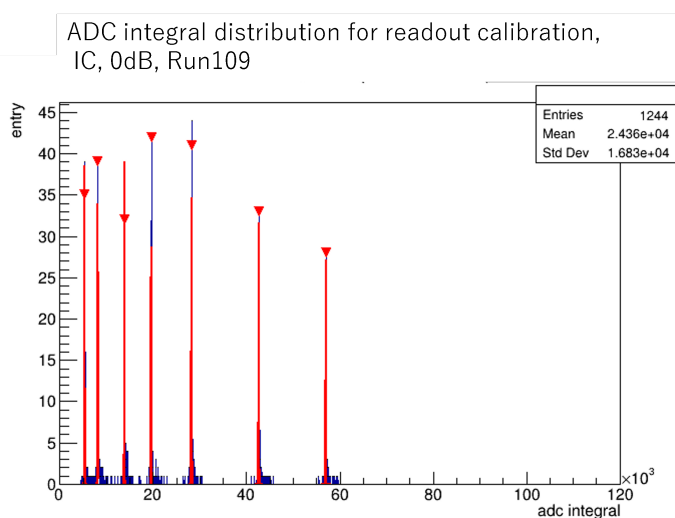


図 3.10: IC の 1 つのチャンネルにおけるパルス波を FADC で測定した積分値の分布。横軸は FADC の積分値、縦軸はイベント数を示す。赤色の線は各波高の高さに応じてガウス関数でフィッティングしたもので、フィッティングの平均値を peak として保存している。

エレキキャリブレーションは Si と IC が使用しているすべてのチャンネル (49×2 個) だけでなく、ref-Si やその他の空きチャンネルに対しても実施され、またアッテネータの設定ごとにもパラメータを取得している。表 3.1 に各設定でのキャリブレーションのパラメータのオーダーを示す。実際にはここにセンサーキャリブレーションの結果が反映され、MUMON の電荷量は FADC の積分値にこれらのパラメータが掛け算されて算出される。

表 3.1: キャリブレーションのパラメータのオーダー。Si は 30 dB, IC には 6 dB の減衰器が掛けられるため、それぞれの設定に対してパラメータが計算されている。

	0 dB	30 dB (6 dB)
Si	0.15	4.9
IC	0.03	0.06

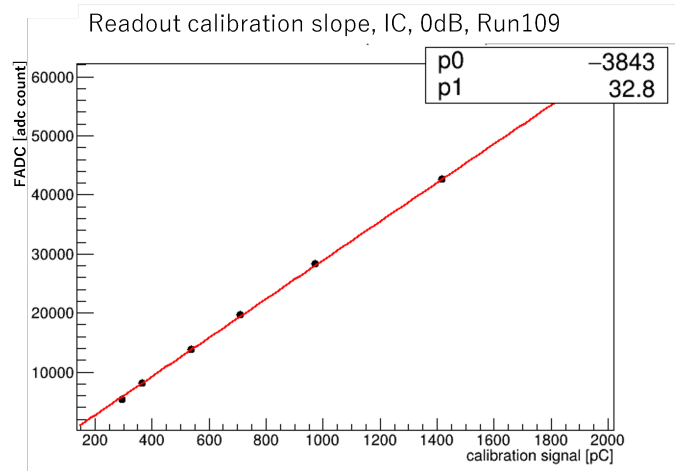


図 3.11: IC の 1 つのチャンネルのエレキキャリブレーションの結果. 横軸はオシロスコープで波高を取ったデータから計算した各波高の電荷量を示す. 縦軸は図 3.10 の FADC の積分値の分布から各波高をフィッティングしたガウス関数の平均値を示す.  $p_0$  は切片,  $p_1$  は傾きを示し, 傾き  $p_1$  の逆数がエレキキャリブレーションのパラメータである.

### 3.4.2 MUMON のセンサーキャリブレーション

MUMON の要求 2. を満たすためには読み出し回路の較正だけでなく, センサーの較正も必要不可欠である. MUMON では Si と IC の各チャンネルの個体差を算出するためビーム運転中のミュオンを用いて, センサーキャリブレーションを行う.

#### Si のキャリブレーション

Si は MUMON として用いている 49 個のセンサーの他に可動ステージに乗せられた ref-Si を使用してキャリブレーションを行う. 3.2 節で述べたように MUMON の Si は放射線劣化によりしばしば交換される. しかし, ref-Si はセンサーキャリブレーションで用いるために MUMON 稼働当初から交換されていない.

可動ステージ上の ref-Si は X 軸と Y 軸に  $\pm 75$  cm の範囲を動かすことができる. ref-Si を各 Si のチャンネルの前に移動させて 10 スピル程度のミュオンを測定する. 10 スピルの Si の平均電荷量  $Q(x, y)$  と ref-Si の平均電荷量  $Q_{\text{ref}}$  との比を算出する.

$$C(x, y) = \frac{Q(x, y)}{Q_{\text{ref}}} \quad (3.1)$$

求めたい Si の各チャンネルの相対ゲイン  $R(x, y)$  は, 算出した  $C(x, y)$  とその平均値  $\bar{C}$  を用いて次のように求められる.

$$R(x, y) = \frac{\bar{C}}{C(x, y)} \quad (3.2)$$

相対ゲインの算出に用いる Si の平均電荷量はセンサーとエレキの個体差を含むため, Si のキャリブレーションコンスタントはエレキキャリブレーションで求めた各チャンネルの定数  $C_{\text{elec}}(x, y)$  の平均値  $\overline{C_{\text{elec}}}$  と相対ゲイン  $R(x, y)$  を掛けたものになる. 単位は pC/ adc count である.

$$\text{Calib const.}(x, y) = R(x, y) \times \overline{C_{\text{elec}}} \quad (3.3)$$

## IC のキャリブレーション [24]

IC の架台を X 軸と Y 軸の方向に  $\pm 25$  cm, 計 9 カ所動かして 10 スピル分のミュオンを測定する (図 3.12). そして IC の各チャンネルの電荷量を  $S_i$  の総電荷量で規格化した 2 次元ミュオンプロファイルを作成する. 架台を動かす前の位置  $(x, y)$  にいたチャンネルが架台を動かした後の位置  $(X, Y)$  に来た時に得られる, 10 スピル分の収集電荷量の平均値  $Q(x, y, dx, dy)$  及び統計誤差を  $\delta Q(x, y, dx, dy)$  とする. ただし  $dx = X - x, dy = Y - y$  である. IC の相対ゲインは  $\chi^2$  の最小値から計算され, 架台の各位置の  $\Delta\chi^2(X, Y)$  を次のように定義する.

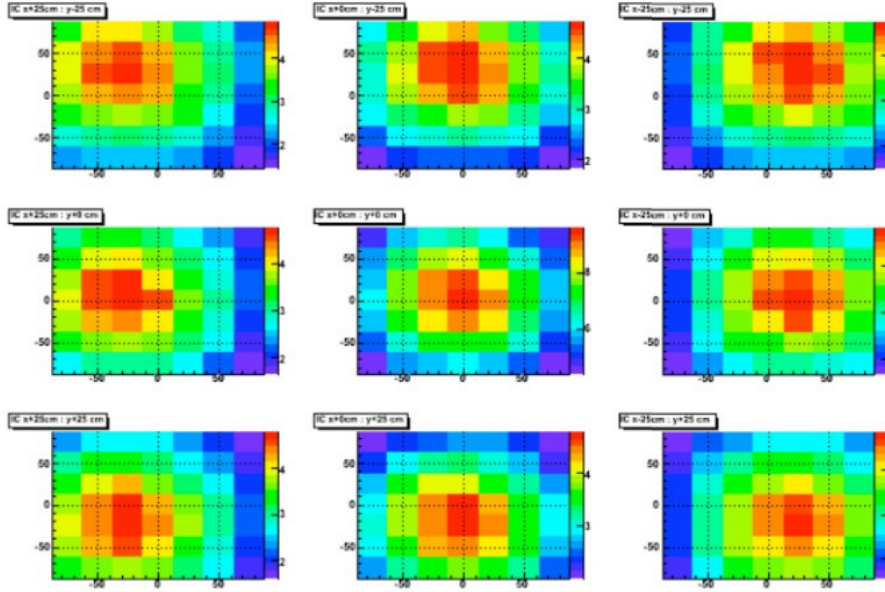


図 3.12: IC の架台を動かして取得した 9 カ所のミュオンプロファイル.

$$\Delta\chi^2(X, Y) = \sum_{x+dx=X} \sum_{y+dy=Y} \left( \frac{Q(x, y, dx, dy)R(x, y) - M(X, Y)}{\delta Q(x, y, dx, dy)} \right)^2 \quad (3.4)$$

ここで,  $R(x, y)$  は各チャンネルの相対ゲインである.  $Q$  の加重平均  $M(X, Y)$  は次のように定義する.

$$M(X, Y) = \frac{\sum_X \sum_Y \delta Q(x, y, dx, dy)^{-2} Q(x, y, dx, dy) R(x, y)}{\sum_X \sum_Y \delta Q(x, y, dx, dy)^{-2}} \quad (3.5)$$

全ての  $(X, Y)$  における  $\Delta\chi^2$  を計算した後にこの総和  $\chi^2$  を計算する.

$$\chi^2 = \sum_X \sum_Y \Delta\chi^2(X, Y) \quad (3.6)$$

計算された  $\chi^2$  は相対ゲイン  $R(x, y)$  をパラメータとしている. IC のチャンネル数は 49 個だがこの内一つの相対ゲインを 1 としているので,  $\chi^2$  は 48 個のパラメータを持つ. この後  $\chi^2$  を最小にするような 48 個の相対ゲインを最小アルゴリズム (ROOT[9] の Minuit2) を用いて算出する. 最後に求めた 48 個の相対ゲインにエレキキャリブレーションのパラメータ  $C_{\text{elec}}(x, y)$  を掛けて, ビーム運転中のキャリブレーションコンスタントとする. 単位は pC/ADC count である.

$$\text{Calib const.}(x, y) = R(x, y) \times C_{\text{elec}}(x, y) \quad (3.7)$$



### 3.5 MUMON ビームプロファイル測定

MUMON は各検出器が  $7 \times 7$  のアレイ状に並んでいるため、ミューオンのビームプロファイルを測定することができる。各チャンネルの電荷量を 2 次元ヒストグラムに値を詰めビームプロファイルを作成する。このとき、各チャンネルの電荷量にはキャリブレーションコンスタントが掛けられている ( $Q(x, y) \times Calib const.$ )。そして作成したビームプロファイルを式 (3.8) の 2 次元ガウス関数でフィッティングし、フィットパラメータからビームの中心位置や広がりなどを取得している。

$$f(x, y) = \frac{A}{\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{1}{1-\rho^2} \left( \frac{(x-X)^2}{\sigma_X^2} + \frac{(y-Y)^2}{\sigma_Y^2} - \frac{2\rho}{\sigma_X \sigma_Y} (x-X)(y-Y) \right) \right\} \quad (3.8)$$

ここで  $A$  は定数、 $X$  と  $Y$  はミューオンプロファイルの中心値、 $\sigma_X, \sigma_Y$  はミューオンビームの幅、 $\rho$  は相関係数 ( $\rho = \text{共分散} / \sigma_X \sigma_Y$ ) である。

MUMON は地面に対して垂直に設置されているが、ビームラインから到来するミューオンは MUMON に対して傾いている。そのため測定されるミューオンプロファイルにはビームの傾きと MUMON の設置位置によるオフセットがあることがわかっている。MUMON のオフセットは垂直方向に -3.85 cm (ミューオン角の影響が -1.35 cm, MUMON のアライメント補正が -2.5 cm) である。

実際にビーム運転中に測定されたミューオンの波形やプロファイルについては 4 章で述べる。

### 3.6 ビームアップグレードの影響

T2K 実験の将来計画ではハイパーカミオカンデの建設までに陽子ビームを 1.3 MW で 1.16 秒の間隔で打ち出し、ホーン電流を 320 kA に引き上げてニュートリノフラックスを増大させる予定である。これに伴いミューオンフラックスも増大するため、MUMON もビームアップグレードの影響を受ける。MUMON に到来するミューオンフラックスは、炭素標的と衝突する陽子数 (Proton On Target: POT) から推定できる。T2K 実験における 1 スpill 当たりの陽子数  $P$  (POT) はビーム強度を  $I$  (W)、繰り返し周期を  $T$  (s/spill) とすると以下のように算出できる。

$$P = I \times T \times \frac{1}{e \times 30GV} \quad (3.9)$$

ここで、 $e$  は電気素量 ( $\sim 1.6 \times 10^{-19}$ ) であり、陽子ビームの運動量 30 GeV を 30 GV の加速電圧に置き換えた。

先行研究のシミュレーションによりホーン電流が +250 kA の時、ミューオンフラックスは  $\sim 1.09 \times 10^5$  muons/cm/1e12POT であることがわかっている [22]。また実際の測定結果により、ホーン電流が +320 kA になるとミューオンフラックスが約 1.8 倍増えることがわかっている。これらの先行研究から表 3.2 に T2K Run11–T2K Run13 と将来強度におけるビーム運転時の条件を用いてミューオンフラックスを推定した。

表 3.2: 各条件下で予想されるビーム運転時のミューオンフラックス。

	ビーム強度	繰り返し周期	ホーン電流	ミューオンフラックス
T2K Run11	510 kW	2.48 s	250 kA	$2.87 \times 10^7$ muons/cm <sup>2</sup> /spill
T2K Run12	550 kW	1.36 s	320 kA	$3.06 \times 10^7$ muons/cm <sup>2</sup> /spill
T2K Run13	710 kW	1.36 s	320 kA	$3.95 \times 10^7$ muons/cm <sup>2</sup> /spill
将来強度	1300 kW	1.16 s	320 kA	$6.16 \times 10^7$ muons/cm <sup>2</sup> /spill

ビームアップグレード後のミューオンフラックスは T2K Run11 (2021 年) より約 2.1 倍増大する。このミュー

オンフラックスにおいて半導体検出器の SI は放射線劣化により 30 日程度で交換が必要になり, ガス検出器の IC はパイルアップにより 1 バンチ毎の測定ができなくなることが予想される. したがってビームアップグレード後 MUMON は要求 3. や 6. を満たせなくなる. そのため Si や IC に代わる検出器の開発が行われ, 電子増倍管 (EMT: Electron Multiplier Tube) が次世代の MUMON として有力とされている. EMT の詳細は 5 章で述べる.

## 第 4 章

# T2K Run12, Run13 の MUMON の測定

### 4.1 概要

T2K 実験は 2010 年から 2021 年の間に 11 回のビーム運転があり, 2023 年には 12 回目 (T2K Run12) と 13 回目 (T2K Run13) のビーム運転が実施された。

T2K Run12 は 2023 年 4 月 17 日から 26 日に実施されたビーム運転である。これは想定外の事故により当初予定していたビーム運転期間より短くなってしまったためである。ただし 2021 年のビーム運転終了から 2 年空けて開始したビームだったため, 2 年間に J-PARC 側で様々なアップデートが行われていた。例えば, 電磁ホーンは電源を追加し, OTR はホイルの追加, そして 1.16 秒のビーム間隔に対応するべくエレクトロニクスが改善されたなど様々である。MUMON では放射線劣化していた Si を全体の半分入れ替え, 第 5 世代と第 6 世代の Si が MUMON 内部に設置された。また MUMON の新検出器である EMT を初めて MUMON 内部に 7 個設置した。T2K Run12 以降の EMT の振る舞いについては 6 章で述べる。T2K Run12 ではビーム強度は 550 kW に到達し, 1.36 s/spill の間隔で安定してビーム運転を行うことができた。高強度ビームによる連続運転の他にも, 1–3 kW 程度の低強度ビームによるビームチューニングも 1.36 s/spill で行われたが MUMON の検出器は十分に動作していた。

T2K Run13 は 2023 年 11 月 21 日から 12 月 25 日に実施されたビーム運転である。T2K Run12 から夏のメンテナンス期間を挟んでおり, その間にも様々な装置がアップデートされ, J-PARC のビームアップグレードの準備が行われた。MUMON では EMT の HV ケーブルコネクタを BNC から SHV に変更し, EMT に最大-1000 V 程度の電圧を供給できるようにアップグレードされた\*1。T2K Run13 ではビーム強度は 760kW に到達した。最大強度における運転でも MUMON は十分に動作していたが, 1 スpill 当たりのミュオンフラックスも過去最大に到達したため, Si への放射線量がこれまでより多く放射線劣化の加速が懸念されている。

T2K 実験のあらゆるビーム運転期間において, MUMON はミュオンビームを監視している。したがって, ビーム調整やビームスタディに用いる低強度 (1–3 kW) から将来強度 (1.3 MW) までのすべての強度でミュオンビームのプロファイルを測定する必要がある。本章では, ビーム強度やサイクル周期がアップデートされた 2023 年のビーム運転で MUMON が測定した波形やプロファイル, ミュオンビームのヒストリープロット, ビームスキャンの結果について述べる。

---

\*1 T2K Run12 の期間に EMT の波形を取得した結果, ホーン電流 0 A で 1–3 kW 程度の低強度ビームの波形は EMT のゲインがまったく足りていなかった。さらに横一列に並べられた EMT からミュオンプロファイルを作成したところ, Si と比較しても明らかに電荷量が小さく, 十分なプロファイルを取得できなかった。そのため, T2K Run13 では EMT のゲインを引き上げるために EMT の HV の上限をあげるような作業が行われた。

## 4.2 MUMON の波形

MUMON はミューオンを1バンチ単位で測定することができなくてはならない。2023年ではスピル間隔が2.48秒から1.36秒に変わり、電磁ホーン+320 kA でビーム運転が行われた。T2K 実験の設計時は750 kW のビーム運転が計画していた強度だったため、MUMON も同様のビーム強度まで測定できるように設計されている。今回のビーム運転では最大で760 kW を達成し、将来強度には1.3 MW を計画しているため、MUMON の波形やプロファイルは今後より注意深く測定する必要がある。

図4.1-図4.4に2023年で取得した、SiとICの1スピルの低強度(1-3 kW, 2バンチ)と高強度(100-710 kW, 8バンチ)の波形を示す。2023年のビーム運転ではICのガスはHeだったため、ゲインが低く低強度の波形が十分に取れていない。また、高強度ではパイルアップにより後方のバンチになるにつれて信号が小さくなっている。Siは低強度、高強度ともプロファイルの計算に十分な波形を取得できている。将来強度のミューオンフラックスは710 kW より約1.5倍であり、1バンチあたりの強度も1.5倍になると予想できる。MUMON-hutのFADCのしきい値は2000 adc count であるため、Siは将来強度でもアッテネータや印加電圧を変える必要がなく、解析可能である。一方でICはすでにパイルアップが深刻であり、将来強度でのICの利用はMUMONの要求を満たすことができないと予想している。

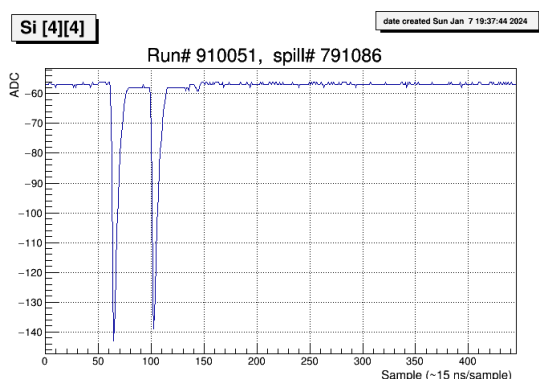


図 4.1: 低強度 (約 3 kW) の Si の波形。

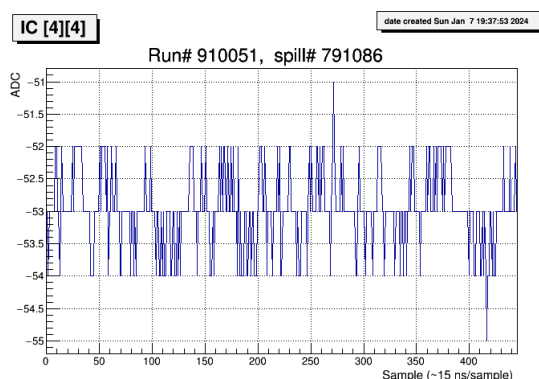


図 4.2: 低強度 (約 3 kW) の IC の波形。

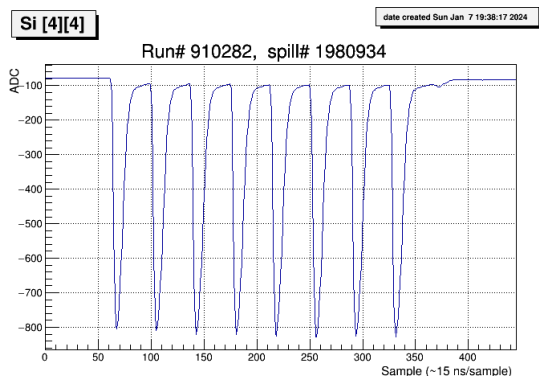


図 4.3: 高強度 (710 kW) の Si の波形。

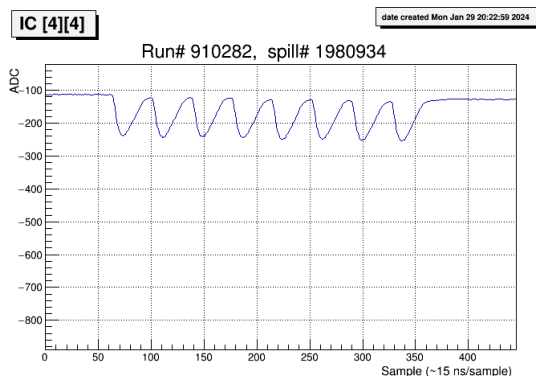


図 4.4: 高強度 (710 kW) の IC の波形。

## 4.3 ミューオンプロフィール

MUMON が測定した 1 スピルのミューオンを CT のタイミングを用いて 1 バンチずつ積分し、電荷量を計算する\*2。総電荷量を CT5 の電荷量で割ったものを MUMON の yield としている。各位置で得られた電荷量の分布をミューオンプロフィールと呼び、2 次元ガウス関数でフィットした結果を MUMON の center と sigma として取り出している。ビーム運転中はこれらのパラメータ (yield, center, sigma) を監視することでビームの状態を確認している。

2023 年に取得した、1 スピルの低強度と高強度のミューオンプロフィールを図 4.5–図 4.8 に示す。

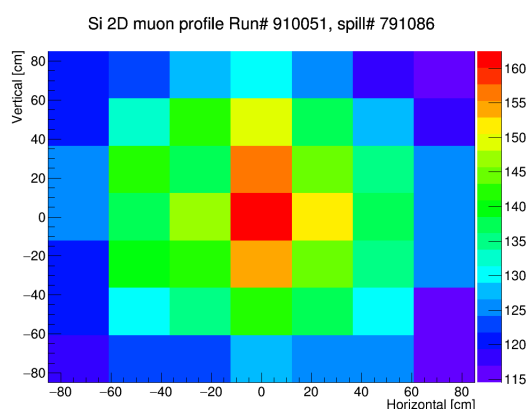


図 4.5: 低強度の Si のミューオンプロフィール。ビーム強度は約 3 kW, 2 バンチ, ホーン電流 0 kA。

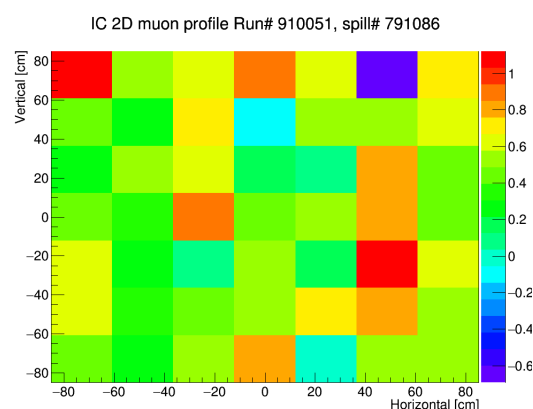


図 4.6: 低強度の IC のミューオンプロフィール。T2K run13 では IC のガスは He を使用した。

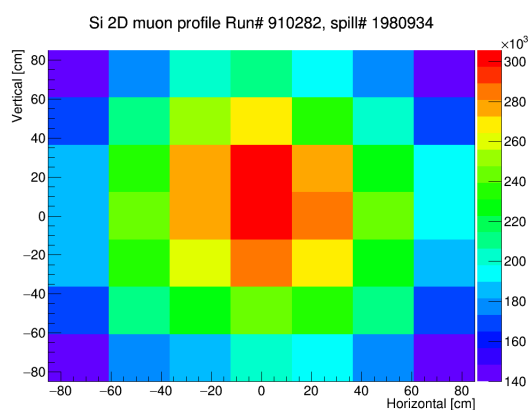


図 4.7: 高強度の Si のミューオンプロフィール。ビーム強度は 710 kW, 8 バンチ, ホーン電流 320 kA である。

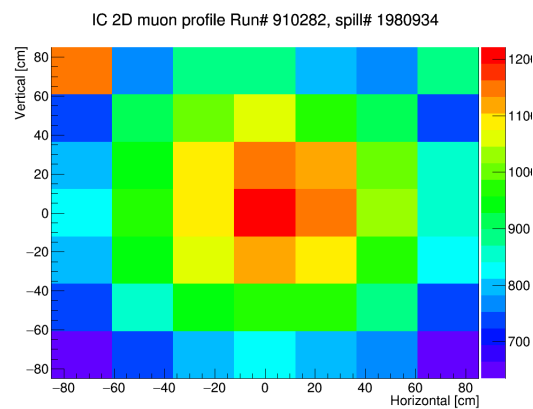


図 4.8: 高強度の IC のミューオンプロフィール。左上 (-75 cm, 75 cm) と右上 (75 cm, 75 cm) のチャンネルは T2K Run13 で発見された IC の不具合であり、実際のビームの形状とは無関係である。

図 4.5 と図 4.7 のように、ビームアップグレードの進む状況でも Si は低強度、高強度に関わらずミューオンプロフィールを十分に測定できていることがわかった。一方で、He ガスを使用している IC はゲインが小さいため図 4.6

\*2 1 スピルの波形から積分した値は adc count であるため、キャリブレーションによって求めた係数 (pC/ADCcount) を掛け算することで積分値を電荷量に変換しつつ、各チャンネルの個体差を考慮している。

のように低強度ビームではミュオンプロファイルを測定できていないことがわかる。Ar ガスを用いることで 10 倍のゲインが得られるが高強度ビームに対して空間電荷効果により線形性を保てない問題がある。加えて、He ガスへの切り替えが安定するまで 2 週間かかるとされているため、ビーム運転中はガスの切り替えが現実的でない。低強度ビームでは Si がミュオンプロファイルを取得できていることから IC の低強度ビームの利用はせず、ビーム調整やビームスタディでは Si のパラメータが重要となっている。

#### 4.4 MUMON のヒストリープロット

T2K Run12, Run13 の期間中 MUMON は安定して稼働し、ミュオンビームの状態を監視した。2023 年のビーム運転ではビーム強度の記録更新だけでなく、+320 kA の連続運転を初めて安定して完了した。本節では 1 ヶ月以上の十分な期間でデータを取得できた T2K run13 について、MUMON の yield と center, sigma のヒストリープロットを示す。

MUMON の yield を図 4.9 と図 4.10 に示す。空白の期間は加速器のメンテナンスやその他トラブルによりビームが出ていない期間を示す。ただし、12/22 以降の空白はホーン電流が +320 kA から +250 kA に変わったことで MUMON yield が低下し、グラフの描画範囲から外れたためである。Si と IC に共通して yield にはある程度の揺らぎがあることがわかる。これは電磁ホーンの電流や陽子ビームの状態の変化が影響していると考えられている。

また図 4.10 の IC のヒストリープロットを見ると 11/23 の連続運転開始日以降 IC の yield が下がり続ける現象があることがわかる。そのため、本研究では MUMON のヒストリープロットやその他の解析については基本的に Si の結果を用いて評価する。

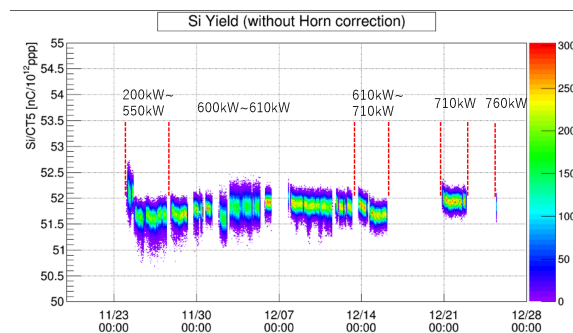


図 4.9: T2K Run13 の Si yield. 縦軸は Si/CT05 ( $\text{nC}/10^{12}\text{ppp}$ ) を表す。ppp は proton per pulse の略称。

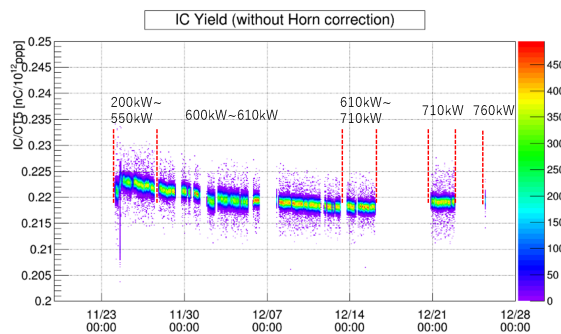


図 4.10: T2K Run13 の IC yield. 縦軸は IC/CT05 ( $\text{nC}/10^{12}\text{ppp}$ ) を表す。

MUMON の center と sigma, ホーン電流を図 4.11–図 4.15 に示す。MUMON sigma の空白の期間の後に値が数 cm 以上飛んでいる箇所は連続運転前にビームを調整したことが原因である。それ以外の期間では T2K Run13 を通

して安定していた。12/22 の途中で  $\sigma$  が飛んでいる、もしくは描画されていない箇所については yield と同様の理由で、ホーン電流が +320 kA から +250 kA に変更されたからである。ホーン電流が小さくなることでパイオンを集束する力が弱まりミュオンビームの  $\sigma$  が大きくなっている。各 MUMON center がジャンプしている箇所(11/23 付近に多い)は、陽子ビームの位置を調整したためであり、連続運転中にビームの位置が大きく変わることは無かった。

図 4.11 より、T2K run13 を通して X-center は Y-center よりも大きな揺らぎを持っていることがわかる。これは 1 次ビームラインにおいて陽子ビームの X 軸のファイナルフォーカスマグネットが Y 軸より上流に位置していることが原因である。X 軸のマグネットが標的から遠いことで、陽子ビームが X 軸方向に広がってしまい Y 軸よりも不安定なミュオンプロファイルとなってしまふ。T2K 実験では連続運転の直前にビーム位置などを確認するために 50 スピル程度の陽子を打ち出すが、MUMON の X-center の揺らぎは 50 スピル程度では収束しないため陽子ビームの X 軸を標的中心に合わせることは困難だとされている<sup>\*3</sup>。

次に図 4.12 の Y-center の揺らぎについて考える。ミュオンビームの形成には電磁ホーンの電流値が大きく関わっていることから、図 4.16–図 4.17 のような Y-center とホーン電流の相関を求めた。それぞれ、12/8–12/13 と 12/20–12/22 の連続運転の期間についての結果である。どちらの期間においてもホーン電流と Y-center の相関は見られず、各連続運転期間の Y-center の揺らぎについてホーン電流の揺らぎではないことを示唆する結果となった。

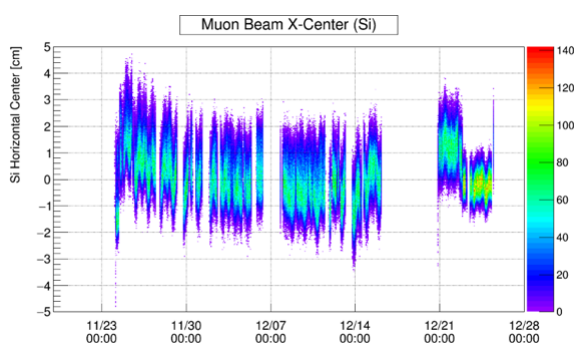


図 4.11: T2K run13 の MUMON X-center.

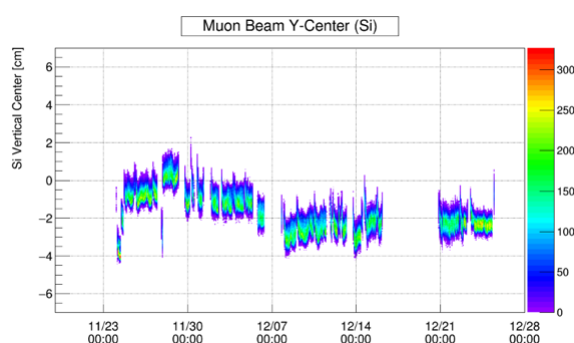


図 4.12: T2K Run13 の MUMON Y-center.

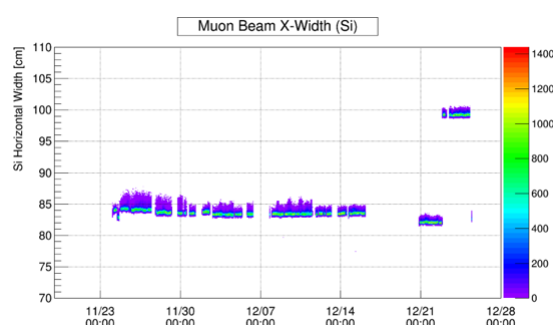


図 4.13: T2K run13 の MUMON X-sigma.

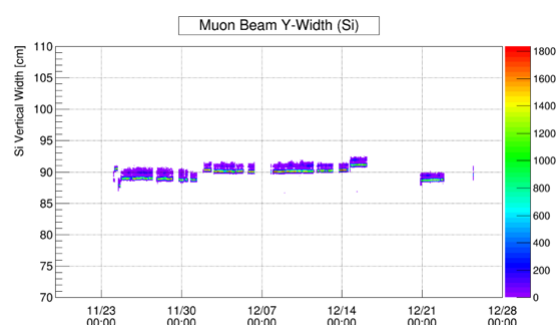


図 4.14: T2K Run13 の MUMON Y-sigma.

陽子ビームの中心とミュオンビームの中心の相関を図 4.18 と図 4.19 に示す。ここで陽子ビームの中心のパラメータには、1 次ビームラインの最下流に配置されている陽子ビームモニターである SSEM19 を用いた。両方の相関図に負の相関が見えているのは電磁ホーンの集光によるためで、陽子が正の方向にずれた場合、ミュオンは負の

<sup>\*3</sup> 陽子ビームが標的中心からずれることでニュートリノフラックスが減ってしまうが、陽子ビームを中心に合わせるために細かな調整をすると何日もかかってしまう。T2K 実験の期間にも限りがあるため、ビーム調整中は陽子ビームモニターと MUMON を比較しながらある程度のずれを許容してビーム運転を行っている。T2K 実験のビーム運転開始直後の場合はビームスキャンを行い、各モニターの挙動を細かく確認しながらビームの調整をするが半日から 1 日程度の期間のみで行われる。

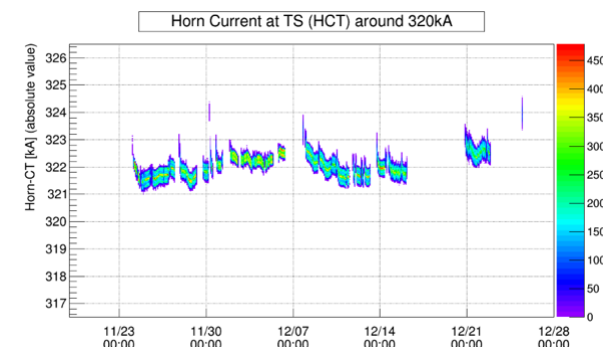
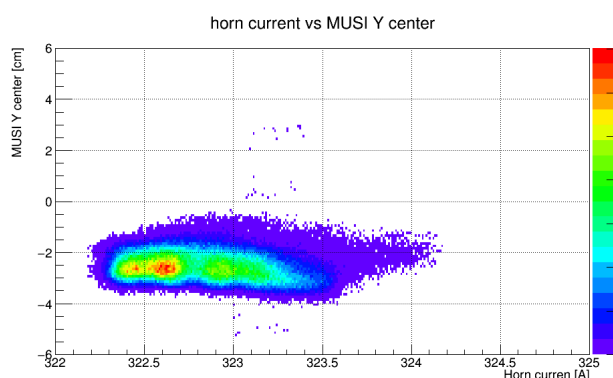
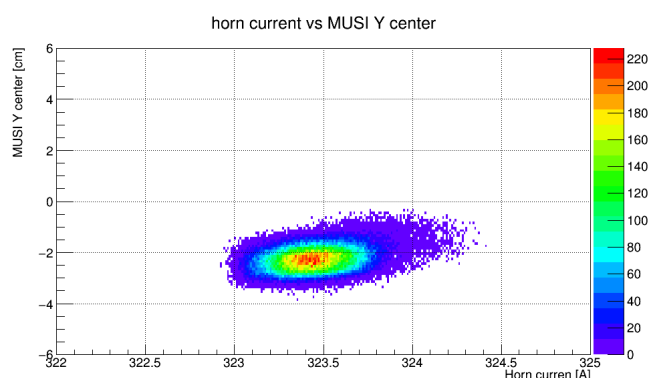


図 4.15: T2K Run13 のホーン電流.

図 4.16: ホーン電流と MUMON Y-center の相関図.  
12/8–12/9 の 600 kW 連続運転の一部.図 4.17: ホーン電流と MUMON Y-center の相関図.  
12/20–12/22 の 710 kW 連続運転の一部.

方向にずれる構造になっている。図 4.18 から陽子ビームとミュオンビームの両方において揺らぎはあるものの、X-center はほぼ中心である結果が得られた。一方で、図 4.19 からは MUMON の Y-center は中心が負の方向にずれていることがわかる。このずれは 2023 年当時のビーム運転中にも注目されたが原因は分かっておらず、その候補として陽子ビームに角度が付いていたことや電磁ホーンなどのビームライン上の装置のミスアライメントが考えられている。このような T2K ビームラインでのアライメントやビームの状態に関する研究として、T2K 実験ではビームスキャンが行われている。ビームスキャンについては次の節で述べる。

ただしこれらのミュオンビームの揺らぎや中心からのずれは、T2K 実験の各装置のパラメータを管理するコンピュータのしきい値の範囲内であり、IC を除くどのパラメータも T2K 実験の要求の範囲内に収まっていた。

## 4.5 T2K 実験 ビームスキャン

T2K 実験では 1 度の実験期間中にビーム調整や物理ラン以外にも、ビームライン上の検出器を用いたビームスタディが行われており、陽子やミュオン、ニュートリノの振る舞いについて研究されている。

ビーム運転開始直後には陽子ビームの位置を水平方向、垂直方向にそれぞれ平行移動させて、2 次ビームラインのバッフルや標的、電磁ホーンなどのアライメントを MUMON で測定したり、ビームオフセットの測定を行うビームスキャンが実施されている。

ビームスキャンで重要な装置はビーム上流から順に、SSEM19、バッフル、炭素標的、MUMON である (図 4.20)。炭素標的は直径 26 mm の円柱、バッフルは長さ 1.7 m の炭素ブロックに直径 30 mm の穴が空いており、本来陽子



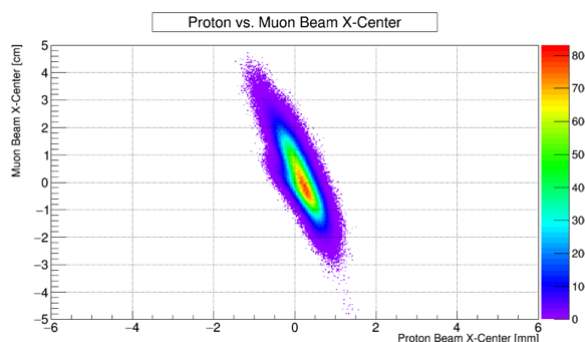


図 4.18: 陽子ビーム X-center vs MUMON X-center.

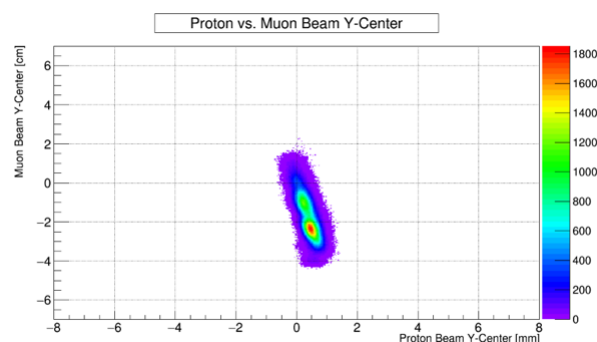


図 4.19: 陽子ビーム Y-center vs MUMON Y-center.

ビームはこれらの中心を通るように調整される。ビームスキャンは陽子ビームを炭素標的から外れるようにわざと  $\pm 20$  mm 程度の範囲まで動かしたときの、MUMON の center や sigma の値の変化を測定している。MUMON は陽子ビームの標的への照射位置に対して感度があり、標的中心に陽子ビームを当てるためにも用いられる重要な検出器である。

通常の運転では想定されていない範囲で陽子ビームを照射するので、機器を保護するためにビームスキャンは低強度ビーム ( $\sim 1$  kW、2 バunch) で実施される。そのため、ゲインの低い IC のパラメータは使用できず、Si のパラメータと陽子モニターを比較して解析する。

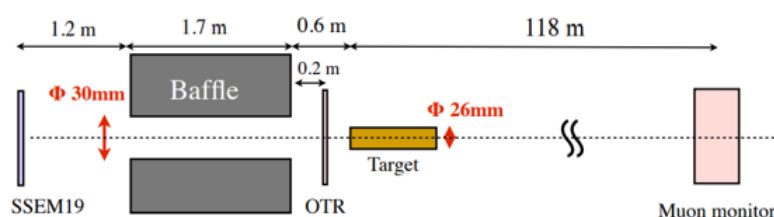


図 4.20: ビームスキャンで用いる SSEM19 から MUMON までの各装置の構造 [25].

### 先行研究におけるビームスキャンの結果 [26]

図 4.21 に T2K Run5, Run6 で実施されたビームスキャンの結果を示す。横軸は陽子モニターの center を表示し、縦軸は MUMON の sigma (width) を表す。黒と赤のプロット点はそれぞれ炭素標的と電磁ホーンの再設置の前と後である。陽子ビームがバフフルと標的のギャップ領域 (図 4.22) に入射した時、MUMON にはビームダンプで生成されたミュオンが増え、プロファイルの sigma は狭くなる。つまり MUMON sigma が低下したタイミングを見ることで、陽子ビームは炭素標的から外れ始めていることがわかる。水平方向のビームスキャンでは予想されるビーム位置の両端で sigma が狭く、標的とバフフルは正しくアライメントされていることがわかる。一方で、垂直方向については再設置後のプロットが  $y < -12$  mm の領域で sigma が広がっている。これは -y 領域のギャップ領域が狭いか、存在しないことを示し、標的とバフフルにミスアライメントがあることを示唆している。

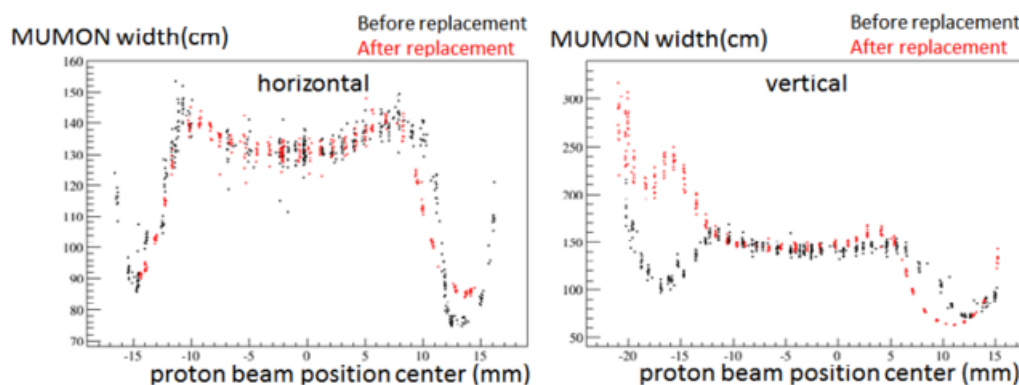


図 4.21: T2K Run5, Run6 のビームスキャンの結果. 縦軸がミュオンビームの幅, 横軸が陽子ビーム位置を示す. [26].

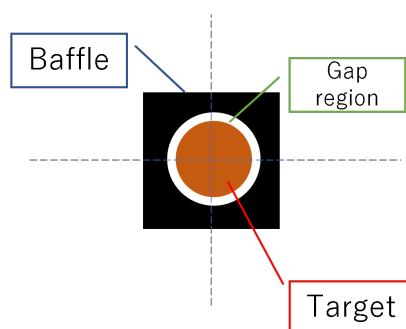


図 4.22: ビーム上流から見たバッフルと炭素標的の概要図.

#### 4.5.1 2023 年ビームスキャンの結果

##### MUMON center の解析結果について

図 4.23 と図 4.24 では, 電磁ホーンが 0 kA のためレンズ集光の原理が働かないため, 陽子ビームが + 領域に動く とミュオンビームも + 領域に動いている. 陽子ビームがギャップ領域に入射した時が center のピーク点となり, ± 領域のピーク点の中央値を読み取ることでビームオフセットの推定が可能になる. 図 4.23 から水平方向はビーム オフセットがほぼ 0 mm だと推定できる. 一方で垂直方向については, 図 4.24 からビームオフセットは -2.5 mm - -3.0 mm 程度だと推定する. 2021 年のビーム運転終了から 2023 年のビーム運転開始までのメンテナンス期間で SSEM19 の再設置が行われているため, ビームオフセットが表 2.2 の -4.5 mm から変化していることを示唆する結果となった.

ただしピーク点の中央値をビームオフセットとする方法は, 陽子ビームが炭素標的に対して角度を持たず中心を 捉えているという仮定のもと成り立つ. したがって, 陽子ビームのコンディションが異なる場合はビームオフセット ではなくその影響がビームスキャンの結果として表れていると考えられる. 特に, -y 領域のピーク位置はこれまでの ビームスキャンのデータと比較しても変化していないことから, 単純な SSEM19 の再配置によるものではない可能性 を示唆しており, ビームオフセットが変わっているとは断言できない. 2023 年のビーム運転ではビームオフセッ トは -4.5mm だと判断したまま, ビーム運転が行われた.

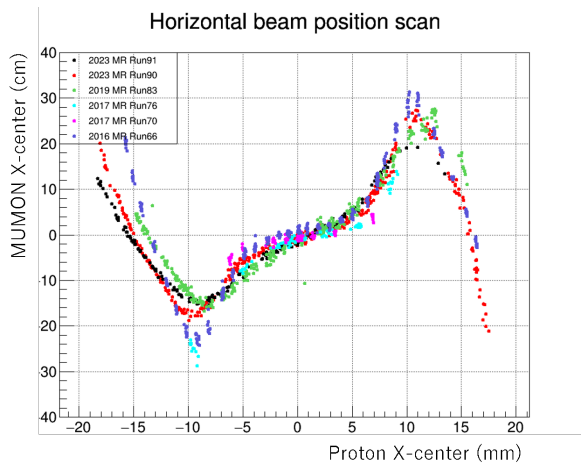


図 4.23: 陽子ビームの X-center とミュオンビームの X-center の関係.

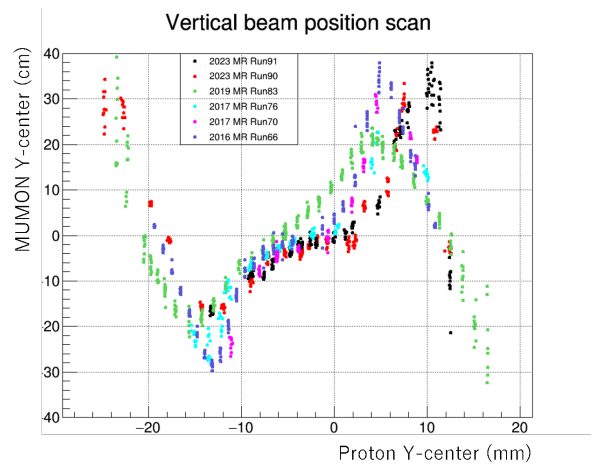


図 4.24: 陽子ビームの Y-center とミュオンビームの Y-center の関係.

MUMON sigma の解析結果について

MUMON sigma について、ビームスキャンの結果を図 4.25 と図 4.26 に示す。2019 年と 2023 年の結果では、水平方向と垂直方向の両方でプロットの非対称性があることがわかる。この非対称性の原因としては、バッフルのミスアライメントによるもの [26] と陽子ビームのコンディションによるものの 2 つが考えられている。

図 4.25 の水平方向のスキャンでは +x 領域において MUMON sigma が広がっているため、+x 領域のギャップ領域が狭いことを示唆している。図 4.26 の垂直方向のスキャンでは 2019 年は -y 領域のギャップ領域が狭いことを示唆し、2023 年は +y 領域のギャップ領域が狭いことを示唆している。2023 年の結果の中でも MR Run91(T2K run13) の方がよりギャップ領域が狭い、もしくは存在しないようである。平木博士論文 [26] では、このギャップ領域の狭まりがバッフルと標的のミスアライメントによるものだというシミュレーション結果が得られていた。しかし T2K Run12 の後に行われた、ターゲットステーションの調査ではバッフルと標的にミスアライメントは認められなかった。

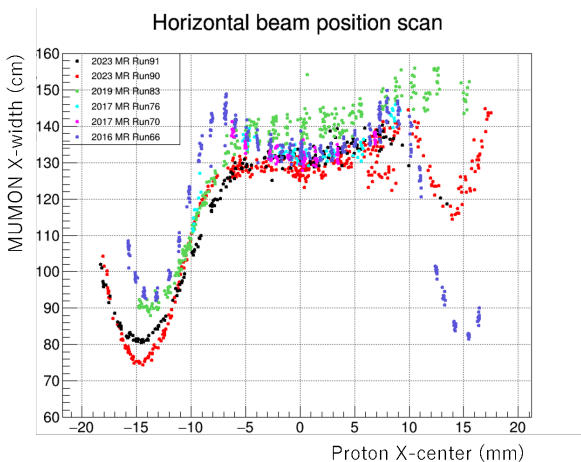


図 4.25: 陽子ビームの X-center とミュオンビームの X-sigma の関係.

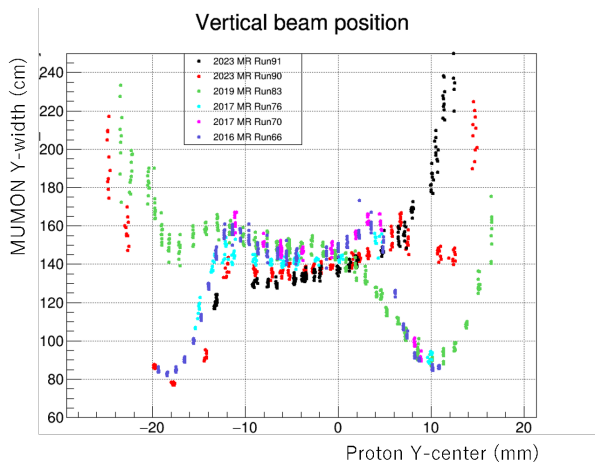
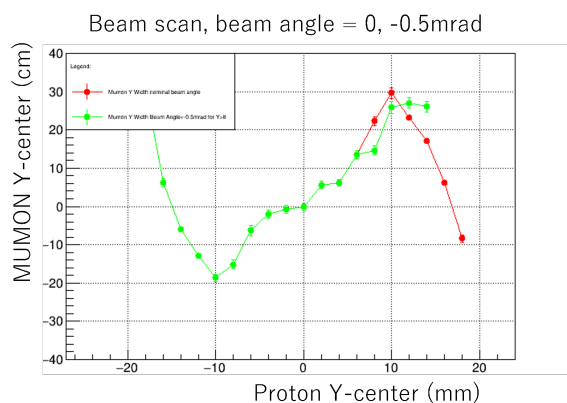
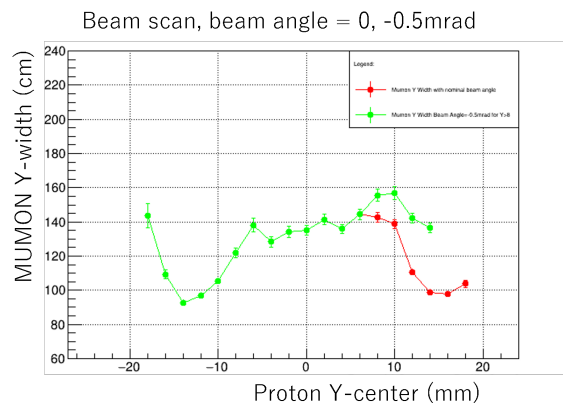


図 4.26: 陽子ビームの Y-center とミュオンビームの Y-sigma の関係.

ここでビーム角度が 0 mrad と -0.5 mrad に設定してビームスキャンのシミュレーションを行った結果を図 4.27 に示す。図 4.27 の左図では、陽子ビーム角度が -0.5 mrad の時にピーク位置が正の方向にずれており、図 4.24 の 2023 年の結果と同じようなピーク位置のシフトがあることがわかる。図 4.27 の右図では、陽子ビーム角度が -0.5 mrad の時に非対称性が表れており、これもまた図 4.26 の結果と一致している。



MUMON Y-center のシミュレーション結果。



MUMON Y-sigma のシミュレーション結果。

図 4.27: JNUBEAM を用いたビームスキャンのシミュレーション結果。緑のプロットは標的に対するビーム角度が -0.5 mrad の場合を示す。赤のプロットは標的に対するビーム角度が 0 mrad の場合を示す。ここで赤のプロットは 6 mm – 18 mm の範囲に絞って描画している。

## まとめ

2021 年以降のメンテナンスの際 SSEM19 の再設置があったため、これまでのビームオフセットが変わっている可能性が高く、これを調査するためにはビームスキャンのデータは重要である。ビームスキャンで得られたデータは、ビームオフセットが -2.5 mm から -3.0 mm 程度であることを示唆しているが、陽子ビームの状態や各装置のミスアライメントによりビームスキャンの結果に想定外の影響を及ぼしている可能性があり、ビームオフセットの決定には至っていない。2023 年のビーム運転はビームオフセットが -4.5 mm のまま行われた。

MUMON sigma に関するデータは、水平方向、垂直方向のビームスキャンにおいて非対称性のあるプロットが得られた。平木博士論文 [26] からは、この非対称はバッフルと標的のミスアライメントを示唆する結果が出ている。一方で、ターゲットステーションでの現地調査ではバッフルのミスアライメントが確認されなかった。

ビームスキャンの陽子ビーム角度に関するシミュレーションからは、今回得られたビームスキャンと一致するピークのずれや非対称性を持ったプロットが得られた。したがってシミュレーション結果は、バッフルや標的のミスアライメントではなく陽子のビーム角度が 0 mrad ではなかったことを示唆している。

## 第 5 章

# Electron Multiplier Tube(EMT)

J-PARC のビームアップグレードにより MUMON に到来するミュオンフラックスは 2021 年の観測から 2 倍以上になることが予想されている。MUMON で使用している Si と IC は 3 章で述べた懸念点により MUMON の安定稼働に課題が生じている。そこで Si や IC に代わる次世代のミュオンモニター候補が開発され、現在有力とされている検出器が電子増倍管 (EMT: Electron Multiplier Tube) である。一般的な電子増倍管と異なり、MUMON では浜松ホトニクス社の光電子増倍管 (R9880-U110, PMT: Photo Multiplier Tube) を元に製作している。同製品の光電面をアルミで蒸着した特注品で、EMT 内部のダイノードに入射した荷電粒子を検出する構造は PMT よりも電子増倍管に近い。区別のため本論文では「EMT」を MUMON で製作した検出器 (図 5.1), 「電子増倍管」を一般的な電子増倍管とする。

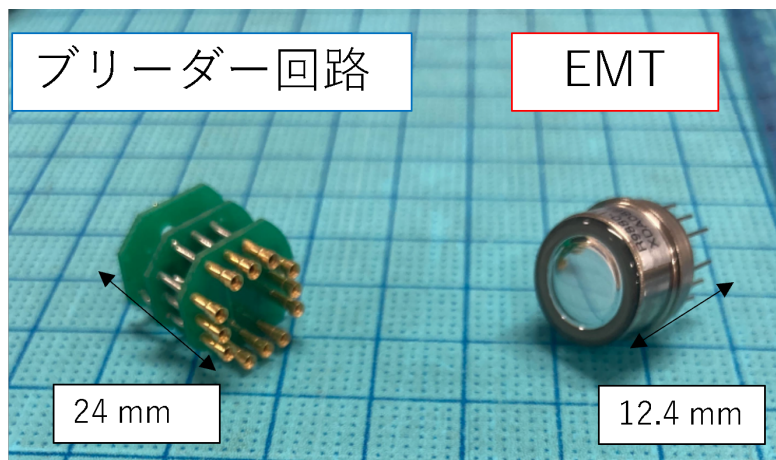


図 5.1: EMT とブリーダー回路の写真. [27]

### 5.1 EMT の概要

EMT はカソードがアルミ蒸着されているため、PMT に比べてカソードの二次電子放出比が低いですが、MUMON に到来する大強度ミュオンビームは EMT 内部を十分に貫通するため、ダイノードによる二次電子で十分な信号を得ることができる。EMT はアルミ蒸着されたカソードと 11 段のダイノードで構成されており、カソードの有感領域は  $50.26 \text{ mm}^2$  (半径 4 mm), ダイノードの有感領域は  $\sim 77.44 \text{ mm}^2$  ( $\sim 8.8 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ ) である。EMT に荷電粒子が入射するとカソードや上段のダイノードから二次電子を生成し、ダイノード間の電界により加速され、後段のダイノードで増幅、最終的に信号となって取り出される (図 5.2)。ここで  $\Delta$  と  $\delta$  はそれぞれアルミニウムとダイノードの

二次電子放出比を示す。添え字の"e"と" $\mu$ "は入射した粒子の種類を示す。EMT はカソードや後段のダイノードでも二次電子を生成するが、より上段のダイノードで生成された二次電子の方が増幅されるため、EMT の信号は 1 段目や 2 段目で生成された 2 次電子が支配的である。

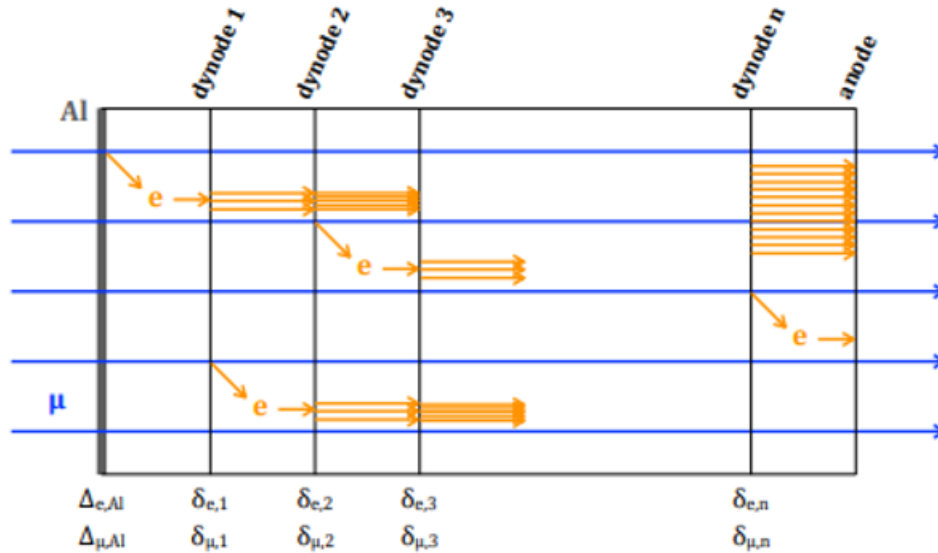


図 5.2: EMT による信号増倍の模式図.

EMT の各ダイノード間に電圧を印加するデバイスをブリーダー回路といい、その構造は図 5.3 のような模式図で表される。EMT の元となった PMT のブリーダー回路はポリブチレンテレフタレートやポリアセタールの絶縁カバーを使用していたが、MUMON への実装に向けて放射化しないように回路部分がむき出しになったものに改良されている。

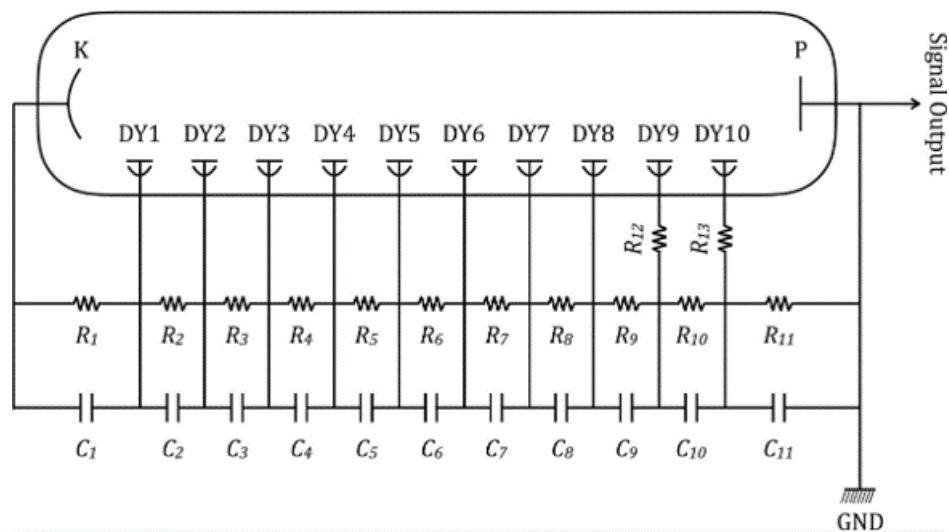


図 5.3: EMT のブリーダー回路の模式図. "K", "P", "DY", "GND"はそれぞれカソード, アノード, ダイノード, グランドを示す. [23]

EMT の開発とともにブリーダー回路も配分電圧比やキャパシタンスが改良されており、2023 年現在は 5 世代目

のブリーダー回路を使用している。各世代のブリーダー回路を表 5.1 に示す。各世代の配分電圧比を表 5.2, キャパシタンスを表 5.3 に示す。第 1 世代と第 2 世代のブリーダー回路は配分電圧比が第 3 世代の normal と同じで、キャパシタンスがそれぞれ異なる。第 4 世代と第 5 世代のブリーダー回路は第 3 世代の typeA と配分電圧比もキャパシタンスも同様であるが、耐電圧がそれぞれ-500 V と-1000 V である。配分電圧比は EMT のゲインに影響し、キャパシタンスは EMT の線形性に影響する。EMT のゲインは全てのダイノードの二次電子放出比の積 (式 (5.1)[23]) である。

$$G = \delta_{e,1} \times \delta_{e,2} \times \dots \times \delta_{e,n} = \prod_{i=1}^n \delta_{e,i}. \quad (5.1)$$

PMT の場合、二次電子放出比  $\delta$  はダイノード間の電圧  $E$  の関数であり、次の式で表される。[28]

$$\delta = a \times E^k \quad (5.2)$$

ここで  $a$  は定数である。 $k$  は電極の構造, 材質で決まり、およそ 0.7–0.8 の値をとる。

表 5.1: 各世代のブリーダー回路と使用年。

世代	ブリーダー回路	使用年
第 1 世代	C3	2017 年
第 2 世代	C4	2017 年
第 3 世代	normal	2018 年
	typeA	2018 年
第 4 世代	Y001	2019 年–2021 年
第 5 世代	Y003	2023 年

表 5.2: 各世代のブリーダー回路の配分電圧比。

ダイノード区間	normal	typeA
	C3, C4	Y001, Y003
配分電圧比		
K-Dy1	1.0	1.3
Dy1-Dy2	1.0	1.3
Dy2-Dy3	1.0	1.0
Dy3-Dy4	1.0	1.0
Dy4-Dy5	1.0	1.0
Dy5-Dy6	1.0	1.0
Dy6-Dy7	1.0	1.0
Dy7-Dy8	1.0	1.0
Dy8-Dy9	1.0	1.3
Dy9-Dy10	1.0	3.3
Dy10-GND	1.0	0.5

表 5.3: 各世代のブリーダー回路のキャパシタンス [23].

	C3	C4 normal	typeA Y001, Y003
	キャパシタンス (nF)		
C1	-	-	-
C2	-	-	-
C3	-	-	-
C4	-	-	-
C5	-	-	-
C6	-	100	-
C7	-	100	10
C8	10	100	10
C9	10	330	10
C10	10	330	330
C11	15	330	330

## 5.2 EMT の先行研究

EMT をミュオンモニターとして利用するためには、MUMON の要求を満たす測定精度を持っていることに加えて、将来強度のミュオンフラックスに対して放射線耐性が十分に高いことと線形性を保っていることが重要である。前者については EMT を MUMON に設置し、実際のミュオンビームの測定を通して、EMT の研究が行われた。後者については将来強度の放射線量を確保するために東北大学光理学研究センター (ELPH: research center for ELelectron PHoton science) の電子線形加速器を用いて、EMT の研究が行われた。

### 5.2.1 J-PARC ミュオンビームテスト

J-PARC での測定は 2017 年–2021 年の間に MUMON に到来するミュオンを用いて行われた。MUMON の下流側外壁のミュオンビーム中心にアルミ板を固定し、その周囲 50 cm に EMT を設置した。各ランにおける EMT の設置位置を図 5.4 と図 5.5, 図 5.6 に示す。

アルミ板に取り付けられた EMT の構造を図 5.7 に示す。EMT は治具のソケットにブリーダー回路のピンを挿しその上に EMT を取り付けている。ブリーダー回路のピンには信号ケーブルと高電圧 (HV) ケーブルが半田で繋がれている。ミュオンビームの測定時は、アルミの箱 (シャシー) の蓋を閉め、MUMON の構造物から生じる二次電子を遮断している。EMT の信号は Si や IC と同様に地上の MUMON-hut にある FADC に送信される。EMT のチャンネルは Si か IC の空きチャンネルに接続されているため、信号解析時にはどちらかのエレキキャリブレーションの結果が使用される。また IC のデータ取得システムには 5 倍の増幅器が繋がれているため、IC のチャンネルにつないだ EMT の信号は 5 倍に増幅されて FADC に送信される。EMT の生波形以外のデータはキャリブレーションコンスタントによってならされる、解析時にアンプを考慮する必要はないが、EMT の生波形についての議論をする場合は 5 倍された信号が出力されていることを考慮しなくてはならない。

J-PARC では EMT の信号強度や線形性、安定性などを測定し、Si や IC と比較することで MUMON の検出器としての要求を満たしているかテストされた。



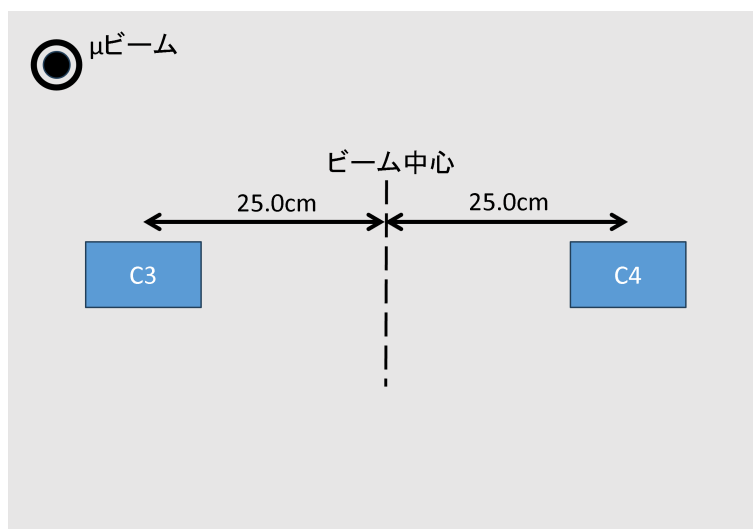


図 5.4: 2017 年, T2K run8 の MUMON 外部 EMT の配置図.

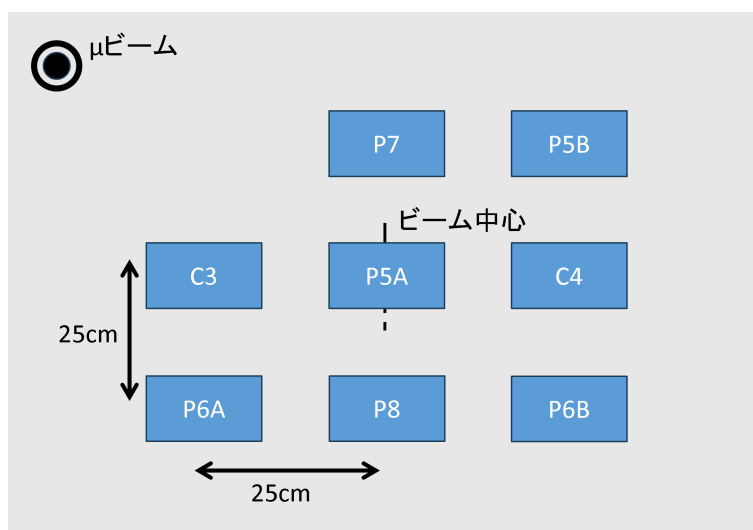


図 5.5: 2018 年, T2K run9 の MUMON 外部 EMT の配置図.

### 5.2.2 ELPH 電子ビームテスト

ELPH で電子ビームを用いた研究は 2019 年から 2022 年に 4 回行われた。電子ビームテストの主な目的は、J-PARC で測定が困難な EMT の放射線耐性と将来強度までの線形性である。第 1 回と第 2 回のビームテストで EMT が Si よりも放射線耐性の高い検出器であることが実証され、第 3 回には EMT の放射線耐性の限界を測定した。他にも各回の実験を通して、EMT の放射線劣化の原因、初期不安定性などが調査された。

電子ビームテストは ELPH の本体室 (図 5.8) にある入射用線形加速器を用いて行われた。入射用線形加速器は最大 90 MeV の電子を周期 7 Hz で打ち出す構造で、ビームテストでは高強度 (20 nC) と低強度 ( $\sim 1$  pC) の電子ビームが用いられ、それぞれ EMT の放射線劣化と信号確認に使われた。

実験のセットアップは各回のビームテストによって異なるが、ビーム強度を測る CT、ビームプロファイルを測る OTR と Siarray、低強度ビームを測る Si の検出器が用いられた。これらの検出器群はビーム軸に対して 4 列の構造

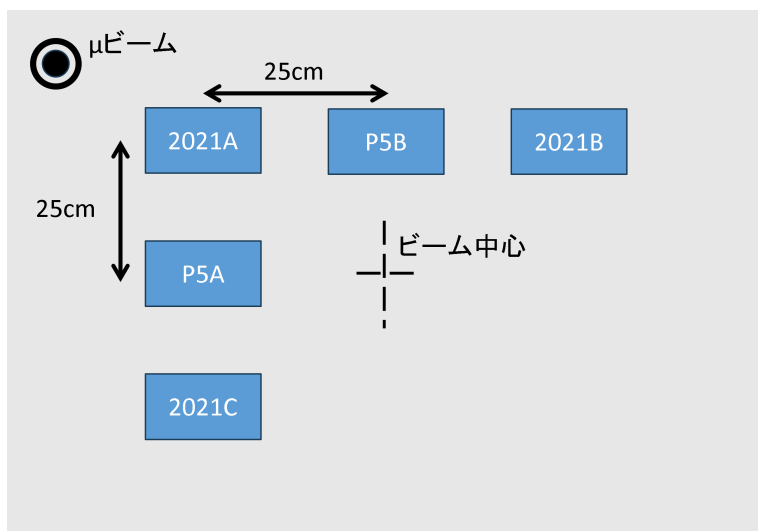


図 5.6: 2021 年, T2K run11 の MUMON 外部 EMT の配置図.

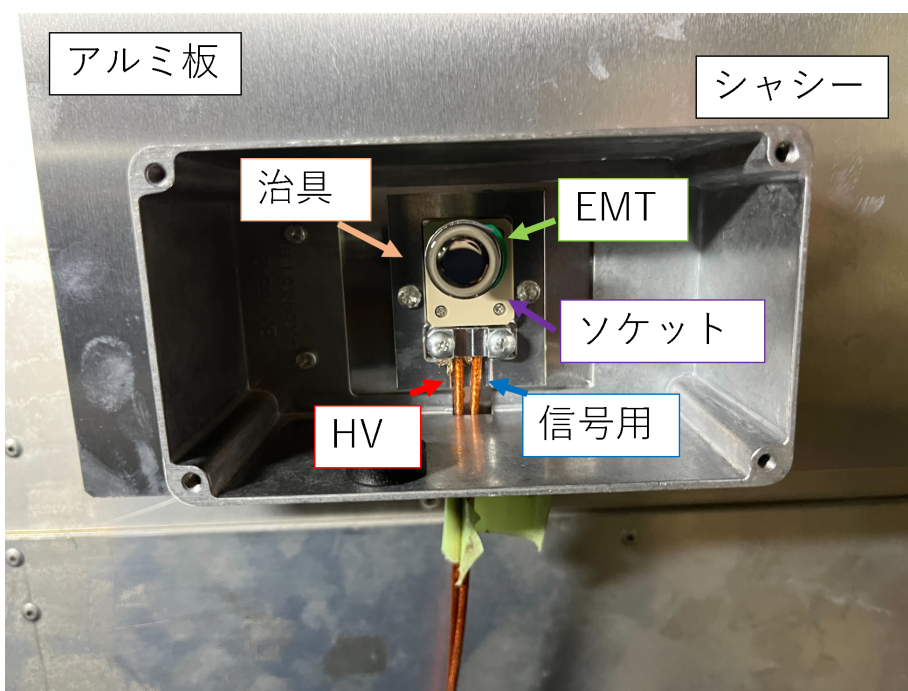


図 5.7: EMT のセットアップの写真. HV ケーブルと信号ケーブルは, それぞれブリーダー回路のカソードとアノードに繋がっている.

で配置されており, 上流から,

- CT, OTR: 高強度のビーム強度モニター, 低-高強度のビームプロファイルモニター,
- Si: EMT と信号を比較するための参照用 SiPIN フォトダイオード,
- Siarray, Si: 低強度のビーム強度モニターとビームプロファイルモニター.

と並んでいる. EMT は最下流の 4 列目に設置され, 各検出器を出し入れできるようにアクチュエータ上に乗せられている. 高強度照射の際は, Si の劣化や Siarray の故障を防ぐため, 半導体検出器はビームラインから外す必要が

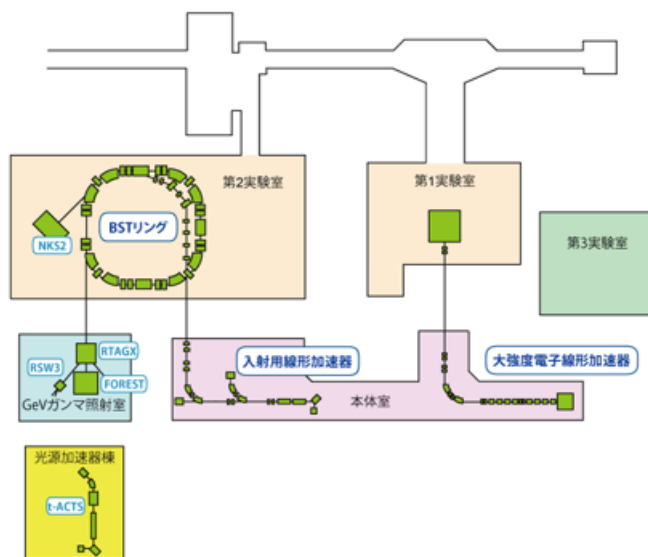


図 5.8: ELPH 研究施設の概要 [29]. 電子ビームテストは第 2 実験室への入射用ラインの 1 つ手前にあるエリアで行った.

ある. 低強度と高強度の入れ替えの際の不定性を排除するために, 半導体検出器と EMT は全てアクチュエータに載せられており, 遠隔操作が可能になっている. セットアップの例を図 5.9 に示す. これは第 3 回ビームテストのセットアップであり, 各検出器には光を遮断するためのアルミ箔や黒ビニルが巻かれている.

ELPH 電子ビームテストで測定した EMT の性能について, 次の節で述べる.

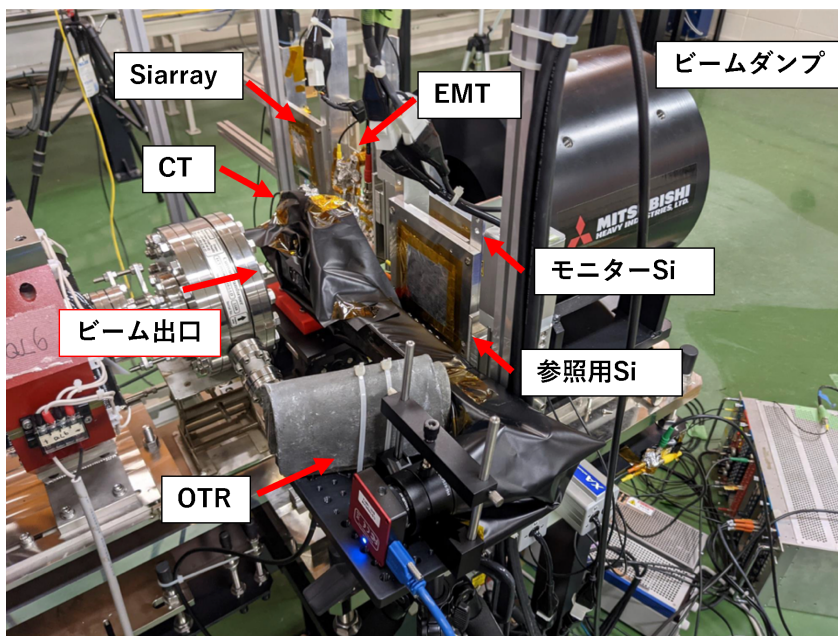


図 5.9: 第 3 回電子ビームテストのセットアップの写真.

### 5.3 EMT の放射線耐性

放射線耐性は MUMON の新検出器として重要な指標であり、信号収量が J-PARC のビームアップグレード後の放射線量に対し 100 日以上安定していることが求められる。EMT はその構造から半導体検出器である Si より、優れた放射線耐性を持つことが予想されていた。

電子ビームテストによる EMT の放射線耐性の測定結果を図 5.10 に示す。ここで、横軸は CT が測定した総電荷量とそれを J-PARC の将来強度の照射日数に置き換えたものを示す。縦軸は EMT と参照用 Si の電荷量の比を示し、照射開始日が 1 になるように規格化している。各プロット点は低強度電子ビームを当てた時の EMT の信号を示す。

EMT は将来強度の T2K ビーム換算で 100 日間の照射で約 3% の低下することがわかった。MUMON の要求はニュートリノビーム強度を 3% の精度で測定できることであるため、EMT は最低でも 100 日間使用可能である。これは Si と比べると十分な放射線耐性を持っていることを示し、MUMON の利用において有望である結果となった。また、Si と比べても 100 日間の照射以降の放射線劣化がゆるやかであり、信号の較正を行うことでより長期間 EMT が使用可能だと考えられている。

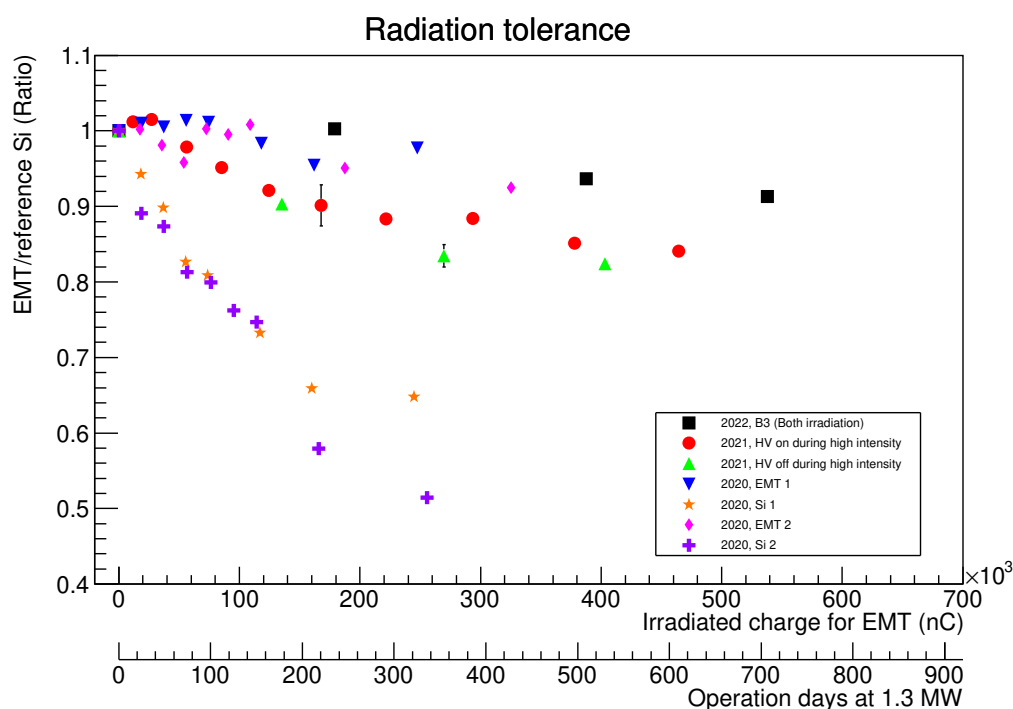


図 5.10: EMT と Si の放射線劣化の測定結果。プロットの色は各回の電子ビームテストとそれぞれの検出器を示す。

#### 5.3.1 EMT の放射線劣化

電子ビームテストによって EMT の放射線劣化の原因について調査された。EMT の放射線劣化の原因として考えられている項目を以下に示す。

- プリーダー回路の放射線劣化,
- ダイノードの放射線劣化,
- アルミ蒸着したカソードの放射線劣化,

- ダイノードの材料であるアルカリ金属とアンチモンの放射線劣化.

ブリーダー回路の劣化の測定は、高強度ビームによって放射線劣化させた EMT とブリーダー回路を用意し、それぞれを劣化させていないものと組み合わせて信号を確認することで行われた。結果は EMT 本体に照射した組み合わせの信号のみが小さくなったため、ブリーダー回路への放射線照射は劣化の原因ではなく EMT 本体の構造に劣化の原因があるとわかった [30].

ダイノードの劣化の測定は、高強度ビーム照射時に EMT の HV を ON にしたものと OFF にしたものを用意し EMT の信号を確認した。結果はどちらの信号も同様の比で低下したため、EMT のダイノードの劣化は放射線劣化の原因ではないことがわかった [30].

カソードの劣化の測定は、カソードと 1 段目のダイノード間をショートさせた改造ブリーダー回路と通常のブリーダー回路を用いて行った。改造ブリーダー回路を使用した EMT は、カソードで生成した二次電子を増幅しないため、カソード由来の信号をほとんど無視できる。改造ブリーダー回路を使用した EMT と通常ブリーダー回路を使用した EMT の信号を確認することでカソードの劣化について測定した。結果はブリーダー回路の種類に関わらず信号の劣化が確認されたため、EMT のカソードの劣化は放射線劣化の原因ではないことがわかった [31].

これまでに行われた ELPH 電子ビームテストでは、放射線劣化の要因が EMT の本体の構造にあることがわかったがその原因までは特定することができなかった。したがって EMT のダイノード材料のアルカリ金属とアンチモンの劣化である可能性が高いとされている。しかしアルカリ金属とアンチモンを取り除いた EMT では図 5.11 のように、ゲインが低下し MUMON での使用に向かない結果がわかっている。

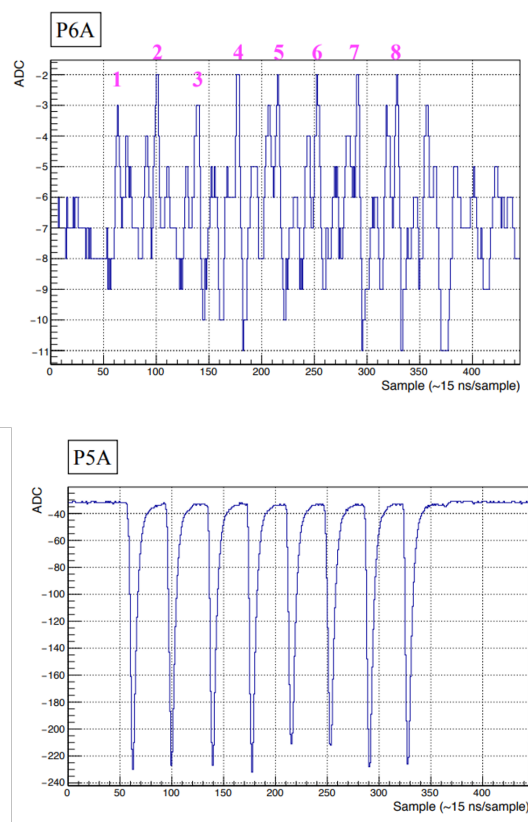


図 5.11: J-PARC ミューオンビームテストで測定された EMTP6A と EMTP5A の波形. EMTP6A の EMT はダイノード材料にアルカリ金属とアンチモンを使用していない.

## 5.4 EMT の線形性

MUMON で運用する検出器の線形性は T2K のビーム強度 0 W-1.3 MW 以上の範囲まで保たれている必要がある。J-PARC の測定では、約 500 kW (260 protons/spill) の強度までのデータが取られており、EMT の線形性が保たれていることがわかってきた。2017 年の測定、EMTC3 (第 1 世代) では EMT の HV が上がると高強度の信号収量が図 5.12 のように低下し、線形性を保てないことがわかった。これを受けて、ブリーダー回路のキャパシタンスを改良した EMTC4 (第 2 世代) を開発し、信号収量の低下は図 5.13 のように改善された。

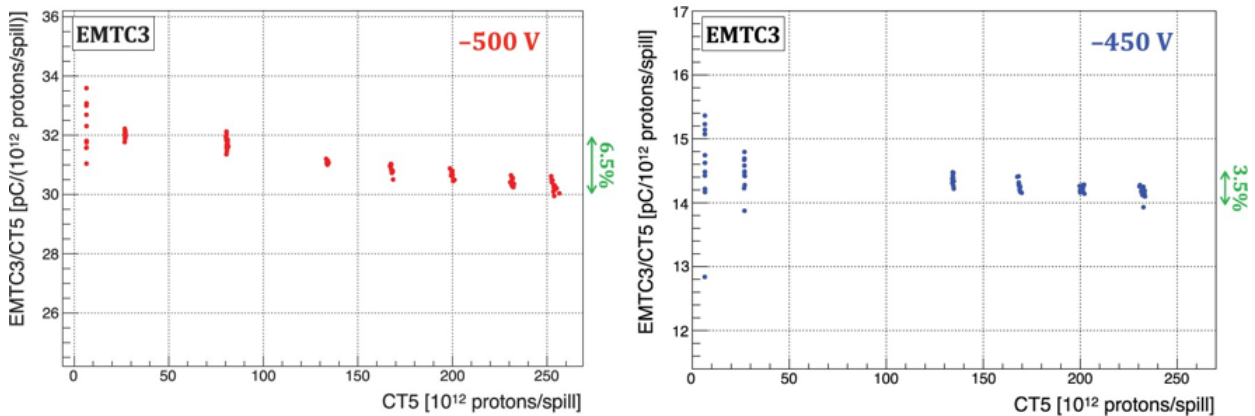


図 5.12: EMTC3 のビーム強度スキャンの結果. 左図は-500 V 印加時の結果である. 右図は-450 V 印加時の結果である. [23]

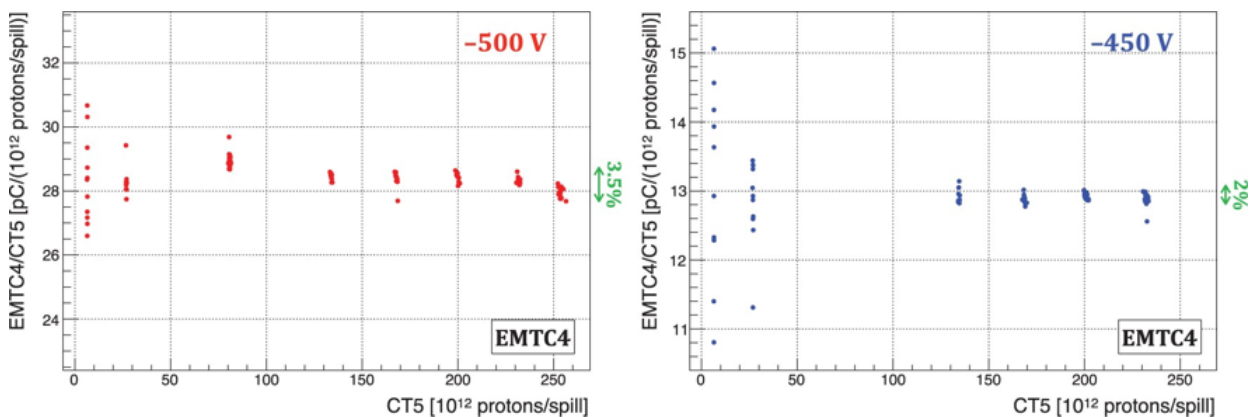


図 5.13: EMTC4 のビーム強度スキャンの結果. 左図は-500 V 印加時の結果である. 右図は-450 V 印加時の結果である. [23]

しかし、高強度での線形性を保てない課題が残っていたためさらなる改良の末、第 3 世代 typeA のブリーダー回路が開発された。以降は、将来強度のミュオンフラックスでも線形性を保つことができるか調査するため、ELPH 電子ビームテストで第 3 世代以降のブリーダー回路と EMT を用いた実験が行われた。図 5.14 に線形性の測定結果を示す。図中に描かれた点線は、それぞれ J-PARC で 500 kW と 1.3 MW でミュオンを照射した時の 1 バンチあたりの EMT の電荷量である。この電荷量の計算式を以下に示す。

$$Q = \phi_{\mu} \times e \times S_{emt} \times \frac{1}{8} \quad (5.3)$$

ここで、各ビーム強度のミュオンフラックス  $\phi_\mu$  は表 3.2 を用いた。  $S_{\text{emt}}$  は EMT のダイノードの有感領域、  $e$  は素電荷である。

式 (5.3) を用いて、500 kW と 1.3 MW の時の 1 バンチ当たりの EMT の電荷量は 0.45 nC と 0.96 nC である。したがって、EMT は J-PARC のこれまでのビーム強度と将来のビーム強度まで十分な線形性を保っていることがわかった。

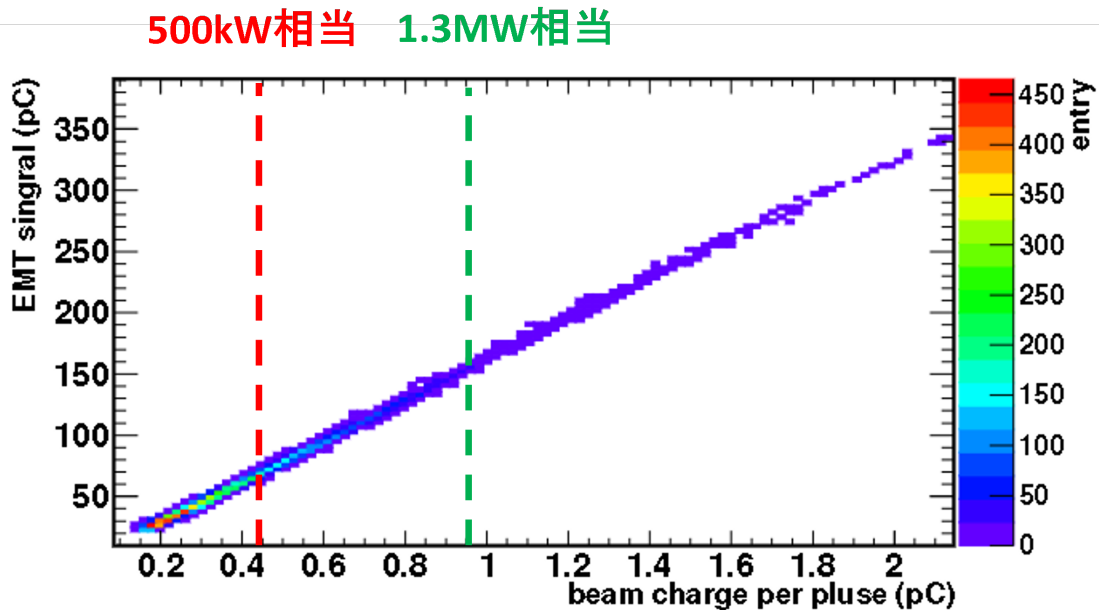


図 5.14: ELPH 電子ビームテストの線形性測定の結果。横軸は Si の 1 パルスあたりの電荷量を示す。縦軸は EMT の 1 パルスあたりの電荷量を示す。

## 5.5 EMT の信号安定性

MUMON の検出器は T2K 実験において安定した稼働が要求されており、ニュートリノビーム強度を約 3% 以下の精度でモニターし続ける必要がある。

2017 年の J-PARC で測定された EMT の信号収量の変化を図 5.15 に示す。測定開始から 1, 2 週間かけて信号収量が 2% ほど低下した後、信号収量は  $\pm 1\%$  以内で安定していた。

2021 年のデータを図 5.16 に示す。測定開始から 1 週間で 2.4% ほどの信号収量の低下が見え、3 週間後のビーム運転再開時にも同様の信号収量の低下が見えた。これらの測定開始直後の信号収量の低下を EMT の初期不安定性と呼ぶ。

EMT の初期不安定性の原因として考えられているものは、EMT のウォームアップと MUMON-pit エリアの温度変化である。ここでいうウォームアップとは、PMT の性質としてよく知られているダイノード材料に使用されているアルカリ金属とアンチモンの安定化のことである。PMT のように光照射によるウォームアップが EMT にも要求されるが、EMT のカソードはアルミ蒸着されているためウォームアップには数 mC の電荷が必要と考えられている。2017 年の先行研究では、EMT の信号収量が低下し続けた期間の総陽子数から EMT のウォームアップに必要な電荷量が算出されており、図 5.15 の PeriodI の期間の場合は約 2.0 mC である [23]。

先行研究では EMT を MUMON 外部に設置していたため、ビーム運転中の温度変化の影響を避けられなかった。

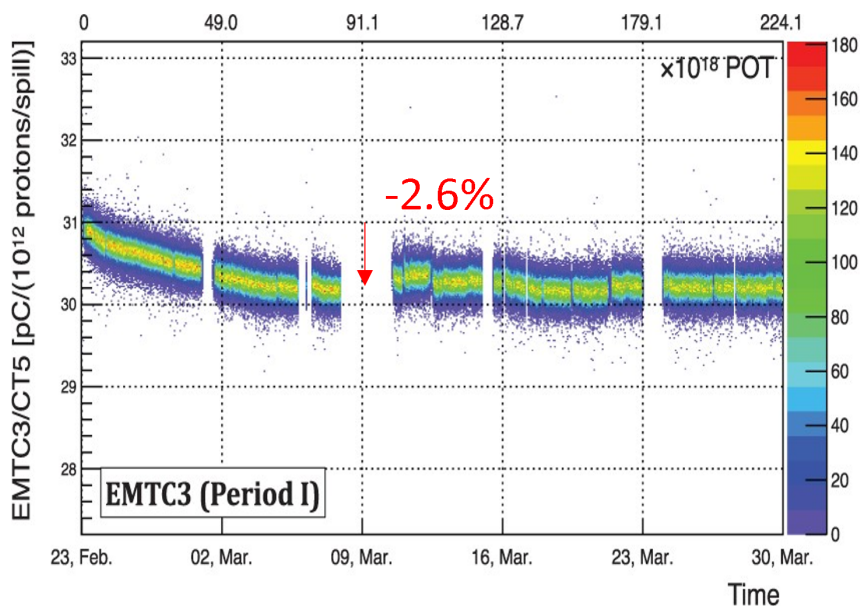


図 5.15: EMT C3 の信号収量と時間関数のプロット (2017、Run8). [23]

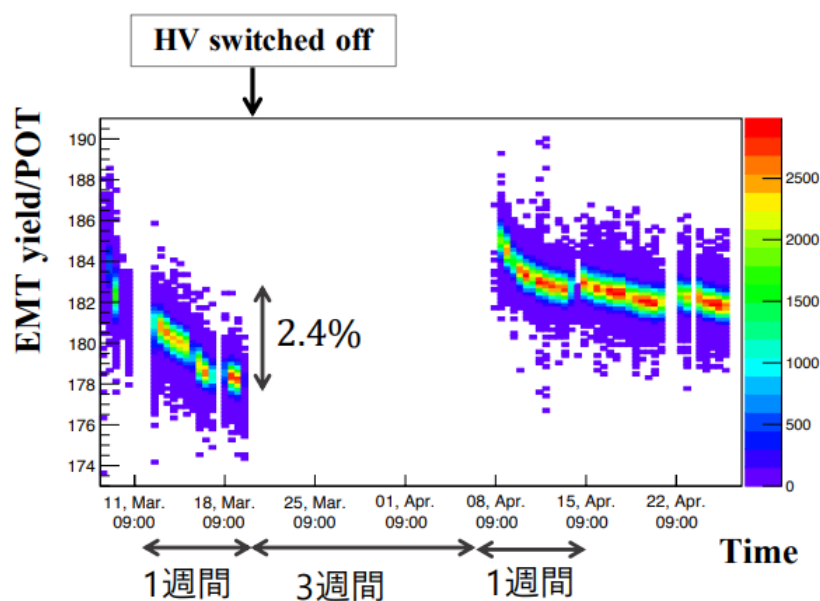


図 5.16: EMT P5B の信号収量と時間関数のプロット (2021、Run11). EMT P5B のブリーダー回路は typeA である. [30]

つまり、これまでの測定データには MUMON-pit エリアの気温の変化が EMT の信号に影響を与えていた可能性がある。EMT の周囲の温度と EMT の信号への影響について、ELPH 電子ビームテストで調査された結果を以下の節にまとめる。



### 5.5.1 EMT の温度依存性

MUMON 内部はヒーターによって温度がほぼ一定に保たれているが、MUMON 外部の EMT を取り付けている近くにはビームダンプの冷却水の排水パイプが設置されている。したがって、ビーム運転中は冷却排水の温度が上がるため、パイプの温度も上がり、EMT 付近の空気に熱が伝わる。このビーム運転中の排水パイプの温度変化は 4 °C 程度で、付近の気温は 0.5 °C 程度変化すると見込まれている。

ELPH 電子ビームテストでは EMT 周囲の温度を 20 °C  $\leftrightarrow$  40 °C 変化させて、EMT の温度依存性を測定した。図 5.17 にその測定結果を示す。1 °C の変化に対し、EMT の信号収量が 0.6% 低下することがわかった。

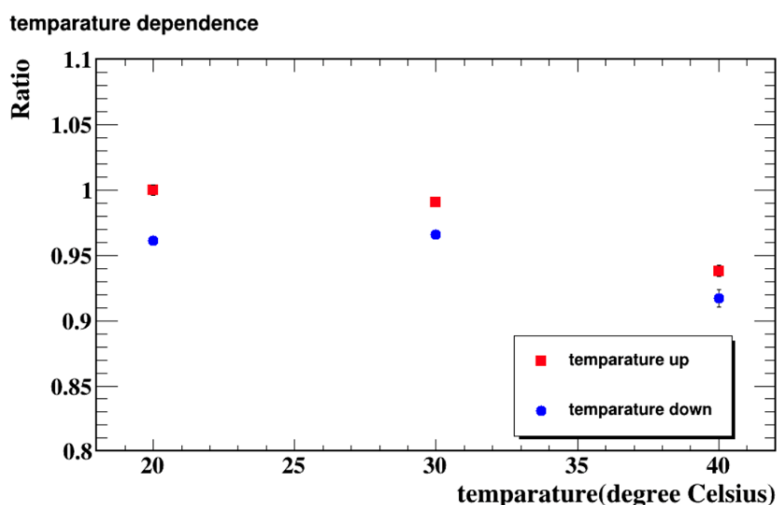


図 5.17: ELPH 電子ビームテストで測定された EMT の温度依存性. [31]

EMT の将来的な利用としては MUMON 内部の Si と入れ替えることを想定しているため、EMT の温度依存性は問題にならない。

### 5.5.2 その他の EMT の信号不安定性

EMT の初期不安定性の原因として有力とされているのが EMT のウォームアップであり、ビーム運転開始から 1, 2 週間で信号収量が約 2% 低下し続け、その後安定することがわかっている。一方で、先行研究の 2018 年の測定では図 5.18 のように 1 ヶ月間でおおよそ 15% も信号収量が下がり続ける現象が見られている。この現象は当時の EMTP5B のみで見られ、EMTP5A や EMTC4<sup>\*1</sup>では確認されなかったため、EMT の個体差が測定された可能性も考えられる。また、EMTP5B に似た挙動を示しているのは EMTP7 や EMTP8 の PMT であり、EMTP5B の設計時にアルミ蒸着などが上手くいっておらず、放射線劣化を起こしてしまったことも考えられる。

\*1 2018 年の測定では他にも EMTC3, EMTP6A, EMTP6B, EMTP7, EMTP8 が用いられた。EMTC3 は信号のエラーにより解析できなかった。EMTP6A と EMTP6B は EMT の二次電子増幅剤を除去したものでゲインが低く解析には使用できなかった。EMTP7, EMTP8 はカソードが光電面の PMT であり、信号がサチュレーションを起こす、空間電荷効果で後段のパンチのゲインが低い、など解析に適していない。

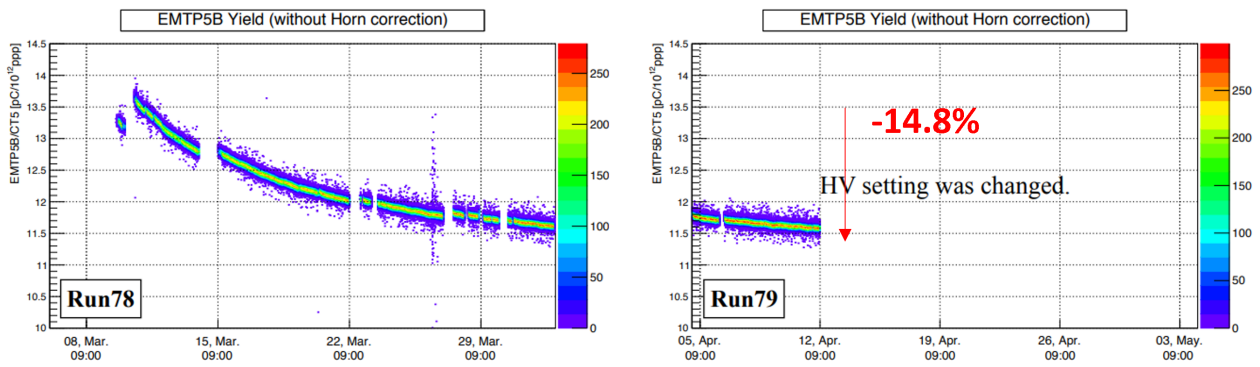


図 5.18: MRRun78, Run79 の EMTP5B/CT のヒストリープロット. without horn correction: ホーン電流の揺らぎによる補正は無視していることを示す.



## 第 6 章

# T2K Run12, Run13 EMT の測定

### 6.1 セットアップ

2023 年に行われた T2K Run12 と Run13 では MUMON 外部と内部それぞれに EMT を設置してミューオンを測定した。MUMON 内部に EMT を設置して実験が行われるのは T2K Run12 が初のビーム運転である。今回 MUMON 内部に取り付けた EMT は内部 EMT(EMT14, EMT24, EMT34, EMT44, EMT54, EMT64, EMT74) と呼び、MUMON 外部に設置した EMT は EMTwall(EMTwall1, EMTwall2) と呼ぶ。EMTwall の取り付けは先行研究と同様であり、図 6.1 の配置で取り付けられた。また、EMTwall の近くに温度計を設置している。

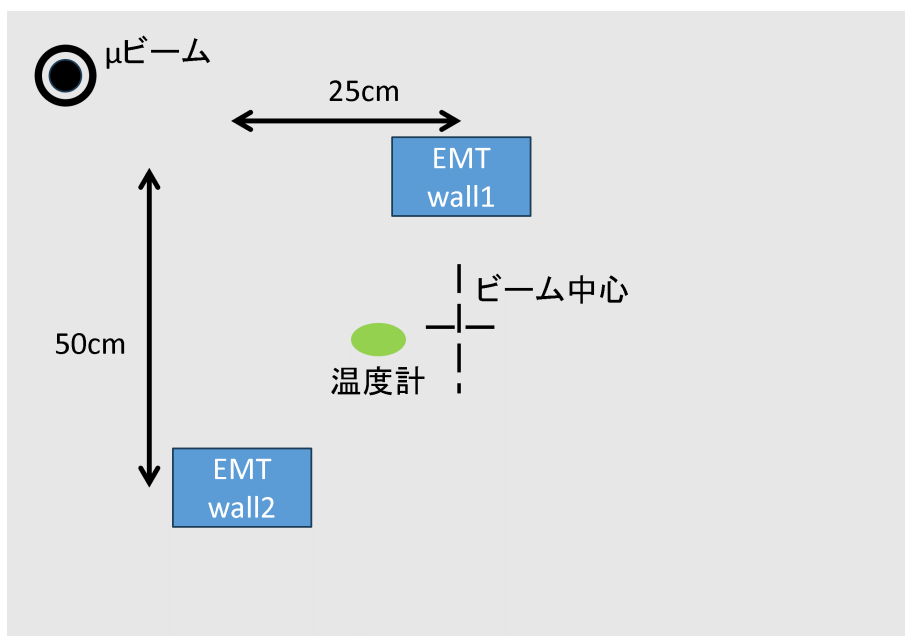


図 6.1: 2023 年, T2K Run12, Run13 の EMTwall の配置図.

内部 EMT(EMT14) の写真を図 6.2 に示す。Si の真上に取り付ける治具を新たに作成した。EMT の治具は EMTwall と同様のケーブルやソケットの構造を用いつつ、ref-si の可動ステージを妨げないように小型化したシャーシで覆うような構造に改造されている。内部 EMT は図 6.3 のように、MUMON の下から 4 列目の Si の真上に 7 個取り付けられた。取り付け後は EMT に LED 光を照射し、地上の MUMON-hut の信号ケーブルをオシロスコープにつないで波形の変化を確認した。波形の確認は地下で LED 照射し、地上のオシロでベースラインの変化を目視して、EMT の配線に問題がないことを確認した。その後のミューオン測定においても EMT の配線が原因とみられ

る問題は発生していない。

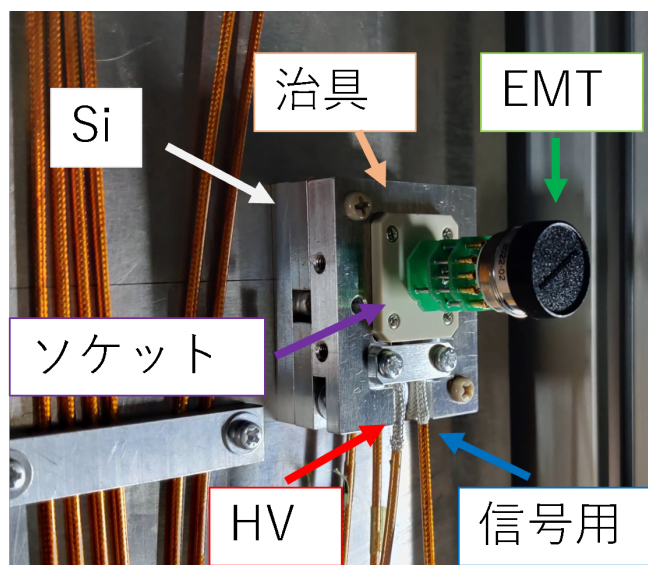


図 6.2: EMT14 のセットアップの写真. EMT の治具の真下に Si が設置されている。

本測定で用いた 9 個の EMT は新しく購入したものであり、-1000 V 耐圧の第 5 世代のプリーダー回路を組み合わせている。

EMT のデータ取得システムもこれまでと同様に MUMON の Si や IC の FADC を用いている。本測定では EMTwall は Si の空きチャンネル、MUMON 内部の EMT は IC の空きチャンネルに接続した。

本研究で用いた EMT のキャリブレーションコンスタントを表 6.1 に示す。MUMON 内部の EMT は ref-Si を用いた Si のセンサーキャリブレーションが可能だが、EMTwall はセンサーキャリブレーションができない。そのため EMTwall のキャリブレーションコンスタントはエレキキャリブレーションの較正值である。また、キャリブレーションを行ったときに EMT に印加していた電圧は-500 V である。

表 6.1: T2K Run13 の EMT のキャリブレーションコンスタント。

EMT#	較正值 (pC/ADCcount)
EMT14	0.02554
EMT24	0.02450
EMT34	0.02414
EMT44	0.03960
EMT54	0.03257
EMT64	0.03399
EMT74	0.03892
EMTwall1	0.15373
EMTwall2	0.15418

EMT の HV は地上の MUMON-hut にある電源 (図 6.4) から供給される。2023 年の T2K Run12 までは EMT に-500 V まで印加することが可能だった。2023 年 T2K Run13 からは地下パッチのケーブルコネクタの規格を



図 6.3: セットアップが完了した内部 EMT の写真. EMT の治具の上に小型のシャーシを被せている. 左から EMT74 → EMT14 の順番に取り付けられている.

BNC から SHV へ取り換え, EMT のブリーダー回路を-1000 V 耐圧に交換することで-1000 V の印加が可能になっている. 電源はつまみによる手動操作とイーサネットを利用した遠隔操作が可能である. それぞれの方法で電圧を調整した場合の電圧の再現性を表 6.2 と表 6.3 に示す. マルチメーターを用いて各項目で 3 回ずつ測定し, 3 回分の測定の標準偏差を誤差として表示している. 電源の全てのチャンネルにおいて, 遠隔操作で電圧を調整した場合の再現性が良いことがわかったため, MUMON における EMT の電源操作はイーサネットによる遠隔操作を採用している.

表 6.2: 電源 RPH-034 のつまみ操作による供給電圧の測定. UP は-500 V → -1 kV の操作. DOWN はその逆を示す.

channel	つまみ (manual)			
	-500 V UP	-1 kV UP	-500 V DOWN	-1 kV DOWN
1ch	-503.37 ± 0.20	-1002.87 ± 0.03	-503.52 ± 0.16	-1002.87 ± 0.03
2ch	-503.83 ± 0.13	-1002.60 ± 0	-504.16 ± 0.03	-1002.60 ± 0
3ch	-503.20 ± 0.02	-1002.30 ± 0.12	-503.35 ± 0.14	-1002.17 ± 0.10
4ch	-502.28 ± 0.05	-1001.20 ± 0.09	-502.52 ± 0	-1001.30 ± 0.12



図 6.4: J-PARC の測定で使用した EMT の電源. NIM ラックに取り付けられている赤いモジュールが EMT の電源である. 今回用いたのは左から 2 つ目のモジュールで林レピック社の RPH-034 である.

表 6.3: 電源 RPH-034 の Ethernet 操作による供給電圧の測定. UP は-500 V→-1 kV の操作. DOWN はその逆を示す.

channel	Ethernet			
	-500 V UP	-1 kV UP	-500 V DOWN	-1 kV DOWN
1ch	-502.60 ± 0	-1001.10 ± 0	-502.59 ± 0	-1001.10 ± 0
2ch	-503.19 ± 0	-1001.80 ± 0	-503.19 ± 0	-1001.80 ± 0
3ch	-503.88 ± 0	-1002.83 ± 0.03	-503.88 ± 0	-1002.90 ± 0
4ch	-503.59 ± 0	-1002.50 ± 0	-503.59 ± 0	-1002.50 ± 0

## 6.2 EMT の波形

EMT は MUMON の要求を満たすため T2K 実験で用いられるすべてのビームパワーでミュオンを 1 バンチずつ測定できなければならない. T2K Run12 の測定では地下のケーブルパネルの HV ケーブルのコネクタ耐圧が-500V だったため実際に EMT に掛けた電圧は-495 V である. 低強度のビームは 1 スピル 2 バンチの構造をしており, EMT の波形もその形状が測定されることを期待したが, ゲインが小さく図 6.5 のように十分な波形が測定できなかった.

T2K Run12 の終了後, 高電圧のコネクタを-1000 V 耐圧の SHV に交換し, EMT には-800 V の電圧を掛け<sup>\*1</sup>, 低強度のミュオンを測定した. 図 6.6 に測定結果を示す. 波形は T2K Run13 の期間で最もミュオンフラックスが小さいタイミングのラン (約 3 kW, 電磁ホーンオフ) である. 比較のため同スピルの Si の波形も示す. EMT の印加

<sup>\*1</sup> T2K Run13 開始時は EMT に-1 kV を印加していたが, Horn320 kA の低強度ビームでは EMT の最もゲインの高い個体の波形がサチュレーションを起こしたため, HV の見直しが行われ最終的に-800 V に決定された.

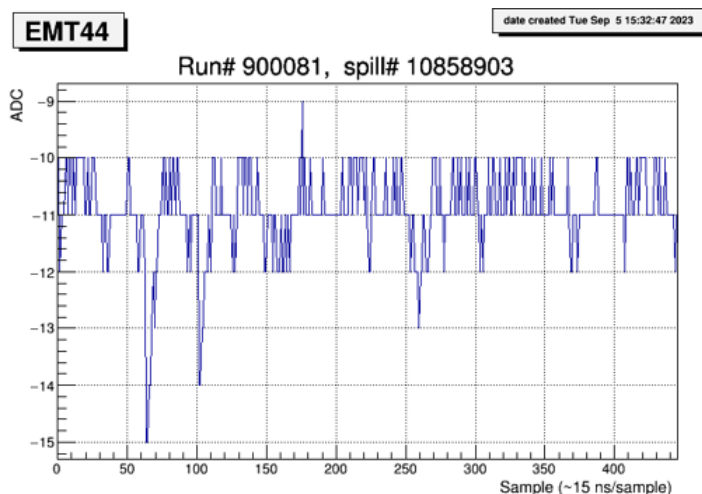


図 6.5: T2K Run12 で測定した 1.5 kW 程度の EMT の波形. 電磁ホーンは 0 A. EMT には -495 V, 5 倍のアンプがかかっている.

電圧の上限を改良した結果, 低強度ビームの波形測定に十分なゲインが確保できていることがわかった.

高強度ビーム運転では信号のサチュレーションを避けるため, ビーム強度ごとに EMT の波形を確認しながら EMT の HV を調整した. 表 6.4 に 1 時間以上のビーム運転時間があるラン番号とビーム強度, EMT の HV についてまとめる. このときの電磁ホーン電流は +320 kA である.

表 6.4: ビーム強度と EMT HV のビーム運転ランごとの一覧.

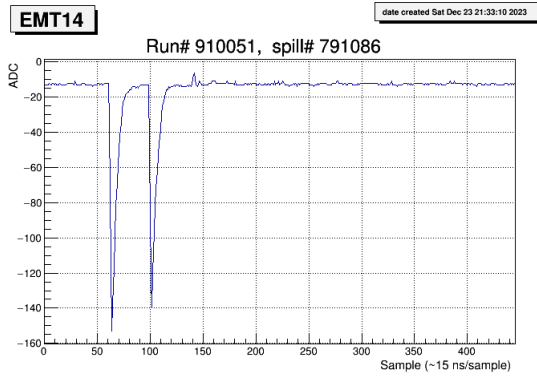
ラン番号	ビーム強度	EMT HV
910075–910076	250 kW(+320 kA)	-500 V
910085–910087	400 kW(+320 kA)	-500 V
910089–910099	550 kW(+320 kA)	-500 V
910102–910103	630 kW(+320 kA)	-500 V
910105–910274	600 kW(+320 kA)	-450 V
910277–910278	665 kW(+320 kA)	-450 V
910280–910304	710 kW(+320 kA)	-450 V
910306–910320	710 kW(+250 kA)	-450 V

ここで, 先行研究のミュオンフラックスを超えたビーム強度から 550 kW, 600 kW, 710 kW の信号波形を図 6.7–図 6.9 に示す. ここで, EMT の波形は多くのスピルの中から一つを取り出し, 図として表示している.

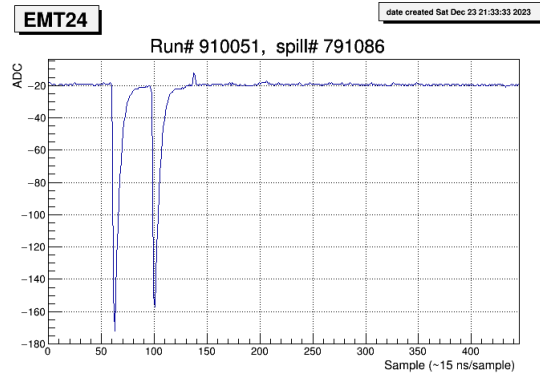
T2K Run11 より高強度のミュオンフラックス下でも, EMT はバンチごとの波形を測定できていることがわかる. しかし, Si の波形と比較すると後段のバンチの強度が低下している現象が発生している. これは, PMT の高いゲインがプリーダー回路のキャパシタンスの許容量を上回り, 飽和する現象に似ている. したがって, 今回の測定で設定した EMT の HV が大きいことを示唆している結果となった. またこの現象は EMT の個体によって異なるため EMT にはゲインの個体差があることが考えられ, 今後の測定では印加電圧ごとのゲインキャリブレーションが必要とされる.

得られた波形を 1 バンチずつ積分し, 積分値とキャリブレーションコンスタントの積を取ることで EMT の電荷

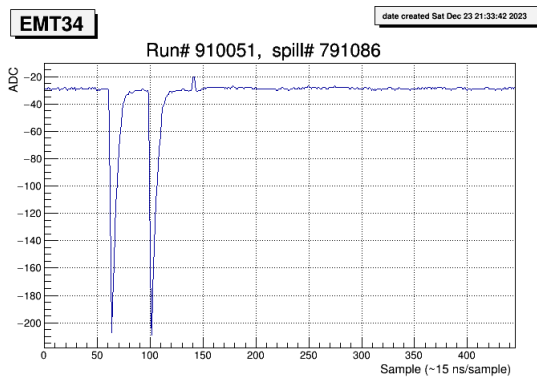




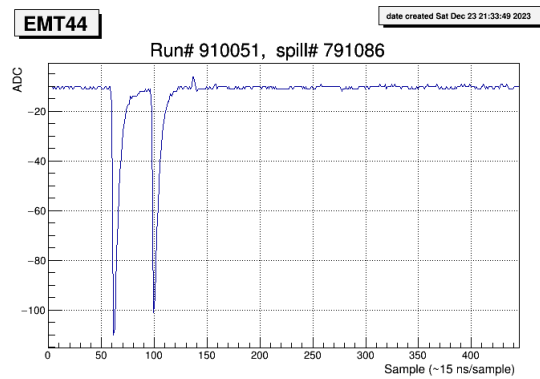
EMT14



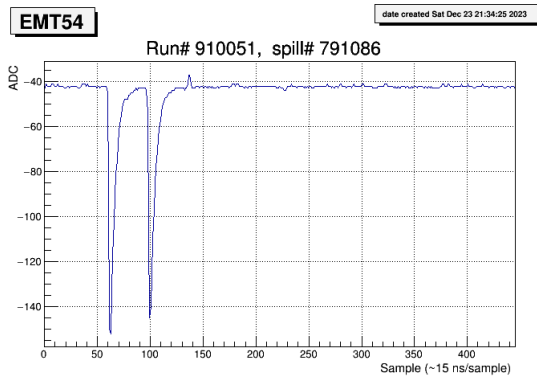
EMT24



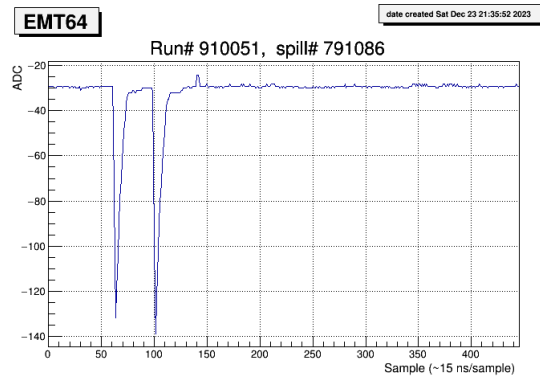
EMT34



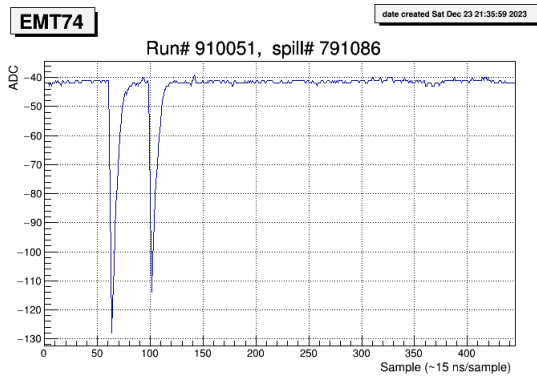
EMT44



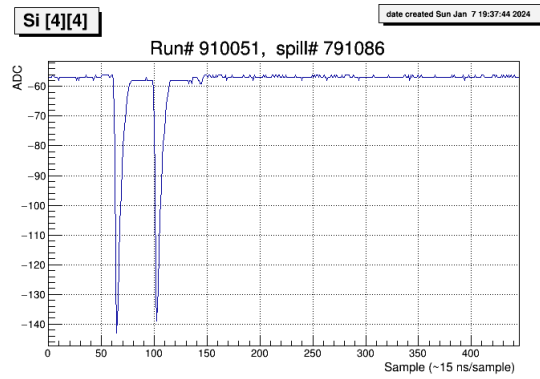
EMT54



EMT64

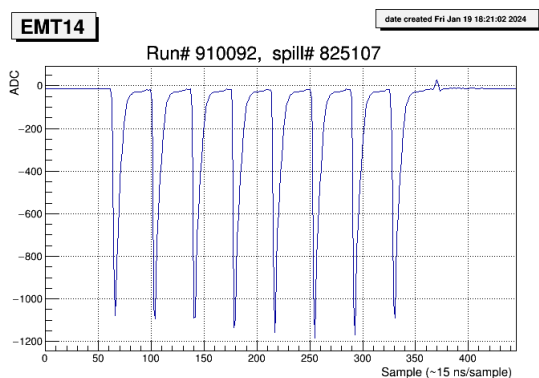


EMT74

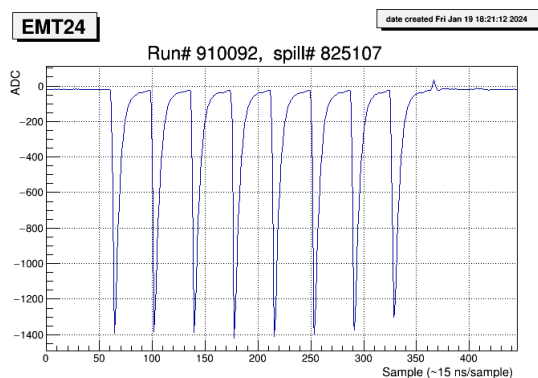


Si44

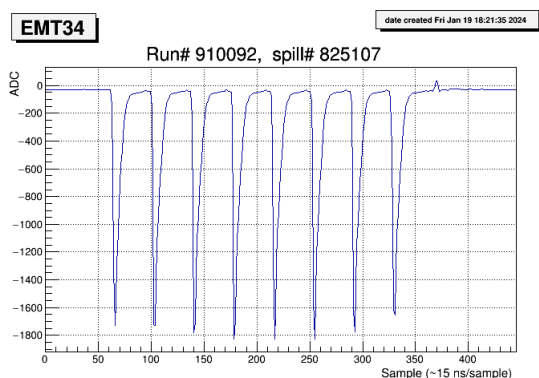
図 6.6: T2K Run13, physics run(1.5 kW, +320 kA) の EMT の波形. EMT には-800 V, 5 倍のアンプがかかっている. Si には-80 V, 0 dB のアッテネータがかかっている.



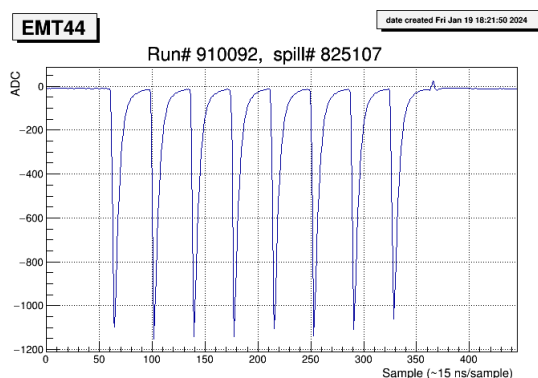
EMT14



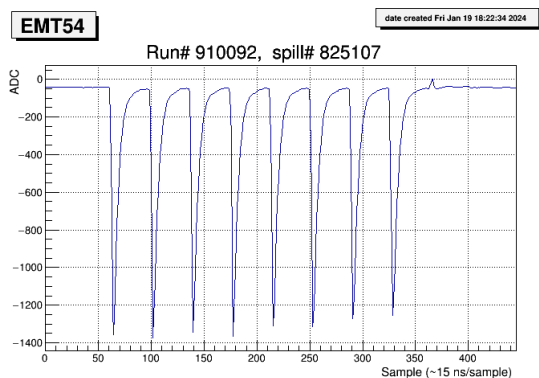
EMT24



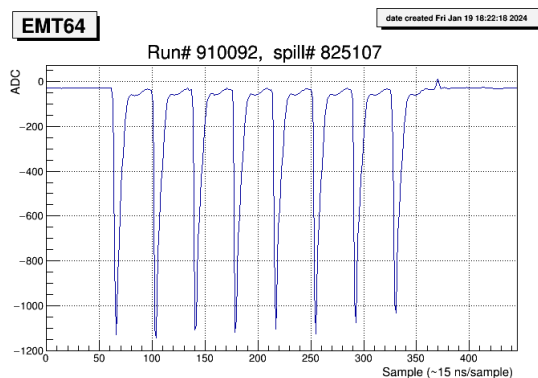
EMT34



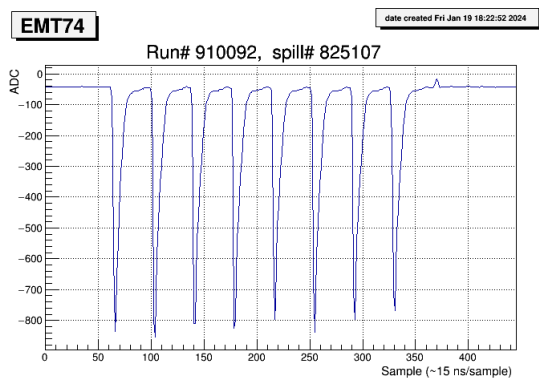
EMT44



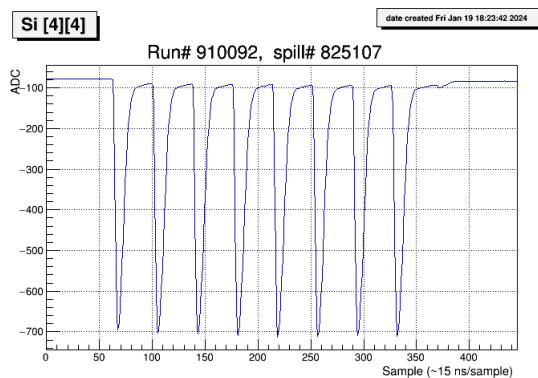
EMT54



EMT64

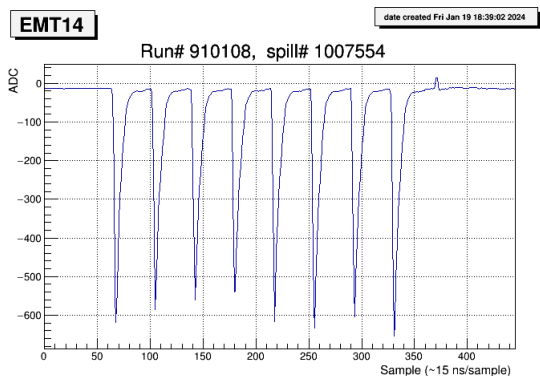


EMT74

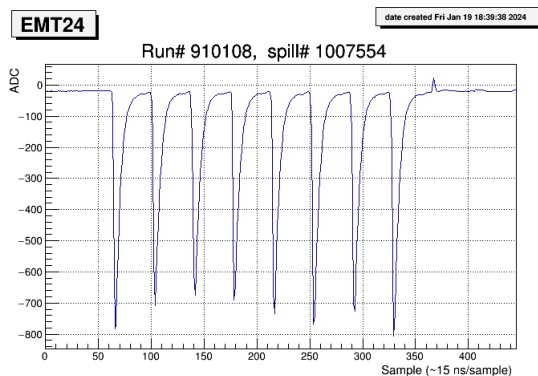


Si44

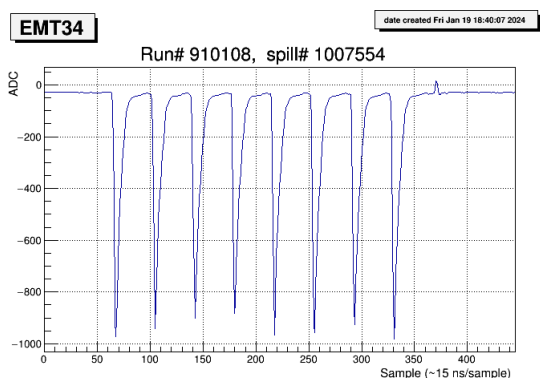
図 6.7: T2K Run13, physics run(550 W, +320 kA) の EMT の波形. EMT には -500 V, 5 倍のアンプがかかっている. Si には 80 V, 30 dB のアッテネータがかかっている.



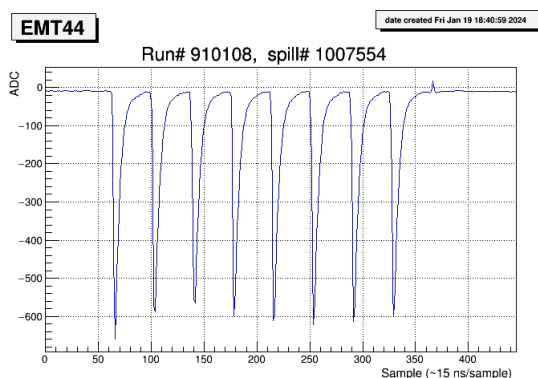
EMT14



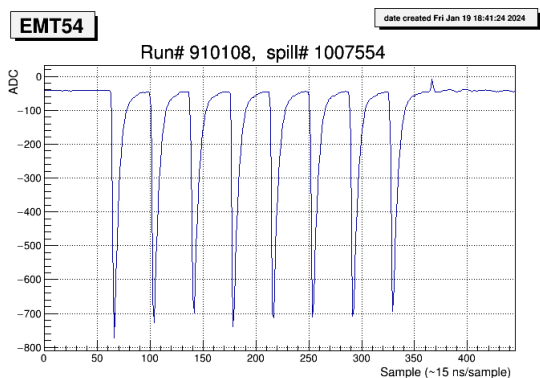
EMT24



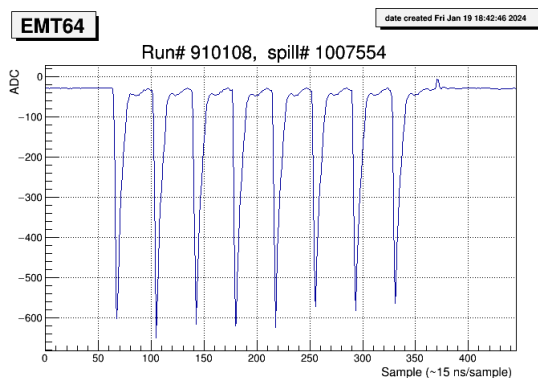
EMT34



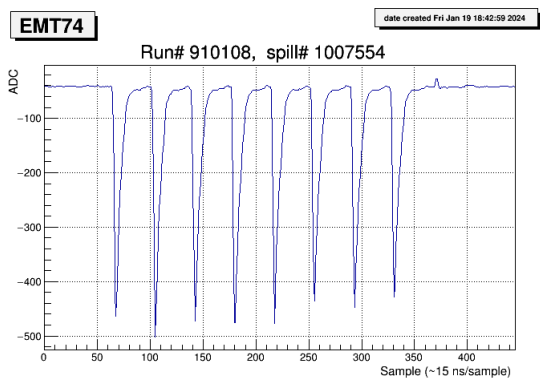
EMT44



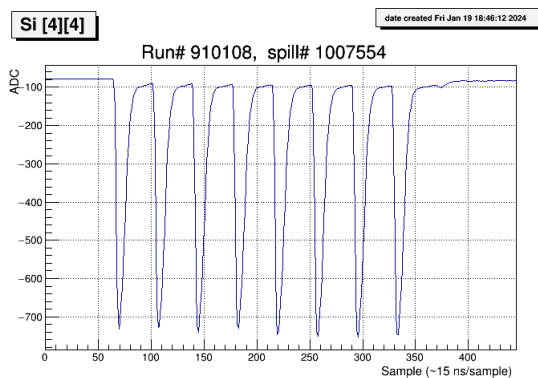
EMT54



EMT64



EMT74



Si44

図 6.8: T2K Run13, physics run(600 kW, +320 kA) の EMT の波形. EMT には-450 V, 5 倍のアンプがかかっている. Si には 80 V, 30 dB のアンプがかかっている.

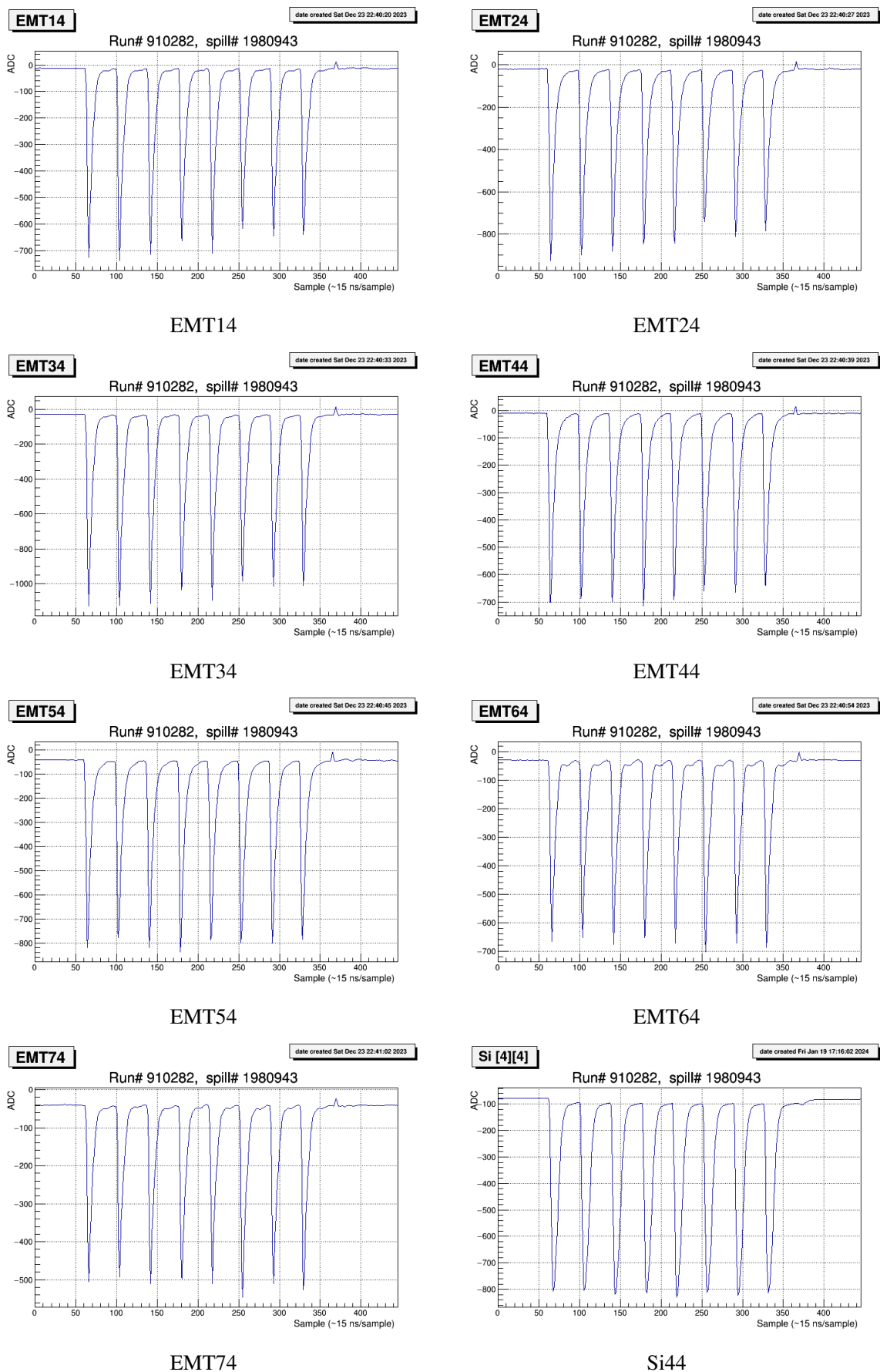


図 6.9: T2K Run13, physics run(710 kW, +320 kA) の EMT の波形. EMT には-450 V, 5 倍のアンプがかかっている. Si には 80 V, 30 dB のアッテネータがかかっている.

量を求めることができる。

### 6.3 EMT の一次元ミュオンプロファイル

MUMON 内部に設置した 7 個の EMT は、水平方向の一次元ミュオンプロファイルを測定するために横一列に配置された。波形と同様に、550 kW、600 kW、710 kW の各ビーム強度の 1 スピル当たりのミュオンプロファイルを図 6.10 に示す。

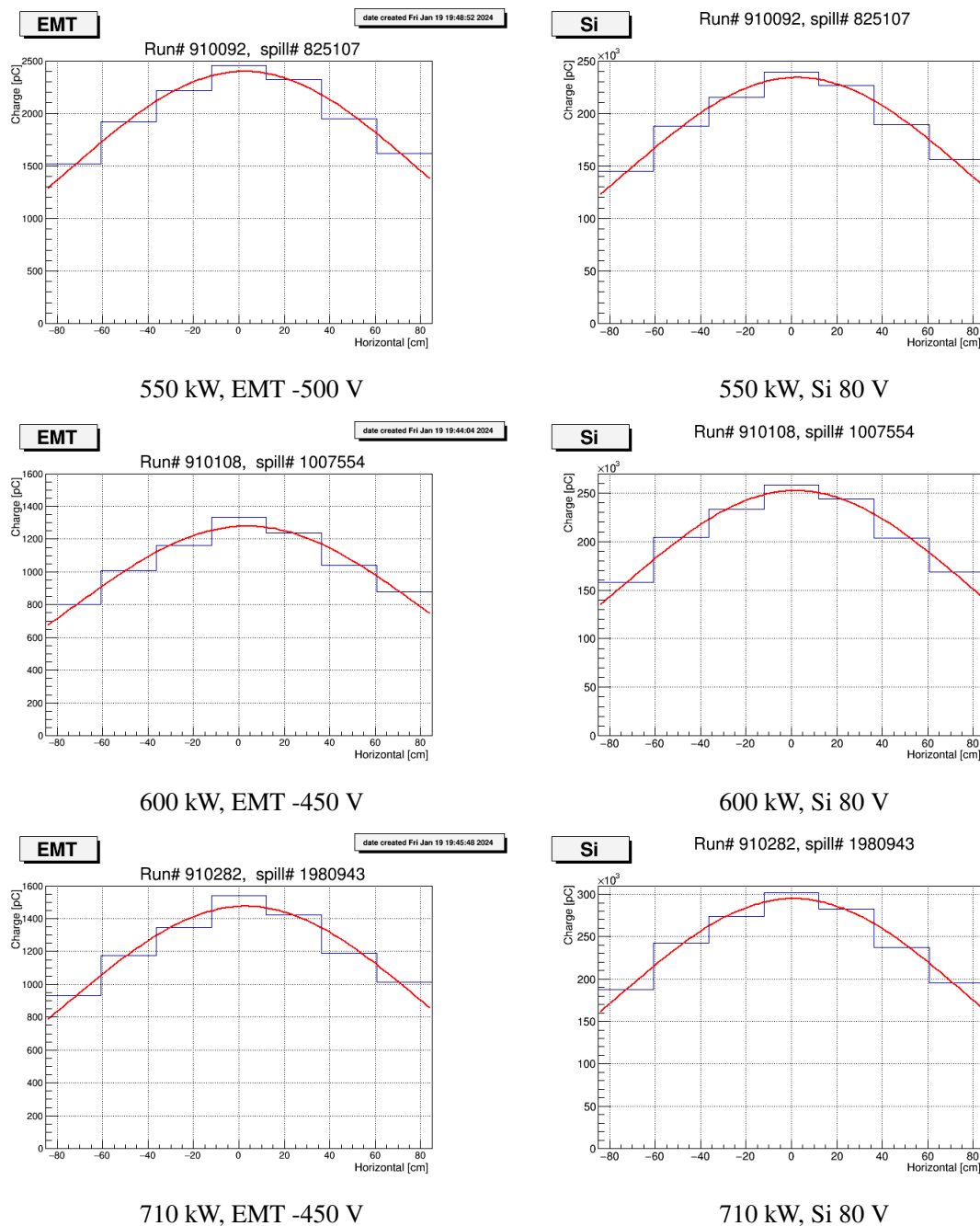


図 6.10: T2K Run13, 各強度 (550 kW, 600 kW, 710 kW) における EMT と Si のミュオンプロファイルの比較。

連続運転中のビームモニターとして MUMON は極めて重要な検出器だが、ビームスキャンなどのビームチューニング期間においてもビームコンディションを確認するモニターとして MUMON は低強度ビームプロファイルも必要とされている。これまでのビームスキャンのビーム強度は、1.5 kW–20 kW とその時のビームコンディションにより異なる。EMT はこの全ての範囲でミュオンプロファイルを取得する必要がある。

T2K Run13 では 3 kW 程度の低強度でビームスキャンが行われた。ここでビームスキャン中に陽子ビームの狙いが中心に設定されている時のデータからミュオンプロファイルを測定する。図 6.11 に、ビームスキャン中のミュオンプロファイルを示す。

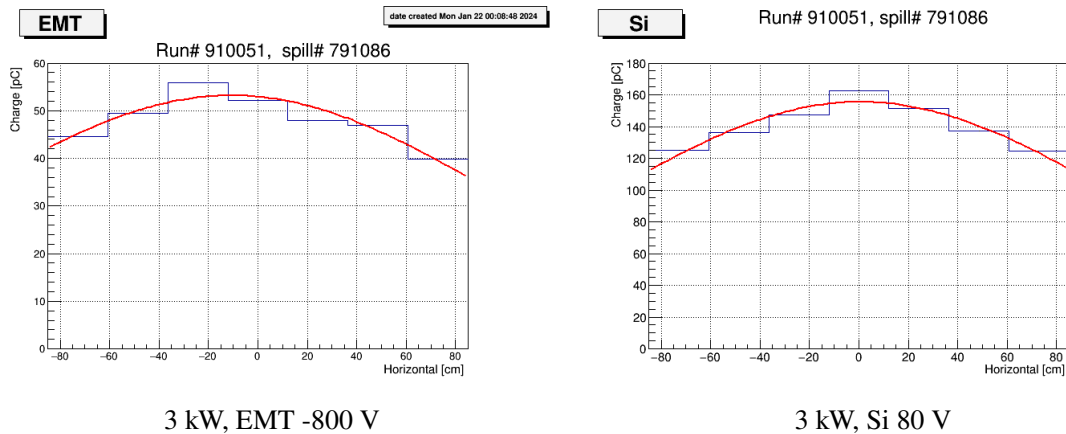


図 6.11: T2K Run13, 低強度 (3 kW) における EMT と Si のミュオンプロファイルの比較。

それぞれの図のフィット線は、取得したミュオンプロファイルをガウス関数でフィットした結果を描いている。フィット関数から取得した、ミュオンプロファイルの中心値の分布を図 6.12–図 6.15 に示す。ここで図 6.13 と図 6.14, 図 6.15 は約 2 万スピル, 低強度ビームは約 30 スピル分のビームプロファイルの分布を表している。

それぞれのヒストグラムの平均値とその誤差を表 6.5 にまとめる。低強度の分布は Si に比べて標準偏差が大きく不安定で、ビームモニターのアラートしきい値 ( $\pm 5$  cm) を大きく逸脱しているイベントも複数存在している。550 kW (EMT -500 V) の分布は、EMT と Si にずれは見られない。EMT はこの印加電圧の時にキャリブレーションを実行した。600 kW (EMT -450 V) 以上の分布は、EMT と Si に 2 cm 程度のずれが表れている。

低強度, 高強度の両方で EMT のゲインが要因となっているずれが発生しており、EMT のゲインの個体差は 1 度のキャリブレーションでは補正することができず、印加電圧ごとにキャリブレーションが必要だということを示唆している。

表 6.5: ミュオンプロファイルの中心値分布の平均値に関する表。誤差はヒストグラムの標準偏差である。

ビーム強度	Si(cm)	EMT(cm)
3 kW	$0.55298 \pm 0.82109$	$-8.02403 \pm 10.1114$
550 kW	$3.48929 \pm 0.90696$	$3.40653 \pm 0.91164$
600 kW	$2.35842 \pm 0.85691$	$3.92660 \pm 0.85427$
710 kW	$2.01907 \pm 0.82302$	$3.79714 \pm 0.81098$

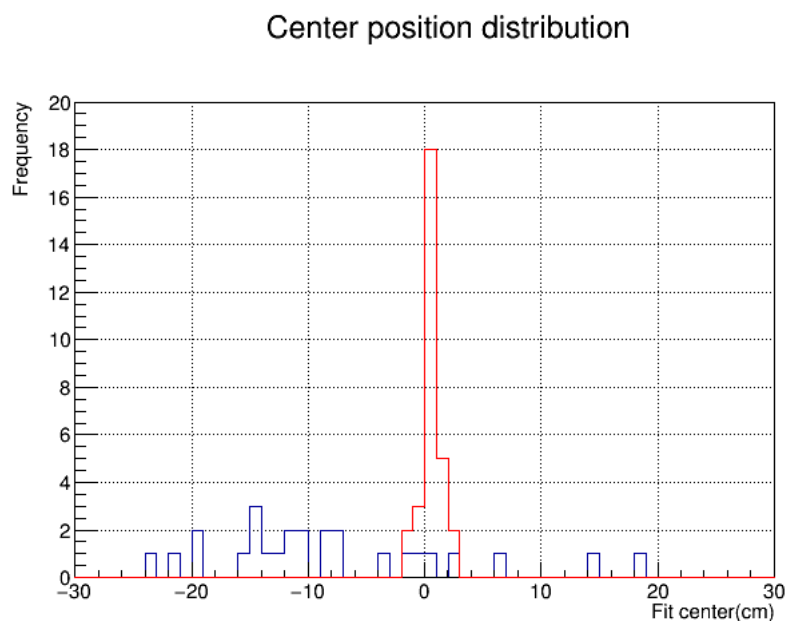


図 6.12: 3 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. 赤いヒストグラムが Si, 青いヒストグラムが EMT を示す. EMT には-800 V 印加している.

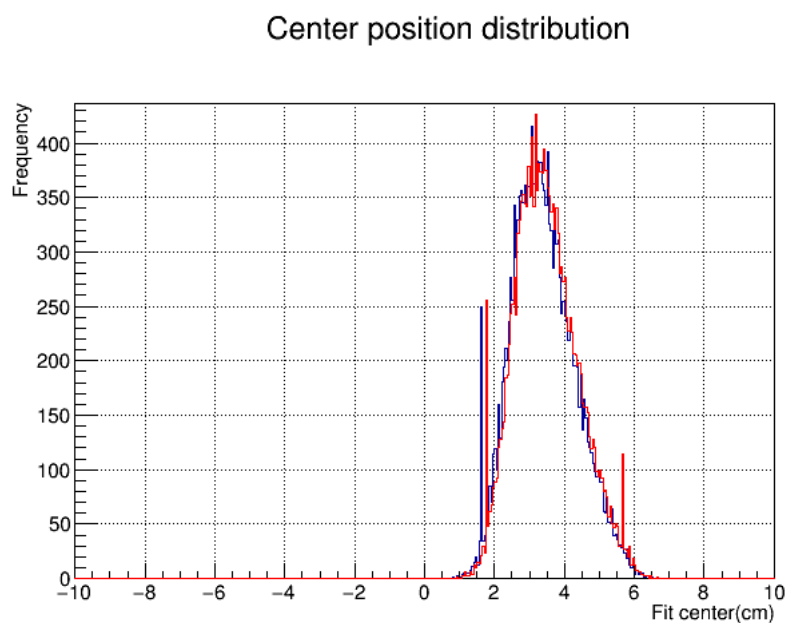


図 6.13: 550 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. 赤いヒストグラムが Si, 青いヒストグラムが EMT を示す. EMT には-500 V 印加している. 図中の Fit center が 1.5cm と 5.5cm の時に見えるスパイクはミュオンプロファイルの中心値の頻度が偏っていたことを示す. 1.5cm のスパイクは Si と同じスパイクが見えるが, 5.5cm のスパイクは EMT にしか見えていない. この原因は不明である.

Center position distribution

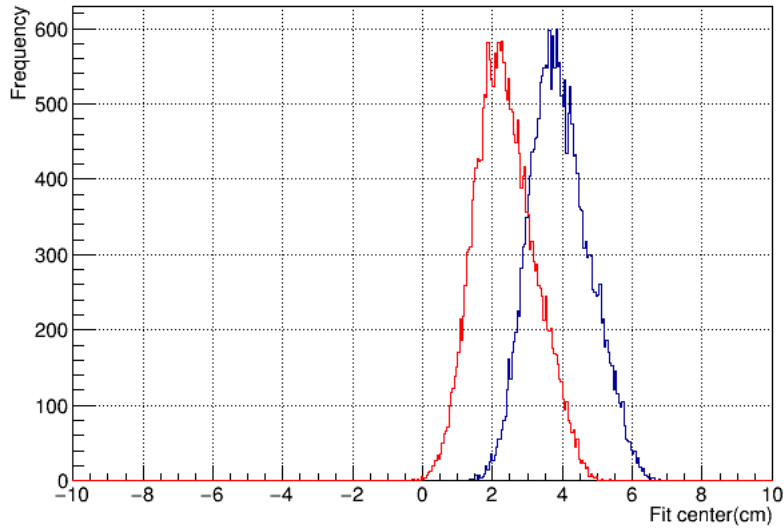


図 6.14: 600 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. 赤いヒストグラムが Si, 青いヒストグラムが EMT を示す. EMT には-450 V 印加している.

Center position distribution

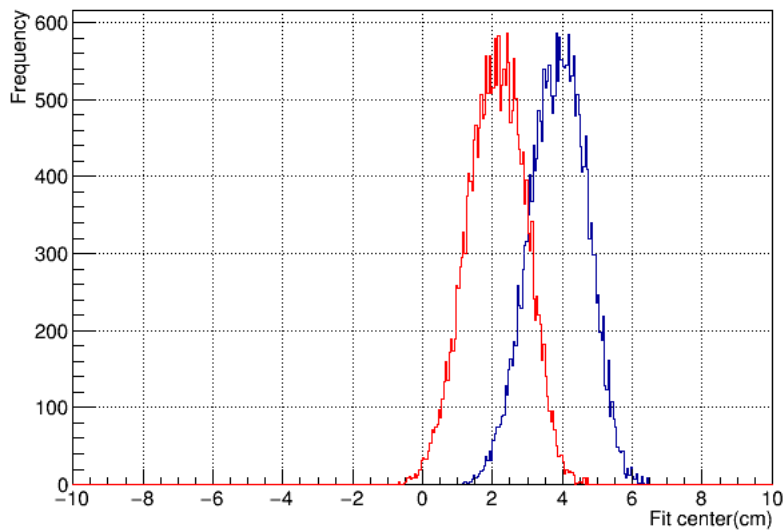


図 6.15: 710 kW におけるミュオンプロファイル中心値の分布. 赤いヒストグラムが Si, 青いヒストグラムが EMT を示す. EMT には-450 V 印加している.



## 6.4 EMT の信号安定性

先行研究により EMT には初期不安定性があることがわかっており、その要因には EMT のウォームアップか温度依存性が挙げられている。T2K Run12, Run13 では、EMTwall の近くに温度計が設置され、ビームダンプの排水パイプの温度変化が EMTwall 付近の空気に影響を与えているか測定した。

T2K Run13 の温度計のヒストリープロットを図 6.16 に示す。ビーム運転期間中は、 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度の温度上昇が存在することが分かった、また、ビーム運転が再開するたびに温度上昇が起きており、EMTwall の信号に影響を与えていることが予想される。先行研究では EMT の温度依存性は  $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$  で下がることわかっているため、ビーム運転再開直後に EMTwall の信号が下がる現象が見えた場合は、ビームダンプの排水パイプの温度変化が要因の一つだと言える。

T2K Run13 で最もまとまったビーム期間のある 12/8–12/11 では、ビーム開始後 4 時間で  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇し、ビーム停止後 6 時間で  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降している。EMT のウォームアップは、1 週間から 2 週間かけて信号収量がおよそ 2% 低下し続けるため、MUMON-pit の温度変化は EMT の初期不安定性の主たる要因ではないことがわかった。ただし、ビーム運転直後数時間の信号収量の低下にはこの温度変化が影響しているため、EMT の信号安定のためには温度を均一に保っている MUMON 内部での測定が必要不可欠である。

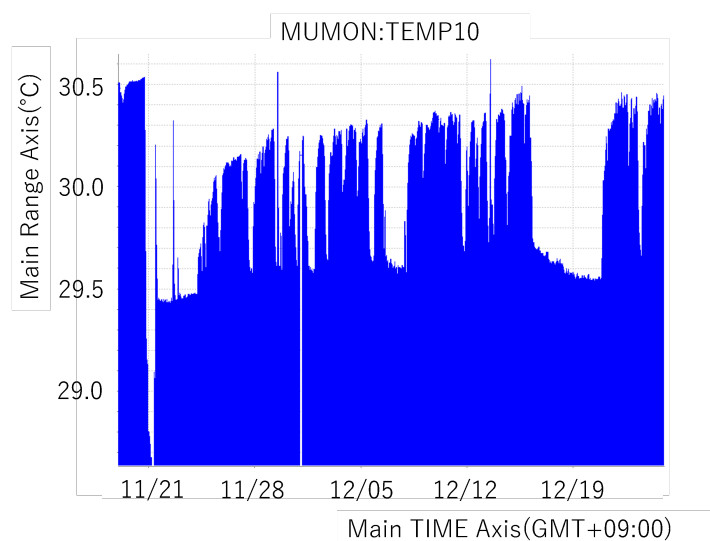


図 6.16: T2K Run13, 全期間の温度計のヒストリープロット。

T2K Run13 の EMTwall のヒストリープロットを図 6.17 に示す。それぞれ、11/22–11/26 の期間 (Period1) と 11/27–12/23(Period2) に分かれている理由は、この期間の間に EMT の HV を  $-500\text{ V}$  から  $-450\text{ V}$  に変更し、EMT/CT のオーダーが変化しているためである。

11/24 に EMT/CT がジャンプしている箇所は、陽子ビームの幅や位置などのビームコンディションを調整していたため、その変化が見えているだけで EMTwall の振る舞いではない。その他の EMT/CT の振る舞いがビームコンディションによるものか、EMT の性質によるものかは EMT/CT では評価できないため、Si との比で評価したヒストリープロットを図 6.18 に示す。ここで EMT/Si では Si の劣化を考慮することができないが、3 章の Si リーク電流の測定から T2K Run13 ビーム運転の放射線劣化は小さいと考えることができる。したがって、今回のビーム運転では Si の劣化はほとんどないと仮定する。

T2K Run13 の測定により、Period1 の 11/24 正午あたりから 2 日かけて EMTwall/Si が 0.5% 低下していること

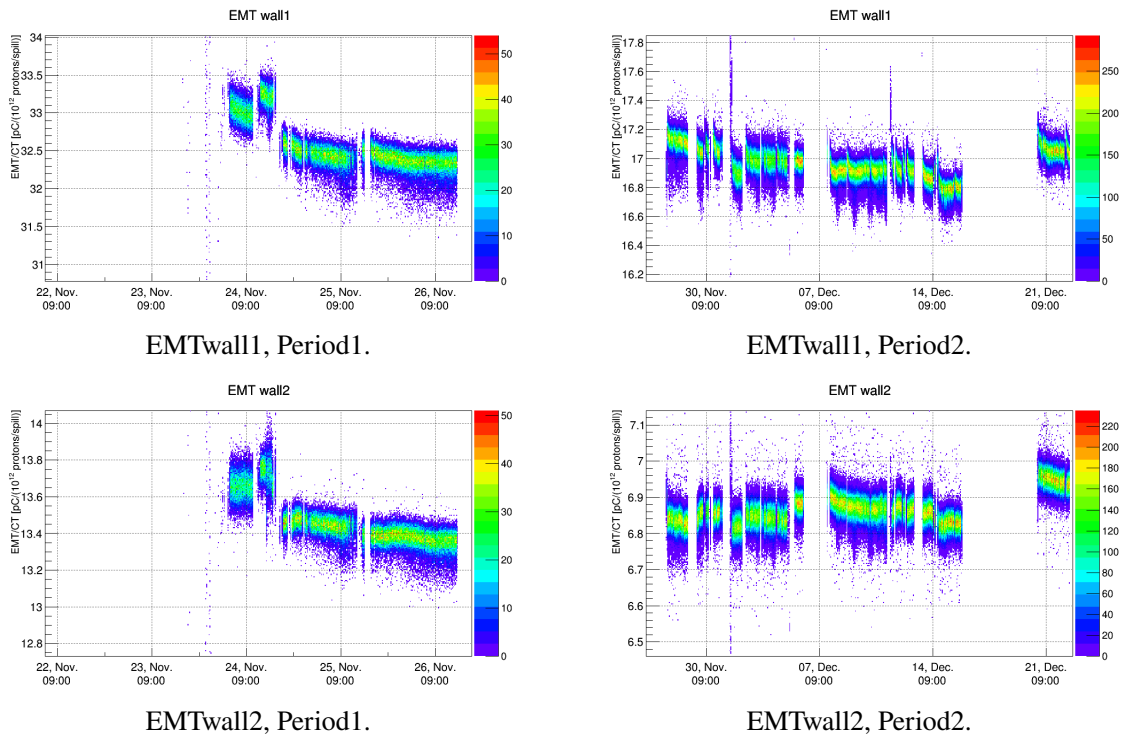


図 6.17: T2K Run13, EMTwall/CT のヒストリープロット. CT はビームライン下流の CT05 の値を用いている.

がわかった. 先行研究でわかっている EMT のウォームアップは  $-2\%/a\ few\ week$  であるため, 今回測定した振る舞いは EMT のウォームアップか MUMON-pit の温度変化か区別が困難である. また, EMTwall2/Si の Period2 にはビーム運転再開直後に信号が低下する初期不安定性が多くみられる.

今回測定した初期不安定性の原因が EMT のウォームアップである場合, MUMON 内部に設置した EMT/Si にも同じ振る舞いが期待されるため, 図 6.19–図 6.20 に内部 EMT/Si のヒストリープロットを示す. EMT/Si のヒストリープロットでは, Period1 の信号収量の低下はどの EMT にも見えなかった. したがって, T2K Run13 で測定された EMTwall の初期不安定性はウォームアップが原因ではないことがわかった. また, Period2 の EMT/Si は EMTwall に比べて安定して, ビーム運転再開時の不安定性が見えていない. ここで, EMTwall と比較している Si は MUMON 内部に設置されている Si のため, その間には約 2m の距離が空いている. MUMON に到来するミュオンビームは傾きをもっているため, EMTwall と Si では同じミュオンを測定できていない可能性がある. したがって, EMTwall/Si にはあって EMT/Si にはない振る舞いの要因には, MUMON-pit の温度変化以外にもミュオンビームの揺らぎが関係していることが考えられる.

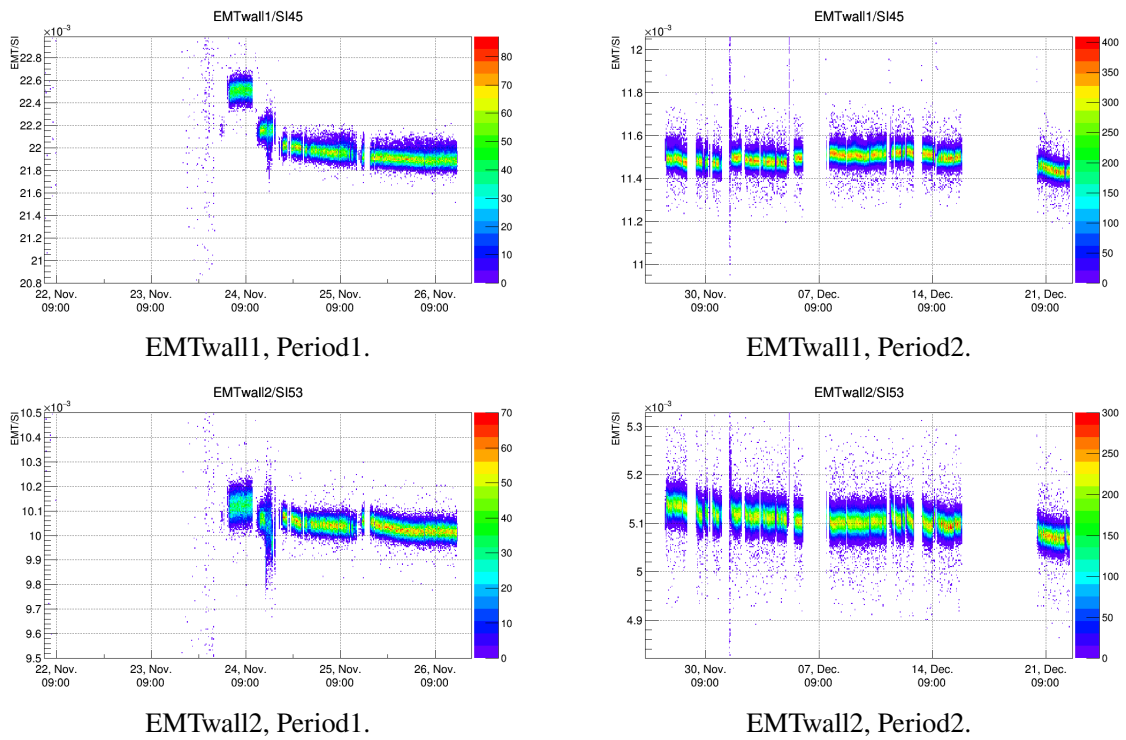


図 6.18: T2K Run13, EMTwall/Si のヒストリープロット. Si は EMTwall の位置と同じ Si のチャンネルを用いた.

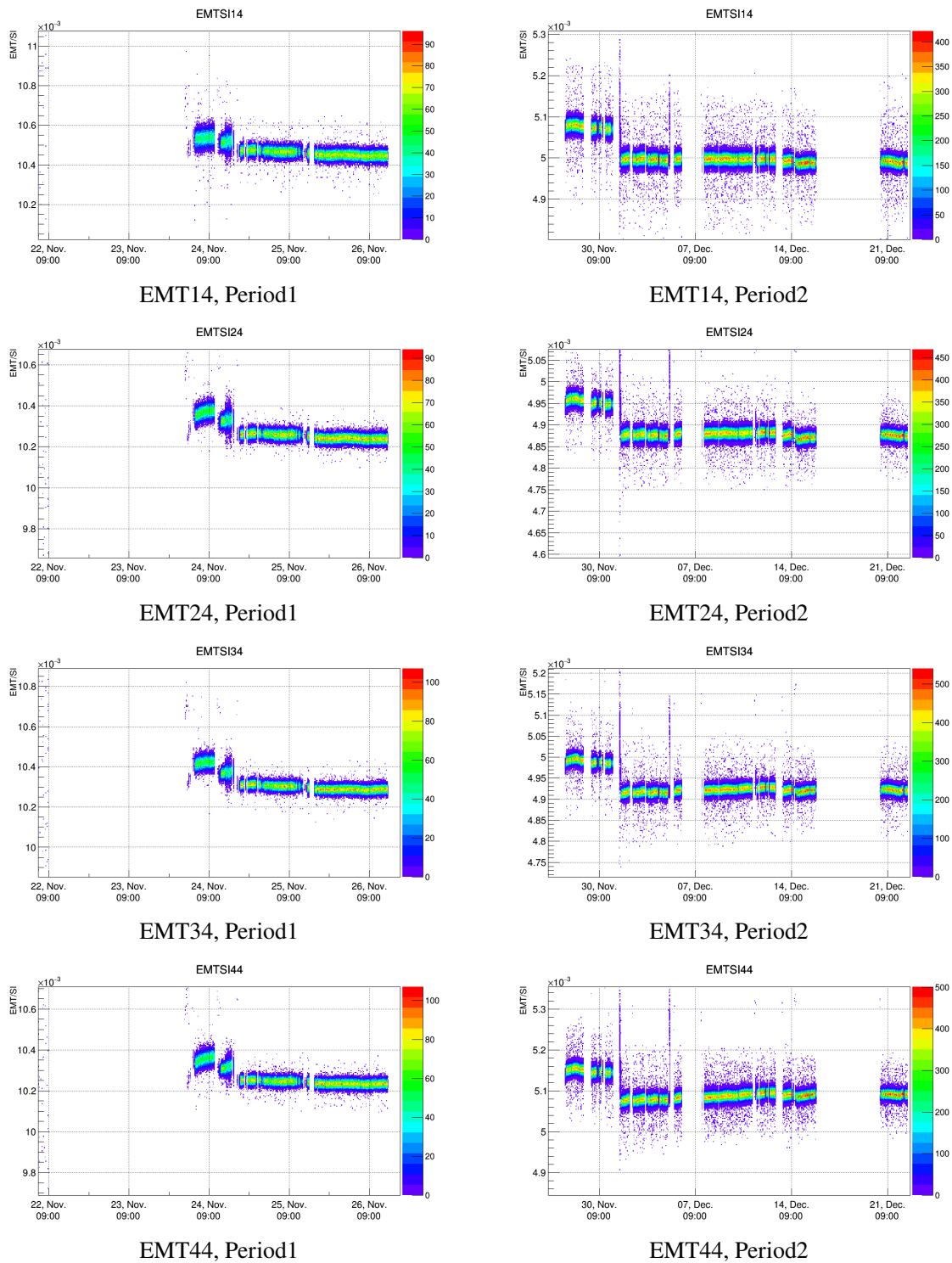


図 6.19: T2K Run13, EMT14–EMT44 までの EMT/Si のヒストリープロット. 比較した Si は EMT の位置と同じ Si のチャンネル。

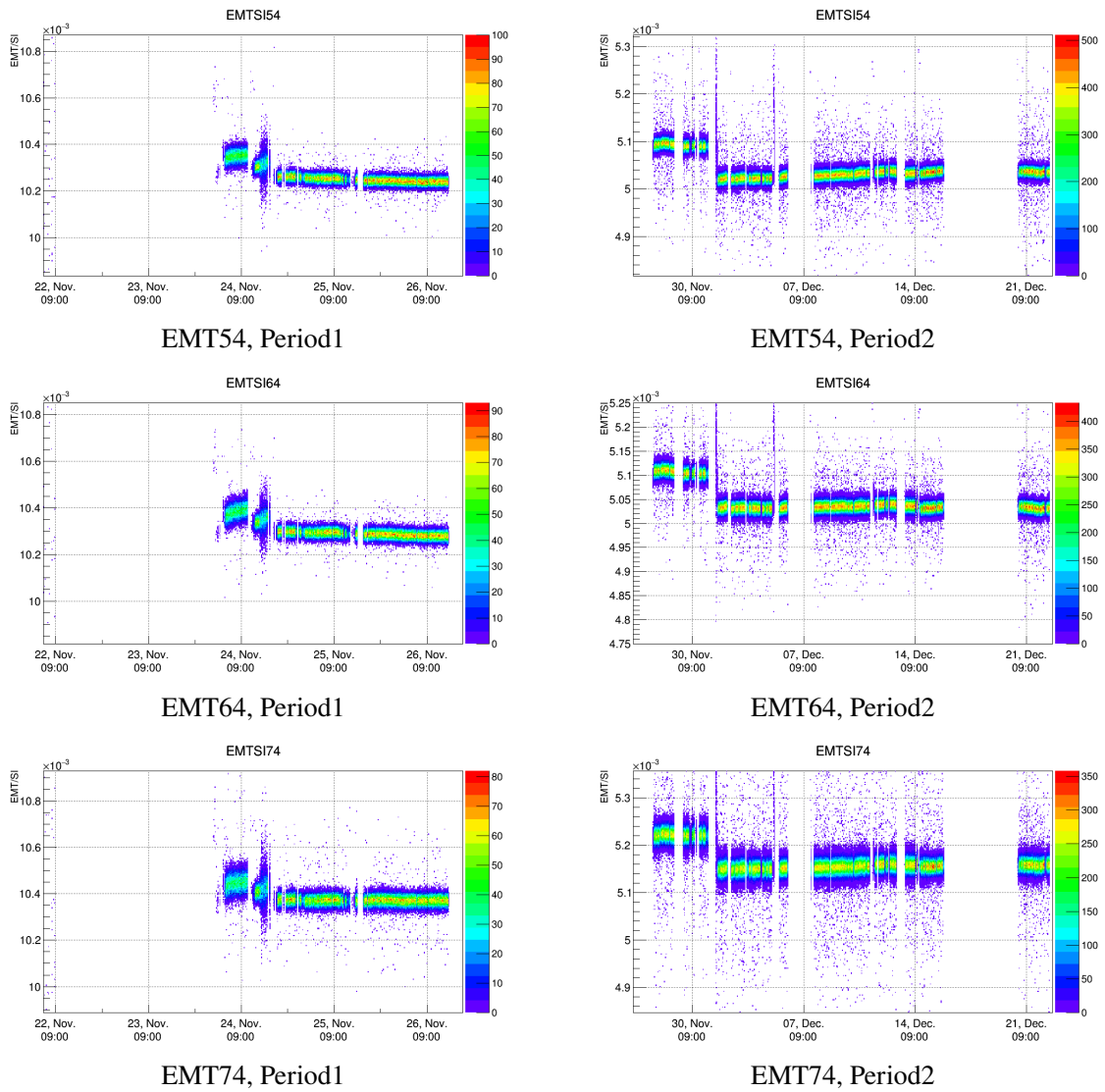


図 6.20: T2K Run13, EMT53–EMT74 までの EMT/Si のヒストリープロット. 比較した Si は EMT の位置と同じ Si のチャンネル.

## 第7章

### 結論

T2K 実験ミュオンモニターは T2K ビームライン上でニュートリノビームをリアルタイムモニタリングできる極めて重要な検出器である。低強度のビーム調整から高強度の連続運転まで、陽子ビームモニターと比較しながらビームコンディションを常に監視することに用いられる。本研究では 2023 年の T2K ビーム運転におけるビームスキャンやミュオンモニターの測定結果をまとめ、新検出器の最有力候補である EMT の性能評価を行った。

T2K 実験では連続運転を行う前に、陽子ビーム位置を調整するためビームスキャンが行われる。ビームスキャンでは陽子ビームモニターとミュオンモニターの相関を測定している。ミュオンモニターによる解析から、ビームオフセットが T2K Run11 から異なっている可能性があることがわかった。さらにバッフルのミスアライメント、もしくは陽子ビーム角が  $0^\circ$  でないことを示唆する結果が得られた。

ビーム調整後は連続運転が行われ、2023 年では 1 スピルあたり 1.36 秒間隔で打ち出し、ビーム強度が最大 765 kW に到達し、ミュオンモニターに到達するミュオンフラックスは過去最大となった。本研究では 2023 年 T2K Run13 のミュオンモニターのヒストリープロットをまとめた。IC が 550 kW の連続運転から信号収量が下がり、T2K Run13 を通して下がり続けた。また IC のミュオンプロファイルの各パラメータも Si に比べて不安定だった。これは IC のパイルアップの影響であり、今後増大していくミュオンフラックスに対してミュオンモニターが抱えている課題である。一方で Si は MUMON の要求を満たす精度でミュオンを測定し、今回のビーム強度に対して十分に測定精度を保っていることがわかった。2023 年 T2K Run13 の後に行われた Si のリーク電流測定では、有意な放射線劣化は測定されなかったが、現状の課題として Si は 100 日程度の連続運転で交換が必要になることがわかっている。これも、今後増大していくミュオンフラックスに対してミュオンモニターが抱えている課題の一つである。

T2K 実験では統計量増大に向けて、ハイパーカミオカンデの建設と J-PARC 陽子ビームのアップグレードが計画されており、最終的に繰り返し周期が 1.16s/spill、ビーム強度は 1.3MW までアップグレードされる予定である。T2K 実験のミュオンモニターとして、ビームアップグレード後のミュオンフラックスに対しても十分な測定精度と長期間の安定稼働が求められる一方で、現状の検出器では T2K の要求を満たすことができない。そこで新たな検出器として EMT が開発され、J-PARC や ELPH での実験により十分な測定精度と高い放射線耐性を持つことがわかっている。

2023 年には初めて MUMON の Si の真上に 7 個 EMT を取り付け、MUMON のエンクロージャー外部には 2 個の EMT(EMTwall) を設置し、ミュオンを測定した。本研究では MUMON 内部に設置した EMT の波形やプロファイル、信号安定性について EMTwall のデータと比較しながら調査した。

EMT の波形はどのビーム強度でもバンチごとの波形を得ることができたが、キャリブレーションを行った印加電圧以外の設定に置いて、EMT のミュオンプロファイルが不安定だという結果が得られた。また、ミュオンプロファイルをガウス関数でフィッティングし、各スピルの中心値の分布を Si と比較した結果、キャリブレーションを行った印加電圧を除く設定において、ミュオンプロファイルの中心値が Si に比べて +2cm ずれていることがわ

かった。この結果は EMT のゲインの個体差があることを示唆しており、今回のようなビーム強度ごとに EMT の印加電圧を変える運用ではそれぞれの印加電圧でキャリブレーションを行う必要があることがわかった。

先行研究では、EMT の初期不安定性の原因として EMT のウォームアップ ( $-2\%/a\ few\ week$ ) と EMT の温度依存性 ( $-0.6\%/^{\circ}C$ ) があることがわかっていた。本研究では EMTwall の近くに温度計を設置し、ビーム運転中の温度変化を測定したところ  $0.5^{\circ}C-0.8^{\circ}C$  の変化があることがわかった。そして、EMTwall/CT と EMTwall/Si のヒストリープロットから連続運転開始日から数日間かけて信号が 1% 程度低下する現象が発見された。EMT のウォームアップを確かめるため、MUMON 内部にも設置された EMT のヒストリープロットと比較したところ、今回の測定では EMT のウォームアップは無かった。したがって、EMTwall の初期不安定性の原因は EMT の温度依存性が見えた可能性が高い。しかし、懸念点として EMTwall の比較に用いた Si は MUMON 内部のものであり、EMTwall と Si の間には約 2 m ほど距離が空いていることが考えられている。これにより、EMTwall と Si ではミュオンビームのコンディションを十分に打ち消せておらず、EMTwall/Si のヒストリープロットの信号不安定性の原因となっている可能性がある。

T2K Run13 の測定では MUMON 内部における EMT の信号安定性がミュオンモニターの測定精度の基準に達していることを示す結果となった。一方で、EMT のゲインの個体差やビーム強度ごとに印加電圧の調整が必要であることがわかった。

## 謝辞

清矢良浩教授には、本研究の議論や研究者としての姿勢、考え方についてご指導いただきました。規模の大きい発表前には、急なお願いにもかかわらず発表練習に付き合っていたり、研究室ミーティングで日常についてのスライドにツッコミを貰うなど、研究者として真摯であり、かつ朗らかな人間性を間近で見て、一人の人間として大きく成長できた3年間だと感じています。

指導教員の山本和弘准教授には、MUMONの解析とその議論、研究室でのPC周りで非常にお世話になりました。研究内容の相談以外にも、細かな書類作業やソフトウェアのインストールに対応していただき感謝します。

豊田博俊さんには、Siarrayの研究中に工具の知識や他愛のない雑談など、慣れない作業で苦戦し疲弊している中で心の支えになっていました。また、道具の貸出や差し入れなど研究環境の構築にもお世話になりました。本論文執筆中にいただいたリポビタン<sup>o</sup>は、非常に活力になりました、ありがとうございます。

東北大学の市川温子教授には、MUMONのデータに関する議論などで本研究の解析において様々な指摘、助言をいただきました。解析途中でつまづいたり、悩んだ際のアドバイスはいつも鋭く、次の一步を超えて数歩先まで研究が進むこともありました。

東北大学の中村輝石助教授には、MUMONグループの指揮から出張先での移動まで様々なことでお世話になりました。英語が不慣れな私のために、ミーティングで直接翻訳していただいたりメモを取っていただいたりと沢山のご迷惑をおかけしたかと思います。質疑応答の時に輝石さんの声が聞こえてくるとホッとしていました。他にも、資料へのコメント、MUMONに関する議論、コーディングのポリシーなど、研究に関わるほとんどのことにご助力いただきました。ありがとうございます。急遽MUMONで作業した後に食べた焼肉、ELPHでのビームテスト後の仙台の牛タン、過酷な作業の後に食べたおいしい食事達がもう食べられないと思うと少し残念です。

T2K実験モニターグループの皆さんには、ビームスキャンのデータやビームライン周りの検出器について多くの助言をいただき、感謝しています。

東北大学のIan Heitkampさん、東京理科大学の佐藤幸音さん、大阪市立大学の本條貴司さんとは、1日15時間超のビームチューニングを過ごしたり、3日間のELPH電子ビームテストなど多くのMUMON作業を一緒に行いました。長時間のビームシフトの後笑顔で寝に戻ったIan、MUMON地下作業を楽しむ佐藤さん、NA棟を案内しながらWAGASCIについて熱く語る本條さん、三者三様のメンバーで2年間楽しく研究を続けることができました。また、Ianにはビームスキャンのシミュレーションデータを提供していただきました。本條さんにはMUMONに関する解析スクリプトの提供からコードの解説まで懇切丁寧にいただき、MUMONの作業で詰まった時にはリモートで何度も助けていただきました。ELPH電子ビームテストの解析結果も提供していただきました。

学部生の時から6年間の付き合いである同期の田川君とは、勉強から遊びまで何でも付き合ってもらいました。ひたすらパスタを折る実験で精神を壊していく様、夕方から早朝までのカラオケなど、学生生活を面白おかしく過ごせたことは彼のおかげです。ありがとう、それしか言葉が思い浮かばない。同期の金子君へ、互いにネットミーミングに毒され共鳴し合った日々はとても楽しかったですが、精神が摩耗したときは寝ましようね。

最後に、4年間の学部生期間に加えて2年間研究を続けるために経済的に支援してくれた私の家族へ深く感謝の意を送ります。



## 引用文献

- [1] W. Pauri. "Letter of 4 december to L.Meither et al.", 1930.
- [2] F.Reines and C.L.Cowan et al. "Detection of the Free Antineutrino". Phys. Rev. 117, 1960.
- [3] M.Nakagawa Z.Maki and S.Sakata. "Remarks on the uni ed model of elementary particles". Prog. Theor. Phys. Vol. 28, 1962. 870.
- [4] Y.Fukuda et al. "Measurement of the Flux and Zenith-Angle Distribution of Upward Throughgoing Muons by Super-Kamiokande". Phys. Rev. Lett. 82 2644-2648, 1999.
- [5] L. Wolfenstein. Physical Review D,17:2369, 1978.
- [6] S. P. Mikheyev and A. Y. Smirnov. Nuovo. Cim. C. 9:17, 1986.
- [7] K. Abe et al. "Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of  $\nu_e$  interactions at the far detector". Physical Review D, 96:092006, 2017.
- [8] M. Jiang et al. "Atmospheric neutrino oscillation analysis with improved event reconstruction in Super-Kamiokande IV ". Progress of Theoretical and Experimental Physics,2019(5):053F01, 2019.
- [9] M. G. Aartsen et al. "Development of an analysis to probe the neutrino mass ordering with atmospheric neutrinos using three years of IceCube DeepCore data". arXiv:1902.07771 [hep-ex], 2019.
- [10] R.L. Workman et al.(Particle Data Group). Prog.Theor.Exp.Phys.2022, 083C01 (2022) and 2023 update, 2023.
- [11] K. Kin. "Measurement of Charged-Current Cross Sections on Water and Hydrocarbon at an Off-Axis Angle 1.5 Degrees Using the T2K Anti-Neutrino Beam", 2018.
- [12] et al.(Super Kamiokande Collaboration) Y.Fukuda. "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos". Phys. Rev. Lett.81:1562, 1998.
- [13] 石井孝信. 「K2K 実験始まる」. 日本物理学会誌 55 (2000) 364.
- [14] Yousuke Ashida. "*Measurement of Neutrino and Antineutrino Neutral-Current Quasielastic-like Interactions and Applications to Supernova Relic Neutrino Serches*". PhD thesis, 京都大学, 2020.
- [15] Kodai Matsuoka. "*Measurement of Neutrino Beam with the Muon Monitor and the First Result of the T2K Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment*". PhD thesis, 京都大学, 2011.
- [16] K. Abe et al.(T2K collaboration). "The T2K Neutrino Flux Prediction". Phys. Rev. D 87(1):012001, 2013.
- [17] D.Beavis et al.(BNL E889 Collaboration). "Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment at the AGS", 1995.
- [18] A. Minamino and M. Otani. 「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, 2010.
- [19] Masashi Otani. "*Measurement of Neutrino Oscillation in the T2K Experiment*". PhD thesis, 京都大学, 2012.
- [20] K. Abe et al. (T2K collaboration). "The T2K Neutrino Flux Prediction". Phys. Rev. D 87(1):012001, 2013.
- [21] (c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo).

- [22] K. Matsuoka. "Design and performance of the muon monitor for the T2K neutrino oscillation experiment". Elsevier, 2010.
- [23] Y. Ashida. "A new electron-multiplier-tube-based beam monitor for muon monitoring at the T2K experiment". PTEP, 2018.
- [24] 鈴木研人. 「T2K ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームの測定とビーム形状に起因する系統誤差の評価」. Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科, 2011.
- [25] K. Suzuki. "Measurement of the muon beam direction and muon flux for the T2K neutrino experiment ". PTEP, 2015.
- [26] T. Hiraki. "*Muon Antineutrino Disappearance Measurement by the T2K Experiment*". PhD thesis, 京都大学, 2016.
- [27] 瀧藤航一. 「T2K 実験ミューオンモニターのための電子増倍管の研究開発」. Master's thesis, 東北大学大学院, 2021.
- [28] 浜松ホトニクス. 「光電子増倍管 その基礎と応用」. [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/PMT\\_handbook\\_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf).
- [29] 東北大学電子光物理学研究センターホームページ. <https://www.lns.tohoku.ac.jp/>.
- [30] 中村妃南. 「T2K 実験ミューオンモニターにおけるビームアップグレードに向けた新型検出器の開発」. Master's thesis, 東京理科大学大学院, 2021.
- [31] 山本達也. 「T2K 実験ミューオンモニターに用いる電子増倍管の開発」. Master's thesis, 大阪市立大学大学院, 2022.