

2024年度 修士論文

T2K 実験前置検出器 WAGASCI-BabyMIND による
ニュートリノ-原子核反応精密測定のための
ニュートリノビームデータの取得と補正
(Acquisition and calibration of neutrino beam data for
precise measurement of neutrino-nucleus reactions with
the T2K experiment near detector
WAGASCI-BabyMIND)

大阪公立大学大学院理学研究科

物理学専攻

山本健裕

概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Reserch Complex) から, 295 km 離れた岐阜県神岡町の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデ (SK) へニュートリノビームを打ち込み, 前置検出器と後置検出器でニュートリノ反応を観測することで, レプトンにおける CP 対称性の破れの探索を目的とした長基線ニュートリノ振動実験である. T2K 実験は既に CP 対称性の破れを示唆する結果を得ているが, これを結論づけるためさらなる精度向上が必要である. T2K 実験における不定性の要因の一つとして, 前置検出器と後置検出器の標的原子核の違いが挙げられる. 前置検出器の多くは炭化水素標的であるが, 後置検出器スーパーカミオカンデは水標的であるため, 各検出器でのニュートリノ反応が異なり系統誤差が生じる. これを削減するために始まったのが T2K-WAGASCI 実験である.

WAGASCI 検出器群は, 水をニュートリノ標的とし, シンチレータを格子状に組むことで全方向にニュートリノ反応を検出するニュートリノ検出器である WAGASCI 検出器, 炭化水素を標的とした Proton Module, 標的モジュール内でのニュートリノ荷電カレント反応により前方に放出されるミュオンを観測する Baby MIND 検出器, 横方向に放出されたミュオンを観測する Wall MRD によって構成され, これらの検出器でニュートリノ反応を捉えている.

Baby MIND 検出器は電磁石を用いたミュオンレンジ検出器であり, ミュオンの電荷を識別することができる. 検出器の構成要素は主にプラスチックシンチレータ, 波長変換ファイバー, 光検出器 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) である. 荷電粒子が飛来するとシンチレータが発光し, その光を波長変換ファイバーが吸収し MPPC に伝達する. 光情報はデータ取得の安定性確認や装置故障の早期発見, ミュオンの運動量精密測定のために重要である.

本論文では, 2023 年 11 月から 2024 年 6 月にかけて行われた T2K 実験 Run13 と 2024 年 11 月から 12 月まで行われた T2K 実験 Run14 で取得したデータを用いて, Baby MIND の光検出器の補正の改良を行い, WAGASCI 検出器群でのニュートリノビームデータ取得の安定性を確認について述べる.

目次

1	ニュートリノ	1
1.1	素粒子標準模型	1
1.2	ニュートリノ	2
1.3	ニュートリノ振動	2
2	T2K 実験	5
2.1	T2K 実験概要	5
2.2	ニュートリノビームライン	5
2.3	前置検出器	8
2.3.1	INGRID 検出器	8
2.3.2	ND280 検出器	8
2.3.3	WAGASCI 検出器群	9
2.4	後置検出器スーパーカミオカンデ	10
2.5	Off-axis 法	10
3	WAGASCI 実験	13
3.1	目的	13
3.2	WGASCI 検出器群	13
3.2.1	WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator)	14
3.2.2	Proton Module	15
3.2.3	Wall MRD (Muon Range Detector)	15
3.2.4	Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector)	16
4	WAGASCI 及び Wall MRD 検出器	17
4.1	MPPC	17
4.1.1	構造	17
4.1.2	動作原理	18
4.1.3	基本動作	18
4.1.4	特性	18
4.2	エレクトロニクス	19
4.3	エレクトロニクスの配置	22
4.4	各種情報の記録	22
4.5	時間情報の記録	23
5	Baby MIND 検出器	25
5.1	検出器の詳細	25
5.1.1	Magnet Module	25
5.1.2	Detector Module	26
5.2	エレクトロニクス	26
5.3	信号情報の記録	27

6	TOT calibration	29
6.1	TOT calibration	29
6.2	解析手順	30
6.2.1	生データ	30
6.2.2	TDM unpack	30
6.2.3	FEB unpack	30
6.2.4	Amplitude matching	31
6.2.5	reconstructed	31
6.3	各条件ごとの hitAmpl と TOT の相関	33
6.4	TOT calibration の改良	40
7	ニュートリノビームデータの取得状況	45
7.1	Baby MIND	45
7.1.1	ADC 分布	45
7.1.2	TDC 分布	48
7.1.3	シンチレータチャンネルごとのヒット数分布	49
7.1.4	各 MPPC チャンネルでの光量分布	49
7.2	WAGASCI & Wall MRD	50
7.2.1	ADC 分布	50
7.2.2	BCID 分布	50
7.2.3	TDC 分布	51
8	結論	53
	謝辞	55
	参考文献	55

目次

1.1	ニュートリノ振動概要図	4
2.1	T2K 実験概要	5
2.2	大強度陽子加速器施設 J-PARC	6
2.3	MR の入射時間とバンチ	7
2.4	INGRID 検出器	8
2.5	ND280 検出器	9
2.6	アップグレード後の ND280 検出器	9
2.7	スーパーカミオカンデ内部の写真	10
2.8	スーパーカミオカンデ概略図	10
2.9	異なる崩壊角に対する親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係性	11
2.10	異なる off-axis angle でのニュートリノフラックスのエネルギー依存性と、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率、 ν_μ の残存確率 (上段), $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の出現確率 (中段), オフアキシス角ごとのニュートリノフラックス (下段).	11
3.1	WAGASCI 検出器群	14
3.2	WAGASCI の概略図	14
3.3	パラレルシンチレータ (上段) とグリッドシンチレータ (下段)	15
3.4	WAGASCI の内部構造	15
3.5	プロトンモジュールの構造 (左) とトラッキングモジュールの構造 (右)	15
3.6	Wall-MRD の構造 (左), 使用されているシンチレータバー (右)	16
3.7	Baby MIND の外観	16
4.1	左が Array 型 MPPC, 右が Single 型 MPPC	17
4.2	MPPC の構造	17
4.3	データ収集システム概略図	19
4.4	Single MPPC Card	19
4.5	ASU	20
4.6	IF	20
4.7	DIF	21
4.8	GDCC, CCC	21
4.9	WAGASCI, Wall MRD の各エレクトロニクスの配置図	22
4.10	時間情報記録システムの概略図	23
5.1	Magnet Module の外観	25
5.2	X 層, Y 層それぞれのシンチレータの概要図. 緑色の部分はファイバー, 黄色の部分は MPPC を表す.	26
5.3	エレクトロニクス	26

5.4 CITIROC による信号情報の読み出し原理. 32 ch のうちあるチャンネル (ここでは ch0) でトリガーがかかり L1HOLD 状態になる. 一つのアナログ信号のみ入った場合, rising time, falling time, High Gain 値そして Low Gain 値が記録される. ここで, case 1 では一つのアナログ信号のみが入る場合を表す. case 2 では三つのアナログ信号が入り最後に読み出した信号の振幅が最大である時を表す. case 3 では三つのアナログ信号が入り最後に読み出した信号の振幅が最大ではない場合を表す. パルス 3 で保存されている HG と LG の値はパルス 1 の値である.	28
6.1 TOT の定義	29
6.2 解析手順	30
6.3 FEBUnpack 後の HG の hitAmpl と TOT の相関	31
6.4 FEBUnpack 後の LG の hitAmpl と TOT の相関	31
6.5 Amplitude matching 後の HG の hitAmplMatched と TOT の相関	31
6.6 Amplitude matching 後の LG の hitAmplMatched と TOT の相関	31
6.7 HG と LG の相関	32
6.8 HG と TOT の相関	32
6.9 LG と TOT の相関	32
6.10 calibration 後の HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関	32
6.11 calibration 後の LG の hitAmplReconstructed と TOT の相関	32
6.12 各条件ごとの HG の hitAmpl と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで振幅と TOT のミスマッチが起こっているため図 6.3 の赤丸で囲った部分が生じる. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.3 である.	34
6.13 各条件ごとの HG の hitAmplMatched と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで生じた振幅と TOT のミスマッチが修正されている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.5 である.	35
6.14 各条件ごとの HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関. (a) と (d) のプロットは Amplitude matching 後のデータがそのまま引き継がれている.(b) と (d) のプロットには TOT calibration が実行されており離散的なプロットとなっている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.10 である.	36
6.15 各条件ごとの LG の hitAmpl と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで振幅と TOT のミスマッチが起こっているため図 6.4 の赤丸で囲った部分が生じる. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.4 である.	37
6.16 各条件ごとの LG の hitAmplMatched と TOT の相関.(c) のプロットと (d) のプロットで生じた振幅と TOT のミスマッチが修正されている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.6 である.	38
6.17 各条件ごとの LG の hitAmplReconstructed と TOT の相関. (a) と (d) のプロットは Amplitude matching 後のデータがそのまま引き継がれている.(b) と (d) のプロットには TOT calibration が実行されており離散的なプロットとなっている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.11 である.	39
6.18 HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関	40
6.19 LG の hitAmplReconstructed と TOT の相関	40
6.20 hitAmplReconstructed と LGhitAmplReconstructed の相関	41
6.21 変更後の hitAmplReconstructed と TOT の相関	41
6.22 変更後の hitAmplReconstructed と LGhitAmplReconstructed の相関	42
6.23 TOT calibration 改良後の HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関	43
7.1 FEB 0 の ADC 分布	45
7.2 FEB 13 の ADC 分布	45
7.3 FEB 0 channel 0 の ADC 分布	46
7.4 FEB 0 channel 0 でエントリー数 0 のイベントを除いた ADC 分布	46
7.5 FEB 0 channel 0 の TOT calibration 後の ADC 分布	47
7.6 FEB 0 の TOT calibration 後の ADC 分布	47
7.7 陽子ビームの構造	48

7.8 FEB 0 の TDC 分布	48
7.9 Baby MIND の TDC 分布	48
7.10 時間と波高の相関	48
7.11 X 層のヒット数分布	49
7.12 Y 層のヒット数分布	49
7.13 X 層 Top pln 6 channel 12 の光量分布	49
7.14 X 層 Bottom pln 6 channel 12 の光量分布	49
7.15 Y 層 Right pln 11 channel 69 の光量分布	50
7.16 Y 層 Left pln 11 channel 69 の光量分布	50
7.17 Wall MRD north top の ADC 分布	50
7.18 WAGASCI upstream top の ADC 分布	50
7.19 run13 2024 年 2 月 13 日の Wall MRD north top の BCID 分布	51
7.20 run13 2024 年 2 月 13 日の WAGASCI upstream side の BCID 分布	51
7.21 run14 2024 年 6 月 12 日の Wall MRD north top の BCID 分布	51
7.22 run14 2024 年 6 月 12 日の WAGASCI upstream side の BCID 分布	51
7.23 run13 2024 年 2 月 13 日の Wall MRD north top の TDC 分布	52
7.24 run13 2024 年 2 月 13 日の WAGASCI upstream side の TDC 分布	52
7.25 run14 2024 年 6 月 12 日の Wall MRD north top の TDC 分布	52
7.26 run14 2024 年 6 月 12 日の WAGASCI upstream side の TDC 分布	52

表目次

1.1	素粒子標準模型一覧	1
4.1	WAGASCI , Wall MRD 1 台あたりの DIF , IF , ASU の枚数と MPPC のチャンネル数	22
5.1	Magnet Module の基本情報	25
5.2	SPIROC と CITIROC の基本性能の比較	27

Chapter 1

ニュートリノ

1.1 素粒子標準模型

素粒子標準模型は表 1.1 のようにまとめられる。素粒子標準模型とは、物理学における強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の三つの相互作用を記述する標準的な枠組みである。素粒子標準模型は、物質の基本的な構成要素である素粒子を 4 つに分類する。一つ目はクォークである。クォークは物質を構成する最小の粒子であり、6 つの異なるフレーバー（アップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトム）と 3 つの色（赤、緑、青）を持つ。クォークは強い相互作用（強い力）によって結合し、陽子や中性子などのハドロンを形成する。二つ目はレプトンである。レプトンは電荷を持つ荷電レプトンと電氣的に中性なニュートリノがあり、電子・電子ニュートリノ、ミューオン・ミューニュートリノ、タウ粒子・タウニュートリノの対が存在する。また、電磁相互作用（電磁力）と弱い相互作用（弱い力）によって相互作用する。三つ目はゲージ粒子である。ゲージ粒子は粒子間の相互作用を媒介するボソンと呼ばれる粒子である。フォトン（光子）は電磁相互作用を、W ボソンや Z ボソンは弱い相互作用を引き起こす。また、グルーオンは強い相互作用を引き起こす。最後に、ヒッグス粒子は物質に質量を与える。

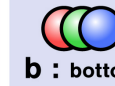
	物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	 u : up	 c : charm	 t : top	 γ : photon		
	 d : down	 s : strange	 b : bottom	 g : gluon		
	 e : electron	 μ : muon	 τ : tau	 Z ⁰ : Z boson	 W ⁺ : W ⁺ boson	 W ⁻ : W ⁻ boson
レプトン leptons	 ν _e : electron neutrino	 ν _μ : muon neutrino	 ν _τ : tau neutrino	 H : Higgs boson		
				ヒッグス粒子 Higgs bosons		

表 1.1: 素粒子標準模型一覧

1.2 ニュートリノ

ニュートリノは電荷を持たず、質量が非常に小さく、 $\frac{1}{2}\hbar$ のスピンを持つレプトンである。宇宙の中に非常に多く存在し、地球上にも宇宙線や地球内部の自然放射線などの形で多くが存在している。また、太陽の核融合反応によって生成され、太陽から地球に向かって常に大量に放射されている。ニュートリノは弱い相互作用でしか反応しないため、ほとんどの物質を透過する特性を持ち、観測が困難である。

ニュートリノの歴史について簡単に述べる。1930年にオーストリアの物理学者 Pauli が原子核が出す放射線（ベータ線）のエネルギー分布を研究しているとき、エネルギーが保存されず消失してしまうことを発見した。そしてつじつまを合わせるために立てた仮説が、エネルギーを持ち去ってしまう粒子が存在するというものである。このとき、Pauli はこの粒子を「ニュートロン」と呼んでいたが、これが今日のニュートリノである。そして、1933年にイタリアの物理学者 Fermi によってニュートリノと名付けられた。「ニュートラル」は中性、つまり電気を帯びていないという意味、「イノ」はイタリア語で小さいという意味である。1956年アメリカの物理学者 Reines と Cowan は、原子炉から生まれるニュートリノを捕まえることに成功した。1970年代にはアメリカの物理学者 Davis が、1969年から太陽ニュートリノの観測を開始した実験を重ねた結果、ニュートリノは理論からの予想の $1/3$ 程度しか発見されなかった。このことは、「太陽ニュートリノ問題」と呼ばれ、その後約 30 年間にわたる物理学上の大問題となった。この問題は 1.2 節で述べるニュートリノ振動が実証されたことによって解決された。1987年にはカミオカンデグループが太陽ニュートリノの観測を開始し、そのわずか 1 カ月後、16 万光年彼方の超新星 1987A の超新星爆発によってやって来たニュートリノを捕まえることに成功し、ニュートリノ天文学という新しい学問が始まった。1988年に太陽ニュートリノの観測を 2 年間継続したカミオカンデグループは、その数が理論より少ないことを発表した。Davis とカミオカンデの二つの観測において同様の結果が得られたため太陽ニュートリノの研究がより活発に行われるようになった。太陽ニュートリノの問題は重水を用いた SNO (Sudbury Neutrino Observatory) 実験による荷電カレント反応、中性カレント反応、弾性散乱の三つの反応の測定により、太陽から放出される全ニュートリノフラックスが理論予測と一致することが確認され、ニュートリノ振動の存在が決定的となった。1996年には 4 年以上の歳月をかけて、世界最大、世界最高精度のニュートリノ観測装置「スーパーカミオカンデ」が完成し、新世代のニュートリノ研究が始まった。そして、1998年スーパーカミオカンデグループは、ニュートリノ振動を観測したことにより、ニュートリノに質量があることを発見した。

1.3 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが質量を持つ場合、ニュートリノが空間を飛行する間にフレーバーの種類が変化する現象である。

1962年に Pontecorvo, 坂田昌一, 牧二郎, 中川昌美によって理論が提唱、定式化され、1998年にスーパーカミオカンデで実際に観測された。ニュートリノが質量を持つ場合、フレーバーの固有状態とは別に 3 種類の質量固有状態を持つ。フレーバーの固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) は、質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) が式 (1.1) のように混合した状態で表される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

ここで、 $U_{\alpha i}$ はユニタリー行列であり、Pontecorvo, 坂田, 牧, 中川 の頭文字を取って PMNS 行列と呼ばれ、あるフレーバーのニュートリノがニュートリノ振動により他のフレーバーに変換される混合の強さを特定することができる。これは式 (1.2) によって表すことができる。

$$\begin{aligned} U_{\text{PMNS}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \quad (1.2) \end{aligned}$$

ここで、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$ 、 $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ であり、パラメータである θ_{ij} は混合角、 δ_{CP} は CP 位相と呼ばれる。

ここでは ν_e と ν_μ の 2 世代の振動を考える. 2 つのフレーバーの固有状態は混合角 θ を用いて以下のように表せる.

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \quad (1.3)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \quad (1.4)$$

また, ニュートリノが運動量 p を持つとするとニュートリノの質量は十分に小さいため,

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.5)$$

と表される. この時, それぞれの波動関数が発生してから時間 t における時間発展は, 単位系をプランク単位系とするとして,

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos\theta|\nu_1(0)\rangle e^{-iE_1 t} + \sin\theta|\nu_2(0)\rangle e^{-iE_2 t} \quad (1.6)$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta|\nu_1(0)\rangle e^{-iE_1 t} + \cos\theta|\nu_2(0)\rangle e^{-iE_2 t} \quad (1.7)$$

と表される. よって, 時刻 $t = 0$ で発生した電子ニュートリノ ν_e が時刻 t でミューニュートリノ ν_μ に変化する確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ は,

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \{1 - \cos(E_1 - E_2)t\} \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{|m_1^2 - m_2^2|}{2E}\right)t \right\} \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2}{2E}t\right) \right\} \end{aligned} \quad (1.8)$$

となる. また, フレーバーの種類が変化せず ν_e がそのままである確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ は,

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \\ &= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2}{2E}t\right) \right\} \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる. 式 (1.8), (1.9) よりニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態の間に混合があり, かつ質量が異なる固有状態が存在するとき, つまり, $\theta \neq 0, \Delta m^2 \neq 0$ の時, $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \neq 0, P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \neq 1$ となり, ニュートリノ振動が起こる. 図 1.1 にニュートリノ振動の概要図を示す.

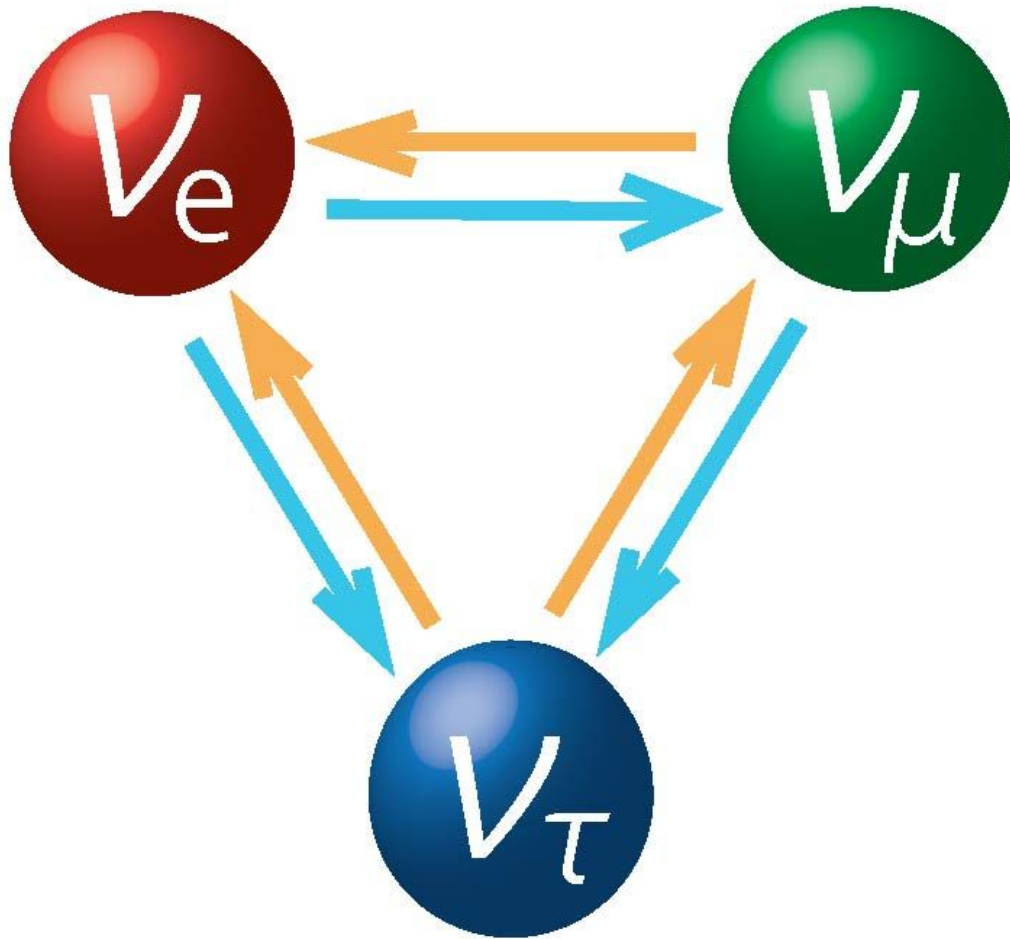


図 1.1: ニュートリノ振動概要図

Chapter 2

T2K 実験

2.1 T2K 実験概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) でニュートリノビームを生成し、280 m 後方の前置検出器で振動前のニュートリノを、295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内に設置されたスーパーカミオカンデ (SK) で振動後のニュートリノを観測し、ニュートリノ振動によってニュートリノの種類が変化するかを観測する。図 2.1 は T2K 実験の概略図である。T2K 実験の主な目的は、電子ニュートリノ出現による混合角 θ_{13} の精密測定、ミューニュートリノ ν_{μ} 消失確率の精密測定、ニュートリノビームと反ニュートリノビームを用いた CP 対称性の破れの観測である。



図 2.1: T2K 実験概要

2.2 ニュートリノビームライン

J-PARC 全体の構造を図 2.2 に示す。T2K 実験において使用されるニュートリノは、J-PARC の陽子加速器によって 30 GeV に加速された陽子を炭素標的に衝突させることで生じる荷電 π 中間子の崩壊によって生成される。J-PARC の陽子加速器は 3 段で構成される。上流側から、400 MeV まで加速する全長約 400 m の線形加速器の LINAC、3 GeV まで加速する周長 348.33 m のシンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、30 GeV まで加速する周長 1567.5 m のシンクロトロンの MR (Main Ring) により大強度陽子ビームを生成する。



図 2.2: 大強度陽子加速器施設 J-PARC

加速された陽子ビームはニュートリノビームラインの炭素標的に照射され、ハドロン反応によって主に π 中間子が生成される。このようにして生成された π 中間子が式 (2.1), (2.2) のように崩壊することでニュートリノが生成される。

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

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

収束する荷電パイオンの電荷は電磁ホーンの磁場の偏向により選択することができ、これによってニュートリノビームと反ニュートリノビームを選択することが出来る。これにより、ニュートリノの粒子と反粒子の対称性 (CP 対称性) の破れを測定できる。

LINAC で加速された陽子の集合体は、次の周回加速器 RCS に送られる。もともと周回している陽子の束に合流するように周期を調整して入射し、電流を増加させる。この陽子の束はバンチと呼ばれ、RCS の軌道では 2 つのバンチが周回している。陽子の軌道を曲げるために約 160 台の偏向電磁石や四極電磁石磁場が用いられている。RCS では陽子を 3 GeV まで加速し、次の加速器 MR へ送る。

MR は直径約 500 m のシンクロトロンである。概要を図 2.3 に示す。8 つのバンチが約 600 ns の間隔で入射する。この 8 バンチのまとまりはスピルと呼ばれ、その時間幅は約 5 μ s である。MR では陽子を 30 GeV まで加速し、スピルごとにニュートリノビームラインへ送り出す。8 つのバンチ (1 スピル) をニュートリノビームラインに送り出すと、同様の手順が繰り返され、加速された陽子がスピル単位で次々にニュートリノビームラインへ送られていく。現在スピルの時間幅 (ニュートリノビームラインで 8 バンチを取り出してから、次の 8 バンチを取り出すまでの周期) は 1.32 秒である。

2.3 前置検出器

前置検出器はビーム生成位置より 280 m 下流の地点に設置されており, 振動前のニュートリノを観測している. ニュートリノビームのフラックスや, ニュートリノと原子核の反応由来の系統誤差を抑制することを主な目的としている. 前置検出器は, on-axis 検出器の INGRID, 2.5° のオフ軸角を持つ ND280, 1.5° のオフ軸角を持つ WAGASCI/Baby MIND の 3 種類が設置されている.

2.3.1 INGRID 検出器

INGRID (Interactive Neutrino GRID) 検出器は, on-axis に設置されている検出器であり, ビーム軸上を中心に各位置でニュートリノを検出し, ニュートリノビームのプロファイルを調べる役割を果たしている. 図 2.4 に示すように INGRID は, 鉛直方向に 7 モジュール, 水平方向に 7 モジュールを配置した十字の検出器である. 一つのモジュールは $1.24\text{ m} \times 1.24\text{ m} \times 0.95\text{ m}$ の大きさを持っており, 鉄 9 層, シンチレータ層 11 層からできている. 標的の大部分を担う鉄の質量は一つのモジュールあたり 7.1 ton である.

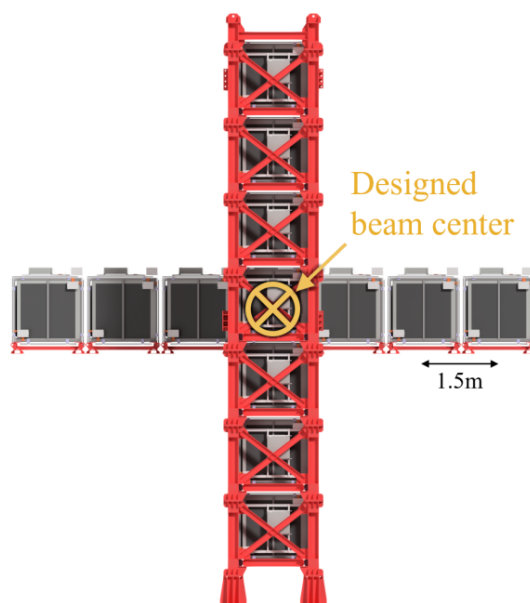


図 2.4: INGRID 検出器

2.3.2 ND280 検出器

ND280 検出器は標的から 280 m の位置に置かれた前置検出器でありこのように呼ばれている. ND280 はビーム軸から 2.5° だけずれた位置に設置されており, ニュートリノ振動前のニュートリノのフラックスや, ニュートリノと原子核の反応を測定する. 図 2.5 が ND280 検出器の概略図である. ND280 検出器は以下のモジュールにより構成されている.

- UA1 Magnet

検出器の全体を囲うように設置されている大型電磁石である. 0.2 T の磁場をかけて荷電粒子の飛跡を曲げることで各粒子の運動量及び電荷の正負の測定を行う.

- P0D (π^0 Detector)

鉛, 水ターゲット, シンチレーターのサンドイッチ構造となっており, π^0 生成反応の測定を行っている.

- FGD (Fine Grained Detector)

断面が約 1 cm 四方の細かく区分されたシンチレータから成る検出器であり, ニュートリノ標的となることで反応点付近の粒子を検出する. シンチレータのみから成るモジュール, 水標的とシンチレータによるサンドイッチ構造のモジュールの 2 台から構成され, 水のニュートリノ反応断面積を測定できる.

- TPC (Time Projection Chamber)

TPC は P0D の後方に 3 つ設置され, FGD とサンドイッチ構造をなす飛跡検出器である. ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の飛跡の曲がり具合から粒子の運動量及び電荷の正負の測定を, エネルギー損失から粒子の識別を行っている.

- ECAL (Electromagnetic CALorimeter)

ニュートリノ反応によって生成した電子及び γ 線の電磁シャワーを観測し, そのエネルギーを測定する. UA1 Magnet 内側の最外層に設置され, 鉛とシンチレータのサンドイッチ構造になっている.

- SMRD (Side Muon Range Detector)

UA1 Magnet の隙間に設置されている検出器であり, TPC に入射しなかった荷電粒子の飛跡を測定し, エネルギーを再構成する.

2020 年まで上記の検出器構成でデータ取得を行っていたが, 2023 年度からは先頭の P0D の一部を, 中心に SuperFGD、その上下に今までの TPC と同様の Ar ガスを用いた HA-TPC(High Angle TPC)、これら 2 つの検出器を覆う 6 枚の TOF(Time Of Flight) 検出器に置き換えた構成でデータ取得を行なっている. 図 2.6 にアップグレード後の ND280 検出器の概略図を示す.

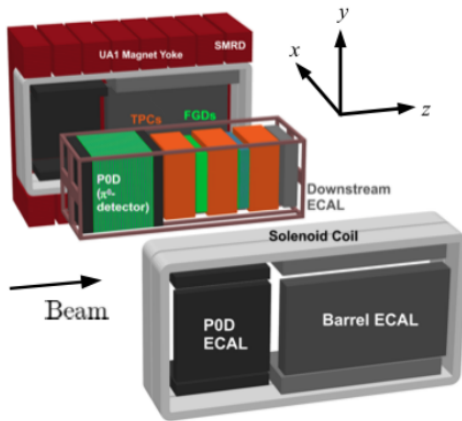


図 2.5: ND280 検出器

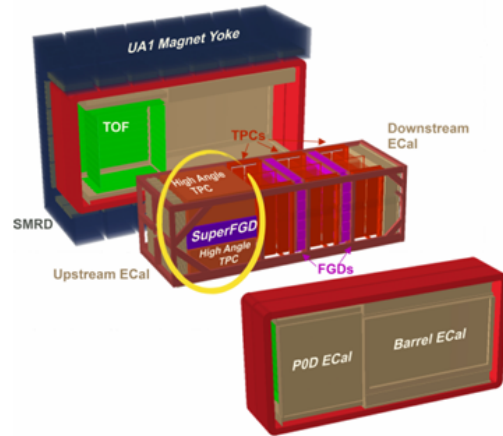


図 2.6: アップグレード後の ND280 検出器

2.3.3 WAGASCI 検出器群

WAGASCI 検出器群は T2K 前置検出器ホール地下 2F (Off-axis 1.5°) の位置に設置されているニュートリノ, ミューオン飛程検出器群である. ニュートリノと標的が反応することで生成された荷電粒子をシンチレータを介し, 半導体型光検出器 MPPC で検出することで観測を行っている. WAGASCI 検出器群の詳細については次章で詳しく記述する.

2.4 後置検出器スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下 1000 m に位置するチェレンコフ光観測装置であり, 1996 年 4 月より利用が開始されている. 直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒形のタンクであり, 内部は約 5 万トンの水で満たされている. 壁面には光電子増倍管が約 13,000 本設置されており, 低確率で起こるニュートリノと水の衝突によって生成された荷電粒子が水中での光の速さよりも速く移動すると放出されるチェレンコフ光を観測している. 図 2.7 はスーパーカミオカンデを内部から撮影した写真である.

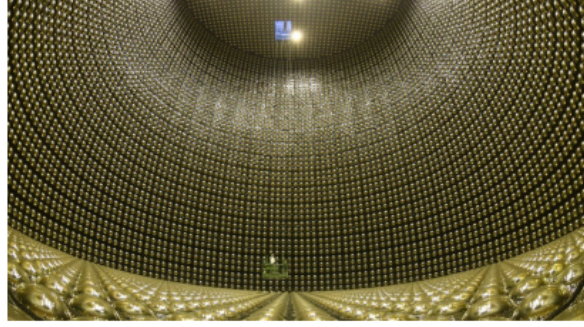


図 2.7: スーパーカミオカンデ内部の写真

また, スーパーカミオカンデは 2 層構造になっており, 厚さ約 2 m の外水槽には外向きに光電子増倍管が約 1,800 本取り付けられている. この光電子増倍管は, ニュートリノと宇宙線ミューオンを区別し, ノイズを除去することができる. 図 2.8 にスーパーカミオカンデの概略図を示す.

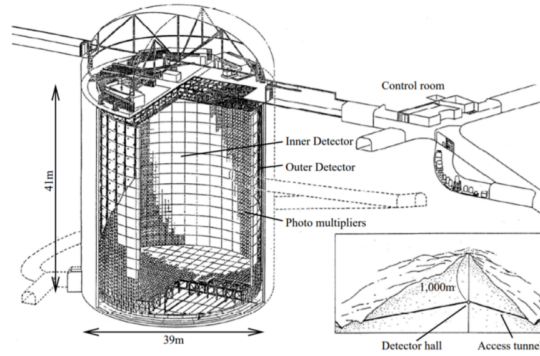


図 2.8: スーパーカミオカンデ概略図

2.5 Off-axis 法

T2K 実験ではスーパーカミオカンデから 2.5° ずれた方向にニュートリノビームを発射している. これにより, スーパーカミオカンデに到達するニュートリノビームのエネルギーが, ニュートリノ振動確率が最も高くなるエネルギーとなる. ニュートリノビームは π 中間子の 2 体崩壊を用いて生成しており, ニュートリノのエネルギー E_ν は式 (2.3) のように表される.

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

ここで, m_π , E_π , p_π はそれぞれ π 中間子の質量, エネルギー, 運動量, m_μ , θ_ν はそれぞれミューオンの質量, π 中間子の進行方向に対するニュートリノの崩壊角である. 式 (2.3) より崩壊角 θ_ν が大きくなるほどエネルギー分布の幅を狭くすることができる. 図 2.9 は異なるオフアクシス角での荷電 π 中間子の運動量と生じるニュートリノのエネルギーを表したグラフであり, 角度が大きい場合は, 運動量の高い荷電 π 中間子であっても, 生じるニュートリノのエネルギーが低く抑えられている. 図 2.10 はニュートリノ振動確率とオフアクシス角を変えたときのエネルギースペクトルを表す. 崩壊角 θ_ν が 2.5° のときニュートリノ振動確率が最も高くなるため, T2K 実験ではオフアクシス角を 2.5° に設定している.

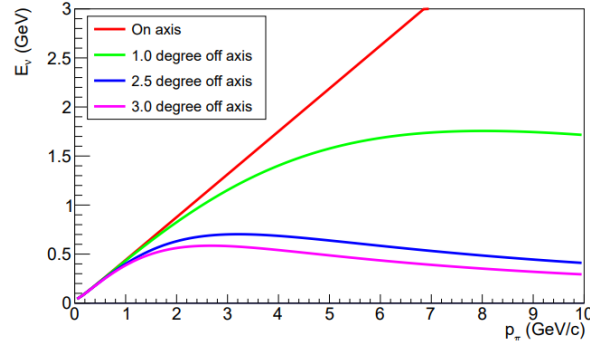


図 2.9: 異なる崩壊角に対する親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係性

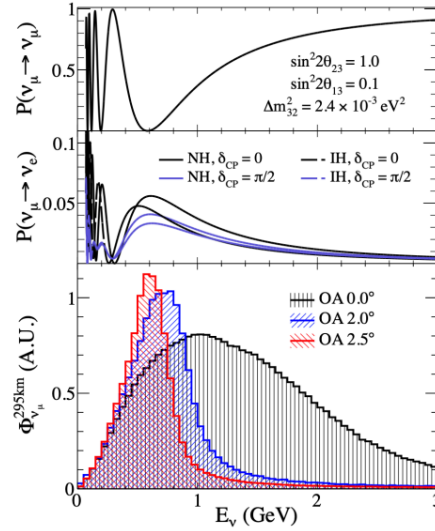


図 2.10: 異なる off-axis angle でのニュートリノフラックスのエネルギー依存性と、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率。 ν_μ の残存確率 (上段), $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の出現確率 (中段), オフアクシス角ごとのニュートリノフラックス (下段).

Chapter 3

WAGASCI実験

3.1 目的

WAGASCI 実験は J-PARC 加速器と T2K ビームラインで生成されたニュートリノを,3 次元格子状に組み立てられたシンチレータを持ち,主に水を標的とする WAGASCI モジュール,プラスチックを標的とするプロトンモジュールによって検出し,ニュートリノと水,プラスチックの反応を精密に測定することを目指す実験である. また,これまで前置ニュートリノ検出器 ND280 において以下のような課題があり,その解決のためにも WAGASCI 実験が改良されながら行われている.

- 現在のニュートリノ振動実験において,ニュートリノと原子核の反応にまつわる系統誤差が,全体の誤差の中で大きな割合を占めている.これはニュートリノと原子核とが反応する際の多体効果が原因である.この課題に対して,ニュートリノと水,プラスチックの反応を精密に測定し,ニュートリノ-原子核反応モデルを検証することで系統誤差を削減する必要がある.
- T2K 実験で現在使用されている前置検出器 ND280 には構造上,ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子を検出できる方向が前方方向に限られており,大角度方向に散乱された荷電粒子の検出効率が低い.
- ND280 検出器はプラスチックシンチレータ (CH) を標的としている一方,後置検出器 (スーパーカミオカンデ) は H_2O 標的であり,この標的の違いによる系統誤差が生まれる.
- ニュートリノの反応により生じるミューオンの電荷を識別する検出器を持たなかったためニュートリノと反ニュートリノを区別することができなかった.
- ミューオンの運動量を精度良く測定する検出器がなかった.

3.2 WAGASCI 検出器群

WAGASCI 検出器群は前置ニュートリノ検出器地下ホール 2F, Off-axis 1.5° の位置に設置されており, WAGASCI, Proton Module, Wall MRD, Baby MIND の 4 種類によって構成される.WAGASCI はビーム上流と下流で 2 台設置されており,その間に CH 標的検出器の Proton Module が設置されている. また,それらの両側面にはミューオン飛程検出器 Wall MRD が設置されている.Baby MIND はこれらよりビーム下流方向に設置されており,磁場を発生させることにより,荷電粒子の電荷を識別している.WAGASCI 検出器群の概略図を図 3.1 に示す.

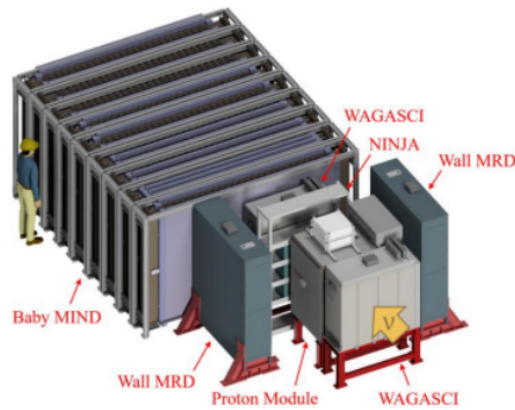


図 3.1: WAGASCI 検出器群

3.2.1 WAGASCI (Water Grid And SCIntillator)

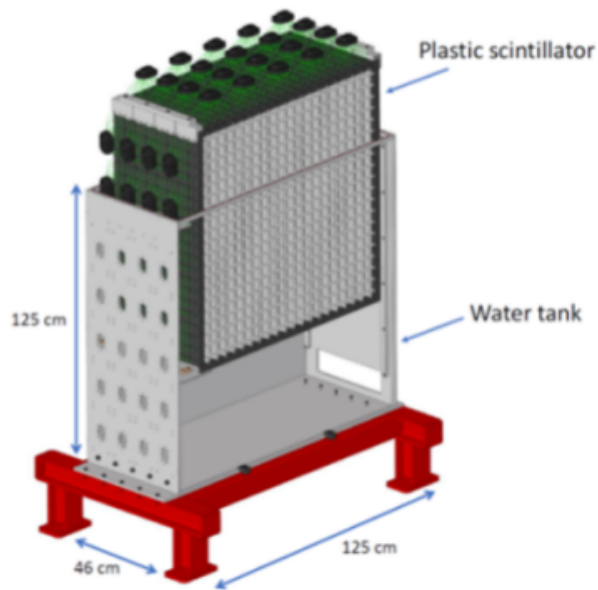


図 3.2: WAGASCI の概略図

WAGASCI は水を標的としたニュートリノ検出器であり、ビーム上流と下流で計 2 台設置されている。図 3.2 は WAGASCI 概略図である。125 cm × 125 cm × 46 cm の水タンクの内部にシンチレータや後述するエレクトロニクスが設置されている。WAGASCI 内部に設置されているシンチレータは格子状に組んだ構造をしており、内部は 0.6 トンの水で満たされている。シンチレータは図 3.3 に示した平行シンチレータとグリッドシンチレータの 2 種類を用いて、それらを図 3.4 に示すように組み上げていく。内部には 5.0 cm × 5.0 cm × 2.5 cm の水のセルが並ぶ構造となる。このようにシンチレータは三次元格子構造であるため、水とニュートリノが反応した際に放出する荷電粒子を全方向に高い検出効率で検出することが出来る。シンチレータの光は波長変換ファイバーを通じ、半導体型光検出器 MPPC によって検出する。

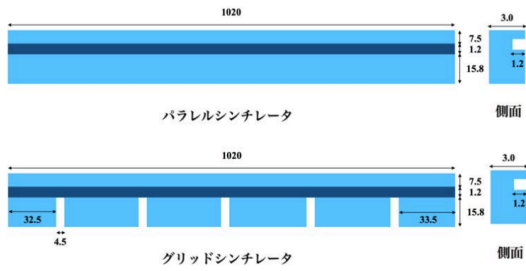


図 3.3: パラレルシンチレータ (上段) とグリッドシンチレータ (下段)
色の濃い部分に波長変換ファイバーを通す。

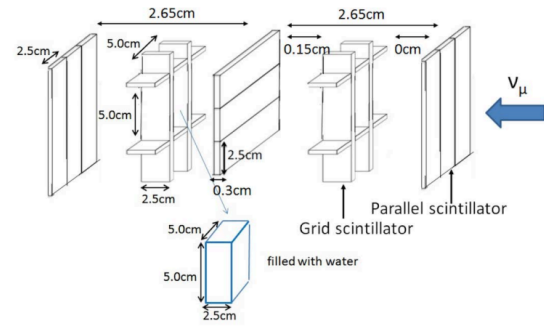


図 3.4: WAGASCI の内部構造

3.2.2 Proton Module

Proton Module は 2 台の WAGASCI の間に設置されている CH 標的ニュートリノ検出器であり, ビーム方向の中心部分に設置されている 2 種類のシンチレータバーで構成された tracking plane で囲まれた構造をしており, 内側領域 16 本は $25 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ の SciBar タイプと呼ばれるシンチレータ, 外側領域の 16 本は $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ の INGRID タイプと呼ばれるシンチレータである. 図 3.5 が Proton Module の概略図である.

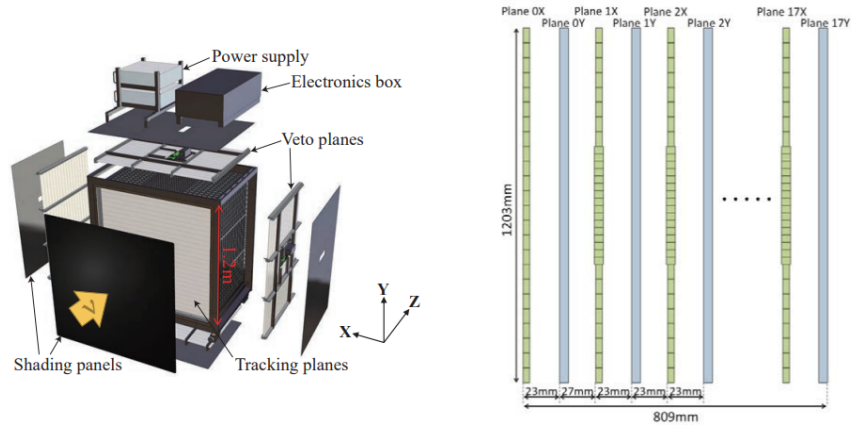


図 3.5: プロトンモジュールの構造 (左) とトラッキングモジュールの構造 (右)

3.2.3 Wall MRD (Muon Range Detector)

Wall MRD は WAGASCI, Proton Module の両サイドに 2 台設置されているミュオン飛程検出器であり, $1.8 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 30 \text{ mm}$ の鉄と $1.8 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 7 \text{ mm}$ のシンチレータをそれぞれ 11 層, 10 層交互に挟んだ構造をとっており, 主に大角度に散乱したミュオンの飛跡, 運動量を観測している. 図 3.6 の左が Wall MRD の概略図である. シンチレータには図 3.6 の右のように波長変換ファイバが波状に埋め込まれており, 両端から MPPC によって読み出しを行っている. また, Wall MRD は WAGASCI より 50 cm 離れた場所に設置されており, それぞれの検出器のヒットタイミングの時間差より, 荷電粒子の運動方向, また, 壁や床, Wall MRD 自身において反応したバックグラウンドのイベントを排除することが出来る. WAGASCI と Wall MRD の詳細については第 4 章で述べる.

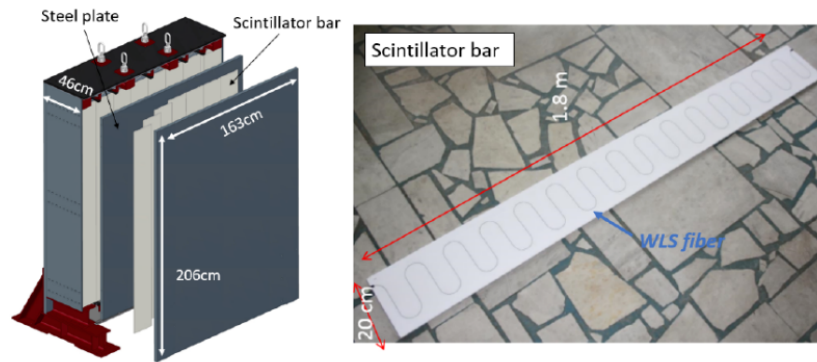


図 3.6: Wall-MRD の構造 (左) , 使用されているシンチレータバー (右)

3.2.4 Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector)

Baby MIND 検出器を横から見た外観を図 3.7 に示す. Baby MIND はビーム下流側に設置されているミュオン飛程検出器である. 大きさ 3500 mm × 2000 mm × 50 mm の鉄モジュールとシンチレータの層でサンドイッチされた構造をしており, WAGASCI においてニュートリノが反応することによって生成されたミュオンを, 1.5T の磁場によって曲げることで電荷の識別 (μ^+ と μ^-) , 及び運動量の測定を行っている. Baby MIND の詳細な説明は第 5 章で行う.

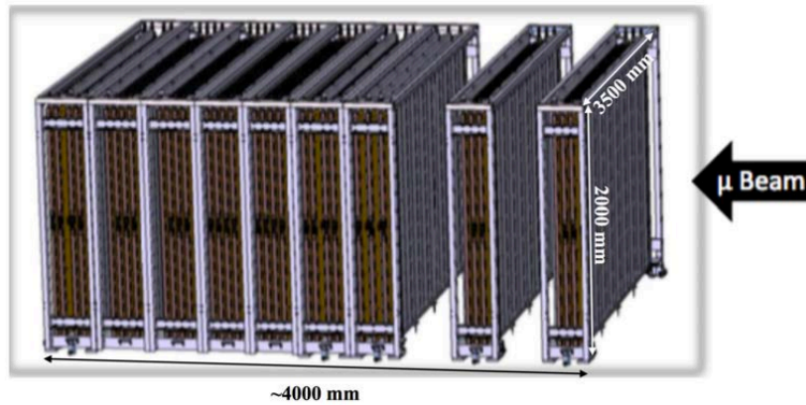


図 3.7: Baby MIND の外観

Chapter 4

WAGASCI 及び Wall MRD 検出器

4.1 MPPC

MPPC は浜松ホトニクス社によって開発された半導体型光検出器の一種であり, 入射した光子の数に応じた大きさのパルス信号を生成する. MPPC は低電圧で動作し, 高い増倍率, 高い検出効率, 高速応答, 優れた時間分解能, 広い感度波長範囲といった特長があり, フォトンカウンティングにおいて必要とされる性能を高いレベルで実現している. さらに, 磁場の影響を受けない, 衝撃などに強い, 入射光の飽和による焼き付きがないといった特徴を持っている. WAGASCI 検出器群ではシンチレータの光を波長変換ファイバを通じて観測するために用いられている. WAGASCI では図 4.1 の左の 32 ch の MPPC を配列した Array 型 MPPC が, Wall MRD では図 4.1 の右の単素子の Single 型 MPPC がそれぞれ用いられている.

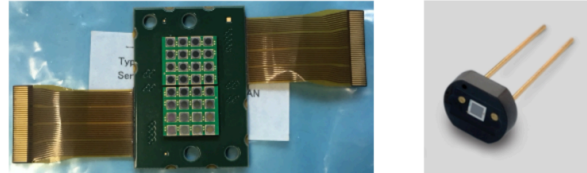


図 4.1: 左が Array 型 MPPC , 右が Single 型 MPPC

4.1.1 構造

MPPC の構造を図 4.2 に示す. MPPC はガイガーモードの APD とクエンチング抵抗を合わせて基本単位 (1 ピクセル) とし, 多数のピクセルを 2 次元に電氣的接続した構造になっている.

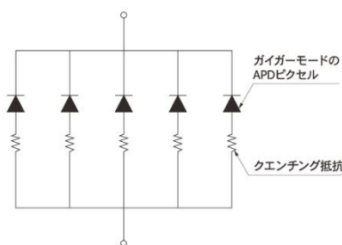


図 4.2: MPPC の構造

4.1.2 動作原理

MPPC はアバランシェフォトダイオード（以下 APD）ピクセルとクエンチング抵抗を 1 単位とし、それを並列接続した構造を持つ。APD は降伏電圧よりも約 5 V 高い逆バイアス電圧を印加することで、ガイガーモードと呼ばれる動作モードで運用することが出来る。ガイガーモードの MPPC に光子が入射すると、それによりはじき出された光電子によってアバランシェ増幅が発生し、ガイガー放電が起こる。アバランシェ増幅が発生すると内部電解が保たれている間はガイガー放電が継続する。ガイガー放電を止めて後に入射した光子を観測するには、動作電圧を下げるため APD に外部回路をもうける必要がある。具体的な例として、ガイガーモードで動作する APD にクエンチング抵抗を直列に接続し APD の動作電圧を下げることで放電を止める方法がある。

4.1.3 基本動作

MPPC のピクセルはそれぞれが光子を観測した際に同じパルスを出力する。複数のピクセルで発生したパルスは、重ね合わされて出力される。また、各ピクセルからの出力パルス数は 1 つであり、入射光子の数によって変化はしない。これは、1 ピクセルに複数の光子が入射した場合、入射光子数に対する MPPC 出力の直線性が悪化することを意味する。よって、入射光子数に合ったピクセル数の MPPC を選択する必要がある。

4.1.4 特性

- 降伏電圧

アバランシェ増幅が発生する最低電圧を降伏電圧と呼び、降伏電圧よりも大きい逆バイアス電圧をかけて MPPC を動作させる。降伏電圧は一般的に温度が高いほど大きくなる傾向があるが、これは半導体結晶中の格子振動が温度の上昇に伴い激しくなり、結晶内で生成されたキャリアが十分に加速されず、アバランシェ増幅が起こりにくくなるからである。

- 増倍率

MPPC の増倍率 M は、1 ピクセルが光子 1 個を検出して発生したパルスの電荷量 Q を、電気素量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ [C] で割った値で定義される。

$$M = \frac{Q}{e} \quad (4.1)$$

Q は印加電圧 V_R と降伏電圧 V_{BR} に依存する。1 ピクセルの容量を C とすると、 Q は式 (4.2) のように表される。

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (4.2)$$

式 (4.1)、(4.2) は、MPPC のピクセル容量が大きいほど、降伏電圧と印加電圧の差が大きいほど、増倍率が高くなることを示している。また、増倍率には温度特性があり、印加電圧の大きさが同じ場合、温度が上昇すると増倍率は低下する。

- ダークカウントレート

MPPC では光によって生成された電子だけでなく、熱的に発生した電子によってもパルスが発生する（ダークパルス）。ダークパルスはノイズの原因となる。ダークパルスは、暗状態において 0.5 p.e. の閾値を超えるパルスとし、観測されたダークパルスの数をダークカウントと呼ぶ。1 秒あたりのダークパルスの数をダークカウントレートと定義する。また、熱的に生じるキャリアによってダークパルスは発生するため周囲の温度に依存する。

- クロストーク

MPPC の 1 ピクセルに光が入射したときに、2 p.e. 以上のパルスが観測されることがある。この現象をクロストークと呼ぶ。これは、MPPC のピクセルでアバランシェ増幅が起こる過程で 2 次光子が発生し、これを他のピクセルが観測することによる現象である。

- アフターパルス

MPPC のピクセルでアバランシェ増幅が起こる過程で, 結晶欠陥にキャリアが捕獲されることがある. これが放出されると, 入射光子によるキャリアとともにアバランシェ増幅され, アフターパルスとして観測される. 入射光子によるパルスとアフターパルスは, 波形からは見分けがつかない.

- 暗電流

暗い状態で出力される電流を暗電流と呼ぶ.

- 時間分解能

MPPC の各ピクセルにおいて光入射後から信号が出力されるまでの時間には, ばらつきが生じる. このばらつきは TTS(Transit Time Spread) と呼ばれ MPPC に印加する逆電圧が大きくなると TTS は小さくなる.

4.2 エレクトロニクス

図 4.3 は WAGASCI 及び Wall MRD で用いられているデータ収集システムの概略図である.

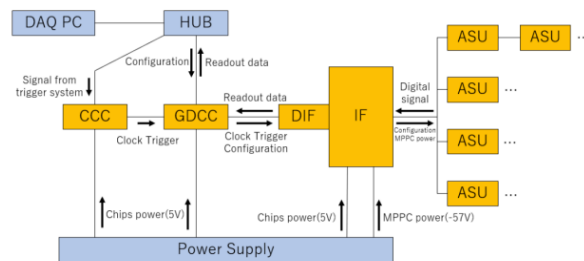


図 4.3: データ収集システム概略図

- Single MPPC Card

図 4.4 に Single MPPC card の写真を示す. Single MPPC card は ASU と single 型 MPPC の接続を介する基盤であり, 最大 32 個の single 型 MPPC を接続することが出来る. これは Wall MRD に搭載されている ASU にフラットケーブルを介して接続されており, 各面 3 枚の Single MPPC card に合計 80 個の single 型 MPPC が接続されている.

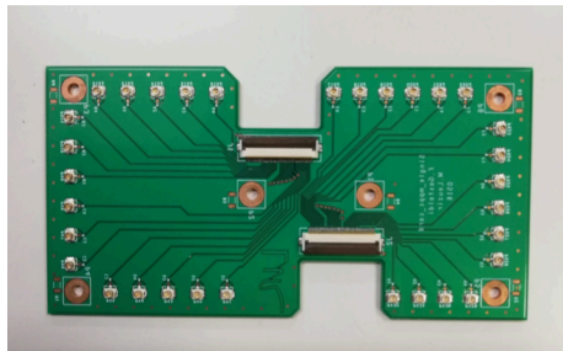


図 4.4: Single MPPC Card

- ASU (Active Sensor Unit)

図 4.5 に ASU の写真を示す. ASU はフランスの OMEGA 社によって開発された ASIC である SPIROC2D を搭載したフロントエンドボードであり, MPPC のアナログ信号をデジタル信号へ変換して送信する役割を担う. ASU と IF, 及び ASU 同士は Samtec 社の 50 pin のフラットケーブルを介して接続されている. また, ASU は WAGASCI の側面, 上面にそれぞれ 20 枚, Wall MRD の上面, 底面にそれぞれ 3 枚ずつ設置されている.

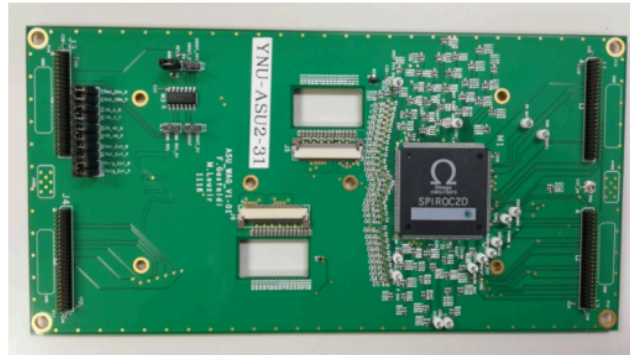


図 4.5: ASU

- SPIROC2D

SPIROC (Silicon Photomultiplier Integrated Read Out Chip) はフランスの OMEGA 社によって開発された SiPM からの信号読み出しを行う ASIC である. 図 4.5 の右側に搭載されている正方形の黒いチップが SPIROC2D である. MPPC からの電気信号をデジタル値に変換し DAQ PC に転送することが主な役割である.

- IF (InterFace)

図 4.6 に IF の写真を示す. Interface は ASU と DIF の間の信号のやり取りを担っている. このほかにも, Low Voltage 電源を通じて DIF 上の FPGA チップや ASU 上の SPIROC2D への電源供給, また, High Voltage 電源を通じて MPPC へのバイアス電圧供給も担っている. Interface は WAGASCI, Wall MRD ともに各面に 1 枚ずつ, 計 2 枚設置されている.

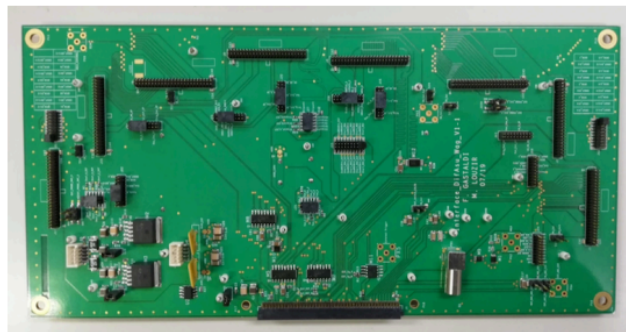


図 4.6: IF

- DIF (Detector InterFace)

図 4.7 は DIF の写真を示す. DIF は GDCC と HDMI ケーブルを介して接続されており, SPIROC2D によりデジタル変換されたデータの送信, DAQ PC 側で設定したヒット閾値の送信, 後述する Slow Clock

信号の同期などを行っている。また, DIF 上には FPGA チップが搭載されており, SPIROC2D の制御を行っている。



図 4.7: DIF

- GDCC (Giga Data Concentrator Card)

図 4.8 に GDCC , CCC の写真を示す。GDCC は DIF と DAQ PC のデータのやり取りを介する, FPGA チップが搭載されたボードであり, DAQ PC とはイーサネット ケーブルを通じて接続される。

- CCC (Clock and Control Card)

CCC はスピルトリガーの制御を行っているボードであり, GDCC とは HDMI ケーブル, DAQ PC とはイーサネットケーブルを通じて接続されている。GDCC の FPGA チップのファームウェアを書き換えることで CCC として使用することが出来る。



図 4.8: GDCC , CCC

4.3 エレクトロニクスの配置

WAGASCI では top , side にそれぞれ 1 枚の IF から各列 5 枚の ASU が 4 列, 計 20 枚ずつ設置されている。また, Wall MRD では top , bottom にそれぞれ 1 枚の IF から 3 枚の ASU が 1 列に設置されている。また, 各検出器にそれぞれ GDCC が設置されており, CCC は共通のものが用いられている。図 4.9 に WAGASCI , Wall MRD の各エレキの配置図を示す。また, 表 4.1 に WAGASCI , Wall MRD 1 台あたりの DIF , IF , ASU の枚数と MPPC のチャンネル数を示す。

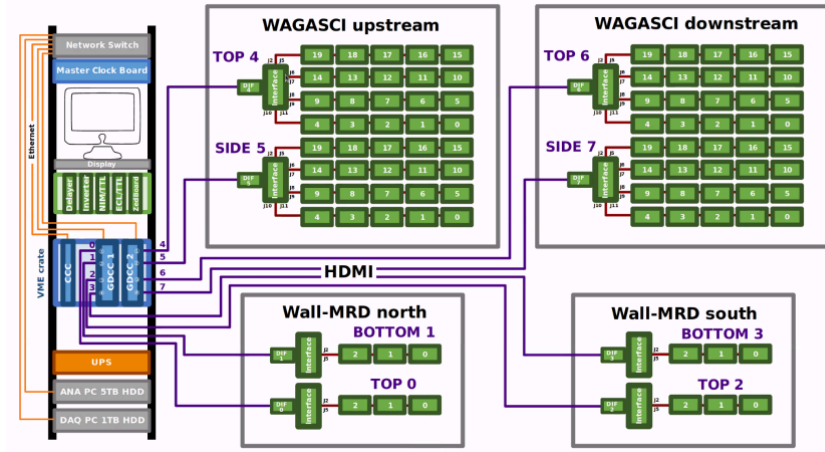


図 4.9: WAGASCI , Wall MRD の各エレクトロニクスの配置図

	WAGASCI	Wall-MRD
DIF、IF の枚数	2 枚 (top,side 各 1 枚)	2 枚 (top,bottom 各 1 枚)
ASU の枚数	40 枚 (top,side 各 20 枚)	6 枚 (top,bottom 各 3 枚)
MPPC のチャンネル数	1280	160

表 4.1: WAGASCI , Wall MRD 1 台あたりの DIF , IF , ASU の枚数と MPPC のチャンネル数

4.4 各種情報の記録

WAGASCI 及び Wall MRD で取得された情報は raw 形式のファイルで一旦保存され, このファイルを復号 (decode) することで記録された各種情報を閲覧することが出来る。復号されたファイルは root ファイルであり, 主に以下の情報が記録されている。

- spill count

WAGASCI , Wall MRD では start acq 信号と呼ばれる信号がデータ取得のトリガーとして用いられており, この信号が立ち上がっている間にデータ収集を行う。spill count は start acq 信号が立ち上がるたびに 1 ずつ増加し, start acq 信号が立ち上がりから立下りまでに取得された一つのデータ群をスピルと呼ぶ。

- chipid , chanid

ヒットした各イベントの ASU の chip number, MPPC の channel number が記録する。

- charge

ヒットしたイベントの ADC count を記録する。ADC は MPPC の波形を電荷積分したデジタル値である。

- time , BCID

ヒットしたイベントの TDC count , 及び BCID 値を記録する.

4.5 時間情報の記録

図 4.10 に時間情報記録システムの概略図を示す。WAGASCI , Wall MRD では slow clock 信号, 及び TDC ramp 信号を基準に検出時刻の測定を行っている。slow clock 信号は 580 ns 周期の矩形波信号であり, TDC ramp 信号は同じ周期で増減を繰り返す ramp 信号である。記録される時間情報は粗い時間情報、詳細な時間情報の 2 種類存在し, 前者は BCID , 後者は TDC によって記録される。

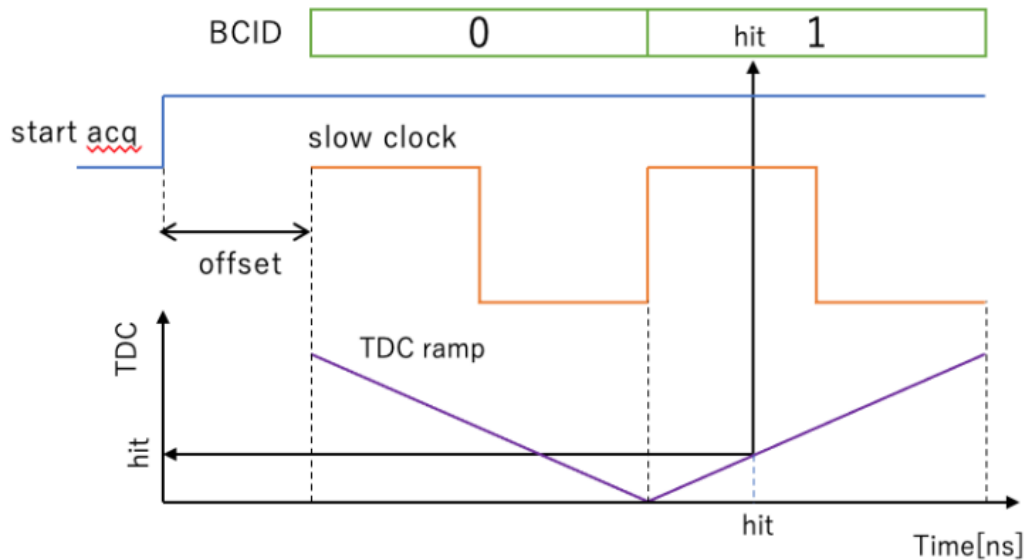


図 4.10: 時間情報記録システムの概略図

- start acq 信号

データ収集が開始される際に立ち上がる信号である。この信号が立ち上がっている間, WAGASCI , Wall MRD はデータ収集を行う。

- slow clock 信号

580ns 周期, duty50%の矩形波信号であり, 後述する BCID や TDC の基準となる信号である。slow clock 信号は CCC がビームトリガー信号を受信するごとに位相がリセットされる。

- BCID (Bunch Crossing ID)

BCID は粗い時間情報を記録するデジタルメモリであり, BCID の値は start acq 信号が立ち上がった後の slow clock 信号の立ち上がり回数を表している。よって, 一つの BCID の幅は 580 ns となる。各 BCID はその間にヒットしたイベント数を記録している。

- TDC (Time to Digital Converter)

TDC は各イベントで記録されるアナログ値であり, ヒットした時点の TDC ramp 信号の値を記録している。1 TDC count あたりおよそ 0.1 ns の長さを表している。また, TDC ramp 信号は BCID が偶数のときは右下がり, 奇数のときは右上がりの信号となる。

- Offset (TDC offset)

start acq 信号の立ち上がりと slow clock 信号の立ち上がりの間には一定の offset (TDC offset) が存在する.

Chapter 5

Baby MIND 検出器

5.1 検出器の詳細

Baby MIND は 18 層の Detector Module と 33 層の Magnet Module から成り, 電磁石を用いたミュオンレンジ検出器である. 第 3 章で述べた通りミュオンの曲がる方向から電荷を識別することができる.

5.1.1 Magnet Module

Magnet Module は鉄の板にコイルを巻きつけた構造をしている. Baby MIND の電磁石は一樣な磁場を作り, 磁場が外部に漏れないように作られている. また, 磁場が一樣な領域をより大きく確保するため鉄板には二箇所スリットが空いている. 図 5.1 に Magnet Module の外観を, 表 5.1 に Magnet Module の基本情報を示す.



図 5.1: Magnet Module の外観

モジュールの数	33
鉄プレートの大きさ (m ³)	$3.5 \times 2 \times 0.03$
スリットの大きさ (m ²)	2.8×0.01
フラックスリターン用のプレートの大きさ (m ³)	$0.32 \times 2 \times 0.01$
コイルの大きさ (m ²)	2.8×0.05
コイルの材質	アルミニウム

表 5.1: Magnet Module の基本情報

5.1.2 Detector Module

Baby MIND 検出器の構成要素は主にプラスチックシンチレータ, 波長変換ファイバー (Wave Length Shifter, WLS), MPPC である.

- プラスチックシンチレータ

プラスチックシンチレータはポリスチレンの板であり, $30\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ の反射材が塗布されている. 一つの Detector Module は X 層, Y 層の 2 種類から構成される. X 層はシンチレータをビーム軸を横切るよう水平方向に並べた層であり, Y 層はシンチレータを鉛直方向に並べた層である. それぞれの層に使われている. X 層のシンチレータは $210\ \text{mm} \times 1950\ \text{mm} \times 7.5\ \text{mm} \times 16$ 枚であり, Y 層のシンチレータは $3000\ \text{mm} \times 31\ \text{mm} \times 7.5\ \text{mm} \times 95$ 枚である. Baby MIND の磁石の中で荷電粒子は鉛直方向に曲がるため, Y 層のシンチレータをより細かく設置することで電荷識別能力を向上させている. X 層, Y 層それぞれのシンチレータの概要図を図 5.2 に示す.

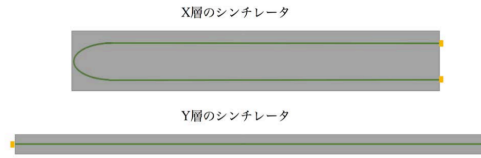


図 5.2: X 層, Y 層それぞれのシンチレータの概要図. 緑色の部分はファイバー, 黄色の部分は MPPC を表す.

- 波長変換ファイバー (Wave Length Shifter, WLS)

WLS は, シンチレーション光を吸収しそれよりも高い波長の光を再発光し, その一部を全反射によって光検出器に伝達する. 波長変換ファイバーはクラレ社製の口径 $1.1\ \text{mm}$ の WLS Y11 マルチクラッド S 型を用いている. 複数の反射率を持つ物質を重ねるマルチクラッドを用いることでシングルクラッドと比較して全反射の条件が緩くなり, より多くの光を検出器に伝達することができる. S 型とはポリエチレン繊維の揃ったファイバーコアを意味しており, 他のタイプに対して曲げに強い.

- MPPC

WAGASCI, Wall MRD 検出器と同様シンチレータの光を波長変換ファイバーを通じて観測するために用いられている. Baby MIND 検出器では Single 型の MPPC が用いられている. MPPC の構造や諸特性については第 4 章で述べた通りである.

5.2 エレクトロニクス

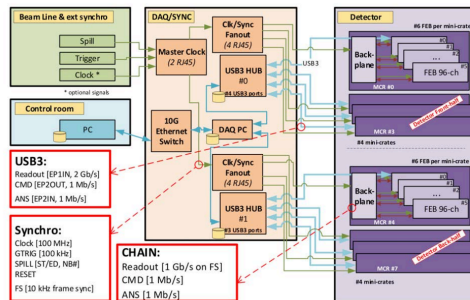


図 5.3: エレクトロニクス

図 5.3 に Baby MIND 検出器で用いられているデータ収集システムの概要図を示す. Detector の枠に入っているものが Baby MIND で使われているエレクトロニクスである.

- FEB(Front End Board)

FEB (Front End Board) は, MPPC で読んだ信号をデジタイズする. 一つの FEB は 3 つの信号処理用の ASIC チップ CITIROC を搭載し, 一枚で 32×3 個の MPPC の信号を読みだすことができる. CITIROC からは 32 ch の信号が逐次出力され, それを ADC チップでデジタイズする.

- CITIROC

Baby MIND では ASIC として CITIROC が用いられている. 第 4 章で述べた通り WAGASCI の ASU には SPIROC2D が搭載されているが, 双方の性能を表 5.2 で比較すると, 時間分解能やデッドタイムの改善により CITIROC は SPIROC よりも精度の高い測定ができる. また増幅率の高い High Gain と増幅率の低い Low Gain の両方で測定することができる.

エレクトロニクス	SPIROC	CITIROC
時間分解能	3 ns	100 ps
デッドタイム	200 ms	10 μ s
トリガーアウトプット	1	32
チャンネルあたりストックできるアナログ信号	16	1
チップあたりのチャンネル数	36	32

表 5.2: SPIROC と CITIROC の基本性能の比較

- MCR(Mini-Crate)

MCR(Mini-Crate) は, Back plane によりマスタークロックから送られてくるクロック信号を受け取り, FEB からの情報を USB を通してソフトウェアを動かす PC に送信するという役割を果たしている. 1 つの MCR で 6 つの FEB を収納でき, FEB は 1 枚で 96 ch まで読み出すことができるので 1 台の MCR で 580 ch を読むことができる.

5.3 信号情報の記録

CITIROC での信号情報の記録は以下の原理に基づいて行われる. CITIROC は 2 つの閾値を設定することができる. 一つは信号のトリガーとなる閾値 (閾値 1) であり, もう一つはデータを書き出す閾値 (閾値 2) である. 閾値 1 は CITIROC 内で共有し, 閾値 2 はチャンネルごとに設定する. 32 ch のうち一つのチャンネルで閾値 1 を越えると L1HOLD(HG/LG) の状態となり, 10 ms のゲートが開く. この状態でアナログパルスが入ると, 閾値 2 を超えたものについてのデータを書き出す. このとき, 閾値 2 を超えるパルスが二つ以上あったとすると, ADC のアナログメモリが 1 チャンネルあたり 1 つしかないため, 全てのパルスの ADC 値を記録することはできない. そのとき, 全てのパルスの振幅を比較し, 最大の振幅値を L1HOLD 期間で読み出した最後のパルスに High Gain, Low Gain の ADC 値として保存する (第 6 章では HG の ADC 値を hitAmpl, LG の ADC 値を LGhitAmpl とする). また, rising time (閾値を上回ったときの時刻) と falling time (閾値を下回ったときの時刻) は全てのパルスに対して保存する. 図 5.4 にこの読み出しの概念を示す. 簡単のため閾値 2 を超えたパルスが三つの場合で考えることとする. また, 実際の解析では ADC 値が書き込まれなかったパルスに対して, rising time と falling time の差 TOT (Time Over Threshold) の情報を用いて High Gain, Low Gain の ADC 値を再構成している (TOT calibration). TOT calibration の詳細については第 6 章で述べる.

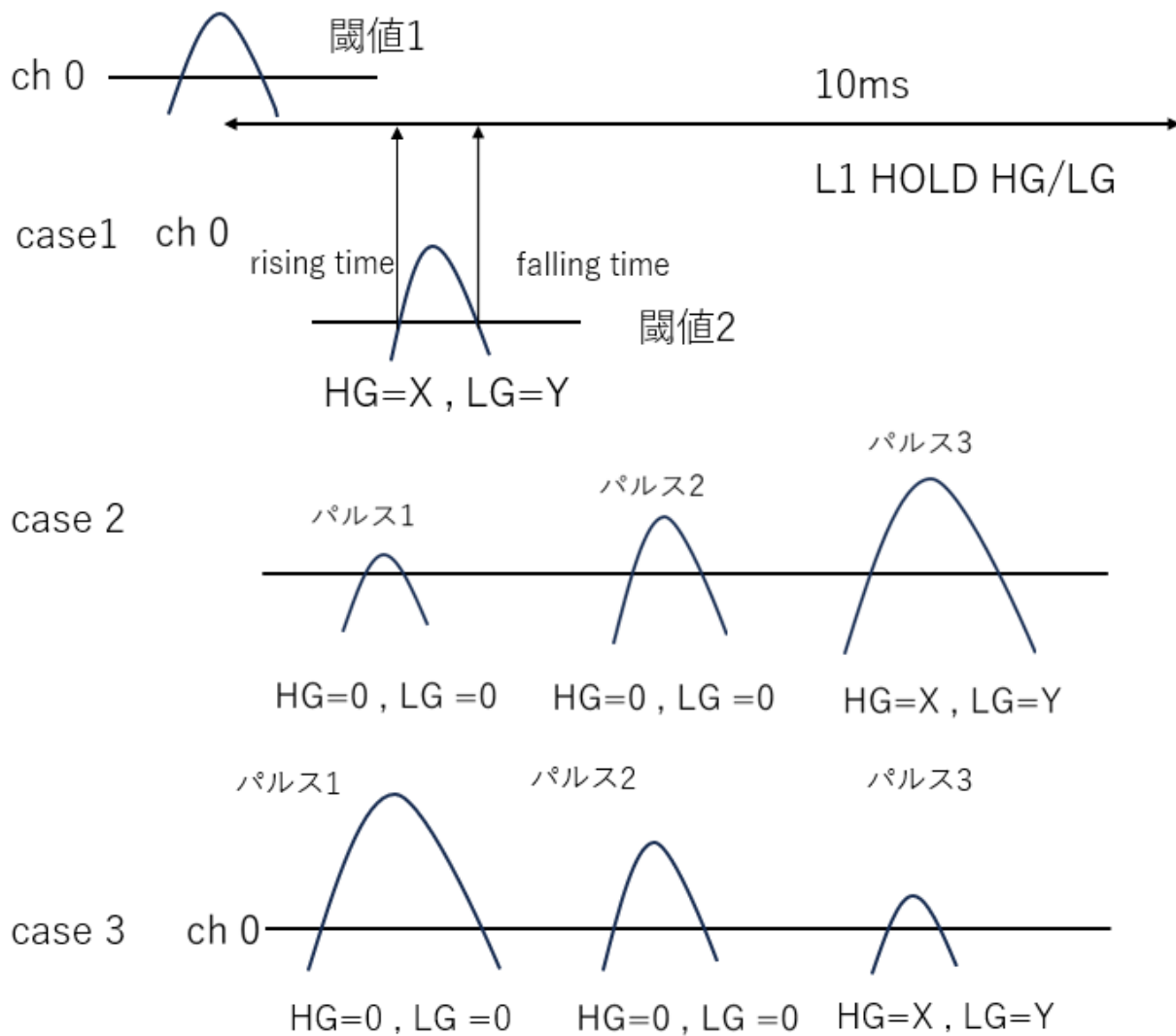


図 5.4: CITIROC による信号情報の読み出し原理. 32 ch のうちあるチャンネル (ここでは ch0) でトリガーがかかり L1HOLD 状態になる. 一つのアナログ信号のみ入った場合, rising time, falling time, High Gain 値そして Low Gain 値が記録される. ここで, case 1 では一つのアナログ信号のみが入る場合を表す. case 2 では三つのアナログ信号が入り最後に読み出した信号の振幅が最大である時を表す. case 3 では三つのアナログ信号が入り最後に読み出した信号の振幅が最大ではない場合を表す. パルス 3 で保存されている HG と LG の値はパルス 1 の値である.

Chapter 6

TOT calibration

6.1 TOT calibration

前章でも述べた通り, Baby MIND の信号を読み出すために搭載されている CITIROC はある HOLD 期間中にマルチヒットが生じると全てのパルスの情報を記録することができない. そこで, 記録されなかったパルスの情報を再構成するために TOT calibration という手法を用いている. 以下図 6.1 に TOT の定義を示す.

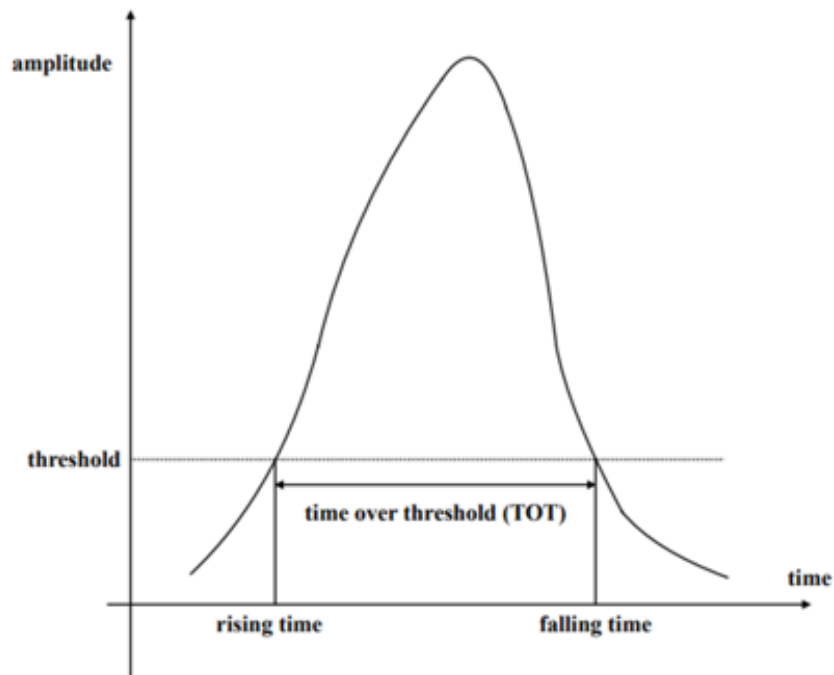


図 6.1: TOT の定義

6.2 解析手順

TOT calibration の解析手順を以下図 6.2 に示す.

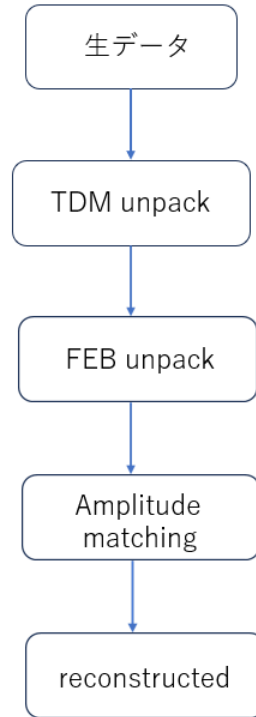


図 6.2: 解析手順

6.2.1 生データ

生データは,DAQ PC によって各 MCR ごとに一つのファイルとして保存される (MCR 0 7 まで 8 つ).

6.2.2 TDM unpack

解析手順で最初に行うのは TDMunpack である. これを実行すると, 生データのファイルが各 FEB ごと個別のデータファイルに分割される.

6.2.3 FEB unpack

次に, 各 FEB ごとのデータファイルに FEBunpack を実行することで, ヒット情報を格納するための FEB ごとの root ファイルが作成される (ファイル名は all.root). 以下図 6.3 と 6.4 にそれぞれ HG と LG の FEBunpack 後の hitAmpl と TOT の相関を表したプロットを示す. これらは T2K 実験 Run13 の 2024 年 6 月 16 日に取得した FEB 0 channel 0 についてのプロットである. 以下この章に示す全てのプロットも同様である. さて, 赤丸で囲った部分は CITIROC が L1HOLD 期間にマルチヒットを検出した際に生じる TOT と振幅のミスマッチによるものである. 原因はこの時点で作成される root ファイルには前章で述べた通り, CITIROC が信号を読み出す際, 全てのパルスの振幅を比較し, 最大の振幅値を L1HOLD 期間で読み出した最後のパルスに High Gain, Low Gain の (以下 HG, LG と記述する) ADC 値として保存するためである. つまり, L1HOLD 期間の最後に読み出したパルスが最大の振幅値を持っていなかった場合, 異なるパルスの振幅値と入れ替わることになりズレが生じる.

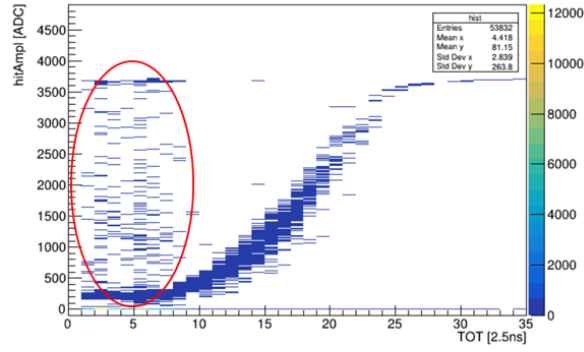


図 6.3: FEBunpack 後の HG の hitAmpl と TOT の相関

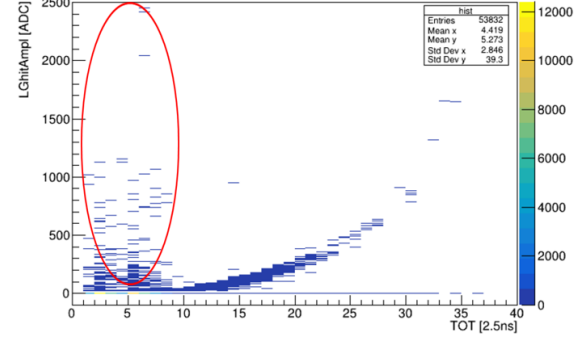


図 6.4: FEBunpack 後の LG の hitAmpl と TOT の相関

6.2.4 Amplitude matching

次に, 前で述べた TOT と振幅のミスマッチを修正するために Amplitude matching が実行される. ここでは, マルチヒットの中で TOT が最大のパルスに CITIROC によって記録された HG, LG の ADC 値の情報が保存し直され, それ以外のパルスの HG, LG の ADC 値には 0 が記録される. そして, この過程が反映された新たな root ファイルが作成される (ファイル名は all_matching.root). 以下図 6.5 と図 6.6 にそれぞれこの段階で補正された HG と LG の hitAmplMatched (Amplitude matching 後の HG と LG の ADC 値) と TOT の相関を表したプロットを示す. 図 6.3 と図 6.4 の赤丸で囲った部分のズレがなくなっていることが分かる.

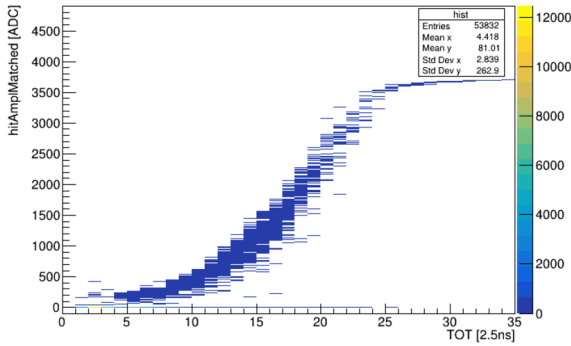


図 6.5: Amplitude matching 後の HG の hitAmplMatched と TOT の相関

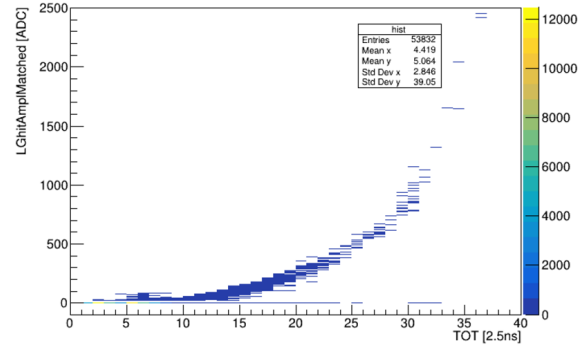


図 6.6: Amplitude matching 後の LG の hitAmplMatched と TOT の相関

6.2.5 reconstructed

最後に calibration が実行され, CITIROC によって 0 と記録された HG と LG に対してそれぞれ TOT を用いることでデータが再構築される. ここでも root ファイルが新たに作成される (ファイル名は all_reconstructed.root). 以下図 6.7 に HG と LG の相関を示す. HG の ADC カウントが 3500 付近でダイナミックレンジの限界に到達し値が飽和する前まで HG と LG は互いに比例する. また, 図 6.8, 図 6.9 にそれぞれ HG と TOT の相関, LG と TOT の相関を示す. ここで, HG と TOT の相関は TOT が 0 以上 6 以下の範囲と 18 以上の範囲において 1 次の多項式に, 6 以上 18 以下の範囲で 4 次の多項式にフィットされる. LG と TOT の相関は TOT が 0 以上 10 以下の範囲と 29 以上の範囲において 1 次の多項式に, 10 以上 29 以下の範囲で 4 次の多項式にフィットされる. 図 6.8, 図 6.9 の相関を用いると TOT を測定することで光量を推定することができる. 以下図 6.10 と図 6.11 にそれぞれこの手法を用いた calibration 完了後の HG と LG の hitAmplReconstructed と TOT の相関を表したプロットを示す.

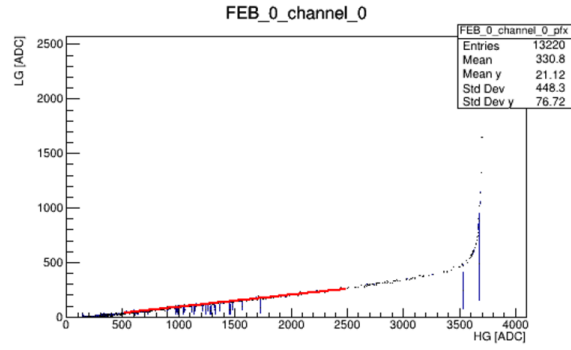


図 6.7: HG と LG の相関

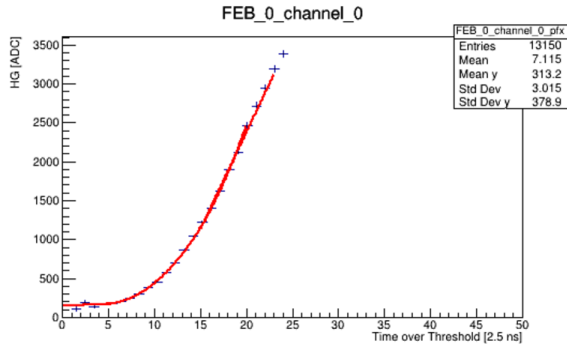


図 6.8: HG と TOT の相関

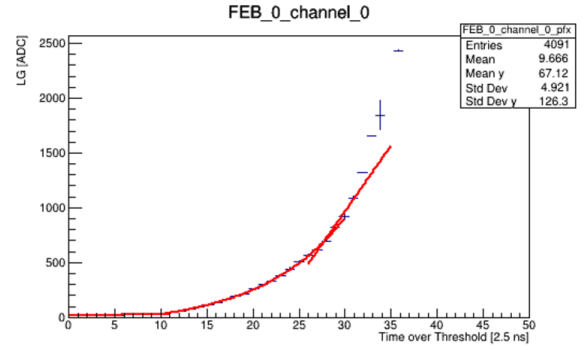


図 6.9: LG と TOT の相関

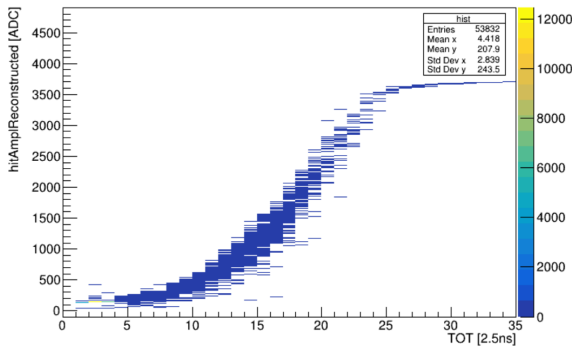


図 6.10: calibration 後の HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関

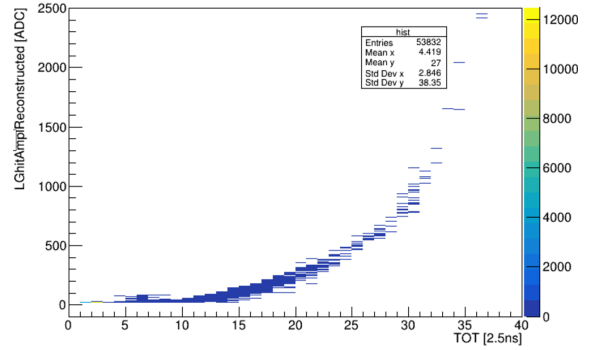


図 6.11: calibration 後の LG の hitAmplReconstructed と TOT の相関

6.3 各条件ごとの *hitAmpl* と *TOT* の相関

ここでは, 6.2 のそれぞれ HG と LG の *hitAmpl* , *hitAmplMatched* , *hitAmplReconstructed* と *TOT* の相関についてさらに条件を分けて示す. 条件は次の 4 つである.

- *hitAmpl* $\neq 0$ かつ *hitAmplMatched* $\neq 0$

この条件に当てはまるデータは, *hitAmpl* にも *hitAmplMatched* にも値が入っているため, CITIROC によって HG と LG の値が記録された振幅が最大であるパルスデータのデータである. 図 5.4 では, case 1 のマルチヒットが起きなかった場合や case 2 のパルス 3 (マルチヒットが起きた中で最大の振幅を持つパルスが一番最後のパルスであるとき) がこの条件に当てはまる.

- *hitAmpl* = 0 かつ *hitAmplMatched* = 0

この条件に当てはまるデータは, *hitAmpl* にも *hitAmplMatched* にも値が入っていないため, CITIROC によって HG と LG の値が記録されなかったパルスのデータである. 図 5.4 では, case 2 のパルス 2 や case 3 のパルス 2 がこの条件に当てはまる. このパルスは *TOT calibration* によって値が再構築される.

- *hitAmpl* $\neq 0$ かつ *hitAmplMatched* = 0

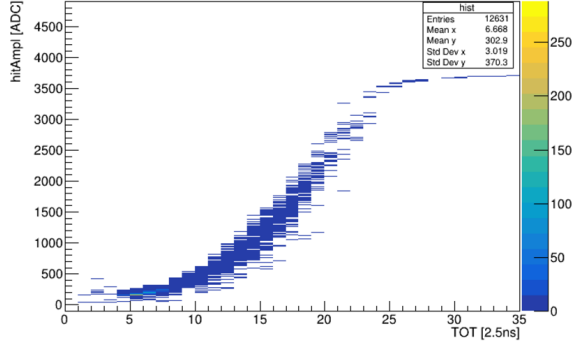
この条件に当てはまるデータは, *hitAmpl* には値が入っており, *hitAmplMatched* には値が入っていないため, CITIROC によって HG と LG の値が記録されたが, 振幅の値が最大ではなかったパルスのデータである. 図 5.4 では, case 3 のパルス 3 (マルチヒットが起きた中で最大の振幅を持つパルスが一番最後のパルスではないとき) がこの条件に当てはまる.

- *hitAmpl* = 0 かつ *hitAmplMatched* $\neq 0$

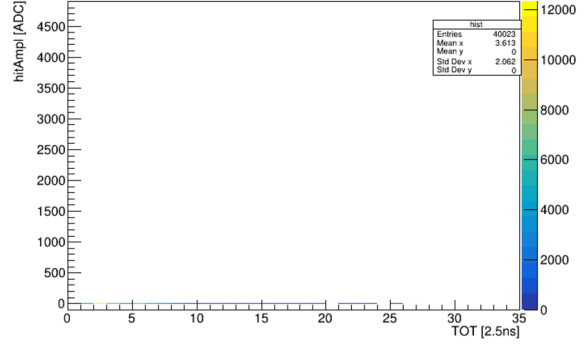
この条件に当てはまるデータは, *hitAmpl* にはデータが入っておらず, *hitAmplMatched* にはデータが入っているため, CITIROC によって HG と LG の値が記録されなかったパルスではあるが, その中でもマルチヒットが起きた中で最大の振幅をもつパルスのデータである. 図 5.4 では, case 3 のパルス 1 が当てはまる.

まず, 上の 4 つの条件に分けて図 6.12 に HG の *hitAmpl* と *TOT* の相関を表したプロットを, 図 6.13 に HG の *hitAmplMatched* と *TOT* の相関を表したプロットを, 図 6.14 に HG の *hitAmplReconstructed* と *TOT* の相関を表したプロットを示す.

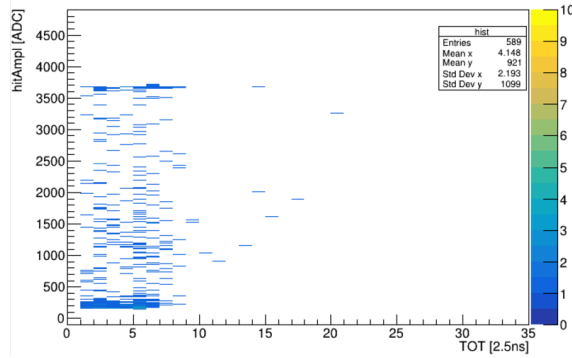
次に, 上の 4 つの条件に分けて図 6.15 に LG の *hitAmpl* と *TOT* の相関を表したプロットを, 図 6.16 に LG の *hitAmplMatched* と *TOT* の相関を表したプロットを, 図 6.17 に LG の *hitAmplReconstructed* と *TOT* の相関を表したプロットを示す.



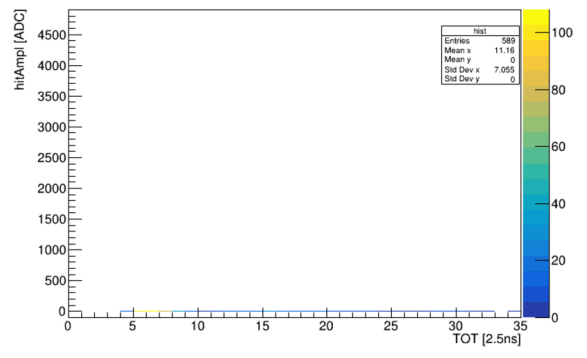
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での HG の hitAmpl と TOT の相関



(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での HG の hitAmpl と TOT の相関



(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での HG の hitAmpl と TOT の相関



(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での HG の hitAmpl と TOT の相関

図 6.12: 各条件ごとの HG の hitAmpl と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで振幅と TOT のミスマッチが起こっているため図 6.3 の赤丸で囲った部分が生じる. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.3 である.

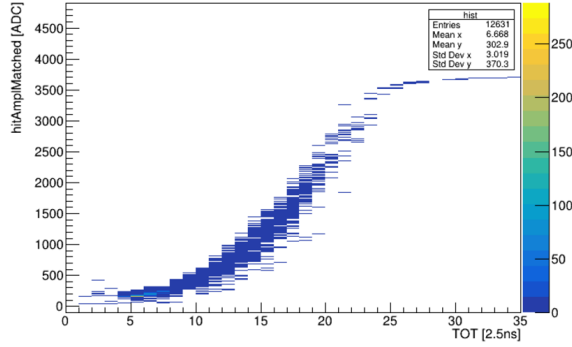
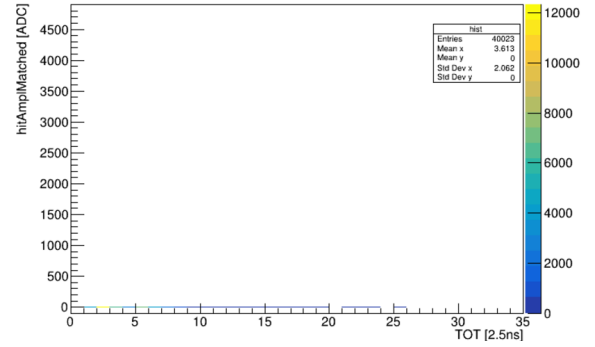
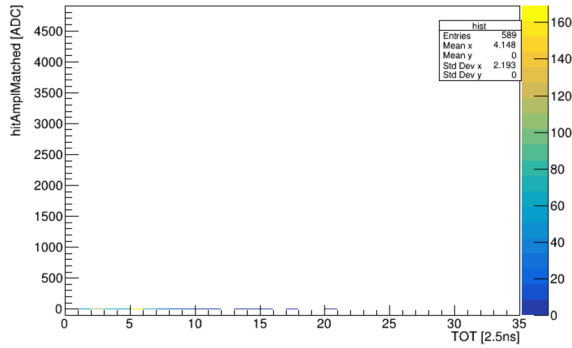
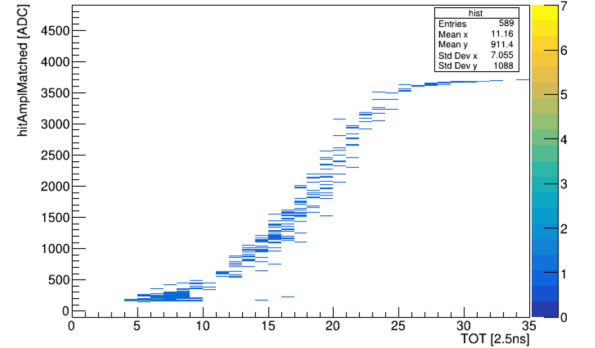
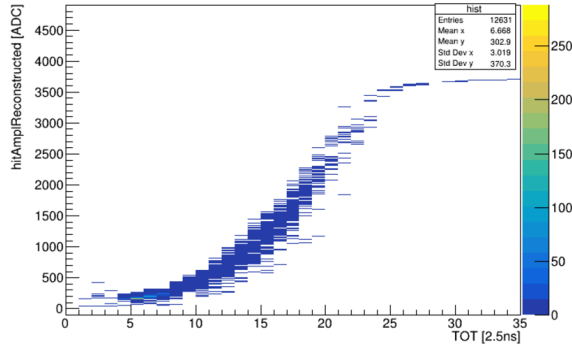
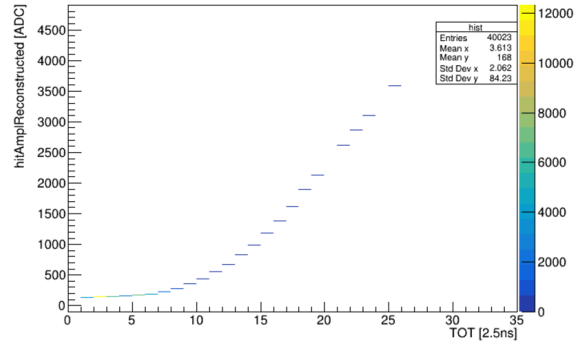
(a) $hitAmpl \neq 0$ かつ $hitAmplMatched \neq 0$ での HG の $hitAmplMatched$ と TOT の相関(b) $hitAmpl = 0$ かつ $hitAmplMatched = 0$ での HG の $hitAmplMatched$ と TOT の相関(c) $hitAmpl \neq 0$ かつ $hitAmplMatched = 0$ での HG の $hitAmplMatched$ と TOT の相関(d) $hitAmpl = 0$ かつ $hitAmplMatched \neq 0$ での HG の $hitAmplMatched$ と TOT の相関

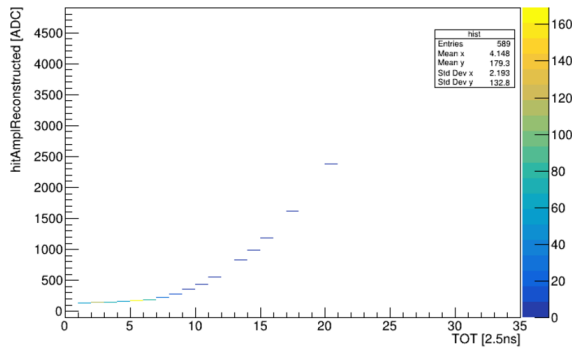
図 6.13: 各条件ごとの HG の $hitAmplMatched$ と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで生じた振幅と TOT のミスマッチが修正されている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.5 である.



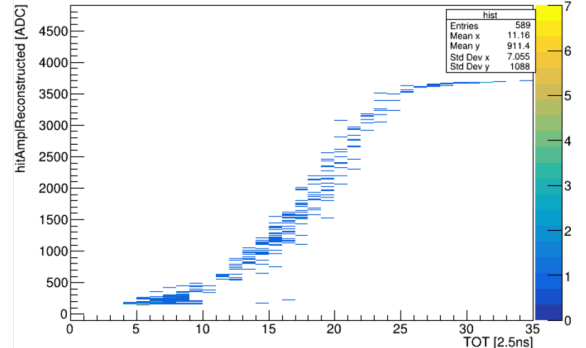
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関

図 6.14: 各条件ごとの HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関. (a) と (d) のプロットは Amplitude matching 後のデータがそのまま引き継がれている.(b) と (d) のプロットには TOT calibration が実行されており離散的なプロットとなっている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.10 である.

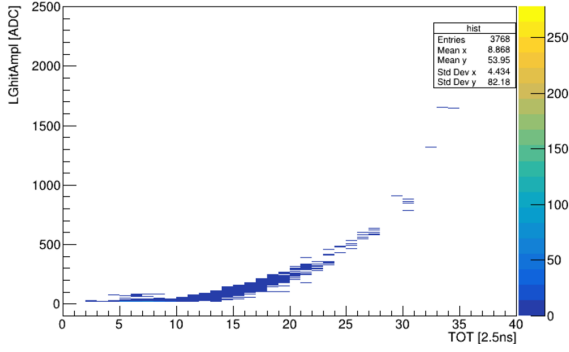
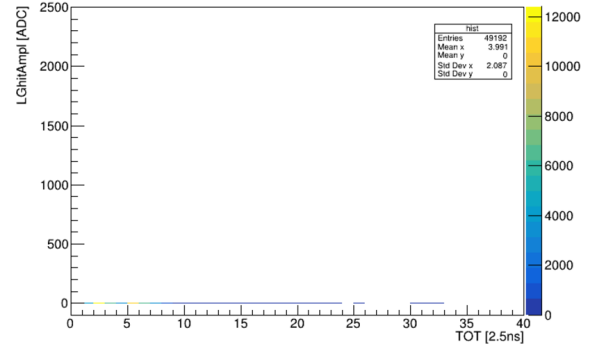
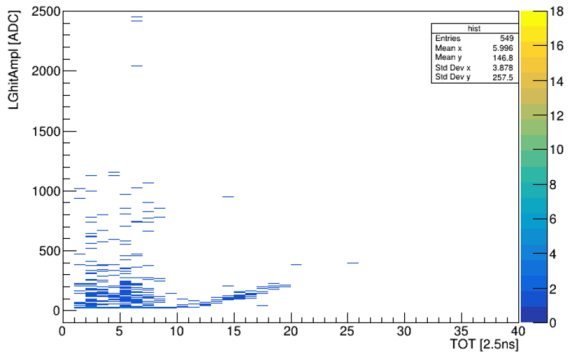
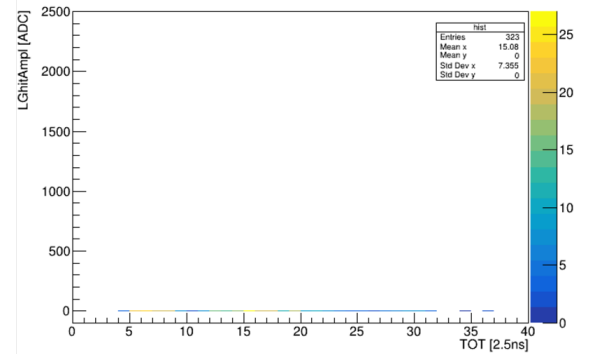
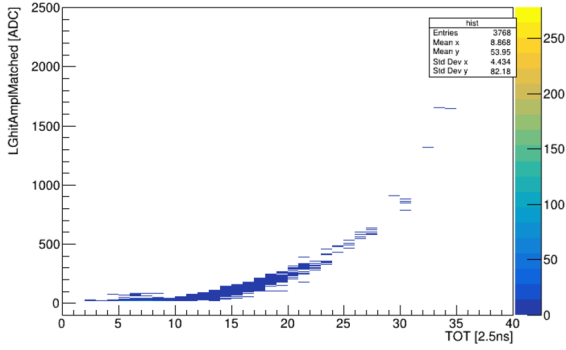
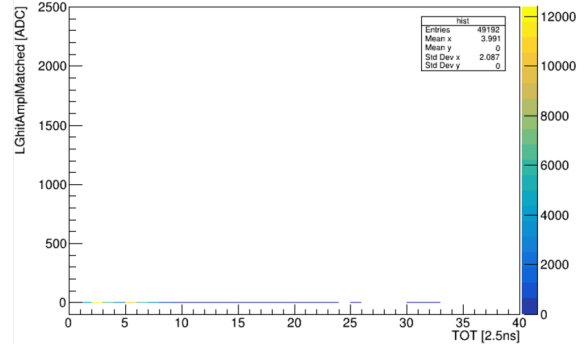
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の hitAmpl と TOT の相関(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の hitAmpl と TOT の相関(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の hitAmpl と TOT の相関(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の hitAmpl と TOT の相関

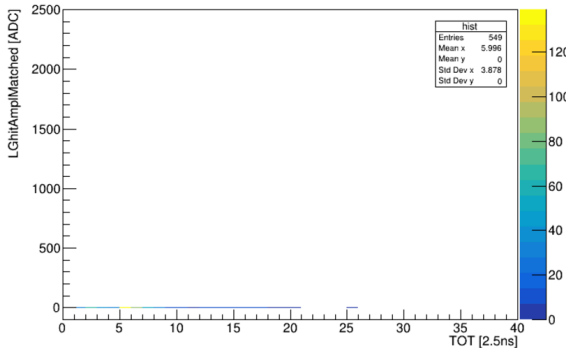
図 6.15: 各条件ごとの LG の hitAmpl と TOT の相関. (c) のプロットと (d) のプロットで振幅と TOT のミスマッチが起こっているため図 6.4 の赤丸で囲った部分が生じる. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.4 である.



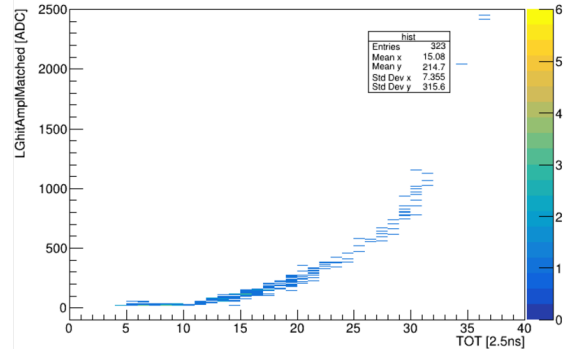
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の hitAmplMatched と TOT の相関



(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の hitAmplMatched と TOT の相関

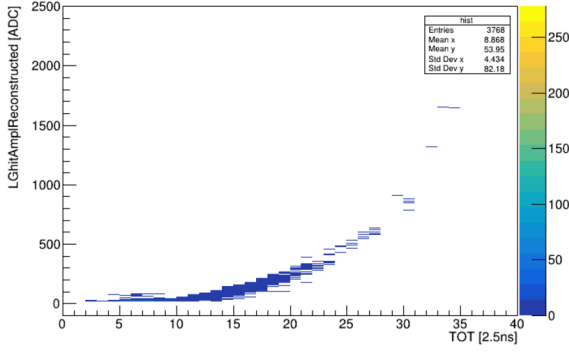


(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の hitAmplMatched と TOT の相関

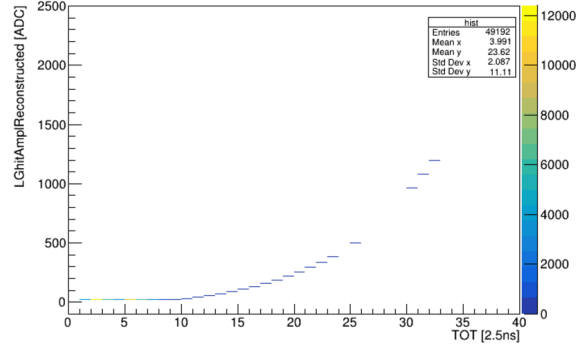


(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の hitAmplMatched と TOT の相関

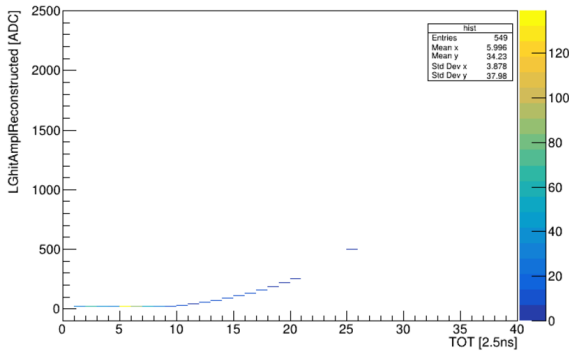
図 6.16: 各条件ごとの LG の hitAmplMatched と TOT の相関.(c) のプロットと (d) のプロットで生じた振幅と TOT のミスマッチが修正されている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.6 である.



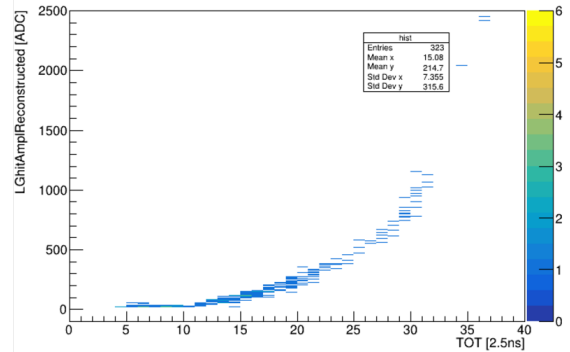
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での LG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での LG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関

図 6.17: 各条件ごとの LG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関. (a) と (d) のプロットは Amplitude matching 後のデータがそのまま引き継がれている.(b) と (d) のプロットには TOT calibration が実行されており離散的なプロットとなっている. これらのプロットを一つにまとめたものが図 6.11 である.

6.4 TOT calibration の改良

2023 年から 2024 年にかけて T2K 実験 Run13 と Run14 が行われた。以下図 6.18 と図 6.19 にその際に解析したデータを示す。ここでは Run14 で取得した 2024 年 11 月 28 日のデータを示す。図 6.18 の TOT が 25 以上の範囲において、プロットにズレが生じていることが分かる。TOT が 25 以上の範囲において、直線的かつ離散的に右肩上がりになっているプロットは TOT calibration が実行されたプロットである。反対に、水平になっているプロットは CITIROC によって始めに保存されたパルスのプロットである。図 6.7 の HG と LG の相関のプロットに示した通り、HG 値は ADC カウントが 3500 付近でダイナミックレンジの限界に到達するため、図 6.18 の CITIROC で読み出されたプロットは ADC カウントが 3500 付近で水平になる。それに対して、TOT calibration によるプロットは用いられる式が TOT が 18 以上の範囲において、1 次の多項式となっているため直線的になる。これが原因となってズレが生じる。また、図 6.19 の LG では TOT が 29 以上の範囲において、1 次の多項式でフィットされるはずだが、その直線上からデータが大きくずれている。これらのプロットは全て CITIROC によって始めに保存されたパルスのプロットである。この原因は TOT の値が飽和していることが考えられる。そして、図 6.20 にこのときの `hitAmplReconstructed` と `LGhitAmplReconstructed` の相関を表すプロットを示す。赤丸で示した部分において HG 値の ADC カウントがダイナミックレンジの限界に到達した部分である。青丸で示した部分が TOT calibration が実行された部分であり、直線的なプロットになっている事が分かる。

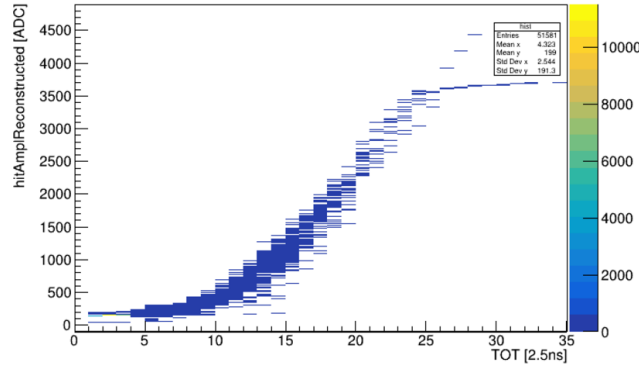


図 6.18: HG の `hitAmplReconstructed` と TOT の相関

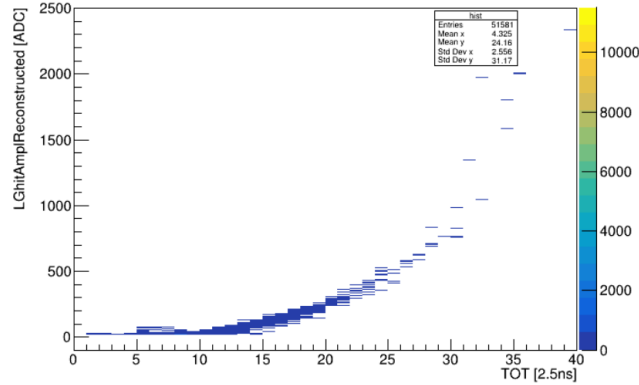


図 6.19: LG の `hitAmplReconstructed` と TOT の相関

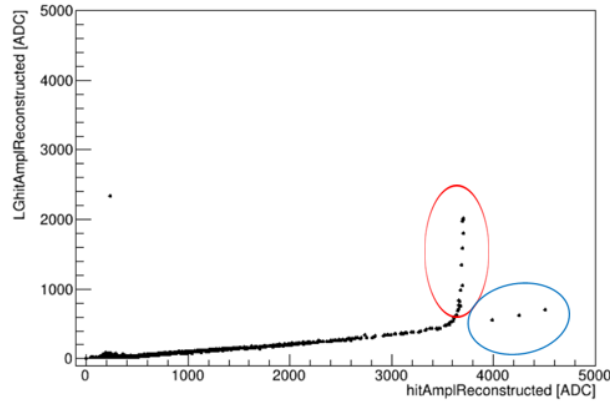


図 6.20: hitAmplReconstructed と LGhitAmplReconstructed の相関

そこで, HG の ADC カウントがダイナミックレンジの限界に到達したイベントについて rising time と falling time のデータは記録されているため TOT が 25 以上のイベントに対して TOT calibration によって値を推定することとした. なお, LG についての TOT calibration に変更はしていない. 以下, 図 6.21 に上記の変更後の HG の hitAmplReconstructed と TOT の相関のプロットを, 図 6.22 に変更後の hitAmplReconstructed と LGhitAmplReconstructed の相関を表すプロットを示す. 図 6.21 では, HG の ADC カウントが飽和したイベントが TOT calibration によって 1 次の多項式でフィットされ直線上にプロットされていることがわかる. また, 図 6.22 では hitAmplReconstructed が 5000 付近までは HG と LG の比例関係を示す直線の延長線上にプロットされているように見える. しかし, hitAmplReconstructed が 5000 を超えてくると直線上から外れたところにプロットされている. この原因は, 前にも述べた通り TOT が飽和し, 正確に TOT を記録できていないところにあると考える.

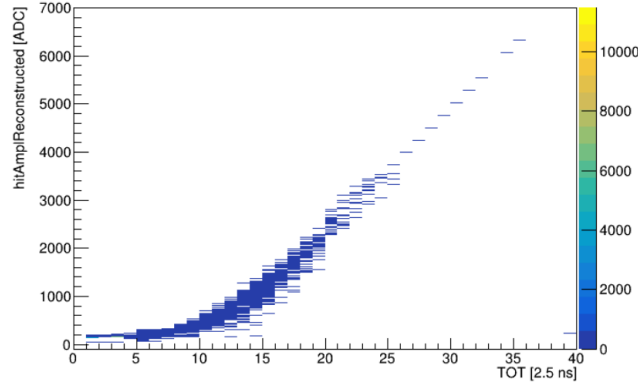


図 6.21: 変更後の hitAmplReconstructed と TOT の相関

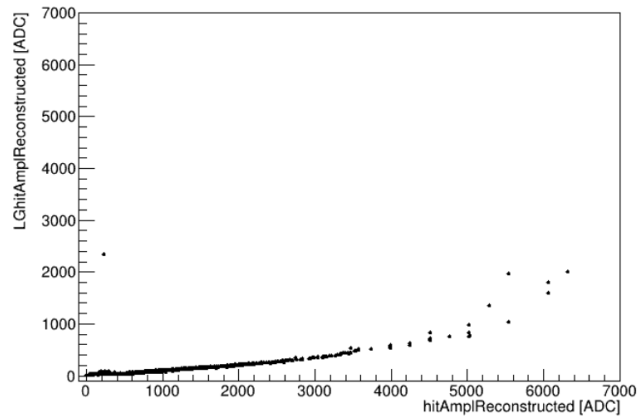
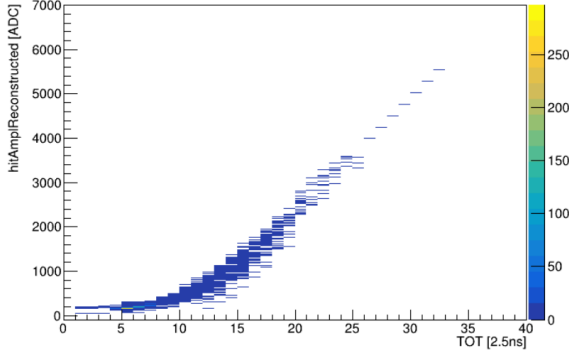
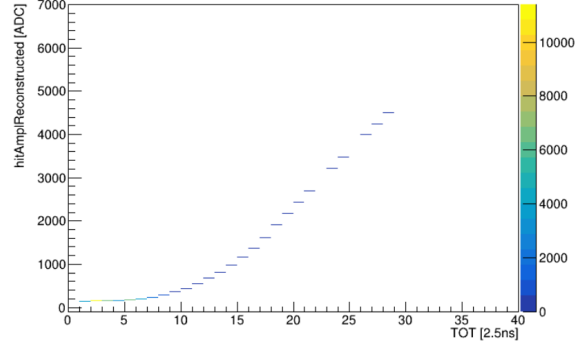


図 6.22: 変更後の hitAmplReconstructed と LGhitAmplReconstructed の相関

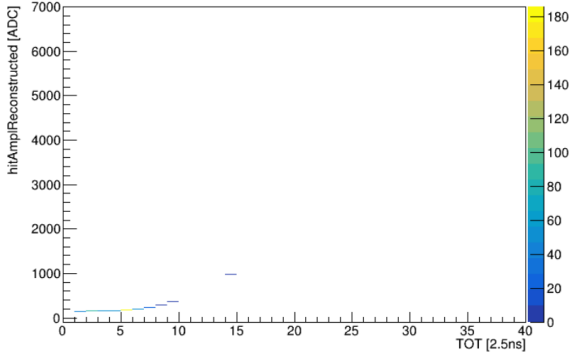
ここでも 6.3 同様, 図 6.21 TOT calibration 改良後の各条件ごとの TOT と HG の hitAmplReconstructed の相関についてのプロットを図 6.23 に示す. 図 6.14 と見比べると, HG の値が飽和し水平なプロットになっている部分に対して, TOT calibration が実行され HG の値を推定することができるようになった. なお, 2024 年 11 月 28 日のデータでは値が飽和したイベント数は 67 イベントであり, 全イベント 51581 に対して約 0.12% であった.



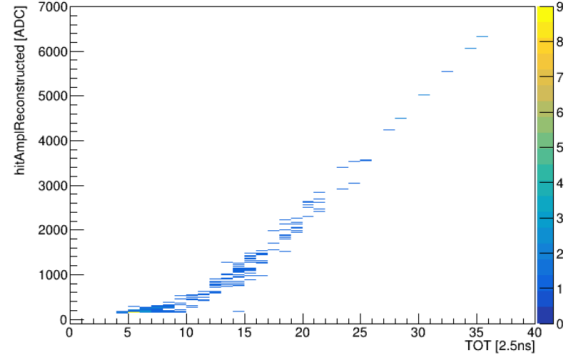
(a) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での TOT calibration 改良後の HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(b) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での TOT calibration 改良後の HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(c) $\text{hitAmpl} \neq 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} = 0$ での TOT calibration 改良後の HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関



(d) $\text{hitAmpl} = 0$ かつ $\text{hitAmplMatched} \neq 0$ での TOT calibration 改良後 HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関

図 6.23: TOT calibration 改良後の HG の $\text{hitAmplReconstructed}$ と TOT の相関

Chapter 7

ニュートリノビームデータの取得状況

2023 年 11 月から 2024 年 6 月まで行われた T2K 実験 Run13 と 2024 年 11 月から始まった T2K 実験 Run14 においてニュートリノビームデータを取得した. 以下にそのデータの一部を示す.

7.1 Baby MIND

7.1.1 ADC 分布

以下に Baby MIND 検出器の各 FEB の MPPC ごとの ADC 分布を示す. 図 7.1 が FEB 0, 図 7.2 が FEB 13 の ADC 分布である. この分布を見ることで Baby MIND の MPPC の状態を確認する. 図 7.2 FEB 13 の ADC 分布において channel 87 のエントリー数が少ないのは MPPC にかけている電圧 HG と LG の値が適切でない, あるいはそもそもそのチャンネルが dead channel であるかのいずれかである. このようなチャンネルについては, ビーム期間中の毎週水曜日に行われる calibration によって MPPC にかける電圧を適切な値に修正する. それでもエントリー数が少ない場合は dead channel であるため MPPC の交換をする必要がある. また, エントリーが多いチャンネル (FEB 0 channel 11 など) はノイジーチャンネルである. これらは直接データに影響は及ぼさないと考えているが, calibration によってかける電圧の調整を行う.

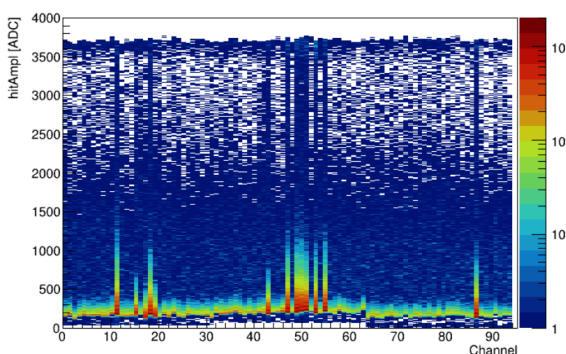


図 7.1: FEB 0 の ADC 分布

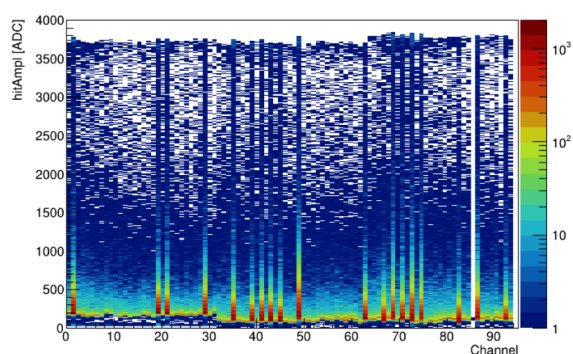


図 7.2: FEB 13 の ADC 分布

図 7.1 や図 7.2 では各 FEB ごとの ADC 分布を示したが, さらに細かく各 MPPC ごとの ADC 分布を示す. 以下, 図 7.3 は FEB 0 channel 0 の ADC 分布である. このプロットを見るとエントリー数が 0 のイベントが多い事が分かる (青丸で囲んだ部分). この原因は CITIROC システムのアナログパルス信号の読み出しが考えられる. 5.3 で説明したように, L1HOLD 状態で一つのチャンネルに複数のアナログパルスが入ってきた場合は, 振幅が小さいパルスの High Gain, Low Gain の値が 0 と記録される. その結果, エントリー数が 0 のイベントが

多くなる. 図 7.4 に FEB 0 channel 0 のエントリー数が 0 のイベントを除いた ADC 分布を示す (図 7.3 の赤丸で囲んだ部分). このプロットが CITIROC によって始めに記録されたパルスの ADC 分布であり, MPPC の特性を表したフィンガープロット (入射した光子の数に応じた大きさのパルス信号) を確認することができた.

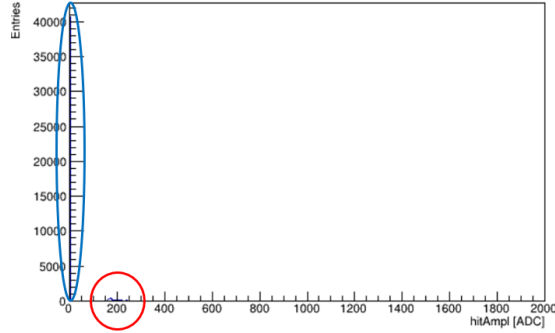


図 7.3: FEB 0 channel 0 の ADC 分布

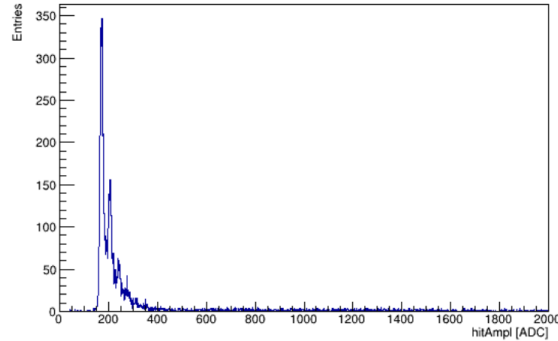


図 7.4: FEB 0 channel 0 でエントリー数 0 のイベントを除いた ADC 分布

さて, 5.3 で説明した通り, 同じ L1HOLD 期間でマルチヒットが起きたとき立ち上がり時刻 (rising time) と立ち下がり時刻 (falling time) については全てのパルスに対して記録されるため, 図 7.3 の ADC が 0 とカウントされたイベントに対して TOT (Time Over Threshold) を用いて光量を再構成することができる (TOT calibration). TOT calibration 後の FEB 0 channel 0 の ADC 分布を図 7.5 に示す. 線形な成分 (赤丸で囲んだ部分) が図 7.4 のプロットに当たり, CITIROC によって始めに保存されたパルスの波高である. 対して, 離散的な成分は TOT calibration によって光量が再構成された部分である. また, 図 7.6 に TOT calibration 後の FEB 0 の全チャンネルの ADC 分布を示す. TOT calibration 前後で ADC 分布に大きな違いは見られなかった.

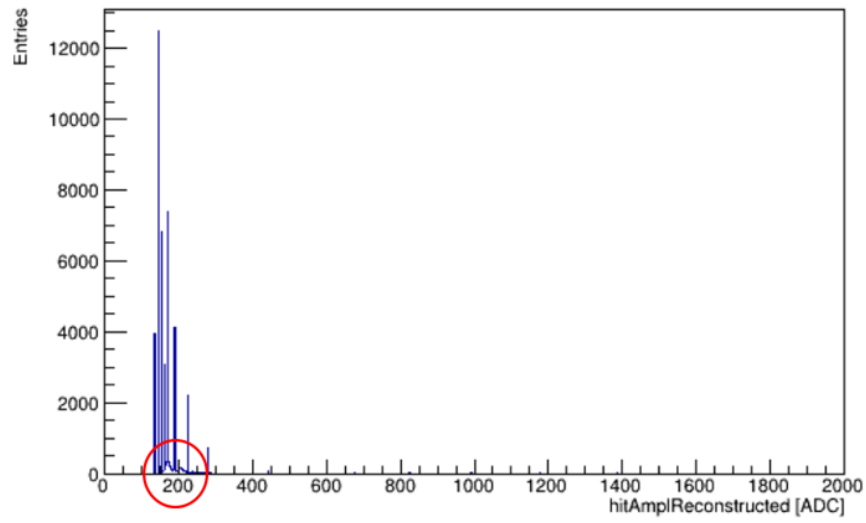


図 7.5: FEB 0 channel 0 の TOT calibration 後の ADC 分布

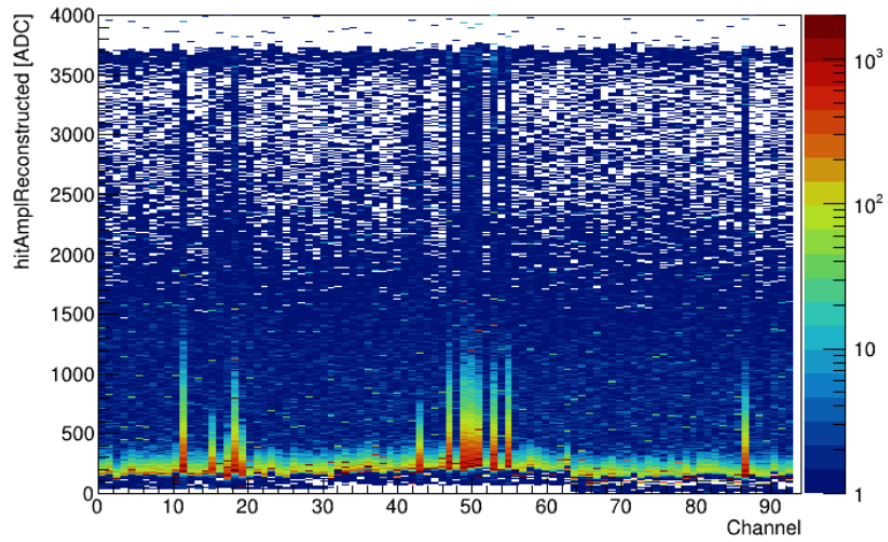


図 7.6: FEB 0 の TOT calibration 後の ADC 分布

7.1.2 TDC 分布

2.2 で説明した通り, ニュートリノビームは陽子ビームを炭素標的に衝突させることにより作られる. 陽子ビームは 1 スpill 当たり 8 バンチ構造をとり, 1.36 秒間隔で生成される. 陽子ビームの構造を図 7.7 に示す.

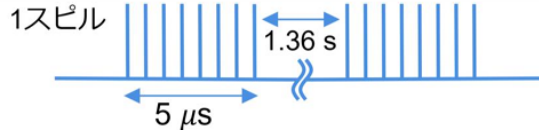


図 7.7: 陽子ビームの構造

T2K 実験 run13 と run14 から得たデータの TDC 分布において, ニュートリノビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができた. 図 7.8 は FEB 0 の TDC 分布であり, 図 7.9 は全 FEB の TDC 分布である. 図 7.9 でデータが入っていない FEB があるのは元々 FEB が設置されていないからである. また, 図 7.10 は FEB 0 で取得したデータの時間と波高の相関を表すプロットである. いずれも 8 バンチ構造を確認することができ, Baby MIND で安定してビームデータを取得できた.

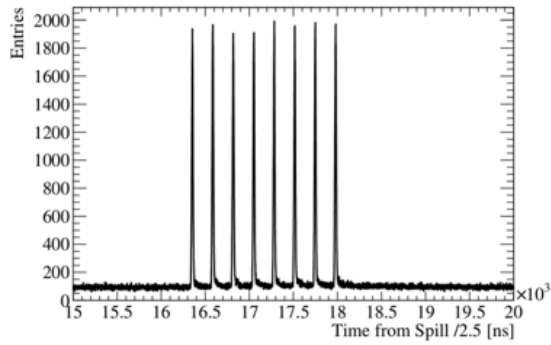


図 7.8: FEB 0 の TDC 分布

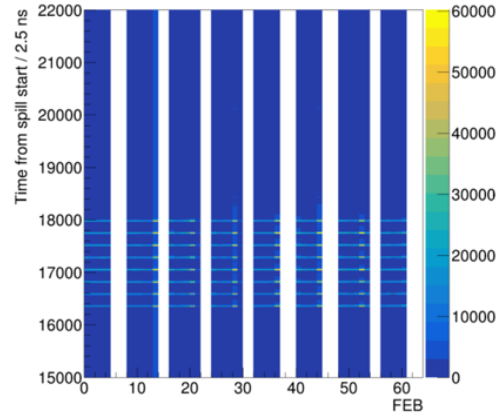


図 7.9: Baby MIND の TDC 分布

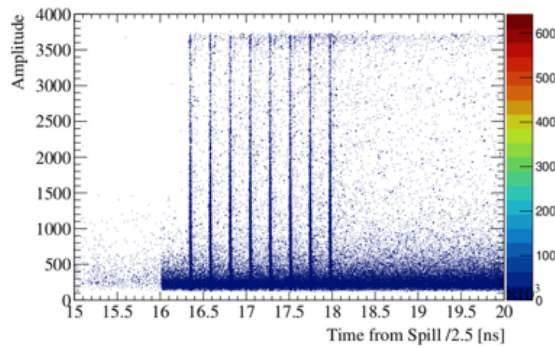


図 7.10: 時間と波高の相関

7.1.3 シンチレータチャンネルごとのヒット数分布

5.1.2 で説明した通り, Baby MIND の Detector Module はシンチレータをビーム軸を横切るように水平方向に並べた X 層とシンチレータをビーム軸に対して鉛直方向に並べた Y 層から成る. それぞれ 2 つの MPPC の同期信号を取る理由は, ファイバーの減衰長を考慮したためである. 現在使用している波長変換ファイバーの減衰長はおよそ 3 m であり, 端でシンチレータが光った場合は半分程度の光を失ってしまうため, 両端から読み出すことでそれを補完している. 以下, 図 7.11 に X 層のヒット数分布を図 7.12 に Y 層のヒット数分布を示す. それぞれ横軸はプレーン番号, 縦軸はチャンネル番号である. なお, Y 層のヒット数分布に関しては Z 軸のエントリーを対数スケールに設定している.

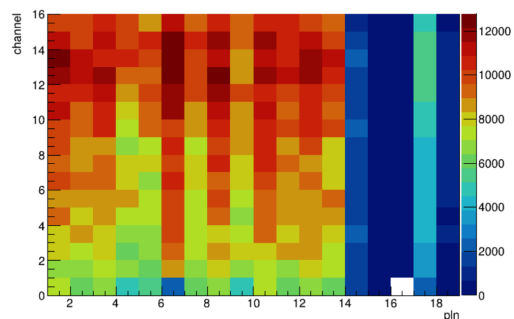


図 7.11: X 層のヒット数分布

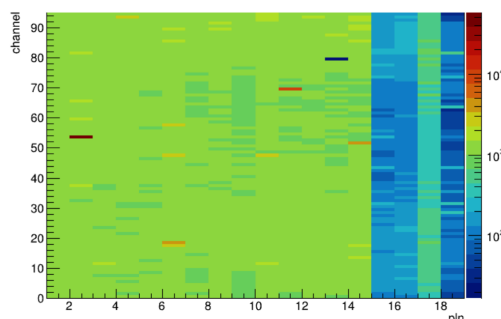


図 7.12: Y 層のヒット数分布

X 層のプロットにおいてチャンネル番号の大きい領域でエントリー数が多いのは Baby MIND のビーム方向から見て左側がビームラインに近くビーム由来のミュオンがより多くヒットすると考えられる. また, いずれのプロットも下流の層でエントリー数が少ないが, この原因はまだ明らかになっていない.

7.1.4 各 MPPC チャンネルでの光量分布

7.1.3 ではシンチレータごとのヒット数分布を示したが, ここでは各 MPPC チャンネルごとの光量分布を示す. まず, 図 7.13 に X 層 Top, 図 7.14 に X 層 Bottom の MPPC チャンネルの光量分布を示す. なお, これら二つは pln 6 channel 12 の光量分布であり, Top と Bottom の光量分布に大きな違いは見られなかった. また, 図 7.15 に Y 層 Right, 図 7.16 に Y 層 Left の MPPC チャンネルの光量分布を示す. なお, これら二つは pln 11 channel 69 の光量分布であり, Right と Left の光量分布に大きな違いは見られなかった. ここで, 離散的な成分は TOT calibration によるものであり, 連続的な成分は CITIROC によって記録された最も振幅の大きなパルスに依るものである (matching 後振幅が最大となったパルス).

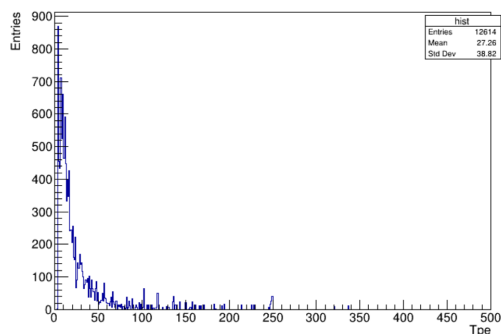


図 7.13: X 層 Top pln 6 channel 12 の光量分布

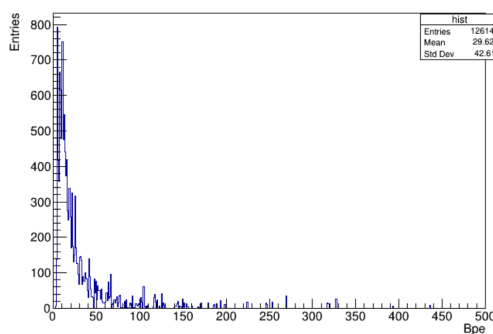


図 7.14: X 層 Bottom pln 6 channel 12 の光量分布

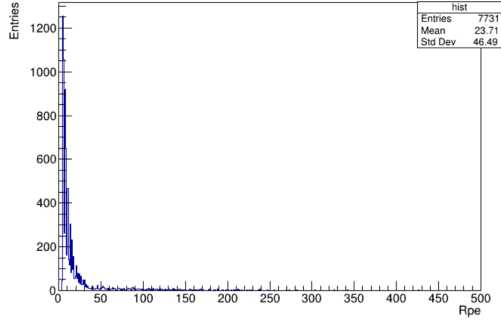


図 7.15: Y 層 Right pln 11 channel 69 の光量分布

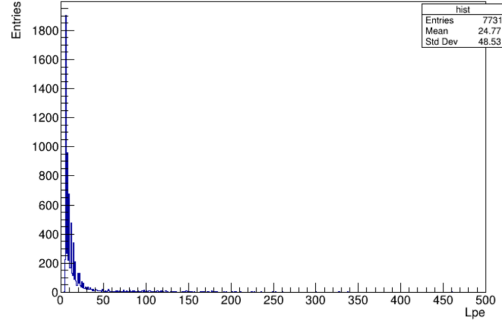


図 7.16: Y 層 Left pln 11 channel 69 の光量分布

7.2 WAGASCI & Wall MRD

7.2.1 ADC 分布

4.2 で説明した通り, WAGASCI と Wall MRD は同じ DAQ システムを使用している. 図 7.17 は Wall MRD north top CHIP 0, 図 7.18 は WAGASCI upstream top CHIP 0 の ADC 分布である. 各 ASU で MPPC の channel 毎に charge の ADC count とヒット数を確認できる. Wall MRD north top の channel 16 にヒットがないのは MPPC が接続されてないからである. この分布を見ることで dead channel や明かりを付けた状態と消した状態を見比べることで光漏れを検出している channel がないかを確認している. WAGASCI と Wall MRD の MPPC は Threshold を ADC カウント 700 付近に設定している. しかし, 図 7.17 では ADC カウント 700 以下に多くの期待していないヒットが見られる. この原因については明らかになっていない.

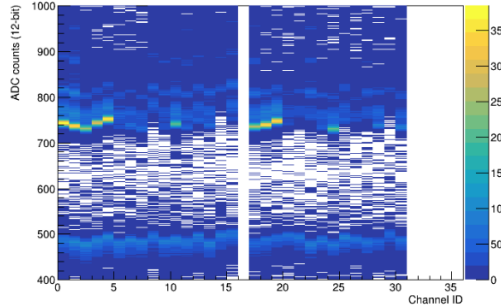


図 7.17: Wall MRD north top の ADC 分布

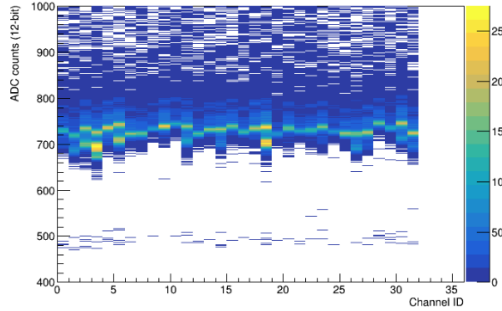


図 7.18: WAGASCI upstream top の ADC 分布

7.2.2 BCID 分布

4.5 で説明した通り, BCID は WAGASCI と Wall MRD の粗い時間情報の記録に用いられており, 1 BCID カウントあたり 580ns である.

T2K 実験 run13 (2024 年 3 月まで) での結果

図 7.19 に run13 2024 年 2 月 13 日に取得したデータの Wall MRD north top, 図 7.20 に run13 2024 年 2 月 13 日に取得したデータの WAGASCI upstream side の BCID 分布を示す. いずれのプロットもニュートリノビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができ, 安定してデータ取得をすることができた. また, 4.3 で説明した通り, これら 2 つの DIF の他にも 6 つの DIF が設置されているが, それらについても同様にビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができた.

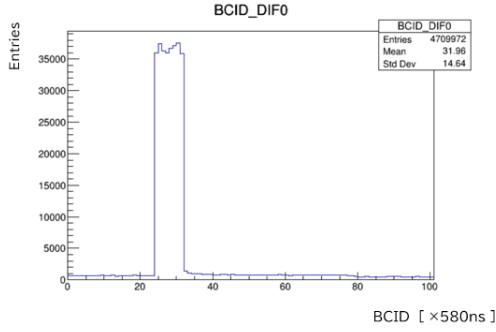


図 7.19: run13 2024 年 2 月 13 日の Wall MRD north top の BCID 分布

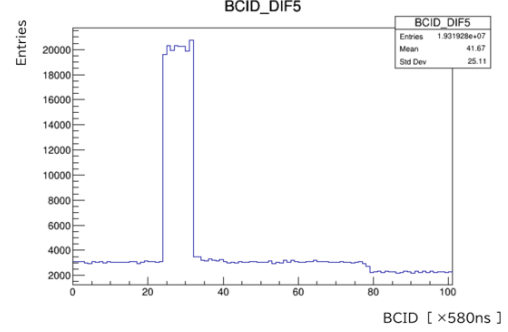


図 7.20: run13 2024 年 2 月 13 日の WAGASCI upstream side の BCID 分布

T2K 実験 run13 (2024 年 6 月以降) , run14 での結果

図 7.21 に run14 2024 年 6 月 12 日に取得したデータの Wall MRD north top , 図 7.22 に run14 2024 年 6 月 12 日に取得したデータの WAGASCI upstream side の BCID 分布を示す. いずれのプロットも 9 つのピークが確認され, ニュートリノビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができなかった. また, 他 6 つの DIF についても同様の結果であった. さらに詳細な時間情報を確認するため, TDC 分布を次項で述べる.

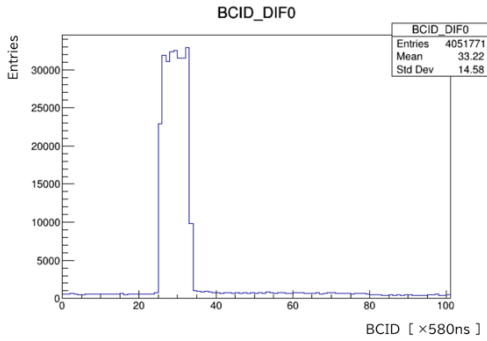


図 7.21: run14 2024 年 6 月 12 日の Wall MRD north top の BCID 分布

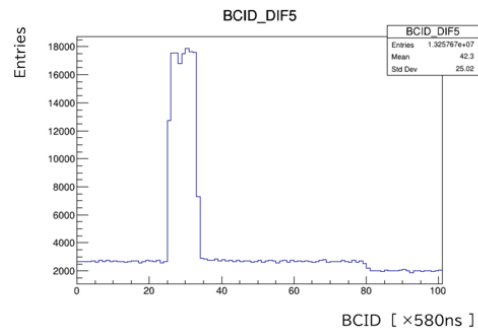


図 7.22: run14 2024 年 6 月 12 日の WAGASCI upstream side の BCID 分布

7.2.3 TDC 分布

4.5 で説明した通り, WAGASCI と Wall MRD は, 粗い時間情報の BCID と細かい時間を記録する TDC という 2 つの時間情報を組み合わせて記録している. BCID は 580ns ごとに 1 ずつ記録されていく. 一方で, TDC は 1 つの BCID において 4096 カウントしている.

T2K 実験 run13 (2024 年 3 月まで) での結果

図 7.23 に run13 2024 年 2 月 13 日に取得したデータの Wall MRD north top , 図 7.24 に run13 2024 年 2 月 13 日に取得したデータの WAGASCI upstream side の TDC 分布を示す. いずれのプロットも BCID より詳細な時間情報が確認できる TDC においてニュートリノビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができ, 安定してデータ取得をすることができた. また, 他 6 つの DIF についても同様の結果が得られた.

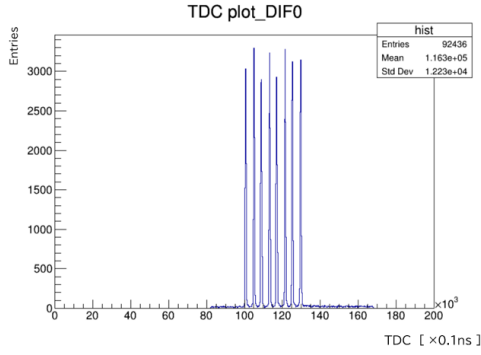


図 7.23: run13 2024 年 2 月 13 日の Wall MRD north top の TDC 分布

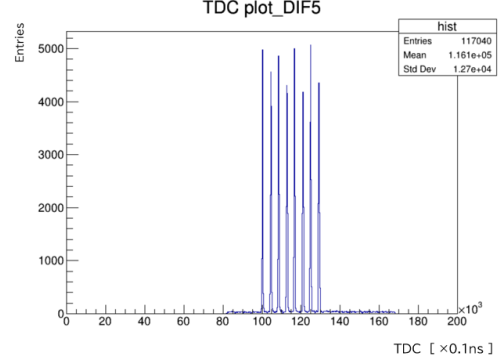


図 7.24: run13 2024 年 2 月 13 日の WAGASCI upstream side の TDC 分布

T2K 実験 run13 (2024 年 6 月以降) , run14 での結果

図 7.25 に run14 2024 年 6 月 12 日に取得したデータの Wall MRD north top , 図 7.26 に run14 2024 年 6 月 12 日に取得したデータの WAGASCI upstream side の TDC 分布を示す. いずれのプロットもニュートリノビームラインからの 8 バンチ構造を確認することができなかった. また, 他 6 つの DIF についても 8 バンチ構造を確認することはできなかった.

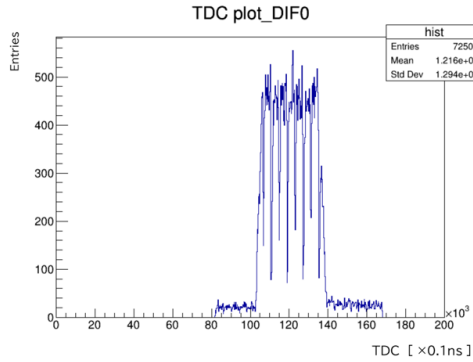


図 7.25: run14 2024 年 6 月 12 日の Wall MRD north top の TDC 分布

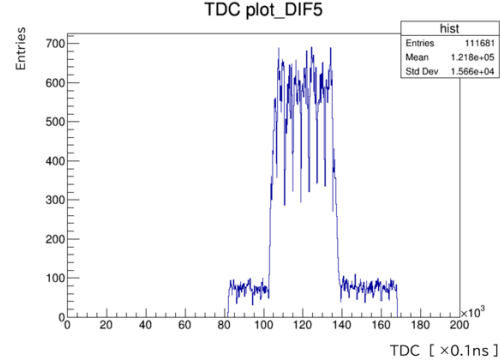


図 7.26: run14 2024 年 6 月 12 日の WAGASCI upstream side の TDC 分布

WAGASCI Wall MRD 共に BCID 分布, TDC 分布で 2024 年 6 月以降のデータで 8 バンチを確認することができなくなった. この原因についてであるが, 2024 年 5 月に run13 の 6 月のビームに向けた準備期間において, run13 の 11 月, 2 月に使用していた CCC を新しい CCC へと交換したことが考えられる. 4.2 で説明した通り, ビームトリガーの情報は CCC から WAGASCI Wall MRD の GDCC へ伝送される. つまり, 時間情報は CCC によって制御されている. CCC を交換したことによって, ビームトリガーの情報が変更されたことで時間情報にズレが生じ, 8 バンチ構造を確認することができなくなったと考える.

Chapter 8

結論

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Reserch Complex) から、295 km 離れた岐阜県神岡町の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデ (SK) へニュートリノビームを打ち込み、前置検出器と後置検出器でニュートリノ反応を観測することで、レプトンにおける CP 対称性の破れの探索を目的とした長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験は既に CP 対称性の破れを示唆する結果を得ているが、これを結論づけるためさらなる精度向上が必要である。T2K 実験における不定性の要因の一つとして、前置検出器と後置検出器の標的原子核の違いが挙げられる。前置検出器の多くは炭化水素標的であるが、後置検出器スーパーカミオカンデは水標的であるため、各検出器でのニュートリノ反応が異なり系統誤差が生じる。これを削減するために始まったのが T2K-WAGASCI 実験である。

本研究では、2023 年 11 月から行われた T2K 実験 run13 及び 2024 年 11 月から行われた T2K 実験 run14 において取得したニュートリノビームデータを用いて、Baby MIND の光検出器の補正の改良を行い、WAGASCI 検出器群でのニュートリノビームデータ取得の安定性を確認した。

Baby MIND 検出器では二つの閾値が設定されている。一つは信号のトリガーとなる閾値 (閾値 1) であり、もう一つはデータを書き出すための閾値 (閾値 2) である。閾値 1 を超えたパルスがやってくると、10 ms の信号読み出しのためのゲートが開く。この状態で閾値 2 をこえたパルスのデータを読み出す。この際、増幅率の高い High Gain (HG) と増幅率の低い Low Gain (LG) の両方で測定することができる。また、ADC のアナログメモリは HG, LG それぞれ 1 チャンネルあたり 1 つである。マルチヒットが生じると、振幅最大のパルスの HG, LG の ADC 値と閾値 2 をこえた時間 TOT (Time Over Threshold) の情報が保存され、その他全てのパルスには TOT のみが記録される。ここで、振幅最大のパルスの HG, LG の ADC 値と TOT の相関を調べることで関係式が導かれる。そして、この相関からその他全てのパルスの HG と LG の ADC 値を導き出すことができた。また、Baby MIND の設置当初から一部のパルスで HG の読み出しがダイナミックレンジに到達し、値が飽和してしまう問題があった。そこで、上記と同様 HG, LG の ADC 値と TOT の関係式から HG 値を導き出すよう波高評価を改良した。

また、データ取得について Baby MIND 検出器では安定してデータの取得ができた。しかし、WAGASCI 検出器と Wall MRD 検出器では安定してデータ取得はできたが、2024 年 6 月から正確な時間情報を読み取ることができなくなった。原因の一つとして、ビーム準備の際安定してデータ取得ができず、ビームトリガーの制御を行う CCC (Clock and Control Card) を交換したことで時間情報にズレが生じたことが考えられるが、まだ確かな原因を特定することはできていないため、その他データ取得システムを含め問題がないか検証する必要がある。

謝辞

本研究を通じて多くの方々からご指導ご鞭撻を頂き、大変お世話になったとともに自身の成長に大きくつながりました。ここに感謝の意を表します。

清矢良浩教授には、研究室ミーティングや個人ミーティングを通じて様々な研究に関するご指導を頂いたり相談に乗っていただいたりと、大変お世話になりました。学部時代から3年間こちらの研究室に所属しましたが、研究活動を通じて多くの貴重な経験を得ることが出来ました。ありがとうございました。

山本和弘准教授には、データの解析やその議論、研究室でのPC周りの作業に協力いただき非常にお世話になりました。また、研究以外でも細かな書類作業や東海での入構にかかる手続きなど様々なことに対応していただきありがとうございました。

豊田博俊さんには、研究中の鉄道に関する雑談が研究で疲れた中で良い息抜きになり非常に助かりました。

続いて、WAGASCIグループであり、共同研究者である横浜国立大学の南野彰宏教授、京都大学の木河達也助教、大阪公立大学の本條さん、船山君、東京都立大学の在原さん、関矢君、鎌田君、東北大学の中野さん、東京理科大学の佐藤さんには研究に関する助言を頂いたり、現地での作業を手伝っていただいたりと大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に、4年間の学部生生活に加えて2年間研究を続けるため、経済的に支援してくれた家族に深く感謝致します。

参考文献

- [1] Kobayashi, M.; Maskawa, H. (1973). “CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”
- [2] Chen, Herbert H. (September 1984). “Direct Approach to Resolve the Solar-Neutrino Problem”.
- [3] T. Kajita, for the Kamiokande and Super-Kamiokande collaborations: 18th Int. Conf. Neutrino Physics and Astrophysics, Takayama, 1998
- [4] 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設, “ニュートリノの歴史”, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/neutrino/history/#:~:text=%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AA%E3%83%8E%E3%81%AE%E6%AD%B4%E5%8F%B2>.
- [5] Pontecorvo, B. (1957). “Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge”.
- [6] Maki, Z; Nakagawa, M.; Sakata, S. (1962). “Remarks on the Unified Model of Elementary Particles”.
- [7] The T2K Experiment <https://t2k-experiment.org>
- [8] J-PARC 大強度陽子加速器施設 <https://j-parc.jp/index.html>
- [9] 大谷 将士, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID の製作と性能評価”, 京都大学大学院 修士論文 (2008)
- [10] 恩田直人, “水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発”, 京都大学大学院 修士論文 (2023)
- [11] 木河 達也, “T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究”, 京都大学大学院 修士論文 (2010)
- [12] 吉田 健人, “三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器 WAGASCI の開発”, 京都大学大学院 修士論文 (2014)
- [13] 浜松ホトニクス 技術資料/MPPC https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf
- [14] 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”, 東京理科大学大学院 修士論文 (2021)
- [15] 工藤悠仁, “T2K 実験前置ニュートリノ検出器 WAGASCI/Baby MIND を用いたニュートリノビーム測定”, 横浜国立大学大学院 修士論文 (2023)
- [16] 永井恒輝, “T2K 実験 WAGASCI 検出器: データ収集系におけるヒット時間情報の校正とビーム取り出し周期の変更に伴うファームウェア改良”, 横浜国立大学大学院 修士論文 (2022)
- [17] 安留健嗣, “新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築”, 京都大学大学院 修士論文 (2018)

- [18] 高安咲妃, ” T2K-WAGASCI 実験におけるセルオートマトンを用いた飛跡再構成アルゴリズムおよび検出器の性能評価 ” , 大阪市立大学大学院 修士論文 (2021)
- [19] Parsa , Saba, ” Baby MIND Detector Construction and Commissioning ” , Master Thesis, University of Geneva (2021)