

2025 年度 卒業研究

T2K 実験 WAGASCI 検出器のタイミングジッタ補正に向けた
LED ドライバの有効性評価

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学 EP
南野・Bronner 研究室

学籍番号 2264137

城下 千剣

2026 年 2 月 20 日

概要

T2K 実験は、茨城県東海村の J-PARC と岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデの間で行われている長基線ニュートリノ振動実験である。WAGASCI-BabyMIND 検出器は、T2K 実験の前置検出器として設置されており、ニュートリノと水の反応断面積の測定を目的としている。測定の系統誤差を低減するためには、ニュートリノ反応で生成される荷電粒子のヒット時刻を高精度に記録することが重要である。しかし、WAGASCI 検出器のデータ収集系には各 Detector InterFace(DIF) 間にタイミングジッタが存在し、時間分解能の低下が課題となっている。WAGASCI 検出器では、荷電粒子の運動方向を同定するために、サブナノ秒オーダーの時間分解能を有するタイミングジッタ補正手法が求められている。

本研究では、新たに作成された LED ドライバによって発光させた LED の光を二つの Multi Pixel Photon Counter (MPPC) で同時に検出し、その検出時刻差をオシロスコープを用いて測定することで LED ドライバの性能評価を行った。得られた検出時刻差の分布を解析した結果、標準偏差は 0.134 ns であり、WAGASCI 検出器において要求される時間分解能に対して十分な補正性能を有していることを確認した。この結果から、本 LED ドライバを用いることで、タイミングジッタ補正を要求値の 5 倍以上の精度で行うことが可能であることが示された。さらに、検出時刻差の平均値に見られる偏りについて、測定系を構成する各要素の寄与を分離して評価した。その結果、これらの要素の個体差が検出時刻差の平均値の系統的なずれに寄与していることが明らかとなった。

以上より、本研究で評価した LED ドライバは、WAGASCI 検出器のタイミングジッタ補正に十分な性能を有していると結論づけられる。今後は、実際の WAGASCI 検出器に LED 光を入射し、実環境下での時間較正への適用を行う予定である。

目次

第 1 章	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノとは	1
1.2	T2K 実験	1
第 2 章	WAGASCI-BabyMIND 検出器	3
2.1	構成	3
2.2	WAGASCI 本体検出器, Wall MRD	4
2.3	時間分解能の要求精度	6
第 3 章	LED ドライバの性能評価	8
3.1	LED ドライバの回路および動作原理	8
3.2	測定に用いた機器	9
3.3	セットアップ	11
3.4	測定	12
3.5	結果	12
第 4 章	結論	18
	謝辞	19
	参考文献	20

目次

1.1	T2K 実験の概略図 [1]	1
2.1	WAGASCI-BabyMIND 検出器の外観 [2]	4
2.2	WAGASCI 本体検出器, Wall MRD のエレクトロニクスの概略図 [2]	5
2.3	WAGASCI-BabyMIND 検出器のジオメトリ	7
2.4	予測される時刻差分布。横軸は (WAGASCI 本体検出器のヒット時刻) - (Wall MRD のヒット時刻) [3]	7
3.1	回路図	8
3.2	測定に使用した MPPC	9
3.3	MPPC 読み出し基板の回路図	10
3.4	作成した LED ドライバ	10
3.5	セットアップの概略図	11
3.6	暗箱内の様子	11
3.7	暗箱内の各装置	12
3.8	検出時刻の差の分布	13
3.9	各要素に番号づけした測定系の簡略図	13
3.10	チャンネルをスワップした測定系	14
3.11	読み出し基板をスワップした測定系	14
3.12	各要素を入れ替えた測定結果 (各 10000 イベント)	16
3.13	MPPC3,4 を用いた Δt の測定結果	17
3.14	MPPC3,4 を入れ替えた時の Δt の測定結果	17

表目次

3.1	各要素で生まれる時間差	15
-----	-------------------	----

第 1 章

ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは、素粒子標準模型においてレプトンに分類される基本粒子の 1 つであり、電荷を持たず、弱い相互作用を通じて物質と相互作用するという特徴をもつ。現在、電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノの三種類のフレーバーが存在することが知られている。

ニュートリノは、伝播する過程でそのフレーバーが変化する「ニュートリノ振動」と呼ばれる現象を示す。この現象の観測によりニュートリノが質量を持つことが明らかになった。ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持ち、かつフレーバー固有状態と質量固有状態が一致していないために生じる現象である。ニュートリノに関する理解が深まることで、質量階層性や CP 対称性の破れの有無といった未解明の問題に対する重要な手掛かりが得られると期待されている。

一方で、ニュートリノは弱い相互作用のみを通じて物質と反応するため、極めて高い透過力を持つ。この性質によりニュートリノの検出は困難であり、その観測には大型かつ高感度な検出器と統計的に十分な事象数が必要とされる。

1.2 T2K 実験

T2K 実験は、ニュートリノ振動を研究することを目的とした長基線ニュートリノ実験である。日本の茨城県東海村に位置する J-PARC において強度の高い ν_μ ビームが生成され、日本列島を横断する形で西日本の山間部に設置されたスーパーカミオカンデ検出器へと照射される。



図 1.1: T2K 実験の概略図 [1]

生成されたニュートリノビームは、J-PARC 施設内に設置された前置検出器によってビーム出射直後に測定され、その後、約 295 km 伝播した後にスーパーカミオカンデにおいて再び測定される。前置検出器と後置検出器で観測されたニュートリノ事象数およびフレーバー組成の違いを比較することで、ニュートリノ振動に関する情報が得られる。

第 2 章

WAGASCI-BabyMIND 検出器

WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator) -BabyMIND (Baby Magnetized Iron Neutrino Detector) 検出器は、T2K 実験におけるニュートリノ振動測定のための系統誤差低減を目的として、ビーム軸から 1.5° の off-axis 角上に前置ニュートリノ検出器として設置された。ニュートリノ振動実験では、前置検出器で観測されたニュートリノ事象を基に、後置検出器での事象数を予測する。このため、ニュートリノと標的物質の反応断面積に関する不確かさが、ニュートリノ振動の測定精度に大きく影響する。

T2K 実験の後置検出器であるスーパーカミオカンデは水を主な標的物質としているのに対し、従来の前置検出器では炭素が主な標的となっており、標的物質の違いによる系統誤差が課題となっていた。WAGASCI 本体検出器は、水を標的物質とし高い充填率で配置することにより、スーパーカミオカンデと同様の標的條件に近い環境でニュートリノ相互作用を測定することを可能にしている。

さらに、WAGASCI-BabyMIND 検出器全体ではほぼ等方的な受容を持つ構造を採用しており、前方だけでなく高角度方向に放出される粒子も効率良く検出できる。この特性により、従来の検出器では測定が困難であった事象に対しても感度を持ち、ニュートリノ相互作用モデルの検証および改良に貢献することが期待されている。

このように、WAGASCI-BabyMIND 検出器は、後置検出器と標的物質および運動学的条件を可能な限り揃えた条件で測定を行うことで、ニュートリノ相互作用に起因する系統誤差を低減し、T2K 実験全体の測定精度向上を目的として設置された検出器である。

2.1 構成

WAGASCI-BabyMIND 検出器は、WAGASCI 本体検出器 2 台、Proton Module、Wall MRD (Wall Muon Range Detector) 2 台、および Baby MIND から構成される複合型のニュートリノ検出器である。図 2.1 に WAGASCI-BabyMIND 検出器の外観を示す。

WAGASCI 本体検出器は、薄型プラスチックシンチレーターで構成される荷電粒子トラッカー層の隙間を水標的で満たした構造を持ち、ニュートリノと水との相互作用を測定することを主な目的としている。本検出器は、後置検出器であるスーパーカミオカンデと同様の標的物質条件に近い環境で測定を行うことが可能であり、反応断面積に起因する系統誤差の低減に寄与する。

ビームに対して最上流には WAGASCI 本体検出器の 1 台が配置されており、その下流に Proton Module、さらに下流側にもう 1 台の WAGASCI 本体検出器が配置されている。Proton Module は主にプラスチック標的の中でのニュートリノ相互作用を測定することを目的としており、標的物質依存性の評価に用いられる。

これらの検出器の両脇には、Wall MRD がビーム方向と平行に設置されている。Wall MRD は、高角度方向に散乱されたミュオンを検出する役割を持ち、前方方向に感度の偏りが生じやすい前置検出器の角度受容を補完している。これにより、大角度散乱事象を含む幅広い運動学領域での測定が可能となる。

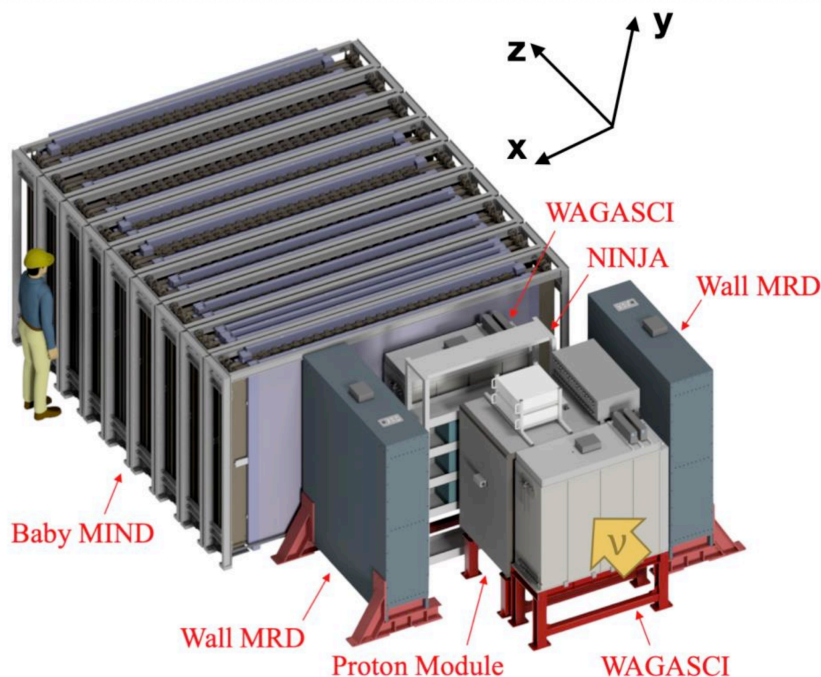


図 2.1: WAGASCI-BabyMIND 検出器の外観 [2]

さらに、検出器群の最下流には Baby MIND が設置されている。Baby MIND は磁化鉄を用いたミュオン検出器であり、ミュオンの運動量測定および電荷識別を行うことができる。この検出器により、下流へ透過した高エネルギーミュオンに対しても精度の高い情報を取得することが可能となっている。

このように、WAGASCI-BabyMIND 検出器は、異なる標的物質、角度受容、運動量領域に感度を持つ複数の検出器を組み合わせることで、ニュートリノ相互作用を多角的に測定できる構成となっている。また、各検出器が異なる位置に配置され、独立した読み出し系を持つことから、検出器間の時間情報の整合性が重要となる。これらの特徴は、2.3 節で後述する時間分解能の要求精度およびタイミングジッタ補正の必要性と密接に関係している。

2.2 WAGASCI 本体検出器, Wall MRD

WAGASCI 本体検出器は、水を主成分とする標的領域とプラスチックシンチレータを組み合わせた検出器であり、ニュートリノと水との相互作用を高い効率で測定することを目的としている。シンチレータは三次元的に配置されており、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の飛跡を複数方向から検出することが可能である。この構造により、前方方向に限らず、比較的大きな角度で放出された粒子に対しても感度を持つ。

Wall MRD は、WAGASCI 本体検出器の側方に配置されたミュオンレンジ検出器であり、鉄板とシンチレータを交互に配置した構造を持つ。主に WAGASCI 本体検出器で生成され、高角度方向へ放出されたミュオンの検出を目的としている。Wall MRD で測定されるミュオンの飛程情報は、事象の同定や運動量推定に用いられ、WAGASCI 本体検出器単体では得られない運動学情報を補完する役割を果たしている。

WAGASCI 本体検出器と Wall MRD は、空間的に離れた位置に配置されているものの、同一事象に由来する粒子を同時に検出する機会が多い。そのため、両検出器間で取得される信号の時間情報を正確に対応付けることが不可欠である。特に、高角度ミュオン事象の解析においては、検出器間のタイミング整合性が事象選択の効率やバックグラウンド低減に直接影響を与える。

2.2.1 エレクトロニクス

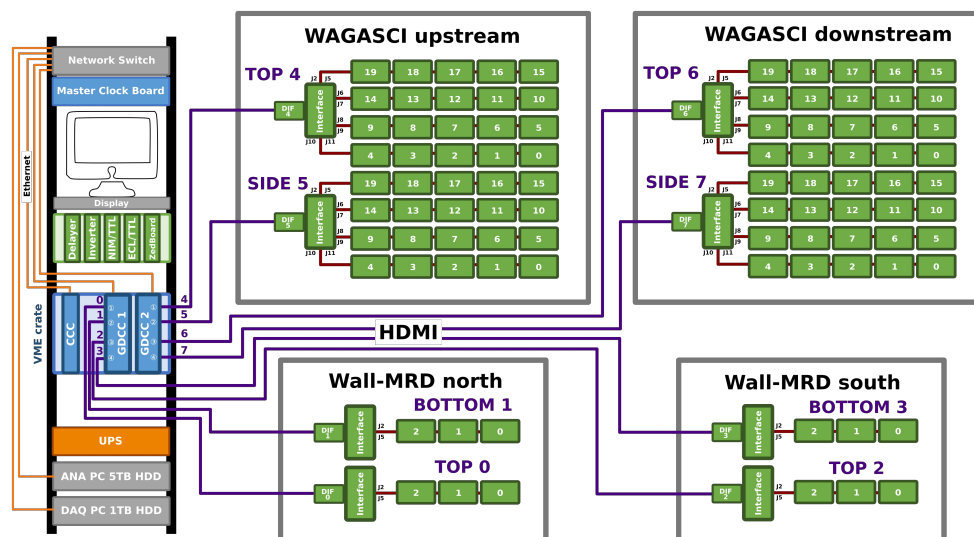


図 2.2: WAGASCI 本体検出器, Wall MRD のエレクトロニクスの概略図 [2]

図 2.2 が WAGASCI 本体検出器, Wall MRD のエレクトロニクスの概略図である。WAGASCI 本体検出器と Wall MRD の各モジュールにはそれぞれ 2 つの Detector InterFace (DIF) が接続されている。WAGASCI 本体検出器では 1 つの DIF に合計 20 枚の Active Sensor Unit (ASU) が接続されている。各 ASU には後述の半導体型光検出器である Multi Pixel Photon Counter (MPPC) が 32 チャンネル接続されている。Wall MRD では 1 つの DIF に 3 枚の ASU が接続されており、合計で 80 チャンネルの MPPC が接続されている。

各 ASU には、1 つずつの ASIC (SPIROC2D チップ) が搭載されている。SPIROC2D は最大 36 チャンネルのアナログ信号の入力が可能で、アナログ信号をデジタル信号として出力する。MPPC の電圧のアナログ信号は SPIROC2D でデジタル化される。SPIROC2D から出力されたデジタル信号は、DIF と GDCC と CCC を通して DAQ PC に送られ、記録される。

2.2.2 MPPC

MPPC は、ガイガーモードで動作するアバランシェフォトダイオード (APD) を多数のピクセルとして配列した半導体光検出器である。WAGASCI 本体検出器および Wall MRD においては、シンチレーション光の検出に用いられている。MPPC は、降伏電圧を超える逆バイアス電圧を印加することで各ピクセルがガイガーモードで動作し、単一光子に対しても大きな信号を出力することができる。このため、高い増倍率を持つとともに、優れた光子検出効率を有している。また、半導体検出器であることから、応答速度が速く、磁場中でも動作可能であるといった特徴を持つ。

2.2.3 DIF 間のタイミングジッタ

WAGASCI 本体検出器および Wall MRD では、MPPC によって検出されたシンチレーション光が所定の閾値を超えた場合、読み出し基板である DIF から Global Data Concentrator Card (GDCC) へ、信号の発生時刻および

信号強度に関する情報が送信される。

しかし、現在のシステムにおいては複数の DIF 間で信号の時刻同期にずれが存在することが確認されている。このような DIF 間で生じる同期のずれを、DIF 間のタイミングジッタと呼ぶ。

タイミングジッタが存在すると、同一事象に由来する信号が異なる時刻として記録される可能性が生じる。その結果、時間情報に基づく事象の対応付けや選別の信頼性が低下し、信号の検出効率やバックグラウンド除去の精度に悪影響を及ぼす。また、WAGASCI 本体検出器と Wall MRD のように空間的に離れた検出器間で荷電粒子の飛跡の同時計測を行う場合、上記のタイミングジッタが存在すると時間情報から運動方向を同定することが困難になる。

このタイミングジッタを補正するため、各 DIF に接続された MPPC にひとつの光源から同時に光を入射させることで、上記のタイミングジッタを補正する手法が考えられている。これを行うには、光を検出した MPPC 間で観測時刻が同時で、かつその時刻にばらつきが少ないことが求められる。

2.3 時間分解能の要求精度

WAGASCI 本体検出器および Wall MRD 内部において、 μ ニュートリノが標的物質と相互作用するとミュオンが生成される。生成されたミュオンは、シンチレータを通過する際にシンチレーション光を発生させ、その光が検出されることで飛跡情報が得られる。

ミュオンが WAGASCI 本体検出器と Wall MRD の両方を通過する飛跡をとる場合、ミュオンが WAGASCI 本体検出器内の水を標的として生成され Wall MRD へ向かったのか、あるいは Wall MRD 内の鉄を標的として生成され WAGASCI 本体検出器へ向かったのかを区別する必要がある。この区別は、事象の起源を正しく同定するために重要である。

本章では、これらの事象判別を可能とするために、WAGASCI 本体検出器および Wall MRD において要求される時間分解能について議論する。

2.3.1 WAGASCI-BabyMIND 検出器のジオメトリ

図 2.3 に WAGASCI-BabyMIND 検出器のジオメトリを示す。図から WAGASCI 本体検出器と Wall MRD 間の最近接距離は約 50 cm であるため、ミュオンの速度を光速と近似すると、WAGASCI 本体検出器でのヒット時刻と Wall MRD のヒット時刻の差は約 1.67 ns であるとわかる。

予想される WAGASCI 本体検出器–Wall MRD 間のヒット時刻差の分布を図 2.4 に示す。赤で示した分布は WAGASCI 本体検出器でヒットが発生した後に Wall MRD でヒットが発生した事象に対応し、青で示した分布は Wall MRD でヒットが発生した後に WAGASCI 本体検出器でヒットが発生した事象に対応する。

ヒット時刻の時間差を用いて事象を判別する場合、時間差 0 ns を境界として、その正負の符号により事象の起源を区別することが可能である。両事象の時間差分布が正規分布に従うと仮定し、その標準偏差を σ とする。

$2\sigma \leq 1.67\text{ns}$ 、すなわち $\sigma \leq 0.835\text{ns}$ の条件を満たす場合、各分布の片側 2σ の範囲は 0 ns を跨がず、それぞれ対応する符号側に完全に含まれる。正規分布において測定値が片側 2σ の範囲に含まれる確率は約 2.3% であることから、この条件下では時間差の符号に基づく事象判別を約 97.7% の精度で行えると期待される。

同様に、 $3\sigma \leq 1.67\text{ns}$ 、すなわち $\sigma \leq 0.557\text{ns}$ の場合には、約 99.9% の精度で事象判別が可能となる。

2.3.2 先行研究の結果

先行研究 [3] の結果より次のことがわかっている。パルスジェネレータに LED を直接接続し発光させ、3つの MPPC に同時に光を入射させる実験において、光の検出時間差分布の標準偏差が 4.86 ns であり、タイミングジッタの補正には不十分である。また、同様のセットアップでピコ秒パルスレーザーからの光を入射させる実験では、

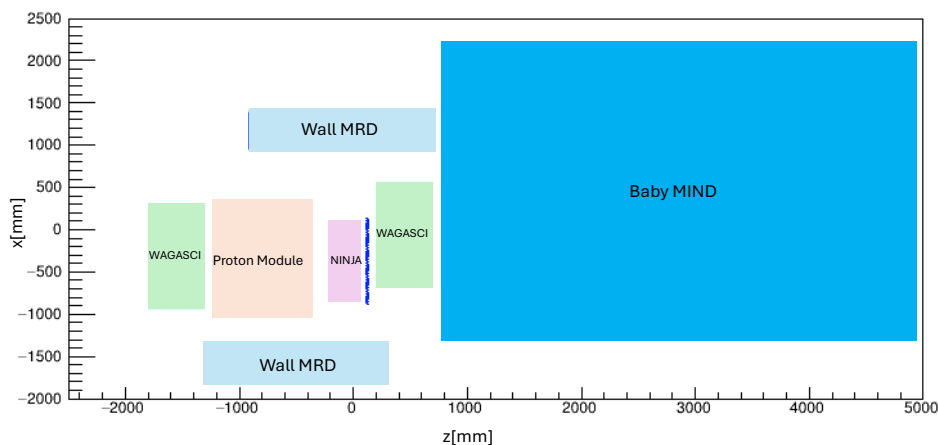


図 2.3: WAGASCI-BabyMIND 検出器のジオメトリ

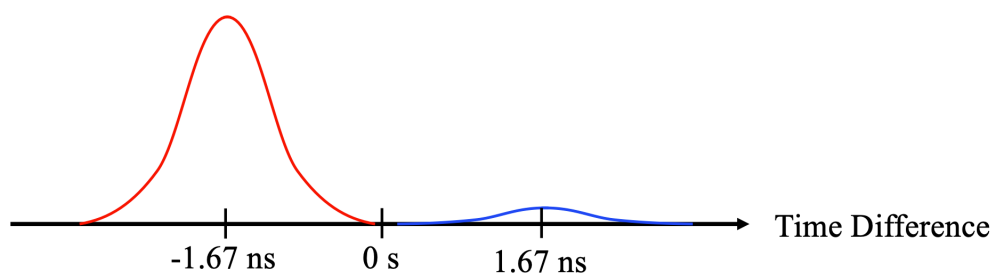


図 2.4: 予測される時刻差分布。横軸は (WAGASCI 本体検出器のヒット時刻) - (Wall MRD のヒット時刻) [3]

時間差分布の標準偏差が約 6 ps でありタイミングジッタの補正を行うのに十分な性能である。

2.3.3 本研究の位置付け

先行研究 [3] よりピコ秒パルスレーザーは WAGASCI 本体検出器および Wall MRD のタイミングジッタの補正に十分な性能を持つことがわかった。しかしレーザーは高価であり、かつ安全性の観点からも課題がある。実用上の問題もある。本研究ではレーザーよりも安全でかつ安価な LED を駆動するためのドライバを作成し、タイミングジッタの補正に足る性能を持つかどうかを評価する。

第3章

LED ドライバの性能評価

本章では作成した LED ドライバの回路およびその性能評価に用いたセットアップについて述べる。本研究で用いた LED ドライバは、文献 [4] で報告されている回路を基に設計されたものであり、WAGASCI 検出器の測定条件に合わせて一部改良が加えられている。回路の実装および調整は共同研究者とともにを行い、本研究では主に当該 LED ドライバの性能評価を担当した。

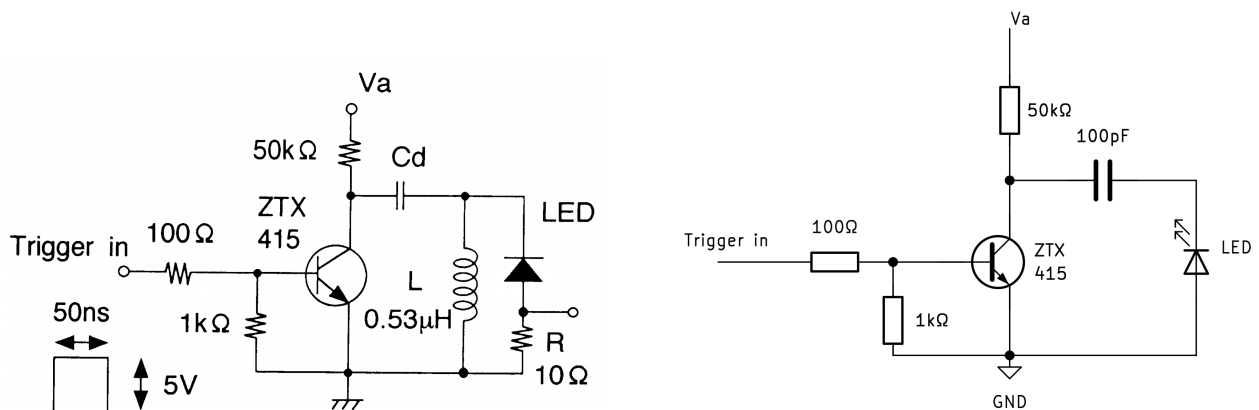
3.1 LED ドライバの回路および動作原理

文献 [4] に記載のある LED ドライバの回路を図 3.1a に、実際に作成した回路を図 3.1b に示す。

まず文献 [4] で報告されている図 3.1a の回路の動作原理について説明する。はじめに、 V_a を印加することによって $50\text{ k}\Omega$ 抵抗、キャパシタ、インダクタの順に電流が流れることでキャパシタが充電される。この状態で Trigger in 端子にトリガーが入力されると、トランジスタのコレクタからエミッタの方向に電流が流れるようになり、キャパシタに蓄えられた電荷が LED に流れて発光する。

一方で、今回作成した図 3.1b の回路では、インダクタが存在しないため、回路が理想的に動作することを仮定すると、電源から供給される直流電流がキャパシタに流れる経路は存在しない。そのため、LED を発光させるための電荷が蓄積することができず、LED は発光しないと想定される。しかし予想に反して、この回路を用いた実験では、非常に長時間かつ多数のイベントで安定に動作した。

この、想定と実際の動作の差異の原因の可能性として LED の整流作用の非理想性や微弱なリーク電流、高電圧



(a) 参考にした LED ドライバの回路図 [4]

(b) 作成した LED ドライバの回路図

図 3.1: 回路図

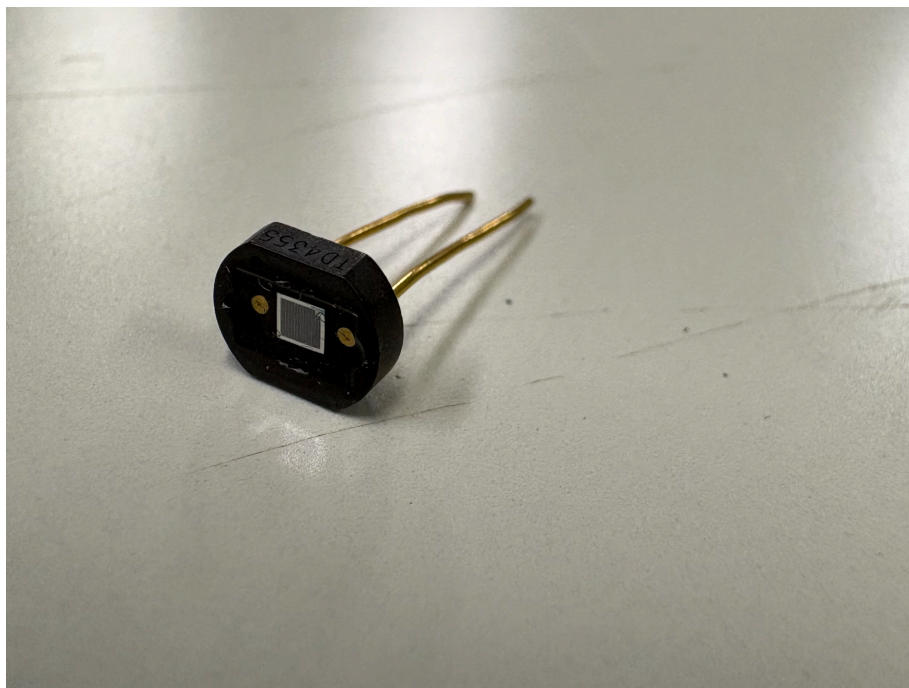


図 3.2: 測定に使用した MPPC

をかけたことによる副次的な効果などが挙げられる。本研究では、動作原理の定量的解明には至っていないが、目的であるタイミングジッタの補正に対する性能評価は行うことができた。

3.2 測定に用いた機器

3.2.1 オシロスコープ

本研究における波形測定には、USB 接続型デジタル・オシロスコープを用い、PyVISA により外部制御を行った。使用したオシロスコープのアナログ帯域幅は 350 MHz、最大リアルタイム・サンプリングレートは 5 GHz である。測定は CH1~CH4 の 4 チャンネルを同時に用いて行った。

オシロスコープ本体の垂直軸設定として、CH1 は画面表示範囲を ± 2 V、CH2~CH4 は ± 800 mV に設定した。入力インピーダンスはいずれのチャンネルも 50Ω とした。時間軸は画面表示範囲が ± 25 ns となるよう設定し、時間原点を中心として前後 25 ns の波形を取得した。トリガ条件は CH1 をトリガソースとし、立ち上がりエッジ、トリガレベル 250 mV とした。波形データは RAW 形式 (8 bit) で取得し、オシロスコープから取得した波形データは、preamble 情報 (XINCR, XZERO, XREF, YMULT, YOFF, YZERO) を用いて時間軸および電圧軸に換算した。波形の取得方式には高分解能 (High Resolution, HRES) モードを用いた。

3.2.2 MPPC

光検出器として MPPC (浜松ホトニクス製 S10362-13-050C) を使用した。この MPPC のアノード側とカソード側をそれぞれ別の IC ソケットに挿し、ガイガーモードとなるよう 70.00 V の電圧を印加した。

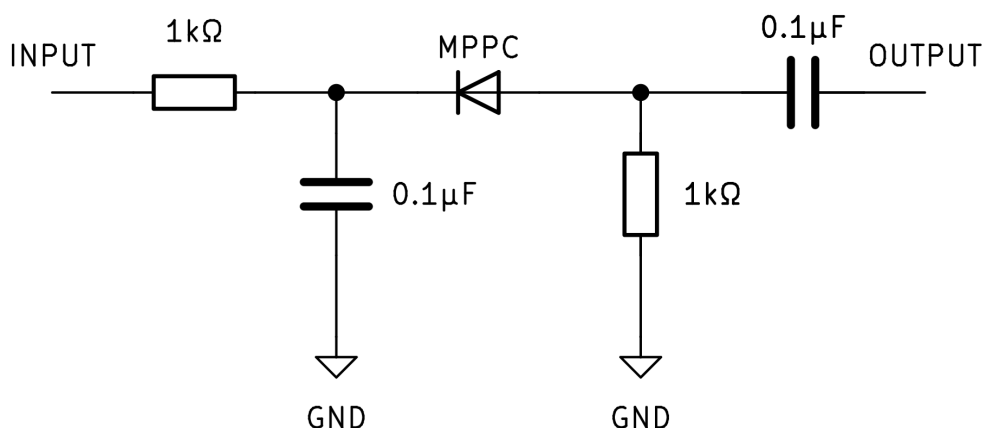
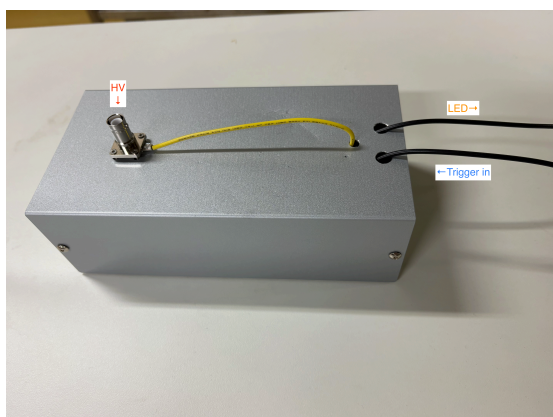
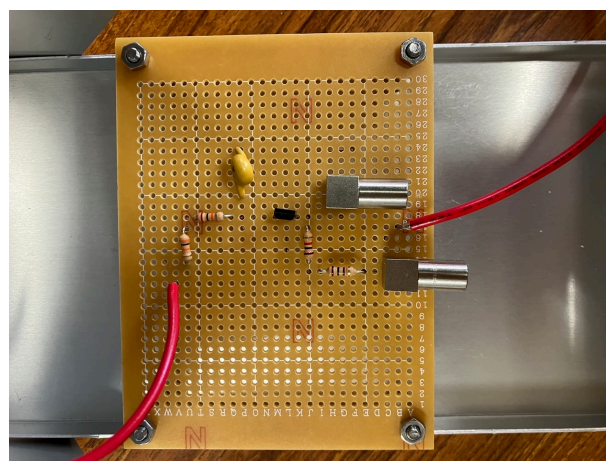


図 3.3: MPPC 読み出し基板の回路図



(a) 作成した LED ドライバの外観



(b) 作成した LED ドライバの基板

図 3.4: 作成した LED ドライバ

3.2.3 MPPC 読み出し基板

MPPC に高電圧を印加しつつ得られたシグナルをオシロスコープで測定するために読み出し基板を作成した。回路図を図 3.3 に示す。図左端の INPUT に電圧を印加する。INPUT に繋がる回路はローパスフィルタとなっている。図右端の OUTPUT から MPPC の信号を読み出す。OUTPUT に繋がる回路はハイパスフィルタとなっている。

3.2.4 LED ドライバ

図 3.1b の印加電圧 V_a として 100 V を印加した。Trigger in には後述のパルスジェネレータから矩形波を入力した。LED に入力する信号は LEMO ケーブルを通して暗箱内に設置した LED に流した。

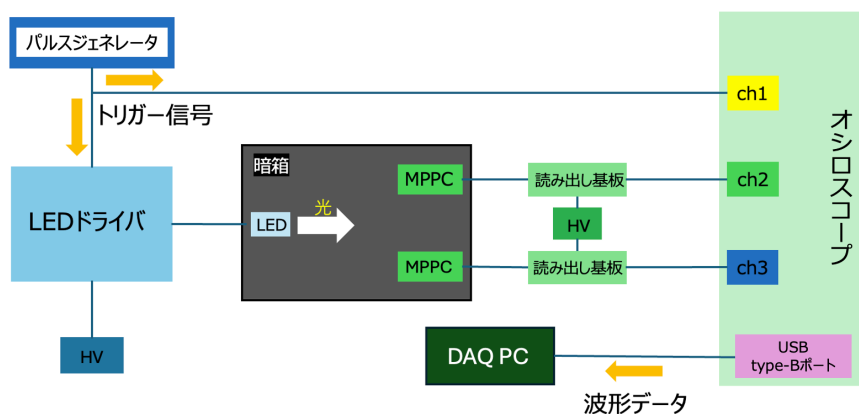


図 3.5: セットアップの概略図

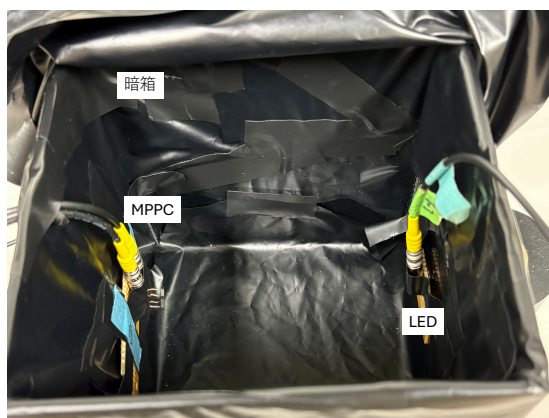


図 3.6: 暗箱内の様子

3.2.5 パルスジェネレータ

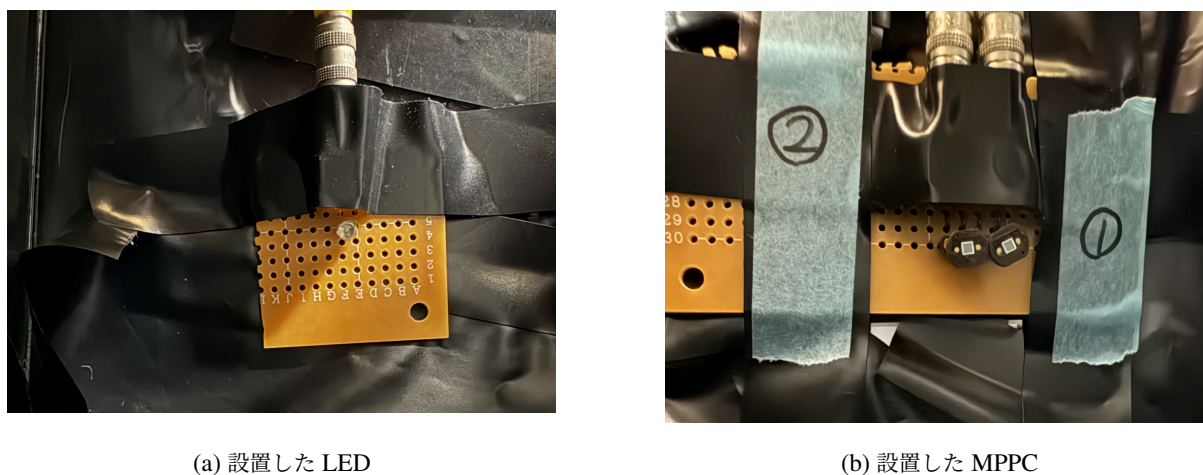
トリガー入力に用いるパルスジェネレータには KEYSIGHT 社の EDU33212A Waveform Generator を使用した。LED ドライバに入力した矩形波の形状は立ち上がり時間を 5 ns、幅を 50 ns、オフセットを 0 V、波形の高さを 5 V に設定した。

3.2.6 LED

LED は株式会社イーケイジャパンの青色 LED、LK-3BL を用いた。

3.3 セットアップ

作成したセットアップの概略図を図 3.5 に示す。LED ドライバには 100 V の電圧印加し、読み出し基板を經由して MPPC には 70 V の電圧を印加した。パルスジェネレータから出力されたトリガー信号は LED ドライバとオシロスコープの ch1 に入る。オシロスコープに入ったこの信号はオシロスコープ側での測定のトリガーとして使われる。トリガーによって発光した LED の光は独立した二つの MPPC に同時に入射する。暗箱内の様子を図 3.6



(a) 設置した LED

(b) 設置した MPPC

図 3.7: 暗箱内の各装置

および図 3.7 に示す。MPPC の信号はそれぞれオシロスコープの ch2 と ch3 で記録される。得られた波形情報は DAQ PC に保存される。

3.4 測定

以上のセットアップで測定を行った。サンプリングレートが最大 5GHz の高分解能モードで測定を行い、一回のトリガーで各チャンネル 670 サンプルの電圧値とその時刻を記録した。上記の条件で 10000 イベントの測定を行った。

3.5 結果

3.5.1 光検出時刻の差

二つの MPPC 間での光の検出時刻の差 (以下 Δt) を計算するにあたり、光の検出時刻の定義を決める必要がある。ここでは、各波形に対する閾値を波形の最大値の 1/3 設定し、閾値の電圧に初めて達したあるいは超えた時刻を光の観測時刻とした。図 3.8 に Δt 分布の結果を示す。

得られた Δt 分布は標準偏差で 0.115 ns の広がりを持っている。これは 2.3 節で議論したタイミングジッタ補正について要求される時間分解能を十分満たしていると言える。ヒストグラムで見られる Δt の分散性はオシロスコープが持つ有限の時間分解能に起因するものである。時間差の平均値は -0.262 ns で、これは MPPC の反応時間に偏りがあることを示している。この偏りの原因については次節で議論する。

3.5.2 各要素で発生する時間差

ここでは「実験に使用した各要素において発生する時間差」(以下時間差)について考える。測定で使用した各要素に番号づけをし、その部分を入れ替えて測定を行うことでそれぞれによって生じる時間差を計算することができる。図 3.9 に測定系の簡略図を示す。赤い矢印は、信号が各要素を通過するのにかかる時間を表したものである。例えば MPPC1 を通過するのにかかる時間は m_1 、IC ソケット 1 を通過するのにかかる時間は s_{01} である。本節で述べている時間差は MPPC では $(m_1 - m_2)$ 、IC ソケットでは $(s_{01} - s_{02})$ と表せる。図に示した並びは 3.5.1 節

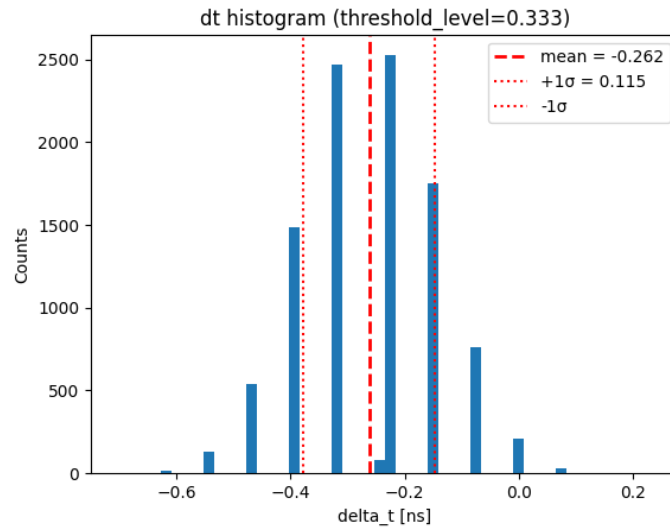


図 3.8: 検出時刻の差の分布

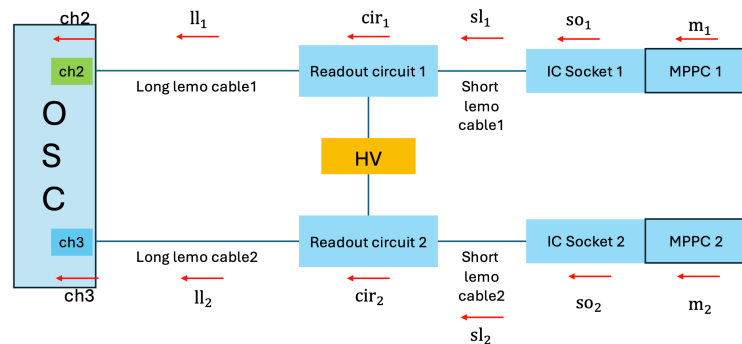


図 3.9: 各要素に番号づけした測定系の簡略図

の結果を得たセットアップである。解析において Δt の計算は ($ch2$ の観測時刻 t_1) - ($ch3$ の観測時刻 t_2) で行われている。計算過程を式で表すと、

$$\begin{aligned}
 & t_1 = ch_2 + ll_1 + cir_1 + sl_1 + so_1 + m_1 + \alpha \\
 - & t_2 = ch_3 + ll_2 + cir_2 + sl_2 + so_2 + m_2 + \alpha \\
 \hline
 \Delta t & = (ch_2 - ch_3) + (ll_1 - ll_2) + (cir_1 - cir_2) + (sl_1 - sl_2) + (so_1 - so_2) + (m_1 - m_2)
 \end{aligned}$$

ここで、例としてオシロスコープのチャンネル間で生じる時間差と読み出し基板で生じる時間差の計算過程を示す。まずオシロスコープのチャンネルを入れ替えた、すなわちチャンネルに接続されている要素を丸ごと入れ替えた場合測定系は図 3.10 のようになる。

オシロスコープのチャンネルを入れ替えた際の Δt である、 $\Delta t_{swapping\ ch}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & t_1 = ch_2 + ll_2 + cir_2 + sl_2 + so_2 + m_2 + \alpha \\
 - & t_2 = ch_3 + ll_1 + cir_1 + sl_1 + so_1 + m_1 + \alpha \\
 \hline
 \Delta t_{swapping\ ch} & = (ch_2 - ch_3) + (ll_2 - ll_1) + (cir_2 - cir_1) + (sl_2 - sl_1) + (so_2 - so_1) + (m_2 - m_1)
 \end{aligned}$$

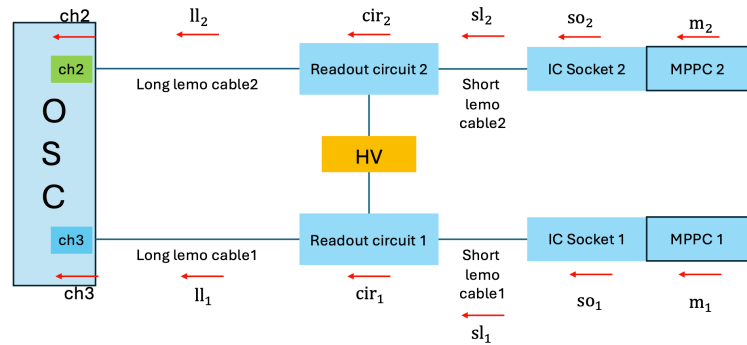


図 3.10: チャンネルをスワップした測定系

これを用いると

$$\Delta t = (ch_2 - ch_3) + (ll_1 - ll_2) + (cir_1 - cir_2) + (sl_1 - sl_2) + (so_1 - so_2) + (m_1 - m_2)$$

$$+ \frac{\Delta t_{swapping\ ch} = (ch_2 - ch_3) + (ll_2 - ll_1) + (cir_2 - cir_1) + (sl_2 - sl_1) + (so_2 - so_1) + (m_2 - m_1)}{\Delta t + \Delta t_{swapping\ ch} = 2(ch_2 - ch_3)}$$

よってチャンネル間に生じる時間差は

$$ch_2 - ch_3 = \frac{\Delta t + \Delta t_{swapping\ ch}}{2}$$

と計算できる。

次に MPPC 読み出し基板を入れ替えた場合、測定系は図 3.11 のようになる。

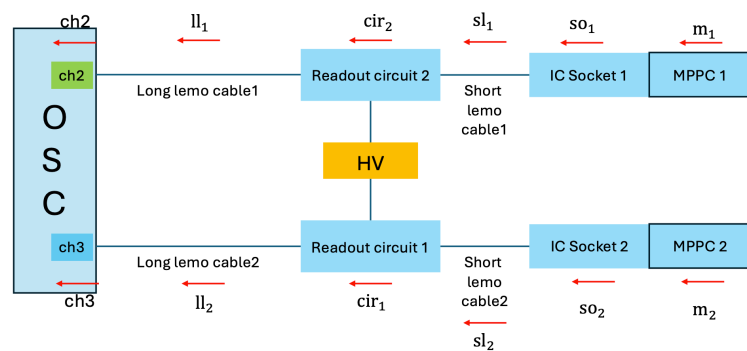


図 3.11: 読み出し基板をスワップした測定系

読み出し基板を入れ替えた際の Δt である、 $\Delta t_{swapping\ circuit}$ は次のようになる。

$$t_1 = ch_2 + ll_1 + cir_2 + sl_1 + so_1 + m_1 + \alpha$$

$$t_2 = ch_3 + ll_2 + cir_1 + sl_2 + so_2 + m_2 + \alpha$$

$$\Delta t_{swapping\ circuit} = (ch_2 - ch_3) + (ll_1 - ll_2) + (cir_2 - cir_1) + (sl_1 - sl_2) + (so_1 - so_2) + (m_1 - m_2)$$

これを用いると

$$\Delta t = (ch_2 - ch_3) + (ll_1 - ll_2) + (cir_1 - cir_2) + (sl_1 - sl_2) + (so_1 - so_2) + (m_1 - m_2)$$

$$- \frac{\Delta t_{swapping\ circuit}}{\Delta t - \Delta t_{swapping\ circuit}} = \frac{(ch_2 - ch_3) + (ll_1 - ll_2) + (cir_2 - cir_1) + (sl_1 - sl_2) + (so_1 - so_2) + (m_1 - m_2)}{2(cir_1 - cir_2)}$$

よって読み出し基板間で生じる時間差は

$$cir_1 - cir_2 = \frac{\Delta t - \Delta t_{swapping\ cir}}{2}$$

と計算できる。他の要素についても読み出し基板と同様の方法で時間差を計算することができる。

それぞれの要素を入れ替えた結果のヒストグラムを次ページに示す。また得られた時間差をまとめた表を表 3.1 に示す。

表 3.1: 各要素で生まれる時間差

要素	時間差 [ns]
ch	-0.104
Long LEMO	-0.023
circuit	0.274
Short LEMO	-0.030
IC socket	0.052
MPPC	-0.518
SUM	-0.349

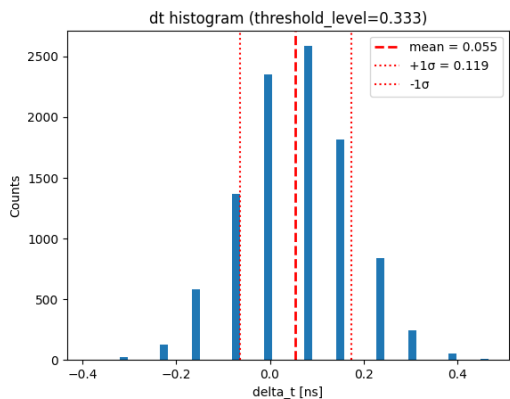
生じる時間差の合計は -0.349 ns で各要素から生まれる時間差を除いた Δt の平均値は 0.087 ns である。以上より、測定で見られた片方の MPPC が早く反応するという現象は、各要素から生まれる時間差に起因するものであると説明できる。 Δt の平均値に残った 87 ps のズレは、ここで考慮していない要因に起因すると考えられる。また各測定で標準偏差に大きな変化は見られないため、LED の発光は安定していると言える。

3.5.3 ゲインの揃った MPPC を使用した測定

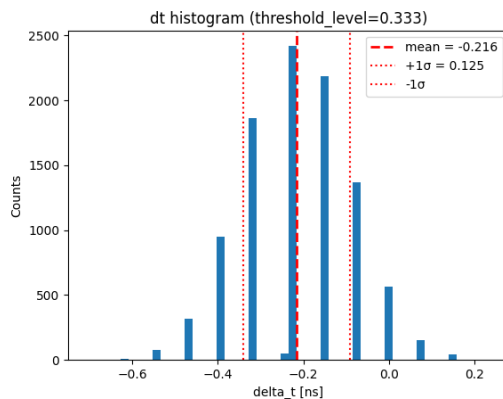
3.5.1 節および 3.5.2 節の測定で使用した MPPC1 はゲインが他のものと比べて大きい個体で、測定に使用した二つ MPPC の間には大きなゲインの差があることがわかった。MPPC 間のゲインの差が大きいことで検出時刻差の分布に偏りが生じた可能性が考えられる。そこでゲインの等しい MPPC3,4 を用意して 3.5.1 節の測定および二つの間に生じる時間差を 3.5.2 節と同様の手法で計算した。図 3.13 に Δt のヒストグラムを示す。

平均値は 0.193 ns で標準偏差は 0.134 ns であった。先の測定と比べて標準偏差は大きくなったものの、タイミングジッタ補正に用いるには十分な小ささである。標準偏差が大きくなった原因として、時間ビンの幅の違いにあると考えられる。時間ビンの幅はオシロスコープのハイレゾリューションモードで各測定で自動で決定され、3.5.1 節の測定では約 30 ps であり、今回は約 150 ps であった。これにより時間差がより大きく離散化され、標準偏差が大きくなったと考えられる。

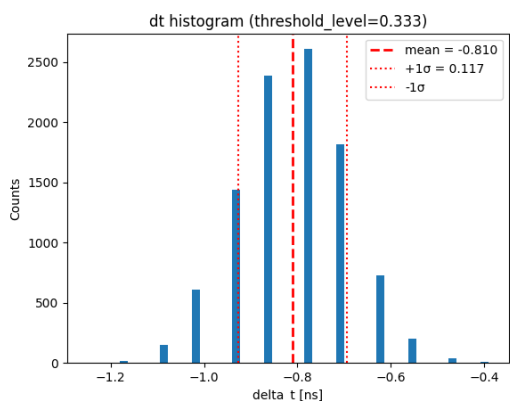
次に MPPC を入れ替えた結果を図 3.14 に示す。平均値は 0.144 ns であった。これにより MPPC3,4 間に生じる時間差は $\frac{0.193-0.144}{2} = 0.025$ ns であるとわかった。その他の要素から生じる時間差を考慮すると時間差の合計は 0.194 ns である。これを図 3.13 の結果から除くと、平均値は -0.001 ns となり平均値のズレは要素間で生じる時



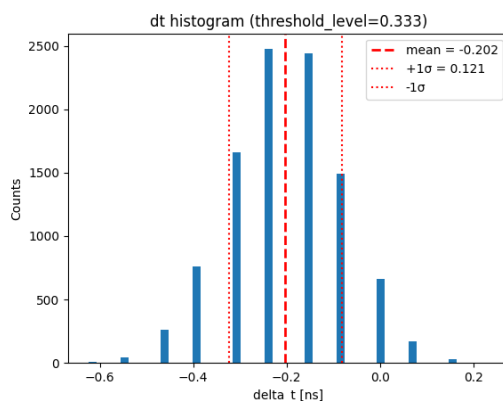
(a) チャンネルを入れ替えた時の時間差分布



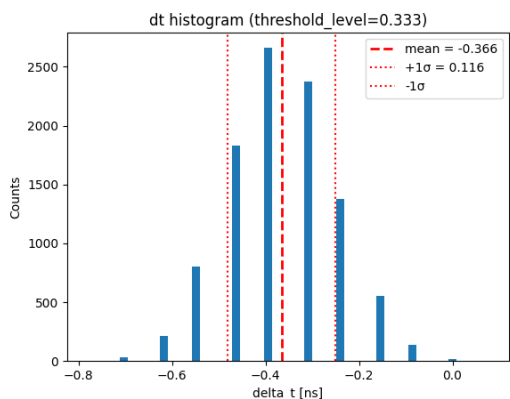
(b) Long LEMO cable を入れ替えた時の時間差分布



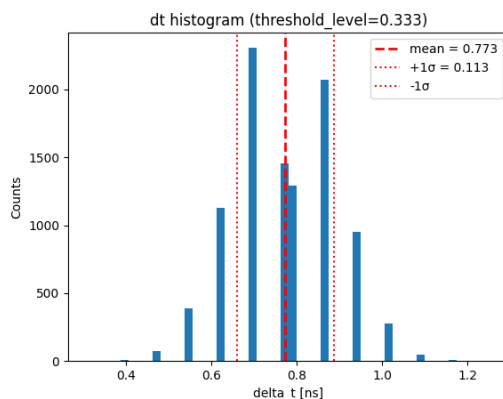
(c) 読み出し基板を入れ替えた時の時間差分布



(d) Short LEMO cable を入れ替えた時の時間差分布



(e) IC socket を入れ替えた時の時間差分布



(f) MPPC を入れ替えた時の時間差分布

図 3.12: 各要素を入れ替えた測定結果 (各 10000 イベント)

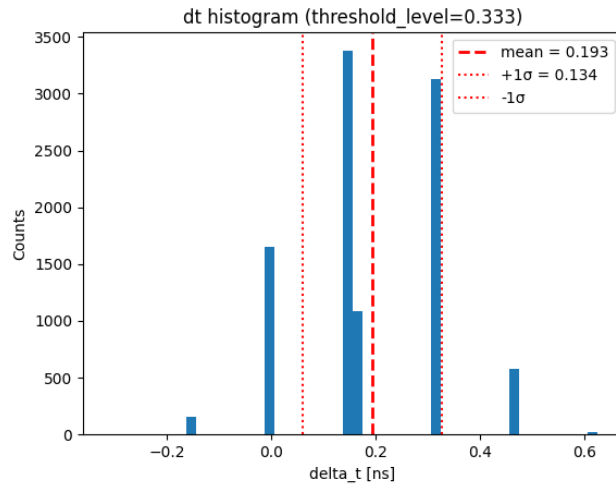


図 3.13: MPPC3,4 を用いた Δt の測定結果

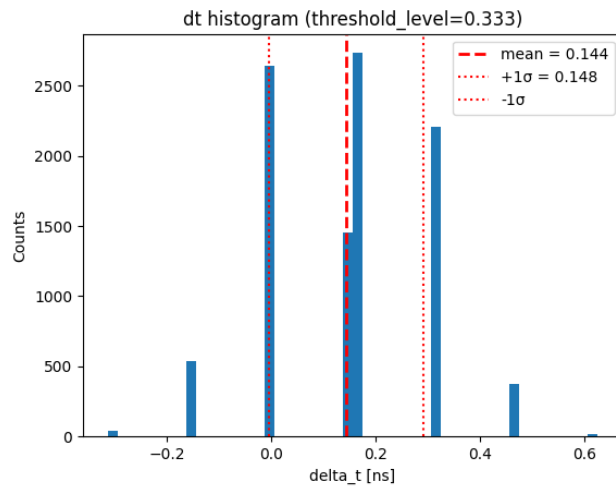


図 3.14: MPPC3,4 を入れ替えた時の Δt の測定結果

間差から説明できることがわかった。残りの 1 ps のずれはここで考慮しきれていない要因によるものであると考えられるが、この差は非常に小さく測定の際には観測できないものである。

第4章

結論

本研究では、作成した LED ドライバの性能評価を行った。その結果、二つの MPPC における光検出時刻差の分布は、標準偏差 0.134 ns の広がりを持つことが確認された。この値は、WAGASCI 検出器において要求される時間分解能 1.67 ns に対して十分小さく、タイミングジッタ補正を 5σ 以上の精度で行うことが可能である。

また、二つの MPPC 間で観測される検出時刻の平均値の 0 からのずれは、測定系を構成する各要素に起因するものであることが分かった。これらの寄与を分離・評価することで、測定系全体の時間特性を定量的に把握できることを示した。

以上の結果から、本研究で作成した LED ドライバは WAGASCI 検出器のタイミングジッタ補正に対して十分な性能を有していると結論づけられる。今後は、実際の WAGASCI 検出器に LED 光を入射し、タイミングジッタ補正を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、お世話になった多くの方に深く感謝いたします。

指導教員である南野彰宏教授には、お忙しい中ミーティングや個別面談で非常に多くのご指導、アドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

また、研究室の先輩である猪俣さん平田さんには特にお世話になりました。測定においては、何も知らない私にさまざまな技術的なご指導をいただき、解析の面では多くのクリティカルな指摘・アドバイスをいただき、卒業論文の執筆にあたっては有益なコメントを多数頂戴しました。研究以外の面でも、夜ごはんを一緒に食べたり、飲んだり、研究室にいる時間を楽しい時間にしていただきました。

同期の北島くんには、共同研究者として LED ドライバの設計・制作を担当してもらい、測定や解析も一緒に行ってもらいました。僕の苦手な、繊細な作業が非常にうまく、LED ドライバの設計・制作を完璧にこなしてくれました。お互いの得意な分野を活かして、協力して研究を進めることができました。

北島くんを含め他の同期の皆さんとは、普段からお互いの研究の話をしたり、お昼ご飯を一緒に食べたりと、研究室での時間を楽しく過ごすことができました。また、卒論発表の練習では、互いに発表を聞き合い、フィードバックをし合うことで、発表の質を高めることができました。

研究室メンバーの皆さん、一年間ありがとうございました。

最後に、いつも支えてくれ、応援してくれる家族にも心から感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] “T2K Experiment Official Website,” <https://t2k-experiment.org>, Accessed: 2026-01-22.
- [2] 永井恒輝（2023）「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較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」, 修士論文, 横浜国立大学大学院理工学府.
- [3] 平田大悟（2025）「T2K 実験 WAGASCI 検出器の時間分解能評価に向けた試験環境の構築および評価」.
- [4] 勉荒木（1997）「発光ダイオードを用いた超高速紫外線パルス光源の開発と応用」, 『照明学会誌』, 第 81 巻, 第 5 号, 459–461 頁.