J-PARC T59実験(WAGASCI)の横方向 ミューオン検出器用シンチレータの 性能評価

横浜国立大学 理工学部数物・電子情報系学科 物理工学 EP学籍番号 1464066岡本浩大

2018.2.15

1 概要

T2K 実験は、茨城県東海村の J-PARC より 295km 先の岐阜県神岡の スーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを打ち込み、J-PARC 構内の前置検出器及び後置検出器のスーパーカミオカンデ両方でニュー トリノ反応を観測することでニュートリノ振動のパラメータを精密測定 する実験である。現在、ニュートリノビーム off-axis 角 1.5°の位置に設置 される前置検出器 WAGASCI の側面に設置する、ニュートリノ反応で生 成されたミューオンを測定するための検出器、Side-MRD を建設してい る。本研究では、Side-MRD にて使用するプラスチックシンチレータに ついて行った、光量、時間分解能に関する試験について報告を行う。ま た、予備も含めた 324 枚について行った大量測定の結果についても報告 する。さらに、WAGASCI のシンチレータについても同様の測定を行い、 WAGASCI と Side-MRD のヒット時間を比較することで方向同定能力を 見積もった。

目 次

1	概要	2
2	ニュートリノ振動	4
3	T2K 実験	5
4	WAGASCI 実験	7
	4.1 WAGASCI	7
	4.2 Side-MRD	8
	4.3 Baby-MIND	9
5	Side-MRD シンチレータの詳細試験	10
	5.1 目的	10
	5.2 SETUP	10
	5.2.1 使用機器	10
	5.2.2 SETUP	15
	5.3 前実験	16
	5.3.1 MPPCのGain 測定	16
	5.3.2 TDC の測定	18
	5.4 本測定	20
6	Side-MRD シンチレータの大量測定	27
	6.1 目的	27
	6.2 SETUP	27
	6.3 測定結果	29
7	WAGASCI シンチレータの性能測定	32
	7.1 目的	32
	7.2 方法	32
	7.3 結果	34
8	ヒット時間による荷電粒子の方向同定能力	35
9	結論	38
10	謝辞	39

2 ニュートリノ振動

ニュートリノは中性のレプトンであり、弱い相互作用と重力相互作用 を行い ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の3つのフレーバー(弱い相互作用の固有状態)を持 つことが実験的に確立されている。

また、ニュートリノはフレーバーとは別に質量の固有状態 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 も 持っており、1つのフレーバーの固有状態はこの質量の固有状態の混合状 態で表される。

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_{i} U_{MNS}^{\alpha i} |\nu_{i}\rangle \tag{1}$$

これまで、ニュートリノ振動は太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、 原子炉ニュートリノ、加速器ニュートリノによる実験にて確認されてい る。

ニュートリノ振動とは、飛行中にニュートリノが元と異なるフレーバー に遷移する現象のことであり、ニュートリノの質量が0ではないこと及び フレーバーの固有状態が質量固有状態の混合状態で表されることに起因 している。ここで式 (1) の行列 $U_{MNS}^{\alpha i}$ はポンテコルボ・牧・中川・坂田行 列と呼ばれ、以下のような式で表される3×3のユニタリー行列である。

$$U_{MNS}^{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & -c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(2)

 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量固有状態の混合角である。 $\delta(\delta_{CP})$ は CP 対称性の破れの複素位相である。

このとき、飛行距離 L の間にニュートリノの状態が ν_{α} から ν_{β} へと振動している確率は以下の式で表される。

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} Re(U_{\alpha i}^{*}U_{\beta i}U_{\alpha j}U_{\beta j}^{*}) \sin^{2}\left(\frac{\Delta m_{ij}^{2}L}{4E_{\nu}}\right)$$
$$+ 2 \sum_{k>j} Im(U_{\alpha i}^{*}U_{\beta i}U_{\alpha j}U_{\beta j}^{*}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^{2}L}{2E_{\nu}}\right)$$
(3)

ここで、 Δm_{ij}^2 は質量二乗差であり、 E_{ν} はニュートリノのエネルギーである。



J-PARCからスーパーカミオカンデまでのミューニュートリノの道筋

図 1: T2K 実験概略図 [1]

3 T2K実験

概要

T2K 実験は日本で行われている長基線ニュートリノ実験で、茨城県 東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC から 295km 先の岐阜県神 岡のスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを発射する 実験である。概略図を図1に示す。J-PARC 構内 (280m 地点) にあ る前置検出器及び、後置検出器 (295km 地点) であるスーパーカミ オカンデの両方でニュートリノ反応を観測することによりニュート リノ振動のパラメータの精密測定を行い、混合角 θ_{ij} の精密測定と、 CP 対称性の破れのパラメータδ_{CP} の調査を目的としている。

• ニュートリノビーム

ニュートリノビームは J-PARC にて、陽子ビームをグラファイト標 的に衝突させて π 中間子を生成し、その π 中間子が ν_{μ} へと崩壊す ることで作られる。ニュートリノ振動の確率は式3より、ビームの エネルギーに依存するため、低いエネルギーのニュートリノは高エ ネルギーのニュートリノに比べて短い距離で振動する。T2K 実験 のニュートリノビームは 600MeV を中心としたエネルギー分布を 持っており、これは後置検出器であるスーパーカミオカンデのある 295km 先で最もニュートリノ振動が起こりやすくするためである。 また、T2K 実験では off-axis 法を採用している。off-axis 法とは、ビー ム軸方向から少しずらした角度でビームを観測することによって、 ビームエネルギーの幅を狭い範囲で観測することができる手法であ る。T2K 実験では off-axis 角として 2.5° を採用しており、これによっ てニュートリノ振動の効果が最もよく見える角度を選んでいる。



 \boxtimes 2: INGRID[1]

• INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) はニュートリノビーム on-axis 方向に設置されている、ニュートリノビームの方向及び強度の確認 を行う検出器である。写真を図2に示す。

グラファイト標的から280m下流に設置されており、ビーム方向に7 台、垂直横方向に7台のモジュールが十字に並べられており、各モ ジュールは9枚の鉄層と11枚のシンチレータ層からなっている。こ の14台のモジュールによってビーム中心より±5mの範囲をカバー している。

 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、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山地下1000m にある世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置であり、J-PARC のグラファイト標的から 295km 先にある。 スーパーカミオカンデは5万トンの純水を蓄えている、直径 39.3m、 高さ 41.4 mの円筒形の水タンクと、その外壁に約 1300 本の光電子 増倍管からなっている。スーパーカミオカンデでは水をニュートリ ノビームの標的としており、水とのニュートリノ反応にて生じた荷 電粒子は円錐状のチェレンコフ光を放射する。このチェレンコフ光 を外壁に設置した光電子増倍管で観測するとリング状の信号を見る ことができる、この際ミューオンによるチェレンコフ光ははっきり としたリングを作るが、電子によるリングはぼんやりしているとい う特徴がある。このリングによって、粒子の種類や、荷電粒子のエ ネルギー、生成点、進行方向などを再構成している。



図 3: WAGASCI予定図

4 WAGASCI 実験

本章ではT2K実験の前置検出器ホール地下二階に設置されているWA-GASCI検出器および、設置予定のSide-MRDについて述べる。完成予定図を図3に示す。

4.1 WAGASCI

WAGASCI(WAter Grid And SCIntillator)検出器は、J-PARC構内の T2K実験前置検出器ホール地下二階に設置されている三次元格子構造を 持つニュートリノ検出器である。

WAGASCI検出器一台の大きさはビーム軸と垂直な方向に縦横1m、平行 な方向に0.5mで、ニュートリノ標的の水とCHの重量はそれぞれ400kg と100kgである。検出器内部はプラスチックシンチレータを格子状に組 むことで三次元的な格子構造を実現している。プラスチックシンチレー タの並べ方は、横方向、グリッド構造、縦方向、グリッド構造、横方向 の順番に配置しており、グリッド構造のプラスチックシンチレータは縦 横5cmの間隔で配置されている。そのグリッド内に水またはCHを入れ るため、5.0cm×5.0cm×2.5cmの水またはCHのセルが並んでいるような 構造になる。プラスチックシンチレータを三次元構造に組むことで、荷 電粒子に対して4πのアクセプタンスを実現できる。

また、WAGASCI検出器ではプラスチックシンチレータ内でのニュートリ ノ反応はバックグラウンドになるため、厚さ 3mm の薄型のシンチレータ



図 4: Side-MRD

を使用している。このためニュートリノ標的部分の体積がおよそ 80 %を 占めている。

4.2 Side-MRD

Side – MRD は WAGASCI 検出器の左右両サイドに設置するミューオ ンの運動量を測定する検出器である。建設中の写真を図4に示す。これ はシンチレータ挿入後でエレキをマウントする前の状態である。 Side-MRD は 11 層の鉄層と 10 層のシンチレータ層を交互に並べてできる サンドイッチ構造をしている。このSide-MRDはWAGASCI検出器の左右 両サイドにそれぞれ 50cm 離した位置に設置を予定しており、WAGASCI 検出器内で起こったニュートリノ反応によって生成されたミューオンの うち、大角度方向に飛んで来るものを観測することを目的としている。 観測されるミューオンはシンチレータ層を通るのと交互に鉄層も貫通す る。その際、運動量の低いものは鉄層に止められるため、何層目まで到 達したかを確認することで運動量の情報を得ることができる。 加えて、WAGASCI 検出器との間でヒットタイミングの差から荷電粒子 の方向同定が可能であれば、これによってバックグラウンドとなる壁や 床などで反応した粒子からのイベントを排除することが可能である。 Side-MRD にて使用するシンチレータの写真を図5に示す。 シンチレータは長さが180cm、幅が20cm、厚さが0.7cmである。シンチ レータにはS字に曲げられて波長変換ファイバーが埋め込まれており、両



図 5: Side-MRD 用のシンチレータ

端に MPPC が取り付けられるようになっているため、一枚につき 2ch 持っている。

また、Side-MRD ではシンチレータ層、1 層につき 8 枚のシンチレータを 使用し、10 層あるため、1 台につき 80 枚のシンチレータを使用し 160ch 持っている。2 台の Side-MRD を作るために使用するシンチレータの枚数 は 160 枚である。

4.3 Baby-MIND

Baby-MIND は WAGASCI 検出器に対してニュートリノビーム下流に 設置予定の MRD である。

Baby-MRD は鉄層およびシンチレータ層によるビーム方向の高エネルギー のミューオンの運動量測定だけでなく、MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector)によって磁場をかけることで荷電粒子の電荷の正負を判別する 役割も持っている。



図 6: シンチレータ試験のデータ収集系

5 Side-MRD シンチレータの詳細試験

5.1 **目的**

Side-MRD にて使用されるシンチレータについて、CAMAC モジュー ルである ADC、TDC を使用して光量、時間分解能及び位置分解能につ いて宇宙線を使った測定試験を行った。

5.2 SETUP

まず、シンチレータ試験のデータ収集系及び写真を図6及び図7に示 す。

5.2.1 使用機器

• MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクス社の製品で、 ガイガーモード APD(アバランシェフォトダイオード) をマルチピ クセル化したフォトンカウンティング (光子計測) デバイスである。 APD は逆電圧を印加することで光電流が増倍されるフォトダイオー



図 7: シンチレータ及びトリガーシンチレータの配置図

ドである。この逆電圧を降伏電圧以上にして動作させると光量の大 小によらず、光の入射によって素子固有の飽和出力を発生(ガイガー 放電)する。この状態をガイガーモードと呼ぶ。。MPPCは、この ガイガーモードの APD とクエンチング抵抗をあわせたものを1ピ クセルとして、多数のピクセルを並べた構造をしている(図8) MPPC のピクセルそれぞれがフォトンを検出した際に同じパルス を発生するため、MPPC からの信号はそれぞれのピクセルからのパ ルスの総和となり、信号の電荷量*Q*は

$$Q = C(V_{bias} - V_{br}) \times N \tag{4}$$

で表される。ここで、Cは1ピクセルの静電容量、 V_{bias} は印加している逆電圧、 V_{br} は降伏電圧、Nはフォトンを検出したピクセルの数である。

次に、MPPCの基礎特性について述べる。

– Gain

Gain とは、1ピクセルがフォトン1つを検出した際に発するパル スがどの程度増幅されたかを表す量であり、1ピクセルが1フォ トン検出した際に発するパルスの電荷量を $q(=C(V_{bias} - V_{br}))$ とすると、

$$Gain = \frac{q}{e} \tag{5}$$

ここで、eは素電荷である。



図 8: MPPCの構成

- 降伏電圧 (Break down voltage)

前述した印加する逆電圧で、APDがガイガーモードへと遷移 するときの電圧である。この降伏電圧には温度特性があり、温 度が高くなるとともに降伏電圧も上昇する。そのため MPPC を使用する際にはできるだけ温度変化の少ない状況が望まし く、測定の際には温度計を確認しながらエアコンを使い部屋の 気温に大きな変化が無いよう注意した。

– Dark Count

MPPC は光を検出しない完全に遮光された状態でもパルスを 発生することがある。このパルスをダークパルスと呼び、一秒 あたりのダークパルスの数をダークカウントと呼ぶ。このダー クパルスは信号とともに観測され形状にも変わりないため、検 出誤差の原因となる。このダークパルスは熱的に発生するもの であるため、周囲温度によって変化する。

Cross talk

MPPC のピクセルが光子を検出してアバランシェ増幅を行う 過程で二次光子が発生し、この光子を他のピクセルが検出する ことによって1ピクセルから 2p.e. 以上のパルスが観測される 事がある。この現象を Cross talk と呼ぶ。

- After Pulse

こちらも MPPC のピクセル内でアバランシェ増幅が行われる際に、結晶欠陥などによってキャリアが捕獲されることがある。

その後、捕獲されたこのキャリアが放出されると、入射フォト ン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。

- NIM モジュール
 - AMPLIFIER [FUJI DIAMOND INTERNATIONAL 0353t Octal PM Amplifier (×10)]
 入力信号を増幅させるモジュール、今回使用したのは×10倍
 させるモジュールを使用した。
 - HI VOLTAGE [REPIC QUED HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY MODEL RPH-034]
 高電圧を 4CH 出力できるモジュール、今回の実験ではトリガー 用のシンチレータとして使用した Nal シンチレータに付随す る光電子増倍管に高電圧をかけるために使用した。
 - CLOCK GENERATOR [カイズワークス 100MHz CLOCK GENERATOR KN271] 指定した周期、幅でデジタル信号を出力するモジュール。今回 の実験では MPPC の Gain 測定の際に LED ドライバに入力す る TTL、ADC の Gate 信号として使用した。
 - GATE GENERATOR [カイズワークス DUAL GATE GENERATOR KN1500]
 入力されたデジタル信号を指定した時間遅延させ、信号の幅を調節できるモジュール。今回の実験ではどの測定の際にもGate 信号のの遅延時間、幅を調整する目的で使用した。
 - DISCRIMINATOR [カイズワークス QUED DISCRIMINA-TOR KN240] 入力したアナログ信号が指定した threshold (閾値)を超えたと きにデジタル信号を出力するモジュール。GATE GENEATOR や COINCIDENSE,TDC などのモジュールに NaI シンチレー タや MPPC の信号を入力する際に使用した。
 - COINCIDENCE [カイズワークス TRIPLE 4-FOLD 1-VETO COINCIDENCE KN470] 指定した端子にデジタル信号が同時に入力された際にデジタル 信号を出力するモジュール。今回の実験ではトリガー用の上下



図 9: オシロスコープで確認した NaI の信号

に配置した NaI シンチレータからの信号が同時に来た際にデジタル信号を出力させるために使用した。

- CAMACモジュール
 - ADC [LeCroy 12Ch ADC 2249W]
 入力された信号を Gate 信号が入力されている間で積分を行い、数値を PC に出力するモジュール。出力される数値の単位は ADC COUNT であり、0.25pC/ADC COUNT である。
 - TDC [REPIC 8CH HR TDC RPC-061]
 入力された信号が Gate 信号に対して遅れている時間を PC に
 出力するモジュール。出力される数値の単位は TDC COUNT である。
- NaI シンチレータ+光電子増倍管
 - シンチレータの性能測定の実験にてトリガー用のシンチレータとし て使用した。シンチレータ内を荷電粒子が通ると発生する光を光電 子増倍管で増幅させ、電気信号として出力する。実験に利用する宇宙 線(ミューオン)の他にもバックグラウンドとなるγ線などにも反応 するが、信号の大きさが異なりミューオンが通過した際のほうが大き な信号を出す(図9はオシロスコープで確認した NaIの信号でミュー オンと思われるもの)。このため、あとに通す DISCRIMINATOR で はおおよそ宇宙線にて到達できる 400mV を閾値とした。



図 10: 配線した NIM モジュール

5.2.2 SETUP

本実験では2chで測定を行うため、2枚のSide-MRD用のシンチレータ を平置きにし、上下のシンチレータで両端に互い違いになるよう MPPC を付けた。MPPCの信号は×10のAmpを通した後、2つの出力先のう ちの1つはそのままADCに入力し光量の測定を行う、もう一方の出力先 は再度Ampを通し×10倍した後、DISCRIMINATORへ入力しデジタル 信号へ変換した後にTDCに入力し到達時間の測定を行う。 このとき、ADCおよびTDCのGate信号には、測定を行うSide-MRD用 のシンチレータの上と下に配置したNaIシンチレータ+光電子増倍管(ト リガーシンチ)を使用している。トリガーシンチからの信号はDISCRIM-INATORを通してデジタル信号に変換した後、COINCIDENCEに入力 し上下のトリガーシンチレータで同時に信号が出た際にデジタル信号を 出力する。その後この信号(Gate信号)をGATE GENERATORへ入力 し幅を200nsにし、遅延時間を調整してMPPCからの信号がGate信号内 に収まるようにした。そしてこのGate信号をADCおよびTDCのGATE 端子へ入力した。

図 10 は実際に配線を行った NIM モジュールの写真である。



図 12: LED ドライバ

図 11: MPPC 読み出し回路

5.3 前実験

Side-MRD 用シンチレータの測定を行うにあたって、前もって MPPC 及び TDC についての試験を行った。

5.3.1 MPPC の Gain 測定

LED ドライバを用いて使用する回路、ADC と合わせて Gain-bias の データを取った。

測定の際に得られるデータは ADC COUNT の単位で出力されるうえ、 MPPC には個性があり同じ印加電圧 (bias voltage) を加え、同じように 光をうけても個々の MPPC によって信号の増幅率など違いがある。その 為、前もって LED ドライバを使って LED を微弱に光らせ、数 p.e. の ADC COUNT を見ることで各 MPPC の Gain を測定しておく。このとき、使用 した MPPC 読み出し回路及び LED ドライバの回路図を図 11、図 12 に、 Setup の模式図を図 13 に示す。

図 12 の LED ドライバは図右上の bias の電圧値で LED の光量を調節 し、図左上の TTL 信号 (CLOCK Generator) の周期で LED を点灯させる 回路である。

暗幕などをかぶせ、十分に遮光させた箱の中で LED と MPPC を向き合わせた状態で測定を行った。MPPC にかけた bias は 56V から 1V 刻みで60V まで上げて測定を行い、0p.e. と 1p.e. の間の間隔 A[ADC COUNT] を



図 13: MPPC の Gain 測定における Setup

bias voltage [V]	Gain(MPPC1)	Gain(MPPC2)
56	2.34×10^6	2.33×10^6
57	3.34×10^6	2.85×10^6
58	4.08×10^6	$3.40 imes 10^6$
59	4.74×10^6	3.92×10^6
60	$5.32 imes 10^6$	4.41×10^6

表 1: Gain vs bias 表

読んだ後、式6より得た結果を表1に示す。そして表より横軸を MPPC にかけた bias voltage[V]、縦軸を Gain にとり、線形フィットを施したグ ラフを図 14、図 15 に示す。

ここで、Gainを算出する際に以下の式を使用した。

$$Gain = \frac{A \times 0.25 \times 10^{-12}}{10 \times e} \tag{6}$$

式6の0.25×10⁻¹²は使用した ADCの*pC/ADC COUNT* である。得られ たグラフより、MPPC1、MPPC2のGainが一致するbias voltage(MPPC1 は 56.5V、MPPC2 は 57.0V) をそれぞれの MPPC にかけて Side-MRD シ ンチレータの試験を行っていく。



図 14: MPPC1のGain vs bias グラフ 図 15: MPPC2のGain vs bias グラフ

5.3.2 TDC の測定

ADC と同様に TDC も出力されるデータは TDC COUNT という単位 であり時間 [ns] への変換式を調べる必要があり、また、各チャンネルご との off-set も不明であったため、合わせて調べる。

測定の際の Setup の模式図を図 16 に示す。この測定では Clock Generator の 2 つの出力端子より片一方はそのまま TDC の Gate 端子へ入力し、も う一方は Gate Generator へ入力し任意時間遅らせた後に TDC の CH0 お よび CH1 へ入力し、遅延させる時間を 100ns から 400ns まで 100ns 刻み で変化させ、出力された TDC COUNT の値を記録した。

時間を遅らせる際の調整方法はオシロスコープで波形を目視で確認しな がらポテンショメーターをドライバーで回して調整した。得られた結果 を表にまとめたものが表2である。そして、このデータをプロットし、線 形近似を施したものが図17および、図18である。

線形近似の結果より、off-set はそれぞれ CH0 は -163 TDC COUNT、 CH1 は -172 TDC COUNT であり、ns/TDC COUNT は傾きの逆数で 求められ、ns/TDC COUNT = 0.13ns/TDC COUNT が得られた。



図 16: TDC の測定における Setup

表 2: TDC COUNT vs delay time 表

delay time [ns]	TDC COUNT@CH0	TDC COUNT@CH1
100	617.5	595.5
200	1370.5	1334.5
300	2164.5	2115.5
400	2931.5	2869.5



19

5.4 本測定

以上の前実験の情報を元に Side-MRD シンチレータの詳細試験を行っ た。まず、トリガー用の NaI シンチレータを Side-MRD シンチレータの 中心に置いて行った測定によって得られた光量及び時間分解能のヒストグ ラムを図 19 に、各パラメータを表 3、オシロスコープで得た画像を図 20 に示す。図 20 において、赤色の信号が MPPC1、黄色の信号が MPPC2、 緑色の信号が Gate 信号である。図 19 の左のヒストグラムが光量分布で あり、青のヒストグラムが MPPC1、赤のヒストグラムが MPPC2、横 軸は $p.e. = \frac{ADC COUNT - pedestal}{A}$ にて求めた (得られた ADC のデータが ADC COUNT)。

右側のヒストグラムは左右の MPPC の信号到達時間の差のヒストグラムで あり、このヒストグラムをガウスフィットして得られたσが時間分解能であ る。このヒストグラムの横軸は *Difference of time* = $\frac{T_1-T_2}{2}$ ここで T_1, T_2 はそれぞれ MPPC1、MPPC2 で得られた TDCのデータを*TDC COUNT* として $T_1 = (TDC COUNT + 163) \times 0.13, T_2 = (TDC COUNT + 173) \times 0.13$ にて求めた。単純に信号の到達時間を求める場合、 T_1, T_2 の平均をとっ て $\frac{T_1+T_2}{2}$ を到達時間とするが、使用しているトリガーシンチレータのど こを通過してくるかというトリガーによるばらつきがあるため、 T_1, T_2 は それぞれ $T_{1,2} = T_{real1,2} + T_{tr}$ で構成されているため T_1, T_2 の差をとって *Difference of time* = $\frac{T_1-T_2}{2}$ を横軸とした。トリガーシンチレータによ る影響がない理想的な場合、 $\frac{T_1-T_2}{2}$ と $\frac{T_1+T_2}{2}$ は中心の値が異なるがσの値 に変わりはなく、今回必要な情報は時間分解能であるσであるためこの値 を採用した。MPPC1,MPPC2 それぞれの時間分解能を $\sigma1, \sigma2$ とすると、 描画した *Difference of time* の σ は、

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{2} \approx \frac{\sigma_{1,2}}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

となり、1ch あたりの時間分解能の <u>1</u> となる。これは Side-MRD 用のシ ンチレータが両側読み出しのため、シンチレータ一枚あたり 2ch 分のデー タが得られるためである。

得られた光量は左右どちらもおおよそ 20p.e. ほど (MPPC1:26p.e.,MPPC2:21p.e.) で時間分解能およびガウスフィットの平均値 (time) はそれぞれσ = 1.45ns, time = 0.22ns であった。これは後述する大量測定の際と大差ない値であった。

次に、トリガーシンチの位置の位置を変えて測定を行った。中心を 0cm とし、MPPC1 に近づく側を負方向、MPPC2 に近づく側を正方向として

衣 5. 平測だめ 551 01 パノノーノ				
MPPC's bias voltage (right)	$56.5\mathrm{V}$			
MPPC's bias voltage (left)	57.0V			
NaI scintillator's voltage	1050V			
DISCRIMINATOR's threshold of NaI	$400 \mathrm{mV}$			
Gate range	200ns			
threshold of MPPC	$300 {\rm mV}(1.5 {\rm p.e.})$			
Position of trigger scintillator	0cm(from center)			

表 3: 本測定の SETUP パラメーター



図 19: トリガー位置中心の光量 (左)及び時間分解能(右)



図 20: MPPC の信号の画像@オシロスコープ

得られた結果 (光量、time、time resolution) を表 4 に示す。

また、これらの諸量 (光量、time、time resolution) を縦軸に、横軸をトリ ガーシンチの位置にとってグラフにプロットした。(図 21 ~図 23) 図 21 はトリガーシンチの位置ごとに、MPPC1 を黒いプロット、MPPC2 を赤 いプロット、それぞれの和を青のプロットで描画した。本試験ではきれい にトリガー位置中心にて光量の一致を確認することは難しかった。後述の 大量試験の際の同様の測定では一度に4枚のシンチレータの両端で測定 を行えるため、トリガー位置中心で光量のおおよその一致を確認するこ とができた。このときと比べたズレの割合は MPPC1 が約 20% MPPC2 が約 10%ほどであった。

図 22 は左右の信号の到達時間のズレを縦軸にトリガーシンチレータの位置を横軸に取ったグラフである。グラフの線形フィットの傾きよりシンチレータの長さで見た信号の伝播速度は $v = \frac{1}{0.19} = 5.26 cm/ns$ が得られた。 図 23 は時間分解能の値を縦軸、横軸をトリガーシンチレータの位置でプロットした。およそどの位置でも大きな変化は見られず同じような値を確認することができた。

上記の試験では全て TDC に入力する前の DISCRIMINATOR にて約 1.5p.e.の 300mV にて閾値を設定して測定を行っている。ここから、この 閾値の値を変化させて時間分解能について同じ SETUP で測定を行った。 各閾値における時間分解能および全エントリー中の有用なデータの数の 割合に加えて、図 22 にて得たシンチレータ内の信号の伝播速度をかけて

位置[cm]	光量@MPPC1[p.e.]	光量@MPPC2[p.e.]	time[ns]	resolution[ns]
-80	55.0	13.0	-15.5	1.43
-70	47.0	14.0	-13.4	1.47
-60	39.0	14.5	-11.2	1.54
-50	36.0	16.0	-9.82	1.43
-40	35.0	17.0	-8.01	1.40
-30	33.0	18.0	-5.92	1.37
-20	32.0	19.0	-4.07	1.39
-10	28.0	20.0	-2.11	1.37
0	26.0	21.0	-0.22	1.45
+10	26.0	22.0	1.60	1.43
+20	25.0	25.0	3.54	1.37
+30	22.0	26.0	5.49	1.35
+40	21.0	28.0	7.29	1.28
+50	20.0	31.0	9.27	1.34
+60	19.0	32.0	11.3	1.48
+70	17.0	38.0	13.1	1.44
+80	15.0	44.0	14.9	1.33

表 4: トリガーシンチの位置に対する諸量



図 21: シンチレータの光量 vs トリガーシンチの位置@詳細試験



図 22: 時間 vs トリガーシンチの位置@詳細試験



図 23: 時間分解能 vs トリガーシンチの位置@詳細試験

位置分解能を求めて記録した表を表5に示す。

表5より、閾値を下げるに連れて幅の狭い時間分解能を得ることができ た。このことは ADC のによる光量が同じでも縦 (電圧) に大きい信号と 時間的に広い信号があり、これらの場合閾値が高いと掛かる位置にズレ が出るため、閾値が高いと時間分解能も広くなると考えられる。また、こ こで低い閾値 (100mV など) でも 5%ほどロスが確認されている。これは NaI シンチレータにかけている DISCRIMINATOR の閾値に対してとて も大きい信号が得られ、波形の後ろ側のノイズ部分が閾値にかかり一回 の宇宙線通過に対して二回測定を行い空のデータなどが得られたのでは ないかと考えられる。また、本測定においても Gate GENERATOR によ る Gate 信号の遅延時間の調整はオシロスコープによる画面の目視確認に よる調整なので Gate 信号よりも先に MPPC の信号が入る可能性もあり、 この場合もこのロスに含まれる。

表 5: 閾値に対する時間分解能および位置分解能

閾値 [mV](p.e.)	時間分解能 [ns]	トリガー効率	位置分解能 [cm]
500(2.5)	2.19	0.91	11.5
400(2.0)	1.81	0.94	9.52
300(1.5)	1.50	0.95	7.89
200(1.0)	1.29	0.95	6.79
100(0.5)	1.15	0.95	6.05

6 Side-MRD シンチレータの大量測定

6.1 目的

Side-MRDに使用するシンチレータの予備を含めた324枚についてCAEN 製の波形記録モジュール (digitizer)を用いて光量について測定を行った。 また、digitizerを用いてトリガーシンチレータの位置を変えた光量の変 化も確認した。

6.2 SETUP

SETUP の模式図を図 24 に示す。

測定方法はおおよそ前述の詳細試験のときと同じであるが、異なる点は digitizer [CAEN digitizer DT5742]を使用した点と、一度に測定する枚数 が異なる点が大きい。

digitizer はトリガー信号が入ったタイミングから 200nsの間の入力信号の 波形を記録するモジュールである。記録した波形のデータを元に光量、時 間を詳細試験の際の ADC 及び TDC を使用して得たのと同様の情報を得 ることができる。得られた波形の例を図 25 に示す。

光量に関しては得た波形を 200nsの区間で積分してデータを得た。

時間はイベントごとに波形のピークの値の 10%を閾値として、閾値前後 のピクセルの平均を到達した時間として記録した。(この digitizer では記 録した 200ns の間を 1023 このピクセルで分割して記録されている。) 使用した digitizer は 16ch 持っていたが、暗箱の大きさ等の都合より一度 に 8ch 使用して4枚のシンチレータに対して両端に MPPC を装着して測

定を行った。



図 24: SETUP の模式図@大量測定



図 25: digitizer にて得られる波形データ



図 26: シンチレータそれぞれの両端の光量の和のヒストグラム

6.3 測定結果

まず、図 26、図 27 に測定を行った Side-MRD 用のシンチレータ 324 枚 の光量について、それぞれ両端の和、両端の光量の差を和で割ったもの を横軸に取ったヒストグラムである。図 27 について、使用しないものと 判断したシンチレータを赤で塗りつぶした。

324枚全てのシンチレータを測定するため、少ないイベント数(およそ100) で測定を行いペデスタルを省いた部分で平均を取りファクター(K=0.77) をかけてピークを求めた。このファクターKは前もってピークを確認で きる大きいイベント数でピーク値とペデスタルを省いて求めた平均値と を比べて求めたものである。

図 26 よりおおよそ多数のシンチレータの光量は両端足し合わせて 40p.e. であり、片側では 20p.e. ほどであった。

図 27 より、横軸で 0.25 の位置に明らかに両端で光量に差があるものが 2 枚ほど確認できた。これら 2 枚は両端で光量が p.e. で 10 程度差があり、 ズレが大きすぎると判断し実際に Side-MRD に使用しないものとした。 原因としてはこれら 2 枚は運搬、保管の際使用されていた木箱に隙間な くシンチレータが詰められていたため、取り出す際ファイバー等に傷が 入ったりしてしまったのではないかと考えられたため、4 つの木箱から 1 枚ずつ排除することにした。

これより、使用可能なシンチレータは 320 枚であり、2 台の Side-MRD の 建設に必要な 160 枚を確保できた。

次に、大量測定の SETUP でトリガーシンチレータの位置を変えて測



図 27: シンチレータそれぞれの両端の光量の差/和のヒストグラム

定を行った、この際 Side-MRD のシンチレータは変えずに4枚のシンチ レータの両端 8ch 使用した。シンチレータの位置は前述の詳細試験と同 じように10cm 刻みでずらし、イベント数もピークを確認できる比較的大 きなイベント数で測定を行った。

測定によって得られたトリガーシンチレータの位置に対する光量のグラ フを図 28 に示す。図 21 と同様に MPPC1 側の 4ch の平均を黒いプロッ ト、反対側の 4ch の平均を赤いプロットで描き、両端の和を青いプロット で書いた。前章で述べたように、詳細試験の際のプロット比べて中心で 左右のプロットが近い値を確認することができた。これは片側を複数 ch で測定できたためよりきれいなプロットが得られたのだと考えれる。



図 28: シンチレータの光量 vs トリガーシンチの位置@大量測定

7 WAGASCI シンチレータの性能測定

7.1 目的

WAGASCI 検出器のシンチレータの時間分解能を測定し、Side-MRD のシンチレータの時間分解能と比較して方向同定が可能であるかを確認 する。

7.2 方法

詳細試験と同様のSETUP(図6のSide-MRDシンチレータがWAGASCI のシンチレータに変わるだけ)で上下に NaI シンチレータではさみ WA-GASCI のシンチレータについて測定を行った。測定の際のSETUPパラ メーターを表6、測定の際の写真を図 29 に示す。WAGASCI シンチレー タは片側の端からファイバーが伸びておりその端に光学接着剤を使いコ ネクタを付ける。

その際、余ったファイバーの先端はニッパーで切った後フィルムヤスリ をかけて磨いた。

測定は2chで二枚のWAGASCIシンチレータを重ねて置き、両端からファ イバーの伸びているように並べた。WAGASCIシンチレータはSide-MRD シンチレータに比べてとても細いため、NaIシンチレータをWAGASCI のシンチレータに対して垂直に置くと余剰部分がとても多くなってしま うと考えたため、上に乗せるNaIシンチレータをWAGASCIシンチレー タに垂直に、下に置く方を平行になるように置き、WAGASCIのシンチ レータの中心で交差するようにしてセッテイングした。また、WAGASCI シンチレータのファイバーの伸びていない側からも少しファイバーが露 出していたため暗幕の切れ端を噛ませて塞いだ。

MPPC's bias voltage (right)	$56.5\mathrm{V}$
MPPC's bias voltage (left)	57.0V
NaI scintillator's voltage	1050V
DISCRIMINATOR's threshold of NaI	400mV
Gate range	200ns
threshold of MPPC	100 mV(0.5 p.e.)
Position of trigger scintillator	0 cm(from center)

表 6: WAGASCI シンチレータの測定の SETUP パラメーター



図 29: WAGASCI シンチレータの測定の様子



図 30: WAGASCI シンチレータのトリガー位置中心の光量 (左)、時間分 解能 (右)

7.3 結果

測定によって得られたヒストグラムを図 30 に示す。左図のヒストグラムの横軸は図 19 と同様に $p.e. = \frac{ADC \ COUNT - pedestal}{A}$ であり、赤が MPPC1、 青が MPPC2 の光量の分布である。左右でおおよそ光量は一致しており約 13p.e. ほどであった。右図の横軸は、詳細試験の際は $T_1 = (TDC \ COUNT + 163) \times 0.13, T_2 = (TDC \ COUNT + 173) \times 0.13$ と置き、Difference of time = $\frac{T_1 - T_2}{2}$ を横軸にしたが、WAGASCI のシンチレータはシンチレーター枚に つき 1ch であるため Side-MRD 用のシンチレータの際の式に $\sqrt{2}$ をかけた Difference of time = $\frac{T_1 - T_2}{\sqrt{2}}$ を横軸にとった。ヒストグラムより、WAGASCI のシンチレータの時間分解能は $\sigma = 1.95ns$ であった。

8 ヒット時間による荷電粒子の方向同定能力

5章の Side-MRD シンチレータの詳細試験及び、7章の WAGASCI シ ンチレータの測定より二種のシンチレータの時間分解能を得た。これら より WAGASCI 検出器及び SIde-MRD にてミューオンの方向同定が可能 であるか確認する。つまり、Side-MRD にて観測されたミューオンのイベ ントが WAGASCI 検出器で反応し観測された後に Side-MRD に向かって 飛んできたものであるか確認できるか否かということであり、双方の時 間分解能が WAGASCI 検出器から Side-MRD ヘミューオンが飛ぶまでの 時間を判別できれば可能であるといえる。

WAGASCI検出器から Side-MRD までミューオンの飛ぶ時間を概算する。 ミューオンの速度はおよそ光速と同じであり $v = 3.0 \times 10^8 m$ で扱う。 WAGASCI 検出器のサイズは $1m \times 1m \times 0.5m$ で、WAGASCI 検出器か ら Side-MRD までの距離は 0.5mを想定しているので、WAGASCI 検出器 中心でシンチレータにヒットしたと仮定し、Side-MRD に向かってまっす ぐ飛んできたときを考えると、その時のミューオンの飛行距離はおよそ 1mとなる。よって、ミューオンの飛行時間は $\tau = \frac{L}{v} \approx \frac{1m}{3.0 \times 10^8 m} \approx 3.3ns$ と見積もることができた。

これより、図 19 及び図 30 の時間分解能のヒストグラムを WAGASCI シ ンチレータのデータに対して Side-MRD 用シンチレータのデータを 3.3ns 遅らせた位置に並べて描いたヒストグラムが図 31 である。

図 31 を書く際、それぞれのデータ数が異なるため、データのエントリー に対して WAGASCI シンチレータのデータと Side-MRD 用のシンチレー タのデータを 2:3 で重み付けして描画した。

このヒストグラムより重なっている部分を数え、全エントリー数で割った 数で1を引くと、重なっていない部分のイベントの割合が得られる。Side-MRD,WAGASCIのデータについてそれぞれ求めて、かけることでどちら も重ならずににイベントが得られる割合、つまり方向同定が可能である割 合が得られる。使用した式を式8に示す。ここで、Entry_{S-MRD}, Entry_{WGS} がそれぞれのデータの全エントリー数、E_{over,S-MRD}, E_{over,WGS} はそれぞ れのデータの内お互いのヒストグラムに重なっていたデータの数である。

$$P_{DI} = \left(1 - \frac{E_{over, S-MRD}}{Entry_{S-MRD}}\right) \times \left(1 - \frac{E_{over, WGS}}{Entry_{WGS}}\right)$$
(8)

これより、得られた割合は 0.6966 であり、約 70% の通過した荷電粒子に 対して方向同定が可能であることがわかった。



図 31: Side-MRD 及び WAGASCI のシンチレータの時間分解能の比較

しかし、これは WAGASCI 検出器および Side-MRD にそれぞれ 1hit のみ 残した場合であり、実際にニュートリノイベントの候補として選ばれる イベントは WAGASCI 検出器および Side-MRD で複数回 hit を残すこと になる。N回 hit した際の時間分解能 σ_N は 1hit した際の時間分解能 σ_1 に 対して $\sigma_N = \frac{\sigma_1}{\sqrt{N}}$ の精度向上が期待できる。

ここで、WAGASCI検出器、Side-MRD でそれぞれ3回ヒットしたと仮定したときのヒストグラムを図32に示す。それぞれの横軸の値 *Difference of time* について $\frac{1}{\sqrt{3}}$ でヒストグラムを描いた。

1hit の際と同様に計算を行うと、0.8430 であり、約85% のイベントで方向同定が可能なことがわかった。



図 32: Side-MRD 及び WAGASCI のシンチレータの時間分解能の比較 (3hit)

表 7: 得られたシンチレータのデータ		
光量 (S-MRD)	20p.e.	
光量 (WGS)	13p.e.	
時間分解能 (S-MRD) σ	1.45ns(閾値 1.5p.e.)	
	1.15ns(閾値 0.5p.e.)	
位置分解能 (S-MRD) σ_x	7.63cm(閾値 1.5p.e.)	
	6.05cm(閾値 0.5p.e.)	
時間分解能 (WGS) σ	1.95ns(閾値 0.5p.e.)	
方向同定能力	0.697 (1hit)	
	0.843 (3hit)	

9 結論

詳細試験、大量試験の結果より、宇宙線のミューオンが中心にヒットした際の Side-MRD 用シンチレータの光量はおおよそ 20p.e. であった。時間分解能については、閾値を 1.5p.e. の際 $\sigma = 1.45ns$ であり、位置分解能は $\sigma_x = 7.63cm$ であった。閾値を 0.5p.e. にすると時間分解能は $\sigma = 1.15ns$ であり、位置分解能は $\sigma_x = 6.05cm$ である。また、WAGASCI のシンチレータについては光量は 13p.e. ほどで、時間分解能は $\sigma = 1.95ns$ であった。

これらのデータを元に求めた、WAGASCI 検出器と Side-MRD 間のヒッ ト時間によるミューオンの方向同定能力は、それぞれの検出器で 1hit ず つの場合約 70% のイベントに対して方向同定が可能であり、それぞれの 検出器で 3hit ずつを仮定した場合 85% のイベントで方向同定が可能であ ることがわかった。

得られたこれらのデータを表7にまとめた。

10 謝辞

本研究を進めるにあたって、ご助力くださった方々にこの場を借りて お礼申し上げます。

指導教官の南野彰宏准教授には、ミーティング、授業等お忙しい中にもか かわらず様々なご指導賜りました。ノイズ対策の際には現場にて具体的 な策も教えていただきました、深く感謝申し上げます。

T2K 共同研究者の INR の Oleg, Nikolay には大量測定の際に加えてその後 のアドバイスまで、未熟でした自分に様々なことを教えてくださり、大 変貴重な経験をいただきました。

同じく共同研究者の大阪市立大学の田中さん、久木田さんは、大量測定 の際から使用している暗箱の作成を主導してくださり、その後の実験に も使用させていただきましてここに感謝の意を表します。

研究室の同期の山口さん、淺田くん、松下くんとは、実験の話から日頃 の他愛ない会話まで、今年から発足した研究室なので先輩もおらずわか らないことも多い中、楽しい一年間を過ごすことができました。

いろいろな人関わり、様々なことを学ぶことができ、とても濃い一年間 でした。

参考文献

- [1] T2K 実験 ホームページ http://t2k-experiment.org/ja/
- [2] 浜松ホトニクス MPPC カタログ