

千葉大学大学院 融合理工学府

修士論文

IceCube-Gen2 実験の新型光検出器用読み出し基板と  
その性能検査システムの開発

2024年3月提出

先進理化学専攻 物理学コース

千葉 めぐみ



# 概要

IceCube 実験は南極点氷河を利用して建設されたニュートリノ望遠鏡である。現在、より多くの高エネルギー事象を観測するために、次世代実験である IceCube-Gen2 計画が進行している。その実現には、電力源が限られている南極点でも使用できるよう省電力で、かつ、検出光子数のダイナミックレンジが大きい光検出器が必要である。我々は、検出器候補の 1 つとして、4 インチ光電子増倍管 (PMT) 18 台を一台の耐圧ガラス内に組み入れた検出器モジュール Gen2-DOM (G2DOM) を開発している。G2DOM 検出器に搭載する各 PMT のベース・読み出し基板 “wuBase” は、アノードだけでなく PMT のダイノードの途中からも信号を読み出し、2 チャンネル構成にすることで測定光子数のダイナミックレンジを広げ、線形性を向上させる。また、省電力化を達成するため、サンプルレートを小さいアナログ・デジタル変換器 (ADC) を使用している。

高い信頼性で G2DOM を製造するためには、搭載前の PMT や基板の性能を組み立て前後に検査する必要がある。その性能検査システムでは、各 PMT について組み立て前は 5 項目、組み立て後は 3 項目の測定を行う。本論文では、G2DOM 検出器に搭載する PMT に wuBase を接続し読み出しを行う “PMT モジュール” の性能評価測定及びその手法の開発について説明すると共に、G2DOM の組み立て前後の測定結果について報告する。



# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>1</b>
1.1 宇宙線エネルギースペクトル . . . . .	1
1.2 ニュートリノの検出 . . . . .	3
1.3 IceCube 次世代実験に向けた本論文の位置付け . . . . .	4
<b>第 2 章 IceCube 実験</b>	<b>5</b>
2.1 実験施設 . . . . .	5
2.2 DOM 検出器 . . . . .	6
2.2.1 PMT の原理 . . . . .	6
2.2.2 ゲイン . . . . .	7
2.2.3 Darkrate . . . . .	7
2.3 ニュートリノ事象 . . . . .	7
2.4 IceCube-Gen2 . . . . .	9
<b>第 3 章 高感度検出器 Gen2-DOM</b>	<b>11</b>
3.1 デザイン . . . . .	11
3.2 ガラス球 . . . . .	13
3.3 LED フラッシャー . . . . .	13
3.4 ゲルパッド . . . . .	13
3.5 PMT . . . . .	14
3.6 電圧印加・読み出し回路基板 wuBase . . . . .	15
3.7 PMT モジュール . . . . .	18
3.8 支持構造体 . . . . .	18
3.9 読み出しシステム . . . . .	20
<b>第 4 章 組み立て手順</b>	<b>23</b>
4.1 ゲルパッドの製作 . . . . .	23
4.2 アセンブリ . . . . .	24
4.3 半球同士の密封 . . . . .	25
4.4 品質管理 . . . . .	26

<b>第 5 章</b>	<b>組み立て前測定</b>	<b>29</b>
5.1	測定環境	29
5.2	波形フィッティング	31
5.3	電荷計算方法	31
5.4	ゲイン較正	34
5.5	電荷分布のフィッティング	35
5.6	線型性	38
5.7	時間分解能	39
5.8	Darkrate	41
5.8.1	DVT1 の組み立て前測定	41
5.8.2	環境による Darkrate の変化	41
<b>第 6 章</b>	<b>組み立て後測定</b>	<b>47</b>
6.1	測定環境	47
6.2	deadtime	49
6.3	ゲイン較正	49
6.4	Darkrate	49
6.4.1	PMT モジュールと DVT1 半球の比較	50
6.4.2	黒テープの有無による比較	50
6.4.3	半球と密封後の比較	52
6.4.4	組み立て前後の比較	52
6.5	複数読み出し	55
<b>第 7 章</b>	<b>まとめと展望</b>	<b>57</b>
<b>第 A 章</b>	<b>耐性試験</b>	<b>63</b>
A.1	耐圧試験	63
A.2	振動試験	65
<b>第 B 章</b>	<b>DVT2 の測定結果</b>	<b>69</b>
B.1	組み立て前測定	69
B.1.1	電荷分解能	69
B.1.2	Peak to Valley 比	70
B.1.3	時間分解能	70
B.2	組み立て前後の測定結果の比較	71
B.2.1	ゲイン較正	71
B.2.2	Darkrate	72

# 第 1 章

## 序章

### 1.1 宇宙線エネルギースペクトル

宇宙を飛び交う高エネルギーの陽子や原子核である宇宙線は、地球に絶え間なく降り注いでいる。宇宙線には、電子、陽電子や反陽子、光子やニュートリノも含まれている。これらの粒子がもつエネルギーごとのフラックスを示したものが、宇宙線のエネルギースペクトルである。例えば、 $5 \times 10^{16}$  eV では、1 年間に  $1 \text{ m}^2$  あたり約 1 個が到達する。これ以上のエネルギーの観測には広い面積や時間が必要だということがわかる。

図 1.1 は、様々な実験により観測された荷電宇宙線フラックスのスペクトルである。“ニー (Knee)” や “アングル (Ankle)” と呼ばれているスペクトルの折れ曲がりが見られる。また  $10^{20}$  eV 以上で急激に減少している現象は、GZK 限界 (Greisen-Zatsepin-Kuzmin limit) が原因であると考えられている。これは、 $10^{10}$  eV を超える高エネルギーの宇宙線は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) と衝突してエネルギーを失い、銀河系への到来数が減るという予想である [1]。高エネルギーの宇宙線については現在も発生源やメカニズムについて研究が進められているが、未だ解明されていない部分も多い。起源となる天体の候補として、活動銀河核、衝突銀河、ガンマ線バーストなどがあると考えられている。

可視光や電波、ガンマ線などを利用した観測が行われている中で、我々はニュートリノによる観測に着目している。ニュートリノは電荷をもたず、弱い相互作用しか作用しない。天体での高エネルギー現象で発生したニュートリノは、宇宙空間の磁気や相互作用で軌道を変えられることなく地球に直進し到達できる。そのため、地球に到達するニュートリノを捉えることができれば、発生天体の情報を得ることができる。

しかし、高エネルギーの宇宙ニュートリノを捉えることは決して容易ではない。地球に到達する頻度が低い上に、物質と相互作用をほとんどしないためである。ニュートリノが原子核や電子と衝突した際に叩き出された粒子が氷などの媒質中で光速を超えて進むと、チェレンコフ光とよばれる光を発生する。そのチェレンコフ光は光子数個からの弱い光であるが、光電効果により放出された光電子を増幅して電流として読み出す検出器を用いることで検出が可能になる。このような方法でニュートリノを観測する実験の一つが IceCube 実験である。南極点氷河中に光検出器を  $1 \text{ km}^3$  にわたり埋設し、氷の中で発生したチェレンコフ光を捉える。

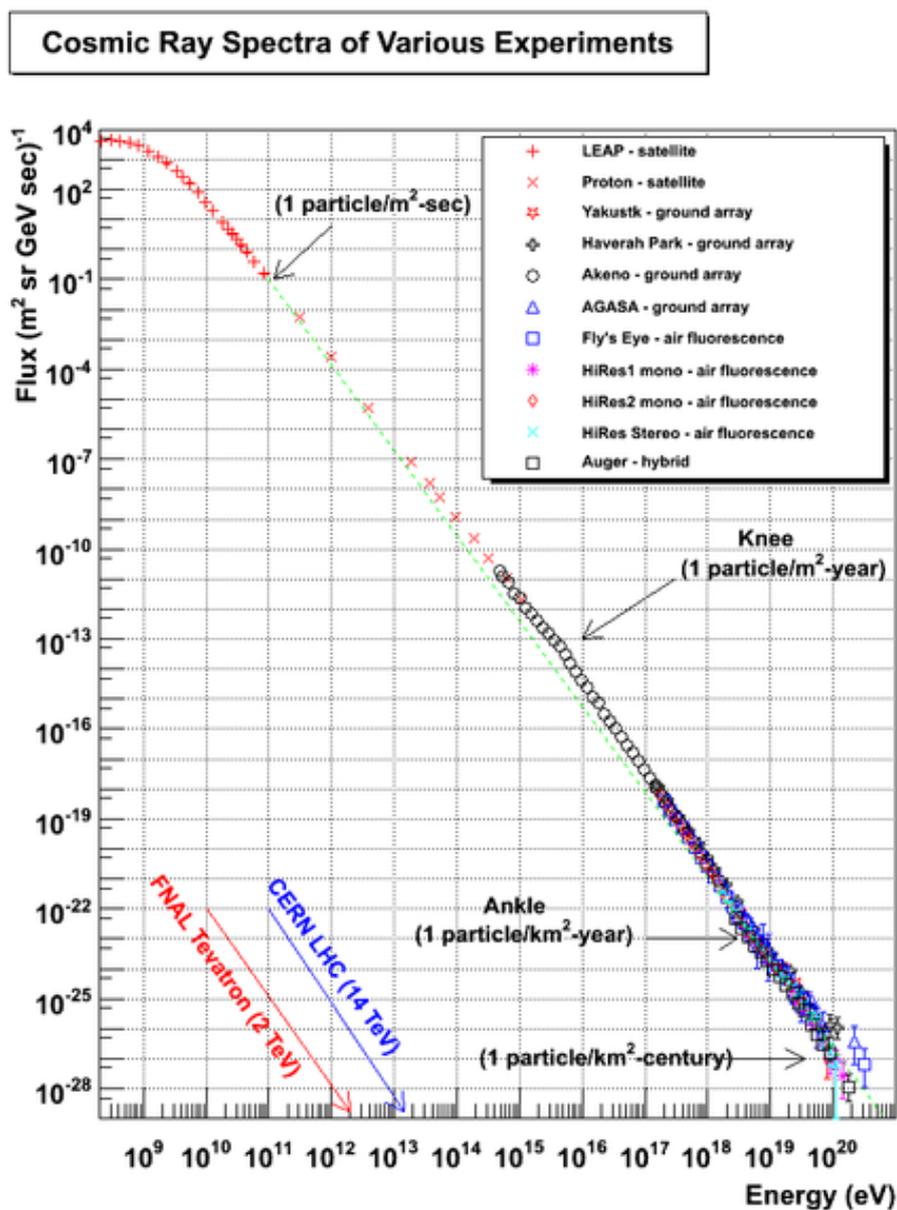


図 1.1: 宇宙線フラックスのエネルギースペクトル [2]。宇宙線の強度は、エネルギーが高くなるにつれてべき関数型で減少している。このスペクトルの傾きが変化する折れ曲がりには "ニー (Knee)" や "アングル (Ankle)" と呼ばれている。

## 1.2 ニュートリノの検出

ニュートリノの反応は、弱い相互作用を介してのみ起こる。弱い相互作用は主に2種類があり、次の反応式に表すような荷電カレント反応 (Charged Current, CC) と中性カレント反応 (Neutral Current, NC) である。

$$\nu_\ell + N \rightarrow \ell^\pm + X : CC$$

$$\nu_\ell + N \rightarrow \nu_\ell + X : NC$$

ここで  $N$  は核子、 $X$  はハドロン、 $\ell$  は荷電レプトンである。ファインマン・ダイアグラムはそれぞれ図 1.2 のように表される。

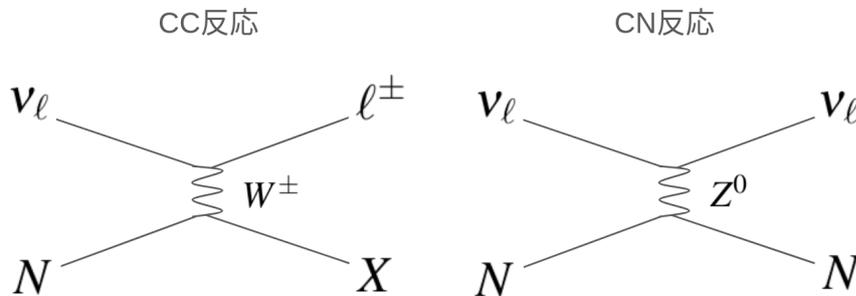


図 1.2: 左図は荷電カレント反応、右図は中性カレント反応のファインマン・ダイアグラムを表す。

荷電カレント反応は、 $W^\pm$  粒子が媒介する。ニュートリノと核子が反応すると、種類に応じて対応する荷電レプトンを生成する。中性カレント反応は、 $Z^0$  粒子が媒介し、反応したニュートリノは同じ種類のニュートリノのままであり、反応の後に新たな荷電粒子は生成しない。これらの反応で生成された荷電粒子がチェレンコフ光を生成し、それが検出されることで、元のニュートリノのエネルギーや到来方向を知ることができる。単位長さあたりに放出される波長  $\lambda$  の光子数  $N_\gamma$  は以下のように表される [3]。

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right), \beta = \frac{v}{c} \quad (1.1)$$

ここで、 $n(\lambda)$  は南極氷河の屈折率、 $\lambda$  はチェレンコフ光の波長、 $v$  は荷電粒子の速度、 $c$  は真空中での光速とする。また荷電粒子の速度方向に対するチェレンコフ光の放射角度  $\theta$  には以下に示す関係がある。

$$\cos \theta = \frac{1}{n(\lambda)\beta} \quad (1.2)$$

したがって荷電粒子の光子数からニュートリノのエネルギー、粒子の速度ベクトルからニュートリノの到来方向をそれぞれ計算できる。

### 1.3 IceCube 次世代実験に向けた本論文の位置付け

IceCube 実験では、天文学と素粒子物理学の発展のためにさらなる次世代計画を進行している。第2章では IceCube 実験とその展望について説明する。本研究はその次世代実験で使用する光検出器の開発・製造に深く関わる。新型検出器の必要性や搭載品の機能について第3章で説明する。また製造の手順について第4章で説明する。本研究では検出器の組み立て前後の性能検査システムを開発した。組み立て前の検査方法と結果については第5章、組み立て後の検査については第6章で説明する。第7章ではまとめと展望について説明する。

## 第 2 章

# IceCube 実験

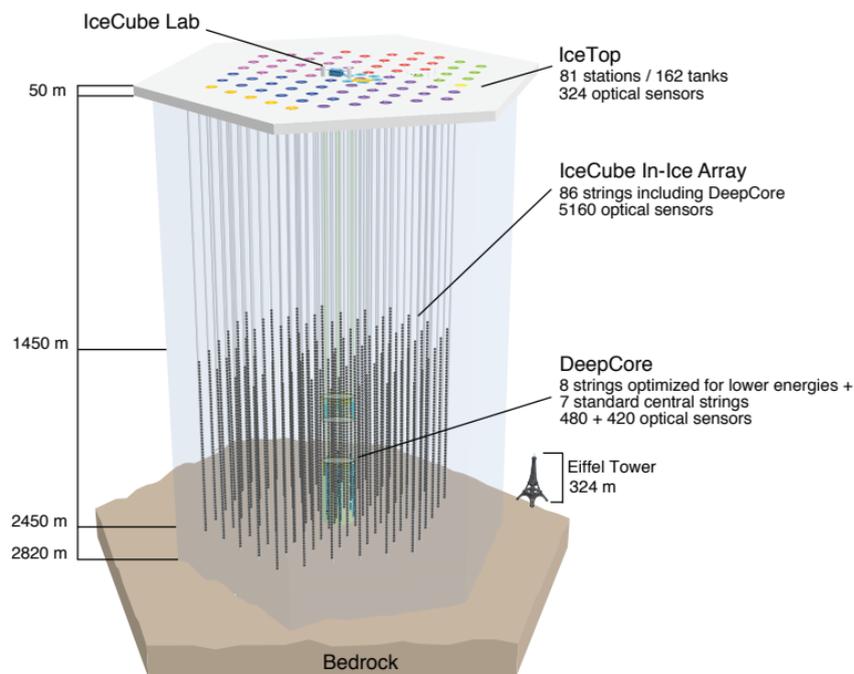


図 2.1: IceCube 実験施設。南極の地下深さ 1450 m から 2450 m にわたって光検出器が埋め込まれている。地表から 86 の穴が切削され、それぞれに検出器が連なるケーブルが通じている。深さ 1450 m 以下に検出器を埋めているのは、浅い氷に比べて水圧が高いため氷の中に気泡が少なく光が散乱されにくいためである。

IceCube は、図 2.1 に示すように南極に建設された実験施設で宇宙ニュートリノを観測する実験である。国際共同プロジェクトであり、日本を含めた 14 カ国が参加している。高エネルギー宇宙ニュートリノの発生源の同定や、素粒子物理学の発展を目的としている。

### 2.1 実験施設

IceCube ニュートリノ観測施設には、図 2.1 のように南極の氷河内に直径 1 km にあたり 86 本のケーブルに連なった検出器計 5160 個が埋設されている。氷河上には、IceCube 実験制御室 ICL

(IceCube Laboratory) が中心に設置されている。検出器は DOM (Digital Optical Module) とよばれ、地上の ICL に通じている 1 本のケーブルに 17 m 間隔で 60 個繋がれている。電力供給やデータ通信は、このケーブルを介して行う。

## 2.2 DOM 検出器

現在の IceCube で稼働中である DOM は、微弱な光を電流に変換し増幅して検出する装置である。構造は図 2.2 に示す [4]。外側は厚さ 0.5 インチの耐圧ガラス半球を、上下合わせることで球体になっている。半球同士のつなぎ目は、地磁気を遮断し PMT の性能を向上させる“マイクロメタルグリッド”で囲まれている。内部には、微弱な光を光電子として増倍して検出する光電子増倍管 (PMT: photomultiplier tube) を搭載している。PMT とガラス球の間には PMT に光子を到達させ、かつ PMT の位置を固定するシリコンゲルが充填されている。PMT にバイアス電圧を印加するための高電圧発生器および分圧器回路、アナログおよびデジタル信号の電子処理機能のあるメインボードの基板が上半球に搭載されている。またアレイ形状の較正と氷の特性の研究に使用される LED フラッシャーも搭載されている。PMT からの信号はメインボード上でデジタル化され、メモリにバッファされ、必要に応じて地表に送信される。

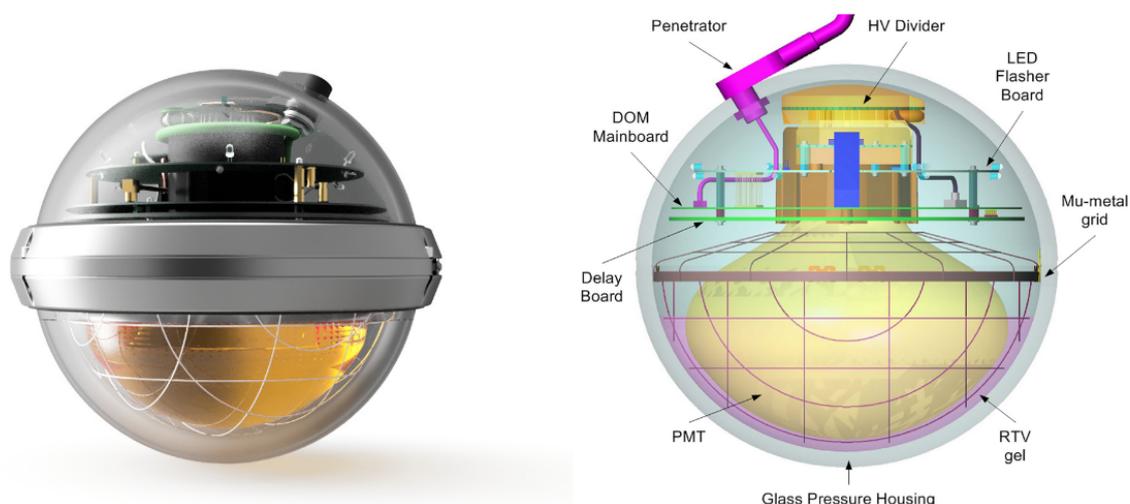


図 2.2: DOM 検出器。外側はガラス球で覆われており、上下のガラス球のつなぎ目を囲む銀色の部分がマイクロメタルグリッドである。下半球の黄色い部分が PMT のセンサーとなる部分である。上部にはメインボード、電圧印加用の基板、LED フラッシャーが搭載されている。

### 2.2.1 PMT の原理

PMT はガラス管に封じられた真空管で、光電面 (陰極、カソード)、集束電極、電子増倍部 (ダイノード)、陽極 (アノード) より構成されている。その構造を図 2.3 に示す。

光電子増倍管に入射した光は光電面を透過すると、光電面内の電子を励起し、光電効果により真空中に光電子を放出する。光電子が第 1 ダイノードに衝突し二次電子を放出し、さらにそれ以降の

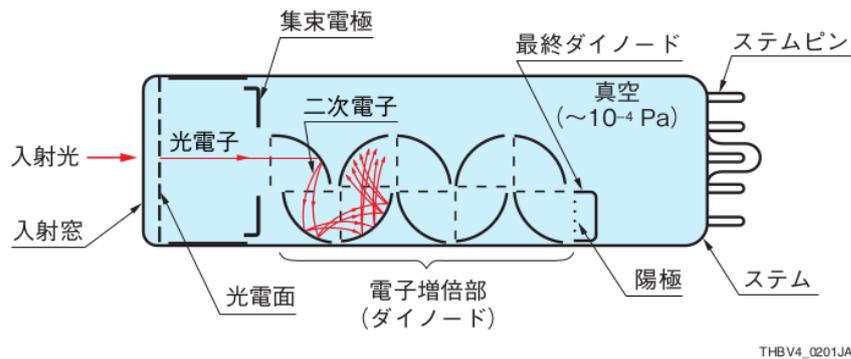


図 2.3: 光電子造倍管の構造 [5]。入射窓はガラスでできている。赤い矢印で示されるように電子が増幅されてゆく。隣り合うダイノード間の電位差によって、電子は繰り返し増倍される。ステムピン部分を外部の回路に接続することで電源を得る。

ダイノードに衝突し、電子放出を繰り返すことで電子を増倍する。最終ダイノードから放出された電子群は、アノードから取り出される。

PMT を動作させるためには、電圧分割回路と 500 V から 2000 V 程度の高電圧が必要である。各ダイノードに印加される電圧によって電子の増幅率が変化するため、適切に電圧を供給する回路が必要である。

### 2.2.2 ゲイン

PMT で電子が増幅される最終的な倍率を、ゲイン (Gain) という。ゲイン  $G$  は次の式で表される。

$$G = A \times V^{kn} \quad (2.1)$$

ここで、 $A$  は定数、 $k$  は電極の構造・材質で決まる値で 0.7~0.8 の値をとり、 $n$  はダイノードの数である。DOM に使用する PMT では  $n = 10$  で、 $10^7$  のゲインを使用する。

### 2.2.3 Darkrate

Darkrate は、外部からの光以外による信号の検出頻度である。Darkrate の発生源には、耐圧ガラスや PMT ガラス内の放射性崩壊によるシンチレーション、熱由来で発生する信号などがある。放射性プロセスの主な原因は、ガラス内のカリウムの崩壊である。崩壊で生成された荷電粒子が、ガラスの蛍光物質を励起することによってシンチレーション光が発生する。熱励起により発生した光子による信号は、 $-40^{\circ}\text{C}$  までの温度の低下に伴って小さくなる傾向がある。一方で極低温下では増加する成分もある [6]。

## 2.3 ニュートリノ事象

IceCube では、以上で述べた方法によりニュートリノの反応で発生したチェレンコフ光を検出しているが、このとき観測されるニュートリノ事象には、図 2.4 に示す 3 種類がある。

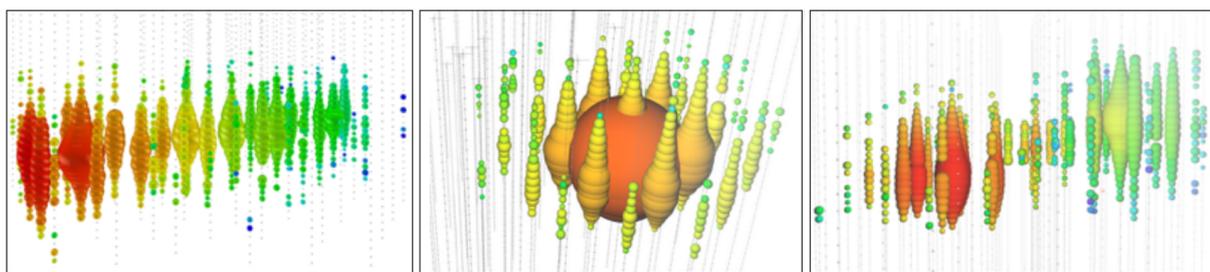


図 2.4: IceCube で観測された事象の例 [7]。左からトラック型事象、シャワー型事象、ダブルバング型事象を表す。球は、チェレンコフ光を検出した DOM の位置である。球の大きさは観測された光の量を表し、色は光子の相対時間を示す。早い光子は赤、遅い光子は青で示されている。

トラック型事象は、ミューオンニュートリノの CC 反応による事象である。シャワー型事象は、すべての種類のニュートリノで起こる。ダブルバング型事象は、超高エネルギーのタウニュートリノが作り出すタウ粒子の崩壊による稀なケースである。

また、2016 年 12 月 6 日には、6.3 PeV の高エネルギーを持つ反電子ニュートリノによる事象が観測された [8]。その現象は図 2.5 のように可視化された。ニュートリノが地球に突入し、南極の氷床内部で電子に衝突して粒子を生成し、すぐに崩壊して二次粒子のシャワーになった。1960 年にノーベル賞受賞者の物理学者シェルドン・グラショウが予言したグラショウ共鳴現象を観測して証明したことになる。この現象は、“Hydregea” (アジサイ) という愛称で呼ばれている。

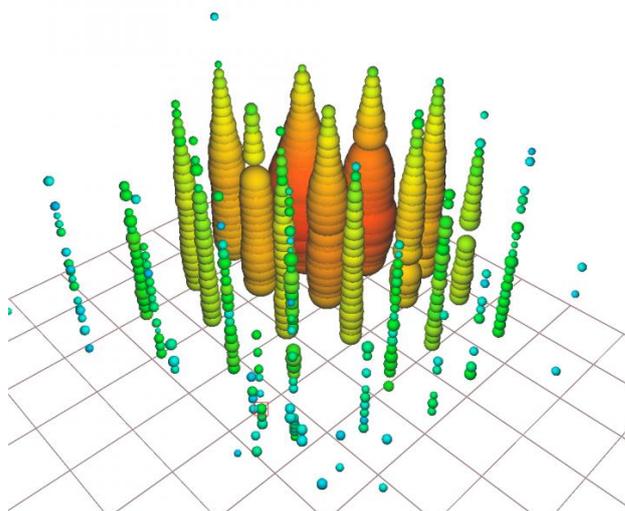


図 2.5: IceCube 検出器によって記録された Glashow イベントの可視化 [8]。色付きの各円は、イベントによってトリガーされた IceCube 検出器を示す。赤い円は早い時間にトリガーされた検出器を示し、緑と青の円はそれ以降にトリガーされた検出器を示す。

## 2.4 IceCube-Gen2

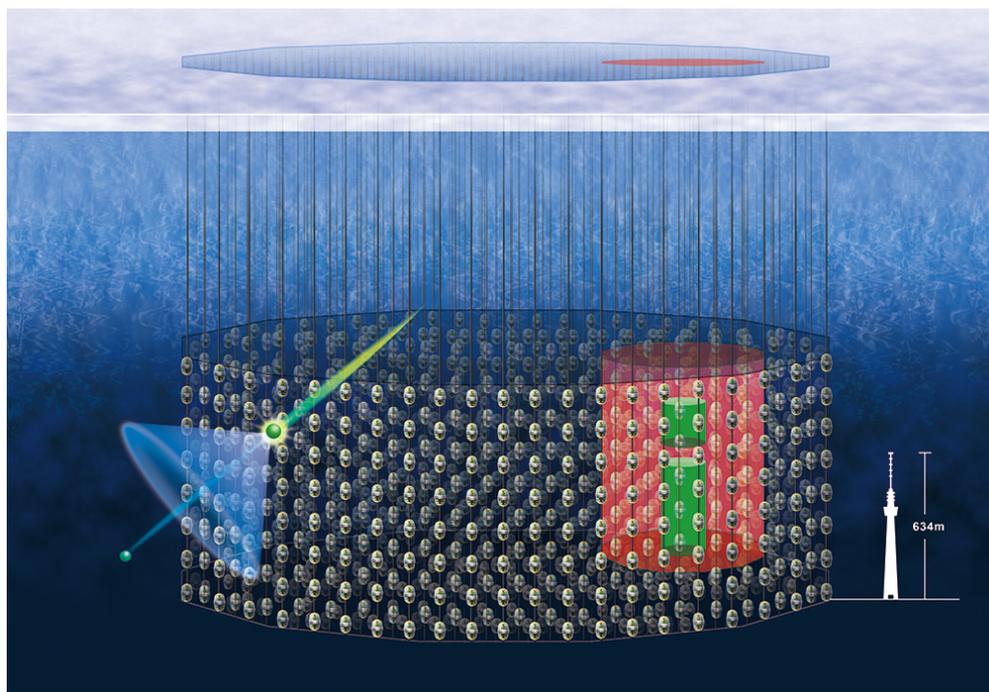


図 2.6: IceCube-Gen2 の完成イメージ [9]。赤い部分は現行の IceCube 実験施設、その周り約 8 倍の体積で囲うように検出器を埋設する。

IceCube 実験では、宇宙線起源天体由来のニュートリノが実際に存在することが確認されてきた。現在、IceCube 次世代高エネルギー拡張計画である、“IceCube-Gen2” 実験の準備が進行中である。IceCube-Gen2 実験はニュートリノの信号を発見するだけでなく、放射起源の理解や素粒子物理の発展を目指して計画されている。Gen2 の名前は、IceCube の次世代実験であるという意味で“Generation 2” と、南極に生息する“ジェンツー”ペンギンの名前にちなんで命名された。

IceCube-Gen2 実験では、図 2.6 に示すように現行の IceCube 実験の約 8 倍の体積範囲に約 1 万台の新型光検出器を埋設する。体積が大きくなることで、観測頻度が 8 倍となり、年間数十事象程度である宇宙ニュートリノの観測頻度が上がる。特に到来頻度の少ない PeV エネルギー以上の事象を主な対象とする。また検出される飛跡の長さが増えることで、角度分解能が約 4 倍に上がる。2028 年から建設を開始し約 10 年で完成する計画で、建設開始の 6 年後には部分的な稼働を予定している。

現行の IceCube 検出器は、図 2.7 に示すように南極の氷に 125 m 間隔で検出器が連なるケーブルを埋設しているが、IceCube-Gen2 では 240 m の間隔で埋設予定である。体積が大きいため従来の施設では観測が難しいほど稀な高エネルギー事象でも捉えられる確率が上がる。一方で、空間的な密度が小さくなるため低エネルギー事象はすり抜けてしまう可能性が高くなる。一台の検出器で測定する信号強度のダイナミックレンジを広くすることで、これをカバーする。その条件を満たす検出器候補のひとつが、Gen2-DOM (G2DOM) である。本研究の主な対象である G2DOM については次章で詳しく述べる。

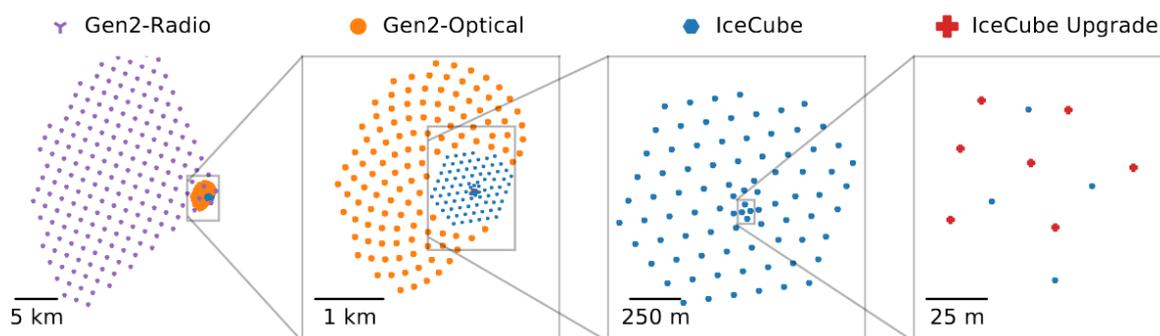


図 2.7: 実験施設を上から見た図 [9]。左図では、200 局からなる電波アレイを紫色の点で示す。120 の新しい IceCube-Gen2 ストリングはオレンジ色の点で、240 m 間隔で配置されている。それぞれ 80 個の検出器が垂直方向に 1.25 km にわたり設置される。青い点で示すのは現在のアイスキューブ検出器アレイである。右端では現在の IceCube 中心部に建設する IceCube アップグレードの 7 本のストリングを赤い点で示す。

## 第3章

# 高感度検出器 Gen2-DOM

IceCube-Gen2 計画に向けた検出器 Gen2-DOM (G2DOM) は、PMT を 16 台搭載した型と 18 台搭載した型の 2 種類の開発が進んでいる。千葉大学チームが中心となって開発を行っている検出器は、18 台の PMT を搭載した G2DOM である。

この G2DOM に要求される性能として、以下の項目が挙げられる。

- 半径を 13 インチ以内に抑えて南極建設時の氷河切削費用を削減する
- 南極での電力使用量が限られているため 4 W 以内の消費電力に抑える
- 地下氷河内の環境で使用するため  $-40^{\circ}\text{C}$ 、70 MhPa に耐性がある
- 1 台あたりのノイズは DOM と同等 (780 Hz) かそれ以下
- 検出光子数のダイナミックレンジを PMT1 台あたり 5000 光子/100 ns まで拡大
- 18 台の PMT を搭載することで DOM の 4 倍以上の検出効率を達成
- 時間分解能は 3 ns 以下

本章ではこれらの要求性能を満たすために開発された 18PMT の G2DOM の各部品について説明する。

### 3.1 デザイン

完成形の 3 次元図面は図 3.1 に示す。1 台の G2DOM は、ガラス球 (3.2 章)、ゲルパッド (3.4 章)、PMT (3.5 章)、電子基板 (3.6 章、3.9 章)、LED フラッシャー (3.3 章) によって構成されている。PMT は 18 個搭載され、図 3.1 の完成形イメージに示すように、位置ごとに名前を付けている。上半球と下半球は対称な構造で、それぞれの球の底に面している 1 台の PMT を 1st layer (L1)、その隣に位置する 4 台の PMT を 2nd layer (L2)、残りの 4 台を 3rd layer (L3) と呼ぶ。すべての PMT とガラスとの間には、シリコンゲルでできた“ゲルパッド”を接着している。ガラス球の直径は DOM の 94% と小さい一方で、縦方向は 133% と縦長である。これは、検出器を埋設する穴の直径を小さくして建設時の氷河切削費用を削減するためである。ガラス球内部は 0.5 bar の圧力で密封している。

図 3.2 には DOM と比較した光検出の有効面積と伝播距離の関係を示す。現行の DOM と比較して G2DOM は伝播距離 50 m で観測されるチェレンコフ光波長領域において 4.4 倍高い感度を持つ [10]。

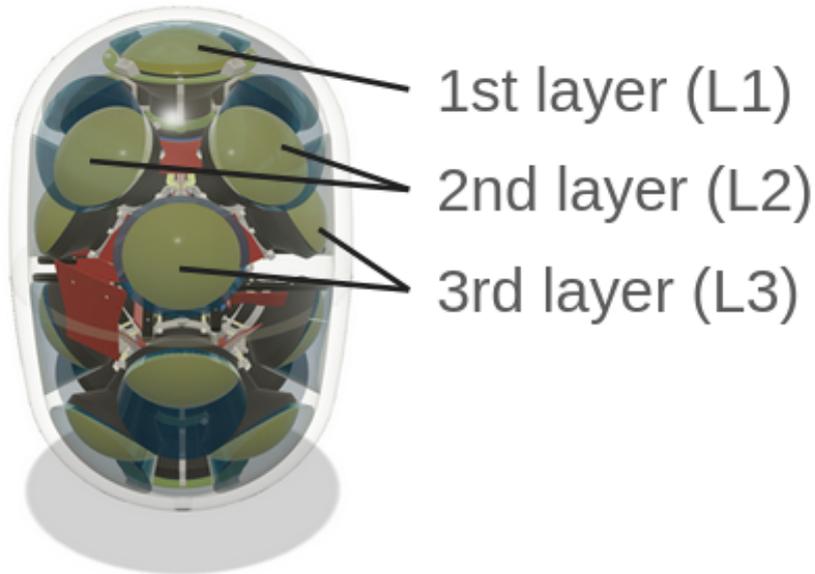


図 3.1: G2DOM の完成形の立体図面。耐圧ガラス球の内部に 18 台の PMT が搭載されている。図の上下の極部分の PMT2 台は 1st layer、それらに隣接する PMT 計 8 台は 2nd layer、中央部分の PMT 計 8 台は 3rd layer と呼ぶ。

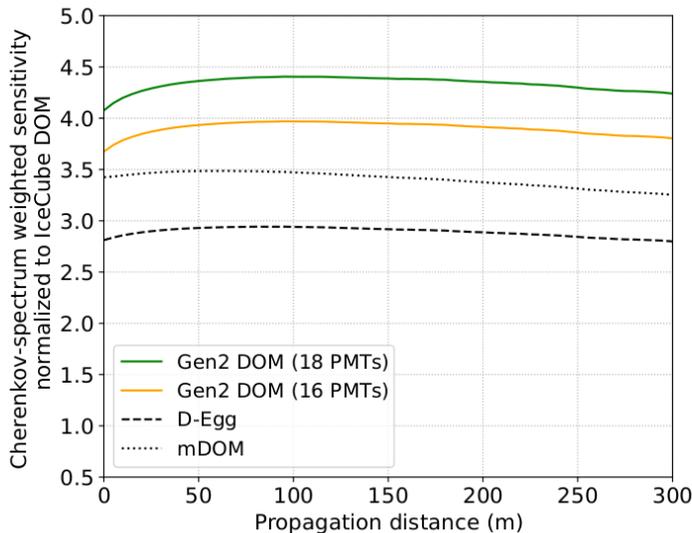


図 3.2: IceCube-Gen2 検出器と Ice-Cube 検出器 DOM のチェレンコフスペクトル加重有効面積の比較 [10]。縦軸は DOM の結果を基準にして正規化された有効面積、横軸は光子の発生点から検出器までの伝播距離を表す。G2DOM は緑色と黄色の実線で、NNVT 社製 4 インチ PMT で測定された量子効率を仮定した結果を表す。点線は IceCube で開発された検出器 “D-Egg”、“mDOM” である。

## 3.2 ガラス球

G2DOM に使用するガラスは岡本硝子社製の耐圧ガラス半球 2 台である。ガラス半球 2 台を合わせると直径 318 mm、高さ 540 mm、重さ 16.9 kg、厚さ 12.5 mm から 16.5 mm である [11]。南極点埋設時にかかる最大圧力を想定した 70 MPa の耐性試験に耐えられる強度がある。耐圧試験については付録 A で説明する。

## 3.3 LED フラッシャー

DOM と同様に、アレイ形状の較正と氷の特性の研究に使用される LED フラッシャーが搭載される。LED 電球は半球あたり 4 個ずつ、計 8 個搭載する。L3 の 4 つの PMT の間にできる 4 箇所の空間に、90 度間隔で外方向に向けて設置する。

## 3.4 ゲルパッド

DOM と同様に、G2DOM では光子の反射や散乱を防ぐためにシリコンゲルを PMT カソード面とガラス内側の間に充填している。ガラスの屈折率は約 1.5、シリコンの屈折率は約 1.4 である。ガラスを通過した光子がシリコンを介して PMT に到達するため、空気を介するよりも屈折率の差が小さくなる。PMT 1 台ごとにカソード面を覆い、ガラス表面に丸い形状で接するような設計である。この形状によって、図 3.3 に示すようにゲルパッド側面での光子の全反射 (臨界角は約  $45^\circ$ ) を利用して PMT に光子が到達するようにしている。そのため、PMT の周りすべての領域をゲルで満たすことなく高い検出効率を得ることができる。ゲルは、現行の DOM に使用されているものよりも透過度が高くなるよう改良された。図 3.4 に示すように 320 nm では 98% の透過率である。



図 3.3: 全反射による光の経路。ゲルパッド側面で光子が全反射することを利用するデザインである。

シリコンゲルは、液体の状態で混ぜ合わせて型に流し込むことで適当な形状で硬化させることができる。ゲルパッドは、形成用の治具を用いてレイヤーごとに異なる形状で製作した。製造の手順は第 4 章で述べる。

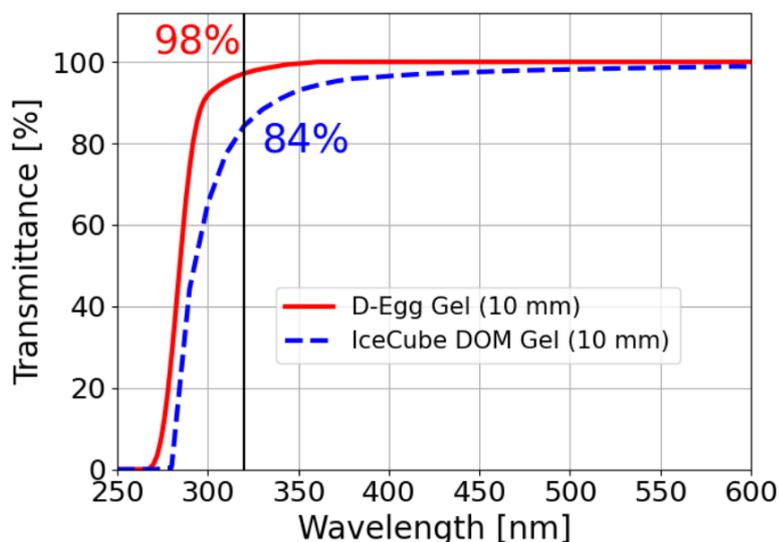


図 3.4: ゲルの透過率 [12]: G2DOM に使用するゲルは D-Egg Gel である。チェレンコフ光に対する検出器の感度は黒線で示す約 320 nm 以上の波長で最大となる。青線は厚さ 10 mm の DOM 用ゲル、赤線は G2DOM に使用する厚さ 10 mm の D-Egg ゲルの透過率を表す。

### 3.5 PMT

PMT は、図 3.5 のような 4 インチ PMT を使用する。個体差はあるが、光電面の直径は  $102 \pm 2$  mm、本体の長さは  $104 \pm 2$  mm である。PMT のカソード面に入射した光子のうち増幅される光子の割合は量子効率 (QE: Quantum efficiency) といい、出力電子数 / 入射光子数で求められる。G2DOM に使用する PMT の QE は波長 400 nm で 25% 程度である [13]。

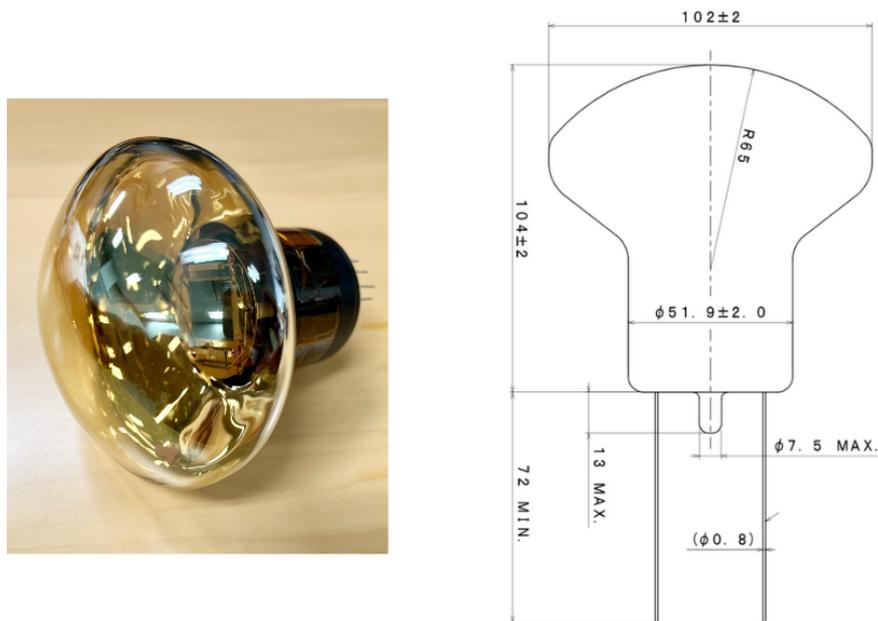


図 3.5: G2DOM に搭載される PMT。左図は実際に使用する規格の PMT。右図は PMT の寸法が示された図面。

### 3.6 電圧印加・読み出し回路基板 wuBase

wuBase (Waveform microBase) は、4 インチ PMT 用のベース・読み出し基板である。形状は Polar 型と Equatorial 型の 2 種類があり、図 3.6 のように前者は L1 と L2、後者は L3 に使用される。形状が異なるのは、ガラス球の中に干渉せずに配置するためである。形状は異なるが、回路は全く同じである。

図 3.7 に示すように、wuBase で高電圧供給を行うベース部分は、円形の部分である。PMT のピンに接続するコネクタは円形に並んでおり、それぞれがダイノードに繋がっている。昇圧にはコッククロフト・ウォルトン回路を用いている。アノードがグラウンドになっており、カソード面が負の高電圧(最大 1500 V 程度)となる。wuBase の長方形の部分には、マイクロコントローラ (MCU)、FPGA (field-programmable gate array)、アナログ・デジタル変換回路 (ADC) の電子回路部品が用いられている。ADC は消費電力を抑えるためにサンプリングレートが小さいものが選択されている。PMT の 1 光子相当の信号は半値幅 50 ns 程度であるのに対し ADC によるデータ取得は 60 MHz のため、そのまま読み出すと 16.7 ns ごとの限られた情報しか得られない。そこでシェイパー (積分回路) により波形を時間的に長くすることで、省電力のデータ取得と時間・電荷分解能の向上を両立している。

PMT による波形取得では、測定できる電子数に上限がある。測定上限を決める要因には、PMT 内の電子の飽和現象と、ADC で処理できる量の上限がある。PMT 内の模式図は図 3.8 に示す。外部からの光は PMT の光電面 (カソード) に当たり、光電子が発生する。光電子は PMT の 10 個のダイノードによって増倍されてゆき、アノードに到達する。大きい信号が得られた場合には終盤のダイノード付近の空間電荷密度が高くなることで飽和現象が起こり、電子を増幅しきれないことがある。アノードから読み出す電子数が ADC の上限値を超えて、それ以上の信号を捉えられなくなることも

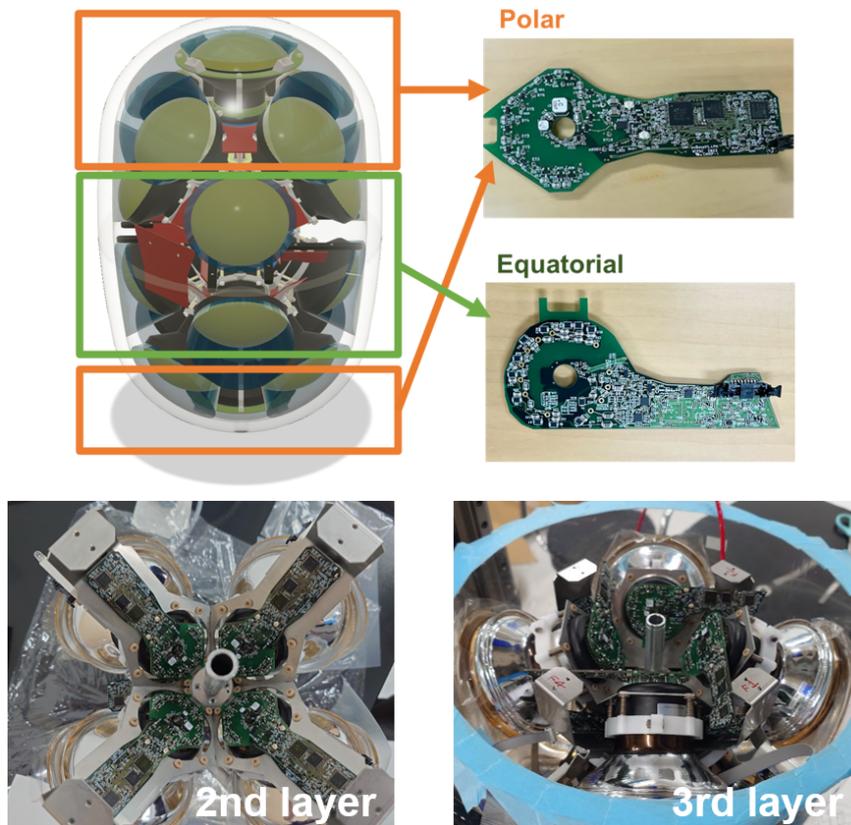


図 3.6: 2 種類の wuBase の使用法。L2 の PMT が付いた Polar 型 wuBase はガラス球の中心に対して対称に配置する。L3 の PMT が付いた equatorial 型の wuBase は半球同士を合わせる際に干渉しないよう、片側が直線の形状である。

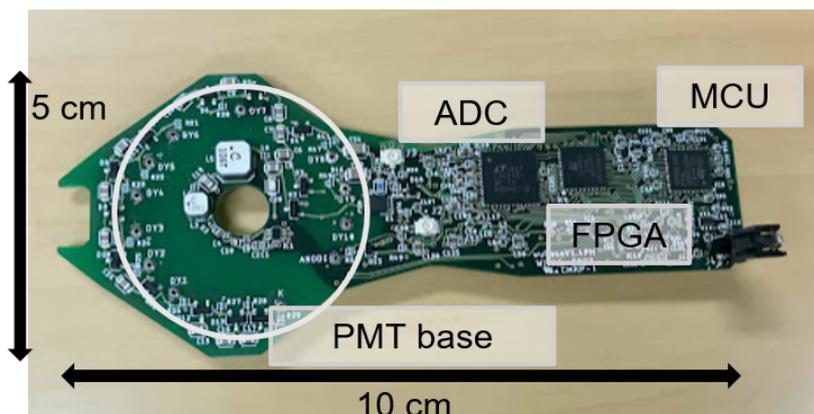


図 3.7: wuBase のサイズと基板の配置。PMT のダイノードに繋がるピンは円形に並んでおり、それに合わせて昇圧回路が配置されている。信号の読み出しや通信に関わる電子部品は写真右側の部分に配置されている。

ある。

そこで wuBase には、検出できる信号のダイナミックレンジを拡大する工夫をした。従来通りの方法ではアノードからデータを取得するところ、増幅途中のダイノード 8 からもデータを取り出すことで、検出光子数の上限値を拡大する。アノードで ADC の上限値を超える電子数になる場合でも、ダイノード 8 で空間電子密度が飽和しない範囲で信号を検出することが可能となる。本論文では、アノードからの読み出しを CH1、ダイノード 8 からの読み出しを CH2 と呼ぶ。2 つのチャンネルを用いることで、ダイナミックレンジの拡大を実現する。

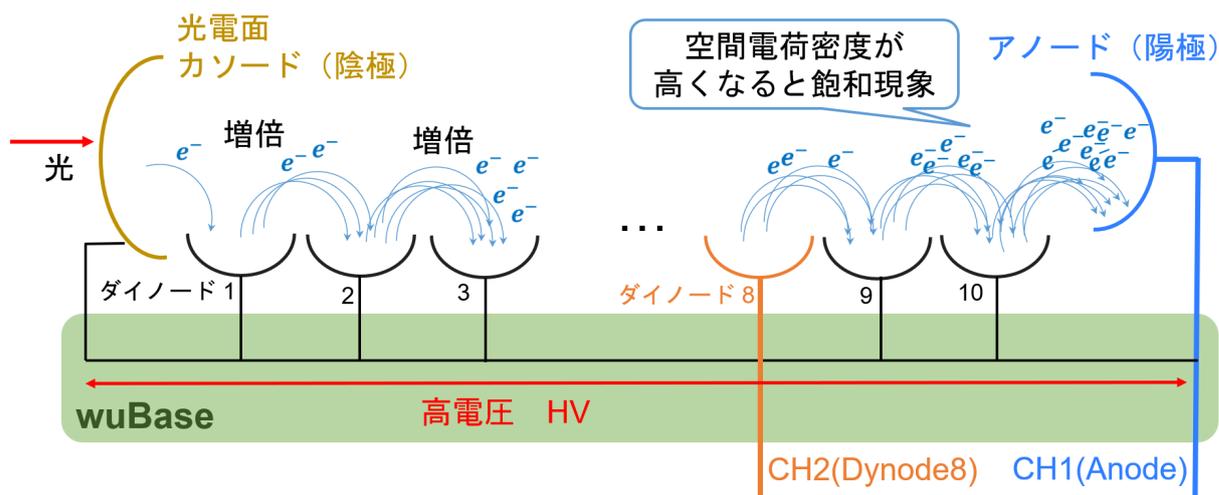


図 3.8: ダイナミックレンジ拡大の原理を説明する模式図。wuBase と PMT はダイノードから繋がるピンで接続される。PMT のダイノードには、wuBase の分圧回路で調整された電圧が印加される。アノードより周辺の空間電荷密度が低いダイノード 8 からも読み出しチャンネルを設ける。

PMT からの信号は、それぞれのチャンネルから電流として取得される。その経路を図 3.9 に示す。電流は電圧に変換され、反転増幅された後にアナログ・デジタル変換回路を経てデータとして取得する。ここで、CH1 ではアノードに達した電子を観測するので負の信号、CH2 では増幅途中のダイノード付近の電荷の変化による電流を見ているので正の信号が得られる。回路中の増幅反転器で反転されるため、実際にデータとして得る波形は CH1 が正、CH2 が負となる。波形取得のトリガとなる閾値は FPGA で処理される。トリガされて得られた ADC の値は FPGA を介して受け取ることができる。

最後に、wuBase の主な仕様についてまとめると、

- コッククロフト・ウォルトン回路で 900 V から 1200 V 程度に昇圧 (カソード面が負の高電圧)
- アノードとダイノード 8 の 2 つのチャンネルから 60 MSPS、12 bit の ADC による読み出し
- トリガされた波形と時間情報を FPGA で取得
- 高電圧、データ取得、バッファは MCU により制御
- 波形はシェイパーで引き伸ばす
- 全体の消費電力は 150 mW 以下
- Polar 型と Equatorial 型の 2 種類の形状
- 3 種類のトリガモードで波形取得 (詳細は第 5 章)

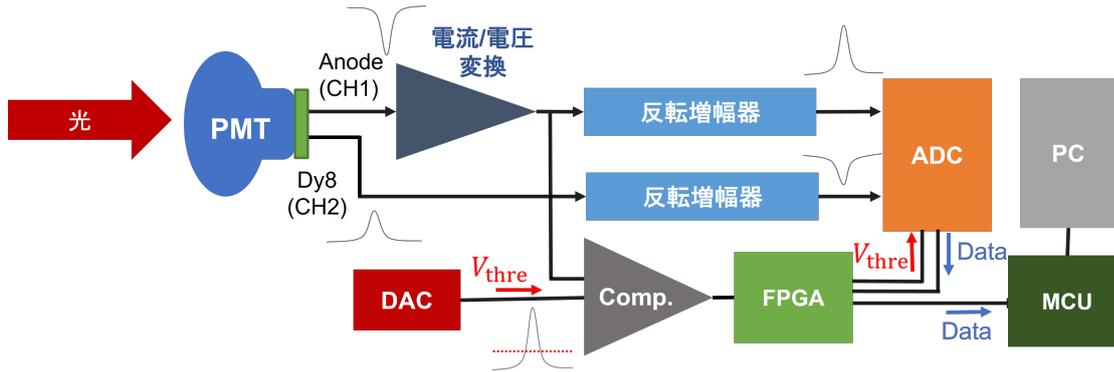


図 3.9: wuBase 読み出しの仕組みの模式図。CH1 と CH2 それぞれの信号の読み出し経路を示す。

となる。

### 3.7 PMT モジュール

Gen2-DOM 内部に搭載する各 PMT には、事前にゲルパッドと電子基板を取り付ける。本論文では、この図 3.10 の状態を“PMT モジュール”と呼ぶ。



図 3.10: PMT モジュール。これは L3 用のゲルパッドと Equatrical 型の wuBase を取り付けたものである。

### 3.8 支持構造体

G2DOM 内部には 18 台の PMT を配置する DOM よりも複雑な構造であるため、設計通り正確に組み立て固定する必要がある。PMT は、図 3.11 に示すような金属とプラスチックでできた内部支持構造体によって固定される。組み立ての際には、レイヤーごとに支持構造体に PMT を取り付けて組み立てた後にガラスに入れる。このとき L2 と L3 はガラスに支持構造体を入れた後、バネの力でゲルパッドがガラス外側へ押し出されるように設計されている。図 3.12 のように、バネは PMT のネックを抑えるホルダーと金属の骨組みの間に取り付ける。これにより、ゲルパッドがガラスに密着し

た状態で接着できる。また温度や圧力の変化でガラスが数ミリ収縮した場合にもバネの伸縮により適応できるようになる。



図 3.11: 内部支持構造体 (上半分) と、アセンブリされた PMT モジュール (下半分) [14]



図 3.12: 右: バネによる押し出し構造の 3 次元図面。左: バネ部分の写真。 [11]

### 3.9 読み出しシステム

G2DOM の読み出しシステムの全体の概要は、図 3.13 のように表される。各 PMT のアノードとダイノード 8 からの信号は、wuBase によりデジタル信号に変換される。wuBase から繋がるリボンケーブルは、上半球は Fanout board A へ、下半球は Fanout board B へ接続される。Fanout board にて整理されたデータは、MMB (Mini-mainboard) Controller によって処理される。Fanout board B は Fanout board A を介して MMB Controller と通信をする。電源を制御する MMB Power を介して検出器外部との通信用のペネトレーターケーブルへ繋がる。

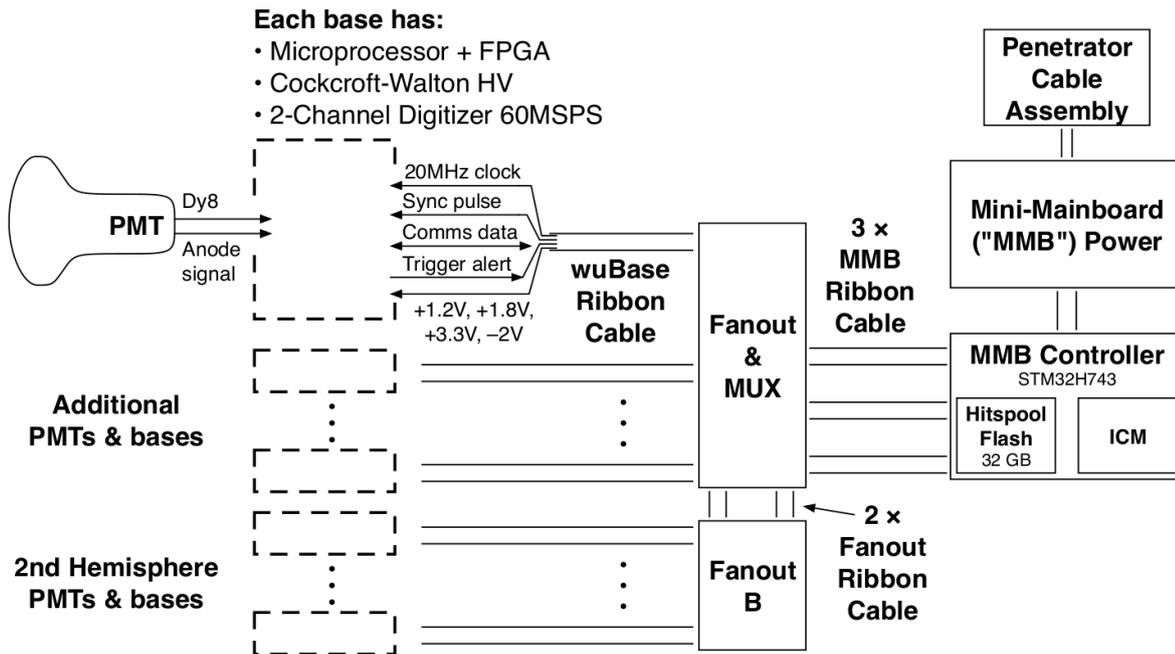


図 3.13: G2DOM 読み出しの仕組み [15]

Fanout board は、複数の wuBase と MMB、フラッシュの基板から繋がるケーブルを集約する。図 3.14 に示すように、Fanout board A には 16 のコネクタが搭載されている。Fanout board B には MMB とフラッシュ用のコネクタは無いが、それ以外の 11 のコネクタが同様の配置で搭載されている。MCU や FPGA は搭載されておらず、18 あるうち特定の wuBase を選択する役割がある。Fanout board A と Fanout board B はリボンケーブルで接続されている。これらは、それぞれの半球に搭載された 9 台の PMT からのケーブルを集約する。

Fanout board と検出器外部との中継には MMB を使用する。MMB は、コントローラー基板 (MMB Controller) とパワー基板 (MMB Power) の 2 種類があり、図 3.15 のように接続される。コントローラー基板に G2DOM 専用のソフトウェアを入れることで、検出器内部のモジュールと通信をする。環境センサも搭載されている。パワー基板は 5 V の DC/DC 変換器がついており、検出器外部へ通じるペネトレーターケーブルとの中継をしている。

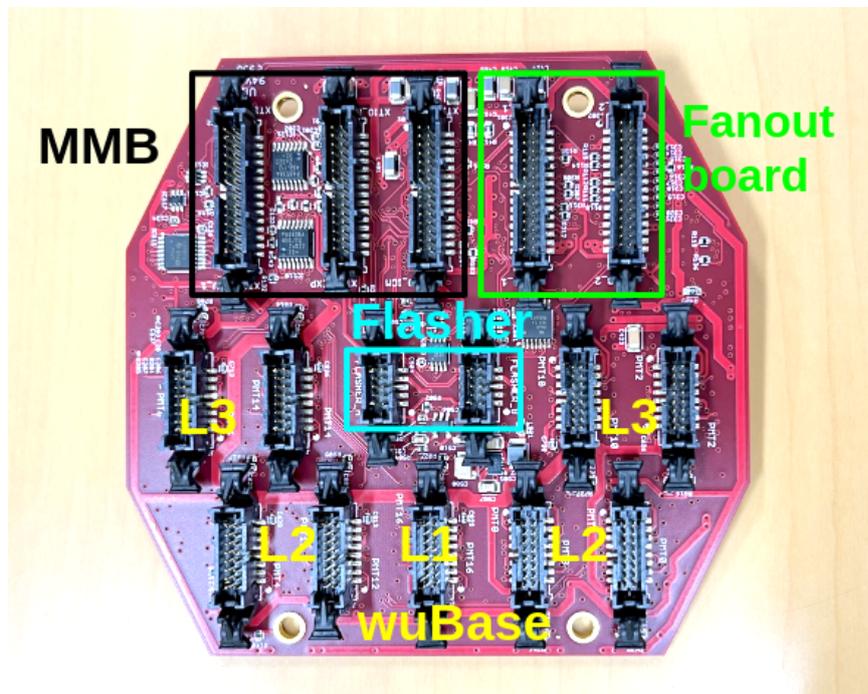


図 3.14: Fanout board A: 左上に黒で囲った 3 個のコネクタは MMB に、右上に緑色で囲った 2 個のコネクタは Fanout board B に通じるケーブルを接続する。水色で囲った 2 個のコネクタはそれぞれ上半球と下半球のフラッシャーケーブルを接続する。wuBase に接続するコネクタの近くには黄色でレイヤー番号を示す。

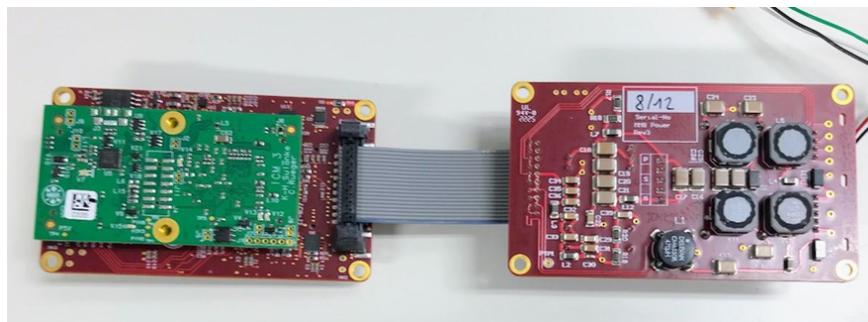


図 3.15: Mini-Mainboard: 左がコントローラー基板、右がパワー基板である。



## 第 4 章

# 組み立て手順

G2DOM の組み立ては、主に千葉大学のメンバーで行った。組み立て手順は大きく分けて表 4.1 のように進行する。

表 4.1: 組み立て手順と所要時間・人数

作業工程	所要時間	必要人数
ゲルパッドの製作	1 日/1PMT	1~2 人
ガラス半球内にアSEMBリ	6 日/半球	1~2 人
半球同士を密閉する	半日	2~3 人

この章では組み立てのそれぞれの製作工程に関して説明をする。

### 4.1 ゲルパッドの製作

ゲルパッドは、PMT の光電面を直接覆うように形成する。シリコンゲル A 剤とシリコンゲル B 剤を混ぜ合わせ型に流し込むことで、適当な形状で硬化させる。専用の治具を用いてレイヤーごとに異なる形状で製作した。ゲルパッドに気泡が含まれると、光子が反射してしまい検出光子数に影響が出てしまうため、気泡が入らないように十分注意して作業を行う必要がある。

以下の手順で製作した。

#### 型の準備

ゲルパッドの型は、シリコンゲルが剥がれやすいプラスチックシートで製造されている。このプラスチック型は図 4.1 のように、専用にデザインされた治具に固定して使用する。治具には PMT を固定するホルダーがついており、上下に動くようになっている。

#### PMT にシリコンゲルを接着する

シリコンゲル A 剤と B 剤を決められた割合で、攪拌機を利用して混ぜる。型に流し込み、真空容器に入れて気圧 0.1 bar で 2 時間保ち、気泡を取り除く。PMT を浸けて治具で位置を固定し真空容器で 0.1 bar にして 1 時間保ち、さらに気泡を取り除く。オープンに入れて 45°C で 5 時間保ち、硬化させる。

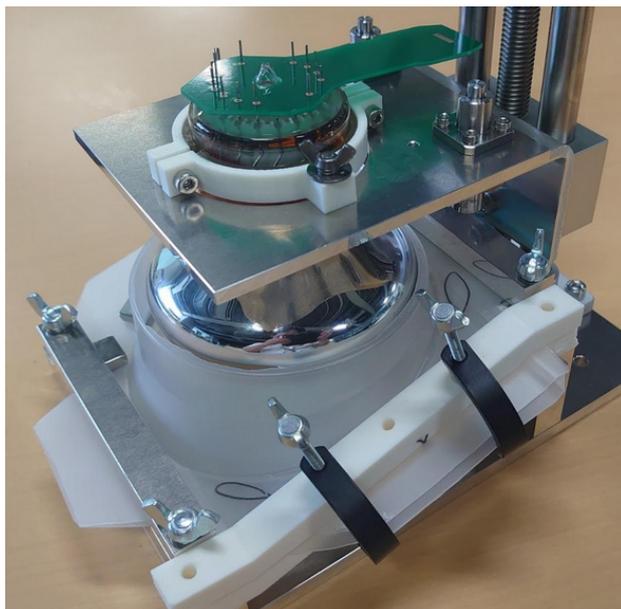


図 4.1: ゲルパッド製造用治具と PMT [16]。PMT を固定している金属のホルダーは上下に動かせる。PMT の下半分はプラスチック型の内部に入っている状態である。

#### シートからゲルパッドを取り外す

ゲルが硬化したら、型から外す。表面に埃が付着するのを防ぐため、ポリエチレンシートを表面に付け、ラップで包む。wuBase をはんだ付けすると、PMT モジュールが完成する。

## 4.2 アセンブリ

PMT モジュールは、ガラス半球内部に接着する。専用に製作した内部構造体 (第 3 章) により位置を固定しながら作業を行う。接着には、ゲルパッドと同じシリコンゲルを用いる。ゲルパッドのガラスが接する面は、図 4.2 に示すように縁の部分 (リム) が 3 mm 盛り上がった形である。図 4.3 に示すように、はじめに面積の小さいリムのみ接着して固定し、硬化後に面中心部の隙間にゲルを注ぐことでゲルパッドとガラス球の間の隙間を無くす。



図 4.2: ゲルパッドの CAD 図。円の端にはリムと呼ぶ厚い部分がある。円の上で一部リムが途切れているのは、リム接着後にゲルを流し入れる口となるためである。

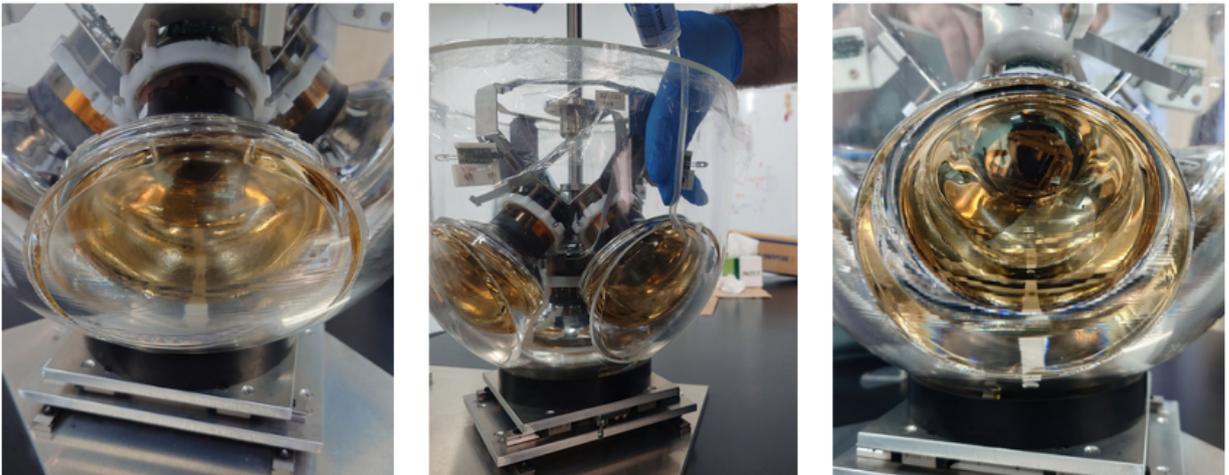


図 4.3: ゲル充填の過程。左: リムの接着を終えた状態。中央: ゲル充填の様子。右: 充填後の状態。PMT とガラスの間はゲルで充填されている。

フラッシャーはL3の4つのPMTの間にできる4箇所空間にある内部構造体に固定する。MMB Controller・Power、Fanout board A・Bの計4台も上半球と下半球のフラッシャーの間の空間に固定する。各基板同士は、図3.13のようにケーブルで接続される。半球にある4個のフラッシャーはケーブルで一列に接続され、そのうち1端がFanout board AまたはBに接続される。配線を終えたG2DOMの半球は図4.4のような状態である。ここで、18台のPMTには図4.5のように番号を付けている。

### 4.3 半球同士の密封

図4.6のように真空容器を用いて半球同士を密封する。配線を終えた半球同士を付けて1つに合わせる際に、ガラス半球同士が開かないように内部の気圧は0.5 barにして密封する。内部に残った水蒸気で氷ができることがないように、乾燥窒素を封入しながら気圧を下げる。合わせる半球同士は僅かな隙間を作り真空容器に入れ、圧力を0.5 barまで下げた後、乾燥窒素を1.0 barになるまで封入する。この作業を5回繰り返すことで、内部の97%が乾燥窒素の状態になる。その後、気圧0.5 barにして半球同士の隙間を無くしゴムテープで固定し、密封が完了する。



図 4.4: 配線を終えた G2DOM 半球。奥にあるのが上半球、手前にあるのが下半球である。上半球のガラスにはペネトレーターケーブルが付いている。赤いケーブルはペネトレーターケーブルからガラス内部に繋がっている。

#### 4.4 品質管理

G2DOM 内部には 18 台の PMT モジュールを搭載するが、一度ガラスに接着してしまえば取り出すことは容易ではない。正常に動作することを確認してから各製造ステップに進むため、品質管理として組み立て前と組み立て後に PMT モジュールの測定試験を行った。

組み立て手順と試験のタイミングについて図 4.7 にまとめた。はじめに PMT と wuBase がそれぞれ単体で正常に読み出しできるものかを確認する。ゲルパッドを作成して wuBase をはんだ付けすることで PMT モジュールができる。ここで組み立て前試験を行う。同様の手順を、G2DOM 搭載の全ての PMT モジュールについて行う。その後半球ごとにアセンブリをし、組み立て後試験を行う。半球同士合体した後は、読み出し試験に加えて耐性試験も行う。各測定の詳細については第 5 章、第 6 章、第 A 章にてそれぞれ延べる。

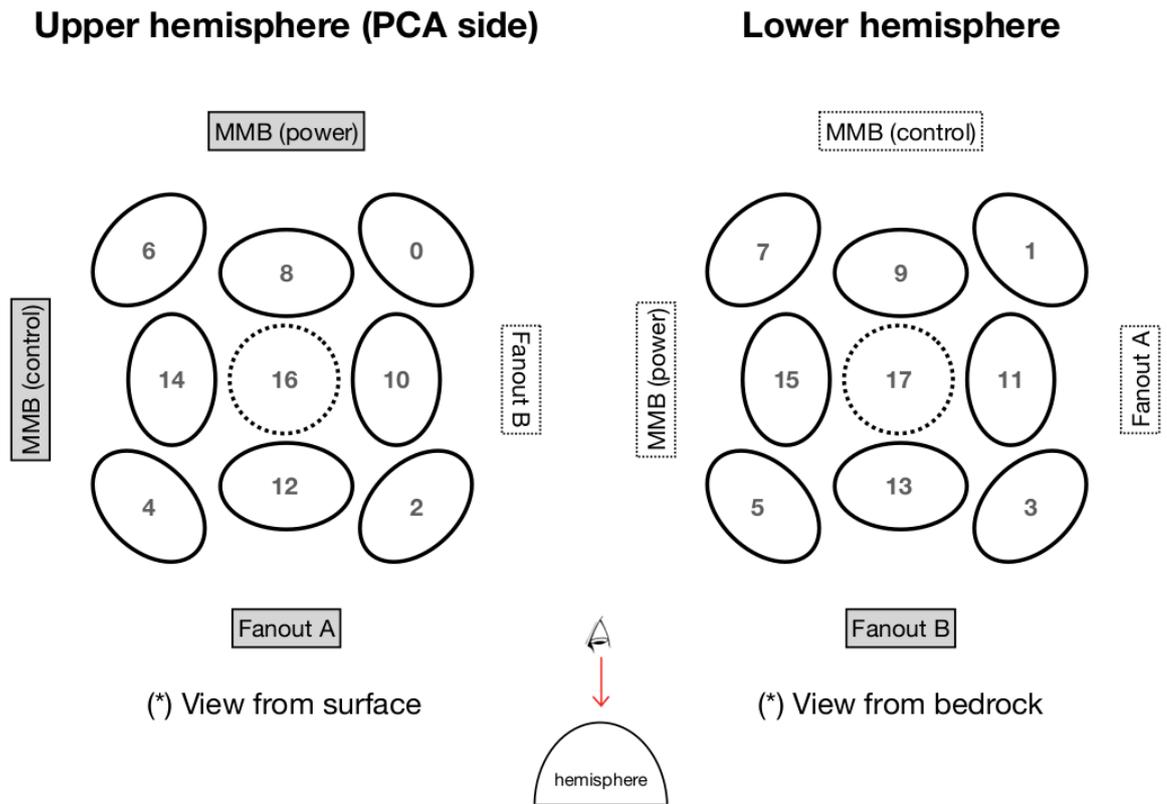


図 4.5: PMT と基板の配置図 [17]。左に上半球、右に下半球の配置を示す。18 台の PMT にそれぞれ channel 番号を振り分けた。上半球は偶数番号、下半球は奇数番号を、それぞれ L3、L2、L1 の順につけた。



図 4.6: 真空容器を用いた G2DOM の密封作業。真空容器の中に G2DOM を入れ、内部の気圧を変えている。容器の上部には、抜いた空気が通る管と窒素が通る管が付いている。

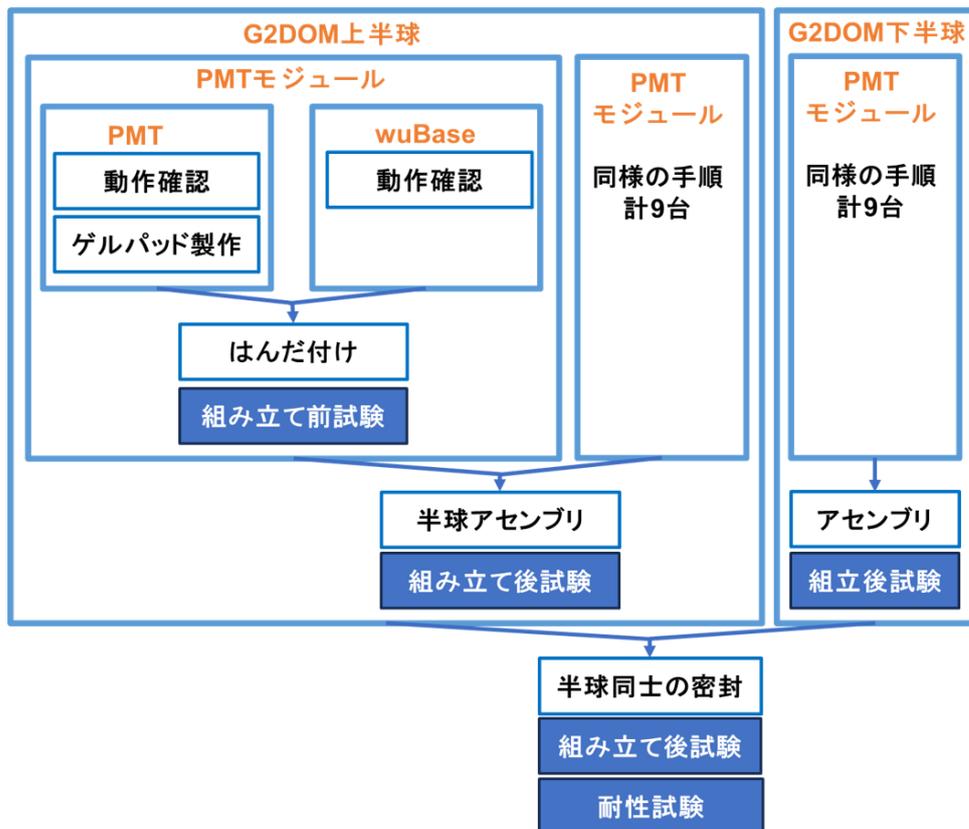


図 4.7: 組み立てと試験の手順

## 第 5 章

# 組み立て前測定

PMT モジュールは一度ガラスに入れて組み立てをすると、後から取り出すことができないため、性能を事前に調べる。組み立て前後ではガラスの有無や読み出しに使用する基板が変化するため、それによる信号の変化を調べるのが重要である。また組み立て前のみ可能な測定項目もある。そこで、G2DOM の組み立ての前に各 PMT モジュールの測定を行いデータを収集した。2023 年度には 1 台目の G2DOM (DVT1: Design Verification Test1) の製造を行った。本研究では、DVT1 の測定システムを開発・測定した。

この章では、組み立て前測定について述べ、第 6 章で組み立て後測定の詳細を述べる。組み立て前測定は PMT モジュールのゲイン較正・電荷分布・時間分解能・線形性・Darkrate の 5 項目である。

### 5.1 測定環境

測定では、氷中の環境に近づけるために冷凍庫とレーザー光を用いた図 5.1 のようなセットアップを使用した。PMT は僅かな光でも検出するため、通常の明るい部屋で動作すると過剰に電子が増倍されるため性能の劣化に繋がる。そのため、必ず PMT は遮光シート等で覆い暗箱に入れて実験を行う。PMT モジュールを入れて測定を行う冷凍庫は、 $-40^{\circ}\text{C}$  に設定している。光源となるレーザーは、浜松ホトニクス M10306 を使用している。パルス幅は 60 ps、波長は 399 nm、最大光量は 10000 光子程度である。光量はダイヤルにより調整することができ、この実験では 3 段階の強度を使用した。また光量の調整のために、0.1%、1%、5%、10%、50%、100% の 6 段階フィルターを使用した。合わせて 18 種類の光量を測定に使用した。

wuBase での信号取得に使用できるトリガモードは 3 種類ある。

#### 1. セルフトリガ

コマンドで DAC (digital to analog converter) 閾値を指定する。CH1 で閾値を超えた信号がトリガされる。南極での測定本番で主に使用する予定の方法である。

#### 2. 外部トリガ

wuBase には CH2 につながる回路に外部から信号を挿入できるコネクタがあり、そこに信号を挿入すると、ダイノードからの信号の代わりに CH2 から読み出すことができる。このとき、CH2 の信号が ADC 内で設定された閾値を下回るとトリガされるモードがある。このモードを利用してトリガのタイミングを指定できる。外部からの信号によりトリガするという意味で、

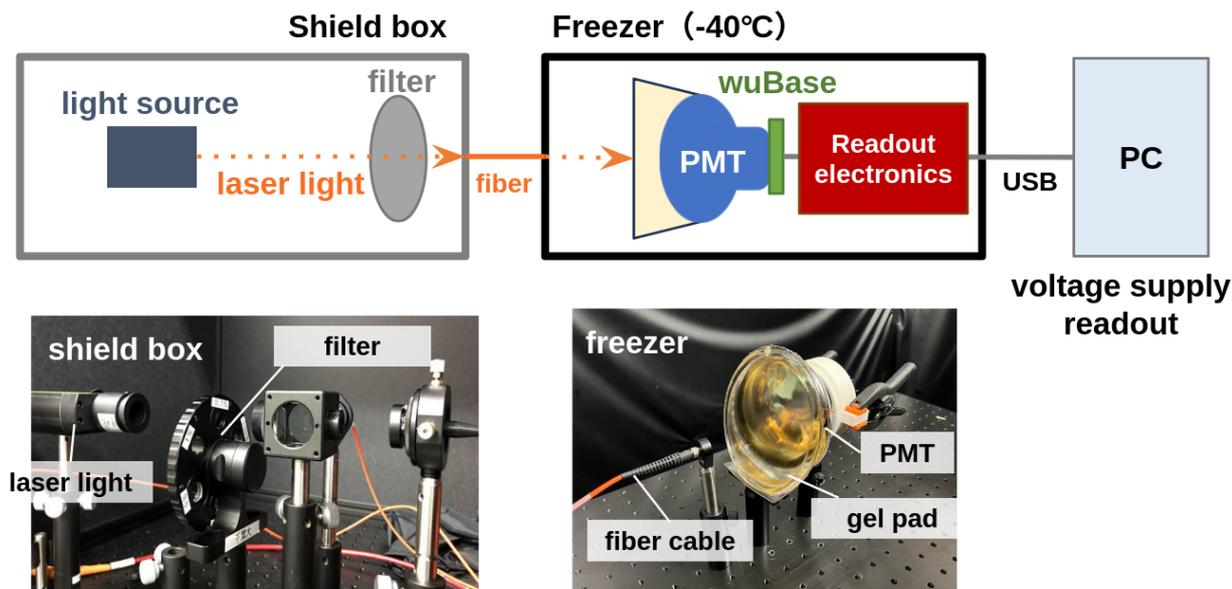


図 5.1: 組み立て前測定セットアップの模式図。レーザー光源とフィルターを入れた遮光箱、PMT モジュールと通信基板を入れた冷凍庫、通信・電源供給用の PC で構成される。フィルターは回転式で、手動で調整する。

本論文ではこの方法を外部トリガと呼ぶ。コネクタの付け外しが必要なことから、この機能は組み立て後には使用できない。

### 3. ランダムトリガ

ランダムに 1 波形のみ取得するモードである。簡単な動作試験の際に使用することがある。

ここで、組み立て前測定の項目と使用するセットアップを表 5.1 にまとめた。測定には、それぞれ適する光量の光源を用意した。線形性測定では 18 段階の光量を使用し、Darkrate 測定は遮光のため光源無し、その他項目では 1 光子レベルを使用した。トリガモードはセルフトリガと外部トリガの 2 種類を使用した。この一連の試験を終えるには、PMT 1 台あたり半日以上の時間を要する。特に、Darkrate 測定で 14 時間と表示しているのは、PMT を遮光された冷凍庫に入れてから、信号が安定するまでに 12 時間程度を要するためである。Darkrate の測定自体は 2 時間程度である。将来的に大量生産を実現するには効率を上げる必要があり、今後の課題の一つである。

表 5.1: 事前検査項目

測定項目	必要な光量	トリガモード	測定所要時間
ゲイン較正	1 光子	セルフトリガ	300 秒
電荷分布	1 光子	外部トリガ	300 秒
時間分解能	1 光子	外部トリガ	60 秒
線型性	1~10000 光子 (18 段階)	セルフトリガ	20 分
Darkrate	無し	セルフトリガ	14 時間

## 5.2 波形フィッティング

得られた波形の例は図 5.2 左である。CH1 (アノード) の信号を青、CH2 (ダイノード) の信号を 50 倍スケールで赤で示す。60 MHz で取得されるため、1 データ点が 16.7 ns、1 波形に対するデータ点が 32 程度である。1 つの波形の幅が 100 ns 程度でありデータ点が 6 点程度しかないため、積分したり正確な時間を求めたりするには情報が少なすぎる。そこで取得した各波形に対して波形のフィッティングを行い、図 5.2 右に示すようになめらかな近似波形を生成した。近似に用いた関数  $v(t)$  は以下の通りである [18]。

$$v(t) = A \left( C \exp \left( \exp \left( \frac{-(t-t_0)}{b_1} \right) \right) + \exp \left( \frac{(t-t_0)}{b_2} \right) \right)^p \quad (5.1)$$

$$b_1 = 20.5 \text{ ns}, b_2 = 63.5 \text{ ns}, C = 0.7, p = -8$$

ここで、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $C$ 、 $p$  は適切な値を求めた後で定数として扱う。このフィッティングにより振幅  $A$ 、ピークの時間  $t_0$  の値が得られる。

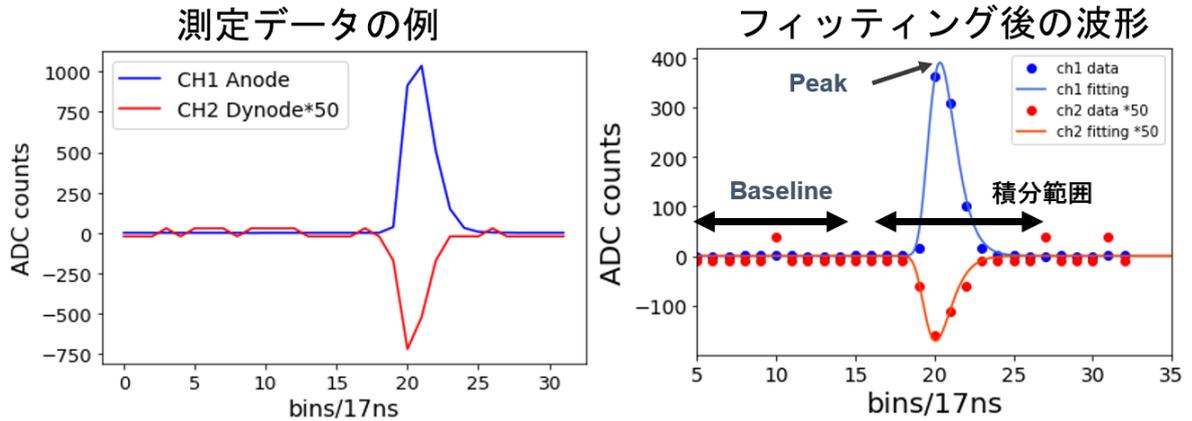


図 5.2: 左: 測定された波形データの例。CH1 を青、CH2 を赤で示す。CH2 は 50 倍のスケールで表した。右: 点は測定データ、実線は関数によるフィッティングで生成した波形である。前半部分のデータは平均値をとり、ベースラインとして扱う。信号は毎回同じ位置にあるため、17 番目から 26 番目のサンプルを信号として扱う。フィッティング波形の頂点を波形のピークとする。

## 5.3 電荷計算方法

電荷  $Q_{wu}$  はフィッティングされた波形  $v(t)$  を用いて以下のように計算できる。

$$Q_{wu} = \int i(t) dt = C_{wu} \int_{\text{signal}} v(t) \quad (5.2)$$

ここで、 $i(t)$  は時間  $t$  における電流、 $C_{wu}$  は電荷を求めるための係数を表す。しかし、 $C_{wu}$  は理論的に計算して値を得ることが難しい。そこで、オシロスコープを利用した較正を行い、 $C_{wu}$  を以下のように決定した。

$$C_{wu} \approx 4.9 \times 10^{-3} [\text{pC}/\text{counts}] \quad (5.3)$$

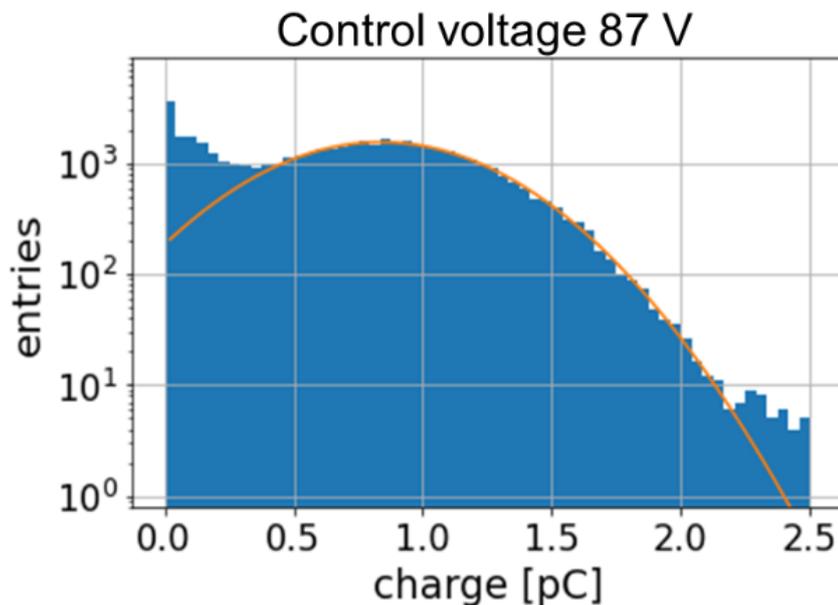


図 5.3: セルフトリガで取得されたデータによる電荷分布。SPE 信号はオレンジ線のようにガウシアンで近似できる。

電荷の計算のために積分する波形の範囲は図 5.2 に示す部分 (17 bin から 26 bin に相当) であり、約 150 ns 間である。トリガされた信号は毎回ほとんど同じ位置となっているため、全ての波形に対して同じ範囲で積分を行う。計算の結果得られた電荷分布図を図 5.3 に示す。データは閾値 0.1 PE (光電子: Photo Electron) 相当のセルフトリガで取得された。図の中心部に見える山のような分布は単光子 (SPE: Single photo electron) の信号によるもので、ガウス関数で近似することができる。このガウス分布の平均値が、SPE 信号の指標となる。

また CH2 は電子増幅途中の波形であるため、振幅が CH1 より小さい。図 5.4 の上図に示すように、1 光子程度の信号の場合 CH2 では信号が判別できない。図 5.4 の下図に示すように、10 光子程度でやっと信号を判別できる。CH2 は SPE による較正ができないため、波形から電荷を換算するための変換係数を使用する。フィッティングで得られたピーク値とベースラインの値の差を振幅として、CH1 と CH2 の振幅の比を変換係数とした。図 5.5 に示すように、線形近似で 0.013 という値が得られた。この比を用いることで、CH1 の信号を基準として CH2 の信号を電荷や電圧に変換できる。

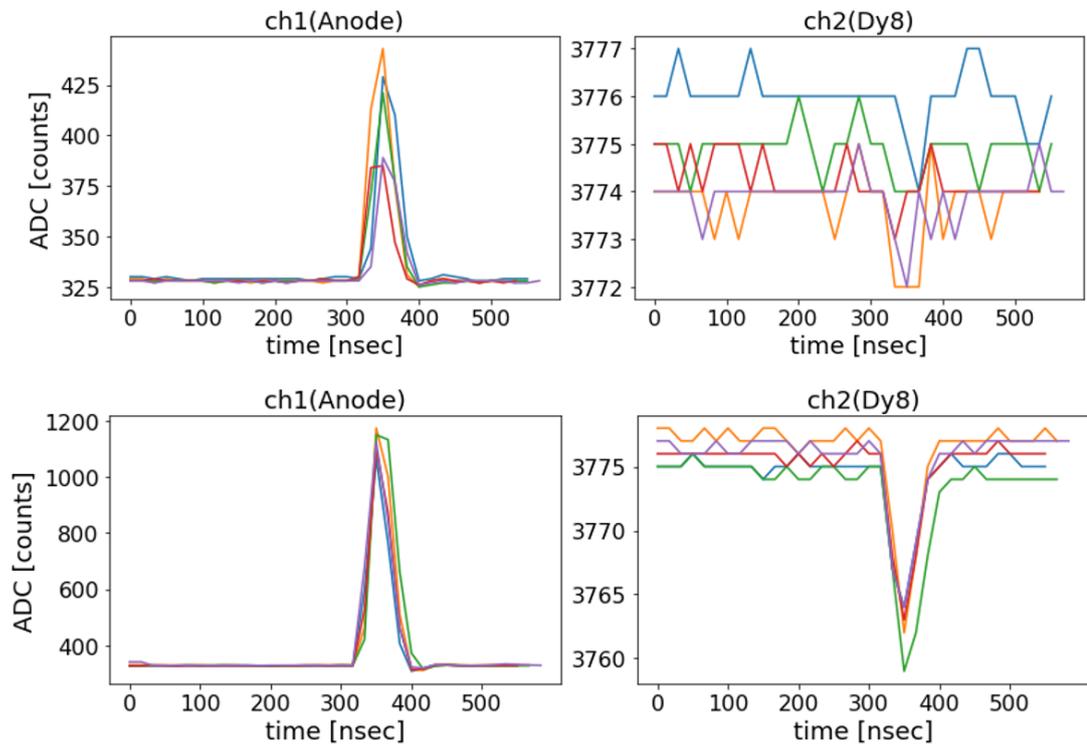


図 5.4: 左上図は 1 光子相当の CH1 の波形で、右上図は同時に取得された CH2 の波形である。このとき CH2 では信号を判別できるほど電子が増幅されていない。左下図は 10 光子相当の CH1 の波形で、右下図は同時に取得された CH2 の波形である。CH2 でも波形を確認できる。

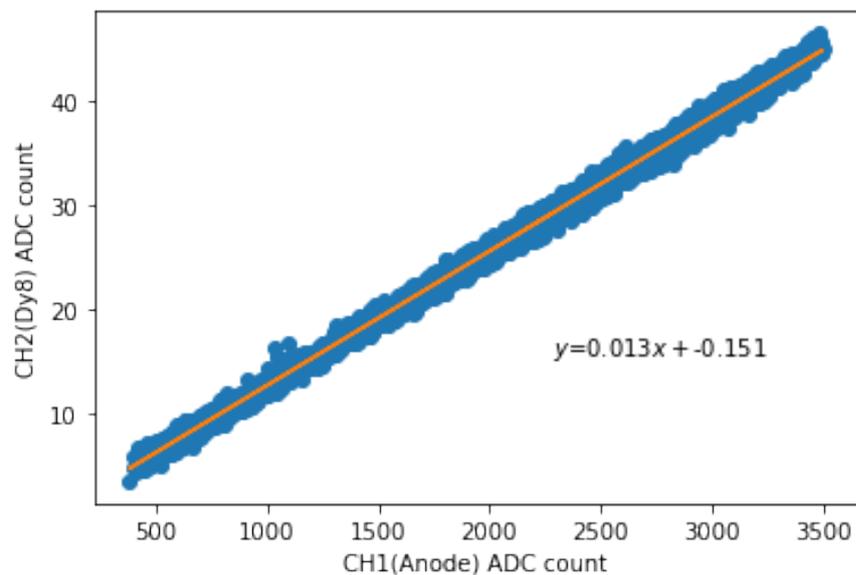


図 5.5: 波高比のプロット例。横軸と縦軸はそれぞれ CH1 と CH2 の振幅である。線形近似直線をオレンジ色の直線で示している。このとき、近似直線は  $y = 0.013x - 0.15$  が得られた。

## 5.4 ゲイン較正

ゲインは第2.2.2章で述べたようにPMTにおける電子の増幅率である。G2DOMに使用する4インチPMTでは $5 \times 10^6$ のゲインを採用する。ゲインの値は、PMTに印加する高電圧 (HV: High Voltage) が高いほど大きくなる。実験では、このHVの値を直接指定するのではなく、制御電圧 (Control Voltage) を指定することで調整する。制御電圧はHVの値の12分の1程度の値である。例えば、1200VのHVを印加するには100Vの制御電圧を指定すればよい。

$5 \times 10^6$ のゲインとなるような制御電圧の値は、PMTによって個体差がある。全てのPMTで同じゲインになるよう較正が必要である。そこで、制御電圧を80から98Vの範囲で2V間隔で変えながら測定を行い、それぞれ電荷のヒストグラムを作成した。各電荷分布のSPEガウシアンからゲインを求めた。制御電圧に対するゲインの関係を図5.6に示した。この関係は2章で述べた(2.1)式の指数関数に従う。

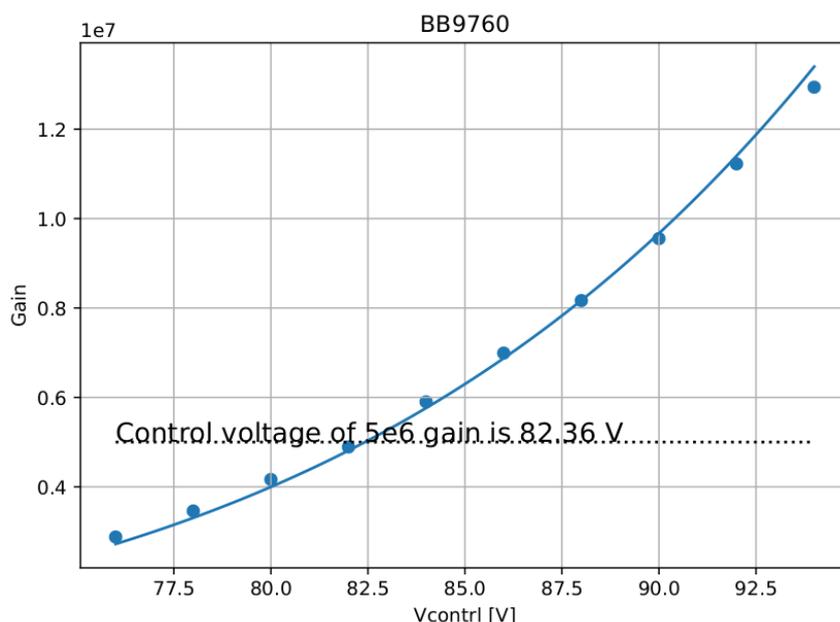


図 5.6: 制御電圧とゲインの関係の例。点は測定で得られたデータ、曲線は指数関数近似を表す。点線は $5 \times 10^6$ のゲインを示す。このとき、(2.1)式のフィッティング結果により制御電圧は82.4Vと求められた。

DVT1に搭載の各PMTの測定結果は図5.7のように表す。18台のPMTモジュールの制御電圧の平均値は81.5Vである。これ以降に述べる測定では、それぞれのPMTに対してゲイン較正で求められた制御電圧に設定している。

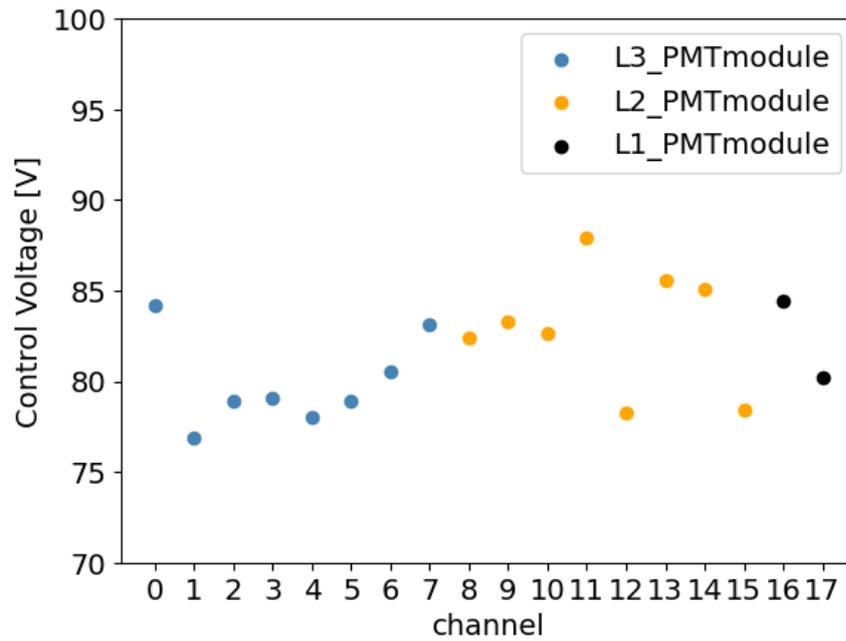


図 5.7: 制御電圧の測定結果。channel 0~7 は L3、channel 8~15 は L2、channel 16 と 17 は L1 の PMT モジュールを表す。

## 5.5 電荷分布のフィッティング

波形データから計算された電荷のヒストグラムは図 5.8 に示す通りである。PMT に SPE 程度の光を入射し、その同期信号を用いて外部トリガモードで測定した結果である。横軸は電荷 (pC) で表している。0 pC 付近にあるガウス分布はペDESTAL と呼び、信号が無いベースラインのみのデータによるものである。レーザーの光が発されているにも関わらず、PMT で光を受け取り増幅することができなかった場合にこのようなデータが取得される。0.8 pC 付近のガウス分布は SPE の波形で、その右側に見えるガウス分布は 2 PE の波形によるものである。またダイノード衝突の際の後方散乱の影響で増幅率が下がる信号が指数関数に近似できるため、ペDESTAL と SPE の間に見える指数関数を追加している。

この分布の形はポアソン分布と正規分布を組み合わせることで以下の式のようにフィッティングをしている。

$$\begin{aligned}
 f(q) = & \frac{N_0}{(\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{ped}})} \exp\left(-\frac{(q-q_0)^2}{2\sigma_{\text{ped}}^2}\right) + \frac{N_0\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{q}{\tau}\right) \\
 & + \frac{N_0\lambda \exp(-\lambda)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{spe}}} \exp\left(-\frac{(q-q_0-q_1)^2}{2\sigma_{\text{spe}}^2}\right) \\
 & + \frac{N_0\lambda^2 \exp(-\lambda)}{2\sqrt{2\pi}(\sqrt{2}\sigma_{\text{spe}})} \exp\left(-\frac{(q-q_0-2q_1)^2}{2(\sqrt{2}\sigma_{\text{spe}})^2}\right)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

ここで、 $N_0$  はペDESTAL のイベント数、 $q_0$  はペDESTAL の平均電荷、 $q_1$  は SPE の平均電荷、 $\sigma_{\text{ped}}$  はペDESTAL の標準偏差、 $\sigma_{\text{spe}}$  は SPE の標準偏差、 $\lambda$  はポアソン分布の母数、 $\eta$  は指数関数の係数、 $\tau$  は指数関数の時間スケールを表す。この式の各項は、順にペDESTAL、低電荷分布の近似のための指数関数、SPE、2 PE (2 photo electron: 2 光子) の分布である。

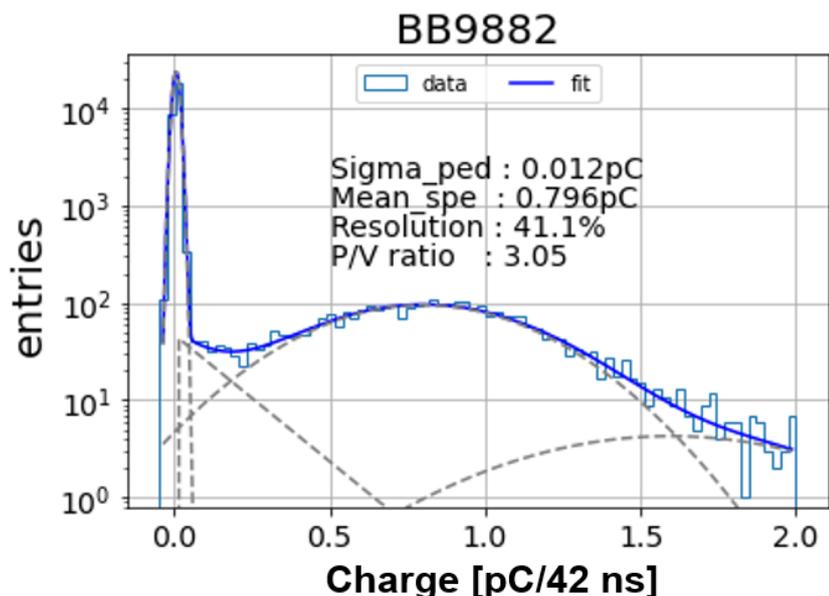


図 5.8: 電荷分布とそのフィッティングの例。電荷データは青のヒストグラムで、フィッティング結果を青線で、その成分を点線で示した。点線で示すフィッティングの成分は、ペDESTAL、指数関数、SPE、2PE である。この結果から、ペDESTALの標準偏差は 0.012 pC、SPE の電荷は 0.80 pC、電荷分解能は 0.41 (41%)、Peak to Valley 比は 3.1 と求められた。

電荷のフィッティングにより求められた関数から、検出器の精度を表す指標となる以下の数値を求めた。

#### 1. ペDESTALの幅

ペDESTALのガウス分布の標準偏差を求め、ペDESTAL幅の指標とした。この値が小さいほど、ノイズが少ないことを示す。

#### 2. SPE ガウシアン の平均値

この値を 1 光子の信号の電荷とした。 $5 \times 10^6$  のゲインのとき、光電子 1 個の電荷は電気素量 ( $1.6 \times 10^{-19}$  pC) の  $5 \times 10^6$  倍に増幅され、0.8 pC に換算される。図 5.8 の例ではゲイン校正で得られた制御電圧を用いて測定したため、1 光子の信号の電荷は 0.80 pC となっている。

#### 3. 電荷分解能

電荷分解能  $R_{\text{charge}}$  は SPE ガウシアン のシグマ  $\sigma_{\text{SPE}}$ 、SPE ガウシアン の平均値  $M_{\text{SPE}}$  を用いて以下のように計算できる。

$$R_{\text{charge}} = \sigma_{\text{SPE}} / M_{\text{SPE}} \quad (5.5)$$

この値が小さいほど、1 光子の信号の分解能が高いと言える。DVT1 に搭載の各 PMT の測定結果は図 5.9 に表す。channel 8、channel 16 のデータが欠けているのは、測定の設定に不備があり計算できなかったためである。PMT の位置による差はほとんど見られず、平均 0.35 という結果となった。G2DOM では 0.7 以下であることが要求されているため、使用に十分に適していると言える。

#### 4. Peak to Valley 比

Peak to Valley 比  $R_{\text{PV}}$  は SPE ガウシアン の最大値  $N_{\text{max}}$ 、ペDESTAL と SPE 間の最小値  $N_{\text{min}}$  を

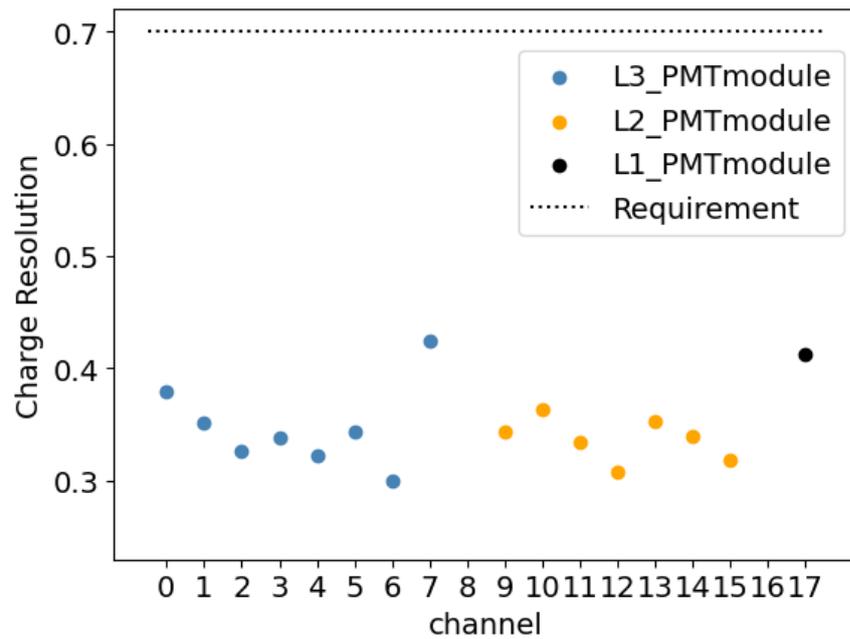


図 5.9: 電荷分解能の測定結果。channel 8 と channel 16 では測定の設定不備によりデータ無しである。黒の点線で要求の値を示す。

用いて以下のように計算できる。

$$R_{PV} = N_{\max}/N_{\min} \quad (5.6)$$

この値が大きいくほど、1光子の信号の解像度が高いと言える。2以上の値であることが望ましい。DVTに搭載の各PMTの測定結果は図5.10に表す。channel 8、channel 16のデータが欠けているのは、測定の設定に不備があり計算できなかったためである。L3、L2、L1の順に値が低くなる傾向があるように見えるが、まだ統計が少ないため今後の測定結果に注意する。平均値は3.31で、全て2を上回っているため、G2DOMでの使用に適している。

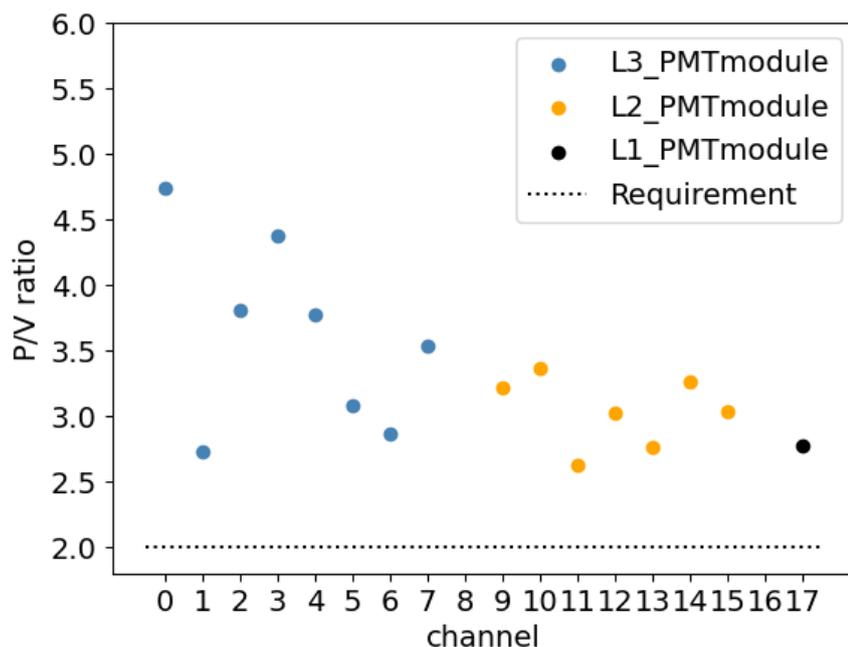


図 5.10: Peak to Valley 比の測定結果。channel 8 と channel 16 は測定の設定不備によりデータ無しである。黒の点線で要求の値を示す。

## 5.6 線型性

線型性の測定結果は図 5.11 に示す。横軸はレーザー光の出力に対応した光子数、縦軸は PMT モジュールで測定した電荷から計算した光子数としてプロットした。青い点で示す CH1 は 50 PE 程度までの線型性であるのに対し、赤い点で示す CH2 は 2000 PE 程度まで線型性が保たれている。ただし PeV 相当エネルギーの事象を検出するには PMT1 台あたり 5000 PE 以上を受けることになるため、IceCube-Gen2 実験では 5000 PE の測定を目標にしている [10]。現在は wuBase 基板の改良が行われており、5000 PE 以上の線型性を達成するように改善された。今後の G2DOM 製作では改良版の新たな基板を使用する予定である。ほぼ全ての PMT モジュールで同様の結果が得られたため、1 台の結果のみ示している。

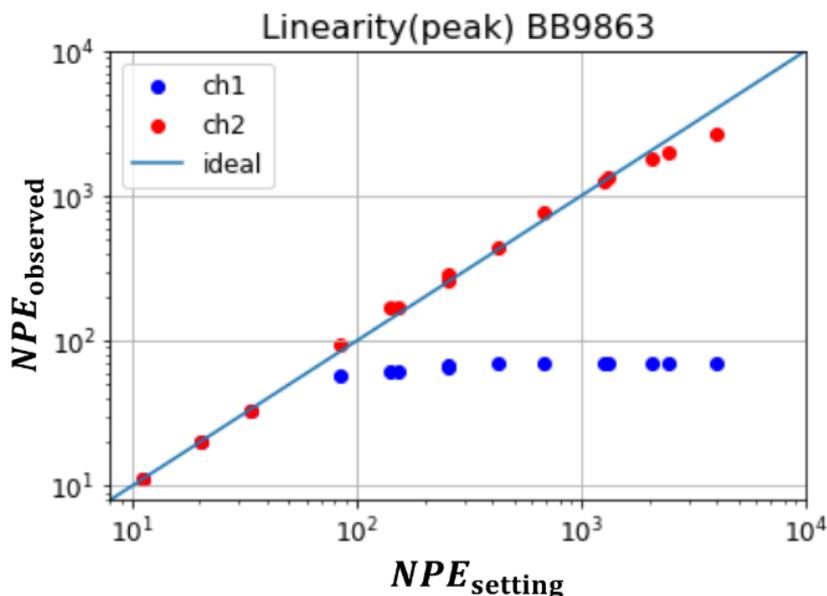


図 5.11: 検出光子数の線型性の結果の例。横軸はレーザー光源による入射光子数、縦軸は測定データから算出された光子数である。青点はアノードのCH1、赤点はダイノード 8 の CH2 のデータ点である。左側の 3 点は CH1 と CH2 の校正に使用したため、完全に重なっている。

## 5.7 時間分解能

光子の入射時刻に対し検出された時刻がどの程度ばらつくのかを“時間分解能”として評価した。本研究では光入射しの同期信号を外部トリガ (5.1 章) として用いて測定した。この信号の時刻と光子検出時刻の差の標準偏差を、本論文では時間分解能と呼ぶ。光の同期信号は、波形のフィッティング関数と類似した形の波形を波形生成器で作成し wuBase に挿入した。この信号は、図 5.12 に示すように CH2 の波形として読み出すことができる。データ点は 16.7 ns 刻みなもので、波形を検出した正しい時間を得るためにフィッティングを行った。挿入波形を作成したのはこのためである。同時に得られた CH1 の波形も同様にフィッティングをした。フィッティング結果のピークの時間をそれぞれ  $t_1$ 、 $t_2$  とする。この  $t_1$  と  $t_2$  の時間差  $\Delta t$  を求める。波形のフィッティング関数は SPE の波形の形状であるため、SPE 波形のみ選択して時間分解能の計算に使用した。

$\Delta t$  分布の例を図 5.13 に示す。これをガウス分布でフィッティングし、標準偏差の値を時間分解能の結果とした。

DVT1 に搭載の各 PMT の測定結果は図 5.14 に表す。channel 10、channel 16 のデータが欠けているのは、測定の設定に誤りがあり計算できなかったためである。取得できた結果の平均値は 1.7 ns である。全ての PMT モジュールで、3 ns 以下という要求を達成した。L3、L2、L1 の順に値が低くなる傾向がややあるように見えるが、統計が少ないため今後の測定で注視していく。

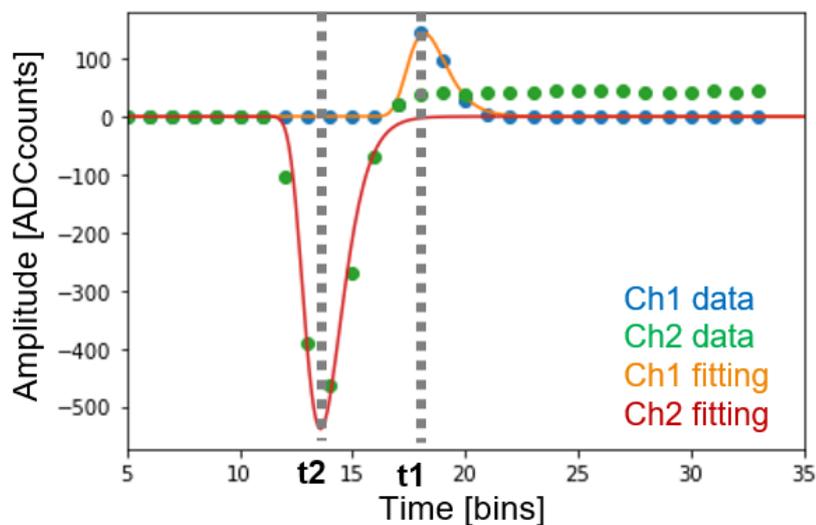


図 5.12: 時間分解能の測定で得られた波形データの例。青と緑の点はそれぞれ CH1 と CH2 で得られたデータ点を示す。この図の CH1 の波形は SPE 相当である。黄色と赤の実線はそれぞれ CH1 と CH2 の波形をフィッティングしたものである。灰色の縦点線は CH1 と CH2 のフィッティング関数から得られるピーク時間で、これらを  $t_1$ 、 $t_2$  とした。 $t_1$  と  $t_2$  の時間差を各波形データについて求め、そのばらつきを時間分解能として評価した。

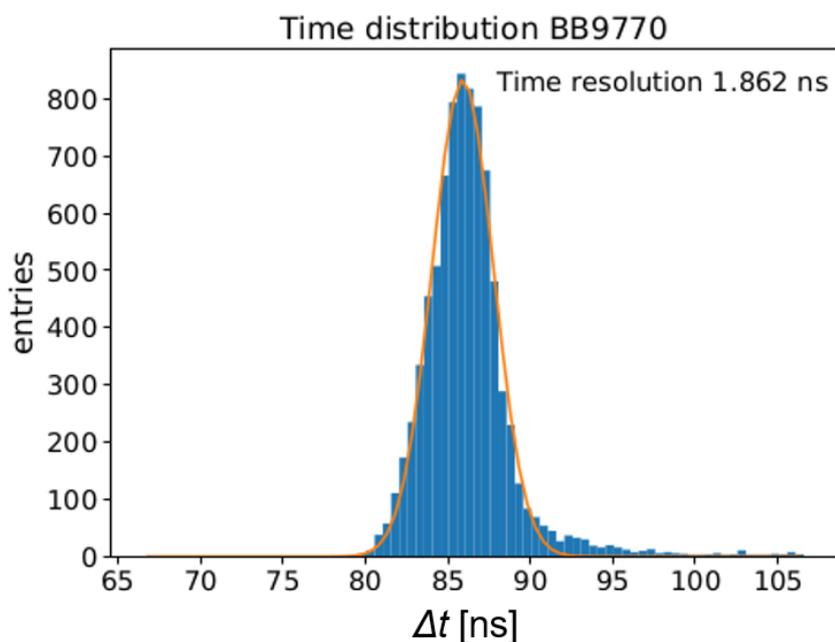


図 5.13:  $\Delta t$  の分布。この場合、時間分解能はガウス関数の標準偏差 1.9 ns である。SPE 相当の振幅の波形のみを選択して計算した。PMT の周囲で反射して遅れて届いた光子が観測された場合に  $\Delta t$  が大きくなることもあり、そのデータがガウシアン分布の右側に見える。

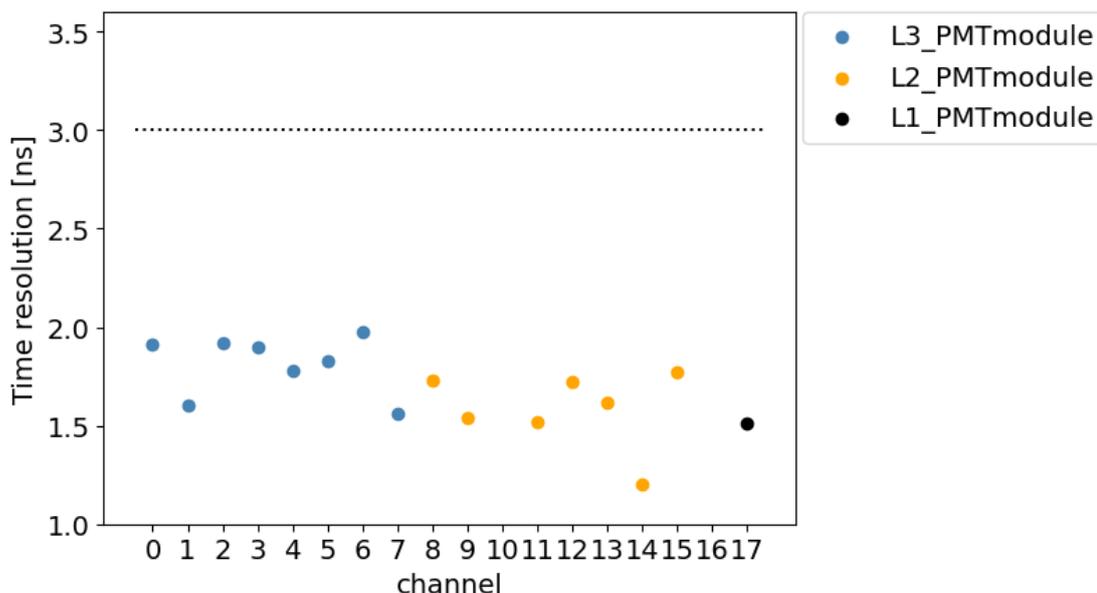


図 5.14: 時間分解能の測定結果。channel 10 と channel 16 は測定の設定不備によりデータ無しである。黒の点線で要求の値を示す。

## 5.8 Darkrate

Darkrate は、光源無しの環境で測定される信号の頻度である。測定は  $-40^{\circ}\text{C}$  の冷凍庫内で遮光し、セルフトリガを使用して測定している。Darkrate は変動するため長い時間測定することが理想だが、一回の測定時間はデータサイズの負担を考慮して 300 秒とし、同様の測定をモジュール 1 台あたり 10 回以上繰り返すことでデータ量を確保した。得られた波形データのうち、閾値を超えた信号のカウント数を測定時間で割り、その値を Darkrate とした。ここで、Darkrate としてカウントするための閾値は、0.25 PE 相当の振幅に設定した。また、1 つの波形データの中に 2 回以上の信号がある場合には、それらすべてをカウントしている。1 回の測定データ (300 秒) ごとに Darkrate を求め、それらの平均を最終的な Darkrate の結果とした。1 台のモジュールの測定結果の例は図 5.15 のように表される。

### 5.8.1 DVT1 の組み立て前測定

遮光のために、透明なプラスチックシートでゲルパッド表面を保護した上に黒シートを掛け、その上から遮光用の箱を被せた状態で PMT モジュールを冷凍庫に入れた。DVT1 に搭載の各 PMT の測定結果は図 5.16 のように表す。平均すると 122.5 Hz の Darkrate が測定された。channel 4 の PMT モジュールでは他の PMT モジュールよりも高い値となった。これは冷凍庫内の温度が上がっていたなど実験設備に変化があったためであると考えられる。

### 5.8.2 環境による Darkrate の変化

Darkrate は、検出器を取り囲む環境によって異なる。そこで、PMT にゲルパッドやガラス球を取り付ける過程で Darkrate がどのように変化するかを調べた。同一の PMT を用い、L1 の PMT モジュールの製造過程で測定を行った。

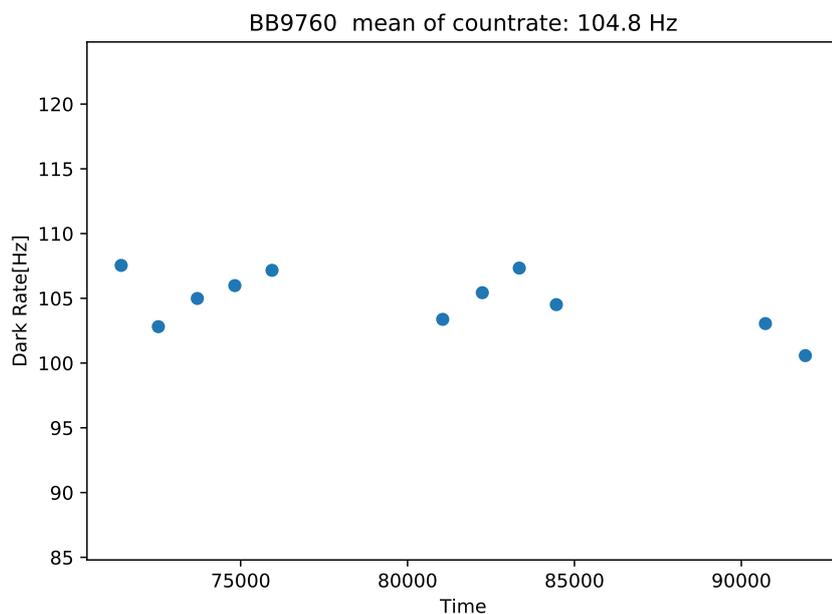


図 5.15: Darkrate 測定プロットの例。横軸はおよそ 07:00 から 09:30 の時間である。このとき、平均値 104.8 Hz を最終的な Darkrate 結果とした。各測定点は 30000 波形前後あるため、統計エラーバーはデータ点と重なっている。

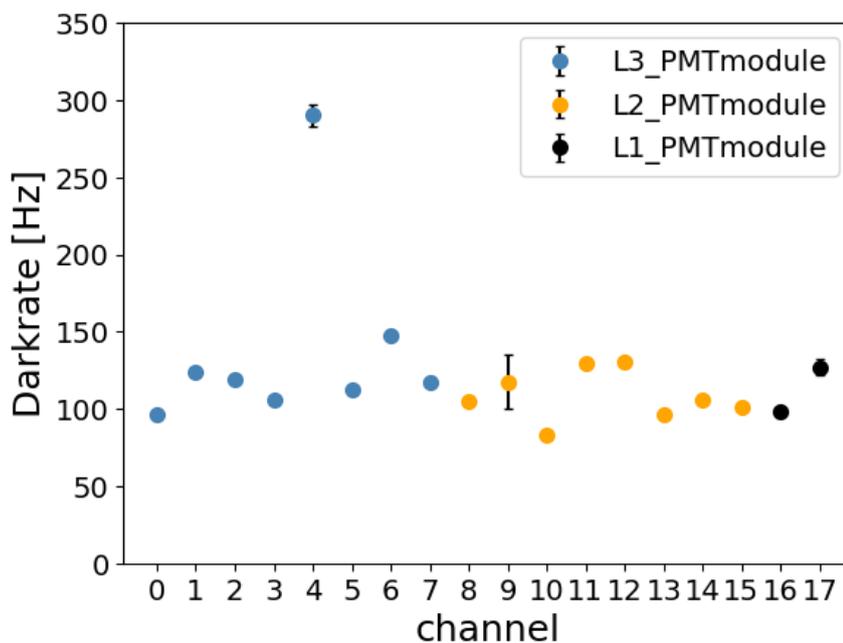


図 5.16: Darkrate の測定結果。channel 4 のみ他の結果の 2 倍程度の結果であるが、実験設備に変化があった可能性が考えられる。エラーバーは図 5.15 に示したような各測定データの標準偏差である。

PMT 単体と、ガラス半球付きの場合には、氷中の環境に近づける黒テープを付けた場合も測定した。図 5.17 に示すように、ガラス (屈折率 1.5) と空気 (屈折率 1) の境界面では屈折率の差が大きいため、ガラス内で外側に向かって進む光子は内側に向けて全反射しやすい。一方で南極の氷河中ではガラス表面は氷 (屈折率 1.3) に接しているため屈折率の差が小さく、ほとんどの外向きの光子は全反射せずに透過する。そこで南極中の環境に近づけるため、黒テープをガラス表面に貼り付けガラス表面で光が反射せず吸収されるようにした。図 5.18 のように表面を満遍なく覆った。



図 5.17: 黒テープと光の反射の関係。南極の氷中では左図のようにガラスと接している氷との屈折率の差は小さいため、多くの光が透過する。一方で実験室では中央図のようにガラスと空気の屈折率の差が大きく、全反射しやすい。そこで右図のようにガラス表面に黒テープを貼り、光子が吸収されるようにすると、PMT 光電面に到達する光子数が氷中と同等になる。

測定結果を表 5.2 に示す。PMT 単体よりも、ゲルパッドやガラス球を付けるにつれて値が大きくなった。ゲルパッド接着後に増加したのは、ゲルパッド内で反射した光を検出したり集光する表面積が大きくなったりしたこと、反応を検出する確立が増加したためだと考えられる。ガラス接着後に増加したのは、主な Darkrate 発生源であるガラスが付着したことによるもので、想定通りである。また、PMT 単体とガラス球付きの場合それぞれで黒テープの有無を比較すると、黒テープ有りの場合はなしの場合の半分程度の値となった。これは、ガラスの片側の空気との境目で起こる反射が想定通り抑えられて吸収されるようになったためだと考えられる。

表 5.2: Darkrate 測定の項目と結果

モジュール	黒テープ	Darkrate [Hz]
PMT		$74 \pm 1$
PMT		$36 \pm 1$
PMT + ゲルパッド		$86 \pm 2$
PMT + ゲルパッド + ガラス		$301 \pm 1$
PMT + ゲルパッド + ガラス	○	$149 \pm 2$

また図 5.19 に示すように、それぞれの測定で信号を測定した時間の間隔の分布を比較した。 $10^{-7}$  s に見えるピークはガラス内で起こるシンチレーションに由来する信号、 $10^{-5}$  s 付近のピークはメインパルスの後に測定されるアフターパルス、 $10^{-2}$  s 付近の大きな分布は熱由来でランダムに発生する信号で Darkrate の主な成分である。PMT モジュール + ガラスの場合のみ現れた  $10^{-1}$  s 付近のピークは、一度に wuBase から送信される信号データが多い際にデータ取得が一時的に止まってしまう時

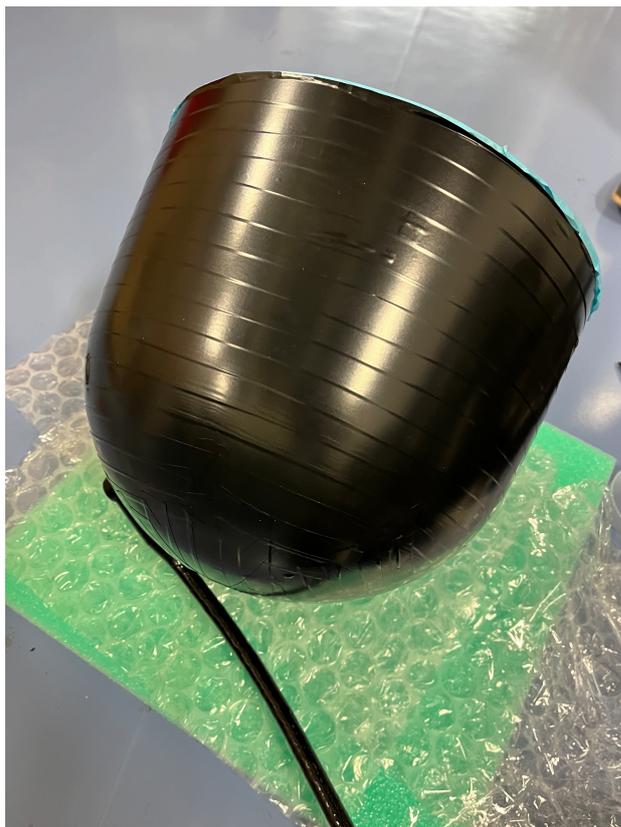


図 5.18: 黒テープを付けたガラス半球

間 (deadtime) である。アフターパルスやシンチレーションによる信号はどの環境でも同じ時間差で発生しており、PMT に固有の値である。熱由来の成分は、環境によって数が大幅に増減することが分かった。

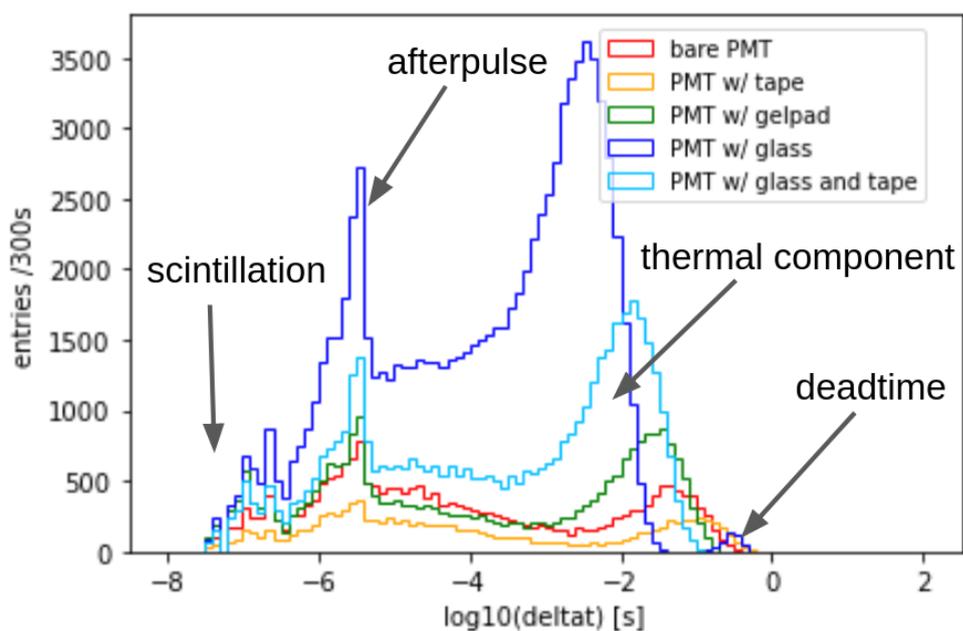


図 5.19:  $\Delta t$  分布の比較。PMT 単体の結果を赤、黒テープを付けた PMT モジュールの結果を黄色、ゲルパッド付き PMT の結果を緑、ゲルパッド付き PMT にガラスを接着した結果を青、ゲルパッド付き PMT にガラスを接着し黒テープを付けた結果を水色で示す。これらは全て 300 秒間の測定データである。



## 第6章

# 組み立て後測定

組み立て後の測定は、ゲイン較正・Darkrate・複数読み出しテストの3項目を行った。電荷分布・時間分解能・線型性の測定が含まれないのは、組み立ての前後でほとんど変化しないことと外部トリガの測定ができないことが理由である。Darkrate測定は、図6.1に示すようにG2DOM半球の状態と半球同士を密閉した状態で測定を行った。



図 6.1: 左図は、アセンブリ後の半球の状態。右図は、密封後の DVT1 が完成した状態。

### 6.1 測定環境

組み立て前測定と同様に、冷凍庫を用いたセットアップを準備した。図6.2に示すように、ガラス半球内に固定された9個のwuBaseからの信号はFanout boardを経由して取得する。Mini-mainboardとのコミュニケーションには、Mini-fieldhub (Mini-mainboardの電源供給と通信をするデバイス)を用いている。これは、南極での測定本番と同様のデータ収集手段となっている。

事前測定と同様に、図6.3に示すように遮光のためにガラス球の外側表面は黒テープで覆いテープ無しの場合と比較した。その上から遮光シートで包み遮光素材の袋に入れて冷凍庫に入れた。

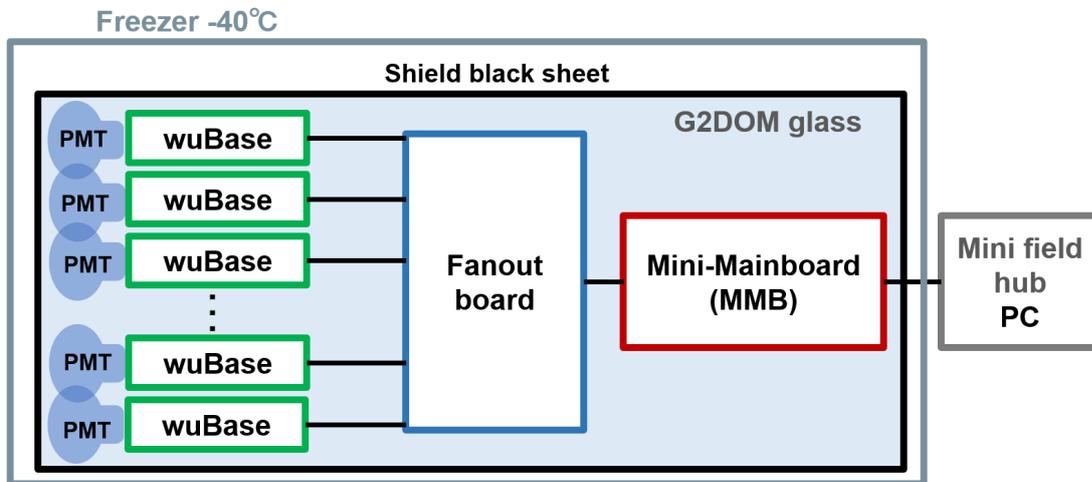


図 6.2: 組み立て後測定のセットアップ図。ガラス球内の全ての PMT との通信は Fanout board と MMB を介して行う。



図 6.3: 左図は、アセンブリ後の半球表面を黒テープで覆った状態。右図は、密封後の DVT1 の表面を黒テープで覆った状態。

## 6.2 deadtime

検出器外部と各モジュールとの通信では、メモリへデータを格納してからまとめて送るようになっている。通信に時間を要するため、その間はデータ取得ができない。このデータ取得ができない時間を *deadtime* と呼ぶ。deadtime に関して以下の特徴があることが分かっている。

- 200 波形取得するごとに一回 *deadtime* がある。
- 一度に読み出す PMT の台数に比例して *deadtime* が長くなる。
- 一度に送信するデータバッチ数が 50 のとき、一回の *deadtime* の長さが最小で 2 s 程度になる。

現在の対処方法として、各波形の取得時間データから前後の波形の時間差を求め、その値が 0.1 s を超える場合にその波形を取り除いている。

## 6.3 ゲイン較正

組み立て前測定と同様の手順で各 PMT についてゲイン較正を行った。結果は図 6.4 に示す。組み立て前測定の結果と比較するため、組み立て後測定の結果を重ねて三角の点で示した。組み立て後はやや制御電圧が高い(ゲインが低い)傾向が見られた。これは、wuBase と PC を仲介する基板やケーブルが組み立て前後で異なるために生じた差であると考えられる。組み立て後測定では、ここで得られた新しい制御電圧の値を使用する。

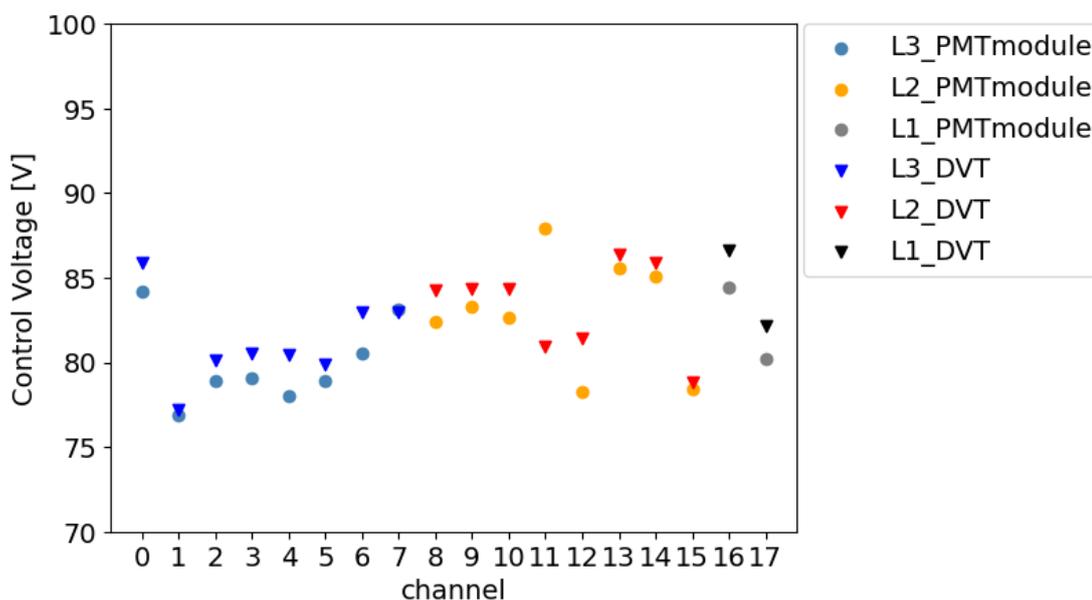


図 6.4: ゲイン較正結果の比較。丸が PMT モジュールの組み立て前測定、三角が組み立て後の測定結果である。ほとんどのモジュールで組み立て後の値が高くなっている。

## 6.4 Darkrate

組み立て前測定と同様に、各 PMT について 300 秒の測定を 10 回ずつ行い Darkrate 測定を行った。半球の状態・半球同士を合わせた状態でそれぞれガラス球表面に黒テープあり・無しで段階的

に測定を行った。全ての Darkrate 測定結果を、組み立て前測定の結果に重ねて図 6.5 に示す。状態ごとの詳しい Darkrate の比較については以下で説明する。

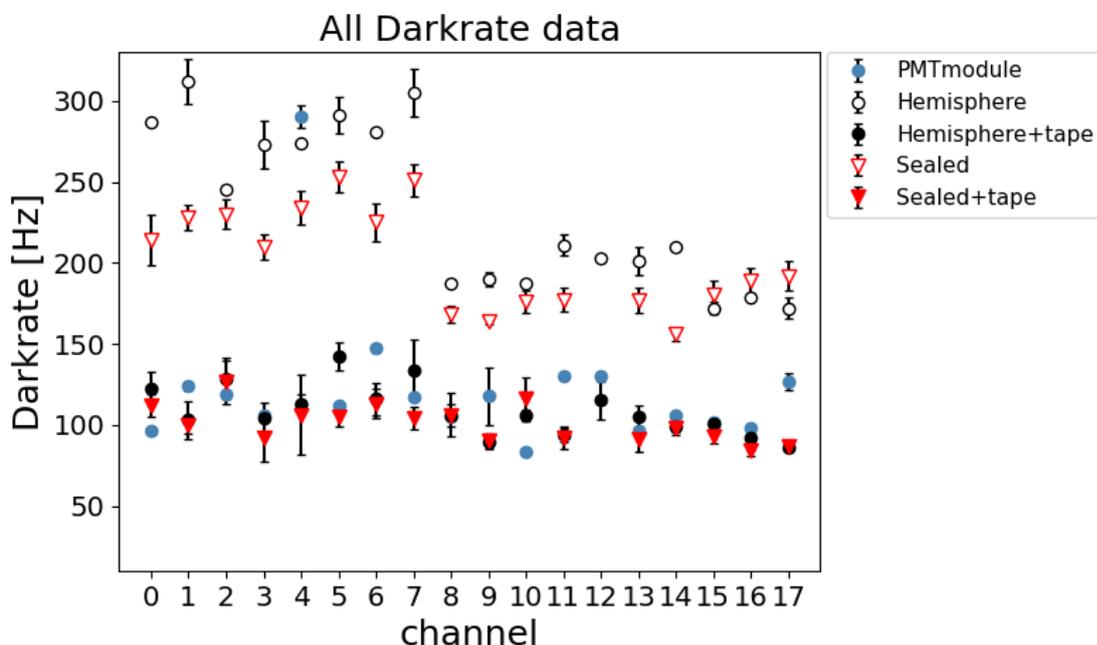


図 6.5: 組み立て前後の全ての Darkrate 測定結果。PMT モジュールを青丸で、半球テープ無しを白丸で、半球テープ有り黒丸で、密封後テープなしを白三角で、密封後テープ有り赤三角で示す。白丸のうち偶数番号チャンネルの上半球テープ無しデータの、Darkrate のゆらぎを示す標準偏差のデータが無いためエラーバーが見えていない。赤い三角と丸で示す密封後は channel 12 の HV 印加に問題が生じたため読み出しができなかった。

#### 6.4.1 PMT モジュールと DVT1 半球の比較

組み立て前測定のパMT モジュールとアセンブリ後の半球の状態の Darkrate 結果を図 6.6 に示す。両者の違いはガラスの有無と測定セットアップである。channel 4 以外は、組み立て後は組み立て前測定結果の値よりも高い結果となり、ガラスを付けたことによる影響が確認できる。特に組み立て後は L3 の Darkrate が L2 や L1 よりも高い傾向が見られる。各 PMT モジュールで組み立て前後の結果を比較すると、L3 は平均 2.3 倍、L2 と L1 は平均 1.8 倍の値となった。この原因としては、L3 はガラス半球の縁が近いため、縁の部分で反射する光子の信号を多く拾ったことだと考えられる。

#### 6.4.2 黒テープの有無による比較

アセンブリ後の半球の状態、ガラスの表面を黒テープで覆った場合と覆っていない場合の Darkrate 結果を図 6.7 に示す。各 PMT モジュールで組み立て前の結果と比較すると、6.4.1 章の結果と同様に L3 は平均 2.3 倍、L2 と L1 は平均 1.8 倍の値となった。テープ無しの場合に有りの場合の 2 倍程度になるという観点では、組み立て前測定の結果と一致している。黒テープで覆った場合には、PMT の位置による優位な差はほとんど見られなかった。ガラス表面の光の反射は L2 や L1 よりも L3 で影響が大きくなるのが分かった。

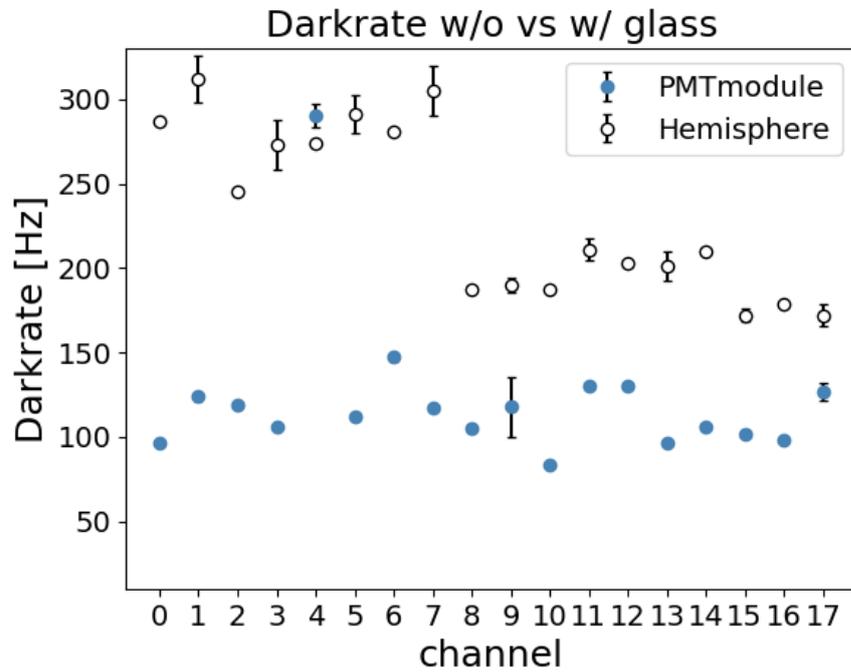


図 6.6: PMT モジュールと DVT1 半球の Darkrate 測定結果。PMT モジュールを青丸で、半球を白丸で示す。channel 1 から channel 7 が L3、channel 8 から channel 15 が L2、それ以降は L1 である。

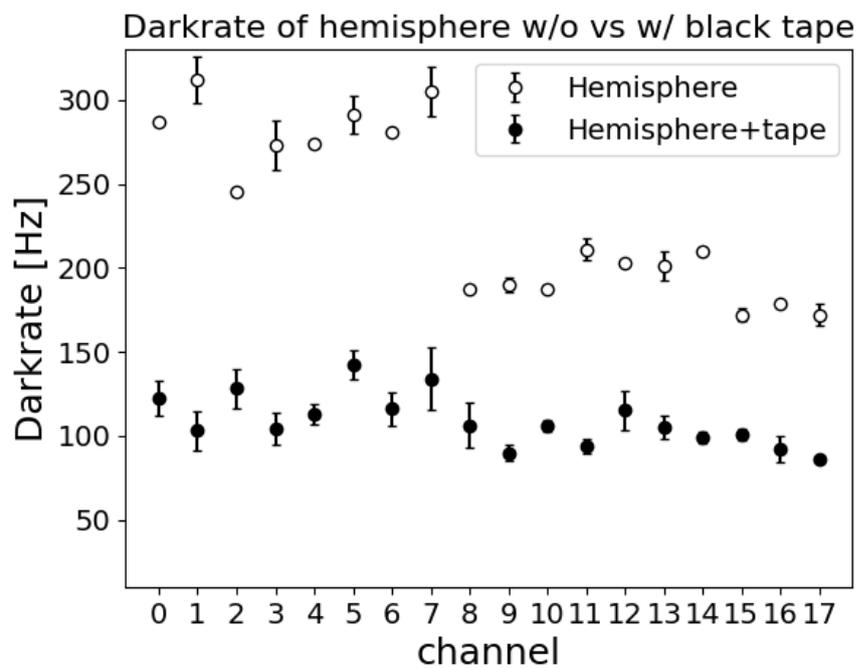


図 6.7: 半球の状態における黒テープあり・無しの Darkrate 測定結果。黒テープ無しを白丸で、黒テープ有りを黒丸で示す。channel 1 から channel 7 が L3、channel 8 から channel 15 が L2、それ以降は L1 である。

半球同士を合わせた状態で、ガラスの表面を黒テープで覆った場合と覆っていない場合の Darkrate 結果を図 6.8 に示す。半球の状態の結果と同様に黒テープ有りでは PMT の位置依存が見られないが黒テープ無しでは L3 が L2、L1 より高い傾向が見られる。またテープ無しの場合に有りの場合の 2 倍前後になる傾向も一致している。

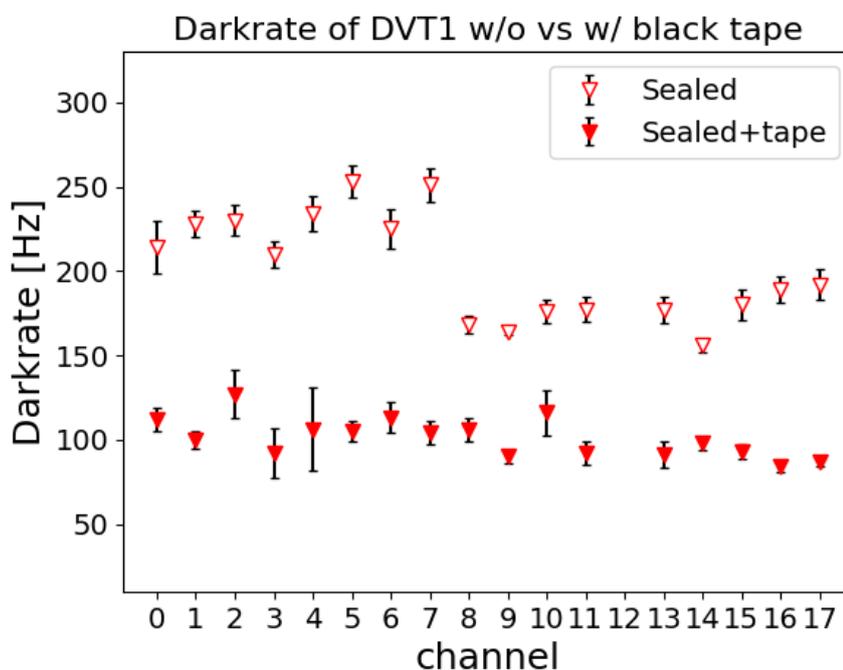


図 6.8: 半球同士を密閉後における黒テープあり・無しの Darkrate 測定結果。黒テープ無しを白で、黒テープ有りを赤で示す。channel 1 から channel 7 が L3、channel 8 から channel 15 が L2、それ以降は L1 である。

### 6.4.3 半球と密封後の比較

半球同士の密閉前 (半球の状態) と密封後 (DVT1) で黒テープ無しの Darkrate 結果を図 6.9 に示す。L2、L1 では密封前後で優位な差は見られなかったが、L3 では密封後に値が下がる傾向が見られる。これは、密封することで半球の接続面で光が透過できる確率が上がり反射が減ったためだと考えられる。また半球同士の接続部分は黒テープを巻いているため、その吸収の影響であるとも考えられる。

半球同士の密閉前と密封後で黒テープ有りの Darkrate 結果を図 6.10 に示す。黒テープ有りの場合は、PMT の位置に寄らず密封前後の優位な差は見られない。

### 6.4.4 組み立て前後の比較

組み立て前測定の PMT モジュールと組み立て後 DVT1 黒テープ有り (本番と最も近い状態) の Darkrate 結果を図 6.11 に示す。PMT の位置に寄らず密封前後の優位な差は見られない。表 5.2 の結果では PMT モジュールで 86 Hz、PMT + ゲルパッド + グラス + 黒テープで 149 Hz という値であった。これと似た状況での測定であることから、組み立て前測定で得られた各 PMT モジュールの Darkrate よりも組み立て後にガラスと黒テープを付けた状態のほうが高い値となると予想していた。しかし組み立て後は予想よりも低い Darkrate だという結果となった。これは、ガラス球の外側を黒テープ

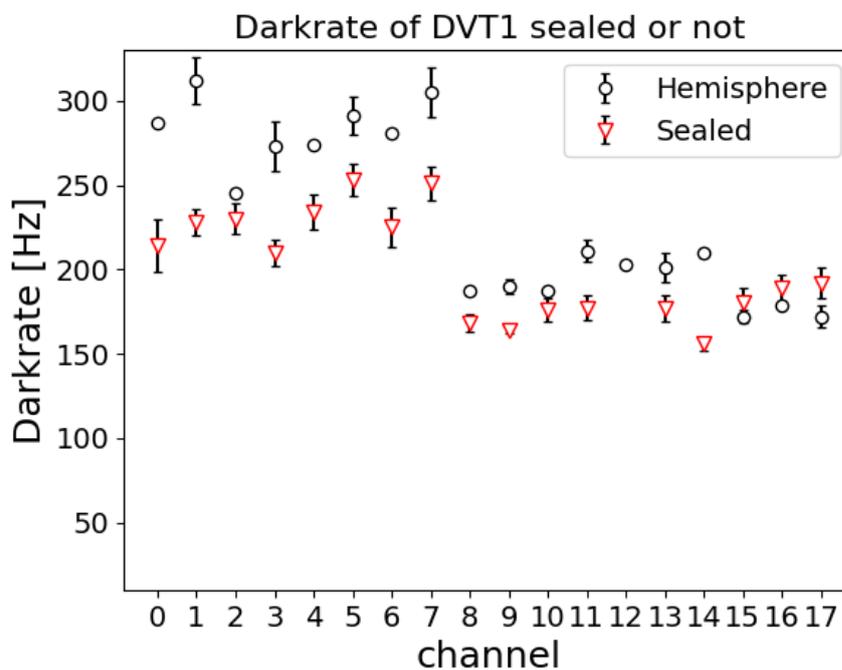


図 6.9: 半球同士の密閉前後の Darkrate 測定結果。半球を黒で、DVT1 を赤で示す。channel 1 から channel 7 が L3、channel 8 から channel 15 が L2、それ以降は L1 である。

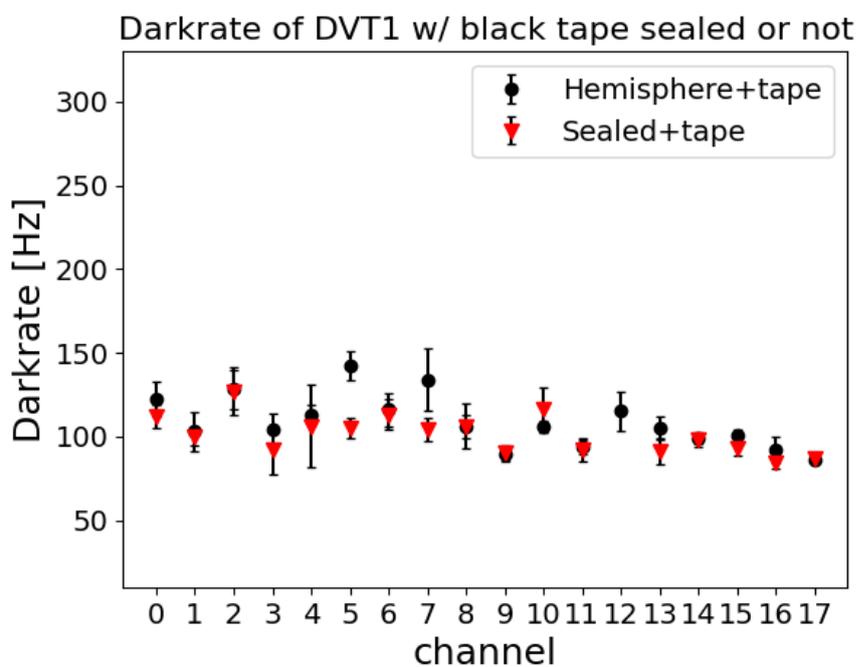


図 6.10: 半球同士の密閉前後の Darkrate 測定結果。半球を黒で、DVT1 を赤で示す。channel 1 から channel 7 が L3、channel 8 から channel 15 が L2、それ以降は L1 である。

で遮光したことと、組み立て前測定よりも長い時間冷凍庫を開けずに測定を続けることができたため安定した環境であったことが一因であると考えられる。

この結果から、組み立て前の Darkrate 測定の結果からおよその本番の Darkrate が分かるということになるが、現時点では DVT1 台の結果のみであるため、今後製作する G2DOM でも同様の傾向があるか注視していく。

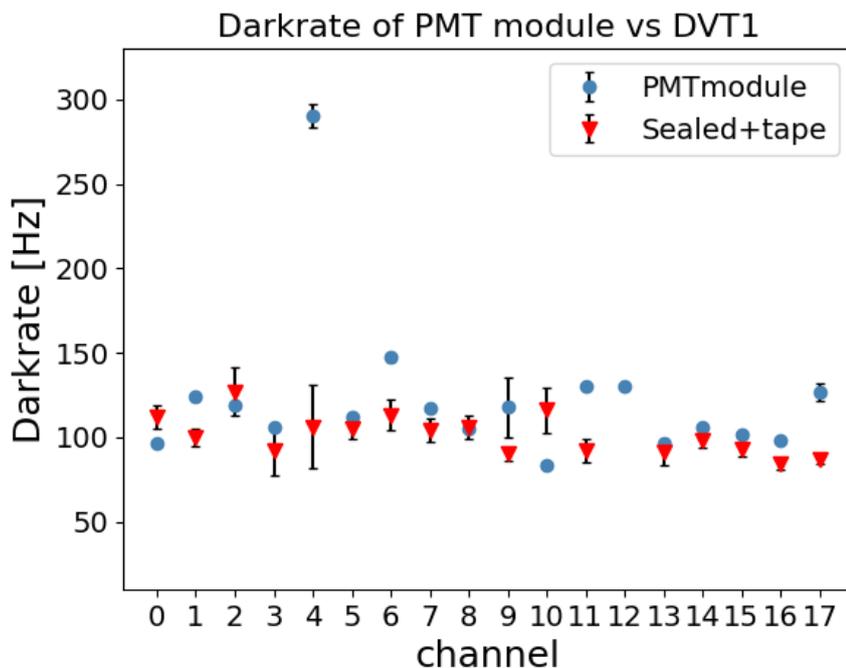


図 6.11: PMT モジュールと密封後 DVT1 の Darkrate 測定結果。PMT モジュールを青で、DVT1 を赤で示す。

## 6.5 複数読み出し

Fanout board を用いることで、18 台の PMT から読み出したい PMT を指定して稼働させることができる。この機能を使用し同時に複数の PMT を稼働させて測定することができる。複数読み出しの試験を行って得られた波形の例を図 6.12 に示す。図 6.12 は channel 0 と channel 14 の 2 台の PMT を同時に稼働し、セルフトリガモードを使用して 30 秒間データ取得を行った結果である。2 台とも電源が入り稼働しているが、それぞれ別の時間に 10 秒程度の deadtime があり、同時刻にデータが取得されているとはいえない。同時に稼働する PMT の数は 2 より多い値も指定可能である。deadtime の改善とタイミング較正、コインシデンスレートの調査は今後の課題である。

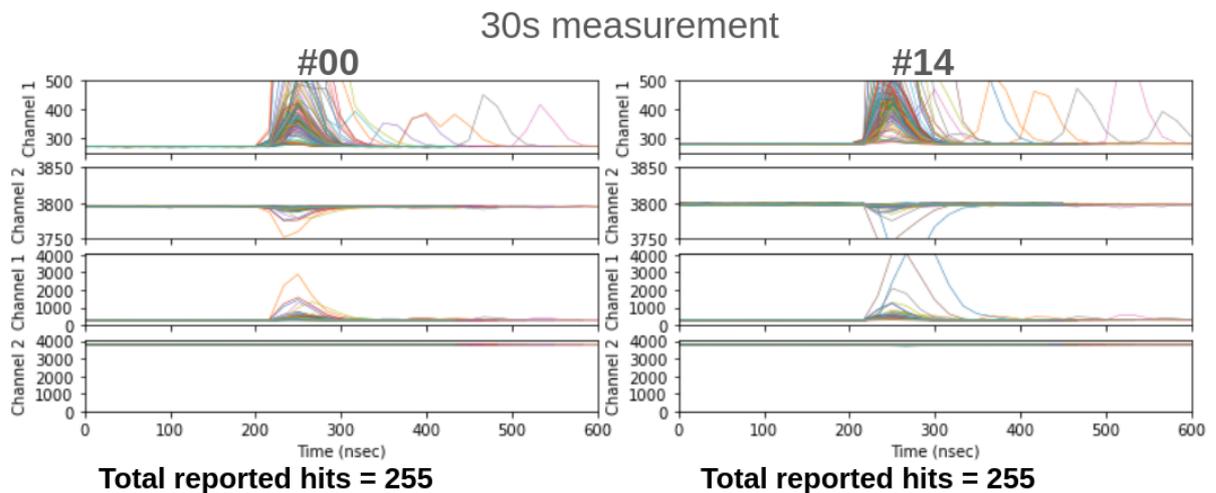


図 6.12: 複数読み出しモードで channel 0 と channel 14 で 30 秒測定して取得された波形の例。上から、縦軸範囲を限定した CH1 の波形、CH2 の波形、縦軸が測定可能全範囲の CH1 の波形、CH2 の波形を示す。測定された波形を重ねて示している。channel 0 も channel 14 も得た波形の数は 255 である。



## 第7章

# まとめと展望

本研究では、次世代高エネルギー拡張実験 IceCube-Gen2 計画に向けて、新型高性能光検出器 G2DOM を開発・製造している。G2DOM には 18 台の PMT を搭載し、各 PMT には電圧印加・読み出し基板 “wuBase” を取り付け。wuBase を使用することで、アノードだけではなく増幅途中のダイノードからの信号を取得できるため、ダイナミックレンジが大幅に拡大できる。本研究では G2DOM の測定システムを作成し、組み立て前後の試験を行った。組み立て前測定では、検査項目をゲイン較正・電荷分布・時間分解能・線形性・Darkrate とした。測定の結果、電荷分解能・時間分解能・Darkrate は Gen2 実験に適した性能を達成した。線形性では、G2DOM 用 PMT モジュール 1 台あたりで 2000 PE 光子までの線形性が確認できた。ゲルパッドやガラス球・黒テープの有無による Darkrate の比較も行い、その傾向を確認した。

組み立て後測定では、半球の状態と完成形でゲイン較正と Darkrate の検査を行った。実験セットアップの変化に伴い、ゲインの僅かな減少が確認された。Darkrate は、組み立て前後と黒テープの有無による比較を行った。黒テープを付けた場合は、ガラス付きでも PMT モジュールのみの結果と同程度で位置による差も見られなかった。ガラス球の接着後で黒テープ無しの場合は、L3 の PMT が L2 や L1 の PMT よりも Darkrate が高くなるという傾向があった。

複数 PMT の同時読み出しの設定も行った。G2DOM 内の PMT を 18 のチャンネルに割り振り、任意の複数チャンネルを選択して測定が可能である。ただし、データ取得自体に多くのデータ通信が必要になるため、チャンネル数に比例して増加する deadtime が存在する。

ここで、G2DOM の性能を表 7.1 にまとめた。

表 7.1: G2DOM の現時点での性能

G2DOM 全体	高さ	540 mm
	直径	320 mm
	重さ	27.1 kg
	PMT 搭載数	18
	DOM と比較した有効面積	DOM の 4.4 倍
	Darkrate (1PMT in DVT, テープ付き) @0.25 PE	平均 101 Hz
ガラス球	重さ (上下半球)	16.9 kg
	厚さ	12.5~16.5 mm
	耐圧性	70 MPa 以上
PMT	QE	24%
	電荷分解能	平均 3.48
	Peak to Valley 比	平均 3.31
ゲルパッド	屈折率	1.4
	透過率	98%
wuBase による読み出し	消費電力	150 mW 以下
	読み出し速度	60 MHz
	時間分解能	平均 1.69 ns
	最大検出光子量	2000 PE

今後は、改良版の wuBase を用いることで PMT モジュール 1 台あたり 5000 PE 以上の検出が可能になる。また複数の PMT での読み出し方法を確立していく。組み立て前測定は現状 1 台ずつの測定だが、複数同時に測定できるセットアップ製作を予定している。そのために、deadtime や信号の時間的コインシデンスに関する理解が今後の課題である。2024 年度中には計 10 台の G2DOM を製造し、その後は日本とアメリカの 2 拠点で生産する計画である。

## 謝辞

本研究は、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学研究室 (ICEHAP) にて行われました。本研究を遂行するにあたり、日頃から御支援と御指導をいただきました指導教官である石原教授、解析方法や実験について御指導を頂いた吉田教授に感謝申し上げます。実験方法の構築から器具の扱い方まで多くのご助言を頂いた清水助教、問題の解決方法についてご助言を頂いた永井特任研究員に感謝致します。野田准教授、Anna Pollmann 助教、岩切助教には、定期ミーティングなどで適切なアドバイスを頂きました。Kareem Farag さん、Colton Hill さん、Max Meier さんには、実験の遂行のためにご支援や着想を頂きました。また、同研究室の学生メンバーの皆さん、ICEHAP グループの高橋秘書にも多くのご支援をいただきました。皆様に感謝申し上げます。



## 参考文献

- [1] K. Greisen, *End to the Cosmic-Ray Spectrum?*, 1966.
- [2] “Cosmic ray spectra of various experiment.”  
<https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- [3] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*, John Wiley & Sons **3** (1999).
- [4] IceCube collaboration Collaboration, R. A. et al, *Calibration and characterization of the IceCube photomultiplier tube*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (2010).  
[http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/files/IceCube\\_PapersCollection.pdf](http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/files/IceCube_PapersCollection.pdf).
- [5] 浜松ホトニクス株式会社編集委員会, 光電子増倍管-その基礎と応用-第4版,.
- [6] R. A. et al, *D-Egg: a Dual PMT Optical Module for IceCube*, Journal of Instrumentation (JINST) (2023).
- [7] IceCube collaboration Collaboration, M. G. A. et al, *IceCube-Gen2: the window to the extreme Universe*, arXiv:2008.04323 (2020). <https://arxiv.org/abs/2008.04323>.
- [8] “Detection of a particle shower at the glashow resonance with icecube.”  
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03256-1>.
- [9] “IceCube アップグレード&gen2 計画 | ニュートリノ天文学 | 千葉大学 ハドロン宇宙国際研究センター.” <http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/icecubegen2.html>.
- [10] R. A. et al, *The IceCube-Gen2 Neutrino Observatory*,.
- [11] N. Shimizu, *Gen2 DOM R&D statusMechanics*,.
- [12] N. Shimizu, *Motivation and requirements for gel pads*,.
- [13] N. Shimizu, *OM photo sensors*,.
- [14] K. Farrag, *Gen2 DOM - the next generation IceCube-Gen2 neutrino detector candidates*, Chiba Satellite Workshop (2023). [http://www.icehap.chiba-u.jp/publicrelations/ICRC2023SW/files/SW2/Mechanical\\_Design\\_Gen2.pdf](http://www.icehap.chiba-u.jp/publicrelations/ICRC2023SW/files/SW2/Mechanical_Design_Gen2.pdf).
- [15] C. Wendt, *LOM Electronics Design & Status*,.
- [16] N. Shimizu, *2nd layer gel pad PMT casting manual*,.

[17] Y. Makino, *LOM-16 Assembly (DVT upper hemisphere)*, LOM Call (2023).

[18] Y. Makino, *WuBase status & Preliminary LOM SPE waveform template*, LOM Call (2021).

## 付録 A 章

### 耐性試験

半球同士のシールド終了後は、氷河中の環境や南極への運搬に対する耐性を試験する。2022年にはダミーのPMTモジュールを使用したG2DOMの試作品について耐圧試験を行った。DVT1については2024年3月現在、振動試験を終えている。

#### A.1 耐圧試験

南極の地下では深い場所であるほど氷による圧力が大きくなる。圧力に対する耐久性と変形を調べるため、図A.1のように専用の設備がある施設で実験を行った。検出器を埋設予定の地下3km



図 A.1: 専用の設備を用いて行った耐圧試験の様子。神奈川県横須賀市にある国立研究開発法人海洋研究開発機構にて試験を行った。

周辺では、氷による圧力が約 30 MPa であるが、最大でその 2.5 倍の 70 MPa で耐圧試験を行った。試験は 2 回実施した。1 つの試験では、0.6 MPa/min で圧力を 70.9 MPa まで上昇させ、10 分間保持

した後、 $-2.0$  MPa/min で  $0$  MPa まで下降させた。もう 1 つの試験では、 $0.6$  MPa/min で圧力を  $50.7$  MPa まで上昇させ、 $10$  分間保持した後、 $-2.0$  MPa/min で  $0$  MPa まで下降させた。

変形はひずみの値を用いて評価した。ひずみ  $\varepsilon$  [strain] は、元の長さを  $L$ 、変化した長さを  $\Delta L$  として以下の式で表される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.1})$$

ダミーの G2DOM 半球による試験では、図 A.2 に示すように最大  $70$  MPa の圧力で、ガラスのひずみが最大  $10$  millistrain の変化であった。図 A.2 に示すようにゲルパッドは最大  $0.05$  millistrain の変化であった。測定に支障をきたすような変化は無く、十分な耐久性があるという結果となった。

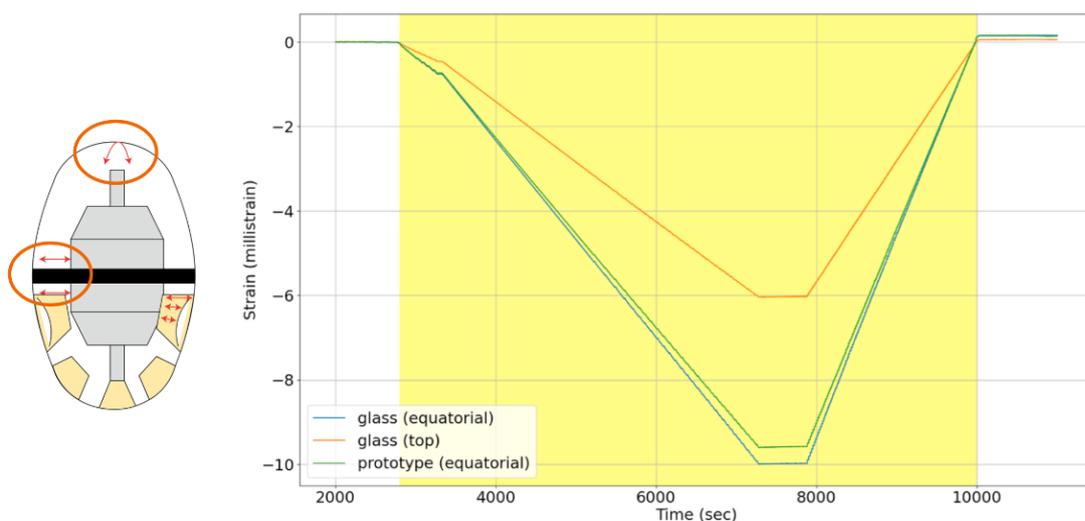


図 A.2: 最大  $70$  MPa の圧力試験のガラス球の変形結果 [14]。左図に示すようなガラスの頂点と側面 2 箇所の計 3 箇所の結果を示す。圧力変化に伴い収縮することが確認できた。

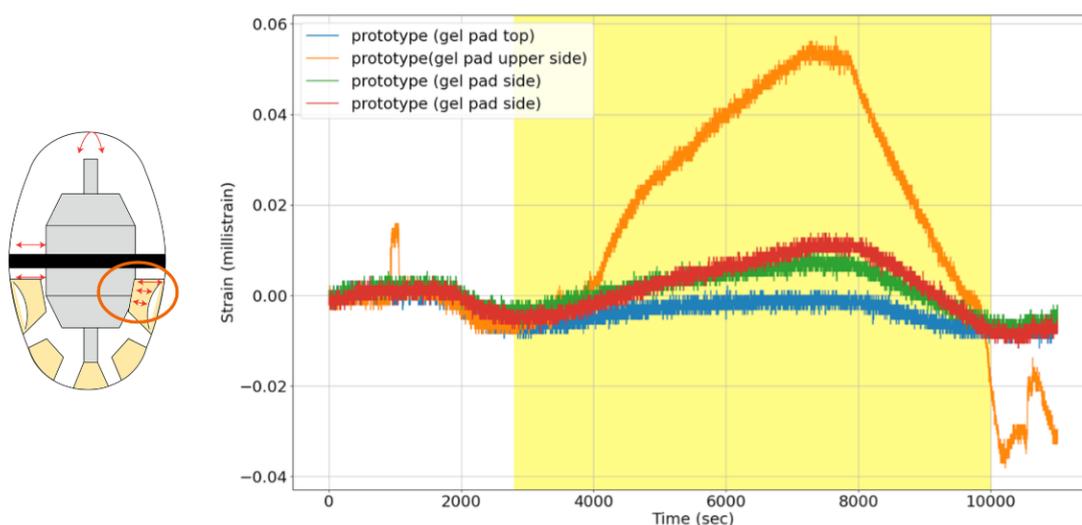


図 A.3: 最大 70 MPa の圧力試験のゲルパッドの変形結果 [14]。左図に示すようなゲルパッド側面の上部・中部・下部、他単体ゲルパッドの側面の計 4 箇所の結果を示す。圧力変化に伴う変形が確認できたが、ガラスとは異なり複雑な曲線を得た。これは、ゲルパッドが左図の矢印で示すような収縮方向だけでなく、ゲルパッドの周りに空いた空間へ押しつぶされる方向にも変形したためだと考えられる。

## A.2 振動試験

検出器の運搬には自動車（トラック）や航空機を使用する。輸送中に想定される振動を加えて試験を行う。実際の輸送環境を再現するために、図 A.4 のように輸送用ダンボールの中に緩衝材とともに G2DOM を入れた状態にした。ここでは 2 台目に製作された DVT（付録 B 章）を試験に使用している。図 A.5 のような専用の設備がある施設で実験を行った。ステージの部分が輸送中のランダムな振動を再現して動く。試験の装置は縦方向の振動に対応していて、今回は横方向の動きは無い。試験項目と時間を表 A.1 に示す。

表 A.1: 振動試験の項目と振動継続時間

試験項目	継続時間
読み出し試験	
トラックの振動 (弱)	40 分
トラックの振動 (中)	15 分
トラックの振動 (強)	5 分
航空機の振動	2 時間
読み出し試験	

試験の前後では目視による損傷の確認と、読み出し試験を行った。振動試験は表 A.1 に示したようにトラックの振動 (弱・中・強)、航空機の計 4 種類を約 3 時間かけて行った。それぞれの振動のスペクトルは図 A.4 に示す。



図 A.4: 右: 輸送用のダンボール箱。左: ダンボール内で G2DOM の上下に入れる緩衝材付きの台座。



図 A.5: 専用の設備を用いて行った振動試験の様子。神奈川県藤沢市にある日本ビジネスロジスティクス株式会社の包装試験室にて試験を行った。箱が置かれたステージが上下に動く。

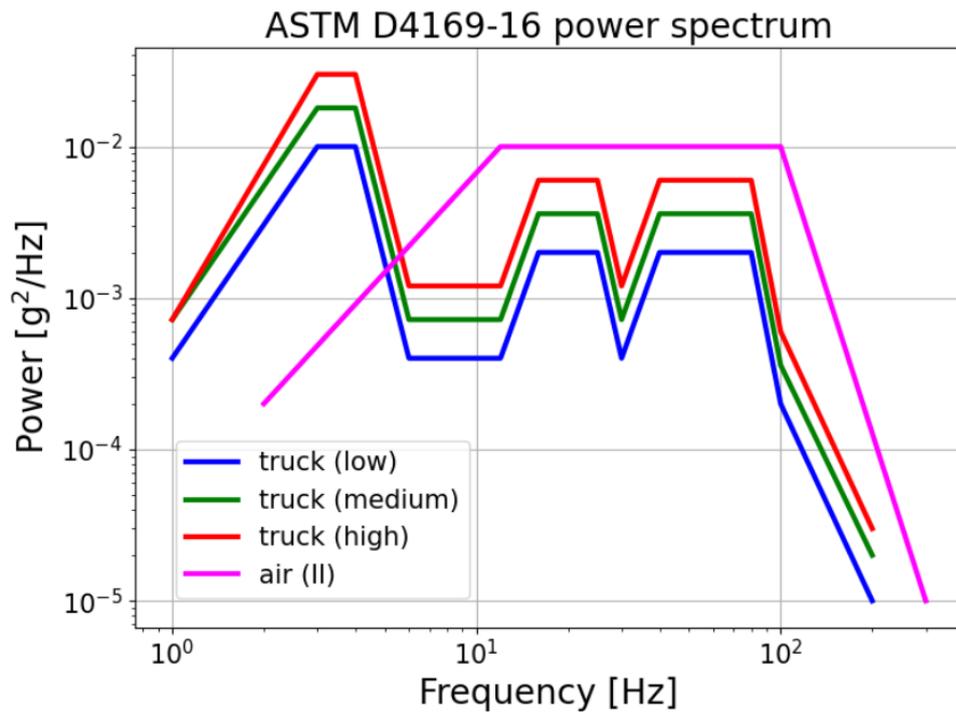


図 A.6: 振動の種類ごとの振動数スペクトル。トラックの振動 (弱) を青線で、トラックの振動 (中) を緑線で、トラックの振動 (強) を赤線で、航空機の振動をピンク色の線で示す。

一連の試験の結果、振動試験の前後で見た目の変化は見られなかった。読み出し試験では、振動試験の前後両方で全ての PMT チャンネルとの通信を確認できた。試験前は 19.9°C で 540 hPa、試験後は 21.8°C で 546 hPa であったことから、ガラス球の密封も保たれていると言える。ゲイン較正の結果を図 A.7 に示す。全てのチャンネルで、振動試験前後でゲインが大きく変化することはなかった。よって、現時点の G2DOM 設計と梱包で、自動車や航空機での輸送の振動に耐えられる安全性があると期待できる。

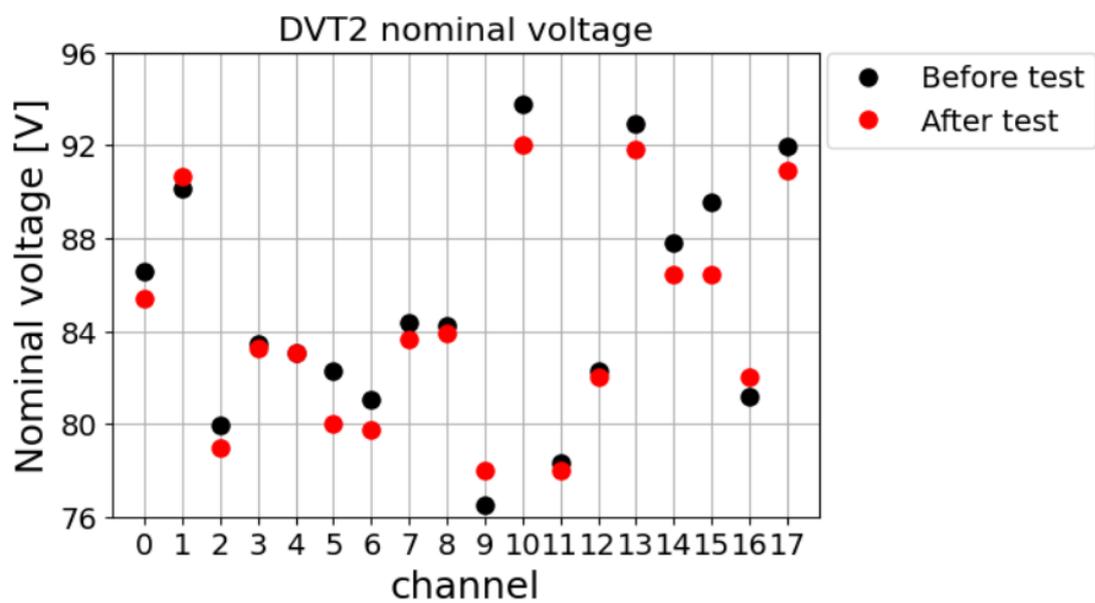


図 A.7: 振動試験前後のゲイン較正結果。振動試験前のゲイン較正で得た制御電圧を黒で、試験後のゲイン較正結果を赤で示す。試験前後で大きく変化したチャンネルはなかった。

## 付録 B 章

# DVT2の測定結果

2023年度末には2台目のG2DOM (DVT2)の製造を行った。DVT2でもDVT1と同様のシステムを用いて組み立て前後の測定を行った。その結果を以下にまとめる。

### B.1 組み立て前測定

#### B.1.1 電荷分解能

DVT2に搭載の各PMTの測定結果は図B.1に表す。PMTの位置による差はほとんど見られず、平均0.39という結果となった。G2DOMでは0.7以下であることが要求されているため、使用に十分に適していると言える。

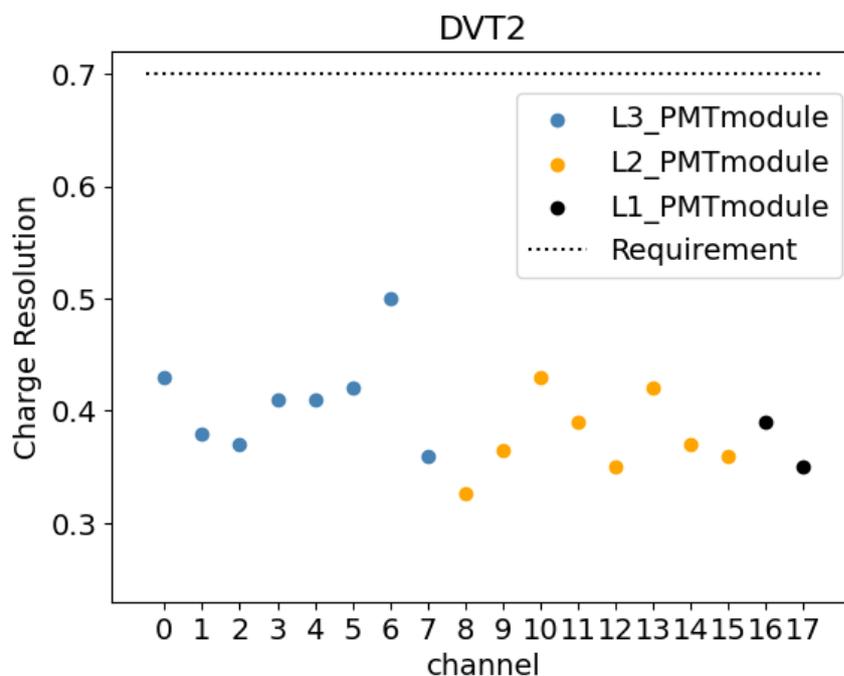


図 B.1: 電荷分解能の測定結果。黒の点線で要求の値 0.7 を示す。

### B.1.2 Peak to Valley 比

DVT2 に搭載の各 PMT の測定結果は図 B.2 に表す。平均値は 3.60 で、全て要求される値 2 を上回っているため、G2DOM での使用に適している。DVT1 では L3、L2、L1 の順に値が低くなる傾向がややあるように見えたが、DVT2 ではそのような傾向は見られない。

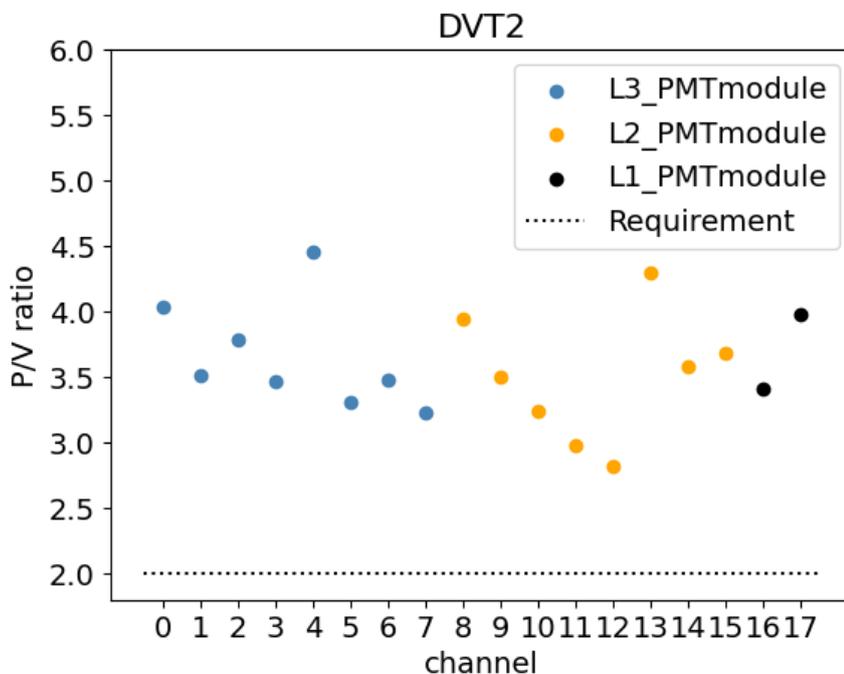


図 B.2: Peak to Valley 比の測定結果。黒の点線で要求の値 2.0 を示す。

### B.1.3 時間分解能

DVT2 に搭載の各 PMT の測定結果は図 B.3 に表す。取得できた結果の平均値は 1.62 ns である。全ての PMT モジュールで、3 ns 以下という要求を達成した。DVT1 では L3、L2、L1 の順に値が低くなる傾向がややあるように見えたが、DVT2 ではそのような傾向は見られない。

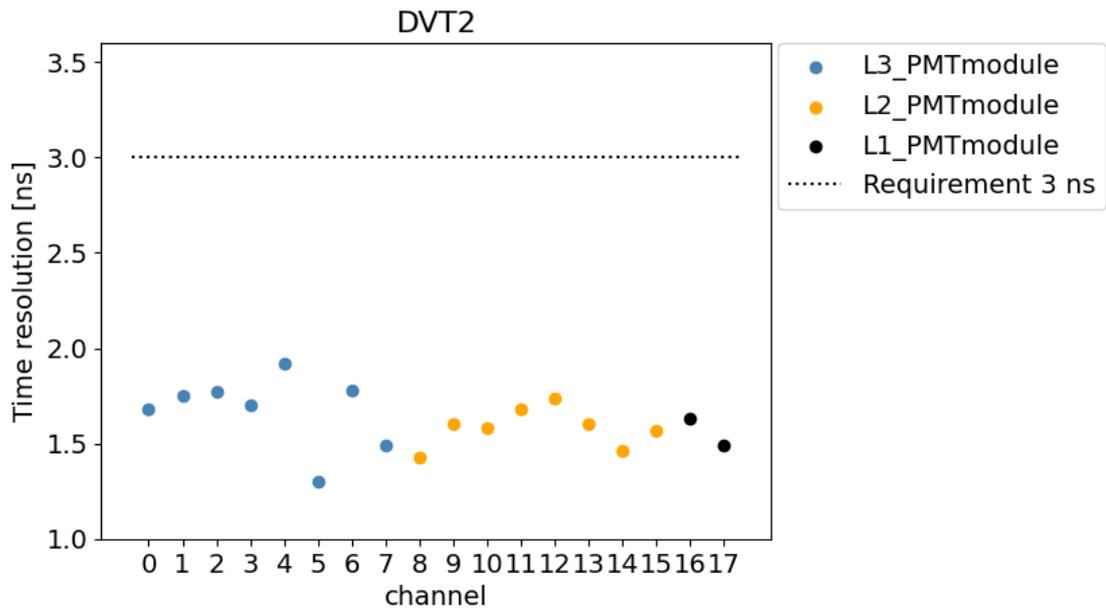


図 B.3: 時間分解能の測定結果。黒の点線で要求の値 3 ns を示す。

## B.2 組み立て前後の測定結果の比較

### B.2.1 ゲイン較正

結果は図 B.4 に示す。組み立て前測定の結果は丸、組み立て後測定の結果を三角の点で重ねて示した。DVT1 と同様に、組み立て後はやや制御電圧が高い(ゲインが低い)傾向が見られた。DVT1 よりも値のばらつきが大きい、これは使用した PMT の個体差によるものであるため問題ない。

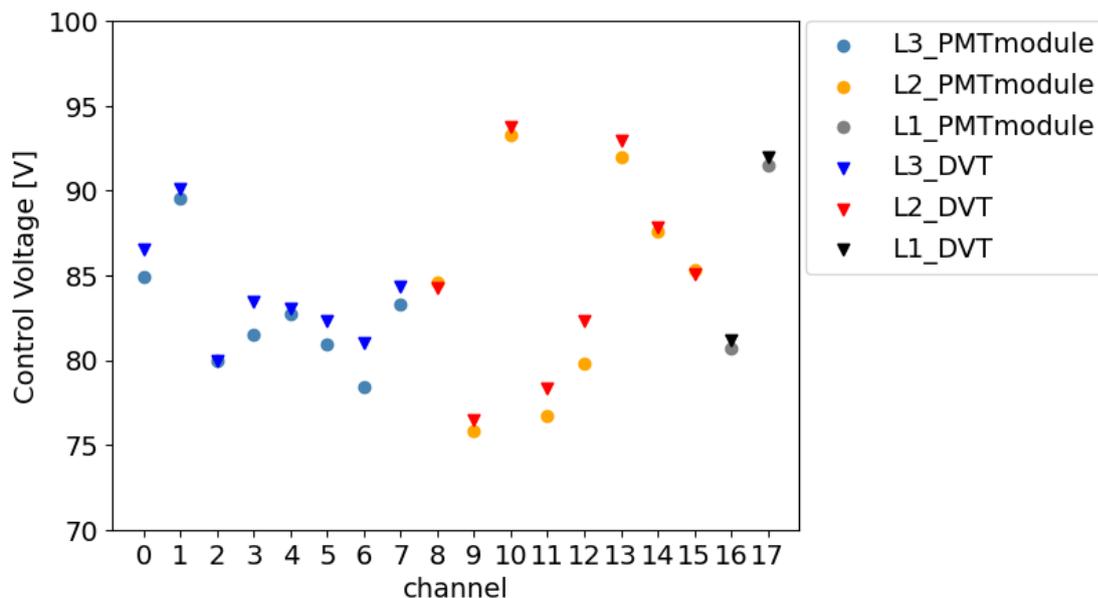


図 B.4: ゲイン較正結果の比較。丸が PMT モジュールの組み立て前測定、三角が組み立て後の測定結果である。DVT1 と同様にほとんどのモジュールで組み立て後の値が高くなっている。

## B.2.2 Darkrate

組み立ての前後で Darkrate 測定を行った。組立後の半球の状態・半球同士を合わせた状態では、それぞれガラス球表面に黒テープを貼り付けて測定した。全ての Darkrate 測定結果を、組み立て前測定の結果に重ねて図 B.5 に示す。PMT モジュールでは平均 103 Hz、アセンブリ後の半球では平均 92 Hz、半球同士合わせた状態で平均 95 Hz の Darkrate が測定された。DVT1 と同程度の値を得たといえる。DVT1 の結果と同様に、PMT モジュールと、黒テープありの状態では PMT の位置による値の差は見られなかった。また組み立て前と組み立て後 DVT1 黒テープ有り (本番と最も近い状態) で比較をすると同じ程度の値になるという結果も DVT1 と一致している。

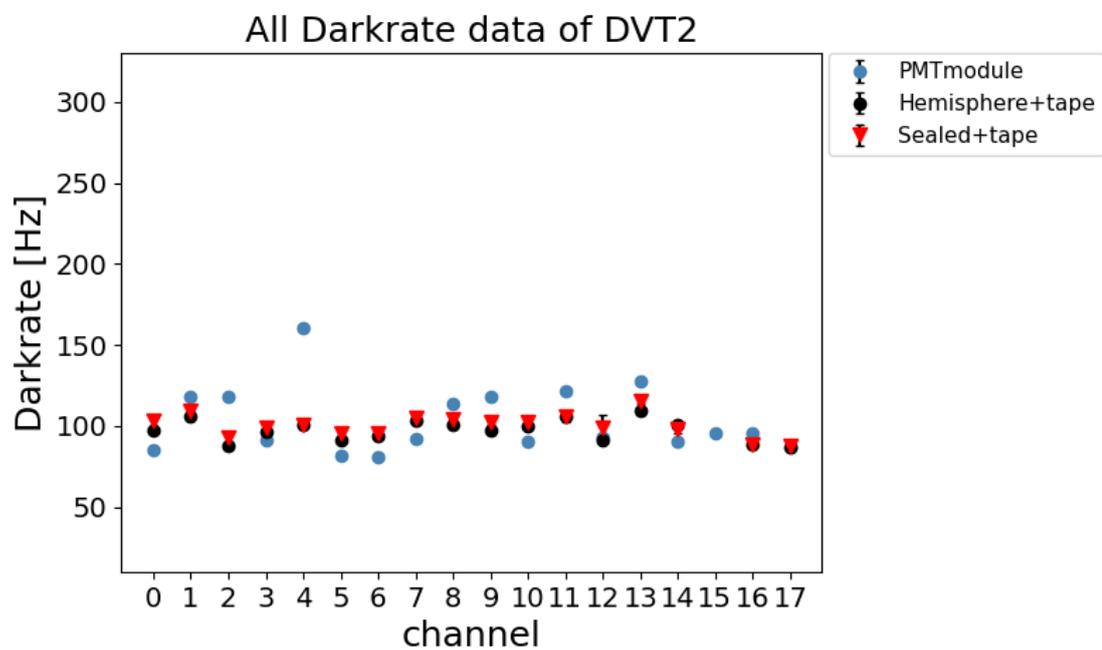


図 B.5: 組み立て前後の全ての Darkrate 測定結果。PMT モジュールを青丸で、半球テープ有りを黒丸で、密封後テープ有りを赤三角で示す。青丸の PMT モジュールでは、Darkrate のゆらぎを示す標準偏差のデータが無いいためエラーバーが見えていない。黒丸と赤三角で示すアセンブリ後は channel 15 のデータ取得に問題が生じたため Darkrate の結果を得られなかった。