

修士論文

ハイパーカミオカンデ用の 50 cm 口径光電子増倍管の
磁場による影響調査

(Investigation of the Impact of Magnetic Field on 50 cm
Diameter Photomultiplier Tubes for Hyper-Kamiokande)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

指導教員: 奥村 公宏 准教授

学籍番号: 35-216070 氏名: 富谷 卓矢

2023 年 2 月

目次

1	本研究の概要	1
1.1	概要	1
2	Introduction	3
2.1	Hyper-Kamiokande project	3
2.2	検出原理	3
2.2.1	チェレンコフ放射 (Cherenkov Radiation)	3
2.3	検出器概要	7
2.3.1	50 cm B&L PMT	8
2.3.2	Multi-PMT	8
2.3.3	8 cm OD PMT	9
2.3.4	ブラックシート、PMT カバー	10
2.3.5	磁気補償	12
2.4	Physics	15
2.4.1	陽子崩壊	15
3	HK B&L PMT	19
3.1	性能	19
3.1.1	電荷・時間分解能	19
3.1.2	ダークレート	21
3.1.3	検出効率	21
3.1.4	ダイノード構造	24
3.2	量産前測定	27
3.3	納入	27
3.4	簡易検査	28
3.5	長期測定	29
3.5.1	長期測定セットアップ	29
3.5.2	長期測定性能	30
3.6	磁場による影響	33
4	Lab-B における磁場の影響の測定	36
4.1	測定の目的	36
4.2	測定セットアップ	36
4.2.1	3次元磁場補償コイル (ヘルムホルツコイル)	36
4.2.2	補償コイル内の磁場制御	38
4.2.3	PMT セットアップと PMT の 3 軸の定義	39
4.2.4	LD 光源	40
4.3	測定	41

4.4	解析	41
4.5	結果	42
4.5.1	無磁場時における閾値電圧	42
4.5.2	3 軸磁場における収集効率と位置依存性	43
4.5.3	収集効率の HV 圧依存性	45
5	PMT ダークレートの磁場による影響の調査	49
5.1	目的	49
5.2	補正係数の算出と補正の方法	50
5.3	結果	51
5.3.1	PMT 量産前測定 (柏での測定) 場所における補正	51
5.3.2	長期測定 (PMT 量産品測定) 場所における補正	53
5.3.3	柏の測定と長期測定の電圧依存性における補正係数の算出	56
5.3.4	ダークレート補正	58
6	結論	61
7	今後の展望	62
8	付録	63
付録 A	SK の磁気補償	63
付録 B	LabB のセットアップにおけるノイズ調査	64
付録 C	PMT100 本測定の場合における磁場の影響	68
	表目次	70
	図目次	71
	参考文献	75
	謝辞	76

1 本研究の概要

1.1 概要

自然界には、重力相互作用、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用の4つが存在する。素粒子物理学では、この4つの相互作用が宇宙初期に統一的に振る舞われていたとされている。現在までに電磁相互作用と弱い相互作用を統一した標準理論がある。そして、これに強い相互作用が追加され3つの相互作用を記述する標準理論が知られており、実験結果などをほぼ矛盾なく説明することができている。しかし、理論と実験で説明できない事柄があり、標準理論を超えた大きな理論体系があるのではないかとされており、最も有力なものとして大統一理論がある。そして、この大統一理論の直接検証できる唯一の方法として陽子崩壊がある。標準理論では陽子の寿命は永久とされてきたが、この大統一理論では陽子には寿命があり崩壊するというものである。数々の崩壊を预言する理論モデルも提唱されたり、実験においても数多くの探索がなされてきたが今だに見つかっていない。神岡の実験でもこの陽子崩壊を発見することが主目標とされて、大量の陽子(純水)が用意され実験観測がされてきたが初代のカミオカンデ、二代目のスーパーカミオカンデにおいても発見されていない。この陽子崩壊の発見や標準理論を超えた物理、ニュートリノのCP対称性の破れや質量階層性の決定、超新星背景ニュートリノなどの観測をするため、現在のスーパーカミオカンデの約8倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ実験が2027年の実験開始に向けて準備が進められている。

本論文では、このハイパーカミオカンデ(HK)実験に使用される光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)についての測定、評価を行った。HKに使用されるPMTは50cmの大きな口径を持つ。PMTは口径が大きくなるほど磁場に対する影響を受けやすくなり、収集効率が低下して検出効率にも影響が出てくる。特に、ダークレートの収集効率への影響は、低エネルギー事象である太陽ニュートリノの観測や超新星ニュートリノの探索などが検出に大きく影響を受ける。そのため、HK PMTの磁場による影響の調査を行った。SK坑内にあるLabBにおいて3次元補償コイルを用いて、任意の3軸磁場を制御してダークレートノイズとLD光源を用いた信号のヒットレートの収集効率の影響を評価した。また、HKに向けて現在PMTの大量生産、納入が行われている。PMTの安定性を評価するためにHK PMT納入場所において2つの暗室が作られており、1暗室に8本のPMTが設置され計16本のPMTの約2週間に渡った長期測定が行われている。長期測定場所の2つの暗室と浜松ホトニクスにおいてPMT測定の比較評価を行っているが、現在納入されたPMTはダークレートノイズなどが一致していないことが確認されている。また、PMT量産前の柏の測定では、ダークレートノイズの平均値が目標値に達成していたが、この測定値とも一致していない。

このことより、長期測定において環境磁場の影響もPMTに影響を及ぼしている要因の一つと考えられ考慮する必要がある。環境磁場の影響をなるべく少なくするため、現行の測定ではカミオカンデ時代に用いられたミューメタルシールドをPMTに取り付けて、磁場を低減した状態で測定を行なっている。しかし、ミューメタルシールドを取り付けて磁場を低減した後にも、HKの許容領域磁場(± 100 mG)以上の残留磁場が残った状態での測定になっている。よって、3次元補償コイルを用いて長期測定場所の磁場に対する収集効率を調査し、ミューメタルシールド取り付けによる

磁場の影響を評価した。柏の測定においても残留磁場は残っていたため各場所の磁場を用いて影響を見積もった。また、印加電圧によっても収集効率は影響を受けるとされるため HV 依存性も調査した。

得られた収集効率から補正係数を算出して現在測定されているダークレートノイズの磁場補正を行い、柏と長期測定場所、そして浜松ホトニクスで比較し影響について評価した。

2 Introduction

2.1 Hyper-Kamiokande project

ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande : HK) 実験は、カミオカンデ、スーパーカミオカンデに続き 3 世代目となる次世代の大型水チェレンコフ光検出器実験であり、世界最高感度で陽子崩壊探索、CP 対称性の破れ、ニュートリノの質量階層性の決定、超新星爆発・超新星背景ニュートリノの観測を目指している。2027 年の観測開始を目指して実験準備が進められており、20 カ国の 500 人を超える共同研究者が実験に参加している。また、スーパーカミオカンデから約 10km 圏内にある二十五山の頂上から地下 650m の位置において 2022 年現在建設が行われている。

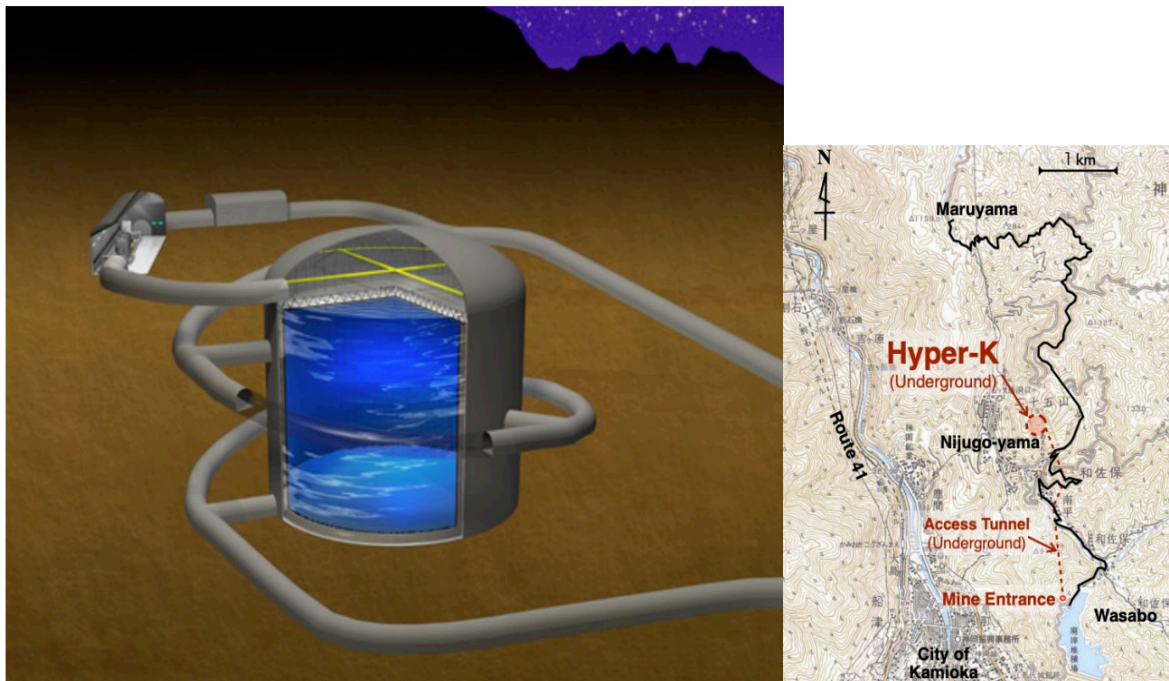


図 1 HK 検出器とその観測地。

2.2 検出原理

HK などの水チェレンコフ光検出器では、ニュートリノ反応によって生じる電子、ミューオンなどの荷電粒子によって放出されるチェレンコフ光が信号として検出される。

2.2.1 チェレンコフ放射 (Cherenkov Radiation)

ニュートリノは電磁相互作用をしないので観測するには、ごく稀に荷電粒子と相互作用する反応を見なくてはならない。その反応が起きた時に放たれるのがチェレンコフ放射であり、それにより

出される光をチェレンコフ光という。チェレンコフ光は、高速の荷電粒子が速さ v で屈折率 n の媒質中を進む時、その媒質内の光速 c/n を超えて進むと、荷電粒子周辺の電磁場が乱れて媒質の原子内の電子を局所的に分極させる。その後安定状態に戻る時に電磁波が発生する。ここで図 2 にチェレンコフ放射の図を示す。

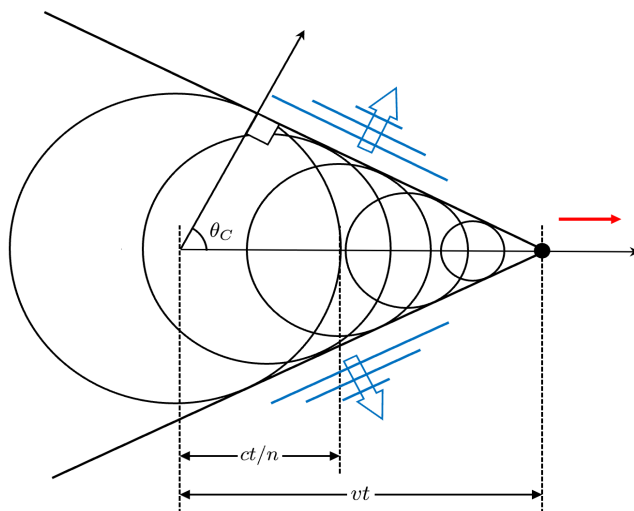


図 2 高速荷電粒子がチェレンコフ光を放射する図。赤: 荷電粒子の進行方向. 青: 分極後に放出されるチェレンコフ光.

この時、もし荷電粒子の速さが媒質中の光速より遅い場合電磁波は相殺されるが、媒質中の光速より速い場合なので、個々の電磁波がチェレンコフ光として観測される。図 2 の荷電粒子の進行方向軸に対して放射されるチェレンコフ光の方向軸の間をチェレンコフ角 θ_C とすると荷電粒子が速さ v で時間 t の間に進む距離は vt であり、光の速さ c を用いて $vt = \frac{v}{c}ct = \beta ct$ となる。ここで $\beta = v/c$ である。チェレンコフ光は、時間が t 経過する間に $\frac{c}{n}t$ 進む。これらを用いて $\cos \theta_C$ をとると

$$\cos \theta_C = \frac{\frac{v}{c}t}{\frac{c}{n}t} = \frac{1}{n\beta} \quad (2.2.1)$$

となり、 $\cos \theta_C \leq 1$ で水の屈折率は $n \simeq 1.34$ であるから

$$\cos \beta \geq \frac{1}{n} \simeq 0.746 \quad (2.2.2)$$

となる。また、式 (2.2.1) の $\beta \simeq 1$ とすると $\theta_C \simeq 42^\circ$ となる。これらより、水中の荷電粒子は光速の約 75% 以上でチェレンコフ光が発生してその進む方向とのなす角度 θ_C は約 42° で最大となる。

またチェレンコフ放射は、式 (2.2.1)、 $\beta = v/c$ と $\cos \theta_C$ の条件より

$$\begin{aligned} 1 &\geq \cos \theta_C = \frac{1}{n\beta} \\ v &\geq \frac{c}{n} \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

であり、媒質中の光速を超えることが必要であり、その荷電粒子のエネルギー閾値 E_{th} の条件は、 $\beta_{th} \equiv v_{th}/c \equiv 1/n$ と

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2, \quad \beta = \frac{pc}{E} \quad (2.2.4)$$

を用いる。ここで、 p は荷電粒子の運動量。これより

$$\begin{aligned} E_{th}^2 &= (mc^2)^2 + (pc)^2 \\ &= (mc^2)^2 + \left(\frac{E_{th}}{cn} c\right)^2 \\ E_{th} &= \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

となり、チェレンコフ光が観測されるエネルギー閾値は荷電粒子の質量に依存する。表に水中の荷電粒子のエネルギー閾値を示す。

表1 荷電粒子のエネルギー閾値 E_{th}

荷電粒子	静止質量 [MeV/c ²]	エネルギー閾値 [MeV]
e^\pm	0.511	0.768
μ^\pm	105.7	158.8
π^\pm	139.6	209.7
K^\pm	493.7	741.7
p	938.3	1410

またチェレンコフ放射時の光子数も見積もることができ、単位飛行距離 dL 、単位波長 $d\lambda$ あたりに放出されるチェレンコフ光の光子数について Frank-Tamm formula より

$$\frac{d^2 N}{dL d\lambda} = 2\pi Z^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.2.6)$$

ここで、 Z は媒質中を通過する荷電粒子の電荷、 $\alpha \approx 1/137$ は微細構造定数である。この式 (2.2.6) を $\cos \theta_C = 1/(n\beta)$ して積分し

$$\begin{aligned} N &= 2\pi Z^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \int_0^l \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dL d\lambda \frac{1}{\lambda^2} \\ &= 2\pi Z^2 \alpha l \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) の波長領域を例えば、約 300 ~ 600 nm とすると $\lambda_2=600$ nm、 $\lambda_1=300$ nm、電子の電荷 $Z = 1$ 、電子が進む距離 l は $l=1$ cm、 $\beta = 1$ とすると $N \simeq 340$ となる。以上より電子が 1 cm 進んだ時には、約 340 個の光子が放出される。

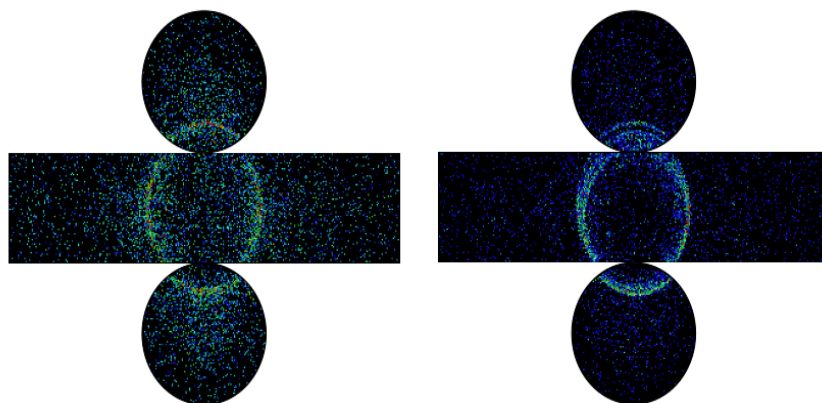


図3 HKの再構成されたイベント、左: 電子によるイベント、右: ミューオンによるイベント。

電子やミューオンなどの荷電粒子が検出器内でチェレンコフ光を発生すると、タンクに取り付けられたPMTにより信号が捉えられる。運動量、位置方向、粒子の種類などを計算し事象再構成を行い、散乱の種類など反応前の粒子を特定することができる。図3は、HKで検出されるニュートリノ反応による電子とミューオンチェレンコフリングのシミュレーションである。HK検出器の展開図を示しており、色のついた点は各PMTの光量を表している。赤色になるほど高い光量を表す。

また、検出される電子はチェレンコフ光を放射しながら進む際に電磁シャワーを起こすためリングがぼやけた輪郭となる。一方でミューオンは、散乱を起こしにくいいため綺麗なチェレンコフリングが生成される。

2.3 検出器概要

HK 検出器は、縦 71 m× 横 68 m の大きさに建設され、タンクの質量は 260 kt、有効体積は 188 kt と計画されている。タンク内に純水が溜められ壁面の内面と外面に 50 cm 口径の Box&Line PMT(B&L PMT)、Multi-PMT、8 cm 口径の PMT が取り付けられる。内水槽側には約 20000 本、外水槽側には約 7200 本取り付け予定されている。図 4 は、HK のタンクの断面図である。濃い青色領域は内水槽を表しており、水槽の内側に光電面を向けて ID PMT(50 cmB&LPMT、Multi-PMT) を取り付け。薄い青色領域は外水槽を表しており、OD PMT(8 cmPMT) をタンク外向きに取り付ける。

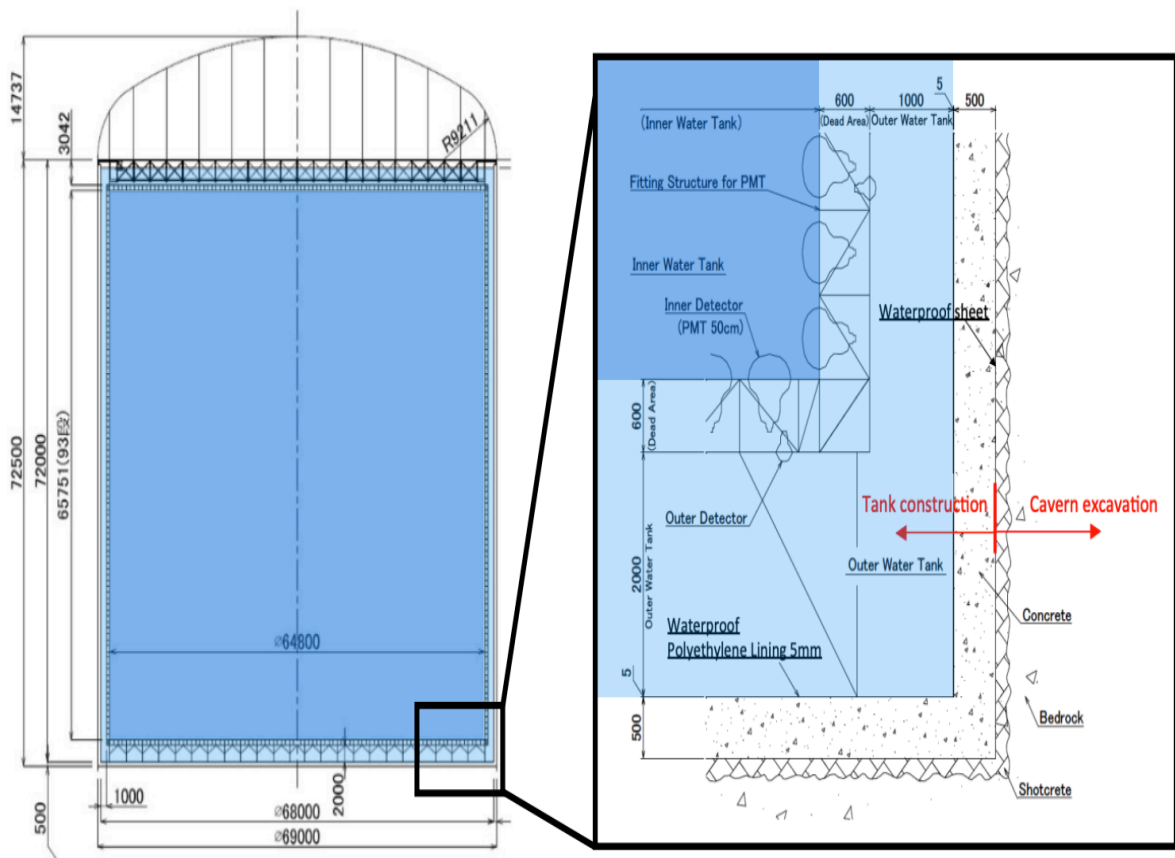


図 4 HK のタンクの詳細図。

2.3.1 50 cm B&L PMT

50 cm 口径 Box&Line PMT(B&L PMT) は、HK の検出器の内部に取り付けられる PMT である。

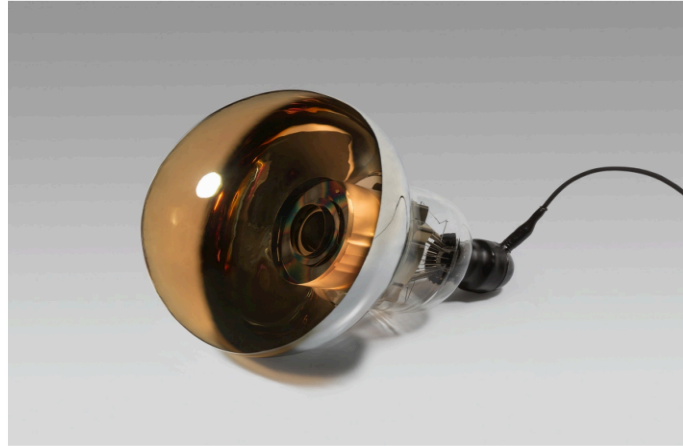


図5 50 cm 口径の B&L PMT。

スーパーカミオカンデ (SK) の 50 cm 口径 PMT を改良して作られたものであり、光電面の大きさが直径 50 cm で円周が約 160 cm となっている。また、信号増倍部であるダイノードには B&L 型が採用されているが、これは KamLAND(Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector: 神岡液体シンチレータ反ニュートリノ検出器) 実験で使用されている B&L 型 PMT を改良したものである。量子効率や収集効率を向上させたことにより、PMT の検出効率を SK PMT の約 2 倍に向上させた。相互作用頂点やエネルギーなどの再構成精度の向上が期待できる

最終的には、光電面やダイノード構造の改良がされて、スーパーカミオカンデ (SK) の PMT に比べて検出効率や時間電荷分解能が 2 倍に向上した。詳細は 3 で後述する。

2.3.2 Multi-PMT

Multi-PMT(mPMT) は、約 8 cm 口径の PMT が 19 本入って 1 セットの PMT となっている。

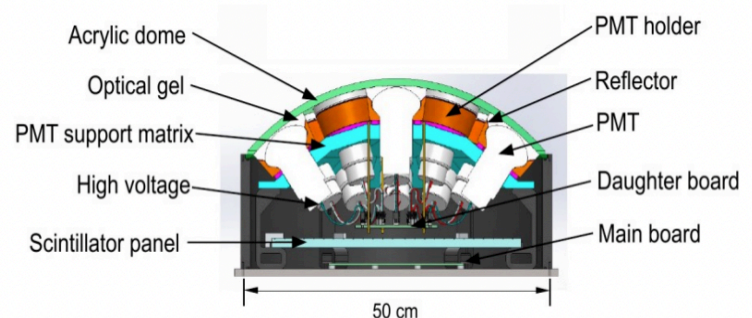


図6 左: Multi-PMT、右: Multi-PMT 内部の構造。

複数の小型 PMT が搭載されているため、異なる方向に取り付けることができ方向に感度を持たせることができる。一つの PMT が 50 cm 口径のものに比べて小さいことによりダークノイズレートを低く、光電面からダイノードまでの距離も短いことから地磁気の影響も少ない。

現在、茨城県の東海村の J-PARC と SK でニュートリノビームを用いた T2K 実験が行われており、HK の観測においても同様の実験が行われる予定である。mPMT は、J-PARC から約 1 km 離れたところに設置される中間水チェレンコフ検出器 (Intermediate Water Cherenkov Detector: IWCD) に約 480 セット取り付けられ、HK でも一部が ID PMT として取り付けられる。

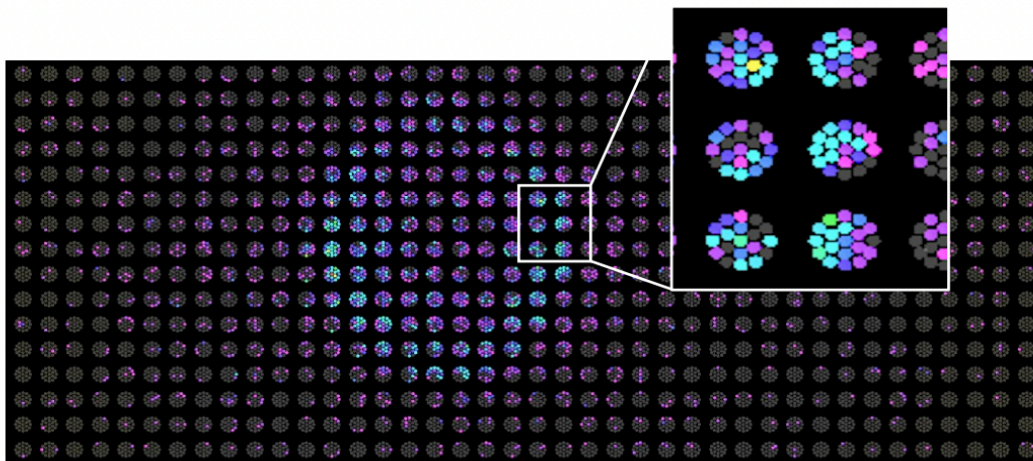


図 7 Mluti-PMT による信号検出のシミュレーションディスプレイ。

検出器で電子ニュートリノ ν_e や ミューニュートリノ ν_μ のフラックスやその断面積比を精度良く測定するためには、有効体積についてのカット時の統計誤差を最小にすることや ν_μ/ν_e 比の分離精度の向上させることが必要となってくる。50 cm 口径の PMT では性能が大きく低下する領域が出てくる。そのため、mPMT で PMT の小型化と位置やタイミング分解能が向上することにより、相互作用頂点の分解能の向上、粒子識別が改善された。

高エネルギー領域と低エネルギー領域でより広い感度領域を持たせることができ、観測では事象再構成などでより高い精度を目指す。また、mPMT は海外グループの貢献が大きい。

2.3.3 8 cm OD PMT

OD PMT は、mPMT と同様一つの PMT が 8 cm 口径と小型 PMT である。検出器外面を覆うように取り付けられるが、タンクを覆う被覆率は ID PMT などの内部の状況よりも低い。なるべくチェレンコフ光の検出効率を上げるため、OD PMT には WLS(Wavelength-shifting) プレートが取り付けられる。図 8 のように、PMT の光電面の大きさに合わせて穴が開けられた 30 センチ角のプラスチックプレートが 8 cm 口径の PMT 光電面に取り付けられる。主に紫外領域の光子がスペクトル対象となりチェレンコフ光子を捕獲して、より長い波長にして再放出させる役割がある。これにより、検出効率を向上することができる。

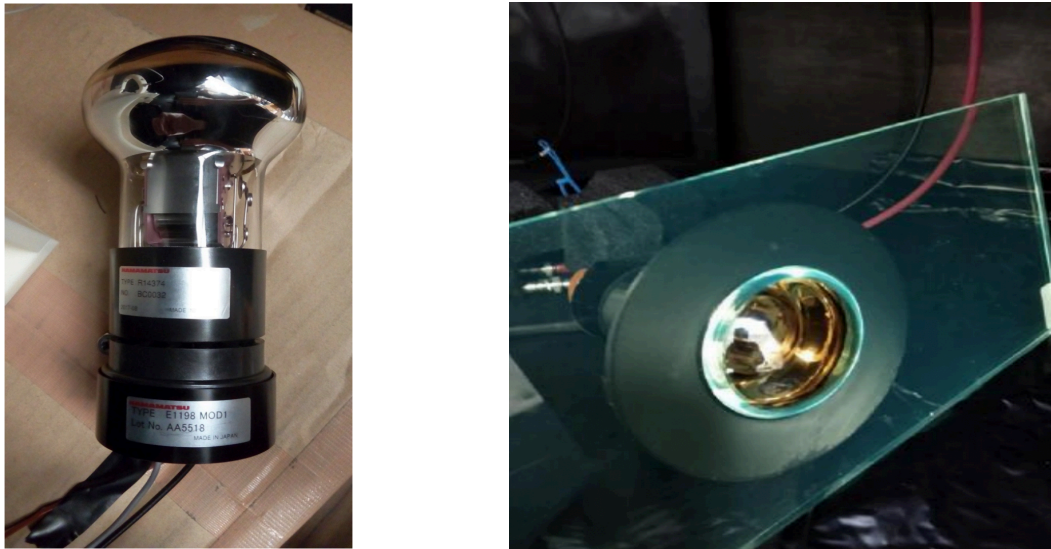


図8 左:8 cm口径の OD PMT、右:WLS プレート。

HKで観測する物理事象は、タンクの内部の事象と外部からやってくる事象で観測したいものが異なってくる。どの方向から来たものかによって信号が区別されており、ニュートリノ事象などはタンクでの振る舞いによってイベントの種類が区別される。例えば Partially Contained では、タンク内にバーテックスがあるがその後粒子が外に抜けていっているイベントであり、ニュートリノ事象が外水槽に到達したかどうかを判別できる。また、外側からの宇宙線ミュオンなども検知して、その事象を排除することができる。これらの事象判別で OD PMT は、重要な役割を果たす。

2.3.4 ブラックシート、PMT カバー

HKのタンク内は、SKと同じように水槽内で発生した光の反射や透過をなるべく抑えるため、図9のようにPMTとPMTの間を埋めるようにブラックシートが取り付けられる。タンクを覆うPMT被覆率は20%であり、ブラックシートが占める割合は残りの80%となる。ミュオンは、電子のリングのようなシャワーが起こらないためチェレンコフリングは鮮明に見えるが、光の反射が起こるとリングがぼやけてしまう。また、光が透過してしまうと事象再構成される時のエネルギー分解能が悪くなってしまう。そのため、ブラックシートは低反射で低透過なものを使う必要がある。

PMTは水中下で使用されるがガラス管が圧力の影響で壊れないように、耐水圧特性は0.95 MPa(約9.4気圧)という高い特性になっている。そして、何らかの影響により一部のPMTが破損した際にも、他に影響を及ぼさないようにカバーが取り付けられる。

2001年11月には、SKの装置内部でPMTの破損事故が起きた。一つのPMTが破損した影響で周囲のPMTにも衝撃波が伝わり、連鎖反応で数十秒間の内に約60%ものPMTが破壊された。このような連鎖反応の事故が起こらないように、タンクへPMTが取り付けられる際には全PMTにカバーの取り付けが行われる。

PMTカバーは、アクリルカバーとステンレスカバーの2つのパーツからなる。図10で示すようにPMTの光電面側にはアクリルカバー、PMTのボトム側にはステンレスカバーが取り付けられる。アクリルカバーには側面や中央部に穴を開け、カバー内部に空気が入らないような構造となっ

ている。また、PMT カバーの高さなどによりブラックシートの設置位置なども変わってくる。



図9 PMT 架構への PMT の取り付け状態。PMT 間にブラックシートが取り付けられている。



図10 アクリルカバーとステンレスカバーを取り付けた状態での PMT。

2.3.5 磁気補償

HK の観測は、SK と同じように検出器周辺の地磁気を磁場補償コイルを用いて磁場を打ち消した状態で行われる。タンク内の磁場は、なるべく HK PMT の許容磁場である ± 100 mG 以内にして低い磁場で観測できるようにコイル設計が行われている。

ここで示すのは、これまでに検討されてきた水タンクの大きさが横 74 m × 縦 60 m の横長の古いバージョンで見積もられていたものであり、現在想定されているシミュレーションの結果である。今現在もさまざまな議論がなされ、今後も最適化される予定である。

図 11 には、HK タンクに対する 3 軸の定義であり、X、Y、Z 軸がそれぞれ定義されている。Z 軸は水槽の中心を原点にとるのではなく、PMT 架構を中心に取り PMT のトップとボトム的位置が上下で対称になるように定義される。

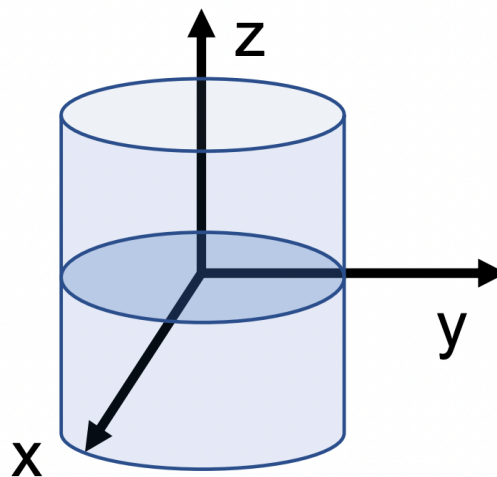


図 11 タンク座標の定義。

HK 建設地での地磁気はまだ実測されていないが、緯度と経度から計算上での水平成分と鉛直成分の大きさは -303 と -366 mG である。シミュレーションでは、PMT の本数は約 4 万本で、コイルの太さは導体部外径が 7.8 mm、絶縁体外径が 11.5 mm と仮定されて行われてきた。図 12 のタンクの X 軸に沿った長方形のコイルと Z 軸に沿った円形のコイルが設置される。

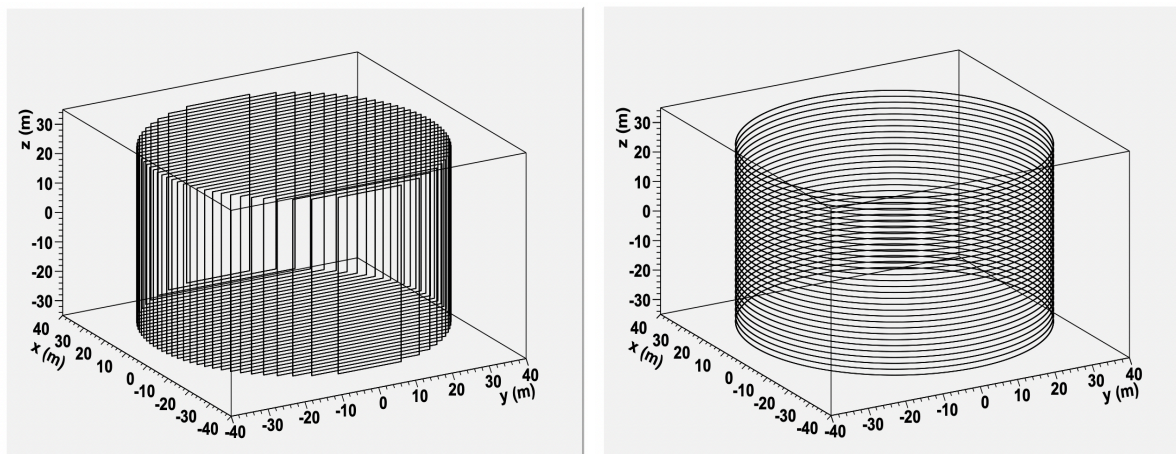


図 12 。タンクに巻かれるコイル。左: タンクに水平方向のコイル、右: タンクの鉛直方向のコイル。.[5]

コイルの電流は、水平電流を 67 A、鉛直電流を 60 A、コイルの巻き数を 7 とした時が、鉛直方向の磁場を一番抑えられることが調査の結果分かっており、97.8% の ID PMT の鉛直方向の磁場を 100 mG 以下に低減することができる。図 13 は、その時の分布となっている。平均で 52 mG の残留磁場が残るとされており、磁場の要求値 ± 100 mG を超えたものの割合が 2.2% となっている。

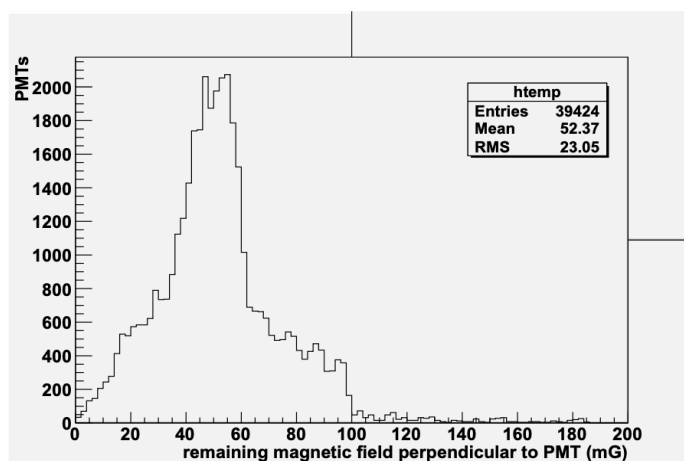


図 13 最適電流を流した時の ID PMT の鉛直方向の磁場分布。[5]

また、タンク内の磁場はコイルの間隔によっても変化する。図 14 のシミュレーションでは、コイル間隔が 5 m、4 m、2 m 間隔にコイルを設置した時の磁場の向きを矢印で示している。間隔が狭くなるほどタンク内の磁場の向きを揃えることができ、特にコイル周辺の磁場の向きを改善することができる。SK ではコイルの設置間隔は 4 m である。HK でコイルの設置間隔を最適化するかについては現在検討中である。

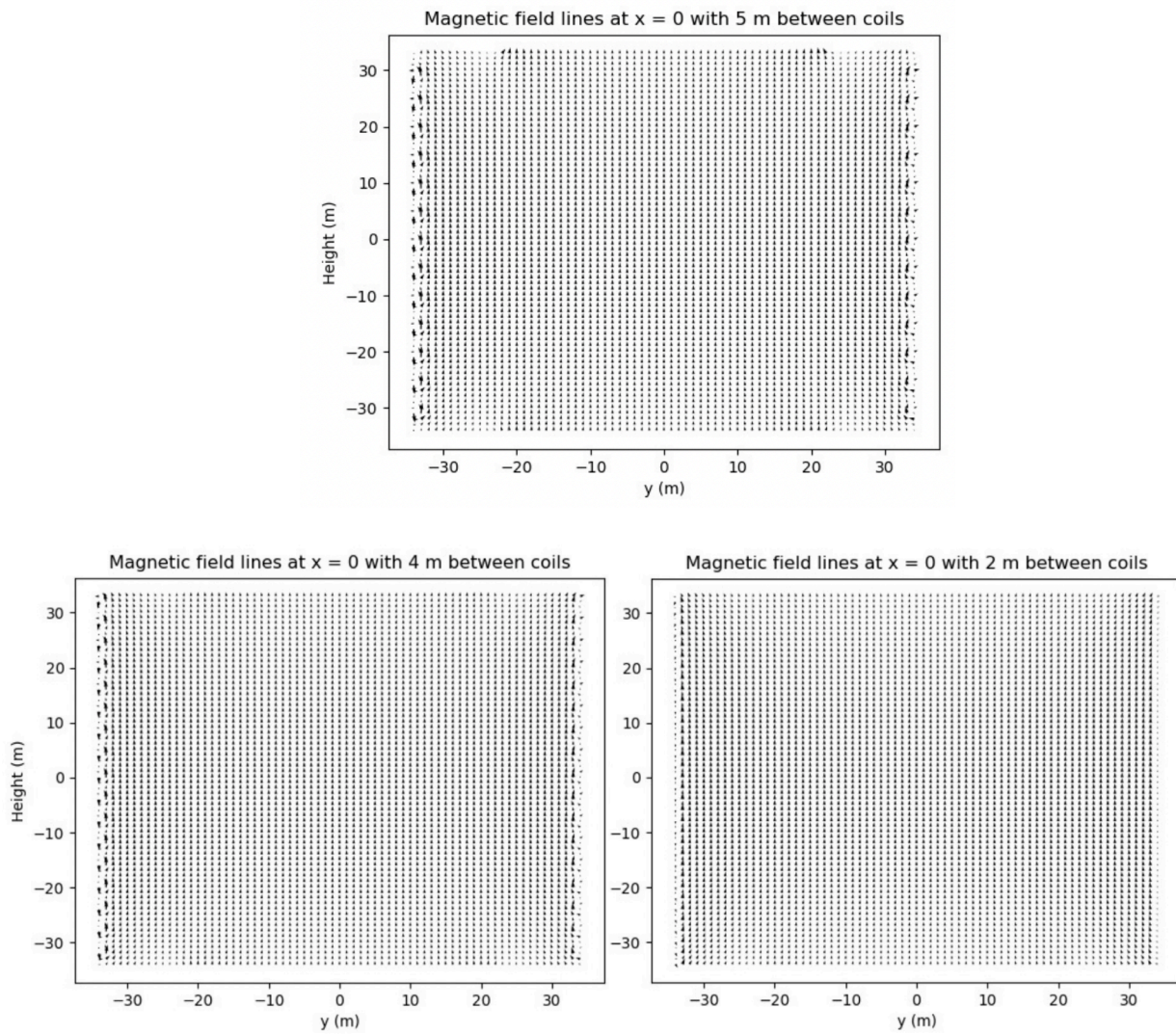


図 14 コイルの設置間隔でタンク内磁場の向きが影響を受ける様子。上段図: 5 m 間隔、下段左図: 4 m 間隔、下段右図: 2 m 間隔。コイル間隔が狭くなるほど $y = \pm 35$ m 付近の磁場の向きが改善されており、4 m と 2 m は、5 m と比べて Height=35 m 付近の磁場の向きも改善されている。

2.4 Physics

HK では、陽子崩壊、CP 対称性の破れ、ニュートリノの質量階層性の決定や太陽ニュートリノ、超新星背景ニュートリノの探索など幅広い物理事象の観測が行われる。ここでは、HK の主目的である陽子崩壊について説明する。

2.4.1 陽子崩壊

自然界には電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用、重力相互作用の 4 つの相互作用が存在していることが、今日の素粒子物理学で知られている。素粒子標準理論では、ワインバーグとサラムによってゲージ対称性 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ を用いて電弱統一理論が提唱されて、電磁相互作用と弱い相互作用の統一がなされた。そして、この電弱統一理論に加え電磁相互作用と弱い相互作用と強い相互作用の 3 つをまとめたゲージ対称性 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ が標準理論とされており、物理事象も多くのことが説明できる。しかし、3 つの相互作用のことを完全に説明することはできず、例えば陽子と電子の電荷が絶対値をとると何故 e で等しいのかなどといった基本的な問題に対して答えが出せていないため、この標準理論を超えたさらに大きなゲージ対称性の予言がされている。この有力な理論として大統一理論がある。大統一理論は様々なモデルが提唱されているが、ここでは主に HK で観測が期待されている二つのモデルについて説明する。

1 つ目が、1974 年にジョージアイとグラショウによって提案された $SU(5)$ model で大統一理論の中で最もシンプルに記述されるゲージ対称性である。[1] フェルミオンが以下のように $\mathbf{5}$ と $\mathbf{10}$ に割り当てられ、クォーク u, d とレプトン e, ν 場が統一的に扱われる。

$$\mathbf{5} = \begin{pmatrix} d_1^c \\ d_2^c \\ d_3^c \\ e \\ -\nu_e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{10} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & u_3^c & -u_2^c & u_1 & d_1 \\ -u_3^c & 0 & u_1^c & u_2 & d_2 \\ u_2^c & -u_1^c & 0 & u_3 & d_3 \\ -u_1 & -u_2 & -u_3 & 0 & e^c \\ -d_1 & -d_2 & -d_3 & -e^c & 0 \end{pmatrix} \quad (2.4.1)$$

そして、この $SU(5)$ は随伴表現で独立な 24 成分から

$$\mathbf{24} = \begin{pmatrix} G_1^1 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_2^1 & G_3^1 & \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 \\ G_1^2 & G_2^2 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_3^2 & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 \\ G_1^3 & G_2^3 & G_3^3 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & \bar{X}_3 & \bar{Y}_3 \\ X^1 & X^2 & X^3 & \frac{W^3}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} & W^+ \\ Y^1 & Y^2 & Y^3 & W^- & -\frac{W^2}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} \end{pmatrix} \quad (2.4.2)$$

と表せられる。 G は $SU(3)$ ゲージ場、 W^\pm, W^3 は $SU(2)$ ゲージ場、 B は $U(1)$ ゲージ場であり、 X, Y はクォークとレプトンを交換する新しいゲージボソンである。

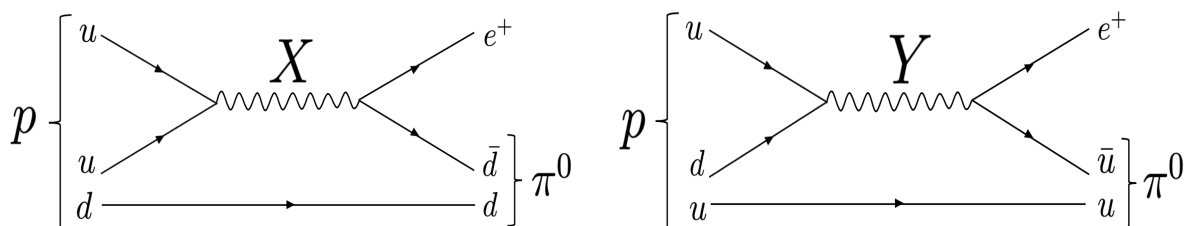


図 15 X、Y ボソンが媒介する $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊のファインマンダイアグラム。左: X ボソン過程、右: Y ボソン過程。

図 15 では、この陽子崩壊モデルの主な崩壊パターンの $p \rightarrow e^+ \pi^0$ を示しており、陽子が崩壊して X、Y ボソンを介して陽電子 e^+ とパイ中間子 π^0 に崩壊して、クォークがレプトンへ変換していくことが予言されている。陽子が崩壊した後の π^0 はすぐに 2 つの光子に崩壊するため、HK の検出器では e^+ と 2 光子の計 3 つのチェレンコフ光のリングが観測される。そして、実際の陽子崩壊探索ではこれらの粒子の終状態からチェレンコフリングの個数や発生させた粒子の種類的事象選択、不変質量を再構成することができる。図 16 に HK のシミュレーションにおける陽子の全運動量と不変質量の分布を示す。崩壊信号が陽子質量付近でピークとなって見られる。

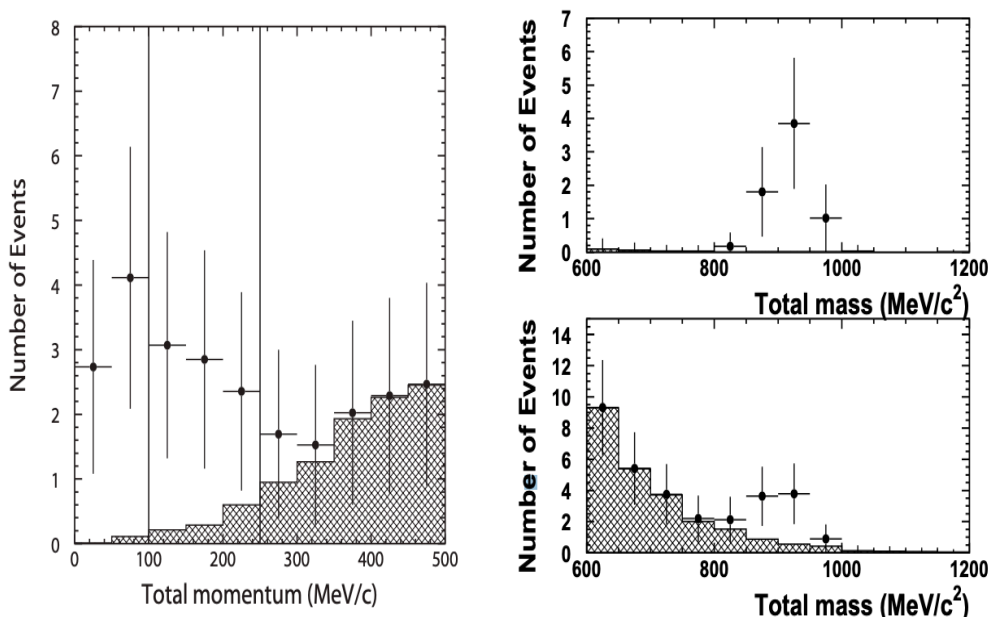


図 16 HK で 10 年間の観測がされた時に期待される $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 過程の分布。左: $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の事象選択条件を通過したイベントの全運動量分布。右上段: 陽子の運動量が 100 MeV/c 未満の領域とした時確認される信号 (自由陽子の領域)、右下段: 陽子の運動量が 100 ~ 250 MeV/c の領域とした時確認される信号 (酸素原子核中でフェルミ運動量を持つ陽子を考慮した時の領域)。点は期待される陽子崩壊信号。網掛けは大気ニュートリノによるバックグラウンドである。ここでの陽子の寿命は、 1.7×10^{34} 年と仮定されている。[5]

2 つ目が SUSY SU(5) model である。このモデルは SU(5) のモデルに新たに超対称性 (Supersymmetry: SUSY) を取り入れたモデルになっている。SUSY で登場する粒子は、素粒子標準理論

での粒子の質量と電荷は等しいがスピンの1/2ずれている性質を持つとされている。

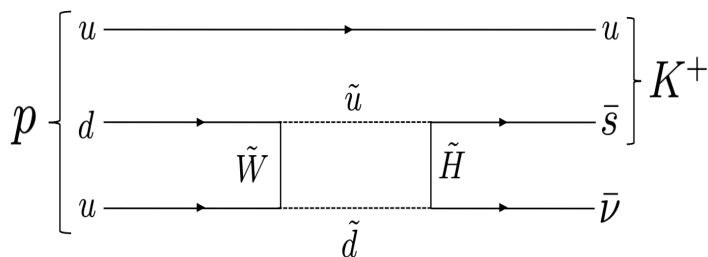


図 17 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 崩壊のファインマンダイアグラム。

図 17 は、SUSY SU(5) で陽子が崩壊する過程であり、SUSY 粒子が相互作用を媒介して K^+ と $\bar{\nu}$ に崩壊することを予言しているダイアグラムである。ここでの媒介粒子は、 \tilde{u} はアップスクォーク、 \tilde{d} はダウンスクォーク、 \tilde{W} はウィーノ、 \tilde{H} はヒッグシーノと呼ばれ、標準理論での u 、 d 、 W 、 H の粒子と超対称性変換でペアとなる粒子である。

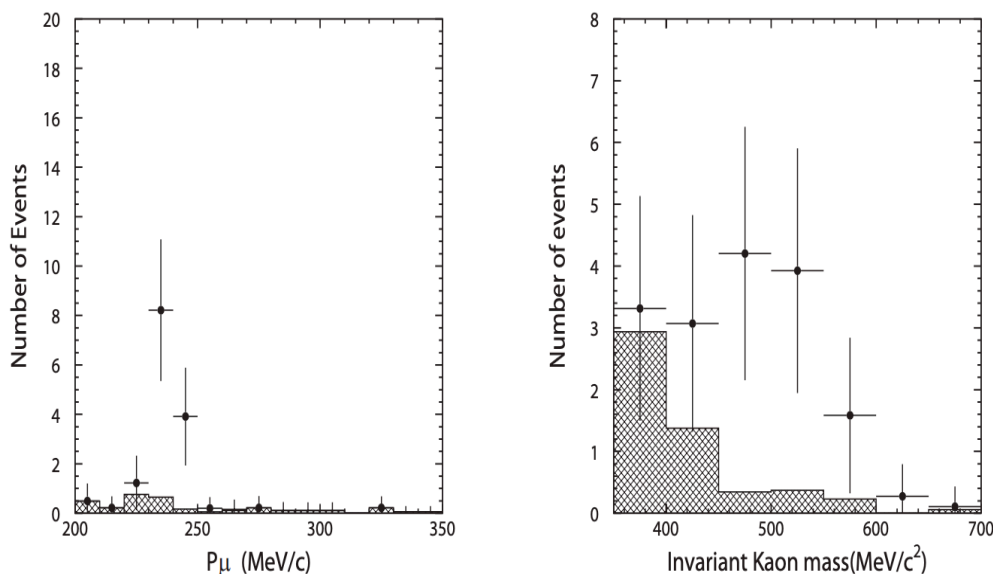


図 18 HK で 10 年間の観測がされた時に期待される $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 過程の分布。左: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ の先行ガンマ線の探索で確認されたミュオンに対しての再構成された運動量分布。右上段: 候補事象で再構成された K の不変質量。点は期待される陽子崩壊信号。網掛けが大気ニュートリノによるバックグラウンド。ここでの陽子の寿命は、 6.6×10^{33} 年と仮定されている。[5]

図 18 では、 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 過程の全運動量と不変質量を示す。終状態において K^+ は生成されるが運動量がチェレンコフ閾値以下であるので検出器で観測することはできなく、ニュートリノも観測されない。したがって、 K^+ が崩壊した後の崩壊生成物によって信号は識別されていく。 K^+ は主に $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ の崩壊へと 64%、 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ の崩壊へと 21% の確率で崩壊していき、生成される荷電粒子を捉える。これらは、2 体崩壊であるため放出される粒子は単一の運動量を持つ。また、崩壊後の原子核の脱励起によって放出される 6 MeV のガンマ線を捉えることによりバックグ

ラウンド事象を識別できる。この脱励起現象と K^+ の約 12 ns の崩壊の信号識別をしていく必要がある。HK の PMT は時間分解能が 2 倍に向上しているため、このガンマ線の検出効率が向上する。

また、以下の図 19 では、SU(5) model と SUSY SU(5) model で予言される相互作用の結合のエネルギースケールを示す。

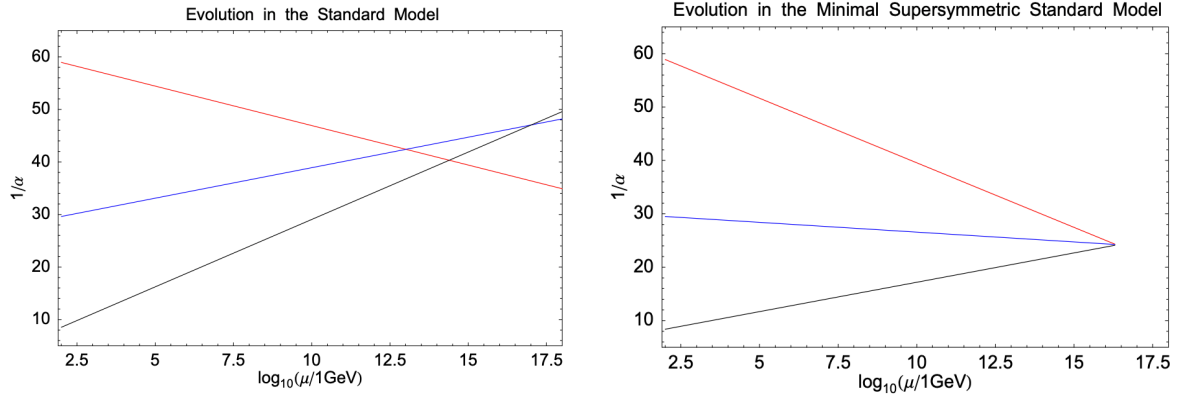


図 19 。左: SU(5) model で予言される相互作用の結合領域、右: SUSY SU(5) model で予言される相互作用の結合領域。[4]

図 20 は、HK で予想される陽子崩壊寿命である。 $p \rightarrow e^+\pi^0$ の崩壊過程では、陽子が崩壊する寿命を $\tau < 6 \times 10^{34}$ 年 とすると 10 年間の観測において 3σ で発見することができる。また、 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ の崩壊過程では、崩壊寿命を $\tau < 2 \times 10^{34}$ 年 とすると 10 年間の観測において 3σ で発見することができる。

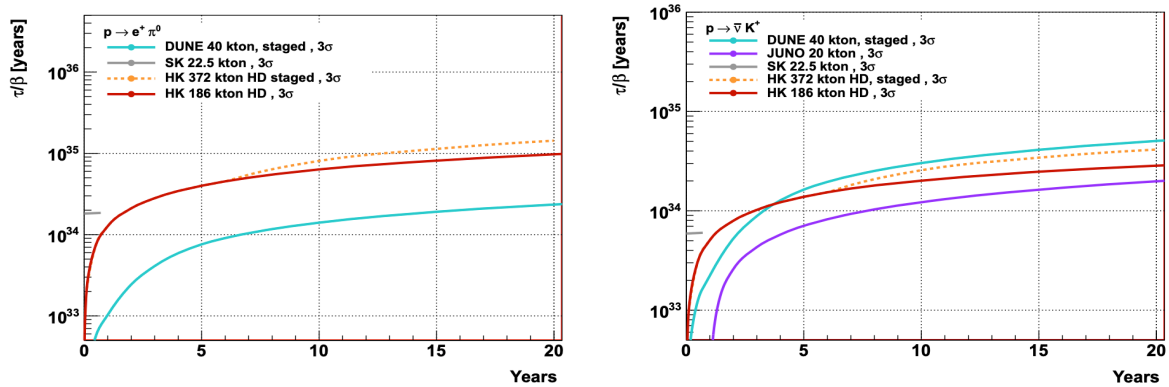


図 20 3σ の優位度で発見できる可能性の比較。左: $p \rightarrow e^+\pi^0$ 、右: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 。赤色: HK、水色: DUNE、紫色: JUNO、灰色: SK。[5]

3 HK B&L PMT

HK B&L PMT が達成された性能、さらに現在実験準備段階である PMT が納入や安定性の測定について説明する。

3.1 性能

SK や HK などの水チェレンコフ検出器では、リング状のチェレンコフ光などが捉えられる。それぞれの PMT に入ってきた光電子の光量や時間情報などをもとに、光の発生点など粒子情報を再構成させる。高精度の観測をするには、検出器の性能が高いことが求められる。

3.1.1 電荷・時間分解能

電荷は、PMT から出力されるアナログ信号が信号積分されてデジタル値に AD 変換されて得られる。光電面に入射してくる光信号由来のものは、光量の度合いにより 1 光電子、2 光電子、3 光電子というように分けられカウントされる。

図 21 では、SK PMT と HK PMT の電荷分布を示しており、Charge が 0 のところには 0 光電子のペダスタル、1 のピーク付近のものは 1 光電子相当にあたる。信号を得る際、光電子がダイノードに入り電子増倍を繰り返すが、その時の増倍率もゲインとして評価することができる。1 光電子量をペダスタルで引き 1 電子の電荷量で割ることにより算出できる。また、1 光電子のピーク値 (Peak) とペダスタルとの間の谷の部分 (Valley) の値との割合である P/V 比が大きいほど、1 光電子に対する検出精度が高くなることを示す。

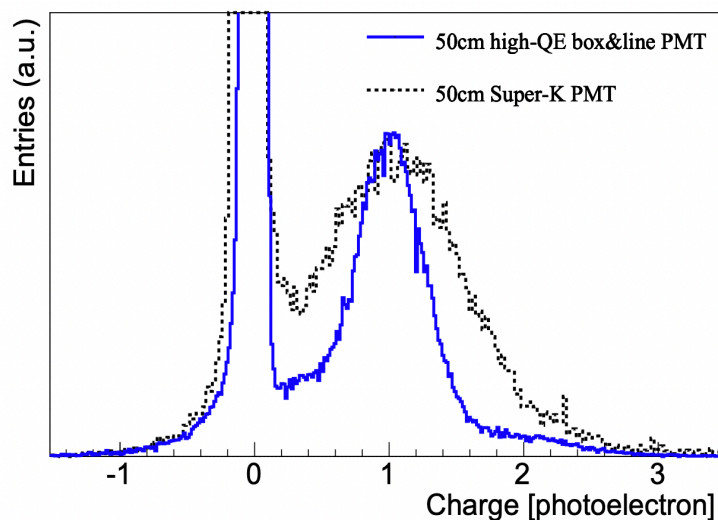


図 21 開発時の SK PMT と HK PMT の電荷分布。[5]

時間分解能は、光子が光電子に変換され検出されるまでの時間応答性についてである。PMT のある信号が得られた時を基準として、光電面に光入射した光電子が出力パルスとして測定されるまでの時間差を電子走行時間 (TT: Transit Time) という。また、光電子に変換されダイノードで増倍した後の電子群の走行時間は各光子によって変わってきて、その走行時間の広がり (TTS: Transit Time Spread) も評価する必要がある。各 PMT から検出される光信号のタイミングから再構成は行われるため重要になってくる。TTS は、ヒストグラムの半値幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) や標準偏差から算出される。図 22 では、SK PMT と HK PMT の比較であり、HK PMT は SK PMT に比べて幅が狭くなり時間分解能が向上している。

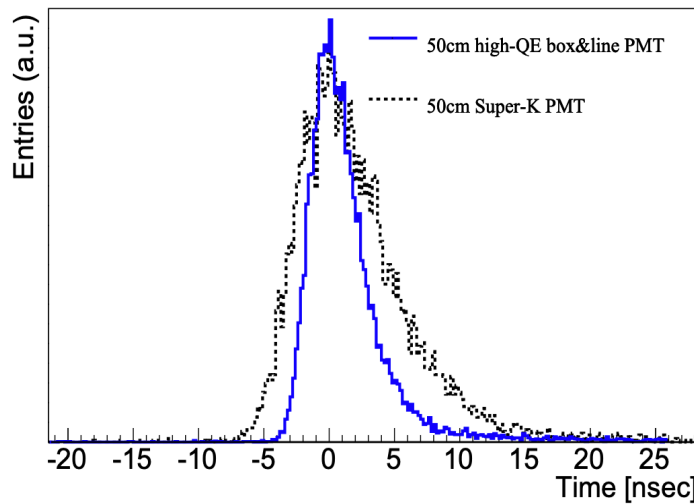


図 22 開発時の SK PMT と HK PMT の電子走行時間。[5]

HK のプロトタイプのパMT は、2018 年に SK 内に 100 本以上の PMT が取り付けられて性能の評価が行われた。図 23 は、SK PMT と HK PMT と比較したものである。電荷分解能の 1 光電子ピークの広がりには $27\pm 4\%$ に向上している。SK PMT は $54\pm 9\%$ であるがピークが 2 つ見えるのは SK-II と SK-III の PMT で同じゲインを出すための HV がずれており、電荷分解能に違いとして現れている。また、時間分解能の TTS は 1.5 ± 0.07 ns へ 2 倍に向上している。

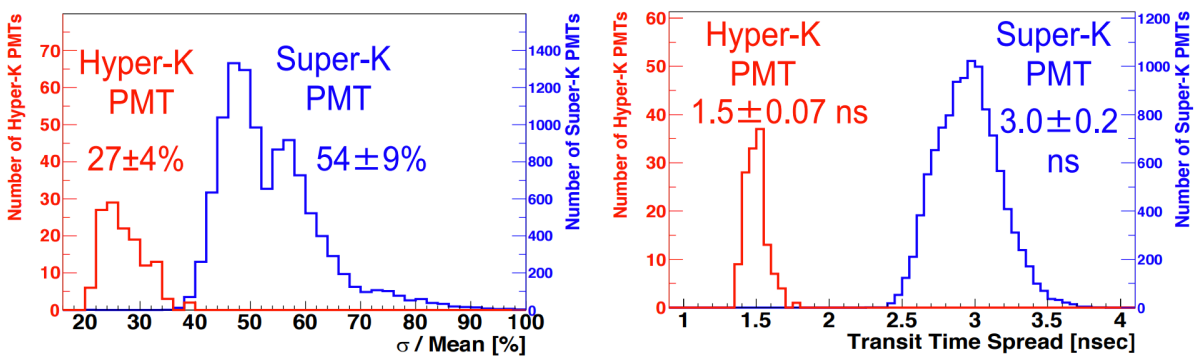


図 23 SK 内で評価された SK PMT と HK PMT の 1 光電子分解能の分布。左: 電荷分解能、右: 時間分解能。[6]

3.1.2 ダークレート

光検出器では、外部から光が入射して検出されるが、実際にはそれだけではなく光が入射していない時でも、電流がわずかに流れ擬似信号としてダークノイズが検出される。このダークノイズの頻度をダークレートという。主な要因は光電面やダイノードから放出される熱電子や宇宙線などがある。特に PMT のガラス材料には ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K などの放射性同位元素が混入しており、ガラスからシンチレーション光が放出されダークレートが生じる。

ガラス発光には、放射線成分以外にも PMT の周囲の電位の影響によってもダークレートが増加することがある。光電面の表面やガラス自体などの導体表面に強い電界が加わることで表面のポテンシャルエネルギーが低下して、熱電子が放出しやすくなりその結果ダークレートが増加する。また、ガラス管内の電極間やピン間のリーク電流、残留ガスのイオン化なども要因となる。

その他にも、PMT の光電面やダイノードは仕事関数の低い物質でできているため、常温での測定時でも熱電子などの放出率が高くなり温度変化がダークレートに影響を及ぼすことがある。

このダークレートの温度による性質は、Richardson-Dushman の式を用いて以下のように与えられる。

$$I = AT^{5/4}e^{-e\psi/k_B T} \quad (3.1.1)$$

I は熱電子放出による電流、 A は定数、 T は絶対温度、 e は電子の電荷、 ψ は仕事関数、 k_B はボルツマン定数である。この式により、電子放出は温度と仕事関数の大きさ (光電面の材料) によって熱電子の放出量は決定する。

3.1.3 検出効率

チェレンコフ光などの光は、光電面で光電子に変換されダイノードで増倍され信号検出されるが、光電面に入ってくる光を 100% 全て光信号にとして得られる訳ではない。この検出される時の光子が光電子に変換され信号で検出される割合を検出効率という。検出効率 (Detection Efficiency) は、量子効率 (Quantum Efficiency: QE) と収集効率 (Collection Efficiency: CE) の 2 つの効率からなっており

$$\text{検出効率} = \text{量子効率} \times \text{収集効率} \quad (3.1.2)$$

で計算することができる。

量子効率は、光電面に入ってくる入射光子が光電面で放出される光電子にどのくらい変換されるかの割合であり、

$$\text{量子効率} = \frac{\text{光電面から放出される光電子数}}{\text{光電面へ入射する光子数}} \quad (3.1.3)$$

で計算することができる。これは、光電面に入ってくる光の波長に大きく依存する。

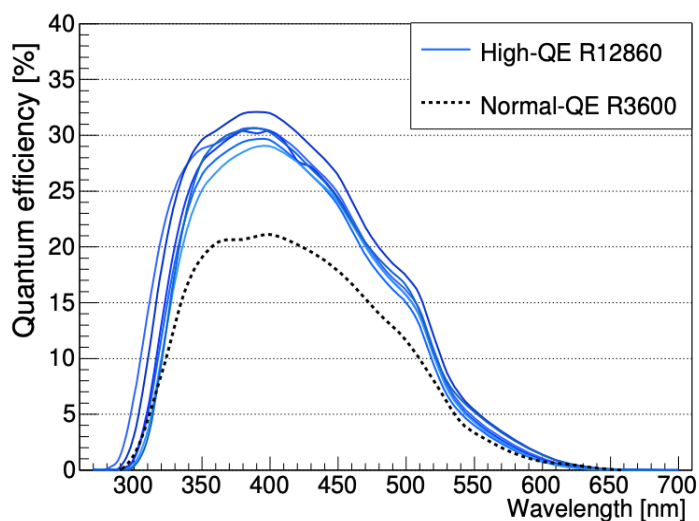


図 24 量子効率、青色: 高量子効率 (HQE) 化された HK PMT、黒色破線: SK で使用されている PMT。[5]

図 24 は、波長に対する量子効率を表している。PMT 感度の波長領域は、300 ~ 650 nm 程度で SK PMT と HK PMT で分布はあまり変わっていないが、量子効率のピーク値は波長の 400 nm 付近で最大値は 22%(SK PMT) から 33%(HK PMT) に 1.5 倍向上している。

収集効率は、光電子に変換された後信号検出されるまでの電子の捕獲割合である。収集効率が低下する要因は複数あるが、そのうちの一つに PMT にかかっている電場や周辺磁場の影響がある。50 cm 口径の PMT は大口径のため光電面からダイノードまでの距離が長い。そのため PMT 内部に電場や磁場が存在すると光電子は、ダイノードへ到達するまでにローレンツ力の効果で電子が加速したり軌道が曲げられる。図 25 は、磁場で電子軌道が曲げられて第一ダイノードに入らなかったり、第一ダイノードを飛ばして第二ダイノードへ入って収集効率が落ちる様子である。HK PMT のダイノード構造は、B&L 型で非対称な形をしておりその影響も収集効率に影響を及ぼす。図 26 には、SK PMT と HK PMT の収集効率の磁場依存性を示す。

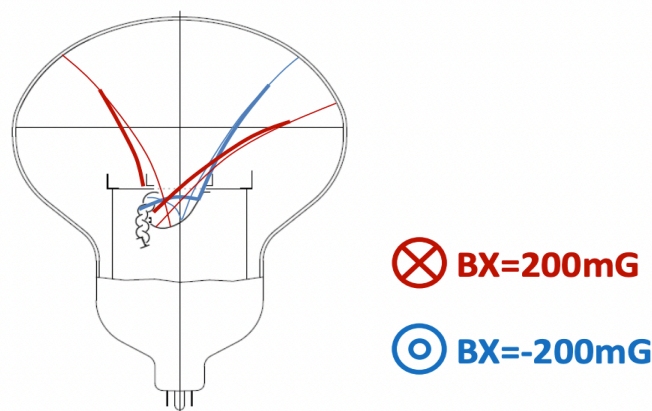


図 25 磁場をかけた際の電子軌道 (X 軸成分の磁場時)。細い線が 0 mG の無磁場時の軌道を示している。太い線が磁場をかけた時どのように軌道が変化しているかを示している。(浜松ホトニクス社提供)

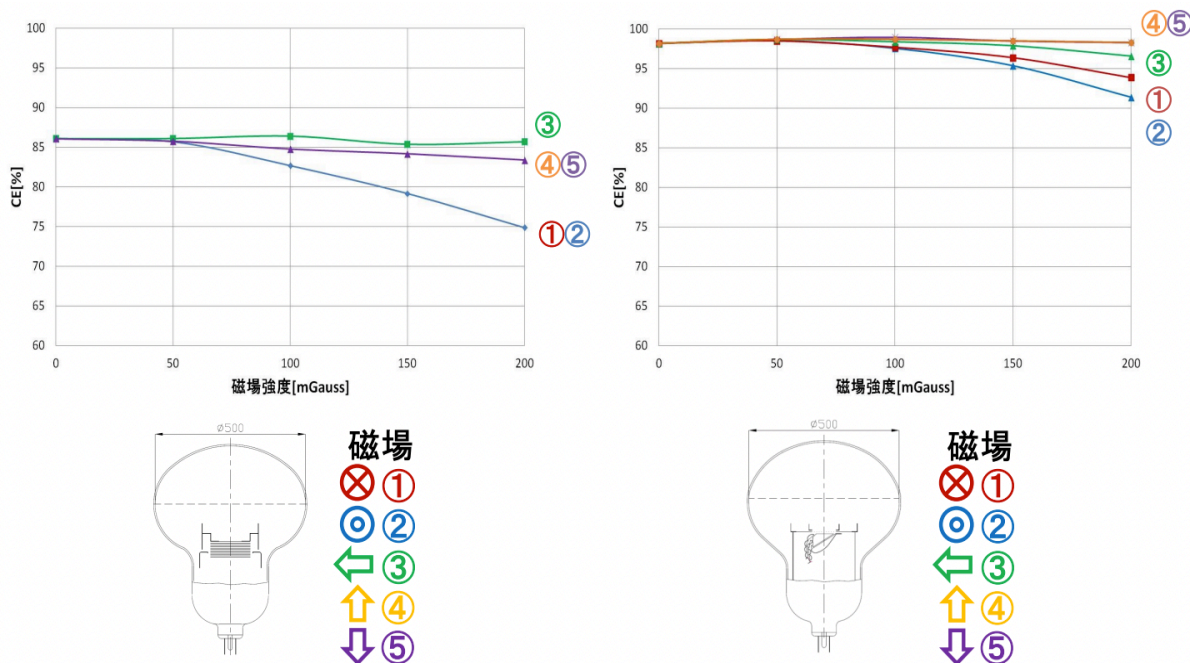


図 26 磁場に対する相対収集効率。左: SK PMT(R3600)、右: HK PMT(R12860)。磁場の方向は、下の PMT のダイノード配置図で決まっており① - ⑤で対応している。(浜松ホトニクス社提供)

表 2 図 26 の値。左: SK PMT(R3600)、右: HK PMT(R12860)。(浜松ホトニクス社提供)

	磁場方向	磁場強度 [mGauss]				
		0	50	100	150	200
CE(%)	①	86.1	85.7	82.7	79.2	74.9
	②	86.1	85.7	82.7	79.2	74.9
	③	86.1	86.1	86.4	85.4	85.7
	④	86.1	85.8	94.8	84.2	83.4
	⑤	86.1	85.8	94.8	84.2	83.4

	磁場方向	磁場強度 [mGauss]				
		0	50	100	150	200
CE(%)	①	98.2	98.5	97.7	96.4	93.9
	②	98.2	98.6	97.6	95.4	91.4
	③	98.2	98.7	98.4	97.9	96.6
	④	98.2	98.7	98.7	98.5	98.3
	⑤	98.2	98.7	99.0	98.5	98.3

0 mG 時が無磁場においての測定でほとんど最大値となっており、PMT に磁場がかかるとその影響で光電子軌道が曲げられて収集効率が低下している。

SK PMT の方では、50 mG を過ぎたあたりから①と②で比較的大きな収集効率低下が見られるが、HK PMT では SK PMT に比べて低下率が緩和されている。SK PMT は、無磁場での収集効率が 86.1% であったが、HK PMT では 98.2% に改善しており、12.1% 収集効率が向上した。HK PMT では、±100 mG 付近から収集効率が低下していき、PMT 周辺の残留磁場の許容値が ±100 mG 以内とされている。

これらの量子効率、収集効率から検出効率は計算される。

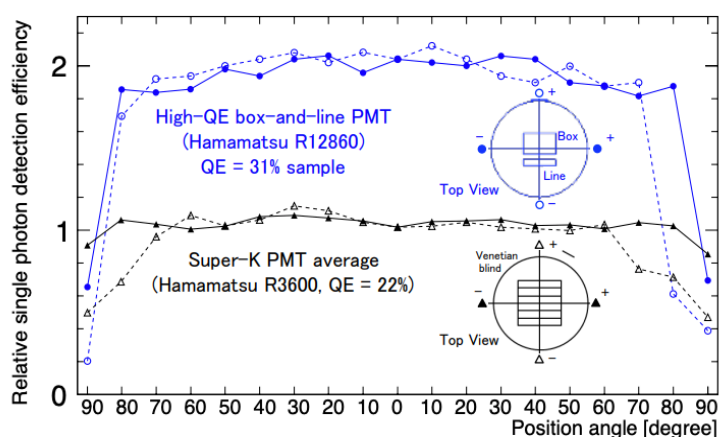


図 27 SK PMT と HK PMT の検出効率。横軸: 受光面上の光入射位置。縦軸: 光検出効率相対比。実線と破線はダイノードに対して 2 方向からの測定である。

図 27 は、SK と HK の PMT の検出効率である。横軸が受光面上の光入射位置を表しており、Position angle が 0° のとき光電面中心直上での光入射を示す。 $\pm 90^\circ$ の範囲で光入射位置を変えて測定している。HK PMT の方は、2 方向において大口径の端まで均一に検出効率を得られており、SK PMT に対して 2 倍に向上している。

3.1.4 ダイノード構造

HK PMT は、SK PMT との一番大きな違いはダイノード構造にある。SK PMT はベネシアンブラインド (Venetian Blind) 型のダイノードを使用している。短冊状の金属板がブラインドのように斜めに並んでいるダイノード配置となっている (図 28 の左)。

一方で、HK PMT では B&L 型のダイノード構造が採用されている。第一ダイノードが大きなボックス型のダイノードとなっており、SK に比べ初段に光電子が当たりやすく収集効率が高くなっている。そして、第二ダイノード以降がライン型で多段のダイノードから構成されて、特に電子軌道のばらつきが小さくなり時間分解能が改善されている。

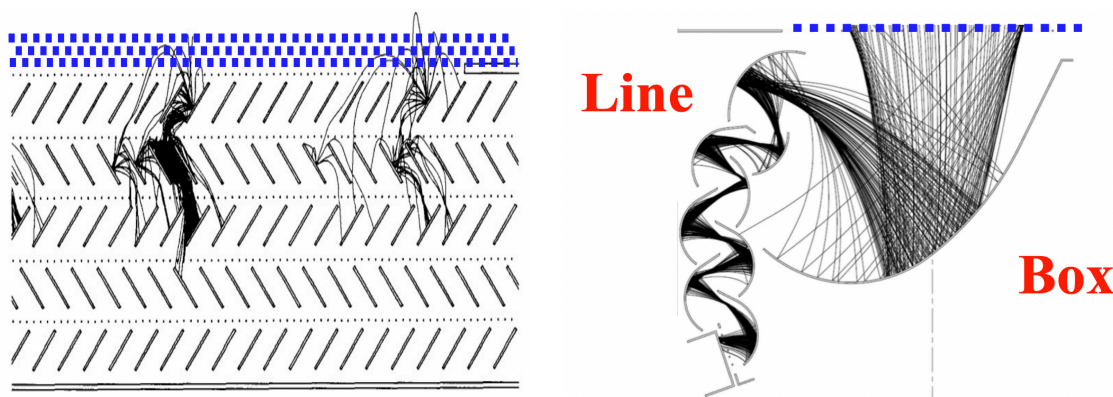


図 28 ダイノード構造。左: R3600 のベネシアンブラインド型 PMT。右: R12860 の B&L 型 PMT。青色破線はダイノード開口部の金属メッシュを表している。

SK PMT のブラインド型のダイノードは、特定の方向からの電子の入射率を良くするため、3 層

の金属メッシュ板をダイノードの前に配置し (図 28 左の青色破線) 電場調整がされており、この 3 層のメッシュ穴の開口率は 79% で、SK PMT の電極構造自体の収集効率は 86% となっている。これらを合わせた実質的な収集効率は 68% となる。HK PMT の B&L PMT は、第一ダイノードが斜めに傾いている。そのため、ダイノードでの非対称電場を避けるため第一ダイノードの開口部に 1 層の金属メッシュが取り付けられており (図 28 右の青色破線) 等電位になるように設計されている。1 層のメッシュ穴における開口率は 97% で、電極構造での収集効率は 98% に向上しており、実質的な収集効率は合わせて 95% と高い効率になっている。

また、ダイノード構造は KamLAND 実験に使用されている 43 cm 径の B&L PMT を元に改良されている。B&L 型は、まず第一ダイノードで電子が収集されて第二、第三ダイノードと続くが、その増倍過程で収集効率が低下するとゲインが悪化する。従って、第一ダイノードの大きさや多段ダイノードの形状も改善されている。

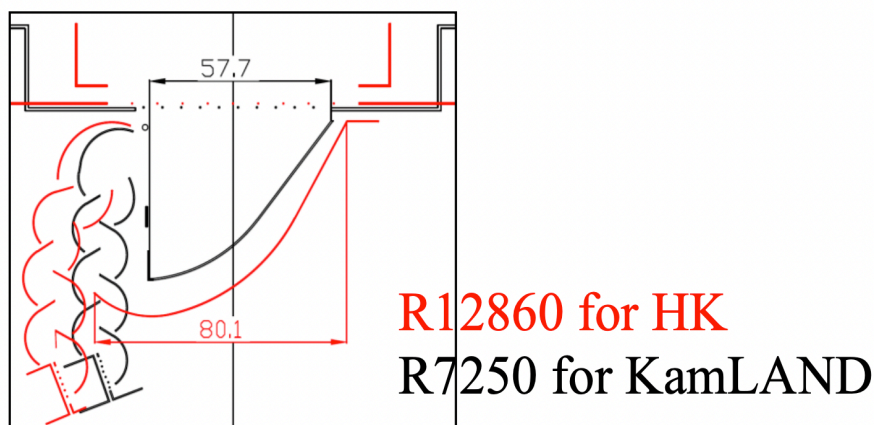


図 29 改良された B&L 型ダイノード。(浜松ホトニクス社提供)

図 29 の改良により、なるべく光電子が第一ダイノードに当たり第二ダイノードへの入射率が向上して、ダイノード間での収集損失が改善されている。この改良によって電子軌道が以下の図 30 ように改善されている。

カムランドの PMT の赤色の線は、光電面から放出された電子が第一ダイノードに当たらず増倍されていない。また、ピンク色の線は、第一ダイノードから第二ダイノードへ入射できていない電子軌道である。HK PMT の濃い青色の線は、ダイノードの改良によって改善した電子軌道である。光電面形状の変更と Acc 電極 (Focus 電極) を追加することによって光電子のダイノードへの収束状態が改善されている。また、Disk 面を光電面に近づけることで周辺の抜け落ちる電子を減らしている。

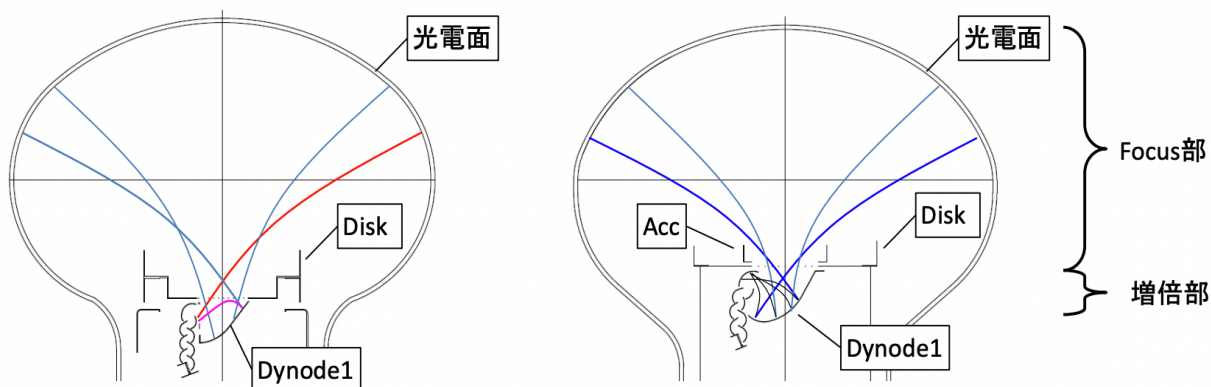


図 30 光電面から放出される電子軌道。左: KamLAND PMT、右: HK PMT。(浜松ホトニクス社提供)

カムランドの PMT では、光の入射位置によって出力分布の違いがあり、入射位置が光電面の端になると出力が低下していた (図 31 の両端)。これもダイノード構造の改良で改善されており、HK PMT ではどの光入射位置でもほぼ一様となっている。

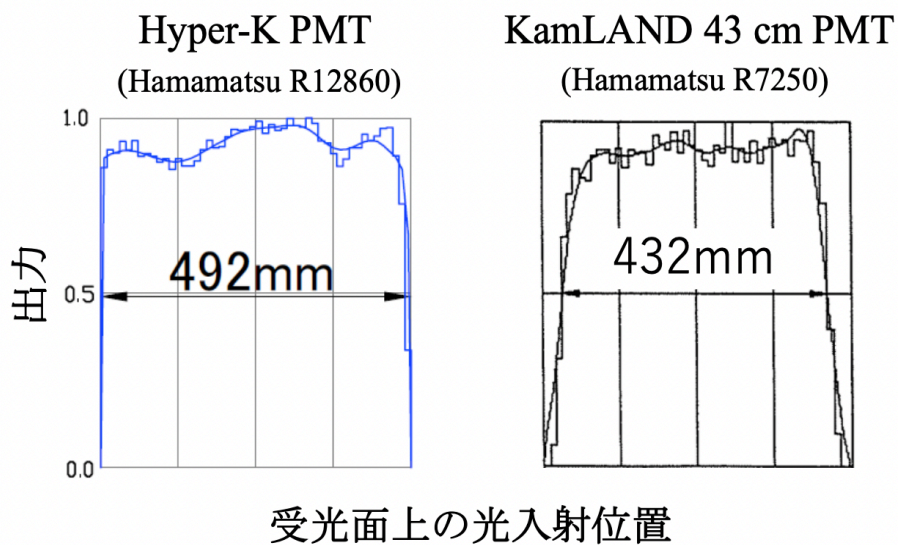


図 31 非一様性の大きいダイノード断面方向での KamLAND と HK PMT のシミュレーションで得た出力一様性の分布。(浜松ホトニクス社提供)

3.2 量産前測定

HK PMT は、PMT を高性能化させる開発が行われ、最終的に HK 測定地への大量生産、納入される前に量産前性能測定が行われた。

PMT が高い性能となっているかを確認するため様々な項目の測定が行われ、柏での量産前測定では、HK PMT の性能基準を満たしダークレートが 4 kHz になる見込みを得た。以下の図 32 に、その時のダークレートの測定結果を示す。

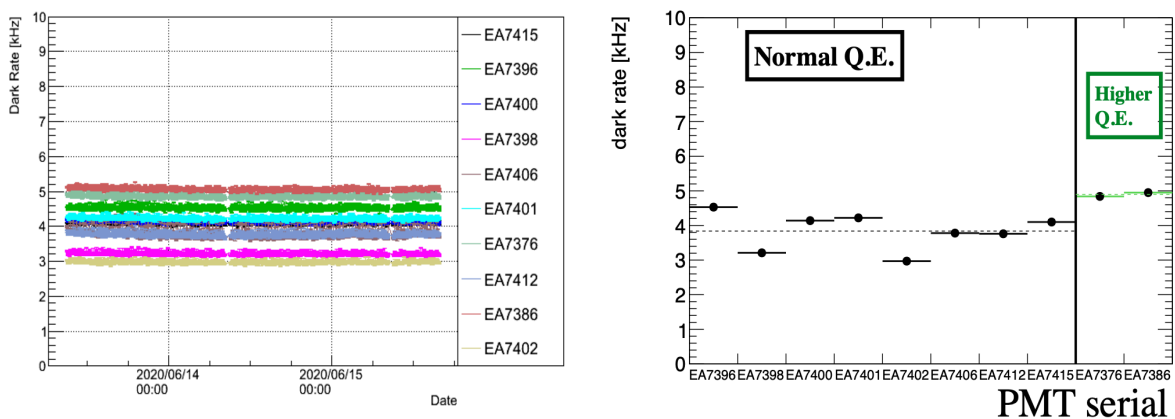


図 32 HK PMT の性能を満たしたダークレート。左: ダークレートの安定性、右: ダークレートの平均値。

3.3 納入

HK PMT は、現在大量生産・納入が行われている。2020 年 10 月に量産が始まり、2021 年 3 月に納入が開始され毎月 300 本が納入されている。現在までに約 3000 本の PMT が納入されている。

最初の約 1000 本は全数検査を行い、詳細な PMT の不良率の検査や性能が浜松ホトニクス仕様を満たしているかを調査する。その後、残りの 10% の PMT で抜き打ち検査が行われる。

3.4 簡易検査

PMT は、製造の過程や運送時に PMT 本体に傷などができる恐れがある。これは、場合によっては PMT 性能に影響を及ぼす可能性がある。そのため、納入されている PMT は受け入れる際に不良品がないかどうかを確認する必要がある。良品 PMT かどうかの判別は、光電面の色や防水部、ケーブル部の損傷がないか、傷や泡異物などが光電面やガラス管内部に入っていないかなど様々な項目によって行われる。

図 33 のように PMT の光電面において傷や泡異物などが混入していないかを mm 単位で調べていく。これらの検査を研究者が PMT 一つずつ目視で確認作業して良品、不良品の判断を行っている。また、信号の確認検査も行われており、図 34 のようにゲインや信号波形が不良なく測定できているかについても簡易的な測定で見られている。

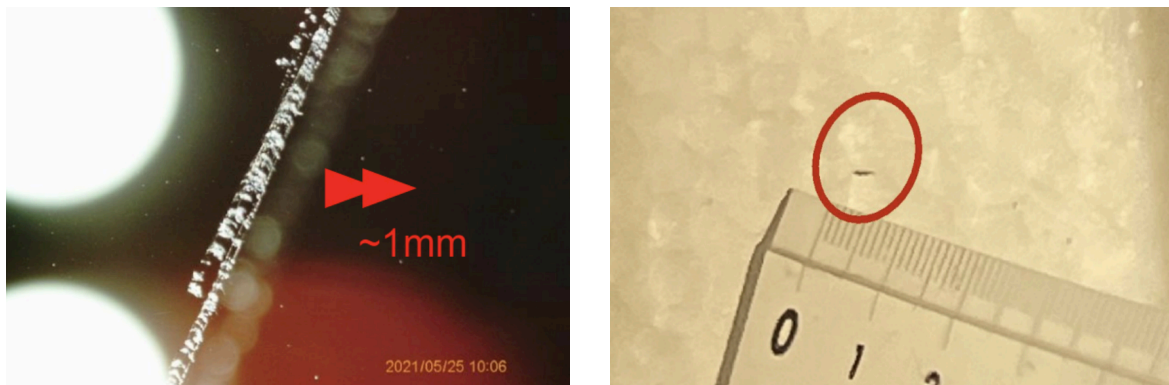


図 33 目視検査。左: 傷の例、右: 異物の例。

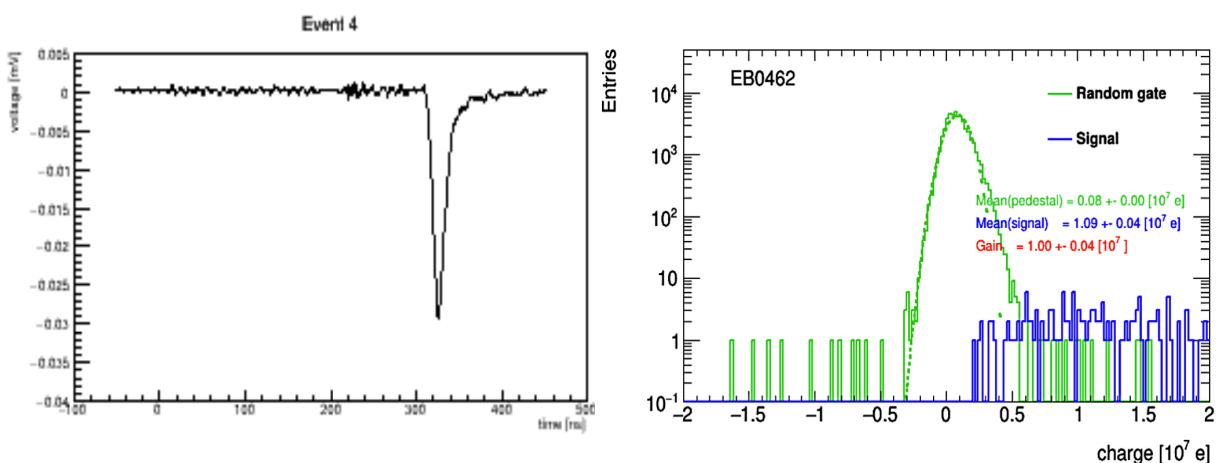


図 34 簡易検査で測定される性能。左: 信号、右: ゲイン。

3.5 長期測定

簡易測定を通過した PMT は、HK の実験開始前の取り付けまで保管される。納入された一部の PMT においては、PMT の性能が仕様を満たしているかを確認するために測定を行う。

HK では、PMT 性能に対する要求値が決められている。以下の表 3 に要求値項目の一部を示す。測定における印加電圧は 1.0×10^7 gain に相当する値で 1600 V 以上 2200 V 未満とし、ダークレート測定についてのパルス幅は 1 μ s、閾値電圧は 1 mV(1/6 光電子相当) とする。

表 3 量産品 PMT の性能要求項目の一部。

	許容値			単位
	(最小)	(標準)	(最大)	
QE(370~420 nm, Peak QE)	30	32	-	%
CE	-	95	-	%
Gain 変動 (1.0×10^7 gain)	-2	-	2	%
PV Ratio	3	3.3	-	-
TTS(1 p.e.)	-	2.5	3.0	ns
After Pulse		4	5	%
Dark Rate	-	6	10	kHz

3.5.1 長期測定セットアップ

長期測定は、以下の図 35 のように、ADC、TDC、Scaler を用いてセットアップを構築している。2つの暗室を設置して各暗室で 8 本の PMT を測定でき計 16 本の測定を行っており、現在まで十数回の長期測定が行われてきた。信号取得の閾値電圧は、1 mV(1/6 光電子相当)、パルス幅は 1 μ s に設定している。暗室内部では、PMT 光電面直上の数十 cm 離れたところから LD 光源により光入射させている。LD 光源の光量は、PMT に入射してくる占有率が約 5 ~ 10% 付近となるように設定している。

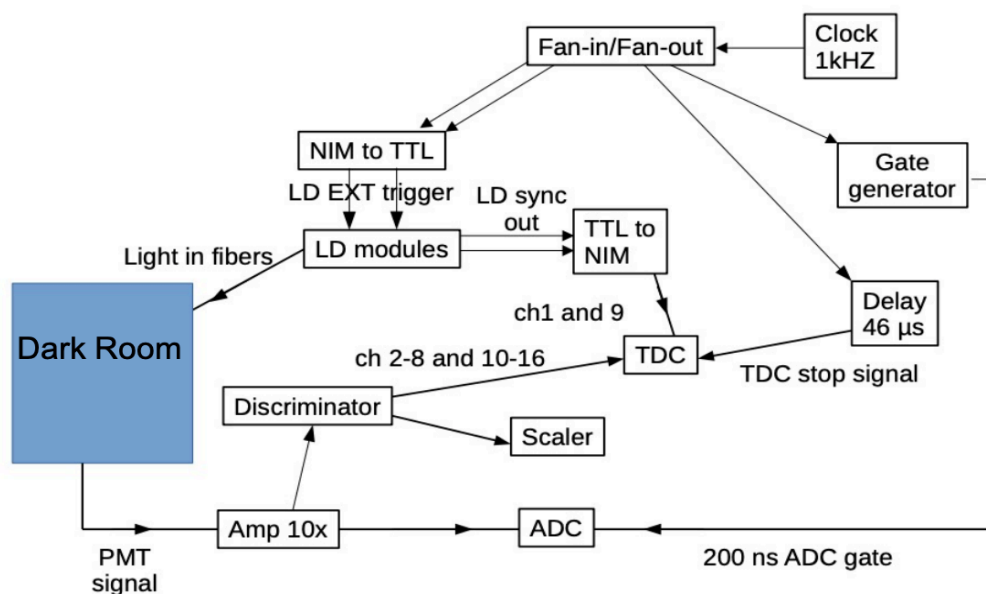


図 35 長期測定のセットアップ。



図 36 長期測定の測定の暗室内における PMT インストール時のセットアップ。

3.5.2 長期測定性能

表 3 の条件に PMT 性能が満たしているかを評価するために PMT1 本に対して約 2 週間程度測定を行っており、主にゲインと電荷分解能、P/V 比と TT、TTS、アフターパルス、ダークレートが測定されている。PMT の印加電圧は、浜松での測定されたゲイン 1.0×10^7 の時の電圧値 (EBB 値) に設定して、その後暗室内の PMT8 本のゲインが 1.0×10^7 付近になるように調節しており、約 1600 ~ 2000 V となっている。また、暗室内の温度もモニターしており、夏季は約 21 ~ 23 °C、冬季は約 12 ~ 17 °C 付近の温度となっている。

表 4 は、これまでの良品 PMT の測定の平均値である。要求項目の標準よりも高めにでているものも見られる。

表 4 長期測定での量産品 PMT の測定値平均。

	Mean	RMS
Gain	1.03×10^7	0.250
Charge Resolution	25.8%	
PV Ratio	4.39	
TTS	2.92 ns	0.539
After Pulse	3.92%	
Dark Rate	7.49 kHz	

長期測定では、PMT 性能の安定性評価測定を行う以前から、精密な測定を行うことができるように測定環境の改良などを行ってきた。以下の図 37 では、測定環境を構築する初期のレート測定である。一旦レートの値が落ち着いているが、途中から 19 kHz から 23 kHz へと上昇しており、高レートで不安定な状態となっている。

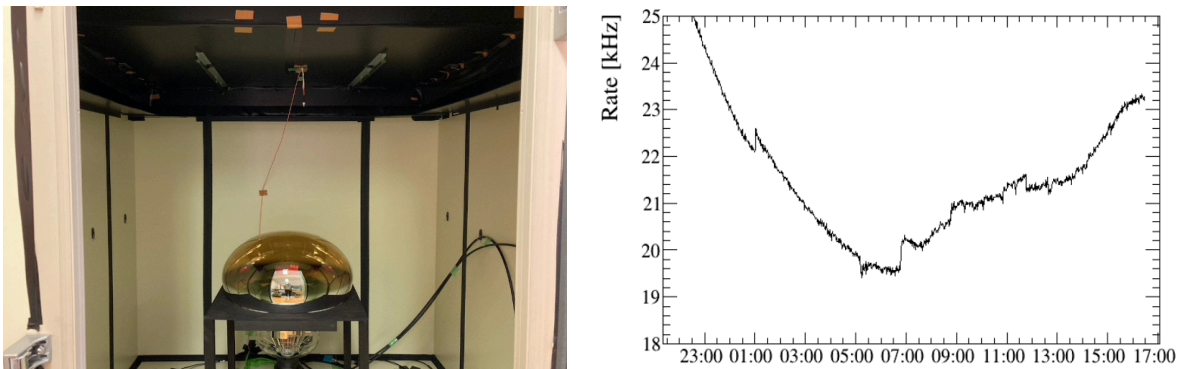


図 37 測定環境を構築する初期のレート測定。左: 測定暗室内の様子、右: レート測定値。

ここから測定環境の改良、ノイズ対策などを行った。そして、ダークレートやその他の評価項目も安定した精度での測定が行えるようになり、現在の長期測定が行われている。以下からは長期測定における結果である。図 38 は、ある 1 期間の測定におけるダークレートの安定性であり、暗室 1、2 でそれぞれ PMT8 本分のデータである。暗室に PMT をインストールしてその直後から測定を開始している。レートが高いところは、インストール作業をした影響で暗室内や PMT 光電面内に光が残っているためであり、測定時間が経過していくと徐々に安定している。

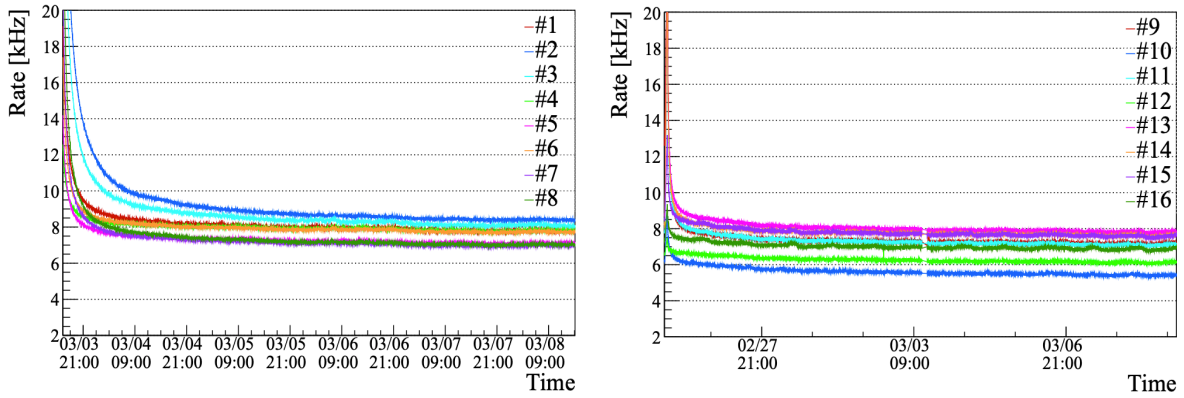


図 38 1 期間分の PMT16 本のダークレートの安定性。左: 暗室 1、右: 暗室 2。

また、図 39 は、1PMT における電荷分解能のゲインと電荷分布をモニターしている。電荷分布は、ペDESTAL と 1 光電子を測定して以下の式 (3.5.1) のガウシアンでフィットしており、そのゲインは 1.0×10^7 付近で緑の点線の $\pm 2\%$ の範囲内で安定している。

$$f(x) = p_0 * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - p_1}{p_2} \right)^2 \right] + p_3 * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - p_4}{p_5} \right)^2 \right] \quad (3.5.1)$$

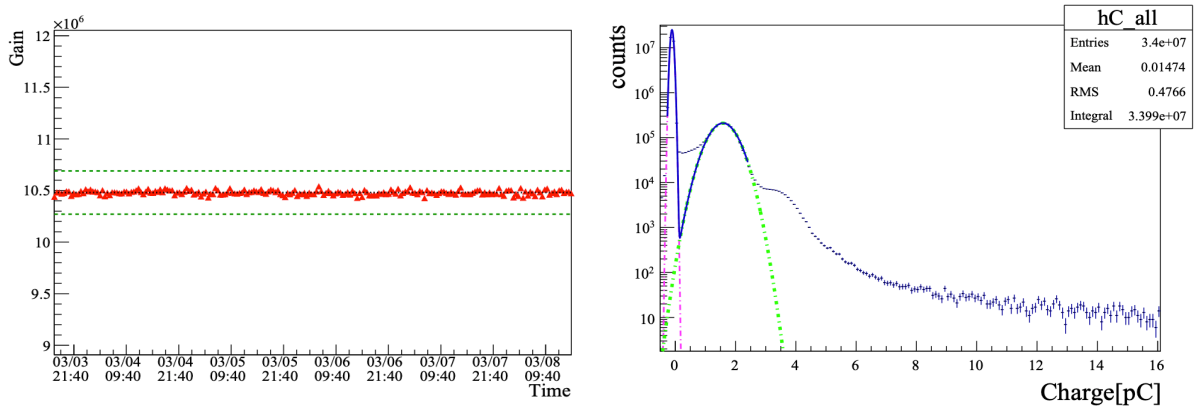


図 39 1PMT における電荷分解能。左: ゲイン、右: 電荷分布。

時間分解能については、LD 光源から光が放出された時間と各 PMT に光が入って検出された時間との差から TT とその走行時間の広がり TTS を算出している。図 40 には、1PMT における TT と TTS を示す。TT のフィッティングは、

$$f(x) = \frac{\lambda}{2} * \exp \left[\frac{\lambda}{2} (2\mu + \lambda\sigma^2 - 2x) \right] * \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu + \lambda\sigma^2 - x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (3.5.2)$$

の関数でフィットを行っている。ここで erfc は誤差関数である。約 320 ns 付近でメインの信号パルスが見えているおり、TTS は 2.75 ns あたりで $\pm 2\%$ の範囲内で安定している。長期測定の TTS(FWHM) は平均約 2.92 ns であるが、許容値標準の 2.5 ns から許容値の最大値 3.0 ns を超えたものも確認されている。

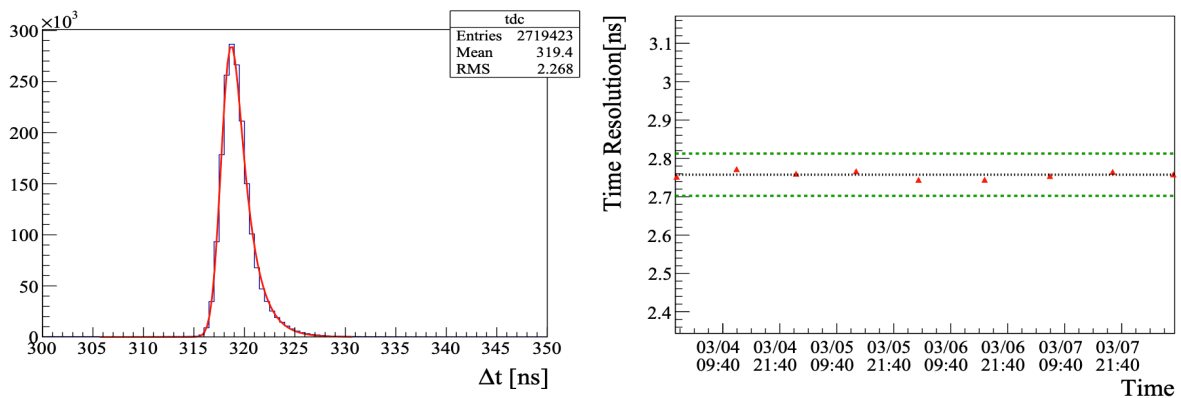


図 40 1PMT における時間分解能。左: TT、右: TTS。

3.6 磁場による影響

現在の量産品 PMT を測定する長期測定のセットアップは、HK の納入場所で測定を行っている。しかし、PMT は磁場の影響を受けるため、長期測定場所周辺の磁場を測定し考慮する必要がある。PMT 測定暗室内の 16 本の PMT の各場所における 3 軸方向の磁場の値を測定した。測定には以下の図 41 のガウスメータを用いて目視で値を測定を行った。PMT 設置台を用いて PMT を設置する高さで中心にガウスメータをセットして X、Y、Z の磁場の値を測定した。



図 41 磁場測定器、TRIAXIAL FLUXGATE MAGNETOMETER FGM-4DTAM。

w/o μ -metal

暗室1			暗室2		
#1 (12, 282, 297)		#2 (-125, 98, 310)	#9 (-79, 205, 797)		#10 (30, 238, 851)
#3 (-1, 268, 49)	#4 (-72, 219, 198)	#5 (-112, 223, 90)	#11 (-4, 210, 724)	#12 (4, 242, 662)	#13 (-33, 245, 661)
#6 (-4, 359, 23)	#7 (-92, 309, 147)	#8 (-54, 337, 144)	#14 (-32, 287, 826)	#15 (35, 284, 649)	#16 (49, 313, 637)

(B_x, B_y, B_z) [mG]

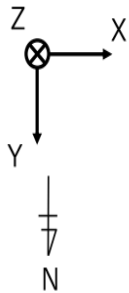


図 42 暗室内部の 16 点における X、Y、Z 軸方向の磁場とその 3 軸方向と方角。

図 42 は、測定された各磁場の値で測定場所周辺では残留磁場が確認された。この何も磁場対策をしていないセットアップをミューメタルなし (w/o μ -metal) セットアップとする。暗室 1 では、X 軸で約 130 mG、Y 軸で約 360 mG、Z 軸で約 310 mG の磁場の得られ、暗室 2 の方では、X 軸で約 80 mG、Y 軸で約 310 mG、Z 軸で約 850 mG の磁場が得られた。これらの磁場は、地磁気に加えて測定場所の建物の鉄材などによる影響も加わり、局所的に高い磁場が発生していると考えられる。

HK PMT の性能に対する要求値は、磁場の絶対値が 100 mG 以内であるので要求値を満たしておらず対策が必要である。よって、磁気シールドを導入して、磁場を低減させ PMT を測定する必要がある。残留磁場を低減させる対策として、カミオカンデで使用された μ -metal を用いて磁場を低減させるセットアップを以下のように作成した。測定は、ミューメタルなしのセットアップで測定した時と同様の箇所で行った。この磁場対策をした後のセットアップをミューメタルあり (w/ μ -metal) セットアップとする。PMT の光電面の円周を囲むようにミューメタルカバーが巻きつけられており、上からはミューメタルメッシュが取り付けられている。そして、PMT のボトム部分にも下からコーン状のミューメタルが設置されている。PMT 設置台の 4 辺の隙間ができていた箇所には、短冊状のミューメタルを取り付けて隙間を塞いでいる。この対策だけでも約 50 mG 程度磁場を低減させられた。 μ -metal を取り付けの際に PMT と直接接触する箇所においては、PVC ブラックシートを取り付けて絶縁している。また、 μ -metal 自体がノイズを発生させている場合も考慮して、 μ -metal のメッシュやカバーなどは全てグランド接続も行っている。この磁場対策を行った後に測定した磁場の値が、以下の図 44 になる。



図 43 左: 磁場削減対策後の μ -metal セットアップ。右: 暗室内部のセットアップ

w/ μ -metal

暗室1			暗室2		
#1		#2	#9		#10
(0, 3, 162)		(-18, -21, 172)	(-4, 5, 392)		(11, 13, 390)
#3	#4	#5	#11	#12	#13
(5, 7, 3)	(-10, -2, 91)	(-11, -9, 53)	(18, 0, 344)	(17, 10, 305)	(1, 24, 291)
#6	#7	#8	#14	#15	#16
(0, 20, 14)	(-18, 11, 64)	(-17, 16, 77)	(19, 19, 416)	(24, 20, 305)	(23, 29, 297)

(B_x, B_y, B_z) [mG]

図 44 μ -metal を PMT に取り付けた場合の暗室内部の 16 点の磁場。

暗室 1 では、X 軸で約-20 mG、Y 軸で約-20 mG、Z 軸で約 170 mG。暗室 2 の方では、X 軸で約 20 mG、Y 軸で約 30 mG、Z 軸で約 420 mG まで磁場を低減できた。X、Y 軸では、20 ~ 30 mG まで下げることができたが、Z 方向においては、まだ 100 mG をこえる磁場が残留している。

4 Lab-B における磁場の影響の測定

4.1 測定の目的

PMT は磁場の影響を受けやすく、HK PMT などの 50 cm の大きな光電面を持つ PMT は光電子が磁場の影響を受けやすい。そのため地磁気レベルの磁場においても信号の収集効率への影響を考慮しないと行けない。

SK 坑内の LabB において 3 次元補償コイルを用いた PMT 測定で調査を行った。現在行われている長期測定の磁場の影響を見積もるため、高磁場領域の約 1000 mG 付近までの磁場を制御して測定を行った。また、HK PMT のダイノードは、B&L 型の構造をしており非対称な形である。そのため 3 軸方向や磁場の向きにおける影響の違いも調査した。

今回の測定では、磁場による影響の理解をするため現在納入されている新型の量産品 PMT を用いて調査を行った。また、PMT のヒット数は光電面からのダークレートと PMT に光源を照射させたものの 2 つで光量分布の位置による違いがある。これもヒット数の測定に違いが出るのが考えられ、光量照射分布による違いも確認した。

図 38 の量産品 PMT の長期安定性測定でのダークレートは平均約 7 ~ 8 kHz となっており、量産前測定である柏の測定で達成されたダークレートの平均値 4 kHz と一致していない。柏での測定と長期測定の結果の違いが磁場の影響によるものであるのかを比較調査した。さらに、長期測定結果を浜松ホトニクスとの結果と比較するために磁場による影響を考慮した。そのため、ダークレートの磁場補正を行うため補正係数を算出して評価した。

4.2 測定セットアップ

4.2.1 3 次元磁場補償コイル (ヘルムホルツコイル)

PMT の周辺磁場を制御するため 3 次元の磁場補償コイルを用いて調査を行った。磁場の制御の仕方は、ヘルムホルツの原理を用いた。X、Y、Z 軸方向に磁場を制御するため、縦 2 m × 横 2 m の正方形の型枠に青色チューブの導線が各コイルごとに 20 回巻かれており、電流が流れるようになっている。電流電源は、DC Stabilized Power Supply PDS-A SERIES を使用した。1 軸に対して 2 本のコイルフレームに電流を同じ方向に流して、コイル中心に 1 方向の磁場を発生させる。これを 3 軸に対して行い、3 次元のコイルフレーム中心で任意の磁場を制御して測定を行った。図 45 は、使用した 3 次元のヘルムホルツコイルのセットであり、その下の図 46 は、コイルの詳細図である。



図 45 3次元コイルのセットアップ

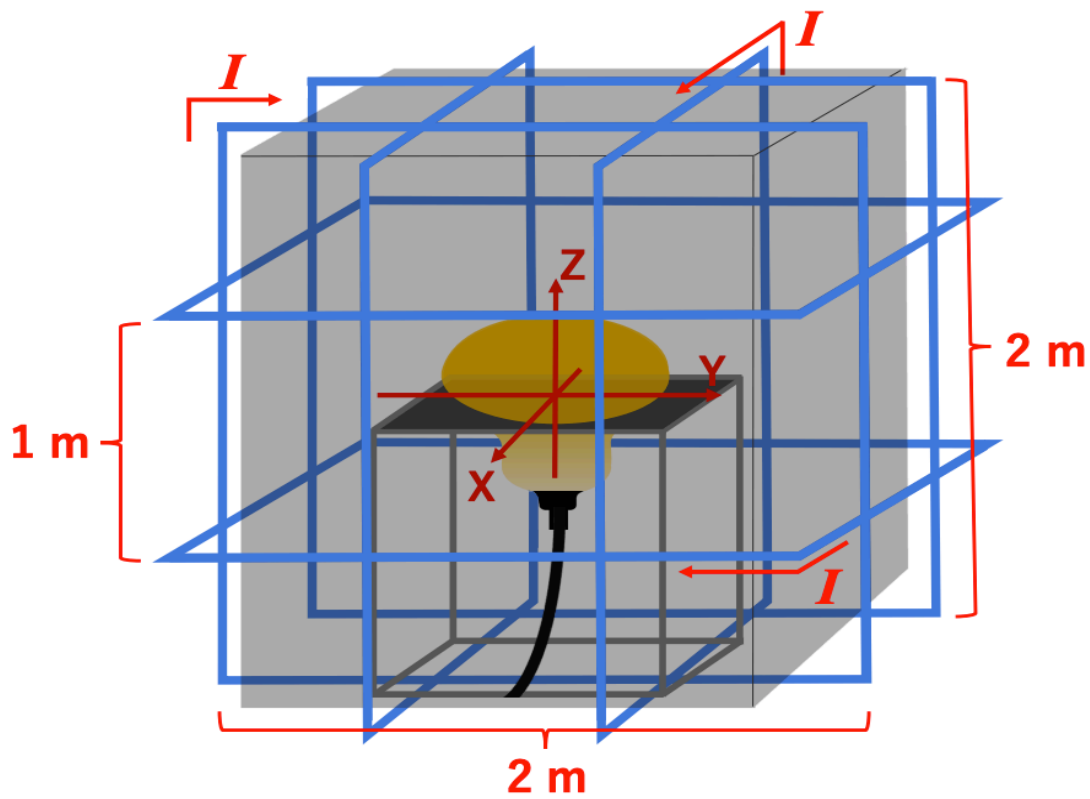


図 46 図 45 の詳細。(コイルの長さ、電流の流れる様子。コイルで囲まれているブラックシート内部のPMTがセットされている様子と3軸の定義を示している。ダイノードの軸の定義の詳細は、図 50 に示している。)

4.2.2 補償コイル内の磁場制御

3次元補償コイル内の磁場を制御するため、あらかじめ流す電流と対応する磁場の関係を調査した。まず、コイルに電流を流さずに PMT 設置台周辺の磁場分布を調査した。測定は設置台の以下の5箇所の点で行った。

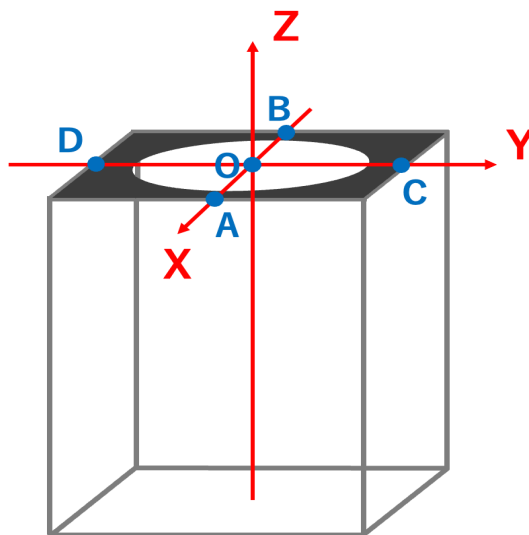


図 47 暗室内の PMT 設置台

表 5 各測定位置の 3 軸磁場。

Position	(B_x, B_y, B_z) [mG]
O	(-96, -243, -349)
A	(-91, -264, -350)
B	(-93.4, -251, -344)
C	(-129, -242, -357)
D	(-96, -225, -371)

磁場の測定方法には、図 41 のガウスメータを用いて目視で値を測定を行った。図 47 の PMT 台の中心点 O にガウスメータを設置して各点 O、A、B、C、D において 3 軸磁場を測定した。表 5 は PMT 設置台の各点における磁場の値である。PMT 設置台周辺には、X 軸で約-130 mG、Y 軸で約-260 mG、Z 軸で約-360 mG の最大磁場があった。中心の点 O においても Y、Z 軸では 200、300 mG レベルの高い磁場が確認された。

その後、コイルへ電流を流して磁場を発生させて、各電流値における中心点 O の磁場値 B_x 、 B_y 、 B_z を測定した。1 軸を測定する際他の 2 軸は 0 mG にして、3 軸それぞれの磁場値を測定した。電流の範囲は、定格の出力電流値あたりの約 0 ~ 6 A とした。結果は以下の図 48 になり、流した電流に対しての磁場の値を示している。

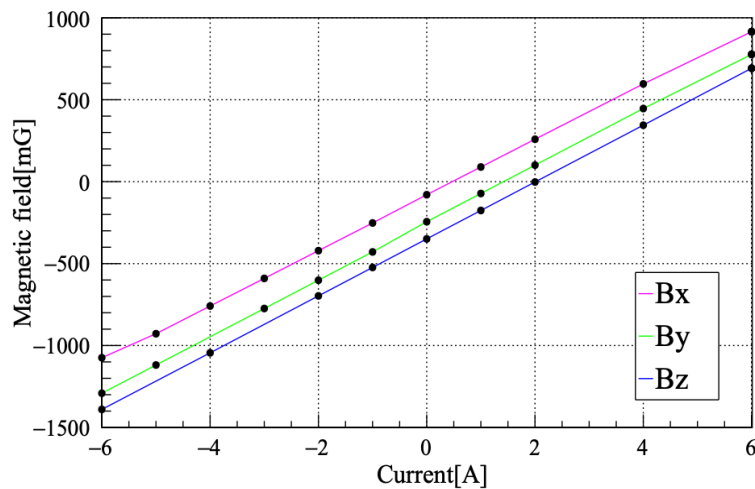


図 48 コイルに電流を流した時の対応する磁場

横軸の-6 ~ 0 A は、マイナス方向の磁場値の影響を見るため電流の流す方向を逆向きにして極性磁場を測定した。以上より、電流と磁場は線形の関係になっており、-6 ~ 6 A まで流して B_x では約-1100 ~ 900 mG、 B_y では約-1300 ~ 800 mG、 B_z では約-1400 ~ 700 mG 領域の磁場まで制御できることを確認した。

PMT の磁場に対する影響では、この電流と磁場の関係から得られた電流値をコイルにかけて測定を行った。

4.2.3 PMT セットアップと PMT の 3 軸の定義

PMT の磁場の影響を測定するため、以下の図 49 のセットアップを用いて測定を行った。

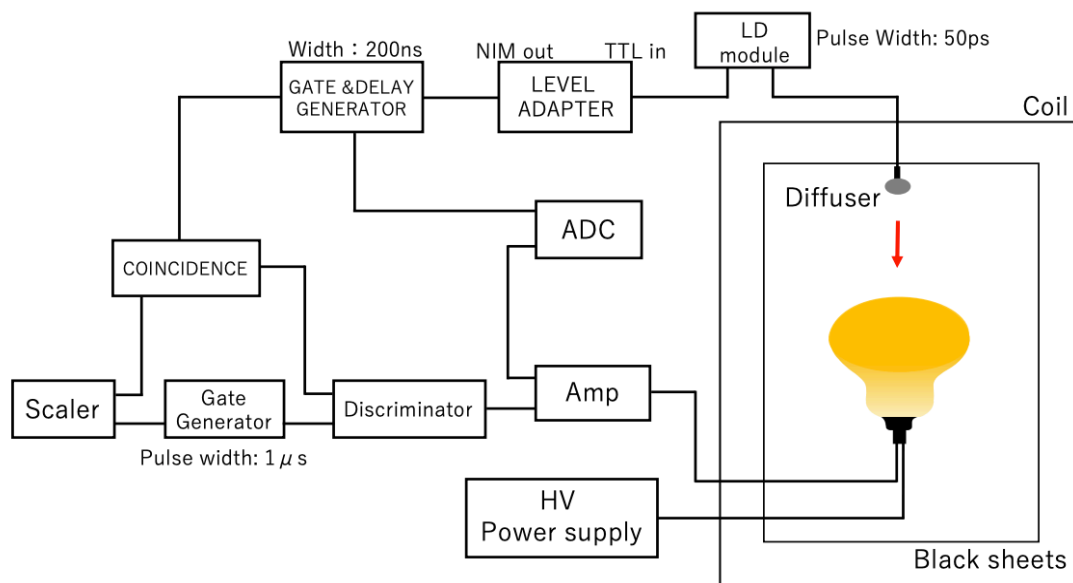


図 49 測定回路のセットアップ。

PMT は、ブラックシートで覆われた暗室内では PMT 台座に設置されている。アンプは 24 倍のものを用いている。期待される 1 光電子は、 -6 mV なのに対し Discriminator の閾値電圧は、 -1 mV になるように Threshold を調節し、パルス幅は $1 \mu\text{s}$ に設定して Scaler でカウント数を測定した。LD 光源は、光電面中心直上約 50 cm 程度距離を空けて設置している (詳細は 4.2.4 に示す)。また、LD module からの信号のコインシデンスを取ってのレート測定も可能になるようにセットアップを作った。ADC は lecroly 1182 を使用し、LD module の信号を TTL から NIM スケールに変換し、設定した Gate 幅でアンプからの信号を取得している。

今回使用した PMT は、量産品 PMT の ED0590-H、EBB 値 (浜松ホトニクスでの測定で $1.0 \times 10^7 \text{ gain}$ の時の電圧値) は 1740 V 、QE は、 34.4% 、Hamamatsu でのダークレート値は 5.4 kHz である。

PMT の 3 軸 X、Y、Z 方向の軸の定義は以下に示す。

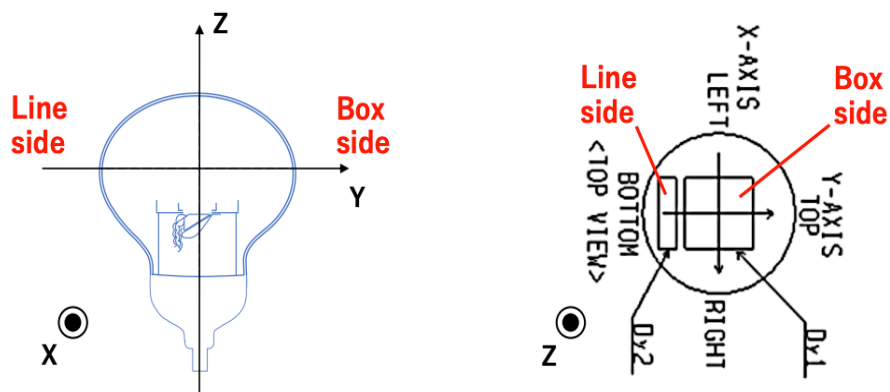


図 50 3 軸の定義, 左:PMT 側面図, 右:PMT 平面図.

軸の定義は、ダイノード方向で決めており、Y 軸の正方向に第一ダイノードのボックス側が位置し、Y 軸の負方向にライン側の複数段のダイノードが位置するように PMT を設置している。

4.2.4 LD 光源

LD 光源は、ピコ秒パルス光源 LDB-100 405 nm を使用した。図 49 のように光電面中心直上約 50 cm 程度距離を空けて設置し、光源にディフューザーを取り付けて光を拡散させて PMT に照射させた。LD ヒットレートの測定の光量の設定は、発振器の繰り返し周波数を 10 MHz 、パルス幅を 500 ps とした。電流値は、例えばダークレートが 7 kHz の場合、LD ヒットレートは 107 kHz にしてを無視できるレート値に設定した。HV 依存性の測定での光量設定は、EBB 値 1740 V での光量とした。

4.3 測定

磁場に対しての影響を見るため、PMT 周辺の磁場を変化させた時における信号のカウント数を測定した。ダークレートや LD 光源を用いた LD ヒットレート測定を行った。測定値の算出方法は、レートの測定値を R とすると閾値電圧を超えたパルス波高の全カウント数を N_{hit} 、測定時間を t とし以下の式 (4.3.1) で求めた。

$$R = \frac{N_{hit}}{t} \quad (4.3.1)$$

LD ヒットレートの測定方法は、LD 光源をつけた時のレート R_{LD} と LD 光源をつけていない時のレート (ダークレート) R_{DR} として

$$LD \text{ Hit Rate} = R_{LD} - R_{DR} \quad (4.3.2)$$

で算出した。

磁場の影響測定では、1 軸の磁場を変化させていく中で測定点は、1 点 15 秒として 15 点の磁場地点で測定をした。測定時間の決め方は、式 (4.4.3) に従って決めた。また、HV 依存性についても測定を行い、測定方法は HV を変えた後に一通り磁場を変えてレートを測定して、使用する PMT の EBB 値 (浜松ホトニクスで測定された時のゲインが 1×10^7 の時の電圧値) の 1740 V より ± 200 V 間の 1540 V ~ 1940 V で HV を変更して測定を行った。

4.4 解析

磁場の影響を調べるため、収集効率比は以下の式 (4.4.1) のように収集効率比として算出した。

$$\text{Collection Efficiency Ratio (CE Ratio)} = \frac{\text{任意の磁場をかけた時のレート}}{\text{磁場なしの時のレート}} \quad (4.4.1)$$

また収集効率比を算出する上で統計誤差を考慮しなければならない。磁場をかけたレート測定値を r_1 として、無磁場時のレート測定値を r_0 として、得られる収集効率比 r_{ce} を r_1 と r_0 を使って書き表し

$$r_{ce} = \frac{r_1}{r_0} \quad (4.4.2)$$

とする。この時、 $R_0 = r_0 \pm e_0$ 、 $R_1 = r_1 \pm e_1$ 、 $R_{CE} = r_{ce} \pm e_{ce}$ で、 e はそれぞれの誤差である。

e_{ce} は、誤差伝播の式を用いて

$$\begin{aligned} e_{ce} &= \sqrt{\left(\frac{\partial r_{ce}}{\partial r_0}\right)^2 e_0^2 + \left(\frac{\partial r_{ce}}{\partial r_1}\right)^2 e_1^2} \\ &= \sqrt{\frac{r_1^2}{r_0^4} e_0^2 + \frac{1}{r_0^2} e_1^2} \end{aligned} \quad (4.4.3)$$

となる。収集効率比 r_{ce} は 0.1 のオーダーと予測できるため誤差 e_{ce} を約 0.001 以下になるように測定時間は、15 秒に設定して統計誤差を無視できる状態で測定した。

4.5 結果

4.5.1 無磁場時における閾値電圧

PMT は、設定される閾値電圧によっても測定されるカウントレートが変わってくる。ここでは、ダークレートの閾値電圧依存性について測定した。

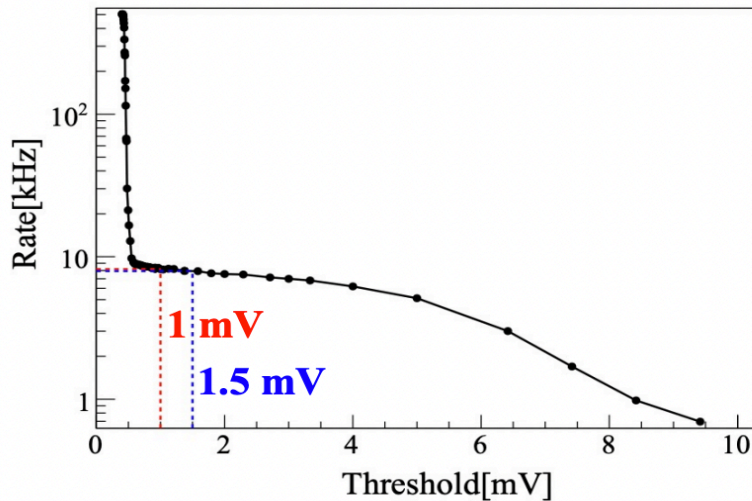


図 51 閾値ごとのダークレートの変動

閾値の設定が低い時は小さなパルス波高も数え上げられ、無限大の方向へレートは上がっていている。これによりディスクリミネータの閾値電圧のベースラインもズレていないことを確認した。ダークレートは閾値電圧が 0.5 mV 付近で急激に低下し、0.6 mV あたりから比較的安定していき、3 mV 付近から緩やかなカーブを描いて低下している。それぞれのダークレートの値 R は、閾値電圧が 1 mV の時は $R=8.18$ kHz、閾値電圧が 1.5 mV の時は $R=7.93$ kHz となっている。現在の HK の長期測定では、1 mV (1/6 光電子相当) と 1.5 mV (1/4 光電子相当) の閾値電圧が用いられており、ここでの 1 mV と 1.5 mV の相対的なダークレート割合は、1 mV 時を 100% とすると 1.5 mV では 97% となり、その差は 3% であり小さな変動であることを確認した。

4.5.2 3軸磁場における収集効率と位置依存性

PMT は、50cm の大きな口径の光電面を持つため、光電面から放出された光電子はダイノードへ到達するまでに磁場の影響を受ける。ダイノード構造も非対称な形であるため、ダイノード周辺での電子軌道も軸方向で異なってくる。

PMT 周辺磁場を X、Y、Z 軸で独立にかけてダークレート測定を行った。また、光量照射分布の違いでの磁場に対する収集効率の違いも見つかるため、LD 光源で光を当てて LD ヒットレートの測定も 3 軸独立に磁場をかけて行った。LD 光源の光量設定は、4.2.4 で記述しているものを用いている。

PMT に印加する電圧値は EBB 値 1740 V にして測定を行い、収集効率比の計算は 4.4 の式 (4.4.1) を用いた。

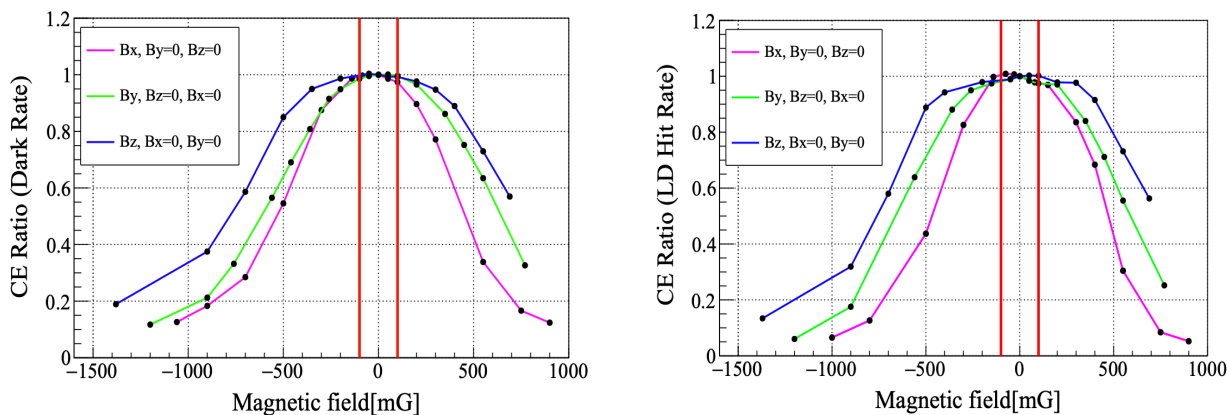


図 52 3 軸におけるヒットレート測定による収集効率。左: ダークレート、右: LD ヒットレート。一軸方向に磁場をかけて測定している時、他の 2 軸では 0 mG としている。

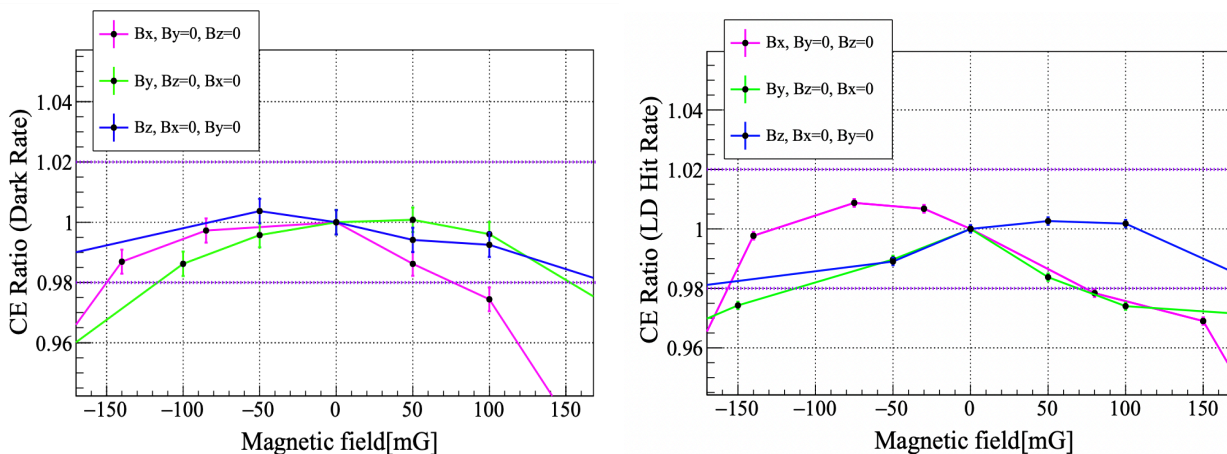


図 53 3 軸方向の独立磁場におけるレート分布の ± 100 mG で拡大したもの。左: ダークレート、右: LD ヒットレート。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。

図 52 の分布から無磁場時が最も電子の軌道が曲げられないため、収集効率が最大になると考えられる。2 本の赤線内は磁場が ± 100 mG 以内の HK PMT の磁場許容領域であるが、この領域内での

大幅な収集効率の低下は見られなかった。ダークレートにおいては、X、Y 軸では光電面に対して水平方向に磁場がかかっているため、鉛直方向の Z 軸磁場に比べ比較的大きな収集効率の低下が見られた。LD ヒットレートにおいても 3 軸それぞれの収集効率の分布は、ダークレートと同じような形となったが ± 100 mG 付近では、X、Y、Z 軸でダークレートに比べて磁場の変化が少なく見られた。特に、Z 軸に関しては約 $-300 \sim 300$ mG 付近まで、よりフラットな分布となった。

図 53 は、図 52 を拡大したものである。 ± 100 mG の領域内での収集効率は、3 軸において LD ヒットレートとダークレートのどちらも低下率が $\pm 2.5\%$ 以内の範囲で収まっていた。また、LD ヒットレートは、ディフューザーで散乱させて光電面に照射させているが、LD 光源と光電面には距離があり、光電面への光量照射が一律ではなく影響が出ている可能性がある。

図 54 では、上記の 3 軸磁場の収集効率を浜松ホトニクス社のシミュレーションとの比較を行った。LD ヒットレートとダークレートのどちらも、X 軸の正方向の②で収集効率が最も低下した。また、磁場の向きにおいては、X 軸方向の①と②では磁場の方向が逆向きの関係であるが、収集効率に違いが見られダイノードの非対称構造の影響があると見られる。

Z 軸方向の④と⑤については、PMT 光電面鉛直方向で磁場の影響を受けにくいいため最も低下率が小さかった。測定値のずれは確認されたがダークレートと 3 軸において収集効率の低下率順は、シミュレーションと近い値となった。

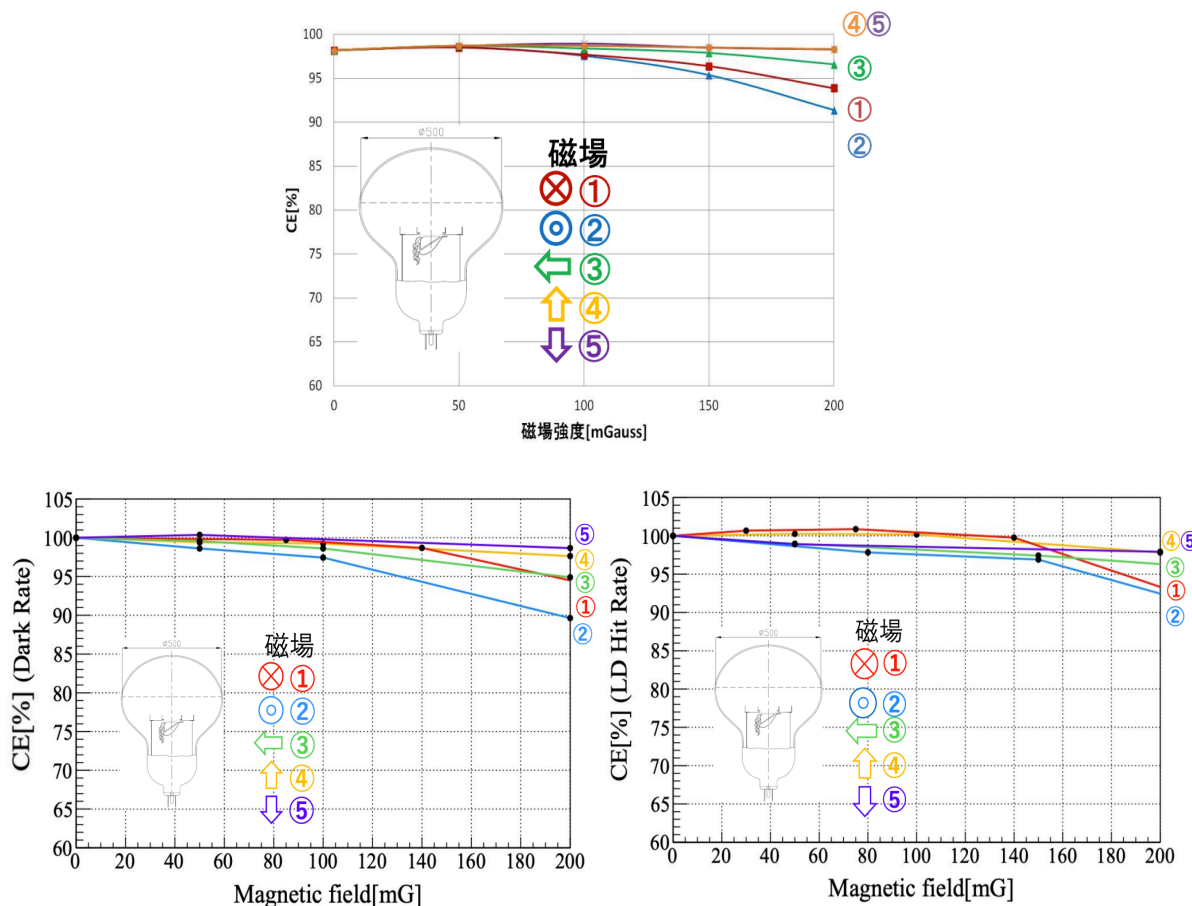


図 54 3 軸における収集効率のシミュレーションと測定値の比較。上段: 浜松ホトニクス社のシミュレーション結果、下段左: ダークレートの測定値、下段右: LD ヒットレートの測定値。

4.5.3 収集効率の HV 圧依存性

4.5.2 で 3 軸方向の磁場ごとの HV 値による収集効率の影響を調べた。PMT の印加電圧を 1740V から ± 200 V で変化させていき、1540 V ~ 1940 V の 5 点において、3 軸それぞれのダークレートと LD ヒットレートの収集効率の測定を行った。

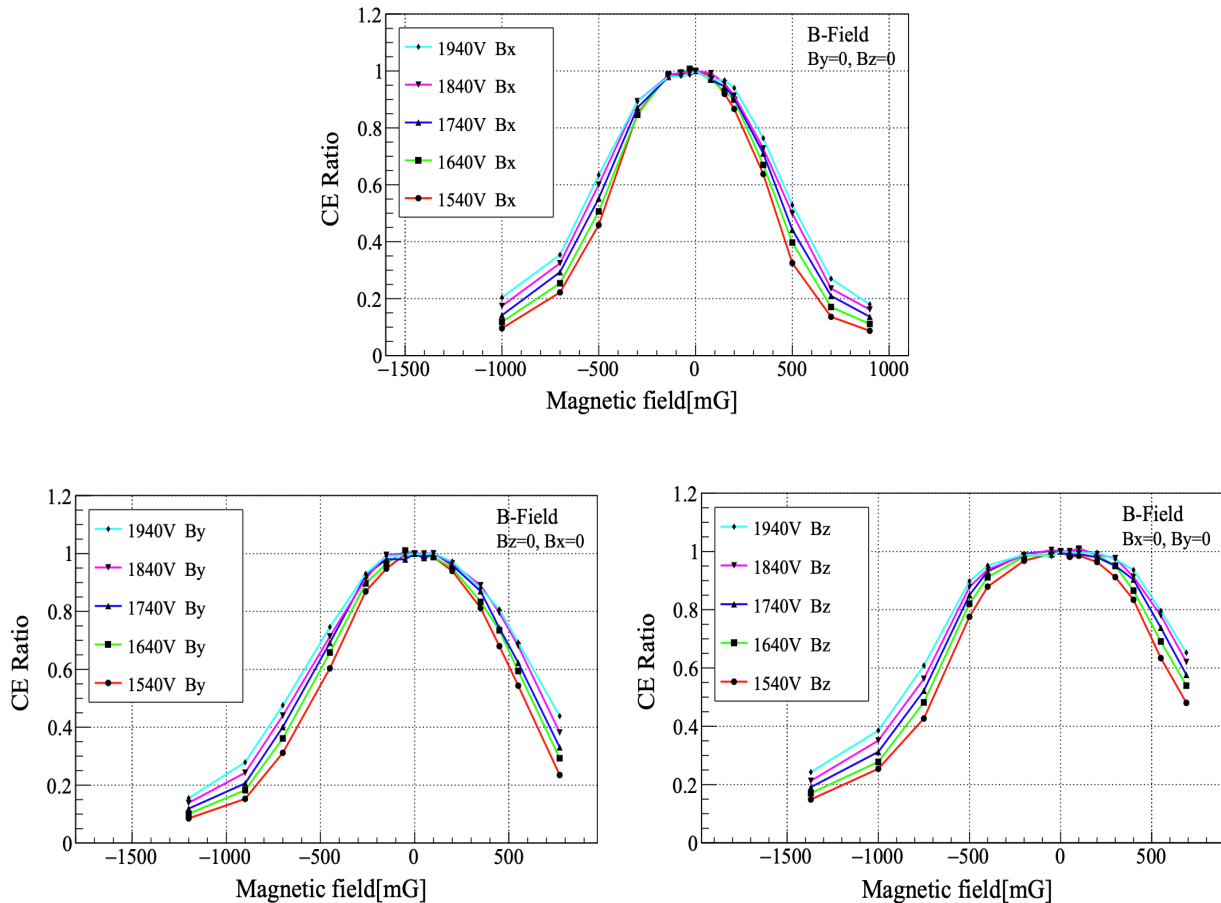


図 55 X、Y、Z 軸のダークレートの HV 依存性。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。

図 55、図 56 の各電圧においてダークレートは、無磁場領域付近の ± 100 mG あたりで収集効率の低下はほとんど見られなかった。各電圧間 ± 200 V 間の収集効率の差は、最大で X 軸で約 20%、Y 軸で約 20%、Z 軸で約 18% となり、電圧が低下するほど収集効率は低下した。

図 56 は、1740 V の基準電圧との収集効率の割合であるが、ほとんどの測定点において $\pm 2\%$ 以内の範囲であった。しかし、測定点の中には $\pm 3\%$ に達するものも確認された。

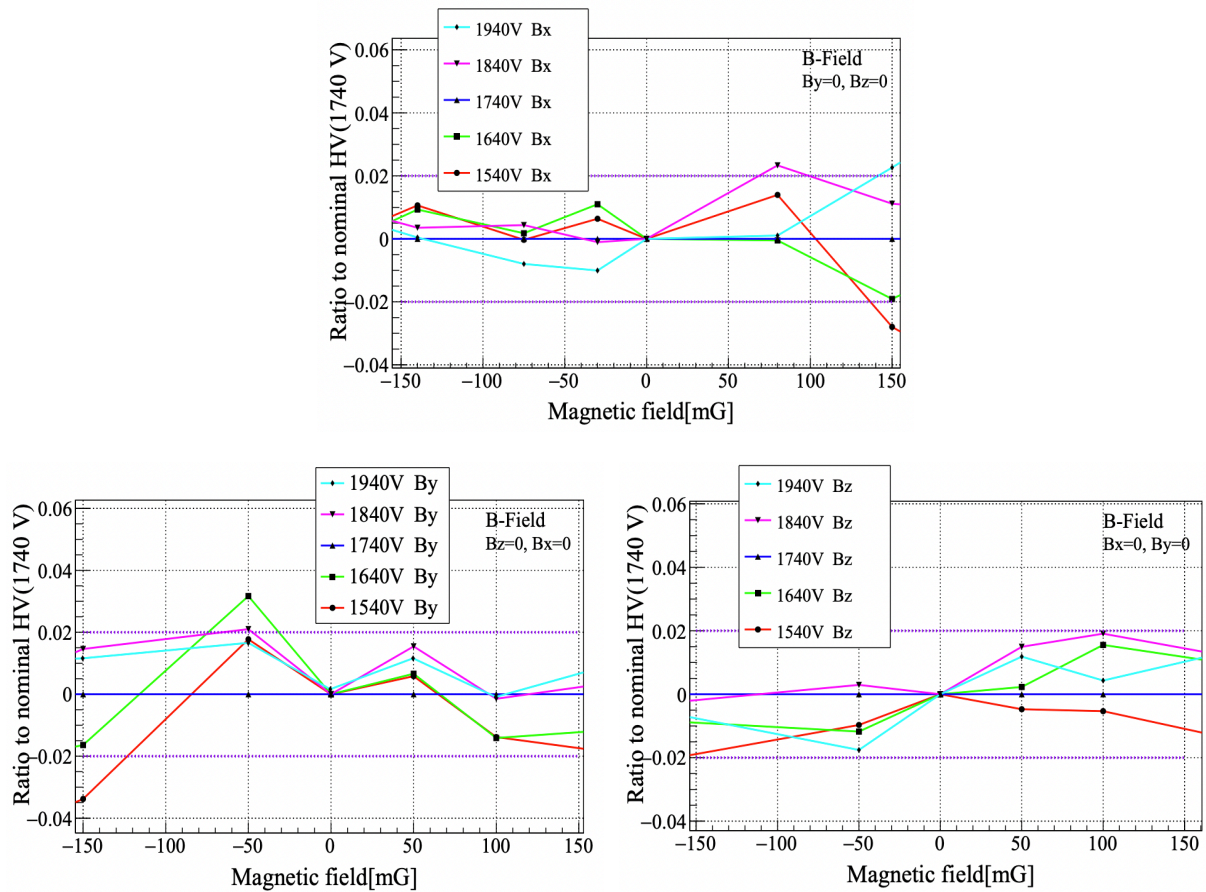


図 56 ダークレートにおける X、Y、Z 軸の 1740 V の時の収集効率との割合。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。

続いて図 57 に LD ヒットレートについての 3 軸で各電圧ごとの収集効率を示す。LD ヒットレートの各電圧間の収集効率差の最大値は、X 軸で約 23%、Y 軸で約 22%、Z 軸で約 21% となり、電圧間の最大低下率はダークレートとあまり変わらなかった。

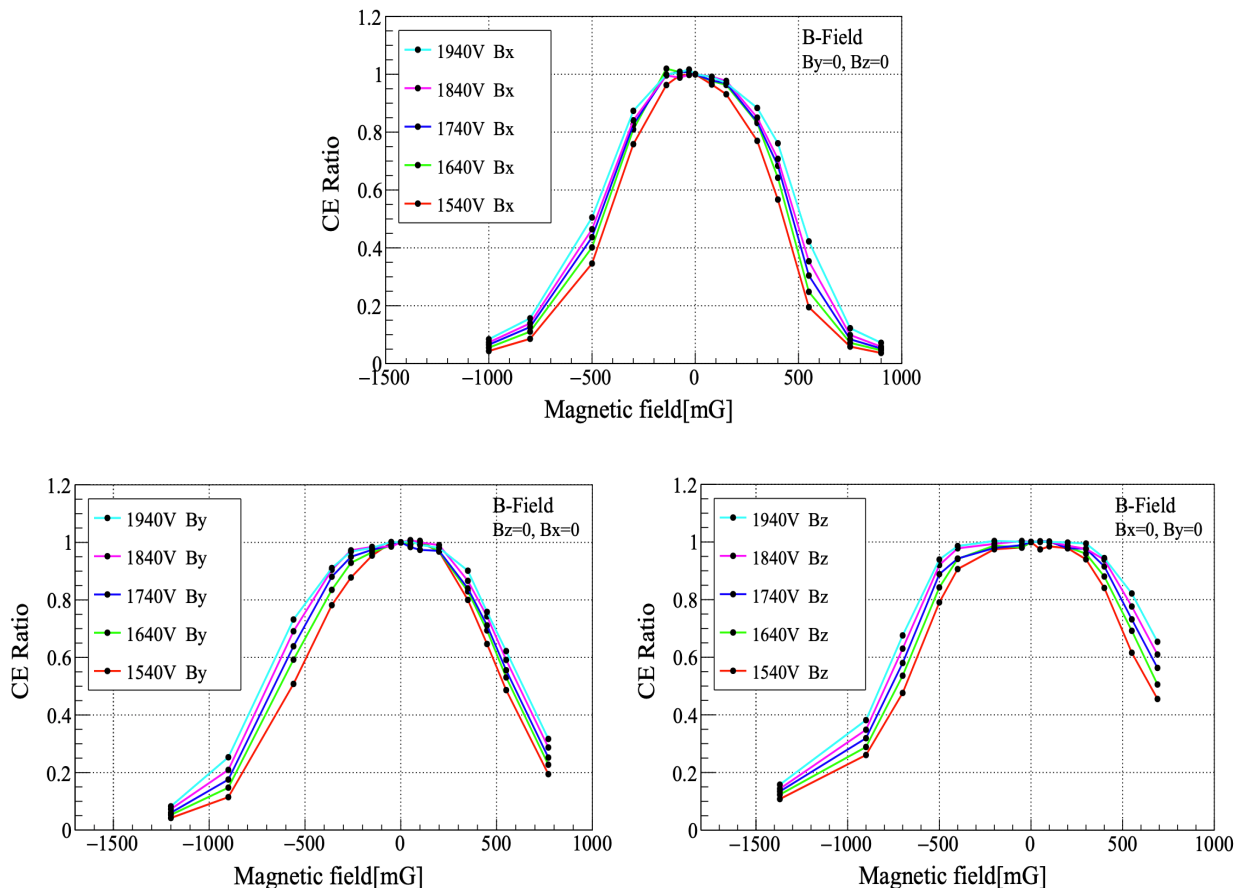


図 57 X、Y、Z 軸の LD ヒットレートの高電圧依存性。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。

図 58 では、1740 V の基準電圧との収集効率の割合であるが、LD ヒットレートの方もほとんどの測定点において $\pm 2\%$ 以内の範囲であった。しかしながら、 $\pm 2\%$ のラインを超える $\pm 3\%$ 付近のものも確認された。これについて、図 56 のダークレートでも 1740 V の基準電圧との割合で $\pm 3\%$ になったものがあった。1740 V との割合を見たときは電圧順にずれが見られると期待されるが、実際はそうになっておらず偏った分布が確認された。これは、現在使用しているセットアップが外部ノイズからの影響を受けているものと見られる。できる限りのノイズ対策を行なったが完全に取りきれていなく、小さなノイズ成分の影響を受けているものと考えられる。セットアップのノイズ調査を行なったことについては付録 B を参照されたい。

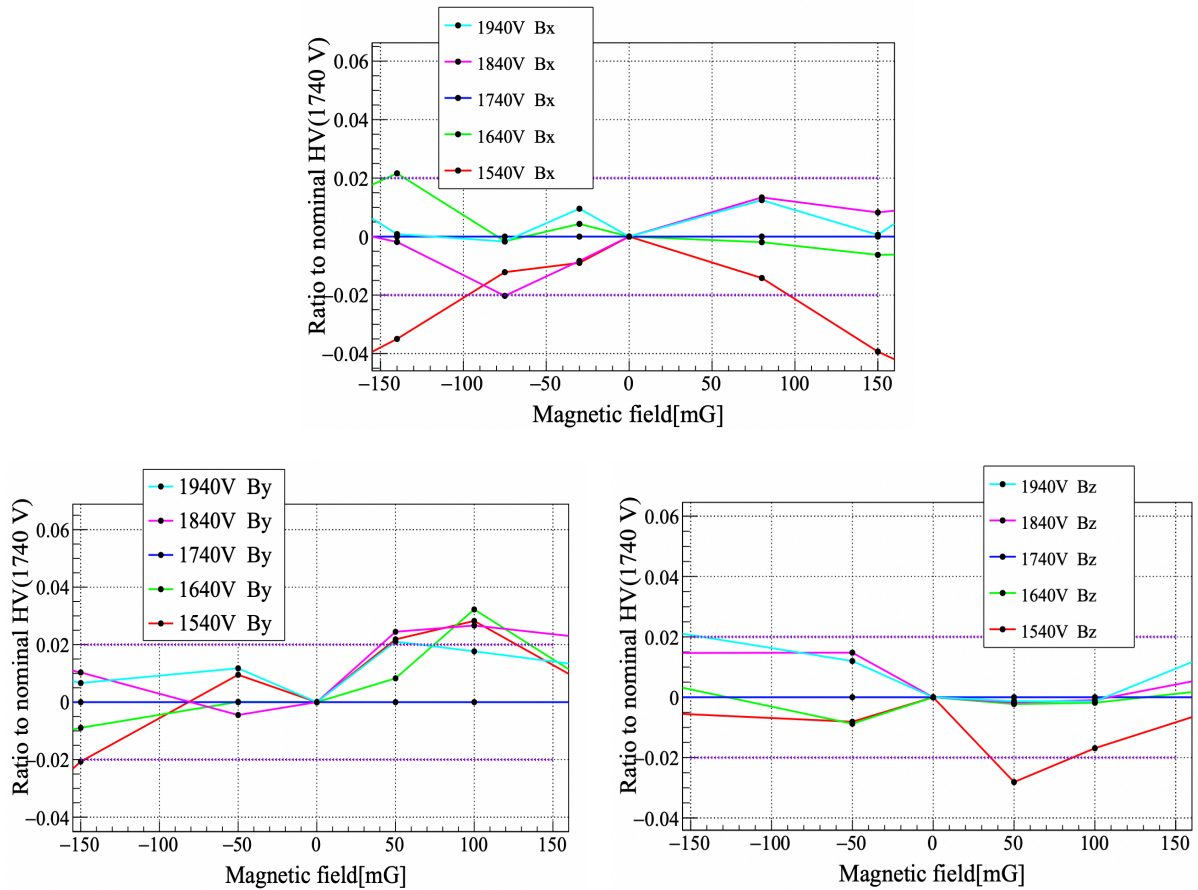


図 58 LD ヒットレートにおける X、Y、Z 軸の 1740 V の時の収集効率との割合。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。

5 PMT ダークレートの磁場による影響の調査

5.1 目的

現在の長期測定環境における残留磁場は、 ± 100 mG 以上残っている状態で測定が行われている。柏での測定では、図 32 より、ダークレートが性能基準の平均 4 kHz だったが、長期測定におけるダークレートは一致していない。どちらの測定場所においても残留磁場が残っている中での測定となっているため、磁場による収集効率の違いとダークレート測定への磁場による影響を見積もった。

また、浜松ホトニクスとの測定比較においても PMT ごとのダークレートの測定値が一致しておらず平均約 1 ~ 2 kHz の差がある。図 60 において暗室ごとのダークレートの比較をしたが相関は見られなかった。

柏の測定や長期測定には、磁場の効果も影響を及ぼしていると考えられる。ダークレートの測定値を補正することにより、磁場による影響を補正して評価した。

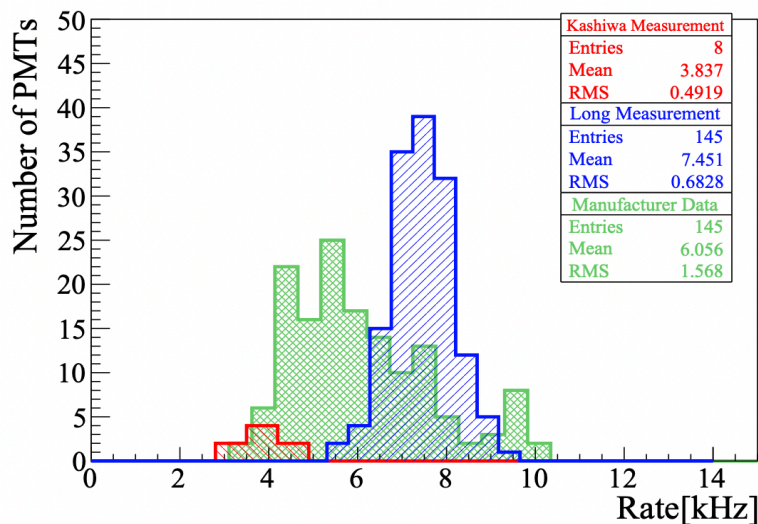


図 59 柏と HK の長期測定と浜松ホトニクスのダークレートの比較。

表 6 柏と HK の長期測定と浜松ホトニクスのダークレート。

	Mean	RMS
Kashiwa Measurement (Entries 8)	3.837	0.4919
Long Measurement (Entries 145)	7.451	0.6828
Hamamatsu Measurement (Entries 145)	6.056	1.568

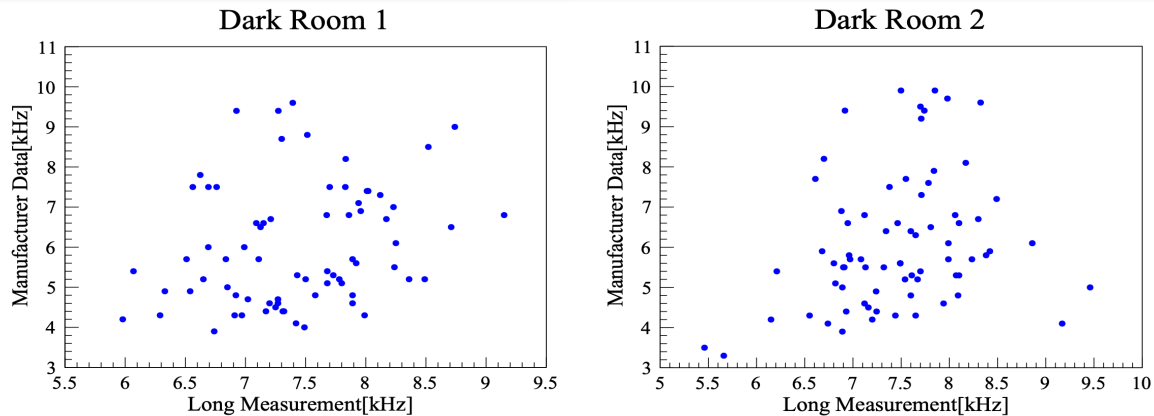


図 60 各 PMT のダークレートの相関関係。縦軸: 浜松ホトニクス側における測定、横軸: HK 側における長期測定。浜松ホトニクス側と HK 側で測定された良品 PMT の測定プロット。

5.2 補正係数の算出と補正の方法

補正係数 (Correction factor) は、3 軸磁場が収集効率に与える影響を見るために、以下の 2 通りの方法で算出した。

- 3 軸それぞれで得られた収集効率を掛け合わせた補正係数

図 52 の各独立磁場で測定されていたダークレートの収集効率を用いて補正係数を算出した。3 軸の磁場の値から図 52 を用いて、X、Y、Z 軸における収集効率を得る。そのとき得られる X、Y、Z 軸の収集効率を ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z とする。これらを掛け合わせて

$$\alpha_{\text{Multiply}} = \epsilon_x \times \epsilon_y \times \epsilon_z \quad (5.2.1)$$

として 3 軸磁場の掛け合わせた補正係数を算出した。

- 3 軸の磁場をかけて測定したレートの補正係数

この補正係数は、4.4 の式 (4.4.1) で得た収集効率と同様の形式である。区別するため、任意の磁場をかけた時に測定したレートを ϵ_1 とすると磁場をかけていない時に測定したレートを ϵ_0 とする。測定から以下の補正係数を得た。

$$\alpha_{\text{Measure}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \quad (5.2.2)$$

データ補正では、ダークレートの測定値を用いて行った。補正方法は、ダークレート測定値を S_{DR} 、ダークレートの補正後のデータを $S_{\text{CF,DR}}$ として

$$S_{\text{CF,DR}} = \frac{S_{\text{DR}}}{\alpha} \quad (5.2.3)$$

で算出した。 α は式 (5.2.1) と式 (5.2.2) で得られた補正係数である。

5.3 結果

5.3.1 PMT 量産前測定 (柏での測定) 場所における補正

柏での測定場所における磁場を用いて補正係数の計算を行った。柏での測定では、暗室内にある12箇所の棚において PMT が測定されていた。

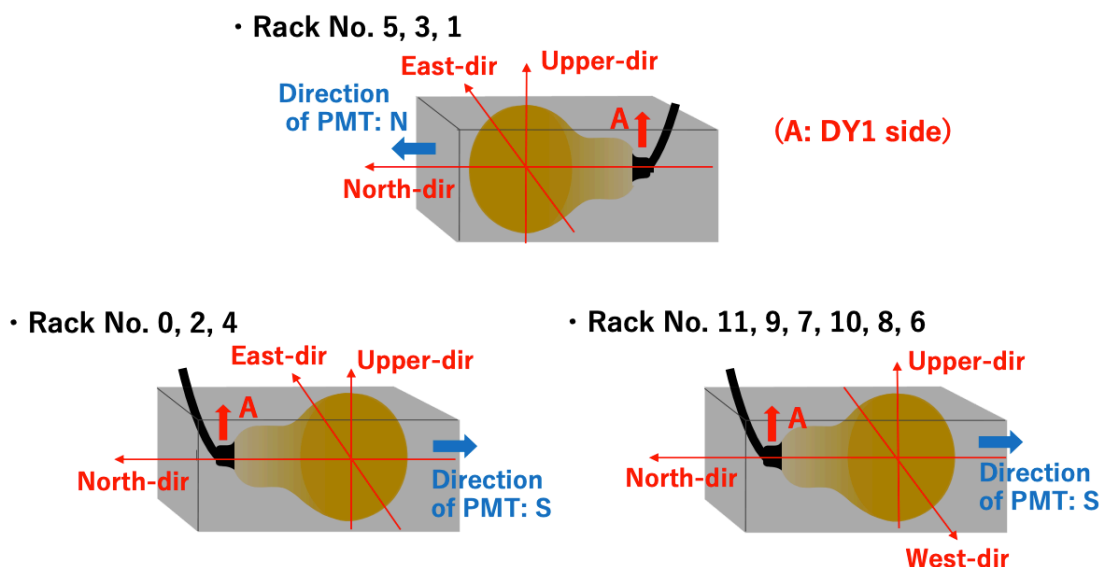


図 61 柏での測定のセットアップ。

図 61 より、PMT は光電面の方向で北 (N) または南 (S) 向きが決められており、Upper-dir(鉛直方向) の正側に A の PMT ケーブルが出てくるようになっている。PMT は、ケーブルの出ている方向に第一ダイノードがくるような配置となっている。

表 7 と表 8 では、PMT の設置場所の磁場値と得られた補正係数について示している。図 62 は補正係数をプロットしたものであり、横軸は PMT 設置場所の Rack No. とした。磁場の向きは、上記の柏の測定 (図 61) と補正係数を得る測定で (図 50)、PMT の軸の向きを合わせて測定を行った。PMT の磁場の成分は、PMT の方角で決められており 3 軸磁場 (B_x , B_y , B_z) は、Rack No.5、3、1、0、2、4 では (B_x , B_y , B_z) = (North-dir, East-dir, Upper-dir) 方向磁場となっており、Rack No.11、9、7、10、8、6 では (B_x , B_y , B_z) = (North-dir, West-dir, Upper-dir) が 3 軸磁場の方向となっている。

補正係数は、(1) と (2) は、3 軸磁場の掛け合わせた補正係数と 3 軸磁場をかけて測定した値から得られた補正係数のリストとなっている。Rack No.4 と Rack No.10 では、局所的に磁場の高い場所であったため補正係数は低い値となった。どの場所においても全て 8 割以上の結果となり全体平均は 0.959 であった。3 軸磁場の掛け合わせた補正係数と 3 軸磁場をかけて測定して算出した補正係数は、2 点間での差は見られて最大 2.6% と小さいものであった。

表7 柏での測定場所 Rack No.5、3、1、0、2、4の磁場値とその磁場に対して算出された2通りの補正係数。

Rack No.	(North, East, Upper) -dir [mG]	(1)Correction factor $\epsilon_x \times \epsilon_y \times \epsilon_z$	(2)Correction factor ϵ_1/ϵ_0	(1) - (2)
5	(71, -90, 138)	0.955	0.938	+0.017
3	(77, 85, 66)	0.990	0.995	+0.0051
1	(46, -15, 160)	0.969	0.994	-0.026
0	(-190, 40, 330)	0.847	0.825	+0.021
2	(-39, -130, 41)	0.985	0.990	-0.0046
4	(54, -128, -23)	0.985	0.985	+0.001 以下

表8 柏での測定場所 Rack No.11、9、7、10、8、6の磁場値とその磁場に対して算出された2通りの補正係数。

Rack No.	(North, West, Upper) -dir [mG]	(1)Correction factor $\epsilon_x \times \epsilon_y \times \epsilon_z$	(2)Correction factor ϵ_1/ϵ_0	(1) - (2)
11	(-84, 46, -100)	0.959	0.984	-0.025
9	(2.6, -81, 73)	0.978	0.978	+0.001 以下
7	(1, 67, 148)	0.979	0.974	+0.0052
10	(-83, 181, -240)	0.877	0.901	-0.024
8	(-43, 41, -40)	0.989	0.978	+0.010
6	(-61, 23, 127)	0.990	0.966	+0.024

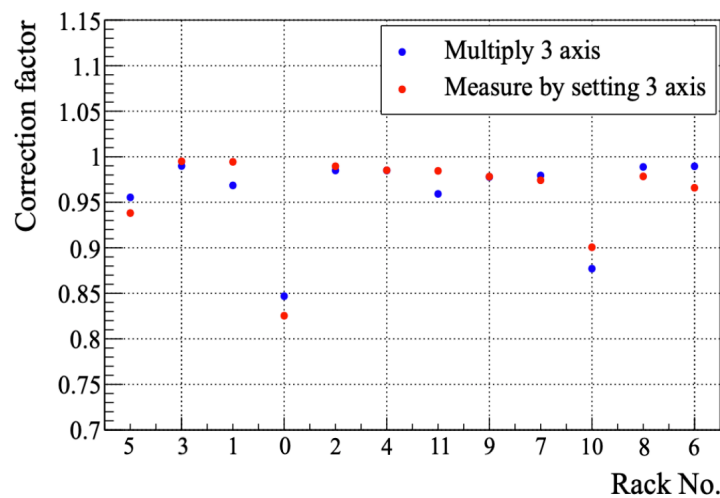


図62 表7と表8からの2通りの補正係数の比較。青色は、表の(1)と対応しており、赤色は、表の(2)と対応している。

5.3.2 長期測定 (PMT 量産品測定) 場所における補正

3.6 では、長期測定場所の磁場の値について測定していた。この磁場の値を用いて 2 通りの補正係数を算出した。まず、PMT に磁場対策をしていない μ -metal 取り付け前の 16 点の磁場値について補正係数を求めた。以下の表 9 に結果、図 63 にそのプロットを示す。

Location は、PMT 設置位置の場所番号を示しており、 (B_x, B_y, B_z) は、各 3 軸磁場である。そして、(1) と (2) で 2 通りの補正係数を 16 箇所分をリストとして示している。補正を行うにあたり用いる磁場の値は、磁場再現測定の軸と合わせている。

(1) と (2) で補正係数の分布は近い結果をなした。最も大きな差が見られたところは、Location 13 で約 2.9% の差が見られた。暗室 1 と 2 ごとで磁場の値は、大きな差があったため補正係数にも差が見られた。それぞれの暗室の補正係数の平均値は、暗室 1 で 0.897、暗室 2 で 0.537 となり、暗室 2 で約 36% 低下した。

表 9 μ -metal の取り付け前の PMT16 点の各補正係数値表。

Location	$(B_x, B_y, B_z)[mG]$	(1) Correction factor $\epsilon_x \times \epsilon_y \times \epsilon_z$	(2) Correction factor ϵ_1/ϵ_0	(1) - (2)
1	(-12, 282, -297)	0.875	0.889	-0.015
2	(125, 98, -310)	0.913	0.910	+0.0029
3	(1, 268, -49)	0.922	0.933	-0.011
4	(72, 219, -198)	0.922	0.941	-0.019
5	(112, 223, -90)	0.916	0.924	-0.0080
6	(4, 359, -23)	0.852	0.869	-0.017
7	(92, 309, -147)	0.863	0.853	+0.0095
8	(54, 337, -144)	0.852	0.853	-0.001 以下
9	(79, 205, -797)	0.456	0.462	-0.0062
10	(-30, 238, -851)	0.401	0.420	-0.020
11	(4, 210, -724)	0.537	0.550	-0.012
12	(-4, 242, -662)	0.596	0.610	-0.014
13	(33, 245, -661)	0.591	0.620	-0.029
14	(32, 287, -826)	0.407	0.423	-0.016
15	(-35, 284, -649)	0.593	0.605	-0.013
16	(-49, 313, -637)	0.593	0.603	-0.010

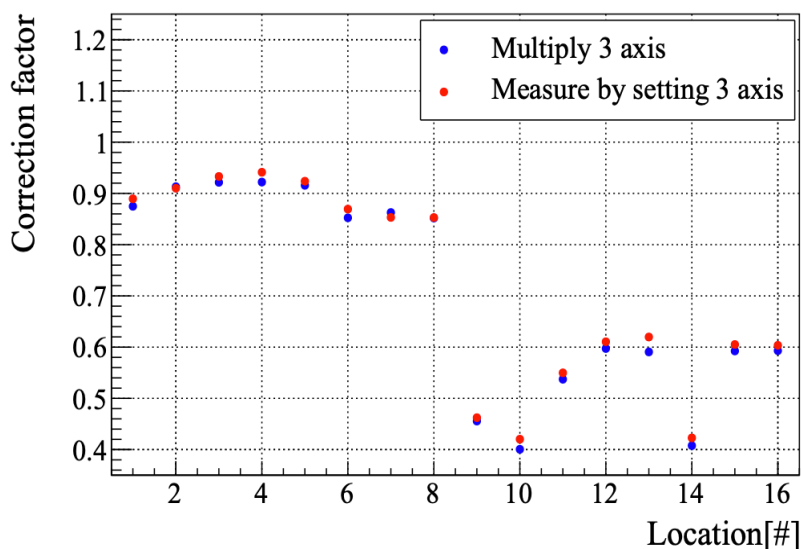


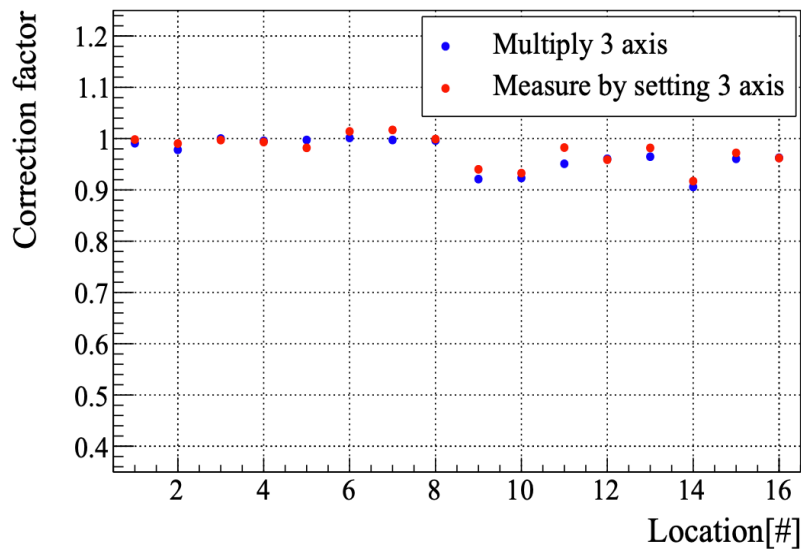
図 63 μ -metal の取り付け前の PMT16 点の各補正係数。

続いて、PMT に磁場対策をした μ -metal 取り付け後の 16 点の磁場値について補正係数を求めた。以下の表 10 に結果、図 64 にそのプロットを示す。

磁場対策後は、両方の暗室において磁場が改善されて、補正係数値も改善された。暗室 2 の全体の補正係数では、Z 軸方向にまだ約 300 ~ 400 mG の磁場が残っており、その影響で暗室 1 に比べて低い値となっている。2 通りの係数での最大の差は、Location 11 で約 3.2% の差が確認された。それぞれの暗室の補正係数の平均値は、暗室 1 で 0.999、暗室 2 で 0.956 となり、暗室 2 で約 4.3% の低下であった。

表 10 μ -metal の取り付け後の PMT16 点の各補正係数値表。

Location	$(B_x, B_y, B_z)[\text{mG}]$	(1)Correction factor $\epsilon_x \times \epsilon_y \times \epsilon_z$	(2)Correction factor ϵ_1/ϵ_0	(1) - (2)
1	(0, 3, -162)	0.991	0.998	-0.0072
2	(18, -21, -172)	0.978	0.990	-0.012
3	(-5, 7, -3)	1.00	0.997	+0.0030
4	(10, -2, -91)	0.996	0.993	+0.0022
5	(11, -9, -53)	0.997	0.982	+0.015
6	(0, 20, -14)	1.00	1.01	-0.010
7	(18, 11, -64)	0.997	1.02	-0.020
8	(17, 16, -77)	0.996	0.999	-0.0029
9	(4, 5, -392)	0.921	0.940	-0.019
10	(-11, 13, -390)	0.923	0.933	-0.0094
11	(-18, 0, -344)	0.951	0.983	-0.032
12	(-17, 10, -305)	0.961	0.959	+0.0018
13	(-1, 24, -291)	0.965	0.982	-0.017
14	(-19, 19, -416)	0.906	0.917	-0.011
15	(-24, 20, -305)	0.961	0.972	-0.012
16	(-23, 29, -297)	0.963	0.962	+0.001 以下

図 64 μ -metal の取り付け後の PMT16 点の各補正係数。

また上記の図 63 と図 64 の (2) の補正係数より、 μ -metal 取り付け前後での補正係数の比較も行った。図 65 に比較したものを示す。全体平均では μ -metal を取り付け後に補正係数は向上して、暗室 1 では約 10%、暗室 2 では約 42% となった。特に暗室 2 での係数は、9 割以上に改善された。

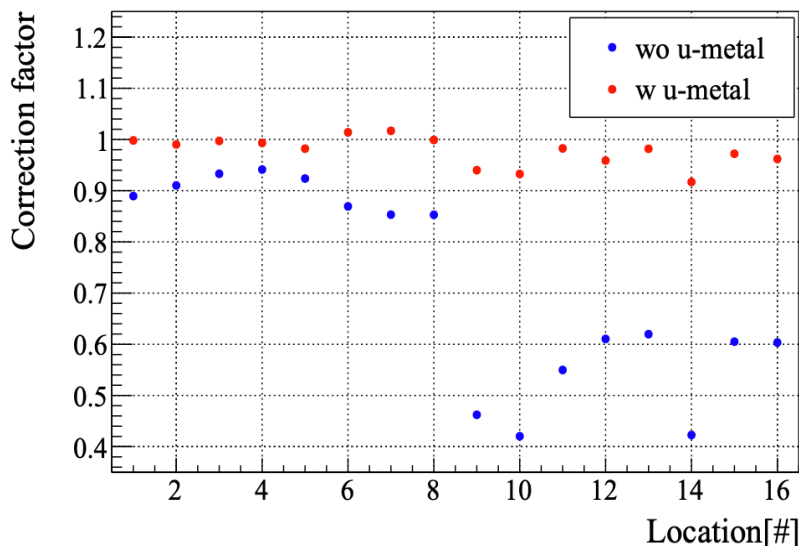


図 65 μ -metal ありとなしの場合の PMT16 点の各補正係数の比較。

5.3.3 柏の測定と長期測定の電圧依存性における補正係数の算出

柏の測定場所と μ -metal の取り付け前後での補正係数の電圧依存性の調査を行った。電圧依存性の測定では、3 軸磁場をかけてダークレートを測定して補正係数を得た。HV は 1540 V から順に変えて測定した。はじめに HV をかけて補正係数を算出するため磁場を 0 mG とし、無磁場での測定をした。その後続いて各場所において測定を行った。

まず、柏の測定の電圧依存性を調査した。表 7 と表 8 の磁場値を用いた。図 66 に結果を示す。補正係数は各電圧を変化させても大まかには同じような分布が得られた。Rack No. 0 と 10 では局所的に高い磁場であるため比較的大きな低下が見られ、Rack No. 10 の 1540 V において、最大で 0.78 まで低下した。また、電圧が高くなるほど電子が加速されて収集効率は上がり補正係数が高い値になると期待されるが、全ての測定点において電圧順になっていない。磁場が高いところでは 1540 V が最も低いが、それ以外のほとんどの箇所において 1940 V が低くなっていることを確認した。Rack No.8 においては 1540 V が最も高い値を示している。これは、1540 V ~ 1940 V まで電圧を変えて、磁場についても各測定点ごとに変化させているため、測定されるまでの過去の履歴が影響している可能性があると考えられる。

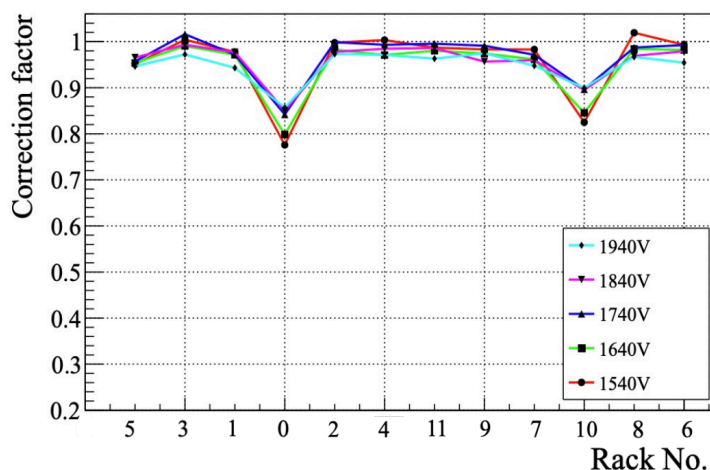


図 66 柏の測定場所での電圧依存による補正係数。

μ -metal の取り付け前後においても補正係数の電圧依存性の調査を行った。上記の柏の補正係数と同様に 1540 V ~ 1940 V 間で電圧を変えて、補正係数を算出するための無磁場でのレートを測定をした後、長期測定場所の磁場対策前の値 (図 42) と磁場対策後の値 (図 44) を用いて 16 箇所において測定を行った。

図 67 左の磁場対策前では、磁場の影響が強く残っている暗室 2 において、補正係数が小さい値となった。磁場が大きいと電圧依存性も顕著に表れていて、電圧 400 V 間では約 16% の変動が見られた。右図の磁場対策後では、磁場が軽減されたことによって全体の補正係数は向上し約 9 割以上となった。また、電圧依存性による 400 V 間の影響は、約 5% と μ -metal の取り付け前の補正係数より小さくなった。

しかしながら、 μ -metal の取り付け前後の補正係数においても、柏の電圧依存性のものと同じように電圧順になっていないものがある。電圧順になっているところでは、補正係数が小さく磁場が高い。そのため、印加電圧や測定ごとに変わる磁場の变化などの測定履歴による影響が相対的に小さいものとなり、補正係数に大きな影響を与えていないと考えられる。

また、図 66 と図 67 の電圧依存性については、磁場の影響が小さいほど電圧依存性は少なくなる傾向と見られる。

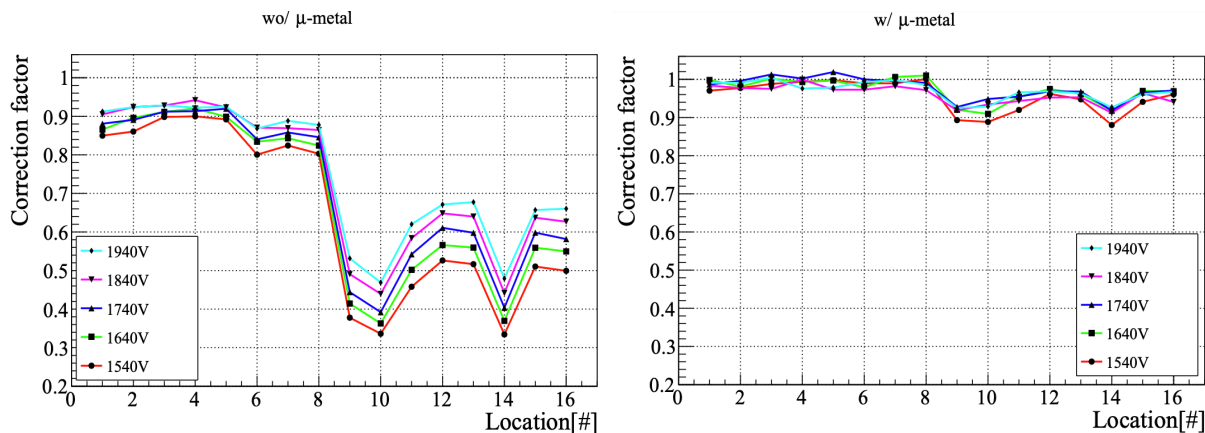


図 67 長期測定場所でのダークレートの補正係数。左: 磁場削減対策前 (μ -metal なし) の補正係数。右: 磁場削減対策後 (μ -metal あり) の補正係数。

5.3.4 ダークレート補正

上記の 5.3.3 の図 66 を用いて柏の測定結果のダークレートの平均値に対して補正を行った。図 68 に結果を示す。補正に用いた PMT は、HQE の PMT や高レート PMT は採用せず 8 本について補正を行った。補正係数は、PMT に印加していた電圧値に近い補正係数を用いてそれぞれに対して補正を行った。補正前は、ダークレートの平均値が 3.979 kHz であり、補正後のダークレートは 3.837 kHz となりその差は 0.142 kHz となった。

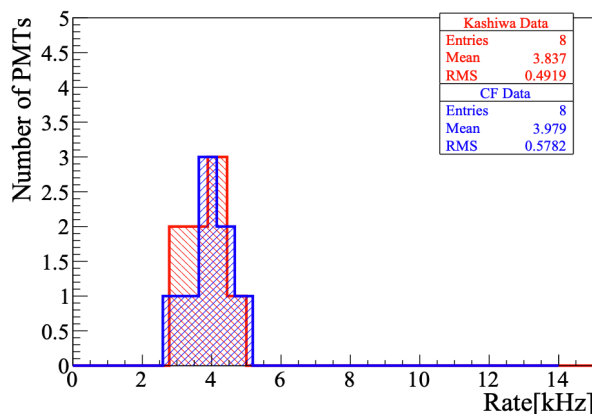


図 68 柏の測定に対してのダークレート補正。赤色: 生データ、青色: 補正後のデータ。

表 11 柏の測定値の補正前後での比較。

	Mean	RMS
Raw Data	3.979	0.5782
Corrected Data	3.837	0.4919
Entries 8		

また、長期測定における良品 PMT についても 5.3.3 の図 67 の右の磁場対策後の磁場で得られた補正係数を用いて、長期測定におけるダークレートの補正を行った。補正係数は柏の補正と同様に、PMT の印加していた電圧に近い値を採用して、PMT それぞれに対して補正を行った。補正前後と浜松の測定で得られたダークレートの値を比較した。

図 69 に各暗室ごとの結果を示す。暗室 1 においては、補正前は 7.435 kHz、補正後は 7.495 kHz であり、補正前後の差は 0.06 kHz となった。暗室 2 においては、補正前は 7.468 kHz、補正後は 7.868 kHz であり、補正前後の差は約 0.40 kHz となった。 μ -metal の取り付け後は、暗室 1 では補正係数がほぼ 1 付近となっていたため補正結果の差は小さいものとなった。一方で暗室 2 では、補正係数は約 9 割以上に向上したが、暗室 1 と比べると補正係数は低い値であり、その差が補正前後の差に影響を及ぼしていると思われる。また、暗室 1 と 2 の補正後のダークレートには、約 0.37 kHz の差が見られた。

浜松ホトニクスとの測定の比較をした。浜松ホトニクスの測定が暗室 1 にあたる PMT では約 6.0 kHz であり、暗室 2 にあたる PMT では約 6.1 kHz である。長期測定の各暗室と比較した結果、

暗室 1 では 1.48 kHz、暗室 2 は 1.77 kHz の差となり、暗室間で約 0.29 kHz の差が見られた。

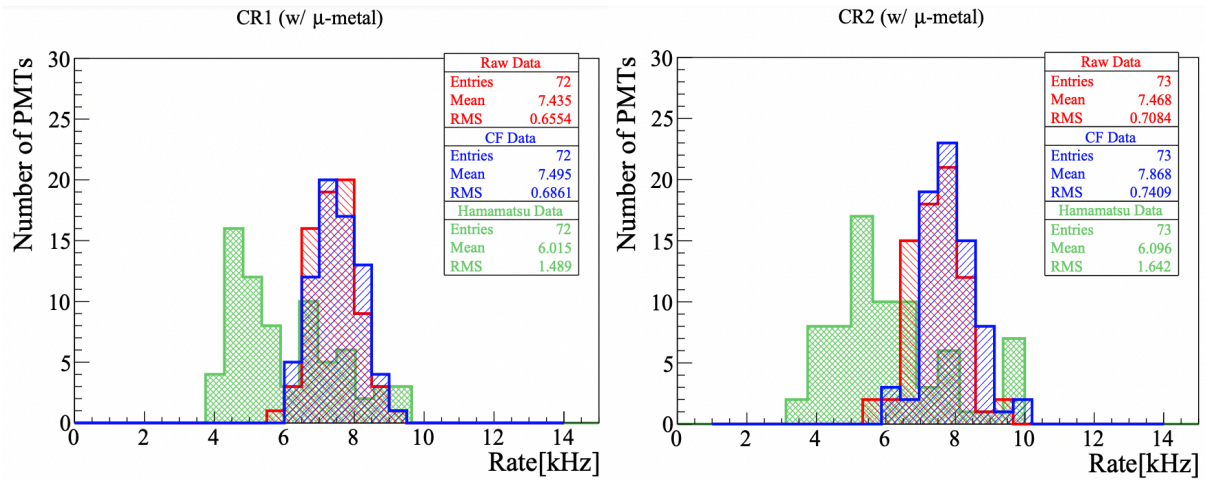


図 69 良品 PMT のダークレート補正。左: 暗室 1、右: 暗室 2。赤色: 長期測定の実データ、青色: 長期測定の補正データ、緑色: 浜松ホトニクス社の測定データ。

表 12 暗室 1 のダークレートの比較。

	Mean	RMS
Raw Data	7.435	0.6554
Corrected Data	7.495	0.6861
Hamamatsu data	6.015	1.489
		Entries 72

表 13 暗室 2 のダークレートの比較。

	Mean	RMS
Raw Data	7.468	0.7084
Corrected Data	7.868	0.7409
Hamamatsu data	6.096	1.642
		Entries 73

図 70 は柏の測定 8 本分と長期測定の良い PMT145 本分 (暗室 1 と 2 の両方を含んだもの) のデータ補正して、浜松の測定値と比較したものである。補正後の柏の測定は約 3.9 kHz、長期測定は約 7.7 kHz となった。浜松ホトニクスの測定が約 6.1 kHz であり、その差は約 3.8 kHz となった。また、浜松ホトニクスの測定との差は、約 1.6 kHz であった。

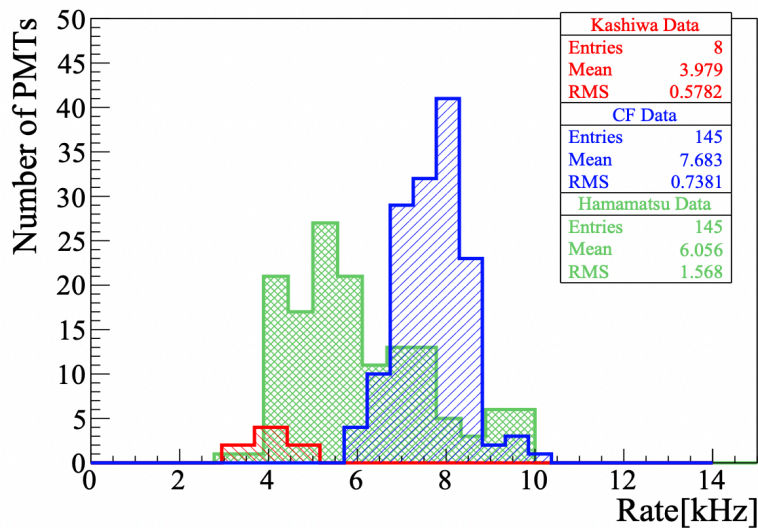


図 70 柏と HK の長期測定をダークレート補正した後の浜松ホトニクスの測定との比較。

表 14 柏と HK の長期測定をダークレート補正した後の浜松ホトニクスとの比較。

	Mean	RMS
Kashiwa Measurement (Entries 8)	3.979	0.5782
Long Measurement (Entries 145)	7.683	0.7381
Hamamatsu Measurement (Entries 145)	6.056	1.568

6 結論

現在ハイパーカミオカンデに向けて PMT の量産・納入が進められており、納入時には製品に不良品がないか良品、不良品の検査を行なっている。また、PMT 性能についても要求項目も安定した性能を満たしているかを調査するため 2 週間のモニターを行っている。現在進行中の長期測定でのダークレートは、納入前の柏の測定とは一致しておらず、約 7 ~ 8 kHz と高い値となっている。

大口径の PMT は、地磁気の影響レベルの磁場についても影響を受けやすく考慮する必要がある、長期測定場所でも残留磁場が残っているため PMT に与える磁場の影響を調査した。SK 坑内にある LabB の磁場補償コイルを用いて任意の磁場による PMT の収集効率を測定した。各 X、Y、Z 軸に対して ± 1000 mG レベルまで磁場を変化させて、それぞれの磁場における収集効率を測定した。3 軸の磁場のそれぞれ独立成分による磁場が PMT に与える影響は、HK で許容される磁場の範囲内 (± 100 mG 以内) で収集効率の大きな低下は見られなかった。

磁場 ± 1000 mG レベルまでの調査においては、3 軸磁場に対しての影響は異なり PMT 光電面の鉛直方向の Z 成分は、約 300 mG 付近まで収集効率の低下率が低かった。一方で X、Y 軸の光電面水平方向では、Z 軸と比較して磁場の影響を受けやすく収集効率の低下率に影響が見られた。また、各軸 HV 依存性についても LD ヒットレートとダークレートにおいて測定を行った。電圧を変化させた 400 V 間で、LD ヒットレートは最大約 23%、ダークレートは最大で約 20% の差があった。基準電圧である 1740 V (EBB 値) と各 HV との割合においては、HK で許容される磁場の範囲内 (± 100 mG 以内) で最大 3% のずれが見られた。

柏と長期測定との収集効率の影響を調べるため、まず 1740 V の基準電圧で補正係数を調査した。補正係数は、3 軸磁場をかけて測定した値から算出したものと 3 軸の独立磁場の収集効率を掛け合わせて算出したものの 2 通りで算出した。これらの 2 つの補正係数は、柏の測定と長期測定場所の磁場を使ったもので比較を行い、ほぼ近い値となった。また、各電圧における補正係数の算出も行った。柏の補正係数はほとんどの箇所でも 9 割以上となったが、一部の局所的に高い磁場がある場所では補正係数が 8 割のものも見られた。長期測定の補正係数は、 μ -metal の取り付け前後のそれぞれで補正係数を算出した。暗室 1 と 2 の両方で μ -metal の取り付け後の補正係数の向上が見られた。特に暗室 2 では約 40% 向上した。

算出した補正係数を用いて柏の測定と長期測定について磁場補正を行った。補正前後における差は、柏の測定で約 0.14 kHz、長期測定の暗室 1 では約 0.06 kHz、暗室 2 では約 0.40 kHz となった。浜松ホトニクスと長期測定の差は、暗室ごとに補正した結果、暗室 1 で約 1.48 kHz、暗室 2 で約 1.77 kHz であった。

柏の測定 8 本分と長期測定の良品 PMT145 本分のデータ補正して、浜松の 145 本分の測定値と比較を行った。柏の測定は約 3.98 kHz、長期測定では約 7.68 kHz となり、その差は約 3.7 kHz であった。浜松ホトニクスの測定値は約 6.06 kHz であり、長期測定との差は約 1.6 kHz であった。

以上より、柏の測定と長期測定の値が一致しない理由は、各場所での磁場の値では説明がつかなかった。また、浜松ホトニクスでの測定でダークレートが約 6 kHz であることも、今回の磁場補正では説明がつかなかった。

7 今後の展望

磁場による影響調査において ADC のセットアップは、完了しているので電荷分解能の測定も行い磁場の影響で 1 光電子の分解能やゲインの安定性がどのくらい低下するのかを調査する予定である。

現在の長期測定におけるダークレートが浜松ホトニクスでの測定との間で一致していない理由の調査をするため、一度に PMT100 本を測定できる環境が構築され測定も開始されている (図 71)。ここの測定場所においても残留磁場が残っており、100 箇所において磁場測定も完了している。測定した磁場の値などについては、付録 C を参照されたい。

今回の磁場の影響調査で補正係数は、3 軸磁場をかけて測定した値から算出したものと 3 軸の独立磁場の収集効率を掛け合わせて算出したものの 2 つで、ほとんど一致していたことを確認した。これにより、3 軸のそれぞれ独立の磁場の収集効率の分布から X、Y、Z 軸を掛け合わせた補正係数をダークレートの磁場補正に使うことができる。したがって、3 軸の収集効率から補正関数モデルを作成して、今後、これまでの長期測定のパ MT16 本に加えて、PMT100 測定の評価に磁場補正を適応させて磁場の影響によらないダークレートの評価を行う予定である。また、この補正関数モデルは、HK 中の磁場補正にも使用することができるため、これについても今後進めていく予定である。



図 71 100 本 PMT 測定 of 暗室内の様子。

8 付録

付録 A SK の磁気補償

SK PMT においても残留磁場を打ち消すためにタンク側面に磁気補償コイルが設置されている。図 72 は、SK に取り付けられているコイルの模式図と各コイルに流れる電流値であり、26 セットのコイルがタンクの周りを取り付けられている。図 73 は、磁場補償した後の全体の磁場と各軸における磁場の値で、全体平均で約 32 mG まで磁場を抑えることができています。

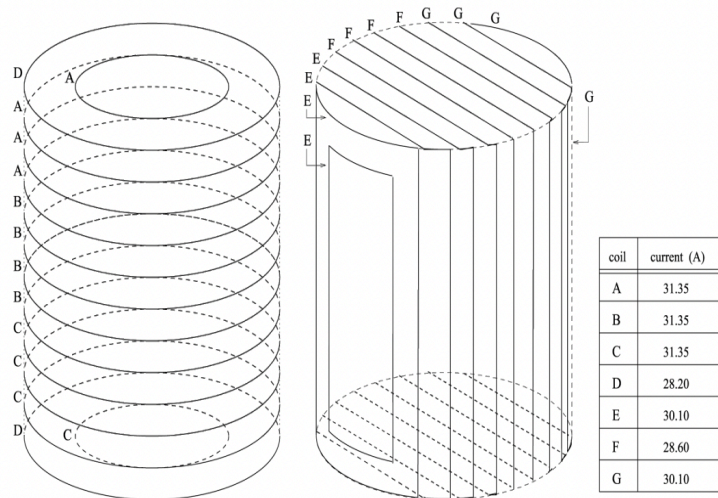


図 72 SK で用いられている磁気補償コイル。

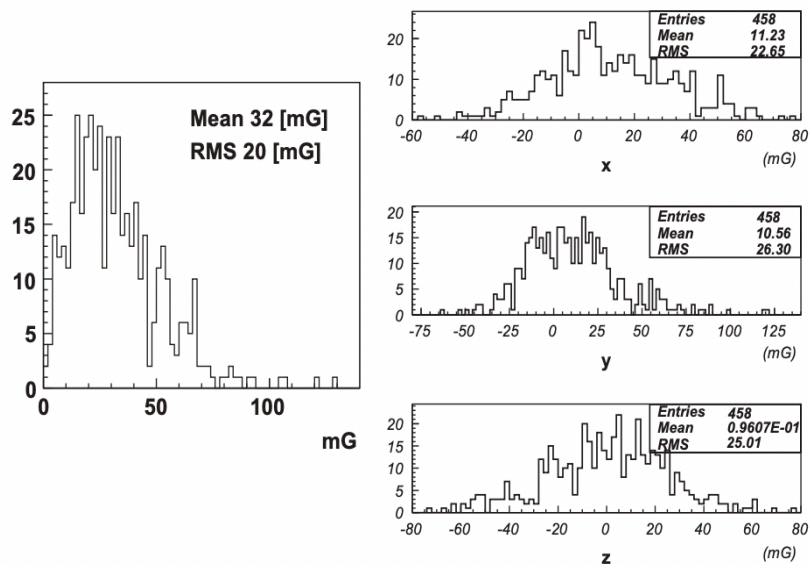


図 73 SK で磁気補償後の残留磁場。

付録 B LabB のセットアップにおけるノイズ調査

LabB の 3 次元補償コイルを用いて磁場に対する影響において、収集効率を測定していた際にレート的时间依存性を含むような分布が確認された。安定したレート測定できるのであればそのまま測定していけば良かったが、不安定な場合この影響調査をしなければならない。以下の図 74 に時間変動分布を示す。赤い領域より右側 (正の磁場領域) が通常磁場をかけた時は極性なしで、赤い領域の左側 (負の磁場領域) は通常とは逆方向磁場をかけた時は極性ありである。測定は、極性を変更する前後 2 セットに分けて測定した。その結果、2 セット間でダークレートの時間変動が確認された。これは、収集効率などを評価していく上で大きな不定性となり詳細な測定ができない。

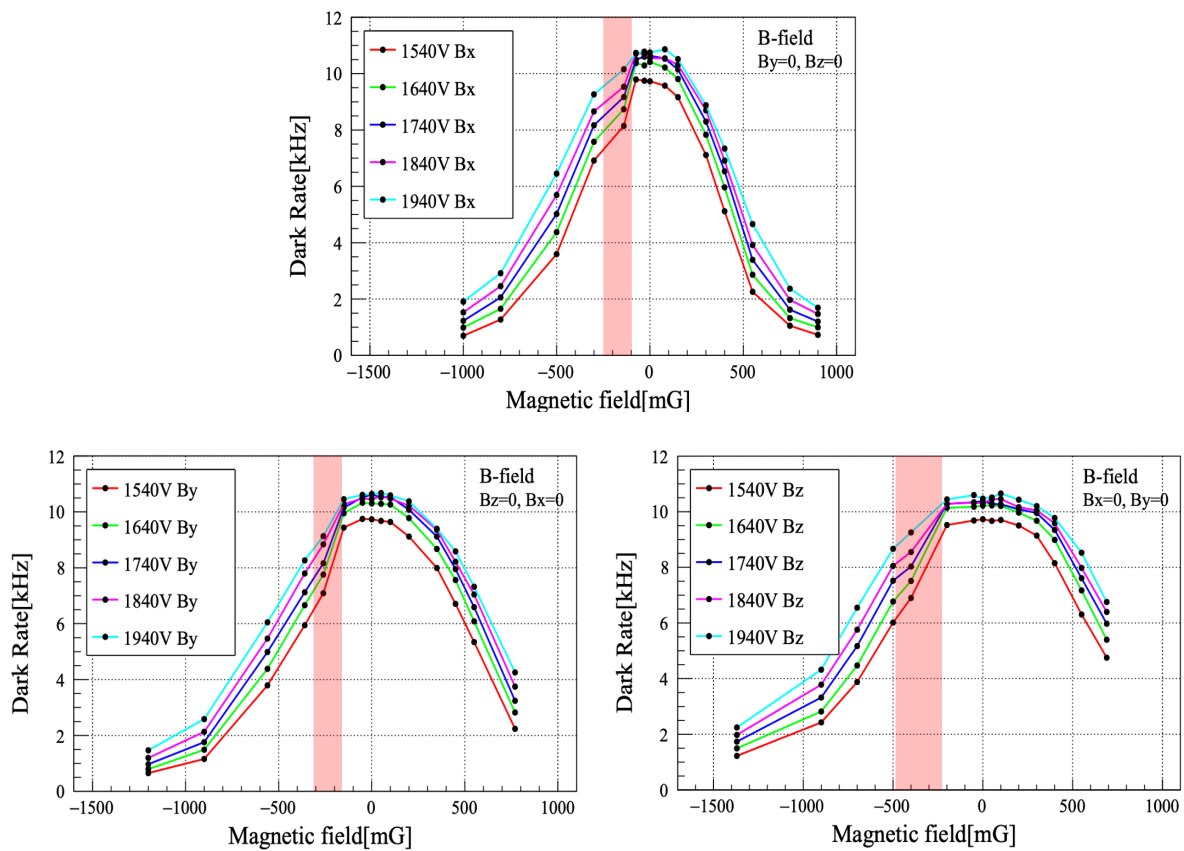


図 74 時間依存性を含んでいると思われる磁場に対するダークレート。

また図 75 で、LD 光源からのヒットレートについても測定したのでダークレートとの相関も見
た。LD ヒットレートのについては、式 (4.3.2) より LD ヒットレートからダークレートを差し引い
たものである。X、Y、Z 軸とも綺麗な直形にはならず、極性有り無しで部分的にズレが生じている
ような結果となった。

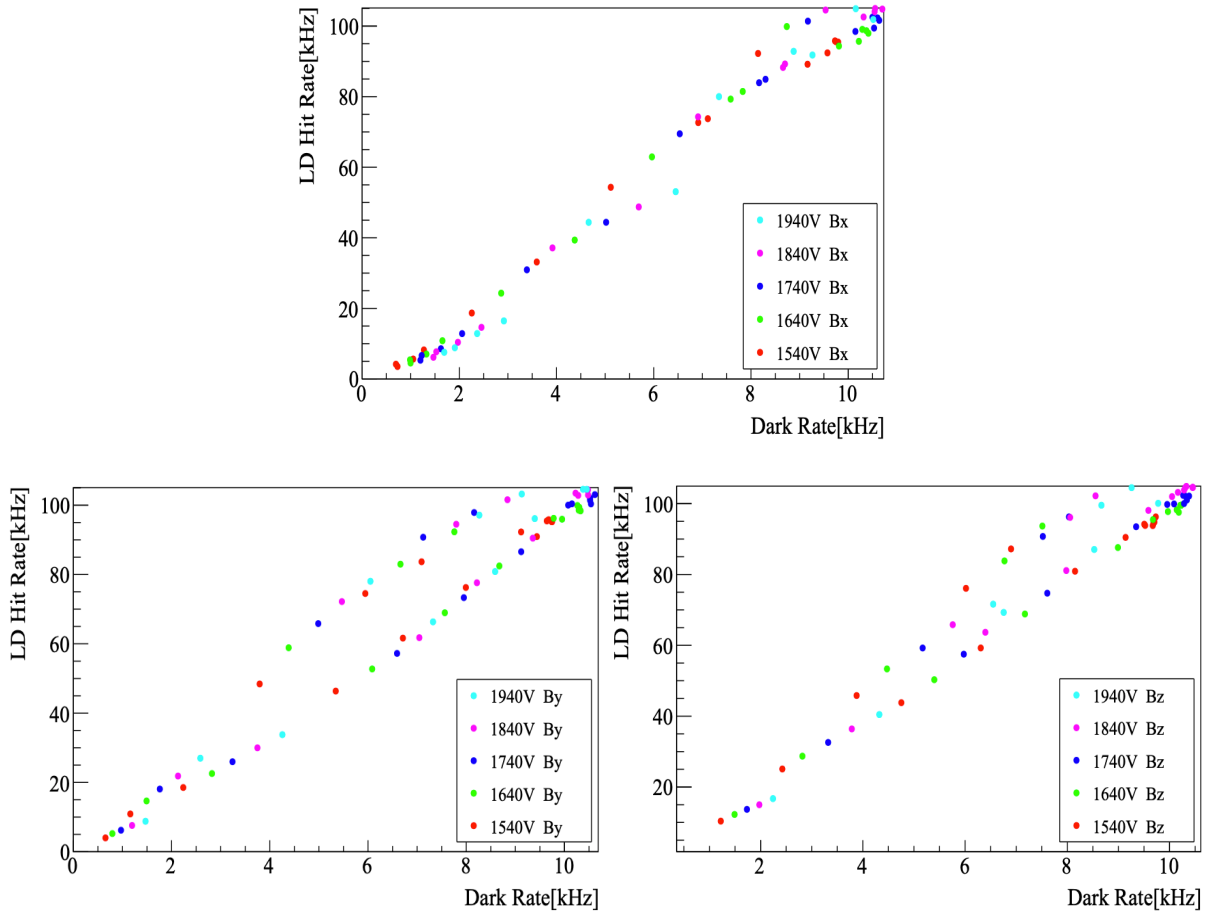


図 75 時間依存性を含んでいると思われる LD ヒットレートとダークレートの相関関係。

時間差でレートが変動することより何らかのノイズ源が存在すると思われる。ここで磁場下での
レート測定をして、磁場の影響によらないダークレートの安定性を調べた。

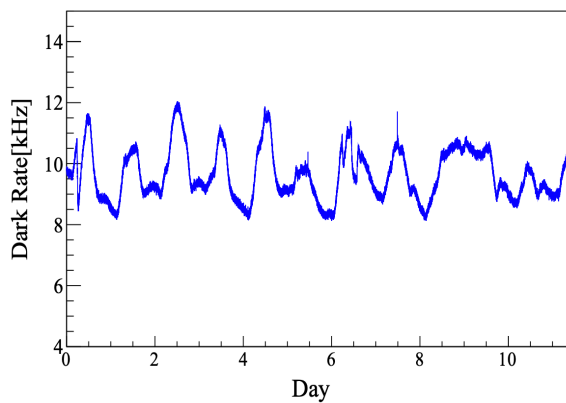


図 76 ノイズ対策前のダークレート。

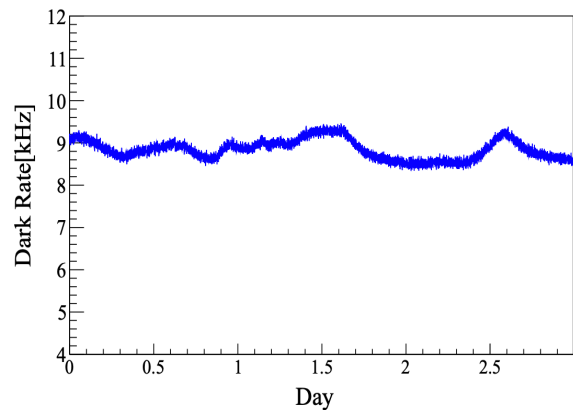


図 77 ノイズ対策後のダークレート。

図 76 は、約 2 週間近くダークレートを測定したものになる。周期的なノイズが含まれ不安定な結果となり、最大で約 3.9 kHz のレート変動の差が見られた。この状況での磁場に対する影響調査で安定したダークレート収集効率の測定をすることは難しくノイズを落とす必要があった。そのためノイズ対策として、暗室に向けて大光量光源を当てたりし光漏れ箇所がないか確認し対策を行なった。ノイズ対策後のレートは、図 77 で変動幅は最大で約 1.1 kHz となり対策前に比べて改善された。

PMT には、3.1.2 で述べたように温度依存性があることが知られている。現在の LabB での磁場の影響測定においても、温度の大幅な変化の有無によって結果が大きく変わってくるため関係性の調査を行なった。図 78 は、ある一定期間の温度とダークレートを測定したものである。温度変動はほとんどなく、LabB の温度は約 28 ~ 29°C でほぼ一定であった。また、ダークレートと温度の相関関係については図 78 に示す通り、温度変化が小さく優位な温度依存性が確認できなかった。約 1 ~ 2 kHz のレート変動は、温度の相関よりも他からの影響であると考えられる。

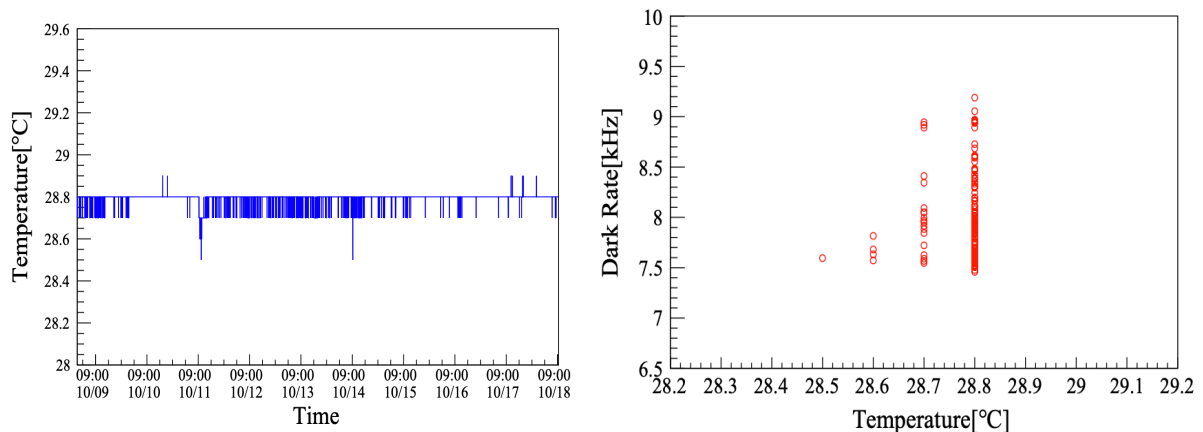


図 78 LabB の温度依存性。左: LabB における温度の時間変動。右: ダークレートと温度との相関。

上記でノイズ対策と温度依存性を調査を行ったが、本研究の磁場の影響調査をするにあたり、収集効率が精度良く測定できているかを保証しないとイケない。そのため、ダークレートの磁場依存

性を約 3 ~ 5 時間ごとに 1 日間の測定を行った。図 77 のノイズ対策後に関しても、ダークレートの時間変動がみられた。そこで収集効率を測定する際に、この時間変動ノイズがダークレートの最大値と最小値それぞれで収集効率に影響を及ぼしていないかを確認した。

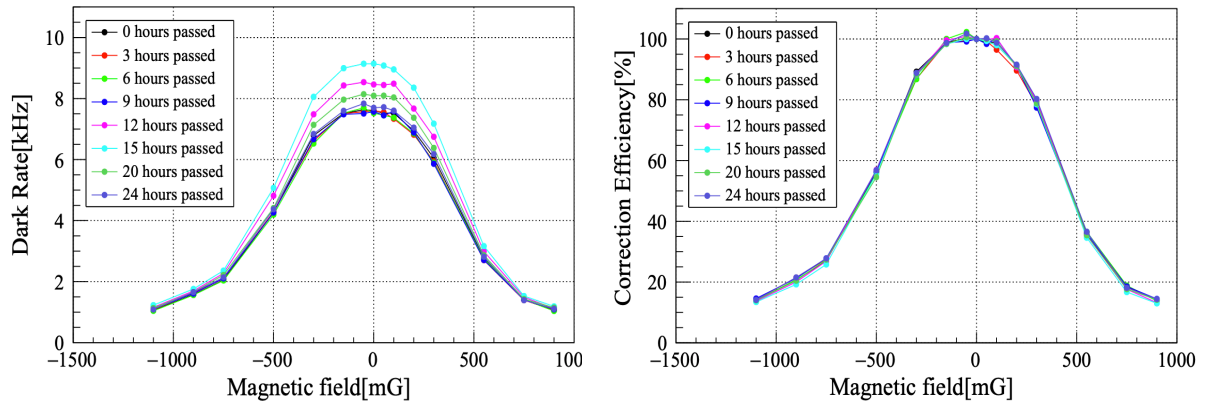


図 79 磁場に対する影響の 1 日測定 (X 軸分布)。左: ダークレート、右: 収集効率。

図 79 は、ダークレートとその収集効率である。0 時間経過から 3 ~ 5 時間ごとにダークレートを測定したものである。ダークレートにおいては 12 時間経過した頃からレートの変動が見られた。一方で、収集効率はどの時間帯で測定しても約-1000 ~ 1000 mG のレベルでは分布に差は見られなかった。

これより、磁場に対する影響調査では、極端に収集効率の分布が崩れることなく測定することができることを確認した。

付録 C PMT100 本測定の場合における磁場の影響

現在 PMT のダークレートノイズや不良率の調査を行うため PMT16 本測定に加えて、100 本の PMT 測定も行なっている。測定場所は部屋 2 つ分 (1 室あたり 8.3 m × 7 m 程度) 使用して、その中に 100 本の PMT を設置して測定を行っている。部屋の中の壁や隙間などには全てブラックシートなどが貼られて遮光対策も行われている。PMT 配置は図 80 に示す。100 本 PMT 測定での磁場の影響を調査するため、PMT を 100 箇所において 3 軸磁場の値を目視で測定した。使用した磁場測定器は、3.6 の図 41 にあるガウスメータを用いて測定を行った。測定方法は、図 81 のようにガウスメータをセットして測定を行った。

100 本 PMT 測定では、PMT の収納箱を用いる。収納箱の蓋を取った状態で PMT 台座をセットしてそこに PMT の光電面を下向きにして測定を行う。よって、磁場を測定する際にも PMT の収納箱を使い測定を行った。箱の正面と横方向がなるべく PMT 各測定場所の中心にくるように設置して、PMT 台座の中心にガウスメータを取り付けて 3 軸方向の磁場の測定を行った。磁場の定義は、PMT16 本の長期測定での磁場の定義と一致するように決めて測定を行った。図 82 に 100 本分の PMT の 3 軸磁場の値を示す。

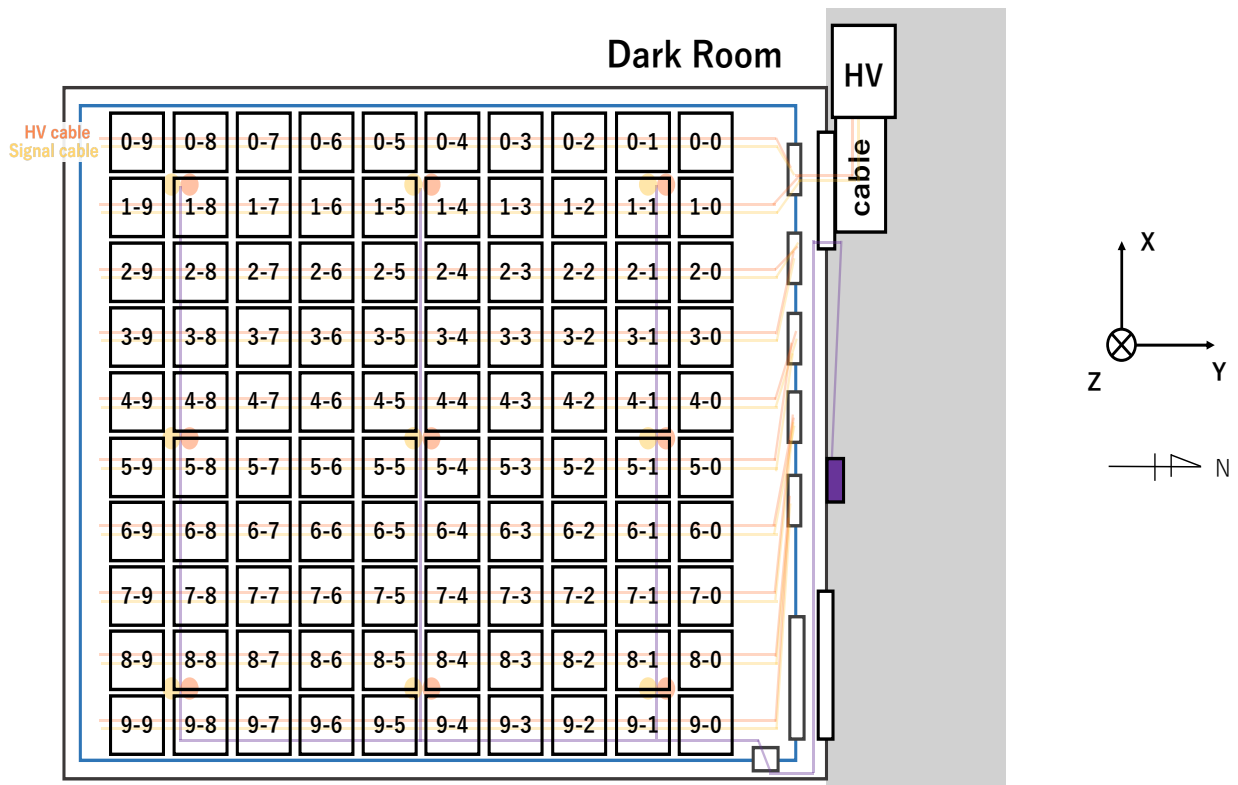


図 80 100 本 PMT 測定場所での PMT 配置図と磁場測定で定義した方角。



図 81 ガウスメータの設置の様子。左: 正面からの設置位置、右: 横方向からの設置位置。点線が中央の位置を表している。

No.	(B_x, B_y, B_z) [mG]	No.	(B_x, B_y, B_z) [mG]	No.	(B_x, B_y, B_z) [mG]	No.	(B_x, B_y, B_z) [mG]	No.	(B_x, B_y, B_z) [mG]
0-0	(-130, 183, 278)	1-0	(-118, 173, 279)	2-0	(-113, 158, 292)	3-0	(-110, 148, 291)	4-0	(-84, 152, 290)
0-1	(-146, 184, 299)	1-1	(-128, 167, 292)	2-1	(-109, 163, 299)	3-1	(-93, 156, 297)	4-1	(-91, 151, 296)
0-2	(-154, 161, 303)	1-2	(-127, 164, 292)	2-2	(-115, 160, 298)	3-2	(-100, 160, 300)	4-2	(-92, 158, 299)
0-3	(-156, 146, 302)	1-3	(-126, 158, 295)	2-3	(-113, 161, 300)	3-3	(-98, 164, 303)	4-3	(-105, 158, 303)
0-4	(-142, 144, 305)	1-4	(-124, 152, 299)	2-4	(-115, 156, 305)	3-4	(-109, 160, 307)	4-4	(-104, 165, 312)
0-5	(-125, 145, 296)	1-5	(-114, 162, 299)	2-5	(-107, 167, 309)	3-5	(-112, 165, 312)	4-5	(-109, 167, 319)
0-6	(-108, 149, 288)	1-6	(-107, 161, 300)	2-6	(-103, 170, 314)	3-6	(-110, 166, 322)	4-6	(-108, 173, 328)
0-7	(-89, 166, 294)	1-7	(-101, 169, 305)	2-7	(-105, 171, 320)	3-7	(-108, 177, 327)	4-7	(-117, 170, 343)
0-8	(-91, 179, 310)	1-8	(-97, 179, 315)	2-8	(-99, 178, 328)	3-8	(-101, 179, 335)	4-8	(-101, 179, 356)
0-9	(-92, 187, 327)	1-9	(-94, 182, 324)	2-9	(-110, 180, 331)	3-9	(-102, 173, 350)	4-9	(-102, 173, 363)
5-0	(-94, 150, 287)	6-0	(-101, 148, 292)	7-0	(-98, 153, 304)	8-0	(-95, 150, 302)	9-0	(-89, 152, 297)
5-1	(-96, 147, 293)	6-1	(-100, 149, 298)	7-1	(-99, 147, 307)	8-1	(-88, 152, 308)	9-1	(-91, 149, 299)
5-2	(-97, 150, 300)	6-2	(-97, 152, 305)	7-2	(-97, 150, 308)	8-2	(-88, 152, 310)	9-2	(-93, 143, 305)
5-3	(-97, 154, 308)	6-3	(-99, 156, 308)	7-3	(-96, 155, 311)	8-3	(-94, 150, 311)	9-3	(-96, 142, 312)
5-4	(-100, 160, 318)	6-4	(-95, 160, 315)	7-4	(-97, 160, 314)	8-4	(-97, 157, 315)	9-4	(-96, 151, 319)
5-5	(-98, 168, 326)	6-5	(-97, 165, 320)	7-5	(-102, 160, 319)	8-5	(-102, 157, 321)	9-5	(-102, 154, 325)
5-6	(-106, 170, 334)	6-6	(-100, 170, 329)	7-6	(-104, 165, 326)	8-6	(-105, 163, 327)	9-6	(-107, 156, 333)
5-7	(-102, 177, 339)	6-7	(-103, 174, 337)	7-7	(-115, 170, 329)	8-7	(-112, 166, 334)	9-7	(-114, 158, 341)
5-8	(-103, 180, 348)	6-8	(-101, 189, 337)	7-8	(-119, 179, 330)	8-8	(-118, 180, 337)	9-8	(-123, 161, 349)
5-9	(-88, 181, 363)	6-9	(-100, 193, 341)	7-9	(-123, 192, 333)	8-9	(-126, 192, 338)	9-9	(-137, 171, 354)

図 82 PMT100 本の各場所における 3 軸磁場。

表目次

1	荷電粒子のエネルギー閾値 E_{th}	5
2	図 26 の値。左: SK PMT(R3600)、右: HK PMT(R12860)。(浜松ホトニクス社提供)	23
3	量産品 PMT の性能要求項目の一部。	29
4	長期測定での量産品 PMT の測定値平均。	31
5	各測定位置の 3 軸磁場。	38
6	柏と HK の長期測定と浜松ホトニクス社のダークレート。	49
7	柏での測定場所 Rack No.5、3、1、0、2、4 の磁場値とその磁場に対して算出された 2 通りの補正係数。	52
8	柏での測定場所 Rack No.11、9、7、10、8、6 の磁場値とその磁場に対して算出された 2 通りの補正係数。	52
9	μ -metal の取り付け前の PMT16 点の各補正係数値表。	53
10	μ -metal の取り付け後の PMT16 点の各補正係数値表。	55
11	柏の測定値の補正前後での比較。	58
12	暗室 1 のダークレートの比較。	59
13	暗室 2 のダークレートの比較。	59
14	柏と HK の長期測定をダークレート補正した後の浜松ホトニクスとの比較。	60

図目次

1	HK 検出器とその観測地。	3
2	高速荷電粒子がチェレンコフ光を放射する図。赤: 荷電粒子の進行方向. 青: 分極後に放出されるチェレンコフ光.	4
3	HK の再構成されたイベント、左: 電子によるイベント、右: ミューオンによるイベント。	6
4	HK のタンクの詳細図。	7
5	50 cm 口径の B&L PMT。	8
6	左: Mluti-PMT、右: Mluti-PMT 内部の構造。	8
7	Mluti-PMT による信号検出のシミュレーションディスプレイ。	9
8	左:8 cm 口径の OD PMT、右:WLS プレート。	10
9	PMT 架構への PMT の取り付け状態。PMT 間にブラックシートが取り付けられている。	11
10	アクリルカバーとステンレスカバーを取り付けた状態での PMT。	11
11	タンク座標の定義。	12
12	。タンクに巻かれるコイル。左: タンクに水平方向のコイル、右: タンクの鉛直方向のコイル。 [5]	13
13	最適電流を流した時の ID PMT の鉛直方向の磁場分布。 [5]	13
14	コイルの設置間隔でタンク内磁場の向きが影響を受ける様子。上段図: 5 m 間隔、下段左図: 4 m 間隔、下段右図: 2 m 間隔。コイル間隔が狭くなるほど $y=\pm 35$ m 付近の磁場の向きが改善されており、4 m と 2 m は、5 m と比べて Height=35 m 付近の磁場の向きも改善されている。	14
15	X、Y ボソンが媒介する $p \rightarrow e^+\pi^0$ 崩壊のファインマンダイアグラム。左: X ボソン過程、右: Y ボソン過程。	16
16	HK で 10 年間の観測がされた時に期待される $p \rightarrow e^+\pi^0$ 過程の分布。左: $p \rightarrow e^+\pi^0$ の事象選択条件を通過したイベントの全運動量分布。右上段: 陽子の運動量が 100 MeV/c 未満の領域とした時確認される信号 (自由陽子の領域)、右下段: 陽子の運動量が 100 ~ 250 MeV/c の領域とした時確認される信号 (酸素原子核中でフェルミ運動量を持つ陽子を考慮した時の領域)。点は期待される陽子崩壊信号。網掛けは大気ニュートリノによるバックグラウンドである。ここでの陽子の寿命は、 1.7×10^{34} 年と仮定されている。 [5]	16
17	$p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 崩壊のファインマンダイアグラム。	17
18	HK で 10 年間の観測がされた時に期待される $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 過程の分布。左: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ の先行ガンマ線の探索で確認されたミューオンに対しての再構成された運動量分布。右上段: 候補事象で再構成された K の不変質量。点は期待される陽子崩壊信号。網掛けが大気ニュートリノによるバックグラウンド。ここでの陽子の寿命は、 6.6×10^{33} 年と仮定されている。 [5]	17

19	。左: SU(5) model で予言される相互作用の結合領域、右: SUSY SU(5) model で予言される相互作用の結合領域。 [4]	18
20	3σ の優位度で発見できる可能性の比較。左: $p \rightarrow e^+\pi^0$ 、右: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ 。赤色: HK、水色: DUNE、紫色: JUNO、灰色: SK。 [5]	18
21	開発時の SK PMT と HK PMT の電荷分布。 [5]	19
22	開発時の SK PMT と HK PMT の電子走行時間。 [5]	20
23	SK 内で評価された SK PMT と HK PMT の 1 光電子分解能の分布。左: 電荷分解能、右: 時間分解能。 [6]	20
24	量子効率、青色: 高量子効率 (HQE) 化された HK PMT、黒色破線: SK で使用されている PMT。 [5]	22
25	磁場をかけた際の電子軌道 (X 軸成分の磁場時)。細い線が 0 mG の無磁場時の軌道を示している。太い線が磁場をかけた時どのように軌道が変化しているかを示している。(浜松ホトニクス社提供)	22
26	磁場に対する相対収集効率。左: SK PMT(R3600)、右: HK PMT(R12860)。磁場の方向は、下の PMT のダイノード配置図で決まっており① - ⑤で対応している。(浜松ホトニクス社提供)	23
27	SK PMT と HK PMT の検出効率。横軸: 受光面上の光入射位置。縦軸: 光検出効率相対比。実線と破線はダイノードに対して 2 方向からの測定である。	24
28	ダイノード構造。左: R3600 のベネシアンブラインド型 PMT。右: R12860 の B&L 型 PMT。青色破線はダイノード開口部の金属メッシュを表している。	24
29	改良された B&L 型ダイノード。(浜松ホトニクス社提供)	25
30	光電面から放出される電子軌道。左: KamLAND PMT、右: HK PMT。(浜松ホトニクス社提供)	26
31	非一様性の大きいダイノード断面方向での KamLAND と HK PMT のシミュレーションで得た出力一様性の分布。(浜松ホトニクス社提供)	26
32	HK PMT の性能を満たしたダーククレート。左: ダーククレートの安定性、右: ダーククレートの平均値。	27
33	目視検査。左: 傷の例、右: 異物の例。	28
34	簡易検査で測定される性能。左: 信号、右: ゲイン。	28
35	長期測定のセットアップ。	30
36	長期測定の測定の暗室内における PMT インストール時のセットアップ。	30
37	測定環境を構築する初期のレート測定。左: 測定暗室内の様子、右: レート測定値。	31
38	1 期間分の PMT16 本のダーククレートの安定性。左: 暗室 1、右: 暗室 2。	32
39	1PMT における電荷分解能。左: ゲイン、右: 電荷分布。	32
40	1PMT における時間分解能。左: TT、右: TTS。	33
41	磁場測定器、TRIAXIAL FLUXGATE MAGNETOMETER FGM-4DTAM。	33
42	暗室内部の 16 点における X、Y,Z 軸方向の磁場とその 3 軸方向と方角。	34
43	左: 磁場削減対策後の μ -metal セットアップ。右: 暗室内部のセットアップ	35
44	μ -metal を PMT に取り付けた場合の暗室内部の 16 点の磁場。	35

45	3次元コイルのセットアップ	37
46	図 45 の詳細。(コイルの長さ、電流の流れる様子。コイルで囲まれているブラックシート内部の PMT がセットされている様子と 3 軸の定義を示している。ダイノードの軸の定義の詳細は、図 50 に示している。)	37
47	暗室内の PMT 設置台	38
48	コイルに電流を流した時の対応する磁場	39
49	測定回路のセットアップ。	39
50	3 軸の定義, 左:PMT 側面図, 右:PMT 平面図.	40
51	閾値ごとのダークレートの変動	42
52	3 軸におけるヒットレート測定による収集効率。左: ダークレート、右: LD ヒットレート。一軸方向に磁場をかけて測定している時、他の 2 軸では 0 mG としている。	43
53	3 軸方向の独立磁場におけるレート分布の ± 100 mG で拡大したもの。左: ダークレート、右: LD ヒットレート。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。	43
54	3 軸における収集効率のシミュレーションと測定値の比較。上段: 浜松ホトニクス のシミュレーション結果、下段左: ダークレートの測定値、下段右: LD ヒットレートの測定値。	44
55	X、Y、Z 軸のダークレートの HV 依存性。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。	45
56	ダークレートにおける X、Y、Z 軸の 1740 V の時の収集効率との割合。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。	46
57	X、Y、Z 軸の LD ヒットレートの高電圧依存性。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。	47
58	LD ヒットレートにおける X、Y、Z 軸の 1740 V の時の収集効率との割合。上段: X 軸方向、下段左: Y 軸方向、下段右: Z 軸方向。紫色の点線は $\pm 2\%$ 以内を表している。	48
59	柏と HK の長期測定と浜松ホトニクスのダークレートの比較。	49
60	各 PMT のダークレートの相関関係。縦軸: 浜松ホトニクス側における測定、横軸: HK 側における長期測定。浜松ホトニクス側と HK 側で測定された良品 PMT の測定プロット。	50
61	柏での測定のセットアップ。	51
62	表 7 と表 8 からの 2 通りの補正係数の比較。青色は、表の (1) と対応しており、赤色は、表の (2) と対応している。	52
63	μ -metal の取り付け前の PMT16 点の各補正係数。	54
64	μ -metal の取り付け後の PMT16 点の各補正係数。	55
65	μ -metal ありとなしの場合の PMT16 点の各補正係数の比較。	56
66	柏の測定場所での電圧依存による補正係数。	57
67	長期測定場所でのダークレートの補正係数。左: 磁場削減対策前 (μ -metal なし) の補正係数。右: 磁場削減対策後 (μ -metal あり) の補正係数。	57
68	柏の測定に対してのダークレート補正。赤色: 生データ、青色: 補正後のデータ。	58

69	良品 PMT のダークレート補正。左: 暗室 1、右: 暗室 2。赤色: 長期測定の実データ、青色: 長期測定の補正データ、緑色: 浜松ホトニクス社の測定データ。	59
70	柏と HK の長期測定をダークレート補正した後の浜松ホトニクス社の測定との比較。	60
71	100 本 PMT 測定時の暗室内の様子。	62
72	SK で用いられている磁気補償コイル。	63
73	SK で磁気補償後の残留磁場。	63
74	時間依存性を含んでいると思われる磁場に対するダークレート。	64
75	時間依存性を含んでいると思われる LD ヒットレートとダークレートの相関関係。	65
76	ノイズ対策前のダークレート。	66
77	ノイズ対策後のダークレート。	66
78	LabB の温度依存性。左: LabB における温度の時間変動。右: ダークレートと温度との相関。	66
79	磁場に対する影響の 1 日測定 (X 軸分布)。左: ダークレート、右: 収集効率。	67
80	100 本 PMT 測定場所での PMT 配置図と磁場測定で定義した方位角。	68
81	ガウスメータの設置の様子。左: 正面からの設置位置、右: 横方向からの設置位置。点線が中央の位置を表している。	69
82	PMT100 本の各場所における 3 軸磁場。	69

参考文献

- [1] H. Georgi and S.L. Glashow, Unity of all elementary-particle forces, *Physical Review Letters* 32, 438-441 (1974).
- [2] T. Dealtry, Hyper-Kamiokande, *NuPhys2018* (2019).
- [3] 戸塚洋二, 素粒子物理 岩波書店 (1992).
- [4] P. Nath and P. Fileviez P'erez, Proton stability in grand unified theories, in strings and in branes, *Physics Reports* 441, 191-317 (2007).
- [5] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, *Hyper-Kamiokande Design Report* (2018).
- [6] 西村康宏, ハイパーカミオカンデの大口径光検出器開発 (2021).
- [7] ZHAO Chang-Hao, *TsinghuaUniversity* Measurement of Magnetic Field and Magnetic Shielding's Influence on Relative Counting Efficiency of Hyper-Kamiokande's Box-and-Line PMT.
- [8] 福田 大輔, ハイパーカミオカンデにおける新型光検出器の開発 (2016).
- [9] 磯部 裕太, ハイパーカミオカンデ/スーパーカミオカンデに向けた自動線源ポジショニング装置の改良, それを用いたデータ収集および解析 (2019).
- [10] 塩沢知晃, ハイパーカミオカンデに向けた新型 20 インチ PMT からのラドン放出率測定 (2020).
- [11] 浜松ホトニクス株式会社, 光電子増倍管-その基礎と応用- 第 4 版 (2017).

謝辞

本論文を執筆するにあたり担当指導教員である奥村公宏准教授には、研究室のミーティングや学会の資料作成の際にさまざまなサポートをして頂いたり、論文作成の際には多数の助言を頂きました。慶應義塾大学理工学部の西村康宏准教授には、PMT 測定の設定アップの組み方を教えて頂いたり、性能や手法についてさまざまなアドバイスを頂きました。また、学会前には発表資料についてさまざまなコメントをして頂きました。田代拓也特任助教には、測定セットアップのことに教えて頂いたり、長期測定の作業をする際にもモジュールのことに色々と教えて頂きました。そして、京都大学大学院理学研究科の Christophe Bronner 研究員には、長期測定の作業をする際に PMT インストール作業からモジュールに関してのこと、データ取得の操作など様々なことについて教えて頂きました。技術職員の猪目祐介さんには長期測定の作業の際に、電子機器、電気関係のことに色々と教えて頂きました。

また、ハイパーカミオカンデ日本グループの FD1 の皆様には、ミーティングの際に測定のことに助言を頂いたり、学会前には発表練習を見て頂き様々なアドバイスを頂きました。大変お世話になりました。

神岡に出張に行った際には、中野佑樹特任助教、竹本康浩特任助教にはよく気にかけて頂きました。そして、D1 の三木信太郎さんには PMT の長期測定作業においていつも大変お世話になりました。また、発表前には色々と気にかけて頂きました。D1 の兼村侑希さんは、普段なかなか会う機会は少なかったですが、神岡で会った際や食事の場では、いろいろ話して頂きとても楽しかったです。

M2 の吉田隼輔くんはニュートリノセンターの同期として1年の初めから大変お世話になりました。講義のことに議論したり、一緒に PMT の長期測定の作業を行ったり、PMT の測定問題について議論したことはとても楽しかったです。M2 の柏木ゆりさんとは、学会前にニュートリノのことに一緒に考えたことがとても良い思い出になっています。また、机に置いてあったいちごのドライフルーツを河内くんと一緒に少し食べてしまいました。ここにお詫び申し上げます。M2 の金島遼太さんとは FPGA 講習会の時、名古屋でご飯を食べたり土岐で買い物をして服や量り売りのチョコレートを買ったことはとても楽しかった思い出になっています。また、神岡で作ってくれたカレーはとても美味しかったです。手作りのケーキを食べるのを逃したことは自分の中で心残りとなっています。M2 の柴勇斗さんとは、自分が富山の店で買ってきた外国のお菓子で盛り上がったことが楽しかったです。また、金島くんの料理作りにも加わっていて意外な一面が見られました。M2 の清水光太郎さんは、自分が神岡にいる時よく声をかけてくれ、冬に旬の海鮮を食べる計画はとても楽しかったです。また、夜遅くに将来のことを語ったりした時のことはとても良い思い出になりました。

M1 の神長香乃さんとは9月の終わり頃に初めて対面で会い、それまではゼミやラインなどで初対面ではないようなやりとりをするという不思議な仲でしたが、神岡で会って話をした際にはとても楽しかったです。また自分が荷物を忘れた時に知らせてくれたり、バス停で来るか来ないかわからないバスと一緒に待ってくれたりとても親切にして頂きました。M1 の河内弘輝さんは、普段からとてもフレンドリーな感じで接してくれました。偶然茂住でお互いランニングをしていた際に、一緒に走ったことはとても良い思い出です。

また、ニュートリノセンターの秘書の眞島さん、神岡事務の石倉さん、前田さん、吉田さんには、

いつも出張の手続きなどで大変お世話になりました。

上記の先生方や学生、スタッフの皆様にご心より感謝申し上げます。

また、ここに挙げられなかった宇宙線研究所、神岡宇宙素粒子研究施設関係の先生や学生、スタッフの皆様にも研究生活で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

最後に、日頃から生活面において支えてくださってきた家族に感謝いたします。