

卒業論文

ハイパーカミオカンデ光電子増倍管の  
出力線形性向上

指導教員

西村康宏准教授

慶應義塾大学理工学部物理学科西村研究室 4年

藤澤千緒里

61716180

# 要旨

ハイパーカミオカンデはニュートリノ測定や陽子崩壊の観測を行う水チェレンコフ検出器で、光検出器として内水槽に 4 万本、外水槽に 6 千 7 百本の光電子増倍管を使用予定である。ハイパーカミオカンデで目指す光子の高精度測定には光電子増倍管の入出力増倍率のわずかな非線形性も影響し得る。本研究では、ハイパーカミオカンデで使用予定の 20 インチ光電子増倍管 (R12860) 及び 3 インチ光電子増倍管 (R14374) とスーパーカミオカンデで使用している 20 インチ光電子増倍管 (R3600) において、印加電圧の違いに伴う非線形性の変動を測定した。光電子増倍管に入力される光電子数が増えていくに従い、ゲインが一度上昇するオーバーリニアリティが見えたのち飽和して大きく減少することがわかった。そのカーブのピーク位置や大きさ、飽和部分の下がり方は光電子増倍管の種類によって異なり、さらに同じ光電子増倍管でも印加電圧を変えると変化することが確認できた。20 インチ光電子増倍管において、入力光電子数の代わりにゲインが一定であるとして補正した出力電荷数に対する線形性の変化を見ると、印加電圧を変えても重なることが示唆された。

また R3600 に比べて R12860 の非線形性が大きいことが確認され、特にこのオーバーリニアリティに個体差が存在すると出力非線形性の補正が難しくなる。このゲインの上昇は各ダイノード電極間の電位差の変動が原因だと考えられており、この影響を抑えるために電位分割回路を改良した。数値計算及び LTSpice を用いて電圧降下の影響を考慮したモデリングを行ったところ、抵抗に対してコンデンサのついていない中段の増幅率降下によりゲインに変動がみられた。その結果を元に電位分割回路に 3 通りの改良方法を試したが、現段階では線形性の改善は得られていない。さらに R12860 の非線形性の測定には、使用した 2 つの光源が点灯するタイミングの違いが影響し得ることが明らかとなった。

本研究により光電子増倍管の電荷数に対する出力非線形性は印加電圧を変えても重なることが示唆され、スーパーカミオカンデのデータの再補正が期待できる。また今後の回路改良により非線形性を改善し、ハイパーカミオカンデの光電子増倍管製造に適用することでハイパーカミオカンデでの光子計数及びエネルギー再構成精度向上が期待できる。

# 目次

要旨	2
第 1 章 導入	9
1.1. 概要	9
1.2. 背景	9
1.3. 目的	14
第 2 章 線形性の評価	15
2.1. 原理	15
2.2. 非線形性の測定	17
2.3. 測定セットアップ	20
2.4. 実験装置	21
2.5. トリガー	25
2.6. イベントセレクション	26
2.7. データ処理・解析	27
第 3 章 非線形性の測定	36
3.1. 目的	36
3.2. 測定した PMT	36
3.3. 測定手法	36
3.4. 印加電圧依存性の結果	37
3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果	43
3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果	45
3.7. 考察	47
第 4 章 モデリング	50
4.1. 目的	50
4.2. 電位分割回路	50
4.3. 反復法と直接法を組み合わせ用いた数値解析によるシミュレーション	52
4.4. LTSpice を用いたモデリング	63
4.5. 今後の展望	65
第 5 章 電位分割回路の改良	66
5.1. 目的	66

5.2.	試した回路	66
5.3.	結果	69
5.4.	今後の展望	71
第 6 章	系統誤差の見積もり	72
6.1.	考える系統誤差の種類	72
6.2.	系統誤差の大きさ	72
6.3.	適切な時間差	78
6.4.	結果	80
6.5.	今後の展望	80
第 7 章	個体差の評価	81
7.1.	目的	81
7.2.	測定手法	81
7.3.	測定した PMT	82
7.4.	結果	83
7.5.	考察	87
第 8 章	結論と今後の展望	92
8.1.	結論と今後の展望	92
	謝辞	93
	付録	94
	付録 A 第 4 章 4.3. 反復法と直接法を組み合わせ用いた数値解析によるシミュレーションのソースコード	94
	参考文献	109

# 目次

1.1	HK のタンク製造予定図 [12]	10
1.2	標準理論 [13]	11
2.1	HK PMT(R12860) の内部構造 浜松ホトニクスによる図に加筆	15
2.2	光が入射した時のブリーダー回路内での電流の流れ	17
2.3	線形性の見積もり方法	18
2.4	スイッチのセットアップ	19
2.5	一様入射させた時のセットアップ	20
2.6	磁場・位置依存性の測定のセットアップ	20
2.7	実験系概略図	21
2.8	HK 20 インチ PMT(R12860)	22
2.9	HK 3 インチ PMT(R14374)	22
2.10	HK 20 インチ PMT(R12860)	22
2.11	SK 20 インチ PMT(R3600)	22
2.12	CAEN の高電圧電源及び NIM, VME モジュール	23
2.13	松定の高電圧電源	23
2.14	ADC モジュールとデータの読み出し	24
2.15	同軸スイッチ	25
2.16	磁場シールド	26
2.17	HK PMT に取り付けられた磁場シールド	26
2.18	トリガーと出力	26
2.19	ゲートと信号	27
2.20	1 光電子分布	28
2.21	PMT 信号のヒストグラム	29
2.22	チャンネル 0	30
2.23	図 2.22 のチャンネル 8	30
2.24	チャンネル 8	31
2.25	チャンネル 8 と同じ光量で光らせた時のチャンネル 1	31
2.26	チャンネル 1	31
2.27	図 2.26 のチャンネル 9	31
2.28	EB0015(1870 V) の入出力相関 (光電子数, 和での測定)	34
2.29	EA0047(1690 V) の出力非線形性 (光電子数, 比での測定)	35
3.1	EA0047 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)	37
3.2	EA7163 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)	38

3.3	EA0047 の出力非線形性 (横軸: 電荷) . . . . .	39
3.4	図 3.3 のオーバーリニアリティの拡大 . . . . .	40
3.5	図 3.3 の飽和部の拡大 . . . . .	40
3.6	EA7163 の出力非線形性 (横軸: 電荷) . . . . .	41
3.7	HK PMT(R12860) の EA0047 と EA7163 の出力非線形性 (横軸: 電荷) . . . . .	42
3.8	図 3.7 の拡大図 . . . . .	42
3.9	SK PMT(R3600) の CD9029 の出力非線形性 (横軸: 光電子数) . . . . .	43
3.10	SK PMT(R3600) の CD9029 の出力非線形性 (横軸: 電荷) . . . . .	44
3.11	BC0592 の出力非線形性 (横軸: 光電子数) . . . . .	45
3.12	BC0592 の出力非線形性 (横軸: 電荷) . . . . .	46
3.13	図 3.12 の拡大図 . . . . .	47
3.14	SK PMT(R3600) の内部構造 提供 浜松ホトニクス . . . . .	48
3.15	HK PMT(R12860) の内部構造 提供 浜松ホトニクス . . . . .	48
3.16	SK PMT(R3600) 内の電子軌道 [9] . . . . .	49
3.17	HK PMT(R12860) 内の電子軌道 提供 浜松ホトニクス . . . . .	49
4.1	HK20 インチ PMT(R12860) の回路図 提供 浜松ホトニクス . . . . .	50
4.2	SK 20 インチ PMT(R3600) の回路図 提供 浜松ホトニクス . . . . .	51
4.3	光電子の波形の近似 . . . . .	52
4.4	EA0047 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.1 のフィッティング結果 . . . . .	56
4.5	CD9029 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.2 のフィッティング結果 . . . . .	56
4.6	EA0047 の入力光電子数に伴う出力非線形の変化 . . . . .	57
4.7	EA0047(C1-C4 なし) の入力光電子数に伴う出力非線形の変化 . . . . .	58
4.8	EA0047(全てのダイノードにコンデンサ追加) の入力光電子数に伴う出力非線形の変化 . . . . .	59
4.9	CD9029 の入力光電子数に伴う出力非線形の変化 . . . . .	60
4.10	EA0047(1690 V) の入力光電子数に伴うダイノードごとの増幅率の変化 . . . . .	61
4.11	EA0047(1690 V, コンデンサなし) の入力光電子数に伴うダイノードごとの増幅率の変化 . . . . .	62
4.12	ダイノード間を飛ぶ時間 (TOF), 浜松ホトニクスによる図に加筆 . . . . .	63
4.13	LTSpice でモデル化した EA0047 の回路図 . . . . .	64
4.14	LTSpice でモデル化した EA0047 の出力 (1-10 光電子) . . . . .	64
4.15	LTSpice でモデル化した EA0047 の出力 (100-1000 光電子) . . . . .	64
4.16	LTSpice でモデル化した EA0047 の線形性のカーブ . . . . .	65
5.1	EA0047 の回路改良 . . . . .	66

5.2	EA0047 で試した回路 . . . . .	67
5.3	EB0015 で試した光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を 1 個追加した回路 . . . . .	67
5.4	EB0015 で試した全てのダイノード間に 10 nF が入っているようにコンデンサを追加した回路 . . . . .	68
5.5	EB0015 で試した後段のダイノード間にある 10 nF のコンデンサを抜いた回路 . . . . .	68
5.6	改良した回路での非線形性の測定結果 . . . . .	69
5.7	改良した回路での非線形性の測定結果図 5.6 の拡大図 . . . . .	70
6.1	測定 1 回目 . . . . .	72
6.2	測定 2 回目 . . . . .	72
6.3	光るタイミングがあっている時 . . . . .	74
6.4	光るタイミングの時間的なずれ . . . . .	74
6.5	パルス間の時間的なずれと線形性の測定の関係 . . . . .	75
6.6	EB0015 においてパルス間の時間をずらして測定した出力非線形性 . . . . .	76
6.7	EB0015 においてパルスの光らせるタイミングのずれと各光量での系統誤差の大きさの関係 . . . . .	77
6.8	EB0015 において光量比比較の測定で測定した結果 . . . . .	79
7.1	実験のセットアップ 提供 西村康宏先生 . . . . .	81
7.2	光学系概略図 . . . . .	82
7.3	R12860 の出力非線形性 . . . . .	83
7.4	R12860 の改良後の出力非線形性 . . . . .	84
7.5	EA7622 の出力非線形性 . . . . .	85
7.6	EA7623 の出力非線形性 . . . . .	85
7.7	EB0145 の出力非線形性 . . . . .	86
7.8	測定した R12860 4 本の $O(A+B)/(O(A)+O(B))$ と $O(A)+O(B)$ の関係 . . . . .	87
7.9	R12860 改良後の 3 本の $O(A+B)/(O(A)+O(B))$ と $O(A)+O(B)$ の関係 . . . . .	88
7.10	EA7622 改良前後の $O(A+B)/(O(A)+O(B))$ と $O(A)+O(B)$ の関係 . . . . .	89
7.11	EA7623 改良前後の $O(A+B)/(O(A)+O(B))$ と $O(A)+O(B)$ の関係 . . . . .	90
7.12	EB0145 改良前後の $O(A+B)/(O(A)+O(B))$ と $O(A)+O(B)$ の関係 . . . . .	90

# 表目次

1.1	カミオカンデ実験の変遷 [1, 6, 11, 12] . . . . .	10
2.1	チャンネル番号とそれぞれの 1 カウントと電荷のおおよその対応 . . .	30
4.1	EA0047 のゲインと印加電圧の測定結果 . . . . .	53
4.2	CD9029 のゲインと印加電圧の測定結果 . . . . .	53
5.1	改良回路とゲインの関係 . . . . .	70
6.1	ピークの平均値 . . . . .	73
7.1	測定した PMT と印加電圧, ゲインの関係 . . . . .	82

# 第 1 章 導入

## 1.1. 概要

ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande: 以下, HK) は 2027 年からの観測を予定している水チェレンコフ検出器で, 光検出器として 4 万本の光電子増倍管を使用予定である. 光電子増倍管のフォトンカウンティング精度はハイパーカミオカンデでの高精度測定において重要であるが, 光電子増倍管には入射光量の増加に伴い出力を線形に増幅しない領域が存在する. ハイパーカミオカンデで使用予定の 20 インチ光電子増倍管 (R12860) 及び 3 インチ光電子増倍管 (R14374) とスーパーカミオカンデで使用している 20 インチ光電子増倍管 (R3600) において, 印加電圧の違いに伴う非線形性の変動を測定した. また, R12860 では 50-500 光電子のような低光量領域においてオーバーリニアリティと呼ばれるゲインの上昇が観測されており, オーバーリニアリティの上昇率に個体差が存在すると出力非線形性の補正が難しくなる. 本論文では, これらの影響を抑えるために各ダイノード間の電位差を決める回路である電位分割回路を改良する際に方針を定めるために行ったモデリングの試みと, その結果を元に電位分割回路を改良しその結果どの様な出力非線形が得られたかを報告する.

## 1.2. 背景

ハイパーカミオカンデは, 岐阜県飛騨市の神岡鉱山にある世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置であるスーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande: 以下, SK) の後継として同じく岐阜県飛騨市の神岡鉱山で建設が進められており, 2027 年からの観測開始を予定している. スーパーカミオカンデは, 直径 39.9 m, 深さ 41.4 m の円筒形状のタンクを 5 万トンの純水で満たされている. 建設中のハイパーカミオカンデは, 直径 68 m, 深さ 71 m の円筒形状のタンクが 26 万トンの純水で満たされている. どちらも壁面に取り付けた光検出器である光電子増倍管でチェレンコフ光を観測する. 図 1.1 はハイパーカミオカンデの製造予定図で, 歴代のカミオカンデ実験は図 1.1 のような円筒形状のタンク内に純水を入れ, 壁面に取り付けた光電子増倍管で測定を行っている.

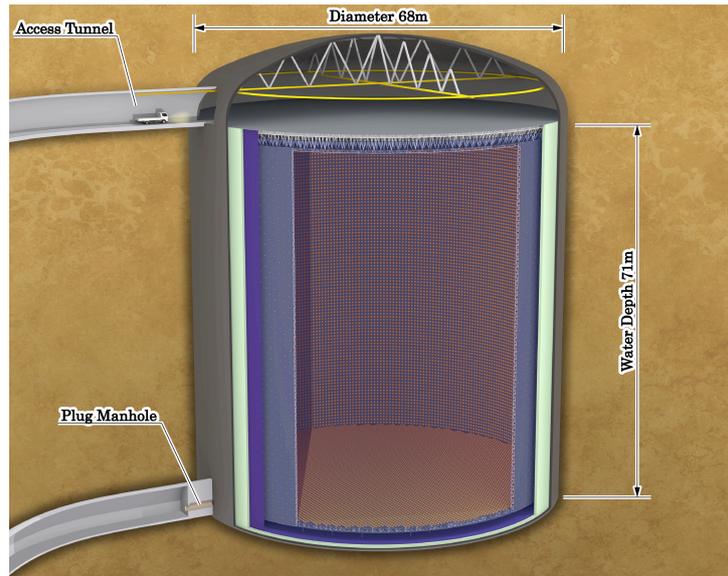


図 1.1 HK のタンク製造予定図 [12]

表 1.1 は今までのカミオカンデ実験の実験の規模をまとめた表で、カミオカンデ、スーパーカミオカンデ、ハイパーカミオカンデ共にタンクの形は円筒形状で、使用している光検出器は光電子増倍管である。

表 1.1 カミオカンデ実験の変遷 [1, 6, 11, 12]

検出器	カミオカンデ	スーパーカミオカンデ	ハイパーカミオカンデ*1
直径 / m	15.6	39.9	68
深さ / m	16	41.4	71
水の量 / トン	3 千	5 万	26 万
光電子増倍管の数 (内水槽 + 外水槽)	1,000(+100*2)	11,129 + 1885	約 40,000+ 約 6,700
観測開始	1983 年 8 月	1996 年 4 月	2027 年

チェレンコフ光は、陽子が崩壊した際に放出される荷電粒子や検出器内に入射したニュートリノが水分子の水素原子や酸素原子と相互作用して放出した電子やミュオンなどの荷電粒子が水中を通過する際に発せられる光で、その荷電粒子の進行方向に円錐形上に放出される。ハイパーカミオカンデではそれらの粒子が水分子と相互作用することで放出するチェレンコフ光を光電子増倍管を用いることで検出できるため、陽子崩壊探索や CP 対称性の破れ、ニュートリノの質量階層性決定など様々な物理に感度のある検出器である。

\*1 2027 年の観測開始に向けて建設中のため、値は予定値である。

\*2 カミオカンデの外水槽は 1986 年からアンタйкаウンタ用として設けられた。

ハイパーカミオカンデは内水槽と外水槽からなり、内水槽には約 4 万本の 20 インチ光電子増倍管を、外水槽には約 6,700 本の 3 インチ光電子増倍管を設置する予定で、スーパーカミオカンデの約 10 倍の有効体積を持ち、光電子増倍管も感度が 2 倍に改良されている。一方で本論文の主眼であるハイパーカミオカンデの 20 インチ光電子増倍管 (R12860) の出力非線形性についてはスーパーカミオカンデの光電子増倍管 (R3600) よりも劣るという結果が出ている。これは次章で述べるように光電子増倍管内の構造の違いによるものであると考えられている。

### 1.2.1. ニュートリノとは

ニュートリノ ( $\nu$ ) は標準理論 (SM) 図 1.2 のレプトン (l) の内、電荷を持たない 3 種類の素粒子 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) である。

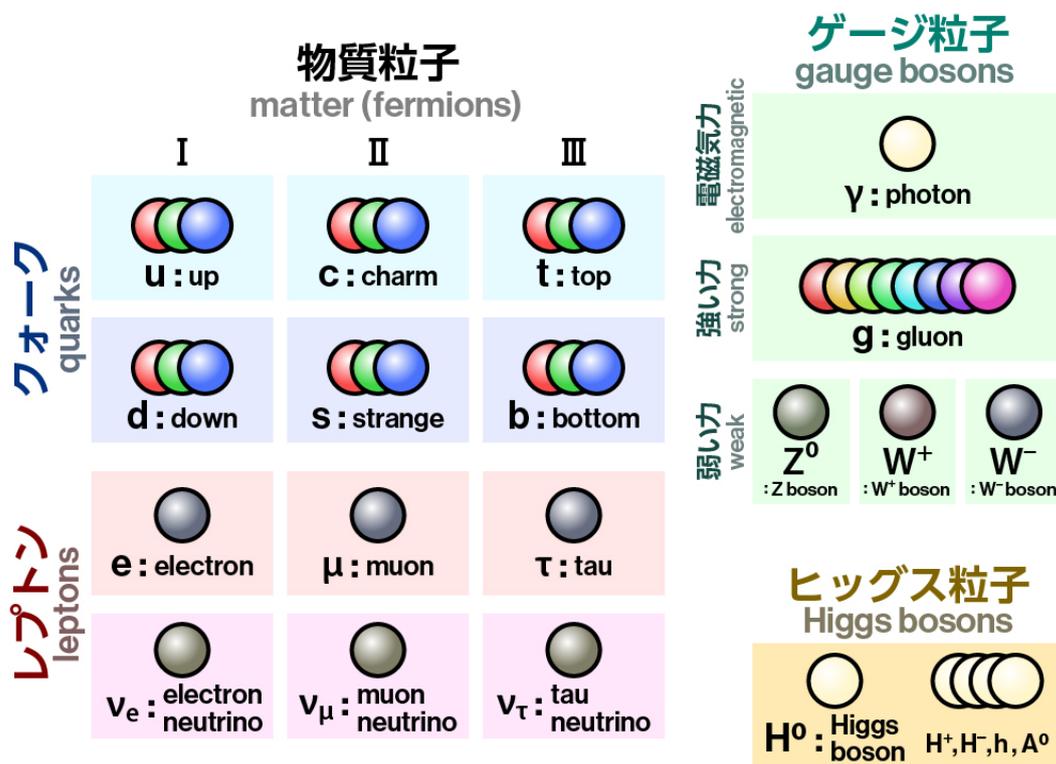


図 1.2 標準理論 [13]

電荷を持たないため電磁相互作用をしないだけでなく、レプトンなのでグルーオン (g) を介した強い相互作用もせず、弱い相互作用しかしない。そのため物質と相互作用しにくく、1 秒間に 8 兆個も手のひらを通過しているにもかかわらず観測が難しい粒子である。また、標準理論ではニュートリノの質量は 0 であるとされているが、1998 年 6 月に SK 実験においてニュートリノ振動の発見がなされたことにより、ニュートリノも

質量を持つことが明らかとなった。この功績で 2015 年に梶田隆章教授がノーベル物理学賞を受賞された。ただ、ニュートリノの質量が 0 でなかったことにより標準理論が棄却されることはなく、標準理論を拡張をするとニュートリノ振動を矛盾なく説明でき、標準理論を否定するような実験結果はまだ得られていない。この標準理論を超える物理として現在観測を目指しているものとしては後述の陽子崩壊 1.2.2. や、ミューオンの  $g$  因子の 2 からのずれを測定する  $g - 2$  実験などがある。

### 1.2.1.1. ニュートリノ振動 [5, 8]

ニュートリノ振動とは、 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  の 3 つのニュートリノが飛行中にお互いに移り変わることを意味する。宇宙線が大気分子にあたって崩壊し、その時生成されるニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶが、その大気ニュートリノの内、 $\nu_\mu$  の数を下から来たものと上から来たもので比較すると下から来たものの方が少なかった。スーパーカミオカンデでは  $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  が観測可能で、 $\nu_e$  の数は上下でほとんど変わらないのに対し、 $\nu_\mu$  の数が減っていたことから、下から来たものは地球を通り抜けている間に  $\nu_\mu$  は  $\nu_\tau$  に振動していることが明らかとなった。このニュートリノ振動は 1998 年 6 月にスーパーカミオカンデ実験により報告された。

ニュートリノにはフレーバー固有状態と質量固有状態の 2 つの固有状態が存在し、ニュートリノ混合行列  $U_{\text{PMNS}}$  を用いて次の様に表される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

このユニタリー行列  $U_{\text{PMNS}}$  は、ニュートリノ振動を予測したイタリアの物理学者ブルーノ・ポンテコルヴォとこの行列を導入した牧二郎教授、中川昌美教授、坂田昌一教授の名前から、ポンテコルヴォ・牧・中川・坂田行列と呼び、

$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

を採用している。ニュートリノ質量差及び上限値はこれまでの研究で調べられているが、質量の絶対値及び、質量がどの順であるか (質量階層性) は明らかになっていない。

### 1.2.2. 陽子崩壊とは [10]

陽子とは標準理論 (SM) 図 1.2 のクォークの中で最も軽いクォークであるアップクォーク (u) が 2 個と次に軽いクォークであるダウンクォーク (d) が 1 個で構成されるバリオンの 1 種である。陽子は安定な粒子で崩壊は観測されたことがないが、崩壊する可能性が大統一理論などで示唆されている。崩壊が観測されれば今まで正しいと考えられてきた標準理論を超える物理 (BSM) が観測されたことになり、物理が大きく進歩するため、カミオカンデから観測しようとしているがスーパーカミオカンデをもつてもまだ観測されておらず、ハイパーカミオカンデで観測しようとしている。

陽子は最も軽いバリオンであるため、電荷とレプトンの数が保存する形で崩壊することができない。2021 年 1 月現在、電荷やレプトンの数を保存しない反応は実験的に観測されていない。しかし、大統一理論の中には陽子の中のクォークがレプトンに変化出来ると考えている理論があり、そのように考えると陽子はクォークと反クォークの対であるメソンとレプトンに崩壊可能である。その内最も簡単なモデルでの崩壊モードは

$$p \longrightarrow e^+ + \pi^0 \quad (1.3)$$

であり、スーパーカミオカンデの測定により 2020 年にこのモードの寿命の下限值は 90 % の信頼水準で  $2.4 \times 10^{34}$  年と得られている [10]。

### 1.2.3. CP 対称性の破れとは [2,5]

CP 対称性とは C(charge:荷電) 反転と P(parity:パリティ) 反転を同時に施した時の対称性のことであり、CP 対称性の破れというのはそれが破れている、つまり対称でないことを表す。宇宙には粒子と反粒子があり、粒子を CP 反転すると反粒子になるが、粒子と反粒子は同じ性質を持っていないことがあり、これが CP 対称性の破れである。CP 対称性の破れは理論より先に 1964 年に  $K^0$  中間子の崩壊において実験的に観測され、その後小林誠教授と益川敏英教授による小林・益川理論によりクォークを 3 世代として混合を考えると CP 対称性の破れが説明できることを提唱した。 $K^0$  中間子の崩壊において CP 対称性の破れを初めて観測した実績で James Watson Cronin と Val Logsdon Fitch がノーベル物理学賞を、対称性の破れの起源の発見の功績で 2008 年に小林誠教授と益川敏英教授がノーベル物理学賞を受賞されている。

クォークと反クォークが全く同じようには振る舞わないことは実験的に既に示されているが、レプトンではまだ実験的に示されていない。しかし昨年 2020 年 T2K コラボレーションが、ニュートリノ振動の観測からニュートリノと反ニュートリノの違いを 99.7 % の信頼水準で測定し、ニュートリノの CP 対称性が破れている兆候を 95 % の信頼水準で得たことを報告した [2]。これにより、ニュートリノの CP 位相角

に大きな制限を世界で初めて与えることに成功した。T2K 実験は、大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex: 以下, J-PARC) からスーパーカミオカンデにニュートリノビームを打ち込む実験である。ハイパーカミオカンデでも T2HK 実験などニュートリノビームを打ち込む実験は続けられる計画があり、ニュートリノの CP 対称性が破れていることを明らかにすると期待されている。

### 1.3. 目的

ハイパーカミオカンデでの高精度測定において光電子増倍管によるフォトンカウンティング精度が重要である。光電子増倍管の出力は入射光量に対して完全に線形ではなく、スーパーカミオカンデではその非線形性が 1 つの非線形カーブで補正されている。しかし、その非線形具合が様々な要因によって変化する場合、補正は難しく、特に出力非線形性に個体差があった場合、補正するのは不可能に近い。そこで、ハイパーカミオカンデで使用予定の光電子増倍管の出力非線形性を測定により確かめた後、出力非線形性の個体差を抑えハイパーカミオカンデで使用する光電子増倍管に採用するために、低光量領域のオーバーリニアリティの小さい回路を見つけるためのモデリングと、その結果に基づいて回路の改良を行った。最終的な目標は光電子増倍管によるエネルギー決定精度を 1% 以内にすることである。

## 第 2 章 線形性の評価

### 2.1. 原理

#### 2.1.1. 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: 以下, PMT) は微小な光量に感度のある光検出器であり, 光電面という表面部分で光子を電子に変換して検出している. ここでの変換効率を量子効率 (QE) といい, おおよそ数 %~数十 % [4] で, ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT の R12860 の QE のピーク値は 30 % である.

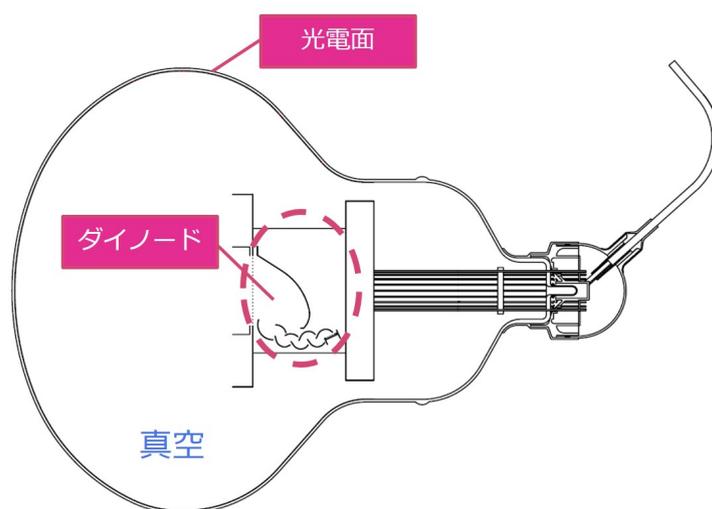


図 2.1 HK PMT(R12860) の内部構造 浜松ホトニクスによる図に加筆

PMT は 2000 V 程度の高電圧をかけて使用し, 図 2.1 のように内部にある複数のダイノードにおいてそれぞれ電位差が生じるように設計されている. 光電面で光子から変換された電子は PMT 内部にかけられている電場に従って第一ダイノードに引き寄せられる. 第一ダイノードに到達した電子は増幅され, ダイノード間にかけている電場に従って第二ダイノードに引き寄せられる. このようにダイノードで増幅を繰り返す, 最終的に  $10^7$  程度まで増幅されて信号として取り出される. この全体の増幅率をゲイン  $\mu$  と呼ぶ. ハイパーカミオカンデの 20 インチ PMT には 10 個のダイノードがあり, 典型的には 2000 V で  $1 \times 10^7$  のゲインが出るように設計されている. ゲインは PMT にかける電圧 (印加電圧) によって変化し, 電圧が低いとゲインも低く, 電圧が高いとゲインも高くなる. また, ゲインは入射光量にかかわらず一定であるのが望ましいが, 入射光量が高くなってくるとゲインが低光量の時の値からずれてくる.

### 2.1.1.1. ゲインと印加電圧

ゲインは印加電圧によって変わるが、その関係を式で見えていくことにする。まず、各ダイノード間の増幅率  $\delta_n$  は各ダイノード間の電位差  $V_n$  を用いて

$$\delta_n = aV_n^k \quad (2.1)$$

となる。ここで、 $a$  は定数、 $k$  は電極の構造、材質で決まる  $0.7 \sim 0.8$  の値をとるパラメータである。そのため、PMT 全体のゲイン  $\mu$  は

$$\mu = \prod_n \delta_n = \prod_n (aV_n^k) \quad (2.2)$$

となる [4].

### 2.1.2. PMT の出力非線形性

PMT の出力非線形性は印加電圧によって変化し、PMT 内のダイノード構造によっても変化することが知られており、スーパーカミオカンデ実験で使用されている PMT 及びハイパーカミオカンデ実験で使用される予定の PMT を製造している浜松ホトニクス [4] によると、PMT の出力非線形性の原理は以下の 2 つであると考えられている。

1. 各ダイノード間の電圧差が変化することによる各ダイノードでの増幅率の変化
2. 空間電荷飽和

1 は低光量領域でのオーバーリニアリティと呼ばれるゲインの上昇を引き起こし、2 は高光量領域での飽和を引き起こす。

### 2.1.2.1. オーバーリニアリティ

1. 各ダイノード間の電圧差が変化することによる各ダイノードでの増幅率の変化は PMT に光が入射した際、光が入射していない時には流れていなかったダイノード間に電流が流れることによって起きる。光が入射すると図 2.2 の様にダイノード間にダイノード電流と呼ばれる電流が流れる様になる。

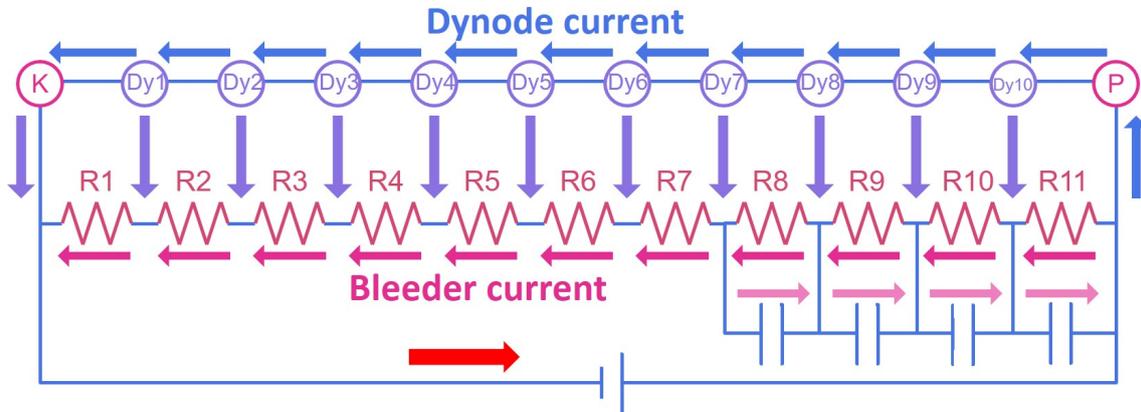


図 2.2 光が入射した時のブリーダ回路内での電流の流れ

### 2.1.2.2. 飽和 [3]

ダイノードから放出される電子が多くなってくると、電子が電荷を持つことにより電子同士が反発し合い、電子がダイノードから放出されにくくなると考えられている。この現象を空間電荷飽和といい、Child-Langmuir の式 (2.3) に従うと考えられる。

$$J_s = 2.2 \times 10^{-6} \times \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (2.3)$$

ここで、 $J_s$  は電流密度 /  $\text{Acm}^{-2}$ ,  $V$  は電位差 /  $\text{V}$ ,  $d$  はダイノード間距離 /  $\text{cm}$  である。

## 2.2. 非線形性の測定

PMT の出力非線形性の測定方法として 2 通りの方法を試したため、それぞれについて以下に述べる。2.2.1. の方法はハイパーカミオカンデの光検出開発で使用されてきた方法で、2.2.2. の方法は 2.2.1. の測定結果の確からしさを確認するために使用した。

### 2.2.1. 光源を2つ使用して和を用いる方法

まず低光量のゲインが一定であると仮定する光量において2つの光源(レーザーダイオードとLED, 又は2つのレーザーダイオード)をそれぞれ光らせた. この時の光量をそれぞれ  $A_1, B_1$  とおき, 出力として得られた  $O(A_1), O(B_1)$  を入射光量及び出力光量として用いた. 次に2つの光源を同時に光らせて  $A_1 + B_1$  を入射した. この時の出力を出力光量  $O(A_1 + B_1)$  とし,  $A_1 + B_1$  を入射光量とした. 図 2.3 の様に, この時ゲインが一定であれば  $O(A_1 + B_1) = A_1 + B_1$  になり, すでにずれてきていれば  $O(A_1 + B_1) \neq A_1 + B_1$  となる.

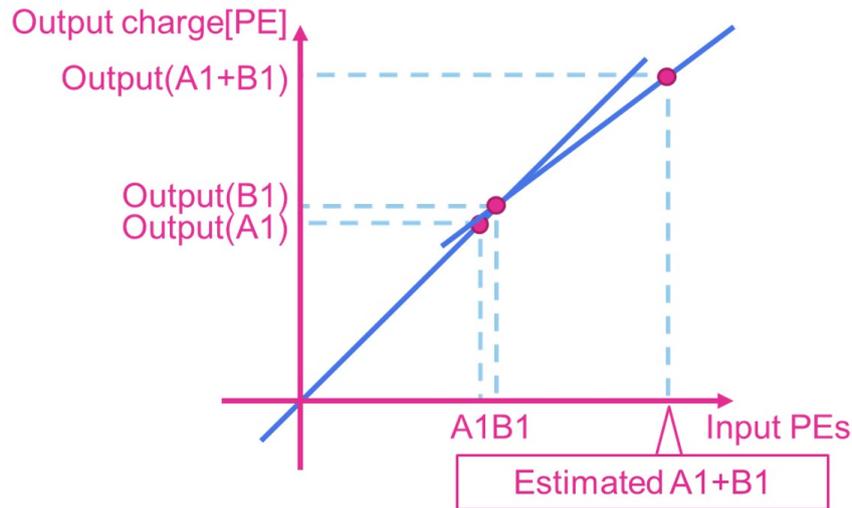


図 2.3 線形性の見積もり方法

次に,  $A_1, B_1$  より大きく,  $A_1 + B_1$  より小さい光量  $A_2, B_2$  を光らせ, その時の出力  $O(A_2), O(B_2)$  を出力光量とし, 入力光量は  $(A_1, A_1), (B_1, B_1)$  と  $(A_1 + B_1, O(A_1 + B_1))$  を結んだ線で非線形を補正して

$$A_2 = \frac{O(A_1 + B_1) - O(B_1)}{A_1 + B_1 - B_1} \times O(A_2) + \frac{O(B_1)}{B_1} \quad (2.4)$$

$$B_2 = \frac{O(A_1 + B_1) - O(B_1)}{A_1 + B_1 - B_1} \times O(B_2) + \frac{O(B_1)}{B_1} \quad (2.5)$$

の様に求めた値を用いた. ここで  $A_1 < B_1$  として上の式を出したが,  $A_1 > B_1$  の時は

$$A_2 = \frac{O(A_1 + B_1) - O(A_1)}{A_1 + B_1 - A_1} \times O(A_2) + \frac{O(A_1)}{A_1} \quad (2.6)$$

$$B_2 = \frac{O(A_1 + B_1) - O(A_1)}{A_1 + B_1 - A_1} \times O(B_2) + \frac{O(A_1)}{A_1} \quad (2.7)$$

となる. この様に補正していき, 非線形性を測定した.

## 2.2.2. 1つの光源を用いて比で比較する方法

図 2.4 の様なセットアップを使用し、光学スイッチによってスイッチ 1 の時は減衰されず、スイッチ 2 の時はダイアル式アッテネータにより約 1/4 に減衰された光が出るようにした。レーザーの光量、つまり電流値は測定の間一定にし、光量調整は USB 制御アッテネータによりコマンドで行った。レーザー光は低電流での使用や印加する電流値を高頻度で変更すると不安定になりやすいため、高電流かつ一定電流で使用することでレーザーの出力が安定する。この様な工夫を施しても 6.2.1. レーザー光の不安定性 で議論するようにレーザー光は不安定であり、本測定は短時間で行う必要がある。

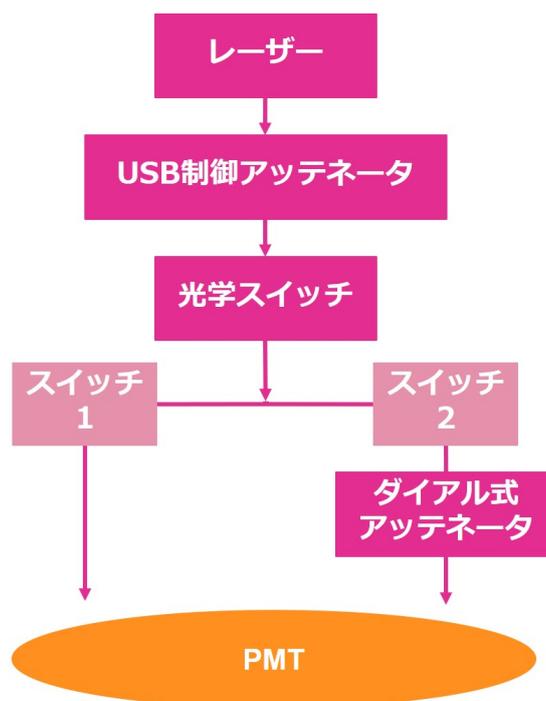


図 2.4 スイッチのセットアップ

まず USB 制御アッテネータの減衰率を 60.0 dB にし、レーザーの電流値は減衰されていないスイッチ 1 の方の光量が 10 光電子となるよう設定した。この電流値は一連の測定の間固定した。この時十分低光量であるとし、ゲインが一定であると仮定してスイッチ 1, 2 それぞれ測定を行い、光量の比を求め  $A_0$  ( $\sim 4$ ) とした。次に 54.0 dB において測定を行い、スイッチ 1 の時の光量とスイッチ 2 の時の光量の比を求め、 $A_1$  とし、 $A_1/A_0$  を求めた。さらに 48.0 dB において測定を行い、スイッチ 1 の時の光量とスイッチ 2 の時の光量の比を求め、 $A_2$  とし、 $A_2/A_0$  を求めた。このように USB 制御アッテネータの減衰率を変えていき、 $A_n/A_0$  を求めた。それぞれの測定のスイッチ 2 の時の光量を横軸に、 $A_n/A_0$  を縦軸にとり、非線形性を測定した。

## 2.3. 測定セットアップ

暗室内に図 2.5 の様に PMT を設置し, PMT の光電面に 2 種類の光源の光が入射するようにした. 図 2.6 は磁場・位置依存性の測定において用いたセットアップで, 暗室内に設置した PMT に磁場の影響を小さくする磁気シールドをかけ, さらに位置依存性の測定のため PMT の光電面の測定したい箇所に固定して測定した.



図 2.5 一様入射させた時のセットアップ

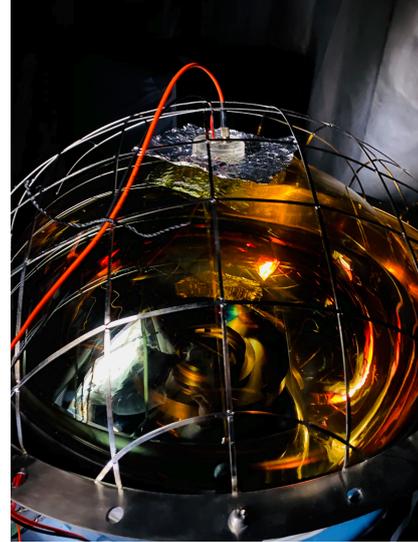


図 2.6 磁場・位置依存性の測定のセットアップ

光源を光らせる回路及び PMT の信号読み出し回路は図 2.7 の様に NIM モジュール, VME モジュールを用いて組んだ. 3.4. 印加電圧依存性の結果 では Output Register と Discriminator の代わりに SIS3153 というモジュールを用いていたが, パソコンの動作速度等により 2 つの光源間に光るタイミングのずれが生じてしまう可能性があったため, 3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良 の測定には図 2.7 の様に ADC の register である Output Register を用いたセットアップで測定を行った. 図 2.7 で青枠で表したモジュールは NIM モジュール, 赤枠で表したモジュールが VME モジュール, 紫枠で表したものが光学系である.

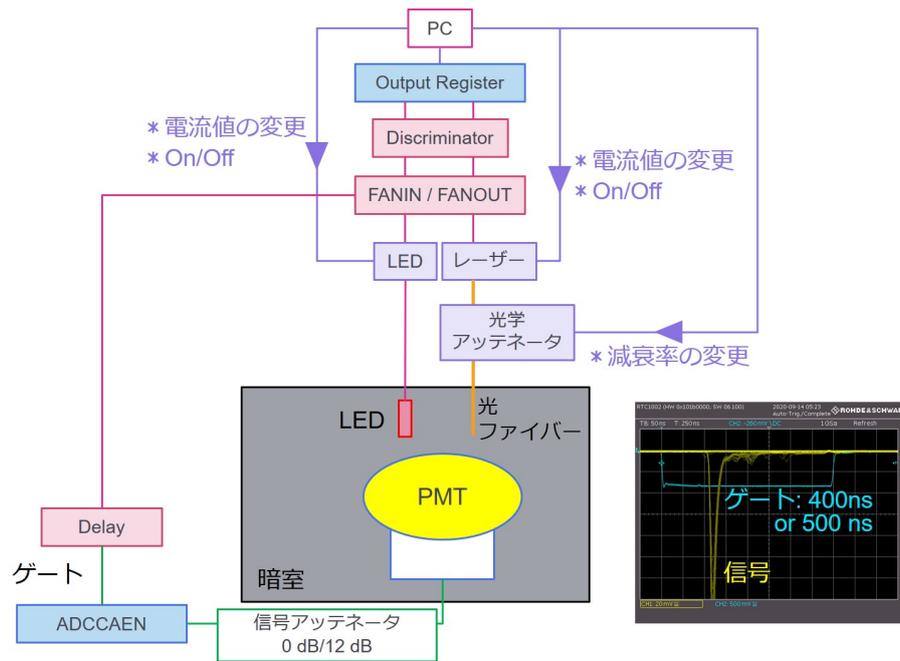


図 2.7 実験系概略図

## 2.4. 実験装置

### 2.4.1. PMT

PMT 内のダイノードの配置や形状には種類があり、ハイパーカミオカンデではスーパーカミオカンデの時とは異なる形状の PMT を使用予定である。

- ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860)
  - 今回測定した PMT のシリアル番号は EA0047, EA7163, EB0015 の 3 つ
    - EA0047 : 2015 年製造品, ブリーダー回路を変えることができる
    - EA7163 : 2019 年製造品, 実際にハイパーカミオカンデに設置される PMT と同じ構造
    - EB0015 : 2020 年製造品, ブリーダー回路を変えることができる, 実際にハイパーカミオカンデに設置される PMT と同じ構造, 大量製造版
  - 図 2.8 はハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) を斜め上から撮った図であり, 口径が 20 インチである.
  - ボックスライン型と呼ばれるダイノード構造の PMT を使用予定
    - \* 上から見た図が図 2.10 で, ボックスライン型であることが分かる.
- スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600)
  - 今回測定した PMT のシリアル番号は CD9029
  - ベネシアンブラインド型と呼ばれるダイノード構造の PMT を使用

\* 上から見た図が図 2.11 で、ベネシアンブラインド型であることが分かる.

- ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374)
  - 今回測定した PMT のシリアル番号は BC0592
  - 図 2.9 はハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R12860) を横から撮った図であり、口径が 3 インチである.
  - ボックスライン型と呼ばれるダイノード構造の PMT を使用予定



図 2.8 HK 20 インチ PMT(R12860)



図 2.9 HK 3 インチ PMT(R14374)



図 2.10 HK 20 インチ PMT(R12860)

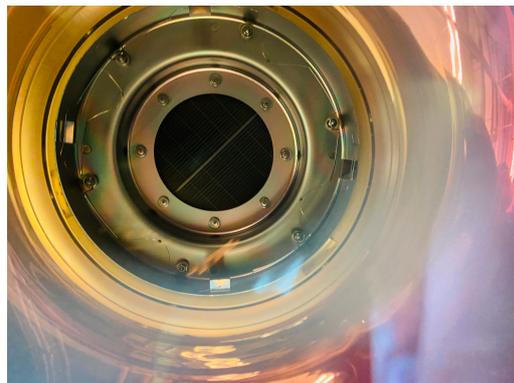


図 2.11 SK 20 インチ PMT(R3600)

## 2.4.2. 光源

3.4. 印加電圧依存性の結果 の測定では光源としてレーザーダイオードと LED を用いた。レーザーダイオードは光ファイバーにつなぎ、光学アッテネータにより減衰させて使用した。レーザーダイオードのパルス幅は 1 ns, LED のパルス幅は 2.5 ns にして使用した。途中で LED が故障したため、3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良 の測定では LED をレーザーに切替え、レーザーダイオード 2 個で測定を行った。レーザーダイオードのパルス幅は両方同じ 2.5 ns にして使用した。

## 2.4.3. 高電圧電源

CAEN の高電圧電源及び松定の高電圧電源を使用した。松定の高電圧電源は、レファレンス電圧の値を変えることで電圧を変えることができるため、電圧値を遠隔制御出来るようにすることでリモートで電圧値を変えて使用した。3.4. 印加電圧依存性の結果 の測定では CAEN の高電圧電源を、3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良 の測定では図 2.13 の松定の高電圧電源を用いた。

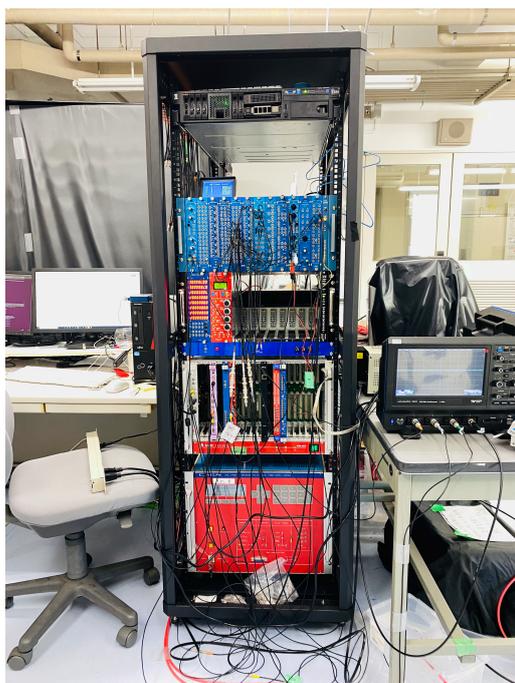


図 2.12 CAEN の高電圧電源及び NIM, VME モジュール



図 2.13 松定の高電圧電源

## 2.4.4. モジュール

VME モジュールの SIS3153, ADC, OUTPUT REGISTER と, NIM モジュールの GATE GENERATOR, FANIN/FANOUT, LEVEL ADAPTER, DISCRIMINATOR を用いた.

### 2.4.4.1. ADC (:Analog to Digital Converter)

ADC は図 2.14 のようにゲート信号がきている間に入力された入力信号を積分し, 電荷に比例した値として出力する.

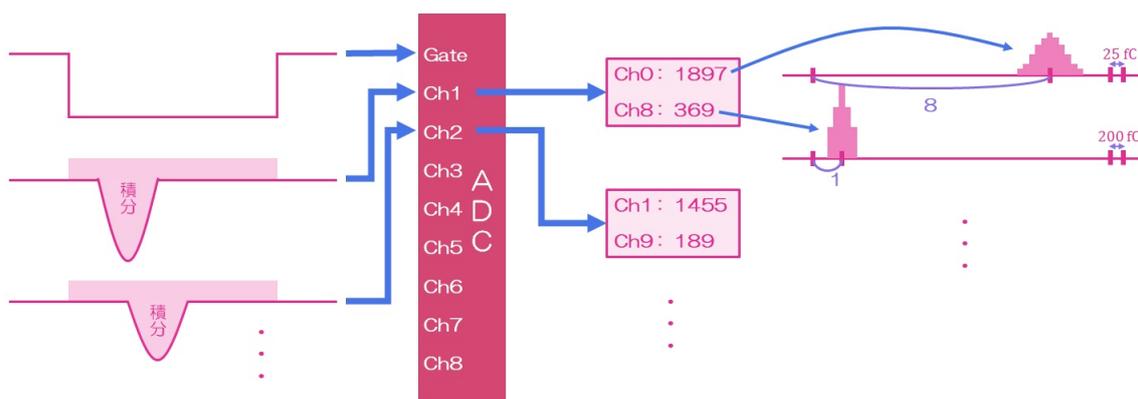


図 2.14 ADC モジュールとデータの読み出し

入力チャンネル 1~8 まで計 8 チャンネル存在し, それぞれ狭いレンジと広いレンジの 2 レンジ取っているため合計 16 チャンネル読みだすことができる. 読みだした後のチャンネルはチャンネル 1 がチャンネル 0 と 8, チャンネル 2 がチャンネル 1 と 9 という形でチャンネル 15 までに順に読み出すようにして用いた. チャンネル 0~7 が狭いレンジで 1 カウント 25 fC, チャンネル 8~15 が広いレンジが 1 カウント 200 fC であり, 取得後に読むチャンネルを変えることでどのレンジも読むことができるようになっている. 全てのレンジには 0 - 4095 カウントまで存在する.

## 2.4.5. 同軸スイッチ

測定の際, 高光量で ADC が振り切れてしまい ADC の 2 レンジのみでは 10000 光電子までの測定ができなかったため, 高光量の測定をする際には信号アッテネータを使用する必要があった. その際信号アッテネータを通すか否かをリモートで制御するために図 2.15 の様なスイッチを用い, スイッチがオンの時は信号アッテネータを通らず, オフの時は信号アッテネータを通るようにした. 信号アッテネータには 12 dB を使用し, 3.4. 印加電圧依存性の結果 の測定ではスイッチの直後に信号アッテネータを入れ, 3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハ

ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良 の測定では ADC に入力される直前に信号アッテネータを入れて測定を行った。



図 2.15 同軸スイッチ

ADC のチャンネル 1 を信号アッテネータなしの時のチャンネル, チャンネル 2 を信号アッテネータありの時のチャンネルとし, 読み出しチャンネルはチャンネル 1 の出力であるチャンネル 0 と 8, チャンネル 2 の出力であるチャンネル 1, 9 を用いた。

#### 2.4.6. 磁場シールド

PMT では光電面で光子を電子に変換し, 変換された光電子をダイノードで増幅して出力している。電子は電荷をもっており電磁相互作用を受けるため, 増幅される際に地磁気の影響を受けて軌道が変わってしまう可能性がある。ハイパーカミオカンデの PMT は 100 mG 以内で問題なく使用できることが要求されているが, 地磁気は 460 mG 程度であるため, 地磁気を 1/8 程度に抑えることができる磁気シールドを 3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良の測定において使用した。この磁気シールドは, 集磁作用による磁気シールド効果を持つパーマロイ (ニッケル-鉄合金) [7] でできた磁気シールドで, 地磁気が 460 mG 程度であることを考えるとシールドの使用により十分 100 mG 以下にすることができると考えられる。実際にスーパーカミオカンデでは地磁気の影響を抑えるコイルで全体を磁気補償し, 数十 mG 程度で PMT が使用されている。図 2.16 が今回測定で用いた磁場シールドで, 図 2.17 のように中に PMT を入れて使用した。

#### 2.5. トリガー

32 回を 1 セットとしてレーザーダイオード, LED, 両方の順でそれぞれ 32 回ずつ点灯させる測定を繰り返した。これは測定の速度を早くするために毎回データを転送するのではなく, 1 度に転送できる最大のデータ数である 32 回光源を点灯させたあとにデータを転送する形をとるためにこのようにした。



図 2.16 磁場シールド

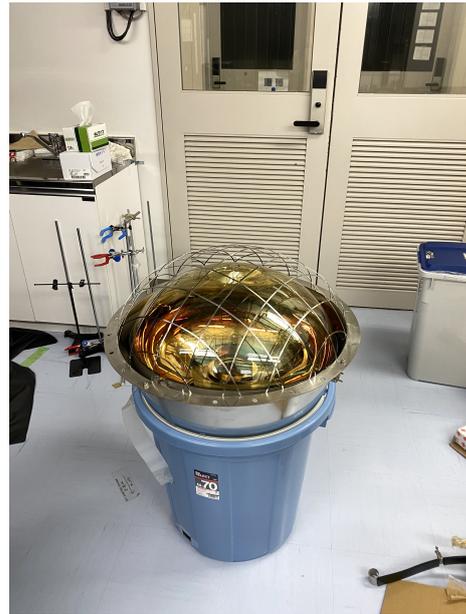


図 2.17 HK PMT に取り付けけた磁場シールド

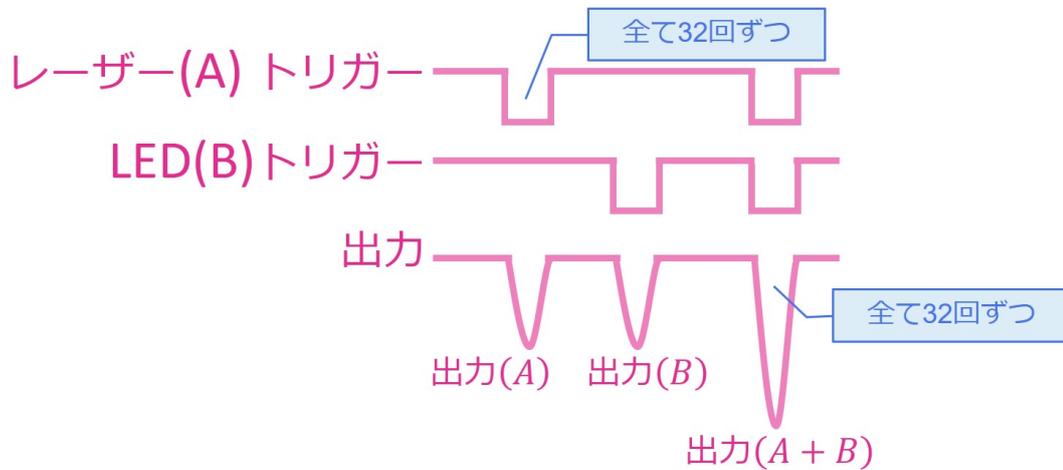


図 2.18 トリガーと出力

レーザーダイオードを光らせるトリガーは Linux のプログラムを通して SIS3153 で作成し, FANIN/FANOUT でゲートを作成した後, LEVEL ADAPTER で NIM 信号を TTL 信号に変換してレーザーダイオードに外部トリガーとして入力した。

## 2.6. イベントセレクション

ADC を用いてデータ取得を行った。ADC はゲート信号がきている間に来た信号の積分値を出力するため、得たい信号がゲート信号の中に十分に入っている必要がある。ADC のデータ取得のゲートとなる信号は FANIN/FANOUT を用いて 2 つの光源を光らせるトリガーの OR を取り、どちらか又は両方が光るトリガーと一致するよ

うにした。ゲート幅は PMT からの出力信号とゲート信号をオシロスコープで確認し、測定する全ての光量においてゲート内に信号が含まれるよう調整し、測定により 400 ns – 500 ns を用いた。測定の際のゲート信号と信号をオシロスコープで観察した時の図が図 2.19 である。

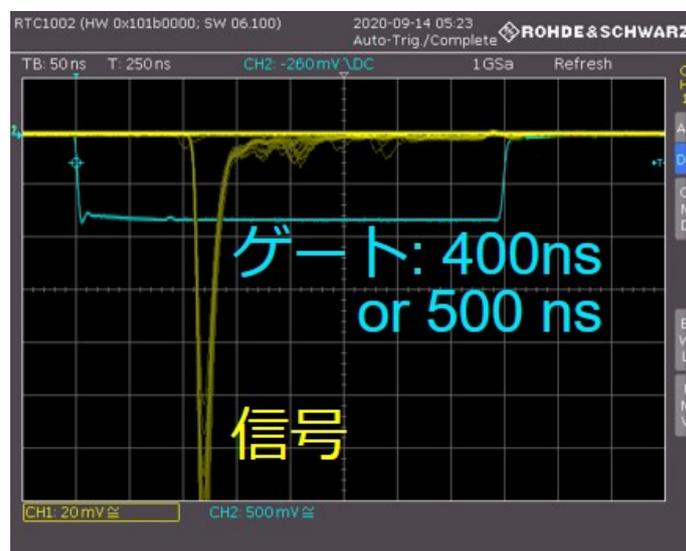


図 2.19 ゲートと信号

## 2.7. データ処理・解析

ROOT という解析アプリケーションを使用してデータ処理及び解析を行った。ROOT は欧州原子核研究機構 (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: 以下, CERN) によって作成された情報処理のためのフレームワークである。高エネルギー分野で一般的に使用されており, C++ や Python で記述することもできる。

### 2.7.1. ゲインの見積もり

ADC はベースラインが 0 からずれているために、データを取得するとデータを取得していない時でもゲート幅に応じた電荷がカウントされる。この値をペDESTAL と呼び、PMT 出力波形の電荷量を見積もるには出力電荷からペDESTAL を引く必要がある。このように見積もられた PMT 出力波形の電荷量を光電子に変換するには、ゲインと呼ばれる 1 光電子の PMT での増幅率で割る必要がある。ゲインは印加電圧を変えることで変化し、同じ電圧をかけている PMT であったとしても PMT ごとに異なるので毎回見積もる必要がある。1 光電子のピークが 2 光電子以上のピークと分離できるよう、図 2.20 の様に 1 % 以下程度になるくらいに光量を絞り、1 光電子ピークからペDESTAL を引くことでゲインを求めた。

図 2.20 の様に光源ごとに分けてヒストグラム化した。図 2.20 で赤色及び黒色で表されているのが光量を絞って光らせた時の光量分布で、青色で表されているのが何も光らせていない時の光量分布である。左端にある 1 番高いピークがペDESTALのピーク、つまり 0 光電子の時のデータであり、その右にあるピークが 1 光電子のピークである。1 光電子のピークのピークが左右対称ではなく左側が広がっているのは、実際にはテールと呼ばれる分布も重なってしまっているからである。

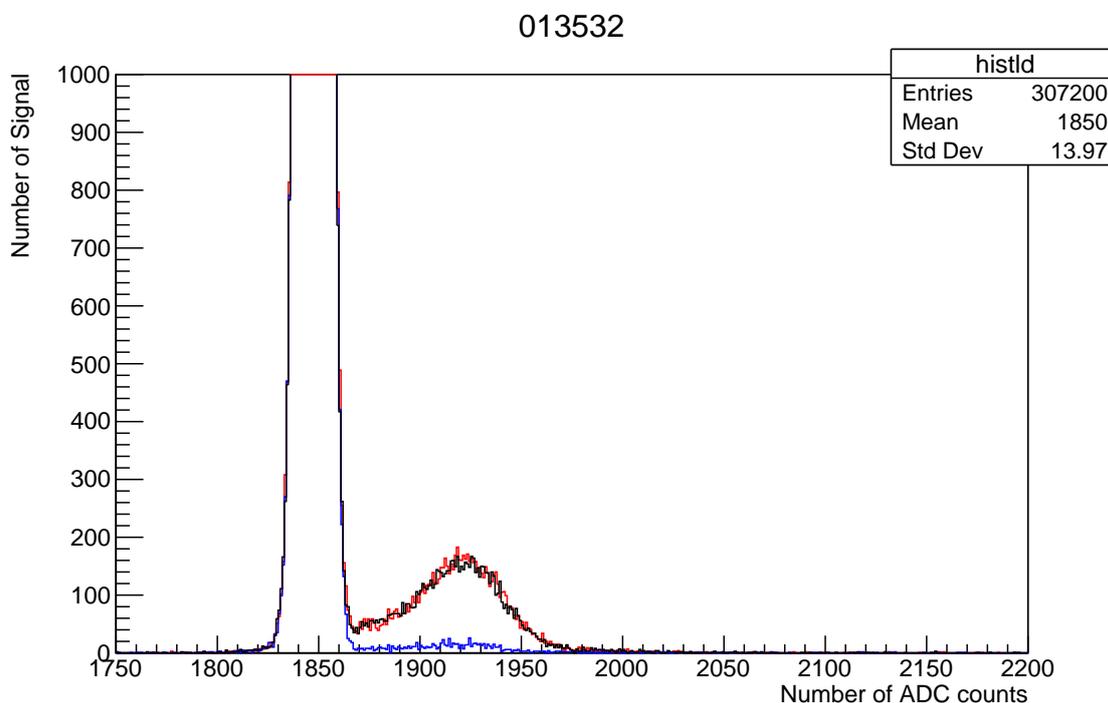


図 2.20 1 光電子分布

この分布に 3 つのガウシアンとテールのフィットを行い、1 光電子のピークを求め、何も光らせていない時のデータをガウシアンフィットして求めたピークの値を引くことで 1 光電子に対応する ADC カウントが求められる。この値に 25 fC をかけて電気素量  $e$  で割って換算するとゲインが求められる。

$$\text{ゲイン} \mu = \frac{(1 \text{ 光電子のピークの ADC カウント} - \text{ペDESTAL}) \times 25 \text{ fC}}{e} \quad (2.8)$$

### 2.7.2. 光量の見積もり

図 2.21 で赤色及び青色で表されているのが片方の光源を光らせた時の光量分布で、黒色で表されているのが 2 つの光源を両方光らせた時の光量分布である。このヒストグラムからそれぞれ平均を求め、その値から 2.7.1. で求めたペDESTALの値を引いた値をその時の PMT 出力波形の ADC カウントとした。

013513

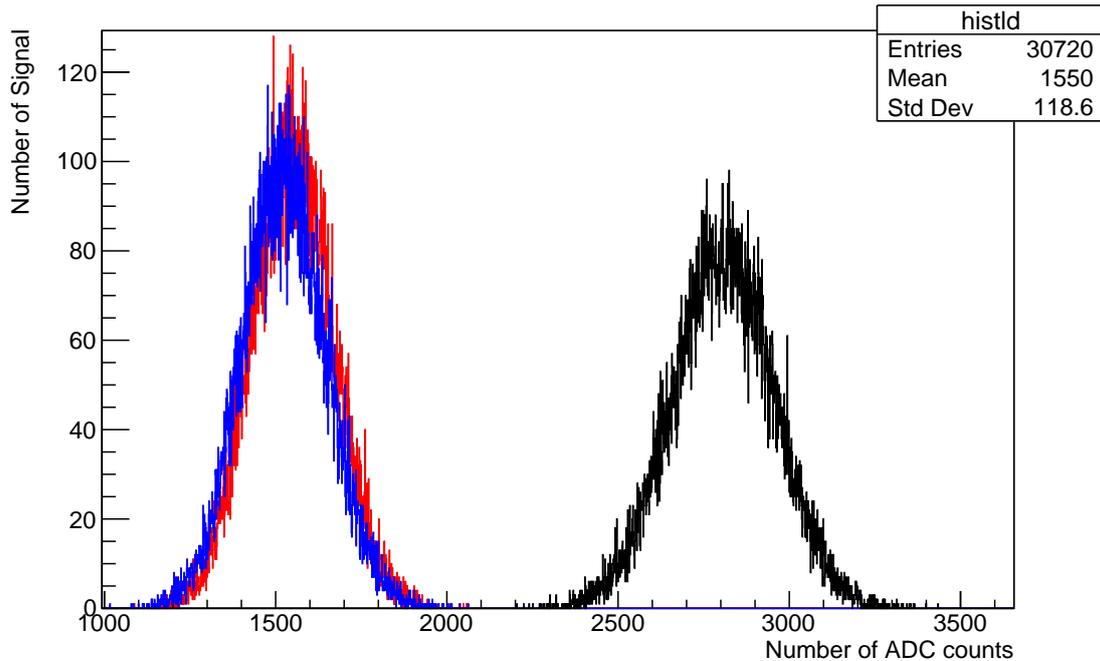


図 2.21 PMT 信号のヒストグラム

PMT 出力波形の ADC カウントから電荷及び光電子数の算出方法は以下の式の様に変換した。

$$\text{PMT 出力波形の電荷量} = \text{PMT 出力波形の ADC カウント} \times 25 \text{ fC} \times A_{\text{ch}} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{PMT 出力波形の光電子数} &= \frac{\text{PMT 出力波形の電荷量}}{e \times \mu} \\ &= \frac{\text{PMT 出力波形の ADC カウント} \times A_{\text{ch}}}{1 \text{ 光電子のピークの ADC カウント} - \text{ペDESTAL}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

ここで  $A_{\text{ch}}$  は 2.7.3. で算出するチャンネル間の電荷量対応比である。以上の光量の見積もりを測定した全てのデータセットに対して行い、同じ条件のデータセットを 1 つのファイルに出力した。

### 2.7.3. 読み出しチャンネル間の対応比の見積もり

測定には 4 つの読み出しチャンネルを用いた。読み出しは 2 チャンネル同時に使用でき、同時に使用できるチャンネル間の比は 1 : 8 であった。光量が小さい時から順にチャンネル 0 → 8 → 1 → 9 と ADC のチャンネルを変えて測定を行ったので、チャンネル間の対応比の計算方法を述べる。表 2.1 はチャンネル番号とそれぞれの 1 カウントと電荷のおおよその対応である。チャンネル 0 を基準としてそれぞれのチャンネルの 1 カウントが何 fC に対応するか測定から推定して用いた。

表 2.1 チャンネル番号とそれぞれの 1 カウントと電荷のおおよその対応

チャンネル	1 カウントと電荷
0	25 fC
8	200 fC
1	237 fC
9	1900 fC

### 2.7.3.1. チャンネル 0 と 8 の比の測定

まず、チャンネル 0 と 8 は同時に取得可能であるため、チャンネル 0 が振り切れないよう ADC カウントの平均値が約 2500 になるような光量を光らせ、それぞれのピークの平均値からそれぞれのチャンネルでのペDESTAL を引いた値で比較した。

$$A_{\text{ch0} \rightarrow 8} = \frac{\text{チャンネル 8 のピークの平均値} - \text{チャンネル 8 のペDESTAL}}{\text{チャンネル 0 のピークの平均値} - \text{チャンネル 0 のペDESTAL}} \quad (2.11)$$

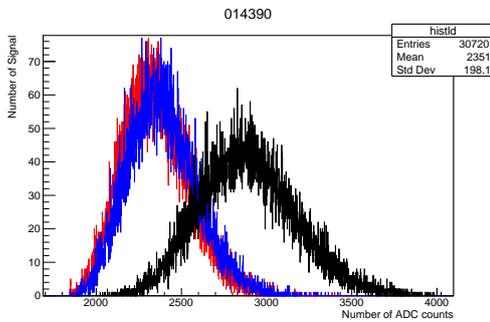


図 2.22 チャンネル 0

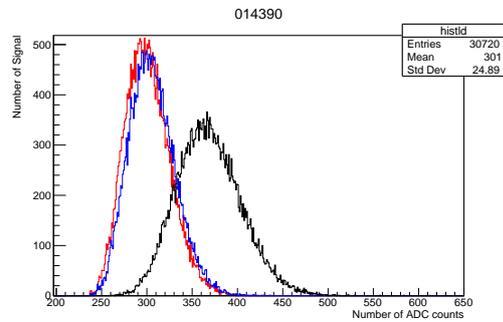


図 2.23 図 2.22 のチャンネル 8

### 2.7.3.2. チャンネル 8 と 1 の比の測定

チャンネル 8 と 1 は同時に取得はできないため、連続したランで同じ光量で取得した。チャンネル 8 も 1 も振り切れないよう ADC カウントの平均値が 1000~2500 になるような光量を光らせ、それぞれのピークの平均値からそれぞれのチャンネルでのペDESTAL を引いた値で比較した。この時、チャンネル 1 に関しては一緒に取得した光を光らせていないヒストグラムからペDESTAL の位置を見積もった。

$$A_{\text{ch8} \rightarrow 1} = \frac{\text{チャンネル 1 のピークの平均値} - \text{チャンネル 1 のペDESTAL}}{\text{チャンネル 8 のピークの平均値} - \text{チャンネル 8 のペDESTAL}} \quad (2.12)$$

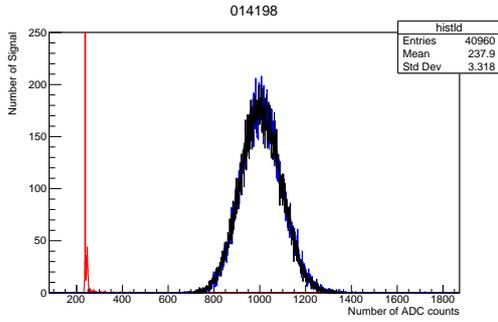


図 2.24 チャンネル 8

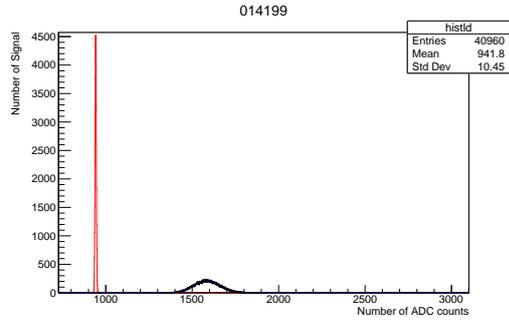


図 2.25 チャンネル 8 と同じ光量で  
光らせた時のチャンネル 1

### 2.7.3.3. チャンネル 1 と 9 の比の測定

チャンネル 1 と 9 は同時に取得可能であるため、上のチャンネル 8 と 1 の対応をとったデータのチャンネル 1 のデータを使用した。それぞれのピークの平均値からそれぞれのチャンネルでのペDESTALを引いた値で比較した。この時、一緒に取得した光を光らせていないヒストグラムからペDESTALの位置を見積もった。

$$A_{ch1 \rightarrow 9} = \frac{\text{チャンネル 9 のピークの平均値} - \text{チャンネル 9 のペDESTAL}}{\text{チャンネル 1 のピークの平均値} - \text{チャンネル 1 のペDESTAL}} \quad (2.13)$$

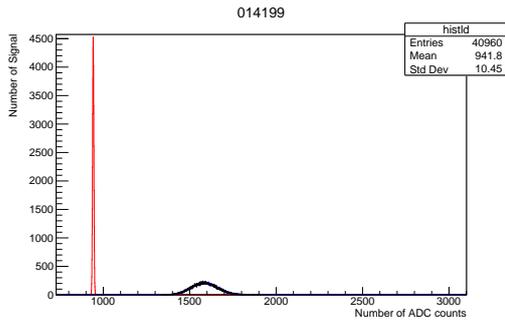


図 2.26 チャンネル 1

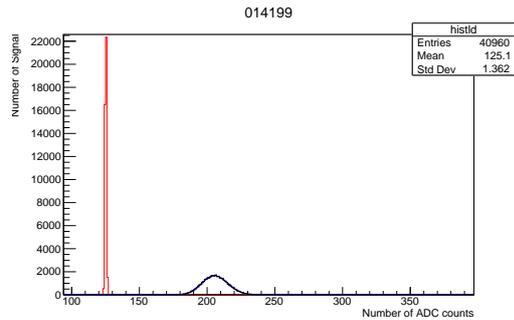


図 2.27 図 2.26 のチャンネル 9

以上よりチャンネル 0 との対応比が計算できるので ADC カウント 1 つの電荷量は

$$\text{チャンネル 8 の 1ADC カウントの電荷量} = 25 \text{ fC} \times A_{ch0 \rightarrow 8} \quad (2.14)$$

$$\text{チャンネル 1 の 1ADC カウントの電荷量} = 25 \text{ fC} \times A_{ch0 \rightarrow 8} \times A_{ch8 \rightarrow 1} \quad (2.15)$$

$$\text{チャンネル 9 の 1ADC カウントの電荷量} = 25 \text{ fC} \times A_{ch0 \rightarrow 8} \times A_{ch8 \rightarrow 1} \times A_{ch1 \rightarrow 9} \quad (2.16)$$

で計算できる。

## 2.7.4. 非線形性の評価

### 2.7.4.1. 光源を2つ使用して和を用いる方法の評価方法

考え方に関しては 2.2.1. で述べたのでここでは解析プログラムの手順を述べることにする。プログラムの大まかな手順は

- a. データの読み出し
- b. 並び替え
- c. 補正及びグラフ化
- d. 縦軸を線形性からのずれにしたグラフの作成

#### a. データの読み出し

2.7.1. ゲインの見積もり ~2.7.3. 読み出しチャンネル間の対応比の見積もり までの作業によりファイルに

```
1 # parameter runN: 017238 ld channel: 0 noatt VALUE ERROR
2 oktoread
3 SignalAttenuator: 0 dB
4 ymax: 115
5 Entries: 30720.000000
6 MeanADC: 265.460838 0.107124
7 StdDevADC: 18.775741 0.075748
8 MeanQ: 6.924173e-12 2.146778e-14
9 StdDevQ: 3.762683e-12 1.518001e-14
10 MeanPE: 3.506168 0.010871
11 StdDevPE: 1.905296 0.007687
12 # parameter runN: 017238 led channel: 8 noatt VALUE ERROR
13 oktoread
14 SignalAttenuator: 0 dB
15 ymax: 601
16 Entries: 29760.000000
17 MeanADC: 281.190827 0.125378
18 StdDevADC: 21.629119 0.088656
19 MeanQ: 8.647657e-12 3.910225e-16
20 StdDevQ: 6.745564e-14 2.764947e-16
21 MeanPE: 4.378882 0.012723
22 StdDevPE: 2.194847 0.008996
23 # parameter runN: 017238 both channel: 8 noatt VALUE ERROR
24 oktoread
25 SignalAttenuator: 0 dB
26 ymax: 457
27 Entries: 29760.000000
28 MeanADC: 316.035786 0.166238
29 StdDevADC: 28.677903 0.117548
30 MeanQ: 1.563063e-11 5.184542e-16
31 StdDevQ: 8.943898e-14 3.666025e-16
```

```
32 MeanPE: 7.914826 0.016869
33 StdDevPE: 2.910133 0.011928
34 # parameter runN: 017239 ld channel: 0 noatt VALUE ERROR
35 oktoread
36 ...(以下略)
```

のようにデータセットは上の様に片方ずつ光らせた時のデータ 2 種 (ld,led) と両方光らせた時のデータ 1 種 (both) の計 3 つで 1 セットとなるように書きだした。出力されたデータセットを全て読み出し、2 次元配列と ROOT のクラス TGraphErrors の両方に読み出した。その際、横軸を光電子 (PE) にしたいときは MeanPE と StdDevPE を、電荷で描きたいときは MeanQ と StdDevQ を 2 次元配列と TGraphErrors の両方に読みだした。さらに 2 次元配列にはデータセットが何番目のデータセットであるかと、片方ずつ光らせた時のデータ (ld,led) のどちらのデータであるか、もしくは両方光らせた時のデータ (both) であるかを 0, 1, 2 のフラグで表して格納した。

#### b. 並び替え

TGraphErrors の Sort を用いてグラフのみデータを小さい順に並べ、新たに用意した 2 次元配列に小さい順に詰めていった。この詰め直し作業の際、小さい順に取り出す作業は Sort 後のグラフを用いて行ったが、小さい順に取り出すだけではデータセットがバラバラになってしまうので、読み出しの際に作成した 2 次元配列を用いてデータセットの番号及びデータの種類も新たな 2 次元配列に格納した。これで小さい順にデータが詰まった 2 次元配列が出来上がったので、補正を加えてデータをプロットしていくこととする。

#### c. 補正及びグラフ化

**c. 補正及びグラフ化** で作成した 2 次元配列を用いて横軸を入力光量、縦軸を出力光量としたグラフを作成する。まず両方光らせた時のデータの内、1 番小さいデータを探し、そのデータとセットの片方ずつ光らせた時のデータを探した。その片方ずつ光らせた時のデータに対しては入力と出力が等しいと仮定して補正無しで、縦軸にも横軸にも出力光量をプロットした。この時他のデータセット内の片方のみ光らせたデータで既にプロットした点より小さいデータがあればそれらの点も入力と出力が等しいと仮定して補正無しで、縦軸にも横軸にも出力光量をプロットした。両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータは、入力光量は片方のみを光らせたデータの和であると考え、出力光量は両方光らせたときの出力を用いて、縦軸には片方のみを光らせたデータの出力光量の和を、横軸には両方光らせた時の出力光量をプロットした。

次に、線形性を仮定してプロットした 2 点より大きく、両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータより小さい、プロットしていない最小のデータを探した。それらの点

に対し、線形性を仮定してプロットした 2 点の内大きい方と両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータのプロットの間の直線で線形補間してプロットした。

両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータより小さいデータがなくなったら、その次に小さい両方光らせた時のデータを探した。その時の出力を縦軸に、そのデータとセットの片方ずつ光らせた時のデータの補正した後の値、つまり横軸にプロットしてある値を足した値を横軸にプロットした。

次は両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータより大きく、上でプロットした両方光らせた時のデータの内 2 番目に小さいデータより小さいデータを探した。それらの点を、両方光らせた時のデータの内 1 番小さいデータと両方光らせた時のデータの内 2 番目に小さいデータの直線で線形補間してプロットした。この作業を繰り返し、全てのデータをプロットすると出力と入力の対応のグラフ図 2.28 が作成できた。

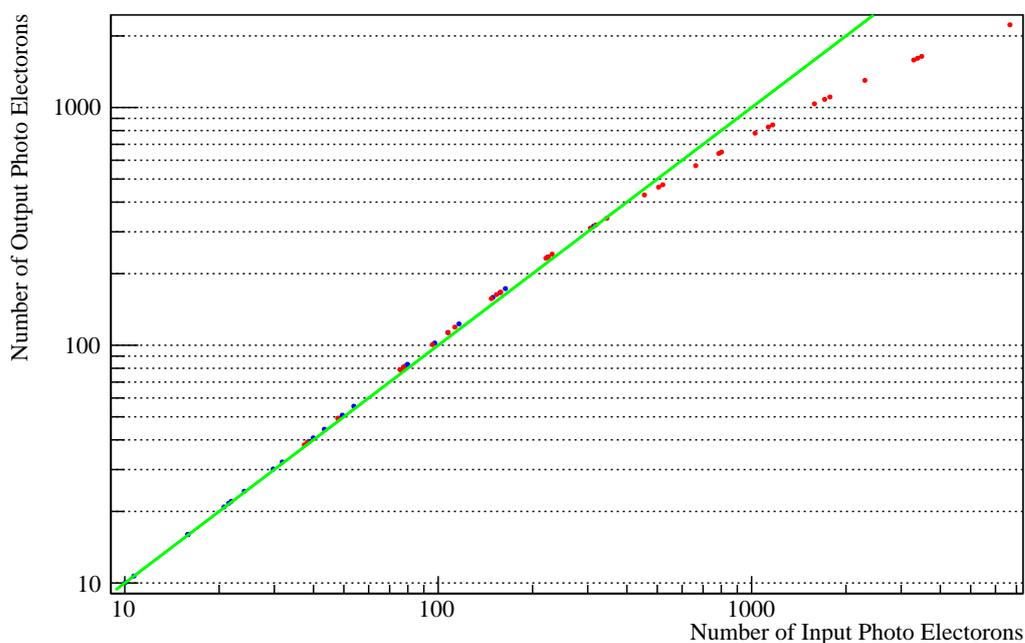


図 2.28 EB0015(1870 V) の入出力相関 (光電子数, 和での測定)

#### d. 縦軸を線形性からのずれにしたグラフの作成

線形からのずれを知りたい場合は、横軸の入力はそのままで縦軸の出力を横軸の入力で割れば線形からのずれのグラフを作成することができた。後述の結果の項のグラフはいずれも線形からのずれのグラフである。

#### 2.7.4.2. 1つの光源を用いて比で比較する方法 の評価方法

この測定についても考え方に関しては 2.2.2. で述べたので、ここでは解析の手順を述べることにする。まず測定したデータを光量が同じもの同士セットにした。こうすることで、スイッチを切り替えたデータ同士がセットとなる。セットとなったデータの中で光量が最小のものを取り出し、ペDESTALとピークの平均値をスイッチ 1, 2 それぞれの時に對して求め、それぞれピークの平均値 - ペDESTALを求めた。この光量の比  $R_0$  を

$$R_0 = \frac{\text{スイッチ 1 のピークの平均値} - \text{スイッチ 1 のペDESTAL}}{\text{スイッチ 2 のピークの平均値} - \text{スイッチ 2 のペDESTAL}} \quad (2.17)$$

の様に計算した。次に小さい光量のデータセットを取り出し、同様に光量の比  $R_1$  を計算し、 $R_0$  とのずれ  $R_1/R_0$  を計算した。この計算を光量が小さい順に繰り返して、縦軸に  $R_n/R_0$ 、横軸にそれぞれの時のスイッチ 1 のピークの平均値 - ペDESTALをとると

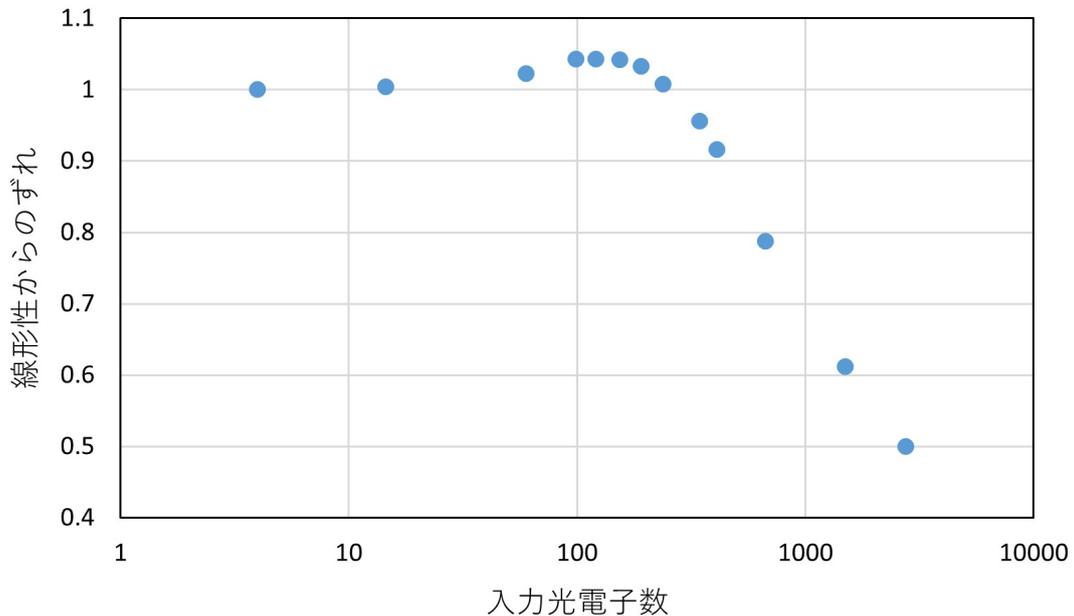


図 2.29 EA0047(1690 V) の出力非線形性 (光電子数, 比での測定)

の様に出力の線形性からのずれのグラフを作成することができた。

## 第 3 章 非線形性の測定

### 3.1. 目的

PMT の出力非線形性は印加電圧によって変化し, PMT 内のダイノード構造によっても変化するため, 異なる印加電圧において測定を行った.

### 3.2. 測定した PMT

HK20 インチ PMT(R12860) として EA0047, EA7163 の 2 つ, SK 20 インチ PMT(R3600) として CD9029, HK3 インチ PMT(R14374) として BC0592 を測定した.

### 3.3. 測定手法

測定に用いた器具は以下の通り

高圧電源: CAEN の高電圧電源

光源: 3.4. はレーザーダイオード (パルス幅: 1 ns) と LED(パルス幅: 2.5 ns)

3.5. はレーザーダイオード (パルス幅: 2.5 ns)2 つを使用

測定手法は 2.2.1. 光源を 2 つ使用して和を用いる方法 を用いた.

### 3.4. 印加電圧依存性の結果

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 において電圧を変えて測定した結果が図 3.1 である。横軸は入力光電子数, 縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。ここで, PE は光電子数 (Photo Electron) の略である。印加電圧と色の対応は図 3.1 中の凡例に書かれている様に, 赤色が 1590 V, 橙色が 1600 V, 黄緑色が 1610 V, 水色が 1620 V, 青色が 1630 V, 薄紫色が 1690 V, 桃色が 1740 V, 若草色が 1800 V, 緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。また, 縦軸の値が 0.9 と 1.1 である部分に引いた赤線は, ハイパーカミオカンデでの光電子増倍管が満たすべき 500 光電子までは 0.9~1.1 である必要があるという条件である。

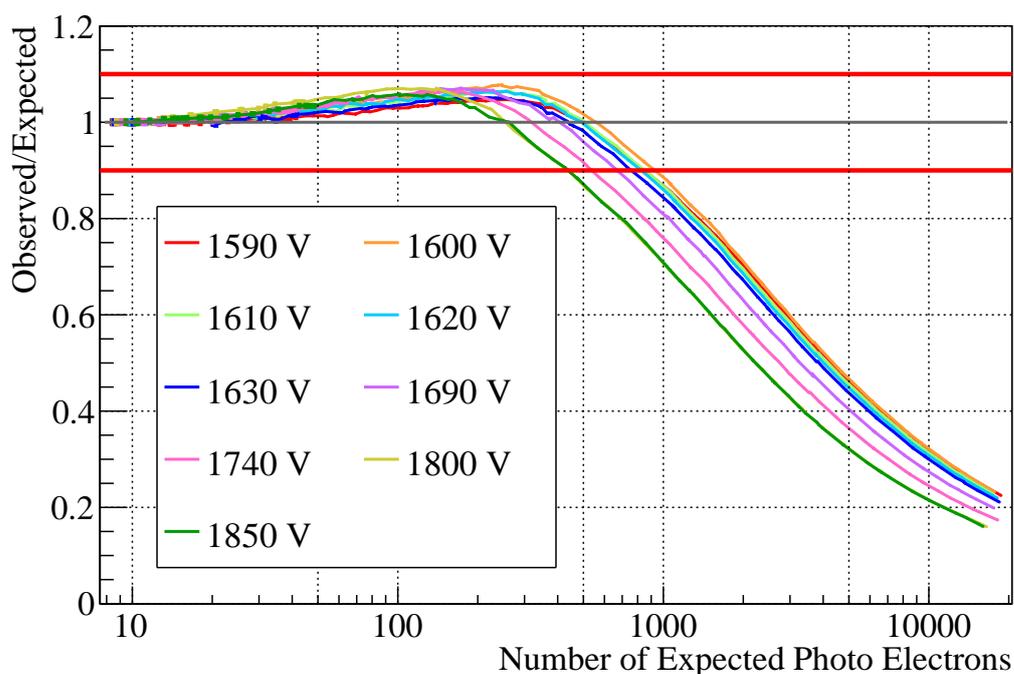


図 3.1 EA0047 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)

図 3.1 より非線形性のカーブは印加電圧によって変化することがわかった。

別のハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA7163 において EA0047 と同様に電圧を変えて測定した結果が図 3.2 である。横軸は入力光電子数, 縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.2 中の凡例に書かれている様に, 赤色が 1750 V, 青色が 1800 V, 黄緑色が 1850 V, 橙色が 1900 V を印加した時の非線形性のカーブである。

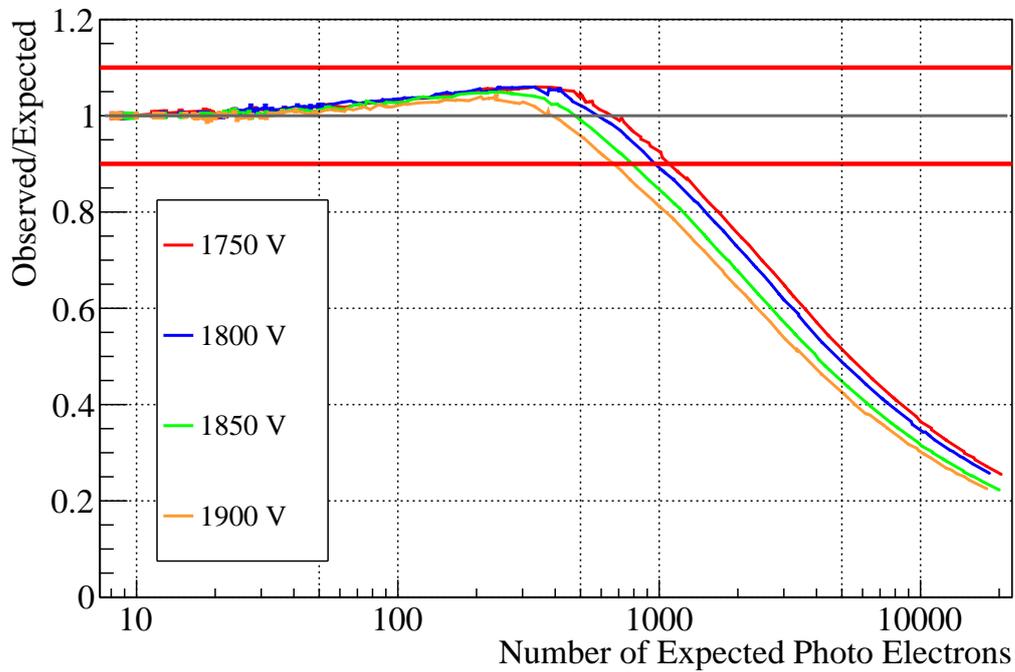


図 3.2 EA7163 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)

図 3.2 より別のハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) でも非線形性のカーブは印加電圧によって変化することが確認できた。

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 において電圧を変えて測定した結果図 3.1 の横軸を電荷に変えた結果が図 3.3 である。横軸は入力電荷、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.1 と同様でありまた図 3.3 中の凡例に書かれている様に、赤色が 1590 V、橙色が 1600 V、黄緑色が 1610 V、水色が 1620 V、青色が 1630 V、薄紫色が 1690 V、桃色が 1740 V、若草色が 1800 V、緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。

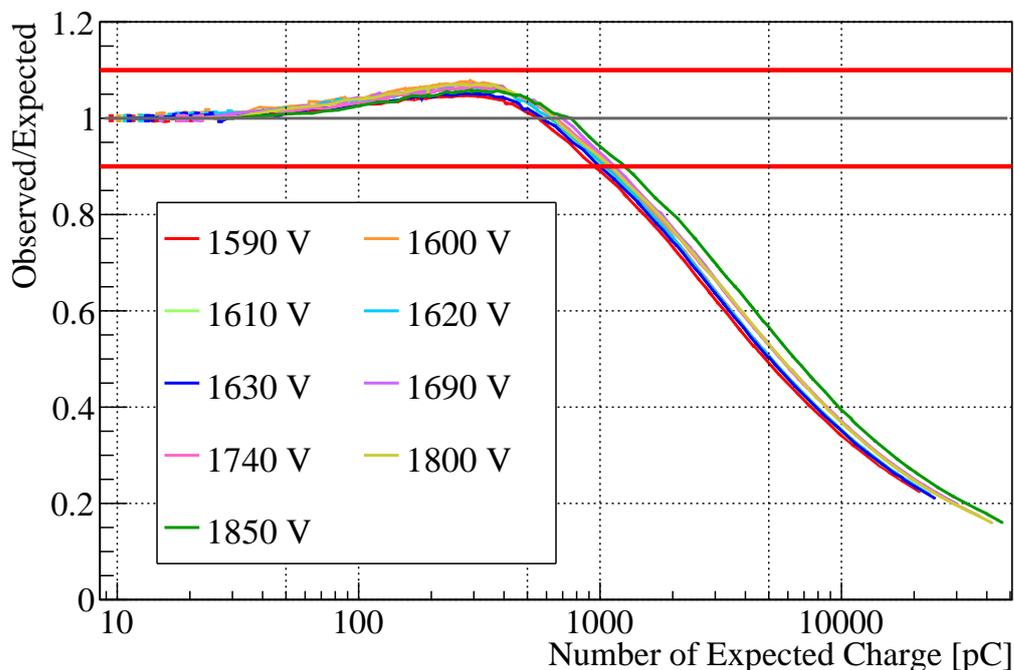


図 3.3 EA0047 の出力非線形性 (横軸: 電荷)

図 3.3 より横軸を電荷に変えると横軸が光電子であった図 3.1 よりも非線形性のカーブが全体的に合うようになったことがわかる。さらに、図 3.3 を拡大すると図 3.4 , 図 3.5 の様になっており、ここで印加電圧と色の対応は図 3.3 と同様で、赤色が 1590 V、橙色が 1600 V、黄緑色が 1610 V、水色が 1620 V、青色が 1630 V、薄紫色が 1690 V、桃色が 1740 V、若草色が 1800 V、緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。

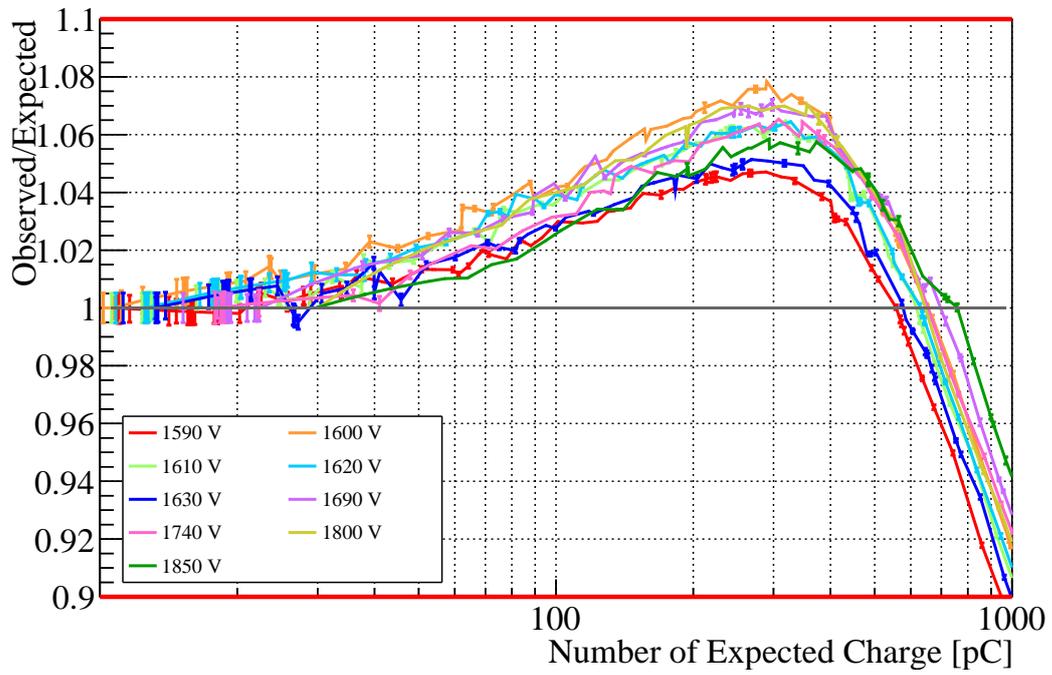


図 3.4 図 3.3 のオーバーリニアリティの拡大

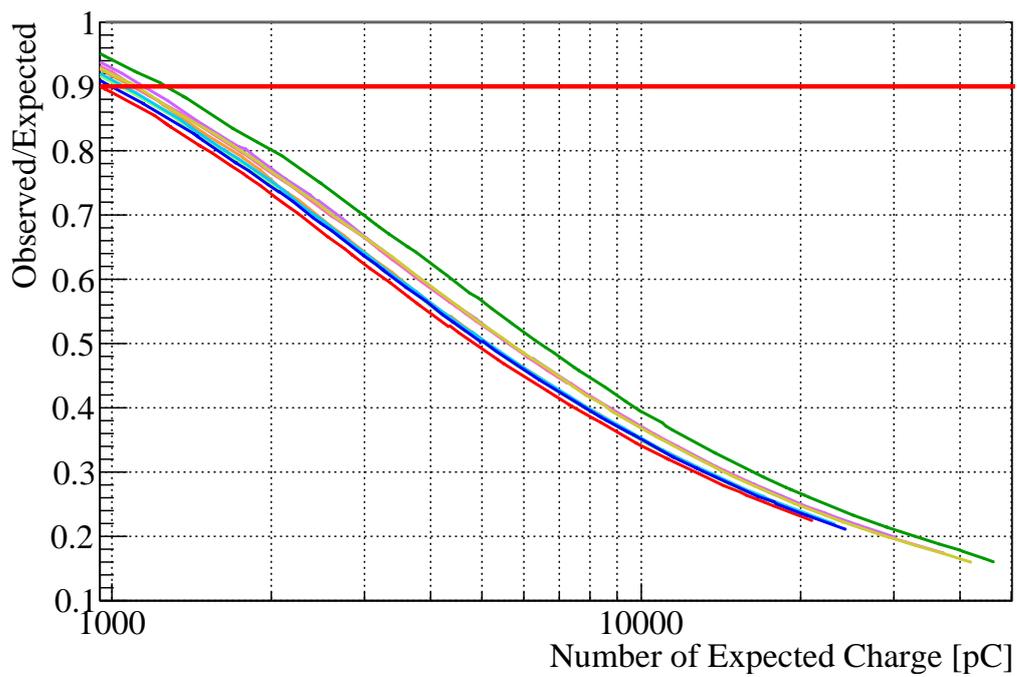


図 3.5 図 3.3 の飽和部の拡大

6.2.2. 光るタイミングの時間的なずれ で議論する光るタイミングのずれによる系統誤差の数 % の範囲でも一致していないが、

- 光源のパルス幅はレーザー光 1.0 ns, LED2.5 ns であった
- セットアップの Register が Outout Register ではないため光るタイミングがずれやすかった可能性がある
- 6.3. 適切な時間差 のようにタイミングを厳密に合わせていない

であることを考慮すると系統誤差はさらに大きい可能性があるため、一致しないとは言いきれない。別のハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA7163 において EA0047 と同様に電圧を変えて測定した結果図 3.2 の横軸を電荷に変えた結果が図 3.6 である。横軸は入力電荷、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.2 と同様でありまた図 3.6 中の凡例に書かれている様に、赤色が 1750 V, 青色が 1800 V, 黄緑色が 1850 V, 橙色が 1900 V を印加した時の非線形性のカーブである。

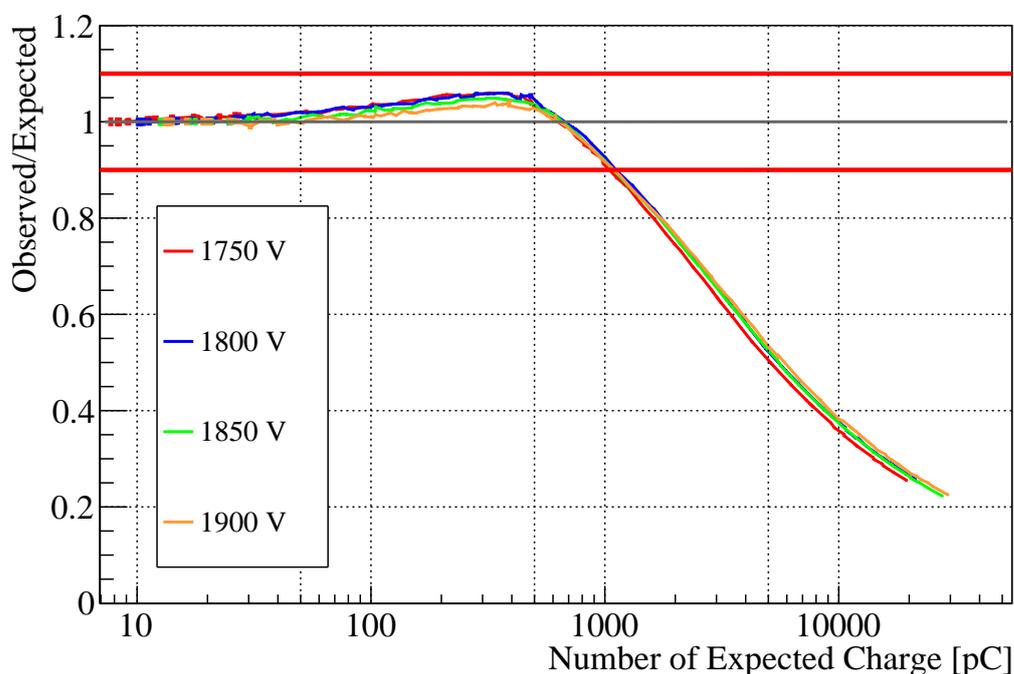


図 3.6 EA7163 の出力非線形性 (横軸: 電荷)

図 3.6 より別のハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) でも横軸を電荷に変えると非線形性のカーブの飽和の部分一致するが、オーバーリニアリティは一致しないことが確認できた。

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 と EA7163 において電圧を変えて測定した結果を、横軸を電荷にして描いた図 3.3 , 図 3.6 を重ねたグラフが図 3.7 である。横軸は入力電荷、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれであり、図 3.8 は図 3.7 の拡大図である。

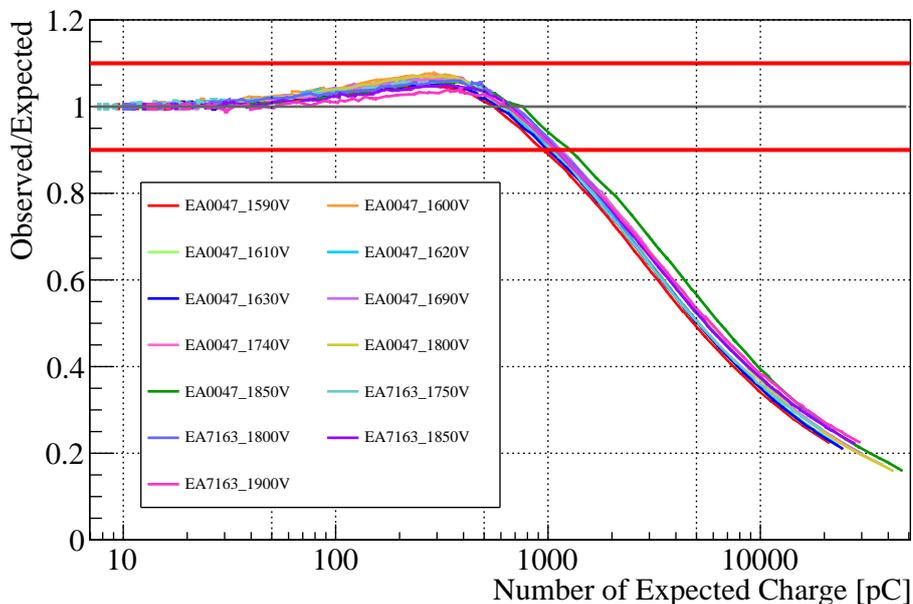


図 3.7 HK PMT(R12860) の EA0047 と EA7163 の出力非線形性 (横軸: 電荷)

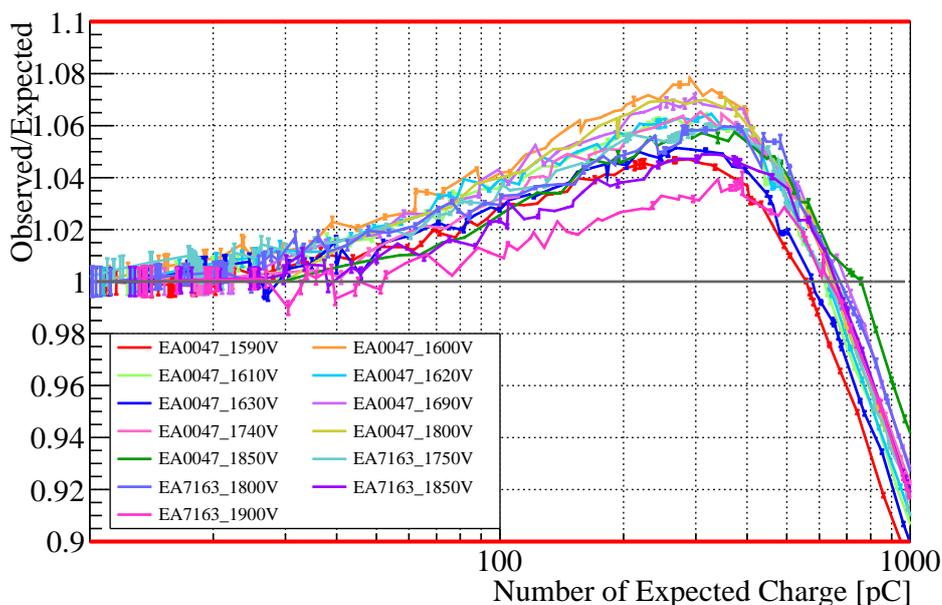


図 3.8 図 3.7 の拡大図

ここから、違う PMT でも横軸を電荷にすると飽和部については一致するが、オーバーリニアリティは一致しないことがわかった。ただし、拡大図 3.8 で見ると飽和部につ

いてもずれていることがわかった。オーバーリニアリティが最大になる時の電荷の値は個体差や電圧の違いに関係なく一致すると言えそうであるが、拡大図 3.8 で見ると EA7163 の 1900 V の時のデータはずれている。

### 3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果

スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の CD9029 において電圧を変えて測定した結果を以下に示す。横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.9 中の凡例に書かれている様に、赤色が 1790 V、橙色が 1830 V、黄緑色が 1860 V、水色が 1890 V、青色が 1930 V、薄紫色が 1960 V、桃色が 1990 V、若草色が 2030 V、緑色が 2060 V、浅葱色が 2090 V を印加した時の非線形性のカーブである。

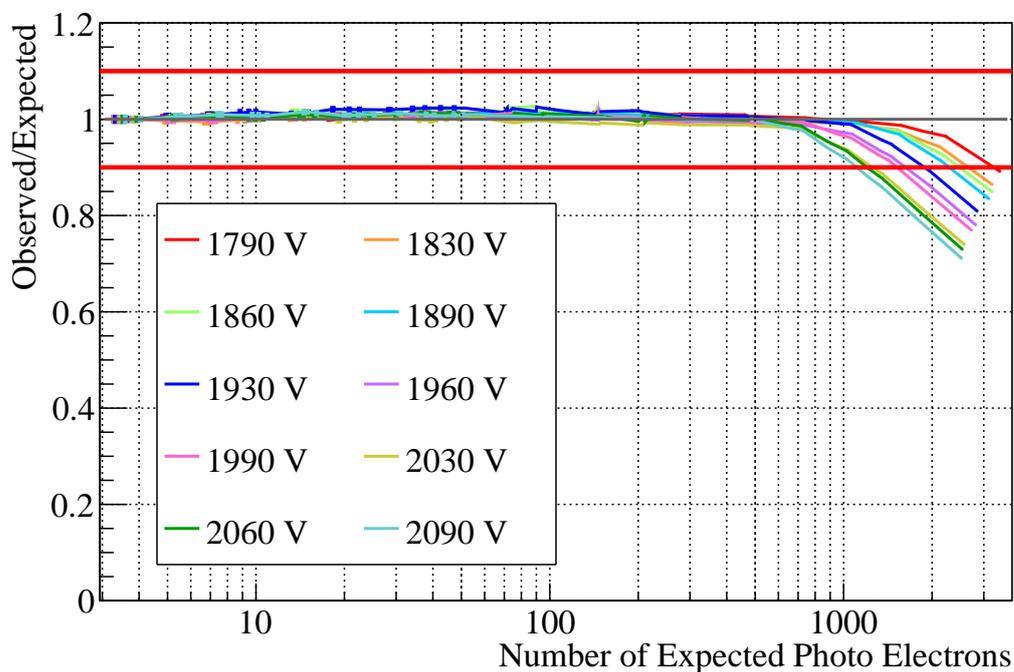


図 3.9 SK PMT(R3600) の CD9029 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)

図 3.9 より非線形性のカーブはスーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) においても印加電圧によって変化することがわかった。

図 3.9 の横軸を電荷に変えた結果を以下に示す。横軸は入力電荷、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.9 と同様でありまた図 3.10 中の凡例に書かれている様に、赤色が 1790 V、橙色が 1830 V、黄緑色が 1860 V、水色が 1890 V、青色が 1930 V、薄紫色が 1960 V、桃色が 1990 V、若草色が 2030 V、緑色が 2060 V、浅葱色が 2090 V を印加した時の非線形性のカーブである。

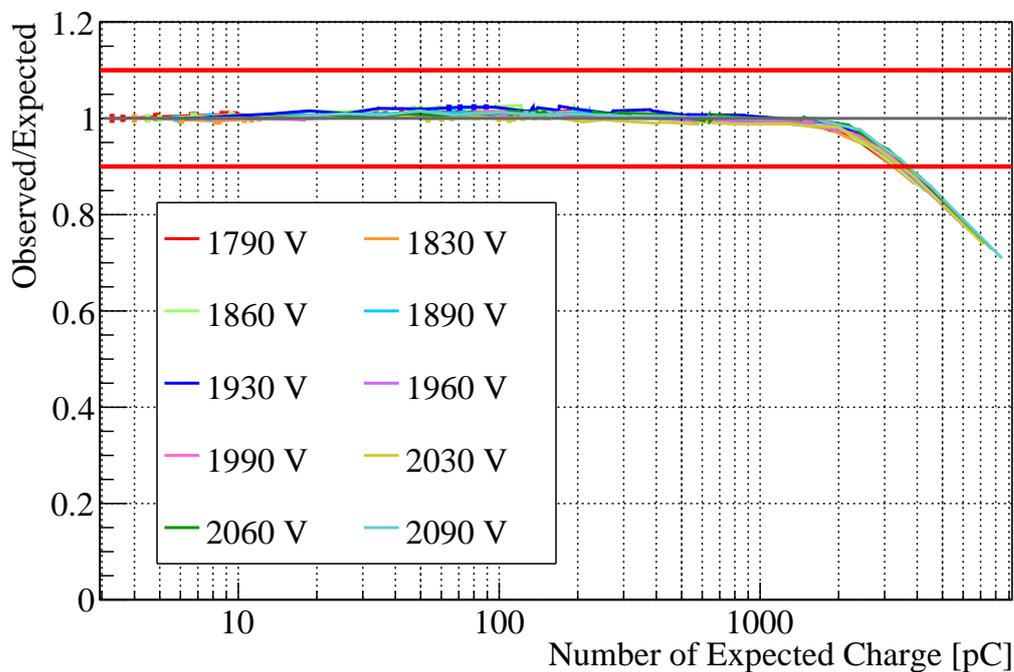


図 3.10 SK PMT(R3600) の CD9029 の出力非線形性 (横軸: 電荷)

図 3.10 より、スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) においても横軸を電荷に変えると飽和の部分が一致することが確認できた。

### 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果

ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の BC0592 において電圧を変えて測定した結果を以下に示す。横軸は入力光電子数, 縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.11 中の凡例に書かれている様に, 赤色が 1080 V, 橙色が 1180 V, 黄緑色が 1280 V, 水色が 1380 V, 青色が 1480 V を印加した時の非線形性のカーブである。

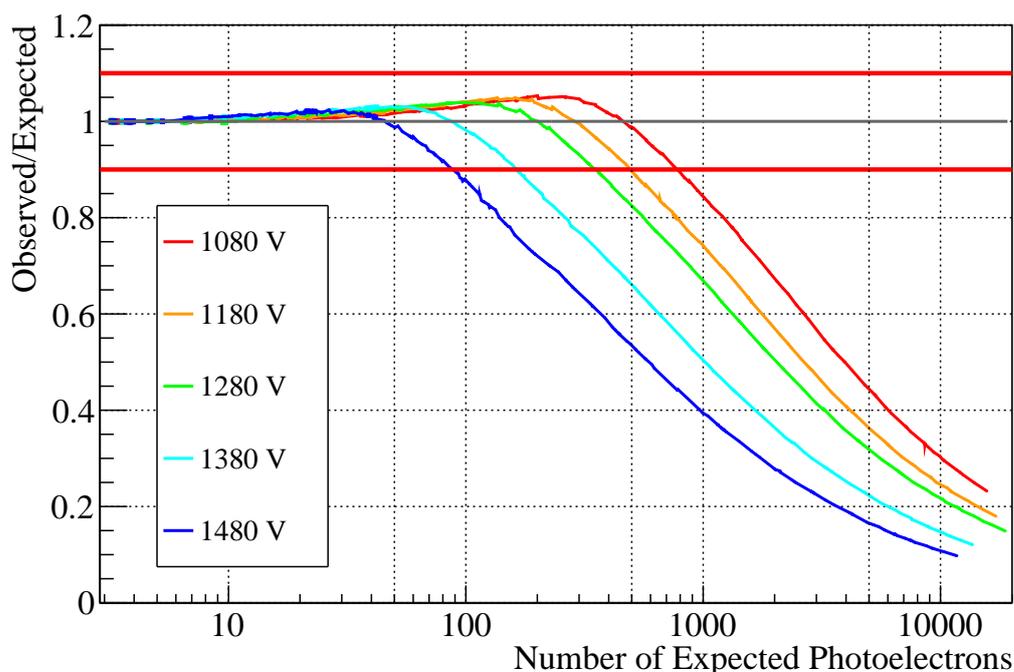


図 3.11 BC0592 の出力非線形性 (横軸: 光電子数)

図 3.11 より非線形性のカーブはハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) においても印加電圧によって変化することがわかった。

図 3.11 の横軸を電荷に変えた結果を以下に示す。横軸は入力電荷、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。印加電圧と色の対応は図 3.11 と同様でありまた図 3.11 中の凡例に書かれている様に、赤色が 1080 V、橙色が 1180 V、黄緑色が 1280 V、水色が 1380 V、青色が 1480 V を印加した時の非線形性のカーブである。

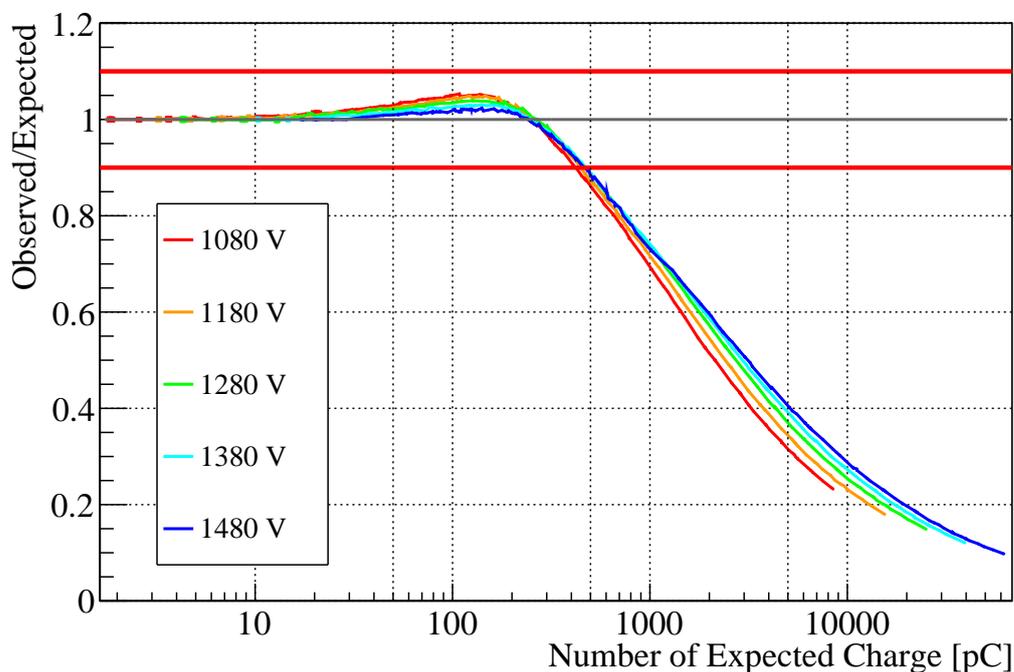


図 3.12 BC0592 の出力非線形性 (横軸: 電荷)

図 3.12 より、ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) では横軸を電荷に変えると飽和部分の全体は一致しなかった。しかし、縦軸の線形性からのずれが 1 と接している、つまり 1 光電子の時とゲインが等しい部分の近くで一致しているように見えたため、縦軸は 0.9~1.1、横軸は 10~1000 として拡大した図が図 3.13 である。

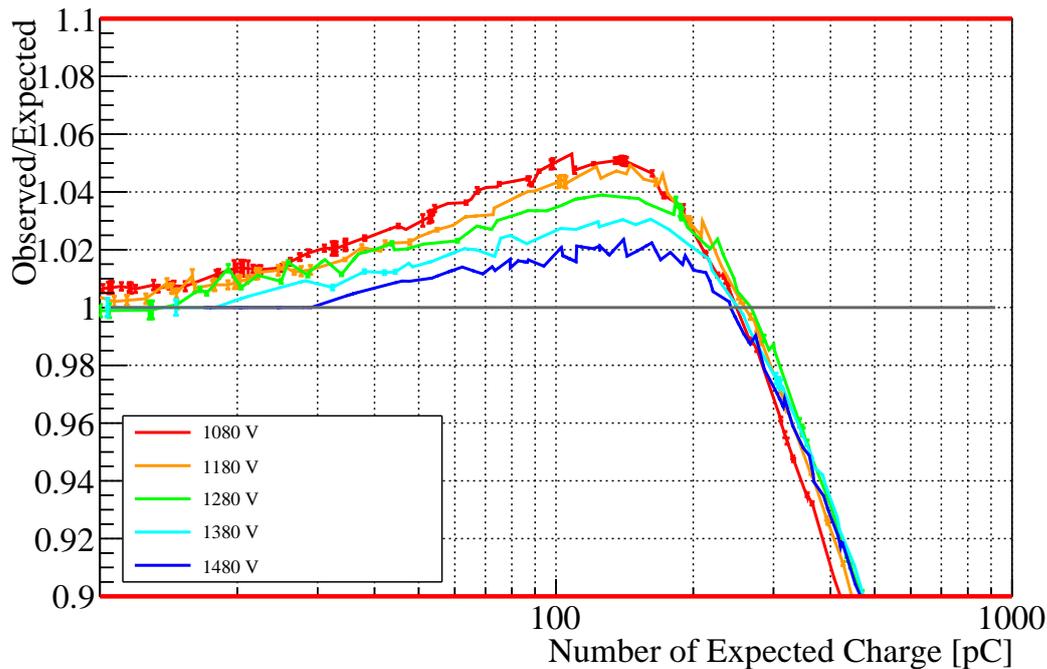


図 3.13 図 3.12 の拡大図

図 3.13 より、1 と接する部分で厳密には一致していないが、0.9~1 で近い値をとることがわかった。

### 3.7. 考察

#### 3.7.1. ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性測定について

まず、測定から得られたことをまとめる。

1. ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) において、横軸を電荷にして非線形性を観察すると飽和部は一致すると言えそうであるが、厳密に一致しているかどうかは更なる検証が必要である。
2. オーバーリニアリティについては印加電圧が高いほどあがりにくい傾向がある。
3. オーバーリニアリティの最高点の電荷は個体差や電圧の違いに関係なく一致すると言えそうであるが、EA7163 の 1900 V の時のデータではずれている。

1 点目と 3 点目に関しては、ずれているのが測定誤差によるものなのか、厳密には一致しないのか、複数回測定を行って比較する必要があるだろう。また、系統誤差がどの程度含まれている可能性があるか、その後差により測定された線形性がどの程度不確かであるかについては第 6 章系統誤差の見積もりで検討する。2 点目に関してはオーバ-

リニアリティに個体差があった場合は出力非線形性の補正が難しくなるため、個体差を抑えるか個体差を把握する必要があるだろう。個体差を抑える方法として、PMTの各ダイノードでの増幅率を決定する電位分割回路を改良することが挙げられるが、測定結果からは回路のどの部分が問題であるか不明なため、電位分割回路を数値計算で再現し、電位分割回路のどこをどのように変えれば出力線形性が良くなるか第4章モデリングで検討する。個体差を把握する方法に関しても、電位分割回路を数値計算で再現し、個体差の影響も含んだシミュレーションができれば非線形性の補正を良くできる可能性があるだろう。

### 3.7.2. ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) とスーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性の違いについて

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性は図 3.1 より、数百 pC でオーバーリニアリティが見え、500 pC 以降で飽和が見えた。一方、スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性は図 3.9 より、数百 pC でオーバーリニアリティが見えるが、R12860 と比べて 2% と小さく、飽和が起こるのも遅く、2000 pC 以降で飽和が見えた。このような違いが生じる原因は、PMT の構造にあると考えられる。スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) は、図 3.14 の様なベネシアンブラインド型というダイノード構造をしており、PMT に入射した光が変換されて生じた光電子は図 3.16 の様な軌道を描きながら増幅されていく。一方でハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) は、図 3.15 の様なボックスアンドライン型というボックス型とラインフォーカス型が組み合わせて用いられたダイノード構造をしており、ダイノード間の距離及びダイノード自体の大きさが初段より 2 段目以降の方が小さく、さらに最終段が最も小さくなっている。また、R12860 に入射した光が変換された光電子は図 3.17 の様な軌道を描きながら増幅されていく。

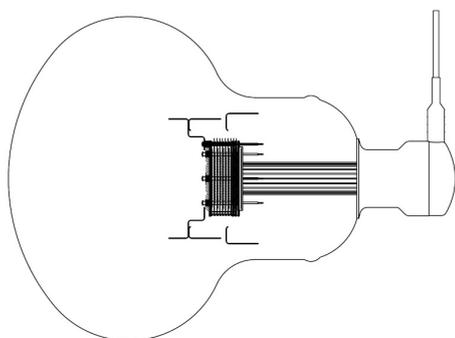


図 3.14 SK PMT(R3600) の内部構造 提供 浜松ホトニクス

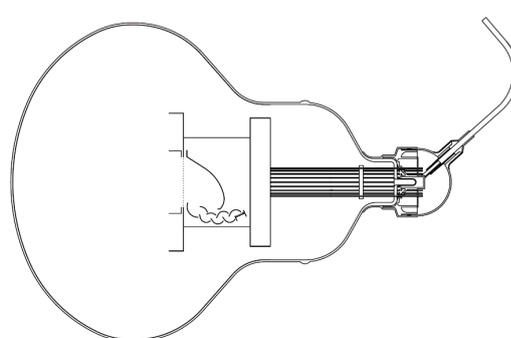


図 3.15 HK PMT(R12860) の内部構造 提供 浜松ホトニクス

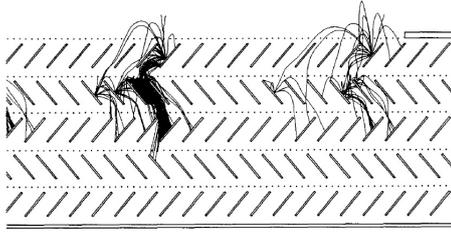


図 3.16 SK PMT(R3600) 内の電子軌道 [9]

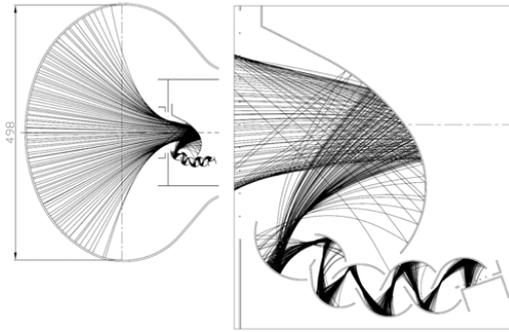


図 3.17 HK PMT(R12860) 内の電子軌道 提供 浜松ホトニクス

さらに後段に行くほどダイノード間を飛ぶ電子も増えていくため、ダイノード間の面積が同じであったとしても単位面積当たりの電子の数は増えていく。ベネシアンブラインド型の PMT では、図 3.16 の様に増幅された電子が 1 箇所集中せず、複数あるダイノードに分散されるため空間電荷飽和が起きにくいと考えられるが、ボックスアンドライン型の PMT では、図 3.17 の様に増幅された電子が 1 箇所集中し、さらにダイノードの全体に当たるのではなく集中して当たりやすいため、空間電荷飽和が起きやすいと考えられる。そのため、ボックスアンドライン型ではベネシアンブラインド型に比べてダイノード後段での飽和が起きやすいと考えられる。

### 3.7.3. ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) とハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性の違いについて

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) では、横軸を電荷にすると飽和が一致した。一方ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) では、横軸を電荷にしても 1 と飽和が一致しなかった。この違いは PMT の大きさに由来すると考えられる。PMT 自体が小さい場合、PMT が大きい場合に比べて最後のダイノード間で電子が密集しやすいと考えられる。電子が密集し空間電荷飽和が起きると、ダイノードから次のダイノードに向けて 2 次電子が放出されにくくなり、ゲインが落ちやすくなる。また、空間電荷飽和は印加電圧によって起きやすさや 2 次電子の放出されにくさが変化すると考えられるので、図 3.12 において印加電圧が大きいほど飽和が起きにくくなっていたと推測される。

## 第 4 章 モデリング

### 4.1. 目的

モデリングにより非線形性のカーブが再現できれば、第 5 章で述べる電位分割回路の改良においてどの様に回路を改良したらよいか考える指標になるため、差分法及び LTSpice を用いて 2 通りの方法でモデリングを試みた。また、個体差の影響も含んだ非線形性のシミュレーションができれば、スーパーカミオカンデですでに取得したデータに対する非線形性の補正も良くできる可能性がある。

### 4.2. 電位分割回路

ここでモデリング及びの第 5 章電位分割回路の改良において重要な電位分割回路について述べる。この回路はブリーダー回路と呼び、PMT のダイノード間の抵抗やコンデンサが含まれているため、この回路によってダイノード間の電位差を決めている回路である。

今回実験に用いたハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の回路図が図 4.1、スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の回路図が図 4.2 である。K と表記してある箇所が光電面で、0 V であり、右下の +HV という部分に 2000 V など印加電圧がかかるようになっている。中央の DY1, 2, ..., 10 がダイノードにつながっている部分で、抵抗によって分圧されている。

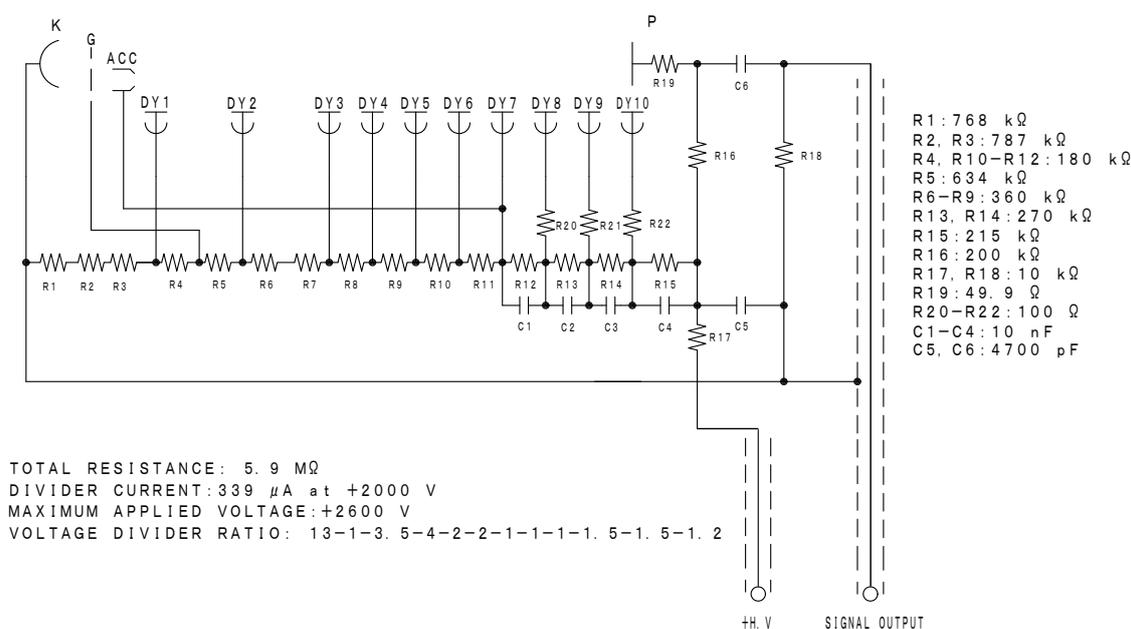


図 4.1 HK20 インチ PMT(R12860) の回路図 提供 浜松ホトニクス

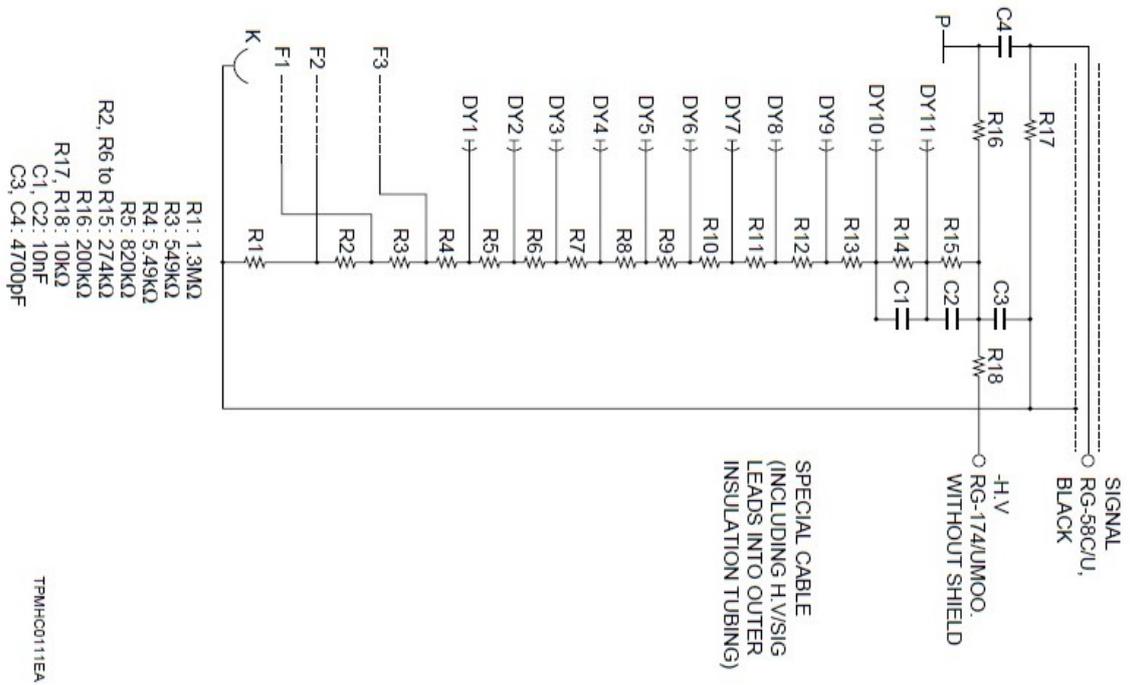


図 4.2 SK 20 インチ PMT(R3600) の回路図 提供 浜松ホトニクス

### 4.3. 反復法と直接法を組み合わせる用いた数値解析によるシミュレーション

反復法と直接法を組み合わせる C++ で記述した ROOT マクロでのモデリングを試みた。ソースコードは巻末付録 A を参照。

#### 4.3.1. 仮定

差分法を用いて数値計算するにあたり、簡単化のため以下の 5 点を仮定した。

- 入ってくる光電子の波形を矩形波に近似し、その時間幅は図 4.3 の様に 40 ns を仮定した。

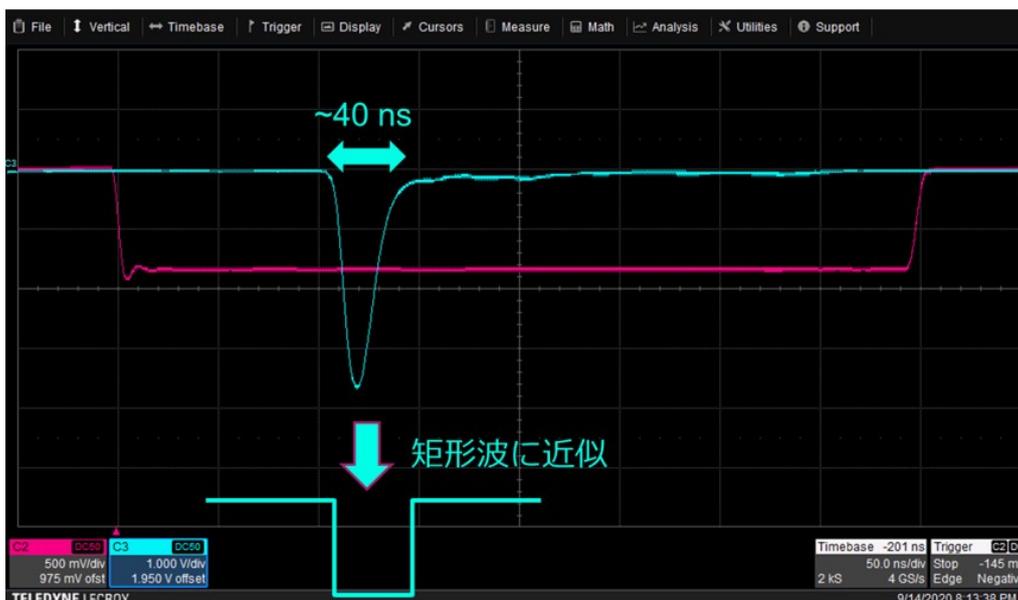


図 4.3 光電子の波形の近似

- 回路全体の電圧は常に印加電圧と等しいとする。
- 出力非線形は 1 各ダイノード間の電圧差が変化することによる各ダイノードでの増幅率の変化のみによって起こるとし、ダイノード構造や空間電荷飽和の影響は考慮しない。
- 電位分割回路の内、ダイノード間の抵抗及びコンデンサのみ考慮し、図 4.1 , 図 4.2 の右上にある P より右の信号読み出しのための抵抗及びコンデンサは計算に入れない。
- 入力電流の変化は入力光電子数に対して連続的に変化する。

### 4.3.2. 計算の方針

計算は以下の順で行った.

1. パラメータ  $a, k$  の見積もり
2. 反復法を用いた 1 光電子と 2 光電子入射時のシミュレーション
3. 直接法を用いた光入射時のシミュレーション

#### 4.3.2.1. パラメータ $a, k$ の見積もり

第 3 章での測定でハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT EA0047 の印加電圧とその時のゲインは表 4.1 の様な結果となり, スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT CD9029 の印加電圧とその時のゲインは表 4.2 の様な結果となった. これらの値を用いて式 (2.2) より

$$\begin{aligned} \mu &= \prod_n (aV_n^k) = \prod_n \left\{ a \left( V \times \frac{R_n}{\sum_n R_n} \right)^k \right\} \\ &= \frac{a^n V^{nk}}{(\sum_n R_n)^{nk}} \prod_n R_n \end{aligned} \quad (4.1)$$

にフィッティングしてパラメータ  $a, k$  を求めた.

表 4.1 EA0047 のゲインと印加電圧の測定結果

印加電圧/V	ゲイン
1500	$4.91 \times 10^6$
1550	$6.13 \times 10^6$
1560	$6.44 \times 10^6$
1570	$6.62 \times 10^6$
1580	$6.90 \times 10^6$
1600	$7.30 \times 10^6$
1650	$9.11 \times 10^6$
1690	$10.8 \times 10^6$
1700	$11.1 \times 10^6$
1800	$16.2 \times 10^6$
1900	$22.4 \times 10^6$
2000	$31.2 \times 10^6$

表 4.2 CD9029 のゲインと印加電圧の測定結果

印加電圧/V	ゲイン
1790	$6.25(5) \times 10^6$
1830	$7.62(5) \times 10^6$
1860	$8.36(6) \times 10^6$
1890	$9.38(8) \times 10^6$
1930	$11.75(7) \times 10^6$
1960	$13.16(8) \times 10^6$
1990	$14.55(9) \times 10^6$
2030	$17.32(15) \times 10^6$
2060	$18.99(12) \times 10^6$
2090	$20.80(14) \times 10^6$

#### 4.3.2.2. 反復法を用いた 1 光電子入射時と 2 光電子入射時のシミュレーション

まず, 光が入射していない時に回路に流れる電流  $I$  を  $V = I \sum_n R_n$  を用いて計算し, その電流が流れ込むとして 1 光電子入射した時について計算を行った. ただし, 光が入射するとダイノード電流が発生することにより  $I$  を回路に流しても全体の電圧  $V'$  が印加電圧  $V$  と等しくならない. そこで,  $I' = (V - V') / \sum_n R_n$  を足した  $I + I'$  が回路に流れ込むとして 1 光電子入射した時について再度計算を行い, 全体の電圧  $V''$  が印加電圧  $V$  と等しくなるかどうかを確かめた. ここで, 数値計算では  $V = V''$  となるまで計算を行うのは困難であるため,  $|V - V''|$  の値がある閾値 (今回は 0.1 V) 以下になることを等しいとする条件とした. 全体の電圧  $V''$  が印加電圧  $V$  が合っていない場合は再度  $I'' = (V - V'') / \sum_n R_n$  を計算し, 回路に流れ込む電流を  $I + I' + I''$  として再度計算した. これを  $|V - V''|$  が先ほどの閾値 (今回は 0.1 V) 以下になるまで行い, 1 光電子入射時のゲインを計算した. 同様の手順で 2 光電子入射時についても計算した.

#### 4.3.2.3. 直接法を用いた光入射時のシミュレーション

4.3.2.2. 反復法を用いた 1 光電子入射時と 2 光電子入射時のシミュレーション で 1 光電子入射時と 2 光電子入射時のゲインが反復法を用いて求められた。反復法を用いて調べたい光電子数全て、つまり今回は 1 – 10000 光電子数に対して計算を行うと、時間がかかり、かつ収束しないことがあった。そのため、ひとつ前の光電子数の時の計算結果、つまり  $m$  光電子の計算をする際には  $m - 2$  光電子と  $m - 1$  光電子の計算結果を使用して直接法で算出し、計算の速度及び収束性を上げることにした。ここで入力電流の変化は入力光電子数に対して連続的に変化する、という仮定を用い、入力光電子数が増えていくとともに連続的に入力電流値は増えていくとした。また、最初の 1 光電子及び 2 光電子入射時に対しては 4.3.2.2. 反復法を用いた 1 光電子入射時と 2 光電子入射時のシミュレーション で 1 光電子入射時と 2 光電子入射時の計算で算出した電流値を用いて直接法で算出しなおした。

まず、 $m - 2$  光電子数入射時の電流値  $I_{m-2}$  と  $m - 1$  光電子数入射時の電流値  $I_{m-1}$  を用いて  $\delta I = I_{m-1} - I_{m-2}$  を算出しておく。次に  $m$  光電子数入射時について考え、回路には  $I_{m-1} + \delta I$  が高電圧電源により入力されるとして計算を行い、全体の電圧  $V'$  を求めた。 $|V - V'|$  が閾値 (今回は 0.1 V) 以下になっているか確かめ、なっていなかった場合は回路に供給される電流値が  $I_{m-1} + \delta I + \delta I/1000$  であるとして再度計算し、全体の電圧  $V''$  を求めた。 $|V - V''|$  が閾値 (今回は 0.1 V) 以下になっているか確かめ、なっていなかった場合は回路に供給される電流値が  $I_{m-1} + \delta I - \delta I/1000$  であるとして再度計算し、全体の電圧  $V'''$  を求めた。 $|V - V'''|$  が閾値 (今回は 0.1 V) 以下になっているか確かめ、なっていなかった場合は回路に供給される電流値が  $I_{m-1} + \delta I + 2\delta I/1000$  であるとして再度計算し、全体の電圧  $V''''$  を求めた。この様に回路に供給される電流値を  $I_{m-1} + \delta I$  の周りで  $\delta I/1000$  ずつずらしていき、 $|V - V'|$  が閾値 (今回は 0.1 V) 以下になる電流値を探し、閾値以下となった時のゲインを  $m$  光電子数入射時のゲインとした。

この計算を 1 光電子から 10000 光電子まで繰り返し、それぞれの光電子数の時のゲインを求め、それぞれ  $m$  光電子数の時のゲイン / 1 光電子の時のゲインを計算することで線形性からのずれを計算した。

### 4.3.3. 結果

#### 4.3.3.1. $a, k$ のフィッティング結果

EA0047 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.1 の  $a, k$  のフィッティング結果が図 4.4 である。黒の点が測定結果, 赤の線がフィッティングの線である。

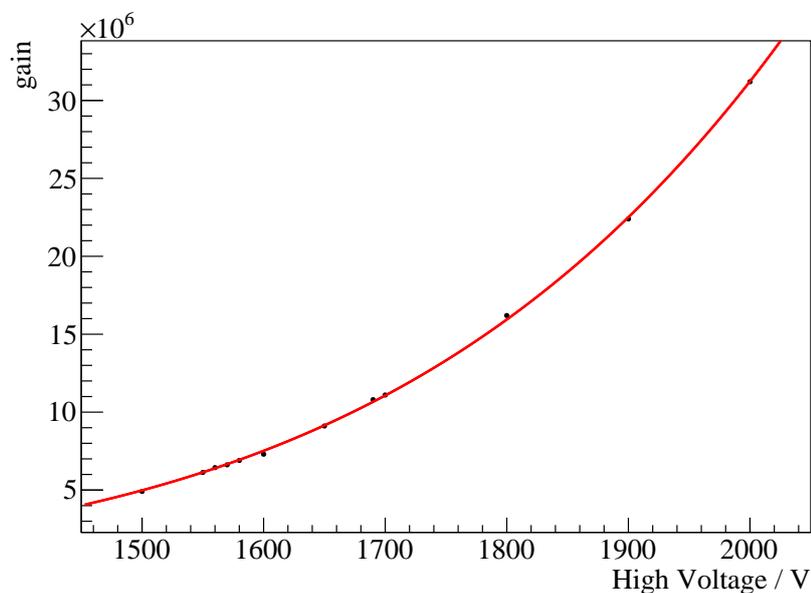


図 4.4 EA0047 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.1 のフィッティング結果

CD9029 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.2 の  $a, k$  のフィッティング結果が図 4.5 である。黒の点が測定結果, 赤の線がフィッティングの線である。

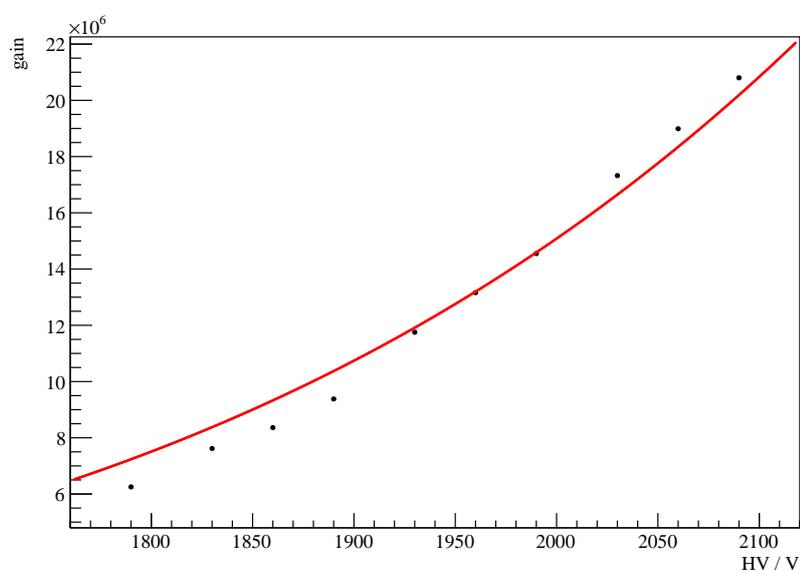


図 4.5 CD9029 のゲインと印加電圧の測定結果表 4.2 のフィッティング結果

#### 4.3.3.2. 非線形性のシミュレーション結果

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 について行った非線形性のシミュレーション結果が図 4.6 で、横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。赤色が 1590 V、青色が 1690 V、黄緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。

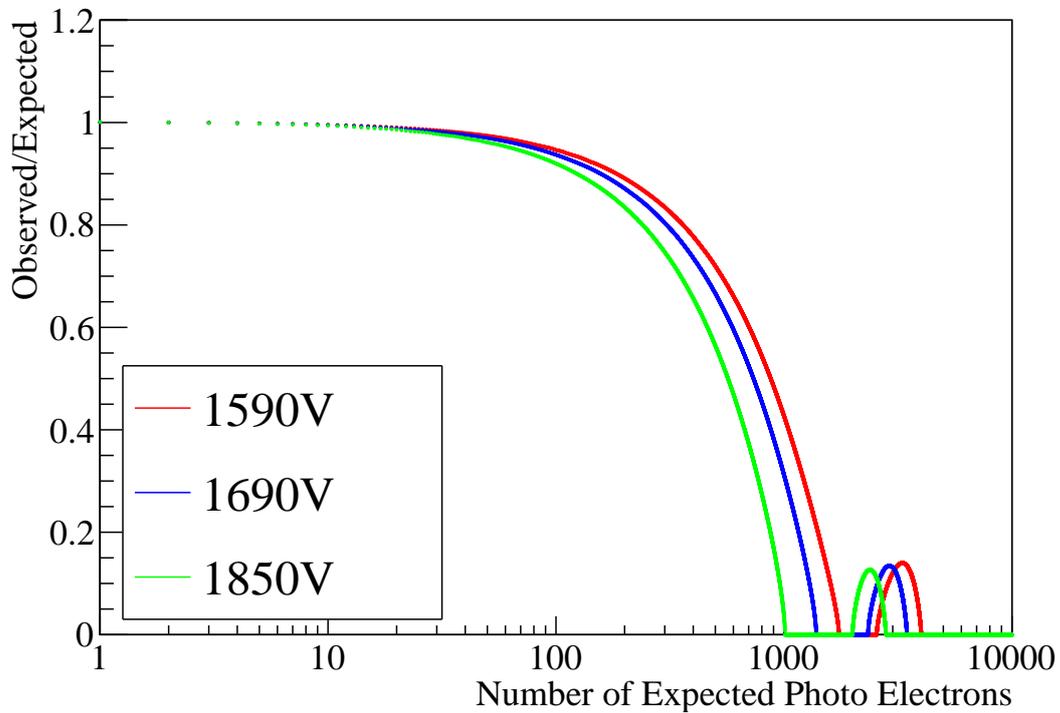


図 4.6 EA0047 の入力光電子数に伴う出力非線形の変化

オーバーリニアリティは観測できなかったが、高光量でゲインが減少することと印加電圧によって非線形性が変化する様子が確認できた。

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 のダイノードについているコンデンサを全て取り外したと考慮して行った非線形性のシミュレーション結果が図 4.7 で、横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。赤色が 1590 V、青色が 1690 V、黄緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。

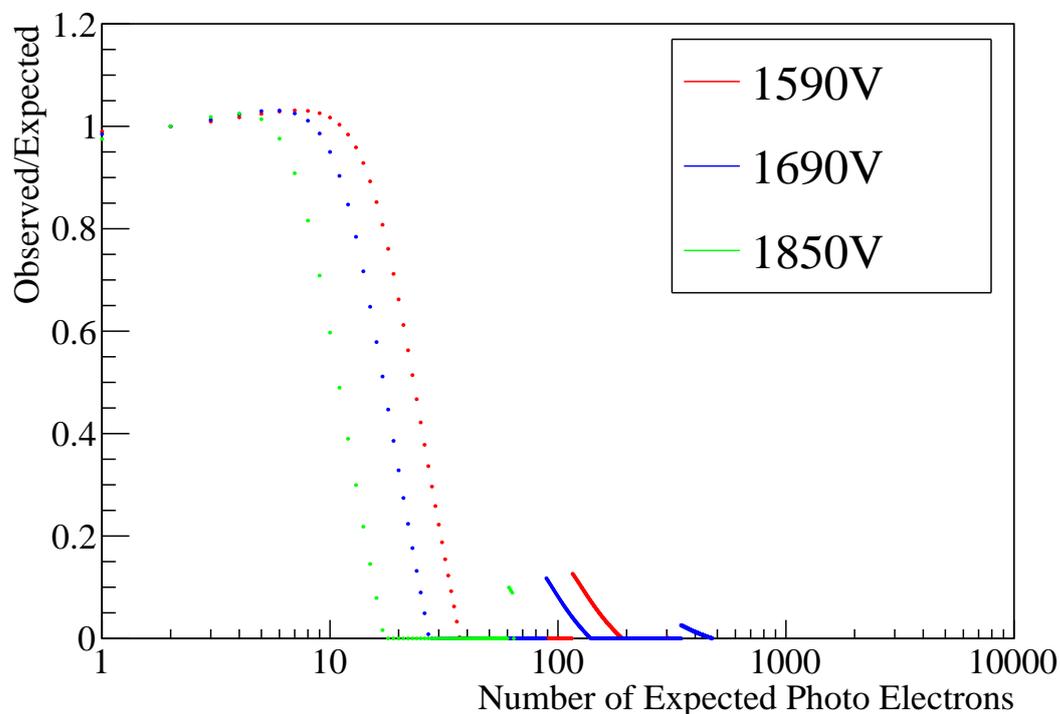


図 4.7 EA0047(C1-C4 なし) の入力光電子数に伴う出力非線形の変化

コンデンサがない場合、オーバーリニアリティも高光量での飽和も観測でき、コンデンサがない時に比べて線形性が悪くなることがシミュレーションで確認できた。

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 の全てのダイノードに 10 nF のコンデンサを取り付けたと考慮して行った非線形性のシミュレーション結果が図 4.8 で、横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。重なっており黄緑色しか見えないが、赤色が 1590 V、青色が 1690 V、黄緑色が 1850 V を印加した時の非線形性のカーブである。

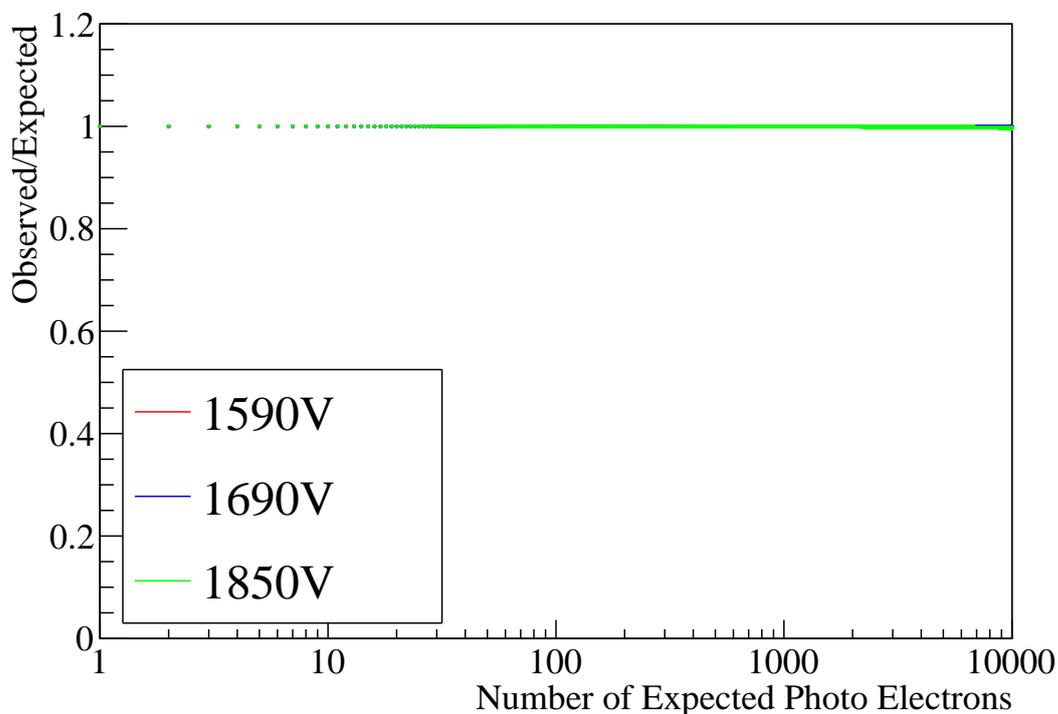


図 4.8 EA0047(全てのダイノードにコンデンサ追加) の入力光電子数に伴う出力非線形の変化

全てのダイノードにコンデンサ 10 nF を付けるとシミュレーションでは線形性が良くなることがわかった。

スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の CD9029 について行った非線形性のシミュレーション結果が図 4.9 で、横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。赤色が 1790 V、青色が 1890 V、黄緑色が 1990 V、橙色が 2090 V を印加した時の非線形性のカーブである。

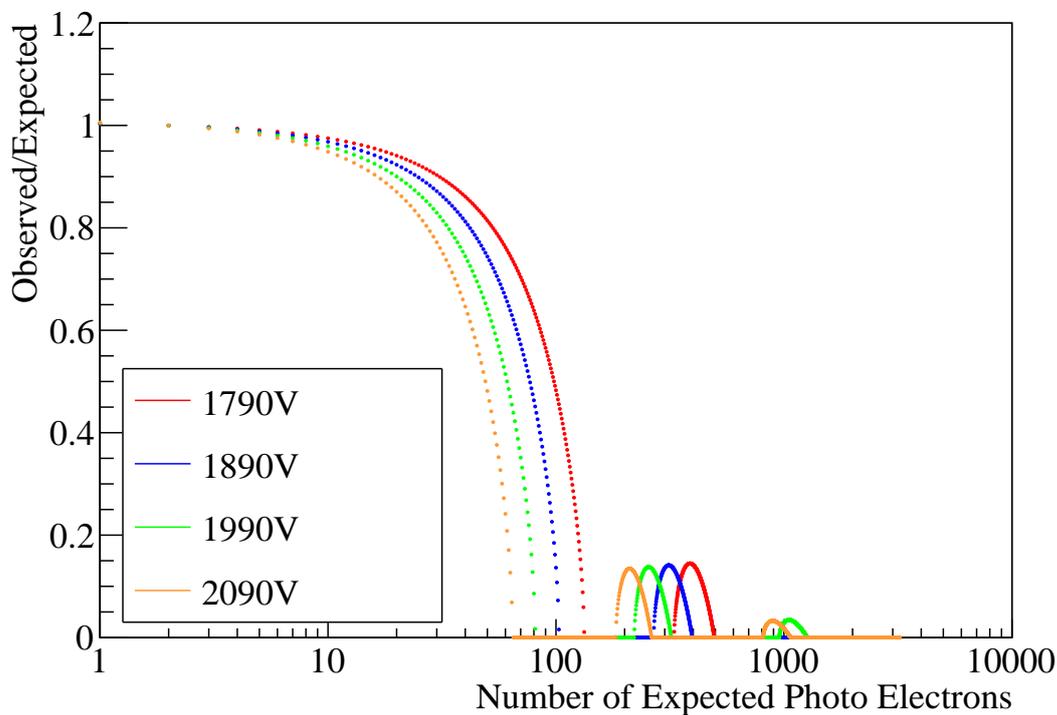


図 4.9 CD9029 の入力光電子数に伴う出力非線形の変化

測定結果とオーバーリニアリティがほとんどない点では一致したが、ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) より線形性がよいという結果とは矛盾してハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) のシミュレーション結果より線形性が悪くなった。

#### 4.3.3.3. ダイノードごとの増幅率のシミュレーション結果

ダイノードごとの増幅率についても入力光電子数の増加によりどの様に変化するかシミュレーションした。ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 について行ったダイノードごとの増幅率のシミュレーション結果が図 4.10 で、横軸は入力光電子数、縦軸は各ダイノードでの増幅率である。赤色がダイノード 1、橙色がダイノード 2、黄緑色がダイノード 3、水色がダイノード 4、青色がダイノード 5、紫色がダイノード 6、桃色がダイノード 7、若草色がダイノード 8、緑色がダイノード 9、萌葱色がダイノード 10 である。実線がコンデンサなしのダイノード、破線がコンデンサありのダイノードを表している。

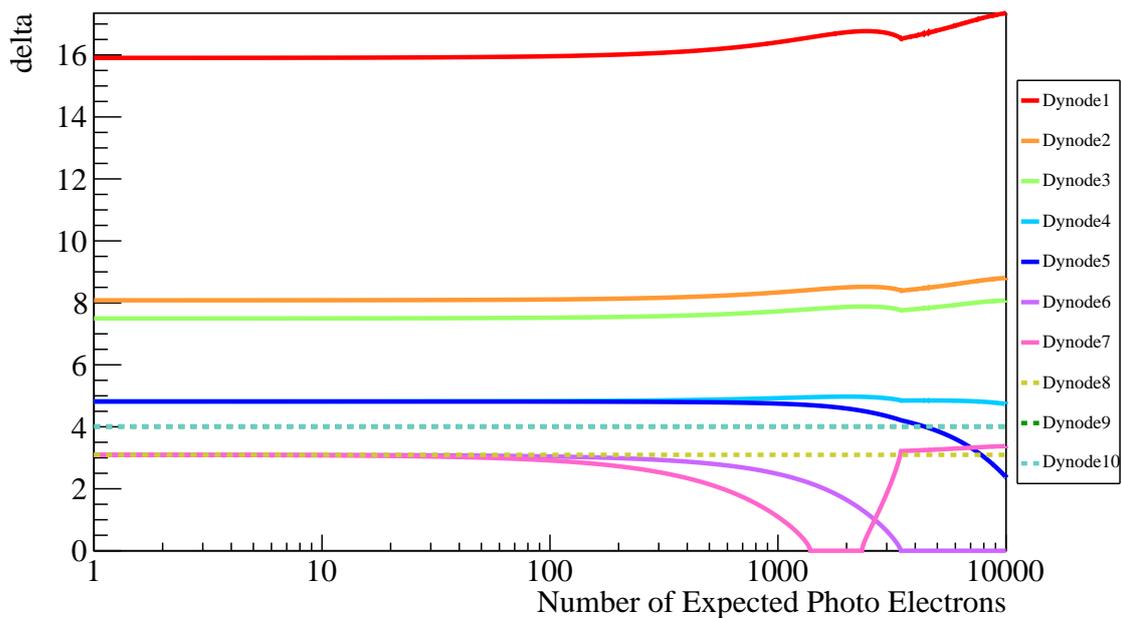


図 4.10 EA0047(1690 V) の入力光電子数に伴うダイノードごとの増幅率の変化

桃色のダイノード 7 での増幅率が 1000~2000 光電子で 0 まで落ち込んでおり、図 4.6 と合わせてみると、非線形性のカーブが極小になっているところと一致することがわかる。よってシミュレーションより、高光量での飽和はコンデンサのついていないダイノードの内、最も後ろのダイノードにおける増幅率が減少することにより起きると考えられる。

ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EA0047 のダイノードについているコンデンサを全て取り外したと考える行ったダイノードごとの増幅率のシミュレーション結果が図 4.11 で、横軸は入力光電子数、縦軸は各ダイノードでの増幅率である。赤色がダイノード 1、橙色がダイノード 2、黄緑色がダイノード 3、水色がダイノード 4、青色がダイノード 5、紫色がダイノード 6、桃色がダイノード 7、若草色がダイノード 8、緑色がダイノード 9、萌葱色がダイノード 10 である。

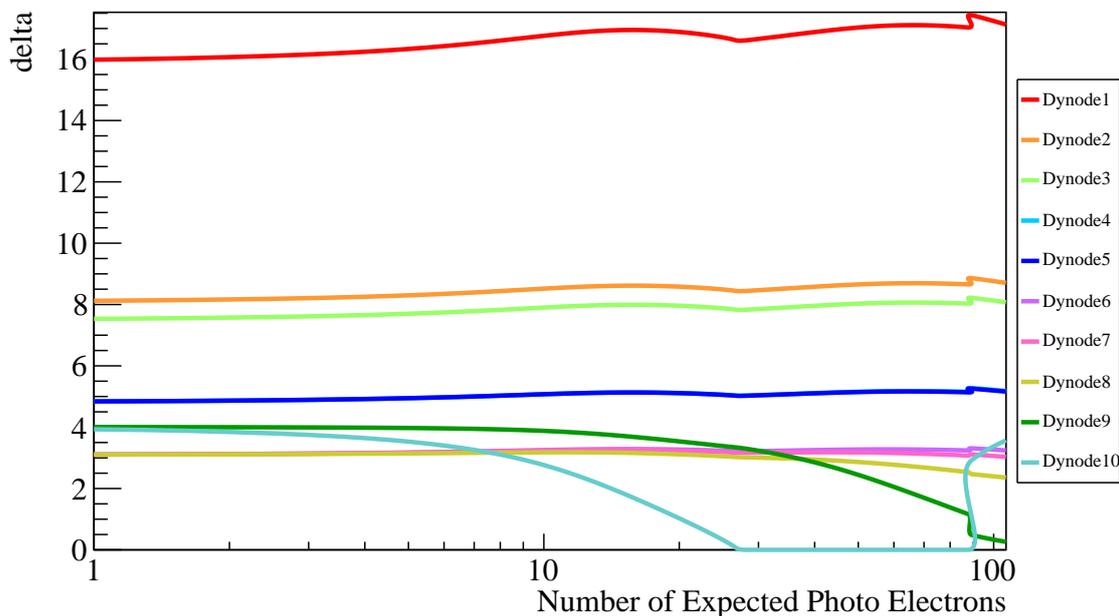


図 4.11 EA0047(1690 V, コンデンサなし) の入力光電子数に伴うダイノードごとの増幅率の変化

萌葱色のダイノード 10 での増幅率が 20~30 光電子で 0 になっており、図 4.7 と合わせてみると、非線形性のカーブが 0 になる位置と一致していることがわかる。ここからも、最後段での増幅率が減少することにより全体のゲインも落ちると示唆されている。

## 4.4. LTSpice を用いたモデリング

LTSpice は電子回路設計の際などに使用される電子回路シミュレーションソフトである。

### 4.4.1. 仮定

LTSpice を用いてモデリングするにあたり以下の 4 点を仮定した。

- 入ってくる光電子の波形を sin 波の半波長に近似し、その波長は光電子数によらず一定とする。
- $i$  番目のダイノードでの増幅率 ( $\mu_i = aV_i^k$ ) は、光が入射すると発生するダイノード電流により変化するダイノード間の電圧差  $V_i$  の変化によって変化する。
- パラメータ  $a, k$  は第 3 章での測定で求められた EA0047 の印加電圧とゲインの対応から ROOT を用いたフィッティングにより求めた値を用いた。
- ダイノード間を飛ぶ時間 (TOF) は、変化したダイノード間の電圧差  $V_i$  を逐次  
用いて  $t_i = l_i \sqrt{\frac{m_e}{e \times V_i}}$  で計算した。

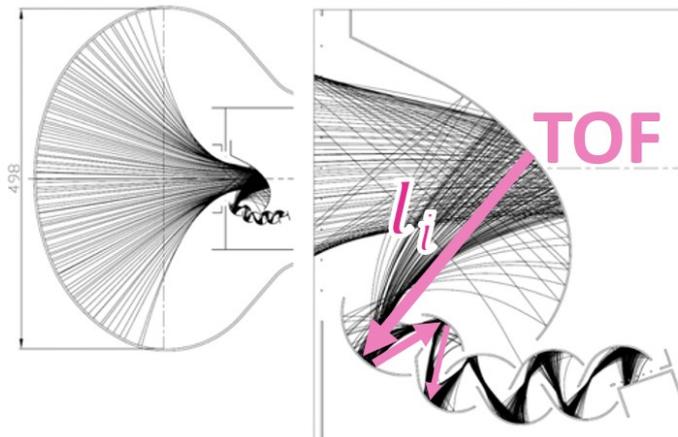


図 4.12 ダイノード間を飛ぶ時間 (TOF), 浜松ホトニクスによる図に加筆

#### 4.4.2. 回路図

LTSpice を用いて次のような回路図を作成した。

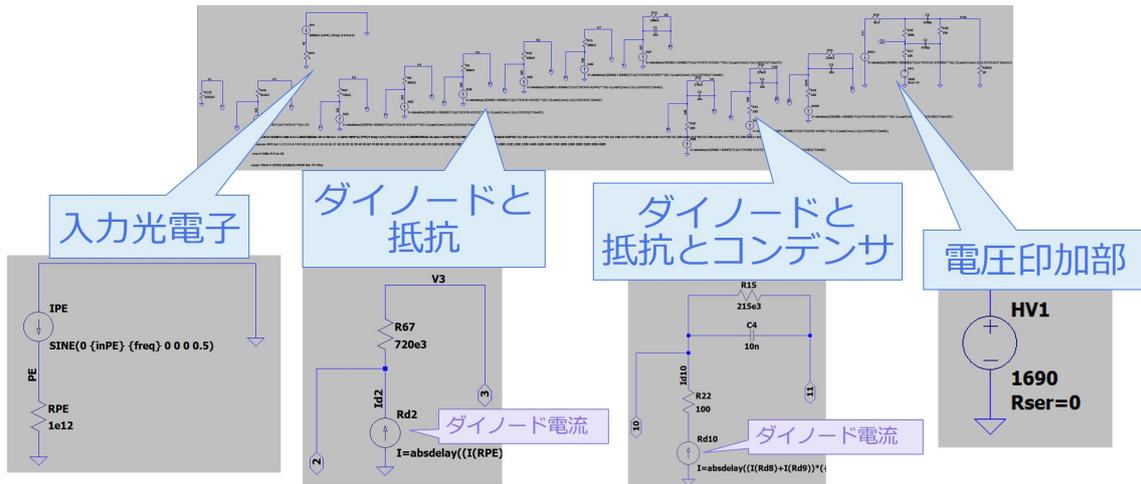


図 4.13 LTSpice でモデル化した EA0047 の回路図

#### 4.4.3. 結果

図 4.13 の回路を用いてシミュレーションした EA0047 の出力電流が図 4.14 , 図 4.15 である。図 4.14 は 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 光電子, 図 4.15 は 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 光電子の出力電流である。

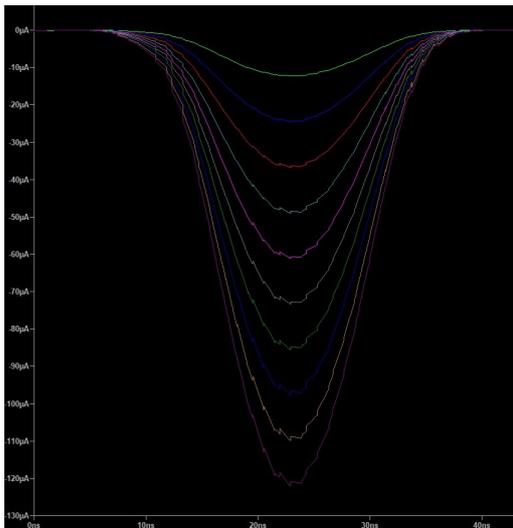


図 4.14 LTSpice でモデル化した EA0047 の出力 (1-10 光電子)

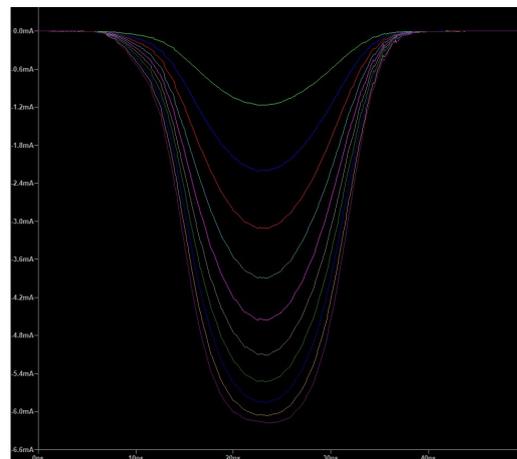


図 4.15 LTSpice でモデル化した EA0047 の出力 (100-1000 光電子)

図 4.13 の回路を用いてシミュレーションした EA0047 の線形性のカーブが図 4.16 である。

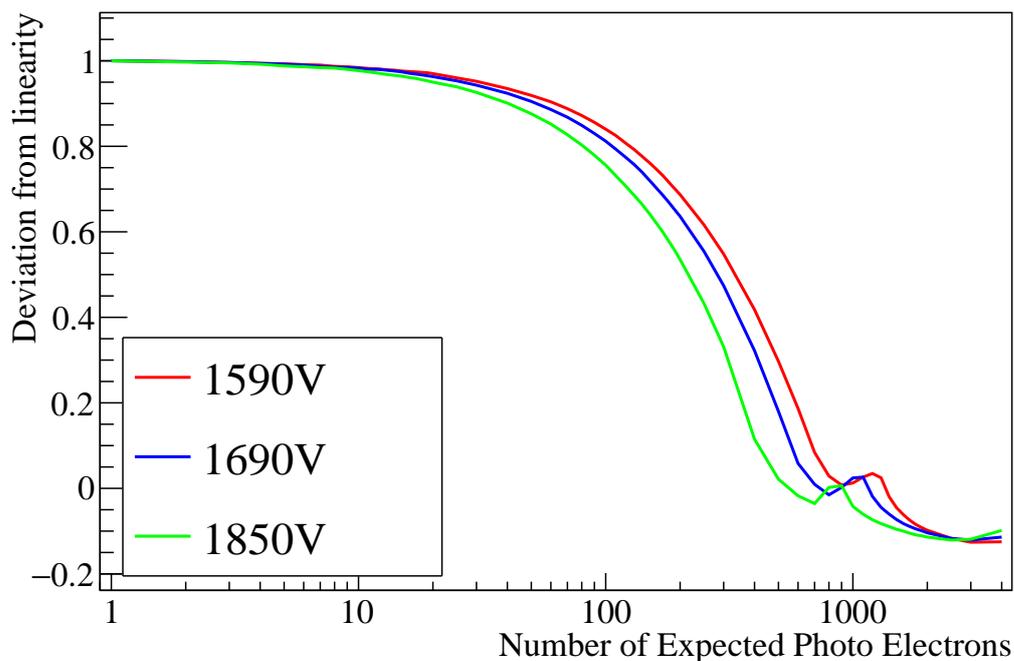


図 4.16 LTSpice でモデル化した EA0047 の線形性のカーブ

## 4.5. 今後の展望

今回は出力非線形の原因として 1 各ダイノード間の電圧差が変化することによる各ダイノードでの増幅率の変化のみしか考慮に入れなかったが、図 3.1 の様な非線形のカーブを再現することはできなかった。数値計算の結果 4.3.2. を見るとハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) とスーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形の図があまり変わっていないことから、この 2 つの PMT の一番の違いであるダイノード構造が出力非線形を再現するには重要であると考えられるため、ダイノード構造を考慮に入れると再現できる可能性があると考え。ダイノード構造によってダイノード最終段の電子の存在する空間の大きさが変化すると考えられるため、空間電荷飽和を考慮に入れたいと思う。

## 第 5 章 電位分割回路の改良

### 5.1. 目的

第 3 章 3.4. 節の結果から、もし出力非線形に個体差が存在した場合、1% 精度での補正は難しくなることが推察される。そこで測定で主に使用する領域である低光量領域のオーバーリニアリティを抑えることができれば個体差により生じる補正のずれを抑えられると考え、ハイパーカミオカンデに使用される PMT に採用するオーバーリニアリティでの非線形性カーブの上昇が小さくなるような回路を探すために行った。

### 5.2. 試した回路

今回使用したハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT の内、EA0047 と EB0015 はブリーダー回路の基板に直接はんだ付けして回路が改良できる PMT であった。図 5.1 は EA0047 の回路改良できる回路で、改良の際使用したコンデンサは高耐圧 (最大 3 kV) の積層セラミックコンデンサ 10 nF である。そのため、予備実験として EA0047 で図 5.2 の 9 通りの回路を試し、その中で改良されたように見えていた光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を 1 個追加した回路図 5.3 を含む図 5.3 ~ 図 5.5 と改良前の回路の計 4 つの回路を EB0015 で測定した。

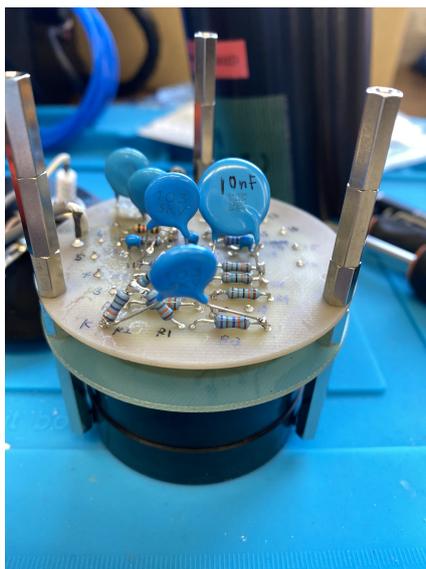


図 5.1 EA0047 の回路改良

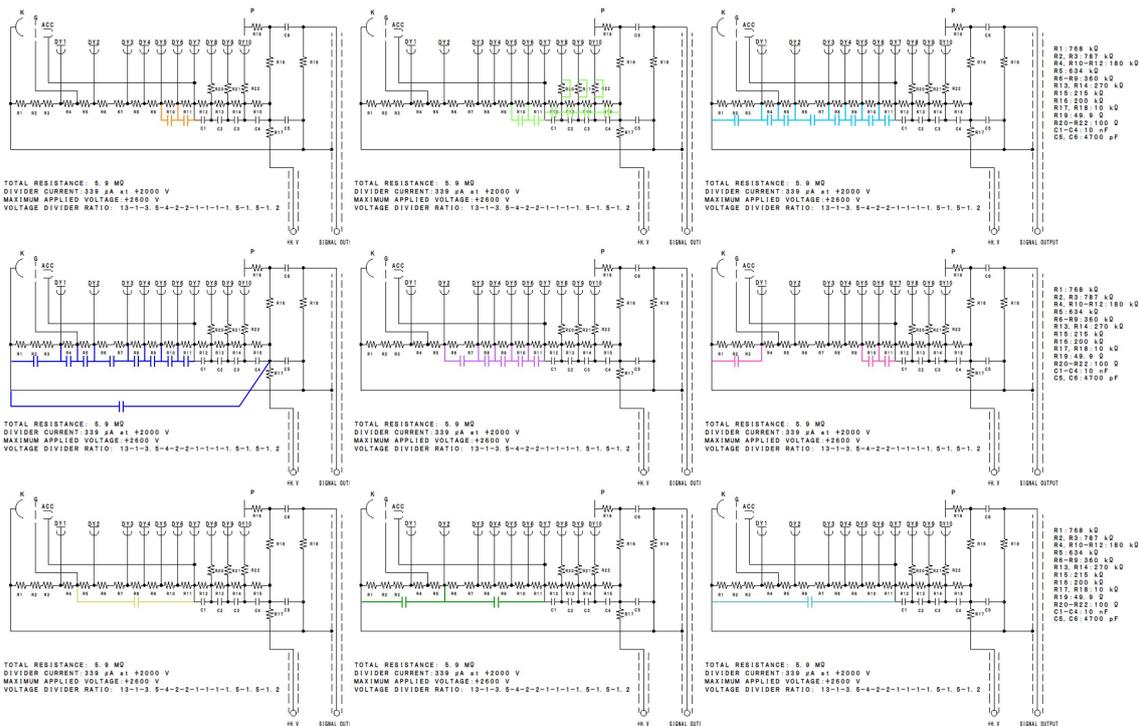


図 5.2 EA0047 で試した回路

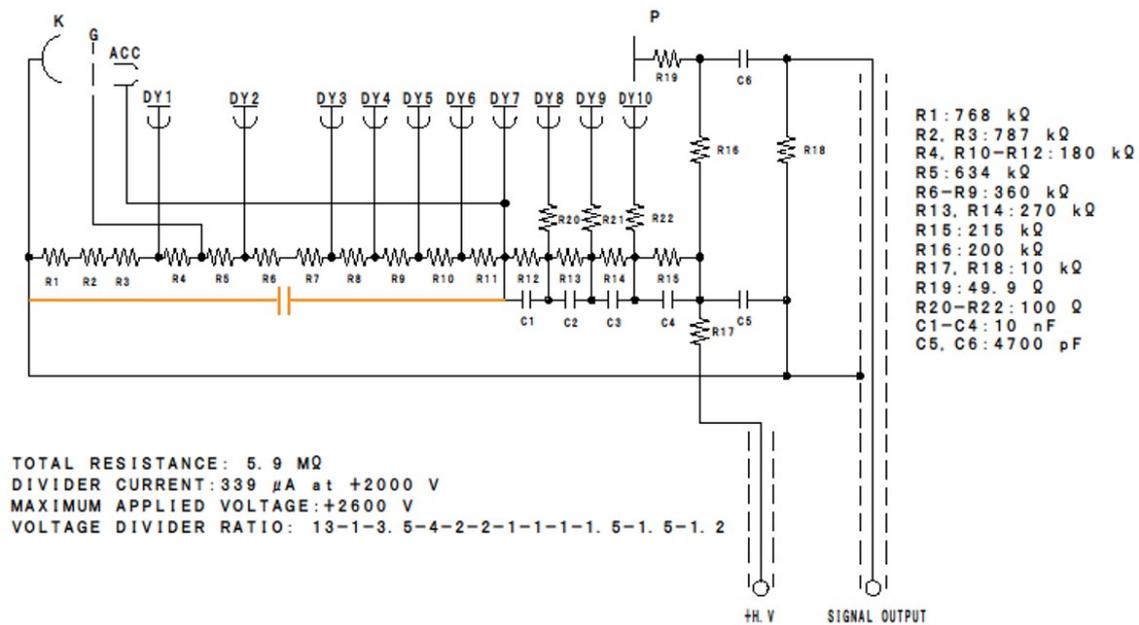


図 5.3 EB0015 で試した光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を 1 個追加した回路

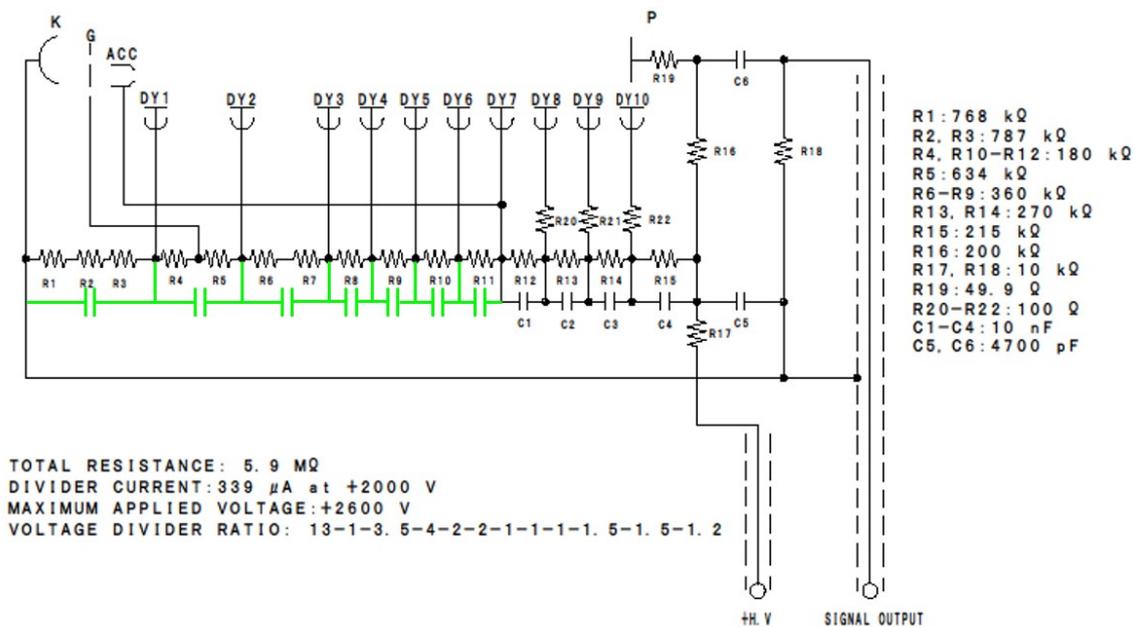


図 5.4 EB0015 で試した全てのダイノード間に 10 nF が入っているようにコンデンサを追加した回路

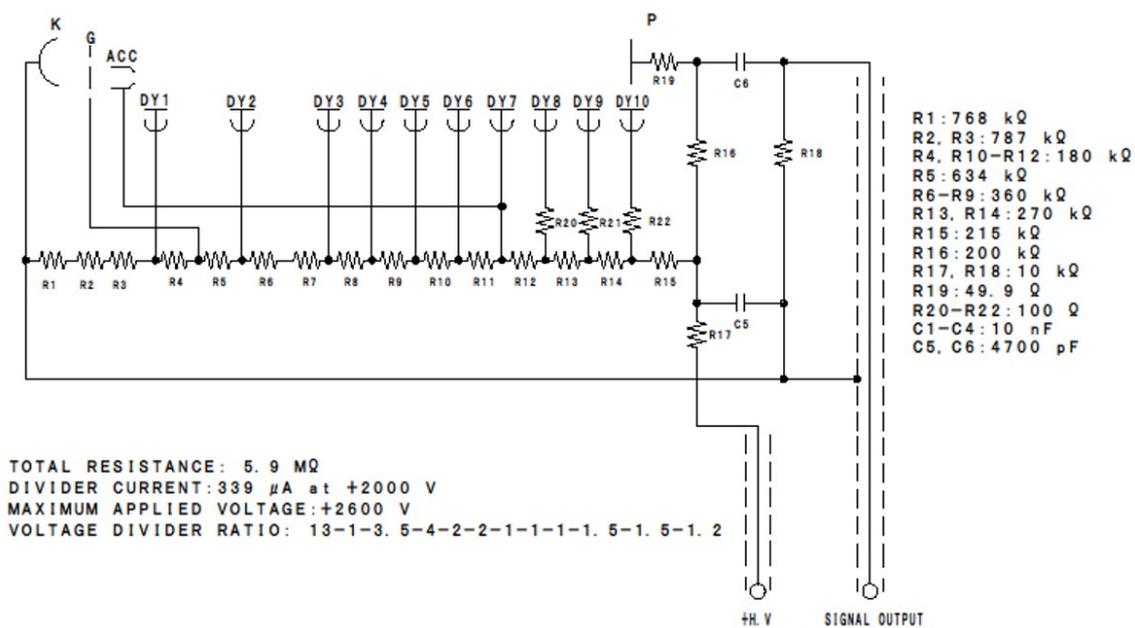


図 5.5 EB0015 で試した後段のダイノード間にある 10 nF のコンデンサを抜いた回路

### 5.3. 結果

改良した回路で測定した非線形性が図 5.6 で、図 5.7 はその拡大図である。横軸は入力光電子数、縦軸は出力が線形の時を 1 とした線形性からのずれである。赤色で表したのが改良前の回路図 4.1 での測定結果、橙色で表したのが光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を 1 個追加した回路図 5.3 での測定結果、緑色で表したのが全てのダイノード間に 10 nF が入っているようにコンデンサを追加した回路図 5.4 での測定結果、水色で表したのが後段のダイノード間にある 10 nF のコンデンサを抜いた回路図 5.5 の測定結果である。

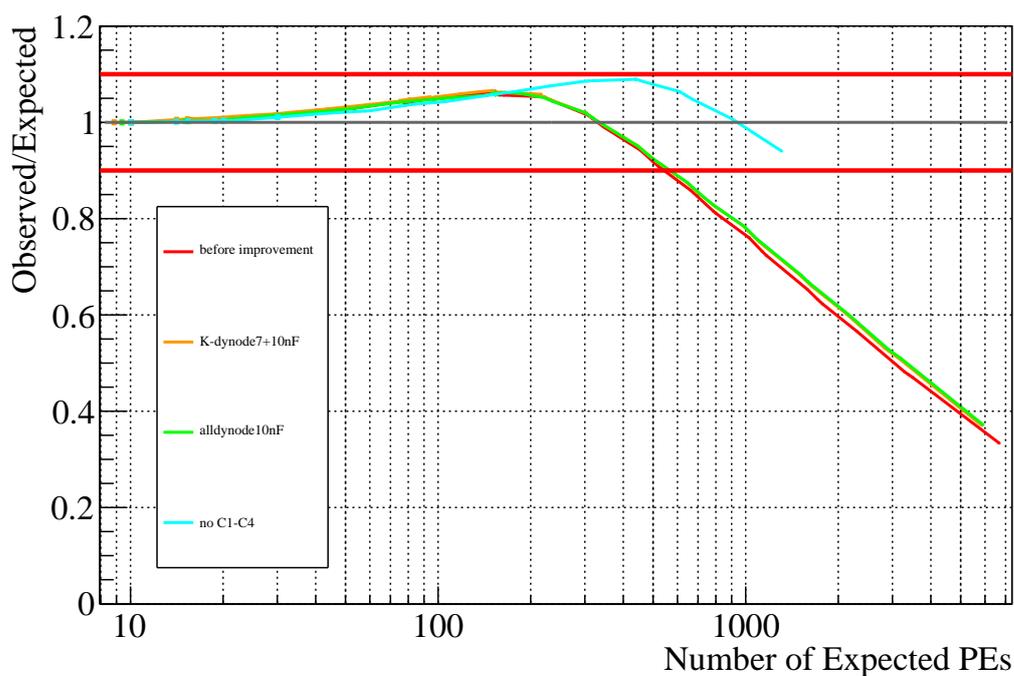


図 5.6 改良した回路での非線形性の測定結果

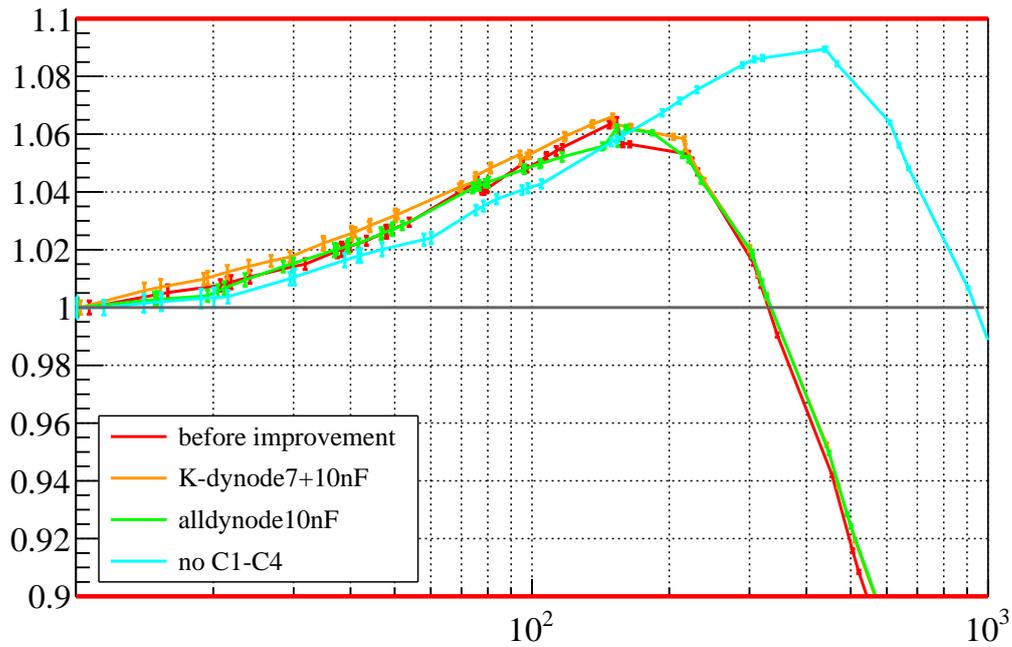


図 5.7 改良した回路での非線形性の測定結果図 5.6 の拡大図

図 5.6 より、コンデンサをダイノード間に追加する方法は非線形性にほとんど効果がないことがわかった。しかし、水色で表した後段のダイノード間にある 10 nF のコンデンサを抜いた回路図 5.5 のみゲインが 1 桁異なっていたことから、後段のコンデンサはゲインの安定などに寄与している可能性がある。

表 5.1 改良回路とゲインの関係

回路	ゲイン
改良前の回路	$1.233(4) \times 10^7$
図 5.3 の回路	$1.275(5) \times 10^7$
図 5.4 の回路	$1.285(4) \times 10^7$
図 5.5 の回路	$2.699(15) \times 10^6$

## 5.4. 今後の展望

シミュレーション結果から示唆された後段だけでなく前段～中段にコンデンサを追加する改良方法で電位分割回路を改良してみたが、非線形性に改善は見られなかった。一方で、後段のコンデンサを取り外した測定結果においてゲインが  $1/4 \sim 1/5$  になっていたことを考慮するとコンデンサを入れることで PMT の動作が安定化する可能性があると考えられる。例えば、PMT の収集効率には位置依存性や磁場依存性があることが知られており、出力非線形性の位置依存性や磁場依存性については現在調査中である。今後、出力非線形性の位置依存性や磁場依存性が今回測定した光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を 1 個追加した回路図 5.3 や、全てのダイノード間に 10 nF が入っているようにコンデンサを追加した回路図 5.4 において改善するか測定する予定である。

## 第 6 章 系統誤差の見積もり

### 6.1. 考えうる系統誤差の種類

系統誤差が生じ得る原因として以下のものが考えられる

1. レーザー光の不安定性
2. 光るタイミングの時間的なずれ

### 6.2. 系統誤差の大きさ

6.1. 考えうる系統誤差の種類 で考えた系統誤差に対してどの程度の大きさであるか、非線形性の測定においてどの程度影響するか考える。

#### 6.2.1. レーザー光の不安定性

まず、レーザー光がどの程度不安定であるか測定を行った。ある光量のレーザーを光らせた時のデータとペDESTALをある測定の前後で測定した結果が図 6.1 , 図 6.2 である。レーザー光のパルス幅は 1 ns, スイッチ 0 で USB 制御アッテネータ 48.0 dB を通過し、ダイヤル式アッテネータは通過していない光を入射した。これらに行った測定は 10 ns での比の測定で、2 つの測定の間には 7 時間 10 分の間が経過していた。ペDESTALは 1 回, 光らせた時のデータはそれぞれ 2 回ずつ測定していたのでデータ 1, 2 と呼ぶこととする。

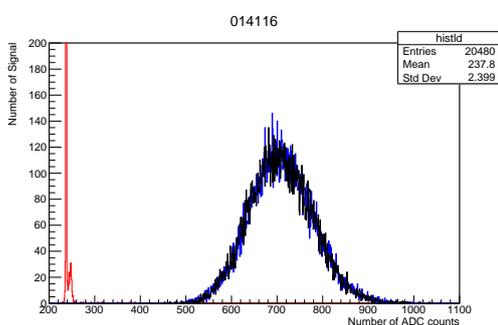


図 6.1 測定 1 回目

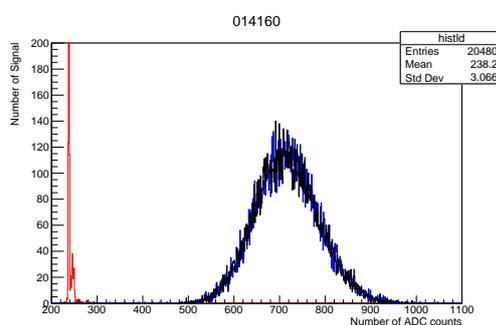


図 6.2 測定 2 回目

これらのペDESTALと光のピークの平均値はそれぞれ表 6.1 であった。

表 6.1 ピークの平均値

	測定 1 回目	測定 2 回目
ペDESTAL	237.301	237.750
データ 1	708.795	716.667
データ 2	708.624	715.893
ペDESTALとデータ 1 の差	471.494	478.917
ペDESTALとデータ 2 の差	471.323	478.143
ペDESTALとデータの差の平均	471.4085	478.530

よって

$$\frac{471.4085 - 478.530}{(471.4085 + 478.530)/2} = -0.015 \quad (6.1)$$

より、レーザー光は 1 – 2 % 程度はふらつくことがわかった。

次に、レーザー光が不安定であった場合どの程度非線形性の測定に影響を与えるか考える。和の測定において測定は 32 回同じ光源で測定を行って光源を変えて 32 回同じ光源で測定を行って光源を変えてという繰り返しになっており、そのセット内で光量の評価を行うため、データセットの中で光量が単調増加しているなどの不安定性があれば影響するが、上で見積もったような長期的に見た時のレーザー光の不安定性は非線形性の測定に影響をほとんど与えないと考えられる。比の測定においてはスイッチ 0 で 3 分測定した後にスイッチ 1 に切り替えて 3 分測定する、という方式を取っていたため、3 分の間に光量が変化した場合光量の見積もりに 1 – 2 % 程度の誤差が生じる可能性がある。しかし、スイッチ 0 で 3 分測定した後にスイッチ 1 に切り替えて 3 分測定し、もう一度スイッチ 0 で 3 分測定した後にスイッチ 1 に切り替えて 3 分測定するなど連続的に繰り返し測定してみたが 1 – 2 % もの違いは生じなかった。よって、レーザー光の不安定性の非線形性の測定への影響は 1 % 未満であると考えられる。

## 6.2.2. 光るタイミングの時間的なずれ

2.2.1. 光源を2つ使用して和を用いる方法の測定方法において光源を両方光らせた際、光らせるタイミングがずれていた場合どの程度結果に影響するかを見積もるために、光源同士の光らせるタイミングのずれを変えていって線形性からのずれがどのように変化するか測定を行った。図 6.3, 図 6.4 は、光るタイミングの時間的なずれというのどのようなことを指しているのかを表した図である。

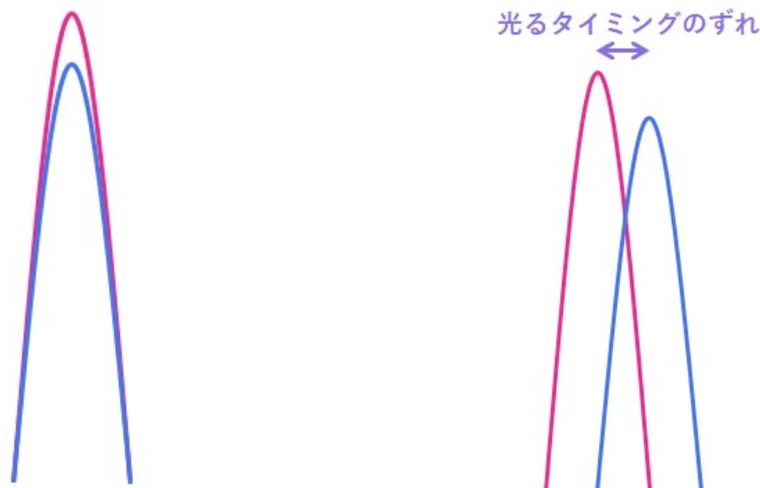


図 6.3 光るタイミングがあっている時

図 6.4 光るタイミングの時間的なずれ

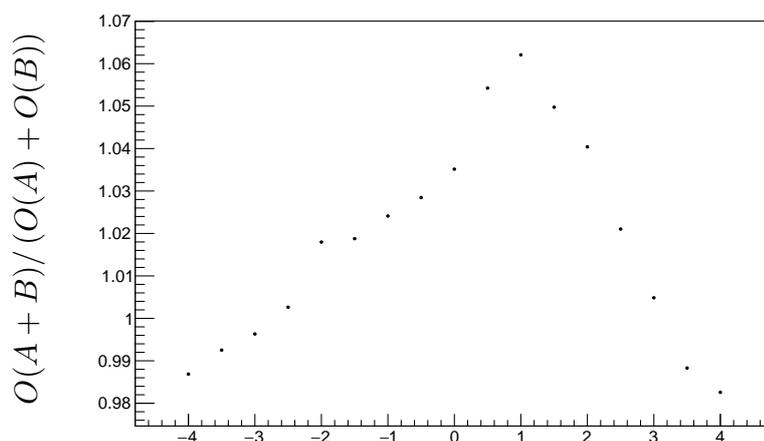
青とマゼンタの線は2種類の光源によるパルスを示しており、両方光らせた際にはそれらのパルスが図 6.3 の様に完全に一致していることが望ましい。しかしパルス幅を 2.5 ns といった ns オーダーにして使用すると、図 6.3 の様に完全に一致させることは困難であり、図 6.4 の様に光るタイミングにずれが生じている可能性がある。図 6.4 の様に光るタイミングにずれが生じていた際に非線形性の測定結果に影響をどの程度与え得るか、そのタイミングのずれと測定結果の関係を調べることで見積もることとする。

光らせるタイミングを図 6.3 の様に完全に一致させるのは非常に困難であるため、オシロスコープを用いてゲートを基準に目視で光らせるタイミングを合わせた時を 0 とし、そこから光源を光らせるタイミングを相対的に変化させた。0 とした時間差で図 6.3 の様に一致しているかは不明であるため、以下では一致している時間差がどの時であるかも推定し、3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果、3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果、第 5 章 電位分割回路の改良 の測定では個の見積もりの後、最も光るタイミングのずれが小さいと考えられるセットアップにおいて測定を行った。光量の設定は、片方ずつは約 85 光電子出ていて両方光らせた際に約 170 光電子になる光量を用い、光源のパルス幅

はどちらも 2.5 ns にして測定を行った。全ての測定の前にペDESTALを測定し、そのペDESTALを用いて光量を見積もり、

$$\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)} \quad (6.2)$$

がパルス間のずれに対してどの様に変化するか測定した結果が図 6.5 である。2つの光源を光源 1, 2 とすると、光源 1 と 2 を目視で合わせたところを 0.0 ns, 光源 1 が 2 に比べて早く光る時を正、遅く光る時を負と定義してその時間差で横軸は表した。



目視で合わせたタイミングからのずれ / ns

図 6.5 パルス間の時間的なずれと線形性の測定の関係

ここから、光源同士の光らせるタイミングがずれると  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値及びこの値を用いて測定を行う非線形性の測定結果が数% 変化しうることがわかった。また、0.5 ns ずれるだけでも +2.0 ns ~ +2.5 ns にかけて 1.9% ずれていることから、最大で 1.9%/0.5 ns ずれ得る可能性があることがわかった。

さらに 1.5 ns と停留点のような -1.5 ns, -2.0 ns で線形性の測定の測定を行うと図 6.6 のように非線形性の測定結果が変化した. 1.5 ns は, 図 6.5 では 1.0 ns より  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値が小さいが, 測定時には図 6.5 で最大値をとった 1.0 ns の  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値 1.0621 とほぼ等しい 1.060 という値を観測していたため 1.5 ns で測定を行った. 印加電圧と色の対応は図 6.6 中の凡例に書かれている様に, 赤色と橙色が図 6.5 の 0.0 ns の時, 黄緑色と水色が図 6.5 の 1.5 ns の時, 青色が図 6.5 の -1.0 ns の時, 薄紫色が図 6.5 の -1.5 ns の時, 桃色がと若草色と緑色が図 6.5 の -2.0 ns の時の非線形性のカーブである.

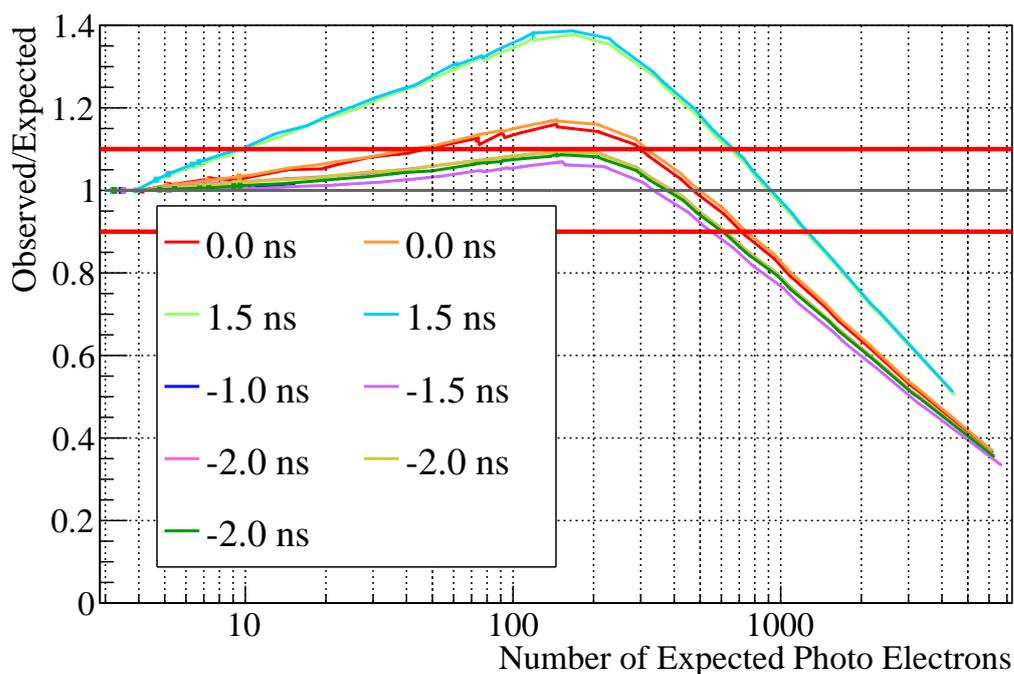


図 6.6 EB0015 においてパルス間の時間をずらして測定した出力非線形性

よってパルスの光らせるタイミングが 3 ns ずれると非線形性は最大で 32 % 変化し, 0.5 ns ずれるだけでも 2.5 % ずれる可能性があることがわかった.

また、第7章「**個体差の評価**」での議論のために、パルスの光らせるタイミングのずれと各光量での系統誤差の大きさの関係をここで見ておくことにする。図6.7は各光量で得られた  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値を補正を行わずにプロットした、縦軸  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$ 、横軸  $O(A)+O(B)$  のグラフである。

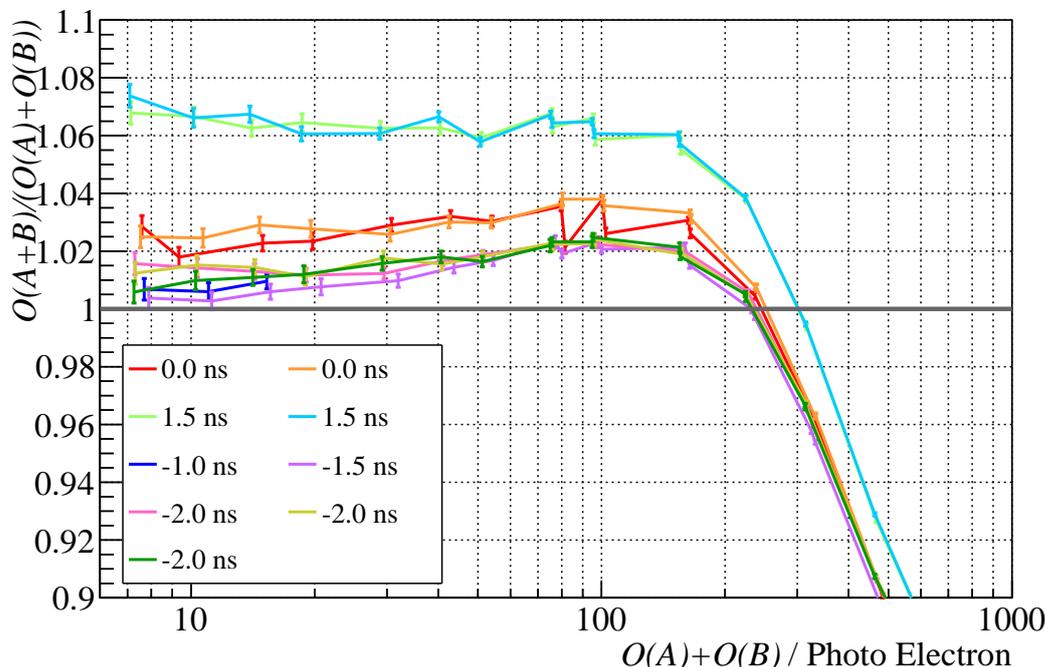


図 6.7 EB0015 においてパルスの光らせるタイミングのずれと各光量での系統誤差の大きさの関係

図 6.7 より、低光量であるほど光らせるタイミングのずれによるずれが大きくなっていることがわかる。図 6.5 で 0.5 ns 刻みで測定した光らせるタイミングによるずれは図 6.7 では 170 光電子の部分に対応している。ここで代表して 0.0 ns と +1.5 ns の結果を比較すると、図 6.5 より 170 光電子の部分でのずれは 1.4 % であるが、低光量の最もずれている 10 光電子の位置では 6.5 % ずれていることがわかる。よって、図 6.5 でみた光らせるタイミングによるずれは光量が異なるとさらにずれる可能性があり、合計が 170 光電子ではない光量で見た場合には、図 6.5 で見積もった系統誤差よりも 4.6 倍大きな系統誤差が存在し得る可能性があることがわかった。さらに、-1.0 ns, -1.5 ns, -2.0 ns のプロットを比較すると、170 光電子の部分では  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値がほとんど一致しているのに対し、10 光電子では  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値が 1.5 % 異なっていることがわかる。ここから光るタイミングのずれの 0.5 ns~1.0 ns の違いにより、10 光電子での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値の方が 170 光電子の部分での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値に比べて変わりやすいと推測できる。

ここで、光源の光らせるタイミングがずれる原因を考える。まず、光らせる位置の変化による影響を考える。最初のセットアップにおいて、LED は基板から電流を受けて暗室内で光り、レーザーは基板で発光したものが光ファイバーで導かれて PMT の上で光る形であった。よって LED と PMT の距離が変わると銅線の長さは変化しないが空気中を通過する距離が変化するため、変化した分だけ PMT に届くのが遅くなる。また、レーザーと PMT の距離が変わると光ファイバーの長さは変化しないが空気中を通過する距離が変化するため、こちらも変化した分だけ PMT に届くのが遅くなる。空気中を通過する光の速度を真空中の高速として 10 cm を通過する速度を計算すると約 0.33 ns である。よって、0.5 ns ずれるだけでも測定結果が数 % ずれうるならば LED やレーザーの位置を PMT を変えたり回路を改良するなどの測定の途中でずらしてしまった場合、測定結果が数 % ずれうる可能性はあるだろう。また、セットアップを変えてファイバーなどを増やした際など、光が通過する距離が変わる際にもタイミングを合わせ直す必要があるが、その場合 0.5 ns 以下の精度でパルスを合わせなければならず、0.1 ns のずれにより非線形性の測定結果に影響があるかは確認できていないため、セットアップを変える前後の測定結果を比較することは出来ない可能性がある。さらに、パソコンやモジュールの不具合によって動作速度が遅くなることにより光源間のタイミングがずれる可能性もあるため、2.2.1. 光源を 2 つ使用して和を用いる方法の測定方法により非線形性を見積もる際には数 % の誤差は生じ得る可能性があることを留意しなければいけないだろう。

### 6.3. 適切な時間差

6.2.2. 光るタイミングの時間的なずれ より光るタイミングは厳密に合わせる必要があることがわかった。しかし、ゲート信号自体が時間的に変動している可能性があり、さらにパルス幅 2.5 ns に対して 0.5 ns 以下の精度で合わせるのは難しい。よって、図 6.5 において 0.5 ns 間隔で測定した  $-4.0$  ns  $\sim$   $+4.0$  ns の間のいずれかの点に固定して測定することにした。図 6.5 を観察すると、 $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値は  $-2.0$  ns  $\sim$   $-1.5$  ns で停留し、1.0 ns で最大値をとっている。それらの点で非線形性の測定を行った結果が図 6.6、図 6.7 である。ここで、PMT の出力線形性において低光量では  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値はほぼ 1 であるはずであると考え、図 6.7 の薄紫色で描かれた  $-1.5$  ns の時が一番その仮定に近いと考えられる。

さらに、2.2.2.1 つの光源を用いて比で比較する方法で測定した結果との比較を行う。この方法では常に 1 つの光源しか光らせず、2 光源を同時に光らせないため時間差の影響を受けない。そのため、結果を比較して一致するところが光るタイミングが起きているところであると考えられる。 $R_n/R_0$  の分母の光量の比は 2.9 光電子と 11.9 光

電子の測定結果から求めた  $R_0 = 4.05$  を用いた.

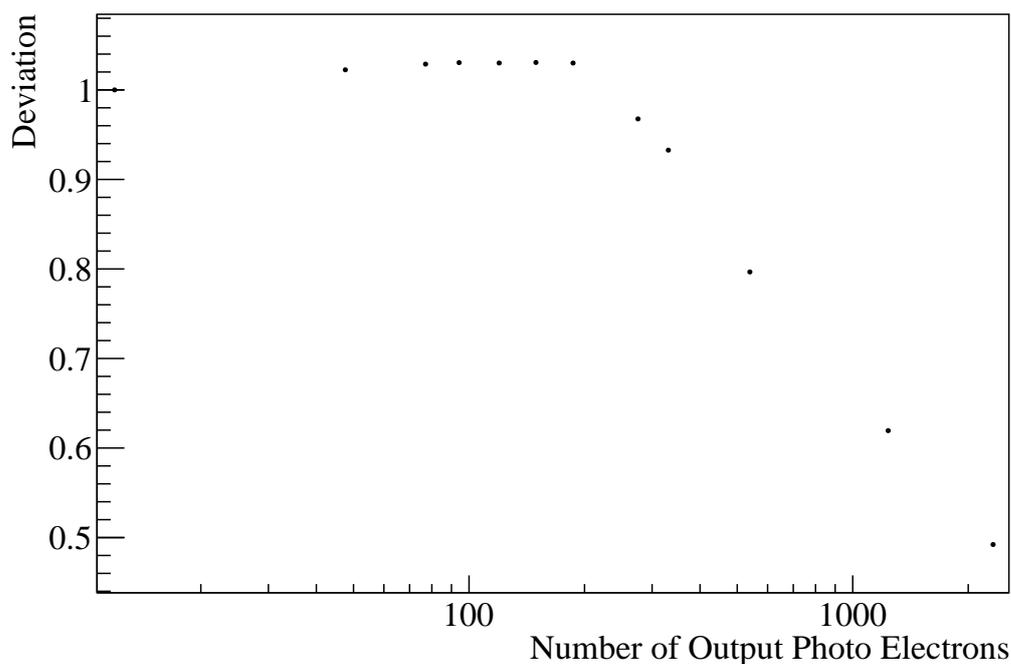


図 6.8 EB0015 において光量比比較の測定で測定した結果

ここで最大値は 1.0306, つまり 3.1 % の上昇が見られたことになる. この比を用いた測定は, 6.2.1. レーザー光の不安定性 で議論したレーザー光の不安定性から 1 % の系統誤差があるので, 比の測定からオーバーリニアリティの大きさは 3.1 %  $\pm$  1 % である. ただし, スイッチや光学的な接続の不安定性の影響を受ける可能性があり, 系統誤差はさらに大きい可能性もある. この結果と補正を行っていない図 6.7 を比較すると系統誤差の範囲内で 0.0 ns, -1.0 ns, 1.5 ns, -2.0 ns の結果が一致していることが分かる.

以上より, 目視で合わせた光源の光らせるタイミングより -1.5 ns において最も光るタイミングが一致していると考えられる. この結果をもとに 3.5. スーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の非線形性測定結果, 3.6. ハイパーカミオカンデ 3 インチ PMT(R14374) の非線形性測定結果, 第 5 章電位分割回路の改良 の測定では -1.5 ns において測定を行った.

## 6.4. 結果

考えうる系統誤差の内、レーザー光の不安定性は測定結果に数 % の精度では影響しないが、パルス間の時間的なずれの方は数 % の精度で影響することがわかった。2.2.1. 光源を2つ使用して和を用いる方法 の測定方法を用いて非線形性を測定する場合、光源同士をテープで止めて相対的にずれないように固定するなど、光源同士の相対的な位置がずれないようにする必要がある。

## 6.5. 今後の展望

2.2.1. 光源を2つ使用して和を用いる方法 の測定方法を用いて非線形性を測定する場合、6.2.2. 光るタイミングの時間的なずれ の系統誤差が数 % 生じ得る可能性があり無視できないことがわかった。ただし今回のパルス間の時間的なずれの見積もりは2つの光源のパルス幅がどちらも 2.5 ns の時に対して見積もったため、パルス幅が 10 ns など長い場合や2つの光源のパルス幅が異なる場合などにどの程度誤差が生じ得るかは未知である。0.5 ns 以下の精度でパルス間の時間的なずれを合わせるのは不可能であるため、2.5 ns より長いパルス幅や2つの光源のパルス幅を変えてみるなどを試して系統誤差が小さくなるような測定方法を見つける必要があると考えられる。

## 第 7 章 個体差の評価

### 7.1. 目的

オーバーリニアリティに個体差があった場合は出力非線形性の補正が難しくなるため、ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) において個体差があるかどうか評価したい。

### 7.2. 測定手法

図 7.1 の様に PMT を並べて設置して一度に測定を行った。並べた 6 つの PMT の内中心の 4 本の PMT(EB0007-G, EA7622, EA7623, EB0145) について解析を行った。



図 7.1 実験のセットアップ 提供 西村康宏先生

出力には信号アッテネータを用いて  $1/2$  に減衰して測定を行い、スイッチを使わず低光量～中光量のオーバーリニアリティの測定を行った。

光源は図 7.2 の様なセットアップを組んだ.

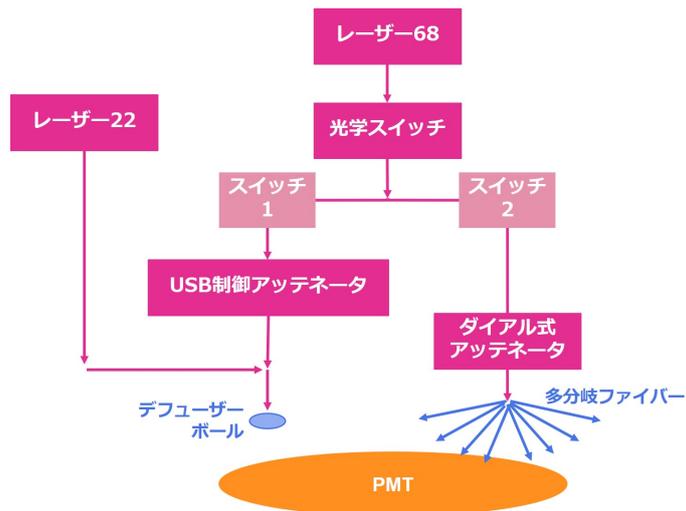


図 7.2 光学系概略図

スイッチは 2 にして測定を行い, レーザー 22 とレーザー 68 スイッチ 2 の 2 光源で 2.2.1. 光源を 2 つ使用して和を用いる方法 を行った.

### 7.3. 測定した PMT

測定した PMT は全てハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の EB0007-G, EA7622, EA7623, EB0145 の 4 本であった. それぞれ印加した電圧とゲインは表 7.1 の様になった.

表 7.1 測定した PMT と印加電圧, ゲインの関係

PMT	印加電圧 / V	ゲイン
EB0007-G	1880.0	$1.51 \times 10^7$
EA7622	1960.0	$1.42 \times 10^7$
EA7623	1930.0	$1.47 \times 10^7$
EB0145	1790.0	$1.44 \times 10^7$

## 7.4. 結果

R12860 の EB0007-G, EA7622, EA7623, EB0145 の 4 本の結果が図 7.3 である。測定結果と色の対応は図 7.3 中の凡例に書かれている様に、赤色が EB0007-G, 青色が EA7622, 黄緑色が EA7623, 橙色が EB0145 の非線形性のカーブである。

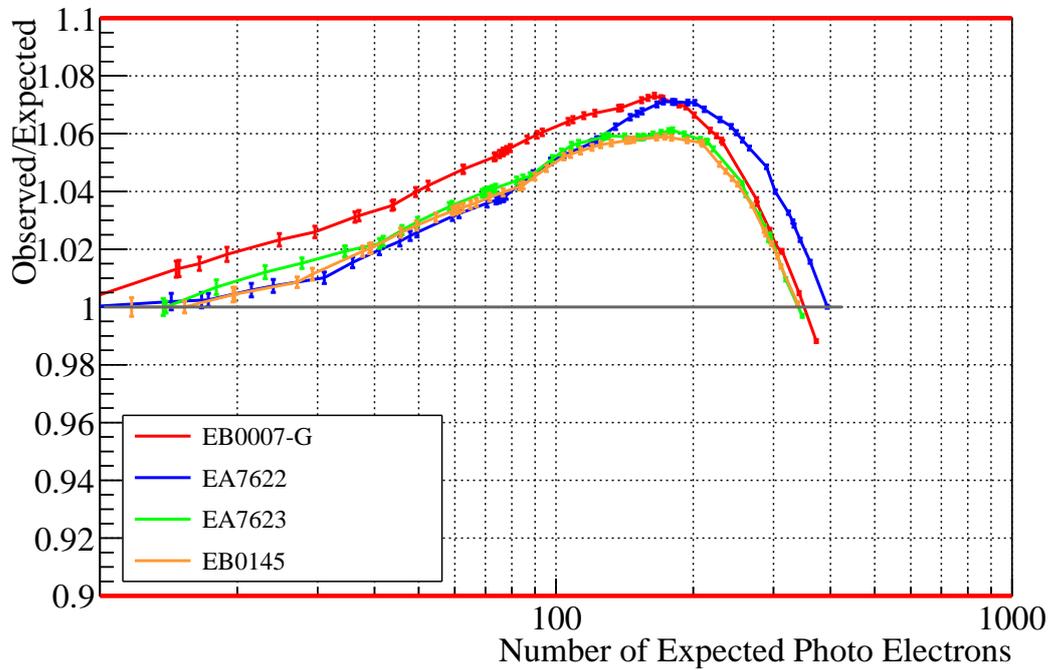


図 7.3 R12860 の出力非線形性

PMT によってハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) のオーバーリニアリティは最大で 1.2 % ずれていることが確認された。

R12860 の EA7622, EA7623, EB0145 の 3 本の光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を追加した時の結果が図 7.4 である. 測定結果と色の対応は図 7.4 中の凡例に書かれている様に, 赤色が EA7622, 青色が EA7623, 黄緑色が EB0145 の非線形性のカーブである.

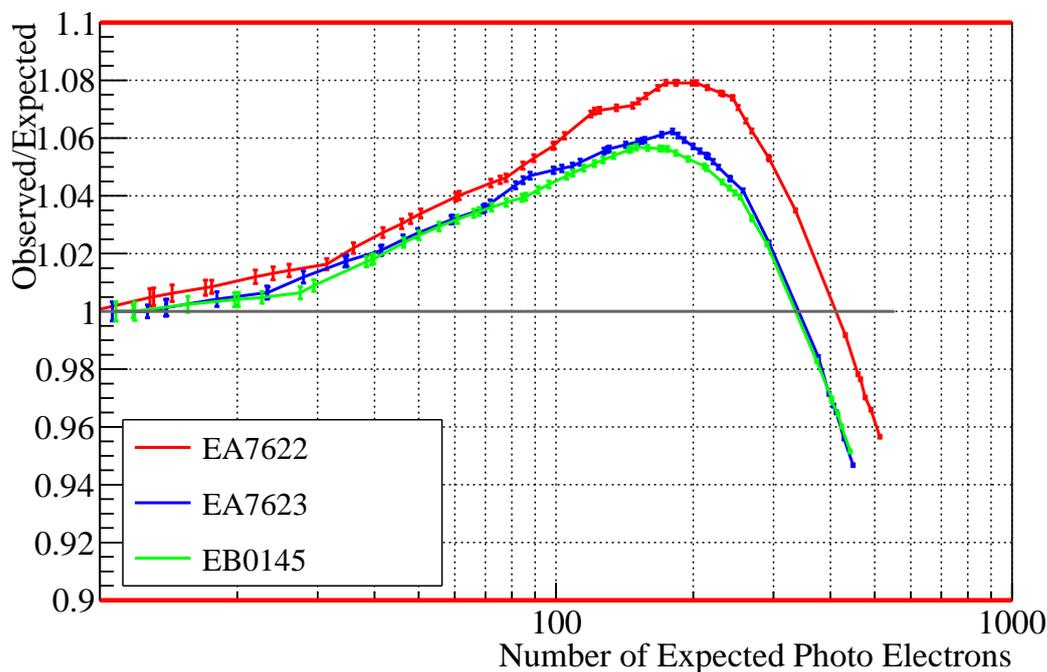


図 7.4 R12860 の改良後の出力非線形性

PMT によってハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の改良後のオーバーリニアリティは最大で 2.2 % ずれていることが確認された.

EA7622 の回路改良前後の結果が図 7.5 , EA7623 の回路改良前後の結果が図 7.6 , EB0145 の回路改良前後の結果が図 7.7 である. 測定結果と色の対応は凡例に書かれている様に, 赤色が改良前, 青色が光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を追加した時の非線形性のカーブである.

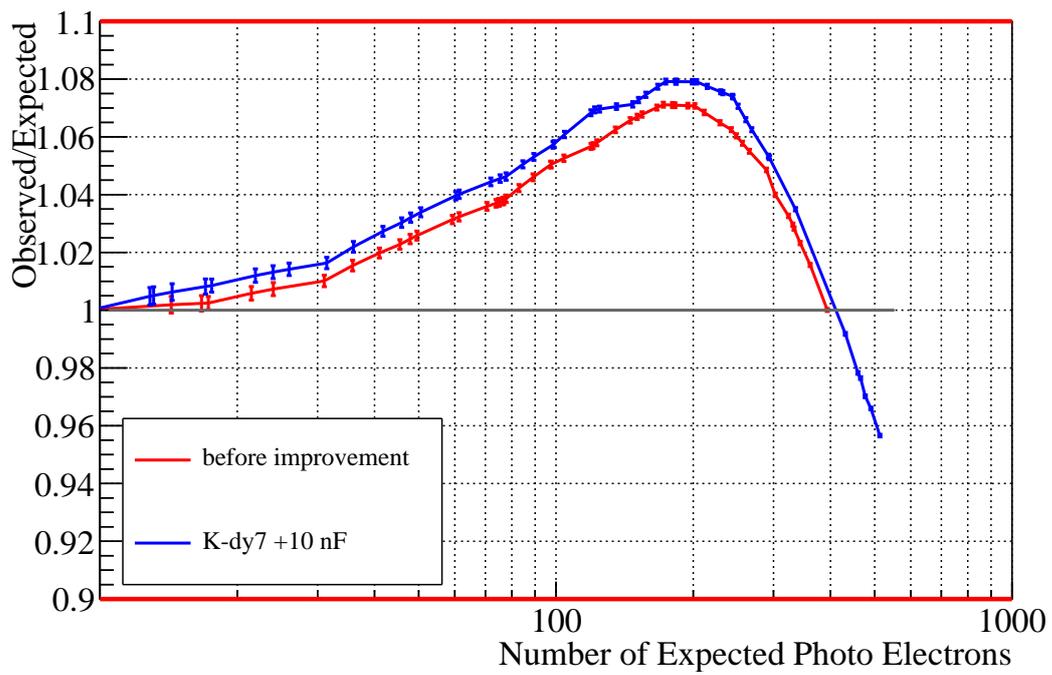


図 7.5 EA7622 の出力非線形性

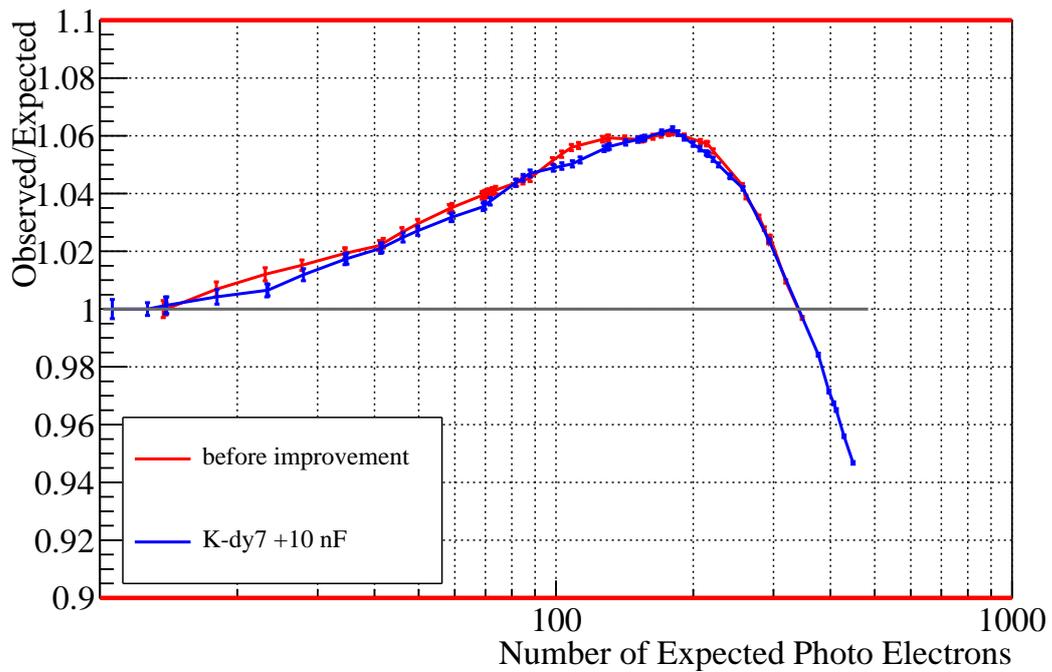


図 7.6 EA7623 の出力非線形性

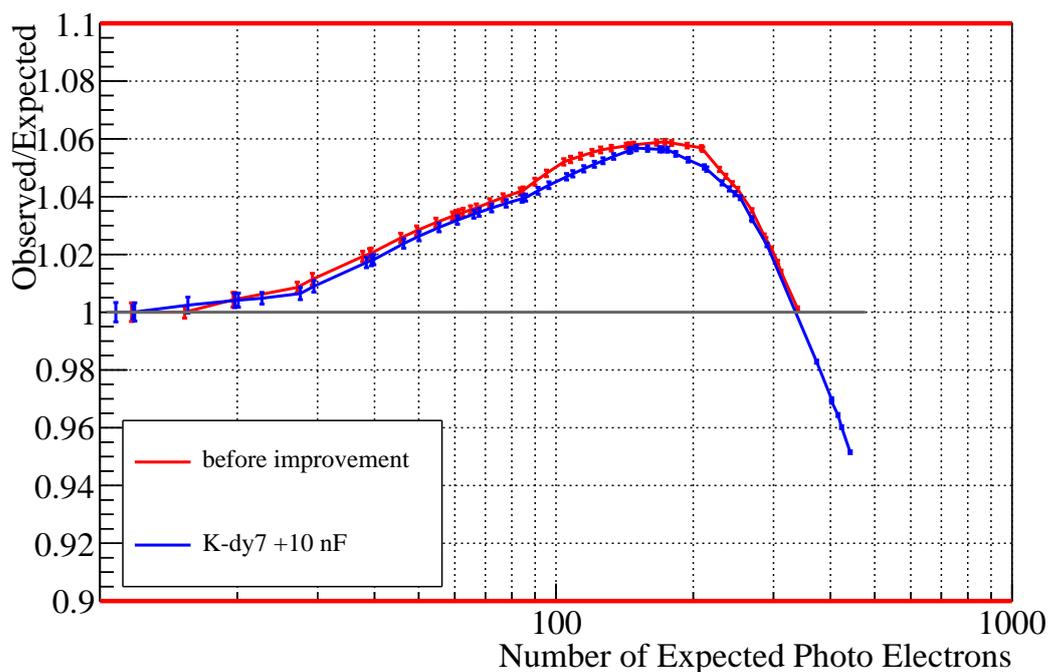


図 7.7 EB0145 の出力非線形性

図 7.5 ~ 図 7.7 より, EA7623, EB0145 の回路改良前後では非線形性は 0.5 % 以下の精度で一致し, EA7622 の回路改良前後では改良後の方がオーバーリニアリティが 0.8 % 大きく, 非線形性の改善は見られなかった.

## 7.5. 考察

### 7.5.1. R12860 の個体差

図 7.3 より, ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性は PMT に よってオーバーリニアリティは最大で 1.2 % ずれていることが確認された. この差か ら R12860 の非線形性に個体差があるといえるかどうか考察する. まずセットアップ を考えると PMT を並べて測定を行い, それぞれの光は片方のレーザー光はデフュー ザーボールで拡散されて空気中を通過して PMT に入射し, もう片方のレーザー光は多 分岐ファイバーで PMT の上まで導かれて PMT 上部から空気中を通過して PMT に 入射するようなセットアップであった. 多分岐ファイバーの長さやデフューザーボ ールから PMT までの距離が PMT ごとに異なる可能性を考えても 0.5 ns 程度の違いで あると考えられるため, PMT ごとに 2 光源の光るタイミングのずれが 0.5 ns 程度異 なるとして考察する. 6.2. 系統誤差の大きさ より, 170 光電子の時には 0.5 ns 光らせ るタイミングのずれがあると最大で 1.9 % ずれる. 図 7.8 は 6.2. 系統誤差の大きさ の 170 光電子の時の見積もりを使用するために, 各光量で得られた  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値 を補正を行わずにプロットした, 縦軸  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$ , 横軸  $O(A)+O(B)$  のグラフで ある. 測定結果と色の対応は図 7.8 中の凡例に書かれている様に, 赤色が EA7622, 青色が EA7623, 黄緑色が EB0145 の結果である.

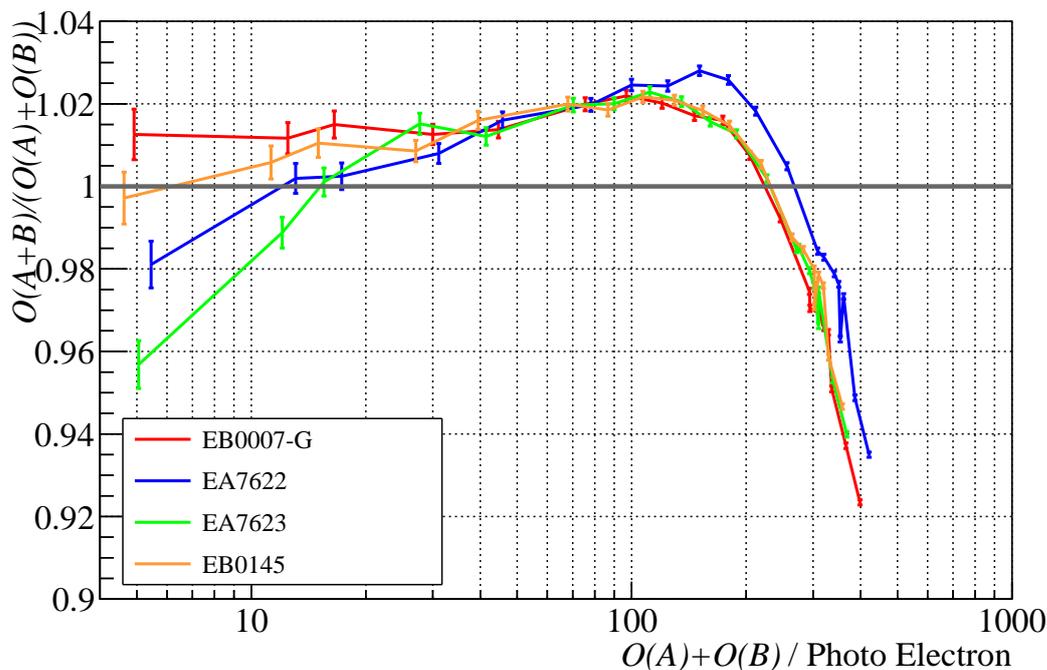


図 7.8 測定した R12860 4 本の  $O(A+B)/(O(A)+O(B))$  と  $O(A)+O(B)$  の関係

図 7.8 より, 170 光電子のずれは時間差により生じる可能性のある系統誤差の範囲内であることがわかる. よって, 今回の測定からはハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性の個体差は系統誤差の範囲内であり, 個体差があるとは言えない.

## 7.5.2. R12860 改良後の個体差

図 7.4 より, ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性は PMT によってオーバーリニアリティは最大で 2.2 % ずれていることが確認された. この差から改良後の非線形性に個体差があるといえるかどうか考察する. 7.5.1.R12860 の個体差と同様に PMT ごとに 2 光源の光るタイミングのずれが 0.5 ns 程度異なるとして考察する. 図 7.9 は図 7.8 と同様に 6.2. 系統誤差の大きさ の 170 光電子の時の見積もりを使用するために, 各光量で得られた  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値を補正を行わずにプロットした, 縦軸  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$ , 横軸  $O(A)+O(B)$  のグラフである. 測定結果と色の対応は図 7.8 と同様に図 7.9 中の凡例に書かれている様に, 赤色が EA7622, 青色が EA7623, 黄緑色が EB0145 の結果である.

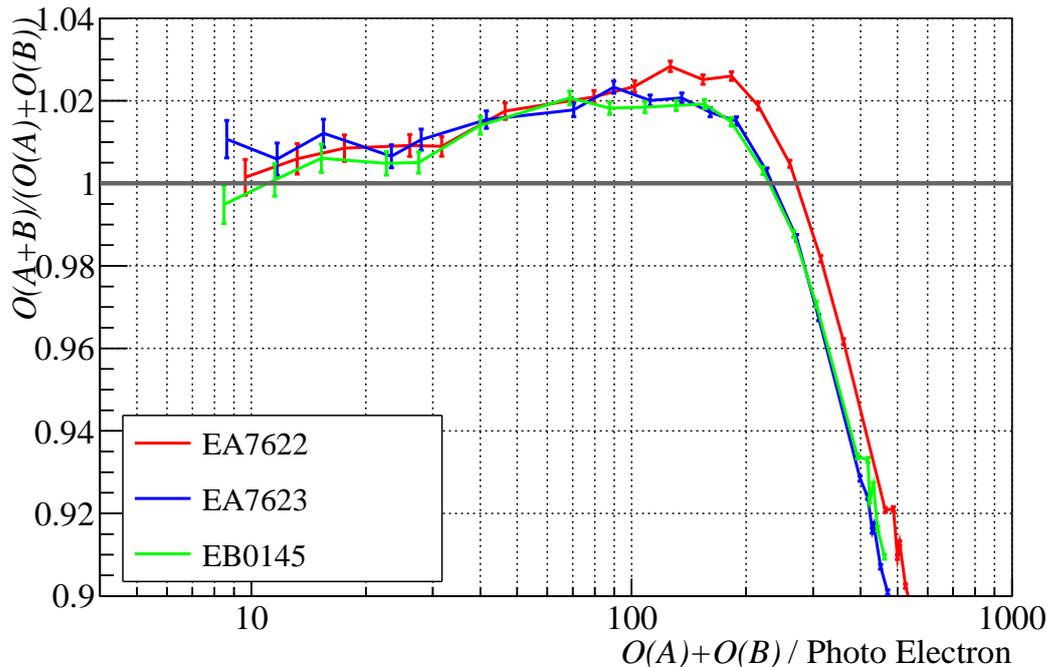


図 7.9 R12860 改良後の 3 本の  $O(A+B)/(O(A)+O(B))$  と  $O(A)+O(B)$  の関係

図 7.9 より, 170 光電子のずれは時間差により生じる可能性のある系統誤差の範囲内であることがわかる. よって, 今回の測定からは改良後のハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) の非線形性の個体差も系統誤差の範囲内であり, 個体差があるとは言えない.

### 7.5.3. R12860 改良度合いの個体差

図 5.3 の改良を EA7622, EA7623, EB0145 の 3 本に対して施し, 改良前後で非線形性が異なるかどうかが考察する. 改良前後で PMT の設置位置は変えていないため理想的にはセットアップは変わっていないはずである. しかし, 図 7.5 ~ 図 7.7 の改良前後の測定結果の内, 図 7.5 のみオーバーリニアリティが 0.8 % ずれていた. この差が改良によるずれなのか, 測定誤差なのかを考察する. 図 7.10 ~ 図 7.12 は 6.2. 系統誤差の大きさ の 170 光電子の時の見積もりを使用するために, 各光量で得られた  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値を補正を行わずにプロットした, 縦軸  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$ , 横軸  $O(A)+O(B)$  のグラフである. 測定結果と色の対応は図 7.10 ~ 図 7.12 中の凡例に書かれている様に, 赤色が改良前, 青色が光電面からダイノード 7 にかけて 10 nF を追加した時の非線形性のカーブである.

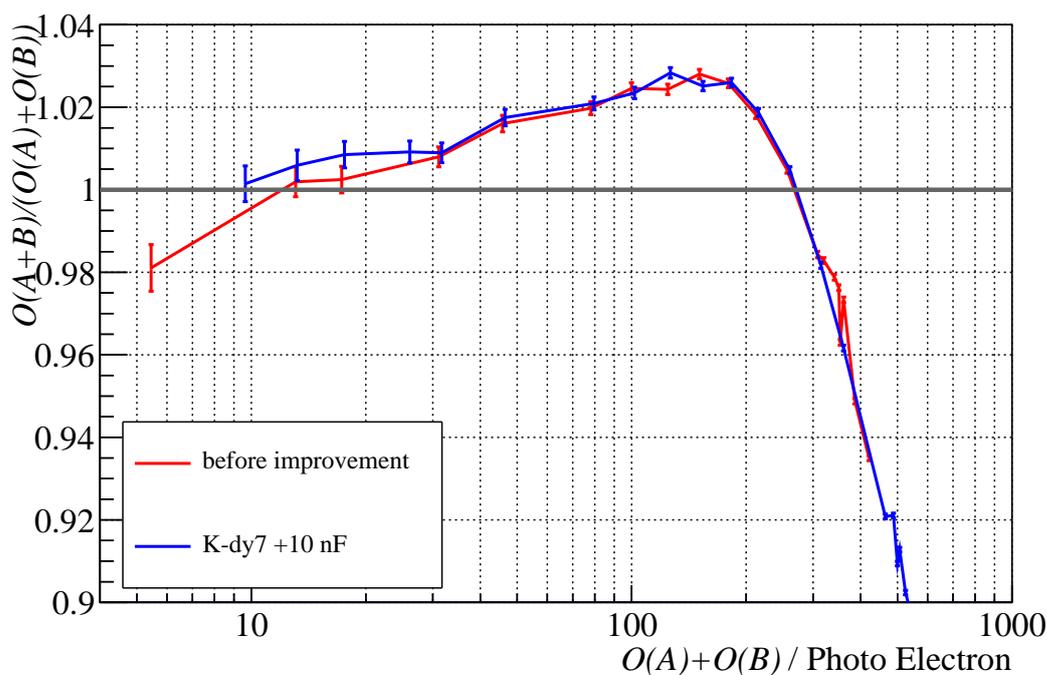


図 7.10 EA7622 改良前後の  $O(A+B)/(O(A)+O(B))$  と  $O(A)+O(B)$  の関係

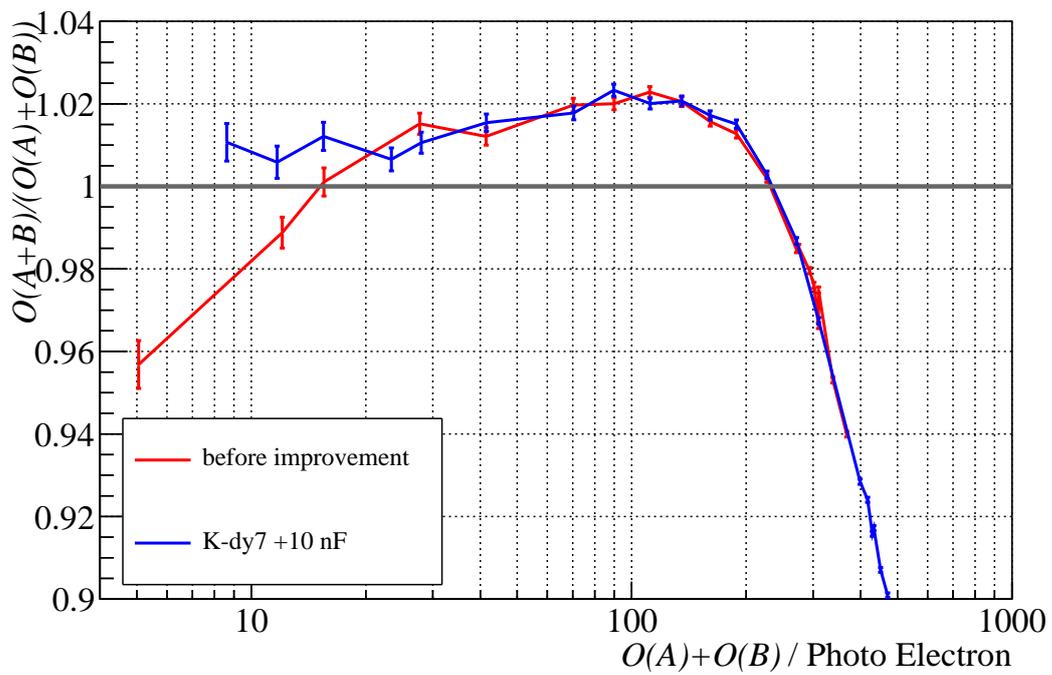


図 7.11 EA7623 改良前後の  $O(A+B)/(O(A)+O(B))$  と  $O(A)+O(B)$  の関係

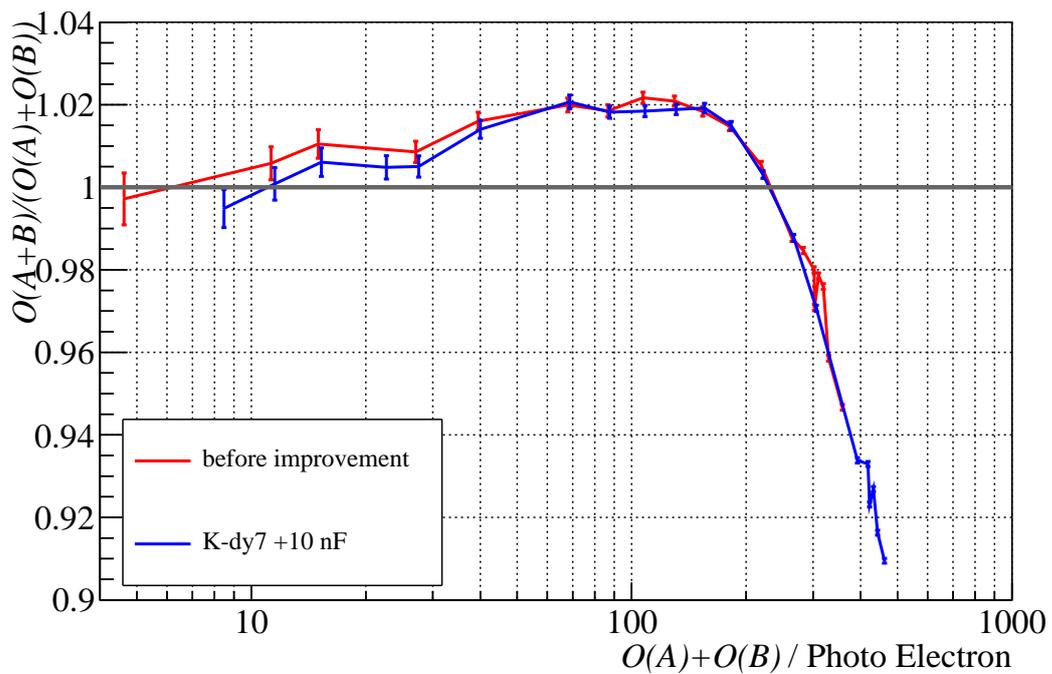


図 7.12 EB0145 改良前後の  $O(A+B)/(O(A)+O(B))$  と  $O(A)+O(B)$  の関係

ここで 6.2. 系統誤差の大きさ での議論を思い出すと、光るタイミングが 0.5 ns～1.0 ns 異なる時、170 光電子での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値はほぼ等しく、10 光電子での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値が異なる、ということが起きる可能性があった。図 7.10 ～ 図 7.12 を見ると、170 光電子での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値はほぼ等しく、10 光電子での  $\frac{O(A+B)}{O(A)+O(B)}$  の値が異なっていることから、図 7.5 でみられたオーバーリニアリティの 0.8 % のずれは時間差によるものであると推測される。よって、図 7.5 ～図 7.7 の改良前後の測定からは改良前後で非線形性が変化したとは言えない。

## 第 8 章 結論と今後の展望

### 8.1. 結論と今後の展望

ハイパーカミオカンデ 20 インチ光電子増倍管 (R12860) において出力非線形を測定し、数十～数百光電子でオーバーリニアリティが見られ、数百～数千光電子以降で飽和が起きることが確認できた。またその非線形性はスーパーカミオカンデ 20 インチ光電子増倍管 (R3600) に比べてオーバーリニアリティの上昇率も大きく、飽和も起きやすいことが確認できた。20 インチ光電子増倍管において、入力光電子数の代わりにゲインが一定であるとして補正した出力電荷数に対する線形性の変化を見ると、印加電圧を変えても重なることが示唆された。これにより、スーパーカミオカンデで既に取得され、補正されているデータのより良い精度での再補正が期待できる。

反復法と直接法を組み合わせて用いた数値解析によるシミュレーションと電子回路シミュレーション LTSpice を用いたシミュレーションにより、高光量でゲインが減少することと、印加電圧値が大きいほど早く飽和し、低いほど飽和が遅い様子が再現できた。しかし、電位分割回路におけるダイノード間の電圧の変化だけでは出力非線形性は再現できないことが明らかとなり、空間電荷飽和などの影響を考慮する必要性が示唆された。反復法と直接法を組み合わせて用いた数値解析によるシミュレーションと LTSpice を用いたシミュレーションにおいて、ハイパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R12860) よりスーパーカミオカンデ 20 インチ PMT(R3600) の方が出力非線形性が良いというシミュレーション結果が得られなかったのは、ダイノード構造による空間電荷飽和の影響が考慮されていないからではないかと考える。そのため、空間電荷飽和などの影響を入れることにより非線形性のモデリングを実現したいと考えている。

回路の改良において、シミュレーション結果から非線形性の改善が示唆された電位分割回路の前段～中段のダイノード間にコンデンサ 10 nF を追加する方法では出力非線形は改善されないことが明らかとなったが、すでに導入されている後段のダイノード間のコンデンサ 10 nF にはゲインを  $1 \times 10^7$  程度にする効果があることが示唆された。今後はより応答の早いコンデンサをダイノード間に追加し、非線形性が改善されるかを試したい。また、今回試した回路において位置依存性や磁場依存性が小さい可能性があるのではないかと考えられるので、改良した回路に対して位置依存性や磁場依存性を今後測定する予定である。これらの取り組みで非線形性を改善し、ハイパーカミオカンデの光電子増倍管製造に適用したいと考えている。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方々にお世話になりました。

まず、指導教員である西村康宏先生に深く感謝を申し上げます。研究内容に関するご指導だけでなく、実験装置の使い方や注意点、C++及びROOTの使い方、解析手法、シミュレーションでの考え方、LTSpiceの使い方など、研究に関するあらゆることをとても丁寧に迅速にご指導いただきました。また、リモートでの測定環境を整えてくださったおかげで、コロナ禍で中々学校に行くのも難しい中、思う存分研究を行うことが出来ました。学校に入構できなかった時には、PMTの交換や条件を変える作業をしていただき、本当にありがとうございました。緊急事態宣言により現地に直接私が伺うことができなかった神岡での測定に関しましてリモートで測定、解析ができるようにしていただき、本論文を書き上げることが出来ました。

Hyper-Kamiokande Collaborationの皆様にも発表の際など様々な場面でご指導いただきました。シミュレーションや測定結果に対してどの様な部分が重要であるか、どの様な測定がどこで役立つかなど様々なことを教えていただきました。ここに感謝の意を表します。

東京大学地震研究所の武多昭道さん、東京大学宇宙線研究所の矢野孝臣さん、中村輝石さんには、実験に必要な器具を送っていただきました。送っていただけのおかげで本研究を滞りなく行うことができました。ここに感謝の意を表します。

同研究室の先輩の前川さんには実験装置の使い方、ROOTの使い方、研究で困った時などとても優しく教えていただきました。コロナ禍で中々学校に入構できなかった時には、高電圧の電圧値を変えていただいたり、エラーが出て困った際に直接確認して写真を送っていただいたり、とてもお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

同研究室の同輩の川島君にも実験のサポート及び助言をしていただきました。コロナ禍で中々学校に入構できなかった時には、高電圧の電圧値を変えていただいたり、PMTの回転など条件を変えるのをしていただいたり、とてもお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

最後にここまで私を支えてくれた家族にも感謝の意を表します。

# 付録

## 付録 A 第 4 章 4.3. 反復法と直接法を組み合わせて用いた 数値解析によるシミュレーション のソースコード

ソースコード 1 gain\_final.cpp

```
1 #include <cstdio>
2 #include <iostream>
3 #include <math.h>
4 #include <fstream>
5 #include <sstream>
6 #include <vector>
7 #include <string.h>
8 #include <cmath>
9 #include <stdlib.h>
10 #include <unistd.h>
11 #include <TApplication.h>
12 #include <TFile.h>
13 #include <TTree.h>
14 #include <TH1F.h>
15 #include <RooInt.h>
16 using namespace std;
17
18 const double width_signal = 40.0e-9;
19 const double e = 1.602176634e-19;
20 const double me = 9.1093837015e-31;
21
22 void import_by_file(TString importfile, TGraphErrors *g, string *str, double *
    r_times, string *strl, double *l_times, string *strc, double *c_times){
23     double voltage[100], gain[100];
24     TString importdir = "./";
25     cout << "import:␣" << importdir << importfile << ".txt" << endl;
26     ifstream ifs(importdir + importfile + ".txt");
27
28     int i = 0;
29     int n = 0;
30     getline(ifs,*str);
31     ifs >> *r_times;
32     ifs.ignore();
33     getline(ifs,*strl);
34     ifs >> *l_times;
35     cout << "*strl:" << *strl << "␣l_times:" << *l_times << endl;
36     ifs.ignore();
37     getline(ifs,*strc);
38     ifs >> *c_times;
39     cout << "strc:" << *strc << endl;
40     while (ifs >> voltage[i] >> gain[i]) {
```

```

41     cout << "voltage:_" << voltage[i] << "_gain:_" << gain[i] << endl;
42     n = g->GetN();
43     g->SetPoint(n, voltage[i], gain[i]*pow(10.0,6));
44     g->SetPointError(n, 0.0, 0.0);
45     i++;
46 }
47 g->SetMarkerStyle(20);
48 g->SetMarkerSize(0.5);
49 }
50
51 void fit_g(TGraphErrors *g, int r, double ratio_sum, double ratio_times,
           double *a, double *k){
52     TF1 *f = new TF1("f","pow([0],[1])*pow(pow(x/[2],[1])*[3],[4])"
           ,0,20000);
53     f->SetParName(0,"a");
54     f->SetParName(4,"k");
55     f->SetParameter(0,0.5);
56     f->FixParameter(1,r-1.0);
57     f->FixParameter(2,ratio_sum);
58     f->FixParameter(3,ratio_times);
59     f->SetParameter(4,0.7);
60     g->Fit("f","","",0.0,2500);
61     f->Draw("same");
62     *a = f->GetParameter(0);
63     *k = f->GetParameter(4);
64 }
65
66 int linearityloop(double inputPE, double a, double k, int r, double ratio_sum
           , double r_times, double c_times, double voltage, double *ratio, double
           *ratioc, double *delta, double *intensity_Dynode, double intensity_step,
           double *voltage_fix, int m, int sametime, int fix){
67     *voltage_fix = 0.0;
68     double intensity_c = 0.0;
69     double intensity_csum = 0.0;
70     double intensity[20],charge[20],delta_min[20],intensity_Dynode_min[20];
71     double input = inputPE * e / width_signal; // inputPE -> intensity
72     double id = voltage / ratio_sum / r_times;
73     for (int i = 1; i < r+1; i++) {
74         charge[i] = c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]*id;
75     }
76     intensity[0] = id;
77     intensity_Dynode[0] = input;
78     int loopmax;
79     if (m==1) {
80         loopmax = sametime;
81     } else {
82         loopmax = sametime+1;
83     }
84
85     for (int i = 1; i < r+1; i++) { // i: resistance num

```

```

86     if (i==1) {
87         intensity[1] = intensity_step;
88     } else {
89         intensity[i] = intensity[i-1];
90     }
91     for (int j = 0; j < loopmax-1; j++) {
92         if (i==m*sametime-j) {
93             intensity[i] = intensity[i-1] + intensity_Dynode[i-2] -
                intensity_Dynode[i-1];
94         }
95     }
96     intensity_c = (charge[i]-c_times*ratioc[i]*intensity[i]*r_times*ratio[i])/
                (width_signal+c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]);
97     if (fix==0) {
98         if (isnan(intensity[i])||isinf(intensity[i])) {
99             intensity[i] = intensity_c;
100        } else {
101            intensity[i] += intensity_c;
102        }
103        intensity_csum += intensity_c;
104    }
105    for (int j = 1; j < loopmax; j++) {
106        if (i==m*sametime-j) {
107            if (intensity[i]<0.0||isnan(intensity[i])||isinf(intensity[i])) {
108                delta[i] = 0.0;
109            } else {
110                delta[i] = a*pow(intensity[i] * r_times * ratio[i], k);
111            }
112            intensity_Dynode[i] = intensity_Dynode[i-1]*delta[i];
113        }
114    }
115    *voltage_fix += intensity[i]*r_times*ratio[i];
116 }
117
118 return 0;
119 }
120
121 void linearity(TString outfile, TString save, double inputPE, double a,
    double k, int r, double ratio_sum, double r_times, double c_times,
    double voltage, double muf, double *ratio, double *ratioc, double *delta
    , double *mu, double *intensity_d, double deltaV, int *error, int
    sametime, int fix, double *idprimem){
122     TString outdir;
123     outdir = "../figures/gain/";
124
125     double voltage_fix = 0.0;
126     double intensity[20],intensity_Dynode[20],charge[20],delta_min[20],
        intensity_Dynode_min[20],voltage_fixm[20],idprimedef[20];
127     double idm;
128     double input = inputPE * e / width_signal; // inputPE -> intensity

```

```

129  const double id = voltage / ratio_sum / r_times;
130  double intensity_c = 0.0;
131  double idprime = input;
132  delta[0] = 1.0;
133  for (int i = 1; i < r+1; i++) {
134      charge[i] = c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]*id;
135      intensity[i] = id;
136      delta[i] = a*pow(intensity[i]*r_times*ratio[i],k);
137      intensity_Dynode[i] = intensity_Dynode[i-1]*delta[i];
138      intensity_c += charge[i]/(width_signal+c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]);
139      if (i<r) {
140          idprime = idprime*delta[i];
141      }
142  }
143  *mu = 1.0;
144  if (*error != 2) {
145      *error = 0;
146  }
147  int stepcount = 0;
148  double mmax = r/sametime + 1.0;
149  if (r%sametime!=0) {
150      mmax = mmax + 1.0;
151  }
152
153  intensity[0] = id;
154  intensity_Dynode[0] = input;
155  for (int m = 1; m < mmax; m++) { // m: dynode num
156      stepcount = 0;
157      idprimem[m] = idprime;
158      linearityloop(inputPE,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,ratio,ratioc,
159                    delta,intensity_Dynode,idprimem[m],&voltage_fix,m,sametime,0);
159  while (fabs(voltage_fix - voltage)>deltaV) {
160      if (stepcount>1.0e5) {
161          *error = 1;
162          break;
163      } else if (stepcount>3.0e4) {
164          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times
165                        /1001.0;
166      } else if (stepcount>2.0e4) {
167          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times
168                        /101.0;
169      } else if (stepcount>1.0e4) {
170          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/50.0;
171      } else if (stepcount>9.0e3) {
172          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/19.0;
173      } else if (stepcount>8.0e3) {
174          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/17.0;
175      } else if (stepcount>7.0e3) {
176          idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/13.0;
177      } else if (stepcount>6.0e3) {

```

```

176         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/11.0;
177     } else if (stepcount>5.0e3) {
178         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/9.0;
179     } else if (stepcount>4.0e3) {
180         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/7.0;
181     } else if (stepcount>3.0e3) {
182         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/5.0;
183     } else if (stepcount>2.0e3) {
184         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/3.0;
185     } else if (stepcount>1.0e3) {
186         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times/2.0;
187     } else {
188         idprimem[m] += (voltage - voltage_fix)/ratio_sum/r_times;
189     }
190     linearityloop(inputPE,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,ratio,
        ratio_c,delta,intensity_Dynode,idprimem[m],&voltage_fix,m,
        sametime,0);
191     stepcount++;
192 }
193 voltage_fixm[m] = voltage_fix;
194 for (int i = 1; i < sametime+1; i++) {
195     if ((m-1)*sametime+i<r) {
196         intensity_d[(m-1)*sametime+i] = intensity_Dynode[(m-1)*
            sametime+i]*width_signal/e;
197     }
198 }
199 }
200 *mu = 1.0;
201 for (int m = 1; m < r; m++) { // m: dynode num
202     *mu = *mu * delta[m];
203 }
204 if (save=="on") {
205     ofstream ofs(outdir + outfilename + ".txt",ios::app);
206     if (*error == 2) {
207         ofs << "PE:_ " << inputPE << " _mu:_ " << *mu << " _Id:_ "
            << id << " _outPE:_ " << idprime << endl;
208         idm = input;
209         for (int m = 1; m < mmax; m++) { // m: dynode num
210             ofs << "m:_ " << m << " _deltaId:_ " << idprimem[m]+
                input-id << " _deltaV:_ " << voltage_fixm[m] - voltage
                << endl;
211             for (int i = 1; i < sametime+1; i++) {
212                 if ((m-1)*sametime+i<r+1) {
213                     idm = idm*delta[(m-1)*sametime+i-1];
214                     ofs << "delta[" << (m-1)*sametime+i-1 << " ]:_ "
                        << delta[(m-1)*sametime+i-1] << " _id[" <<
                        (m-1)*sametime+i << " ]:_ " << idprimem[m]+
                        input-idm << " _deltaid[" << (m-1)*
                        sametime+i << " ]:_ " << idprimem[m]+input-
                        idm-id << endl;

```

```

215         }
216     }
217 }
218 }
219     ofs.close();
220 }
221 }
222 }
223
224 void linearity2(TString outfile, TString save, double inputPE, double a,
    double k, int r, double ratio_sum, double r_times, double c_times,
    double voltage, double muf, double *ratio, double *ratioc, double *delta
    , double *mu, double *intensity_d, double deltaV, int *error, int
    sametime, int fix, double *defaultintensity, double *deltaintensity){
225     TString outdir;
226     outdir = "../figures/gain/";
227
228     double voltage_fix = 0.0;
229     double intensity[20], intensity_Dynode[20], charge[20], delta_min[20],
        intensity_Dynode_min[20], idprimem[20], voltage_fixm[20], idprimedef[20];
230     double idm, step, diff;
231     double input = inputPE * e / width_signal; // inputPE -> intensity
232     const double id = voltage / ratio_sum / r_times;
233     double intensity_c = 0.0;
234     double idprime = input;
235     delta[0] = 1.0;
236     for (int i = 1; i < r+1; i++) {
237         charge[i] = c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]*id;
238         intensity[i] = id;
239         delta[i] = a*pow(intensity[i]*r_times*ratio[i],k);
240         intensity_Dynode[i] = intensity_Dynode[i-1]*delta[i];
241         intensity_c += charge[i]/(width_signal+c_times*ratioc[i]*r_times*ratio[i]);
242         if (i<r) {
243             idprime = idprime*delta[i];
244         }
245     }
246     *mu = 1.0;
247     if (*error != 2) {
248         *error = 0;
249     }
250     int stepcount = 0, stepcountcount = 0;
251     double mmax = r/sametime + 1.0;
252     if (r%sametime!=0) {
253         mmax = mmax + 1.0;
254     }
255
256     intensity[0] = id;
257     intensity_Dynode[0] = input;
258     for (int m = 1; m < mmax; m++) { // m: dynode num
259         stepcount = 1;

```

```

260     stepcountcount = 1;
261     diff = 1.0e-3;
262     idprimem[m] = defaultintensity[m] + deltaintensity[m];
263     linearityloop(inputPE,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,ratio,ratioc,
        delta,intensity_Dynode,idprimem[m],&voltage_fix,m,sametime,0);
264     while (fabs(voltage_fix - voltage)>deltaV) {
265         if (stepcount==1.0e8) {
266             *error = 1;
267             break;
268         } else if (stepcount%2==0) {
269             step = deltaintensity[m] * diff * (double)stepcount/2.0;
270         } else {
271             step = -1.0 * deltaintensity[m] * diff * ((double)stepcount
                +1.0)/2.0;
272         }
273         linearityloop(inputPE,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,ratio,
            ratioc,delta,intensity_Dynode,idprimem[m]+step,&voltage_fix,m,
            sametime,0);
274         stepcount++;
275     }
276     voltage_fixm[m] = voltage_fix;
277     for (int i = 1; i < sametime+1; i++) {
278         if ((m-1)*sametime+i<r) {
279             intensity_d[(m-1)*sametime+i] = intensity_Dynode[(m-1)*
                sametime+i]*width_signal/e;
280         }
281     }
282     deltaintensity[m] = idprimem[m] + step - defaultintensity[m];
283     defaultintensity[m] = idprimem[m] + step;
284 }
285 *mu = 1.0;
286 for (int m = 1; m < r; m++) { // m: dynode num
287     *mu = *mu * delta[m];
288 }
289 if (save=="on") {
290     ofstream ofs(outdir + outfilename + ".txt",ios::app);
291     if (*error == 2) {
292         ofs << "PE:_ " << inputPE << "___mu:_ " << *mu << "___Id:_ "
            << id << "___outPE:_ " << idprime << endl;
293         idm = input;
294         for (int m = 1; m < mmax; m++) { // m: dynode num
295             ofs << "m:_ " << m << "___deltaId:_ " << idprimem[m]+
                input-id << "___deltaV:_ " << voltage_fixm[m] - voltage
                << endl;
296             for (int i = 1; i < sametime+1; i++) {
297                 if ((m-1)*sametime+i<r+1) {
298                     idm = idm*delta[(m-1)*sametime+i-1];
299                     ofs << "delta[" << (m-1)*sametime+i-1 << "]:_"
                        << delta[(m-1)*sametime+i-1] << "___id[" <<
                        (m-1)*sametime+i << "]:_" << idprimem[m]+

```

```

        input_idm << "  deltaid[" << (m-1)*
        sametime+i << "]:" << idprimem[m]+input-
        idm-id << endl;
300     }
301   }
302 }
303 }
304   ofs.close();
305 }
306 }
307
308 int gain_final(TString importfile, double voltage, int sametime, TString save){
309   int maxPE = 10000;
310   double PEkizami = 1;
311
312   const int fontid = 132;
313   gStyle->SetStatFont(fontid);
314   gStyle->SetLabelFont(fontid,"XYZ");
315   gStyle->SetLabelFont(fontid,"");
316   gStyle->SetTitleFont(fontid,"XYZ");
317   gStyle->SetTitleFont(fontid);
318   gStyle->SetTextFont(fontid);
319   gStyle->SetLegendFont(fontid);
320   gStyle->SetLabelSize(0.05,"XYZ");
321   gStyle->SetTitleSize(0.05,"XYZ");
322   gStyle->SetTitleX(0.0);
323   gStyle->SetTitleOffset(0.8,"Y");
324
325   int r = 1;
326   int c = 1;
327   int length_i = 1;
328   int error = 2;
329   double ratio[20],ratioc[20],delta[20],intensity[20],intensity_Dynode[20],
        intensity_d[20],length[20];
330   double ratio_sum = 0.0;
331   double ratio_times = 1.0;
332   double r_times,l_times,c_times,mu_voltage;
333   double mu = 1.0;
334   string str,s,strc,sc,strl,sl;
335   TString outdir, outfile, legendname;
336   outdir = "../figures/gain/";
337
338   TGraphErrors* g = new TGraphErrors();
339   g->SetName("g");
340   TCanvas* c1 = new TCanvas("c1","c1");
341   import_by_file(importfile, g, &str, &r_times, &strl, &l_times, &strc, &c_times
        );
342   g->Draw("AP");
343   g->SetTitle(";High Voltage/V;gain");
344

```

```

345 stringstream ss{str},ssc{strc},ssl{strl};
346 vector<string> v,vc,vl;
347 while(getline(ss,s,'_')){
348     v.push_back(s);
349 }
350 for (const string& s : v) {
351     ratio[r] = stof(s);
352     ratio_sum += ratio[r];
353     ratio_times = ratio_times * ratio[r];
354     r++;
355 }
356 r--;
357 ratio_times = ratio_times / ratio[r];
358 cout << "r:_ " << r << "_ " << ratio_sum << "_ " << ratio_times <<
    endl;
359 while(getline(ssl,sl,'_')){
360     vl.push_back(sl);
361 }
362 for (const string& sl : vl) {
363     length[length_i] = stof(sl) * l_times;
364     length_i++;
365 }
366 for (int i = 1; i < r+1; i++) {
367     cout << "ratio[" << i << "]: " << ratio[i] << "_length[" << i <<
        "]" << length[i] << "_voltage:" << voltage*ratio[i]/ratio_sum
        << "_t:" << sqrt(me/e/(voltage*ratio[i]/ratio_sum))*length[i] <<
        endl;
368 }
369 while(getline(ssc,sc,'_')){
370     vc.push_back(sc);
371 }
372 for (const string& sc : vc) {
373     ratioc[c] = stof(sc);
374     cout << "ratioc[" << c << "]: " << ratioc[c] << endl;
375     c++;
376 }
377 c--;
378 cout << "c:_ " << c << "_ " << strc << endl;
379
380 double a,k;
381 fit_g(g,r,ratio_sum*r_times,ratio_times*pow(r_times,r-1),&a,&k);
382 if (save=="on") {
383     c1->SaveAs(outdir + importfile + ".pdf");
384     c1->SaveAs(outdir + importfile + ".png");
385     c1->SaveAs(outdir + importfile + ".root");
386 }
387 for (int i = 1; i < r; i++) {
388     delta[i] = a*pow(voltage*ratio[i]/ratio_sum,k);
389     mu = mu * delta[i];
390     cout << "delta[" << i << "]: " << delta[i] << endl;

```

```

391     }
392     cout << "mu:" << mu << endl;
393
394     if (sametime==0) {
395         sametime = r;
396     }
397
398     int n = 0;
399     double id = voltage / ratio_sum / r_times;
400     outfilename = importfile + "_";
401     outfilename += voltage;
402     outfilename += "V_lag";
403     outfilename += sametime;
404     mu = 1.0;
405     for (int m = 1; m < r; m++) { // m: dynode num
406         delta[m] = a*pow(id * r_times * ratio[m], k);
407         mu = mu * delta[m];
408     }
409     cout << "idealmu:␣" << mu << endl;
410     TCanvas* c2 = new TCanvas("c2","c2");
411     TCanvas* c3 = new TCanvas("c3","c3",800,500);
412     TCanvas* c4 = new TCanvas("c4","c4",800,500);
413     TCanvas* c5 = new TCanvas("c5","c5",800,500);
414     TLegend *legend = new TLegend( 0.91, 0.2, 1.0, 0.8);
415     legend->SetTextSize(0.03);
416     legend->SetBorderSize(1);
417     TLegend *legendi = new TLegend( 0.91, 0.2, 1.0, 0.8);
418     legendi->SetTextSize(0.03);
419     legendi->SetBorderSize(1);
420     TGraphErrors* gPE = new TGraphErrors();
421     gPE->SetName("gPE");
422     TGraphErrors *gm[20];
423     TGraphErrors *gd[20];
424     TGraphErrors *gi[20];
425     TString gmname,gdname,giname;
426     for (int i = 1; i < r; i++) {
427         gmname = "gm";
428         gmname += i;
429         gdname = "gd";
430         gdname += i;
431         gm[i] = new TGraphErrors();
432         gd[i] = new TGraphErrors();
433         gm[i]->SetName(gmname);
434         gd[i]->SetName(gdname);
435         legendname = "Dynode";
436         legendname += i;
437         legend->AddEntry( gm[i], legendname , "1" ) ;
438     }
439     double mmax = r/sametime + 1.0;
440     if (r%sametime!=0) {

```

```

441     mmax = mmax + 1.0;
442 }
443 for (int m = 1; m < mmax; m++) {
444     giname = "gi";
445     giname += m;
446     gi[m] = new TGraphErrors();
447     gi[m]->SetName(giname);
448     legendname = "loop";
449     legendname += m;
450     legendi->AddEntry( gi[m], legendname , "p" ) ;
451 }
452
453 double delmin = -1.0;
454 double delmax = 0.0;
455 int color_i;
456 double intensity_dmin = -1.0;
457 double intensity_dmax = 0.0;
458 double defaultintensitymin = -1.0;
459 double defaultintensitymax = 0.0;
460 double idprimem1[20],idprimem2[20],defaultintensity[20],deltaintensity[20];
461 error = 2;
462 linearity(outfilename,save,1.0,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,-1.0,
         ratio,ratioc,delta,&mu_voltage,intensity_d,1.0e-1,&error,sametime,0,
         idprimem1);
463 cout << "main_mu_voltage:" << mu_voltage << endl;
464 if (save=="on") {
465     ofstream ofs(outdir + outfilename + ".txt",ios::app);
466     ofs << "main_mu_voltage:" << mu_voltage << endl;
467     ofs.close();
468 }
469 linearity(outfilename,save,2.0,a,k,r,ratio_sum,r_times,c_times,voltage,-1.0,
         ratio,ratioc,delta,&mu_voltage,intensity_d,1.0e-1,&error,sametime,0,
         idprimem2);
470 for (int m = 1; m < mmax; m++) {
471     deltaintensity[m] = idprimem2[m] - idprimem1[m];
472     defaultintensity[m] = idprimem1[m] - deltaintensity[m];
473 }
474
475 for (int inputPE = 1; inputPE < maxPE; inputPE++) {
476     error = 2;
477     linearity2(outfilename,save,(double)inputPE*PEkizami,a,k,r,ratio_sum,
         r_times,c_times,voltage,-1.0,ratio,ratioc,delta,&mu,intensity_d,1.0e
         -1,&error,sametime,0,defaultintensity,deltaintensity);
478     if (error == 2) {
479         n = gPE->GetN();
480         gPE->SetPoint(n, (double)inputPE*PEkizami, mu/mu_voltage);
481         gPE->SetPointError(n, 0.0, 0.0);
482         for (int i = 1; i < r; i++) {
483             n = gm[i]->GetN();
484             gm[i]->SetPoint(n, (double)inputPE*PEkizami, delta[i]);

```

```

485         gm[i]->SetPointError(n, 0.0, 0.0);
486         if (delta[i]<delmin||delmin<0.0) {
487             delmin = delta[i];
488         }
489         if (delta[i]>delmax) {
490             delmax = delta[i];
491         }
492         n = gd[i]->GetN();
493         gd[i]->SetPoint(n, (double)inputPE*PEkizami, intensity_d[i]);
494         gd[i]->SetPointError(n, 0.0, 0.0);
495         if (intensity_d[i]<intensity_dmin||intensity_dmin<0.0) {
496             intensity_dmin = intensity_d[i];
497         }
498         if (intensity_d[i]>intensity_dmax) {
499             intensity_dmax = intensity_d[i];
500         }
501     }
502     for (int m = 1; m < mmax; m++) {
503         n = gi[m]->GetN();
504         gi[m]->SetPoint(n, (double)inputPE*PEkizami,
505             defaultintensity[m]);
506         gi[m]->SetPointError(n, 0.0, 0.0);
507         if (defaultintensity[m]<defaultintensitymin||defaultintensitymin
508             <0.0) {
509             defaultintensitymin = defaultintensity[m];
510         }
511         if (defaultintensity[m]>defaultintensitymax) {
512             defaultintensitymax = defaultintensity[m];
513         }
514     } else if (error == 1) {
515         break;
516     }
517     c2->cd();
518     gPE->SetMarkerStyle(20);
519     gPE->SetMarkerSize(0.5);
520     gPE->GetXaxis()->SetLimits(1.0*PEkizami,maxPE*PEkizami);
521     gPE->SetMinimum(0.0);
522     gPE->SetMaximum(1.2);
523     gPE->GetXaxis()->SetNoExponent();
524     gPE->Draw("AP");
525     gPE->SetTitle(";Number_of_Expected_Photo_Electrons;Observed/
526         Expected");
527     c2->SetLogx();
528     c2->Update();
529     if (save=="on") {
530         c2->SaveAs(outdir + outfilename + ".pdf");
531         c2->SaveAs(outdir + outfilename + ".png");

```

```

532     TFile *fout2 = new TFile(outdir + outfilename + ".root","recreate");
533     gPE->Write();
534     c2->Write();
535     fout2->Close();
536 }
537
538     double color[20] = {0, 632,801,816,870,600,876, 906,397,418,426,593,877,
539         909,804,800,419,432,861,888};
539     c3->cd();
540     gm[1]->GetXaxis()->SetLimits(1.0*PEkizami,maxPE*PEkizami);
541     gm[1]->SetMinimum(delmin);
542     gm[1]->SetMaximum(delmax);
543     gm[1]->GetXaxis()->SetNoExponent();
544     if (ratioc[1]==0.0) {
545         gm[1]->SetLineStyle(1);
546     } else {
547         gm[1]->SetLineStyle(2);
548     }
549     gm[1]->SetLineWidth(3);
550     gm[1]->SetLineColor(color[1]);
551     gm[1]->Draw("AC");
552     gm[1]->SetTitle(";Number_of_Expected_Photo_Electrons;delta");
553     for (int i = 2; i < r; i++) {
554         color_i = i/4;
555         if (ratioc[i]==0.0) {
556             gm[i]->SetLineStyle(1);
557             gd[i]->SetLineStyle(1);
558         } else {
559             gm[i]->SetLineStyle(2);
560             gd[i]->SetLineStyle(2);
561         }
562         gm[i]->SetLineWidth(3);
563         gd[i]->SetLineWidth(3);
564         gm[i]->SetLineColor(color[i]);
565         gd[i]->SetLineColor(color[i]);
566         gm[i]->Draw("C");
567     }
568     legend->Draw();
569     c3->SetLogx();
570     c3->Update();
571     if (save=="on") {
572         c3->SaveAs(outdir + outfilename + "_dynode.pdf");
573         c3->SaveAs(outdir + outfilename + "_dynode.png");
574         TFile *fout3 = new TFile(outdir + outfilename + "_dynode.root","
575             recreate");
576         for (int i = 1; i < r; i++) {
577             gm[i]->Write();
578         }
579         c3->Write();
580         fout3->Close();

```

```

580     }
581
582     c4->cd();
583     gd[1]->GetXaxis()->SetLimits(1.0*PEkizami,maxPE*PEkizami);
584     gd[1]->SetMinimum(intensity_dmin);
585     gd[1]->SetMaximum(intensity_dmax);
586     gd[1]->GetXaxis()->SetNoExponent();
587     if (ratioc[1]==0.0) {
588         gd[1]->SetLineStyle(1);
589     } else {
590         gd[1]->SetLineStyle(2);
591     }
592     gd[1]->SetLineWidth(3);
593     gd[1]->SetLineColor(color[1]);
594     gd[1]->Draw("AC");
595     gd[1]->SetTitle(";Number_of_Expected_Photo_Electrons;Number_of_
        electrons");
596     for (int i = 2; i < r; i++) {
597         gd[i]->Draw("C");
598     }
599     legend->Draw();
600     c4->SetLogx();
601     c4->SetLogy();
602     c4->Update();
603     if (save=="on") {
604         c4->SaveAs(outdir + outfilename + "_dgain.pdf");
605         c4->SaveAs(outdir + outfilename + "_dgain.png");
606         TFile *fout4 = new TFile(outdir + outfilename + "_dgain.root",
            "recreate");
607         for (int i = 1; i < r; i++) {
608             gd[i]->Write();
609         }
610         c4->Write();
611         fout4->Close();
612     }
613
614     c5->cd();
615     gi[1]->GetXaxis()->SetLimits(1.0*PEkizami,maxPE*PEkizami);
616     gi[1]->SetMinimum(defaultintensitymin);
617     gi[1]->SetMaximum(defaultintensitymax);
618     gi[1]->GetXaxis()->SetNoExponent();
619     gi[1]->SetTitle(";Number_of_Expected_Photo_Electrons;Input_
        Intensity_/A");
620     for (int m = 1; m < mmax; m++) {
621         color_i = m/4;
622         gi[m]->SetMarkerColor(color[m]);
623         gi[m]->SetMarkerStyle(20);
624         gi[m]->SetMarkerSize(0.5);
625         if (m==1) {
626             gi[1]->Draw("AP");

```

```

627     } else {
628         gi[m]->Draw("P");
629     }
630 }
631 legendi->Draw();
632 c5->SetLogx();
633 c5->Update();
634 if (save=="on") {
635     c5->SaveAs(outdir + outfilename + "_intensity.pdf");
636     c5->SaveAs(outdir + outfilename + "_intensity.png");
637     TFile *fout5 = new TFile(outdir + outfilename + "_intensity.root",
638         "recreate");
639     for (int m = 1; m < mmax; m++) {
640         gi[m]->Write();
641     }
642     c5->Write();
643     fout5->Close();
644 }
645 if (save=="on") {
646     TFile *fout = new TFile(outdir + outfilename + "_tfile.root",
647         "recreate");
648     fout->cd();
649     gPE->Write();
650     g->Write();
651     for (int i = 1; i < r; i++) {
652         gm[i]->Write();
653         gd[i]->Write();
654     }
655     for (int m = 1; m < mmax; m++) {
656         gi[m]->Write();
657     }
658     legend->Write();
659     legendi->Write();
660     c1->Write();
661     c2->Write();
662     c3->Write();
663     c4->Write();
664     c5->Write();
665     fout->Close();
666 }
667 return 0;
668 }

```

## 参考文献

- [1] 鈴木厚人 (監修). カミオカンデとニュートリノ. 丸善出版株式会社, 6 2016.
- [2] The T2K Collaboration., K. Abe, R. Akutsu, and et al. Constraint on the matter - antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature*, Vol. 580, pp. 339 – 344, 2020.
- [3] S-O Flyckt and Carole Marmonier. Photomultiplier tubes principles & applications. [https://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt\\_Marmonier.pdf](https://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt_Marmonier.pdf). Accessed: 2021-01-10.
- [4] 浜松ホトニクス株式会社. 光電子増倍管ハンドブック (光電子増倍管その基礎と応用 第4版). [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4J.pdf). Accessed: 2021-01-06.
- [5] 多田将. ニュートリノ:もっとも身近で、もっとも謎の物質. イースト・プレス, 7 2016.
- [6] 日本分析化学会. Internet 「とにかくやってみる」 20 インチ径光電子増倍管の開発. <https://www.jsac.or.jp/bunseki/pdf/bunseki2003/novel0308.pdf>. Accessed: 2021-01-31.
- [7] 株式会社オータマ. Internet パーマロイとは. <https://www.ohtama.co.jp/whats.html>. Accessed: 2021-01-07.
- [8] 山田作衛, 相原博昭, 岡田安弘, 坂井典佑, 西川公一郎 (監修). 素粒子物理学ハンドブック. 株式会社朝倉書店, 10 2010.
- [9] A. Suzuki, M. Mori, K. Kaneyuki, T. Tanimori, J. Takeuchi, H. Kyushima, and Y. Ohashi. Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 329, No. 1, pp. 299 – 313, 1993.
- [10] A. Takenaka, K. Abe, C. Bronner, Y. Hayato, M. Ikeda, S. Imaizumi, H. Ito, J. Kameda, Y. Kataoka, Y. Kato, and et al. Search for proton decay via  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  and  $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$  with an enlarged fiducial volume in superkamiokande i-iv. *Physical Review D*, Vol. 102, No. 11, Dec 2020.
- [11] 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設. Internet スーパーカミオカンデ. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>. Accessed: 2021-01-10.
- [12] 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設. Internet ハイパーカミオカンデ. <http://www.hyper-k.org/>. Accessed: 2020-11-27.
- [13] 秋本祐希. Internet higgstan. <https://higgstan.com/>. Accessed: 2021-01-09.