

高時間分解能 MCP-PMT の動作条件最適化による
寿命改善の研究

水野 嶺

261401346

平成 28 年 1 月 18 日

概要

MCP-PMT(Micro Channel Plate Photo Multiplier Tube) は近年注目度が高まっている高い時間分解能を大きな特徴とした光電子増倍管である。我々は、Belle II 実験の粒子識別装置である TOP(Time Of Propagation) カウンター用の光検出器として企業と共同で研究開発を進め、一光子を 50ps 以下の時間分解能で検出するという要求性能を満たし、実際の実験で使用できる MCP-PMT の開発に成功している。MCP-PMT の長期連続使用で懸念されるのが、光電面の劣化による量子効率の低下である。主な原因として、MCP の製造過程で表面に付着した残留ガスが二次電子により離脱・イオン化され、光電面を劣化させることが挙げられ、量子効率の低下が読み出し信号の積分電荷量の関数となっていることが先行研究で示されている。従って、MCP-PMT をより長く使用するには、時間分解能・検出効率を高く保ったまま可能な限り低増幅率で使用する必要がある。

既製品の MCP - PMT の運転条件は、光電子と二次電子の加速電場をつくる各電極の電位で決まる。本研究の対象となる MCP-PMT では、光電面と 2 段の MCP の入力・出力にある計 5 カ所に高電圧を供給するが、実際の実験では使用できる電源の数やノイズの影響を考慮して、一つの電源から供給される電圧を抵抗チェーンで分圧をする。供給電圧は各 MCP-PMT ごとに最適化されているが、その分圧比は全ての MCP-PMT に共通となる。ところが、この分圧比の最適化はこれまでに研究されていない。より最適な分圧比の決定が本研究の目的である。

本研究では、MCP-PMT 内の各電極に独立に電圧を供給できるシステムを構築し、電子の加速電場と MCP の特性 (時間分解能、増幅率、検出効率) の関係を調べた。その結果、時間分解能は後段 MCP の電場に比べ、前段 MCP の電場に大きく依存することが明らかとなった。このことから、後段 MCP の入出力電位差だけを下げれば、時間分解能の悪化を最小限に抑えつつ低増幅率で使用できる。また、光電面から前段 MCP の電位差を大きくすることで検出効率を上げられることもわかった。本研究の結果を指針に今後詳細な分割比を決定し、MCP-PMT をより長く使用することが可能となる。

目次

1	MCP-PMT	4
1.1	MCP-PMT の構造	4
1.2	MCP-PMT の基本特性	6
1.2.1	増幅率	6
1.2.2	時間分解能	6
1.2.3	量子効率 (QE)	6
1.2.4	収集効率	6
1.2.5	検出効率	6
1.3	Belle II 実験用 TOP カウンター	7
1.4	増幅率と QE 低下	8
1.5	本研究の目的	9
2	測定システム	10
2.1	測定ベンチ	10
2.2	電圧供給	10
2.2.1	抵抗チェーンと本実験の電圧供給	10
2.2.2	ローパスフィルタ	11
2.3	解析手法	11
2.3.1	増幅率の算出	11
2.3.2	時間分解能の算出	11
2.4	測定の戦略	13
3	測定結果	15
3.1	前段および後段 MCP	15
3.1.1	増幅率と時間分解能	15
3.1.2	時間分解能	16
3.1.3	検出効率	17
3.2	光電面-前段 MCP 入力	18
3.3	前段 MCP 出力-後段 MCP 入力	19
3.4	検討課題	20
3.4.1	レーザー光量の安定性	20
4	結論	22
5	参考文献	24

1 MCP-PMT

本章では、MCP-PMT の構造、MCP-PMT の基本特性、MCP-PMT が使用される Belle II 実験用 TOP カウンター、Belle II 実験で使用する際に問題となる増幅率と量子効率 (QE) 低下の問題を説明し、本研究の目的を明らかにする。

1.1 MCP-PMT の構造

マイクロチャンネルプレート (MCP) が 2 枚、1mm の間隔を開け重ねて設置されている。MCP は厚さが $400\ \mu\text{m}$ の鉛ガラスの板で、表裏を貫通する直径 $10\ \mu\text{m}$ の穴が多数並んでいる。MCP の表面はコーティングで原子層が形成され、二次電子放出層となっている。

穴は 13° の角度で開けられており、電場で加速された電子が穴の壁面の二次電子放出層に入射できる。電子が二次電子放出層に衝突すると、二次電子が放出される。二次電子が電場によって加速され穴の壁面に衝突し、更に電子を放出する。これを繰り返すことで、約 10^6 個に電子を増幅する。増幅された電子は、 4×4 の 16 チャンネルに分割された陽極で収集・検出される。

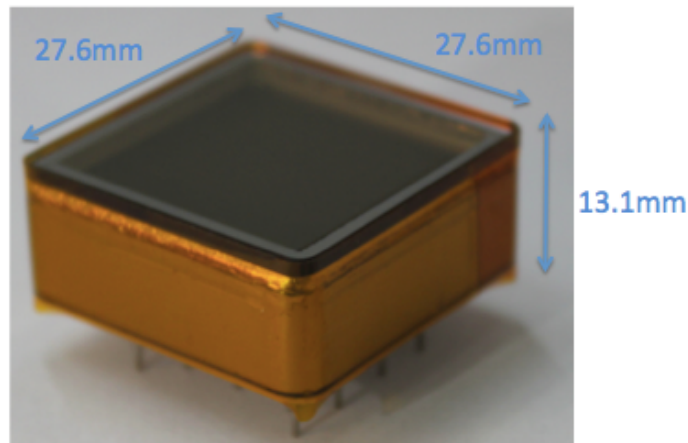


図 1: MCP-PMT 外観

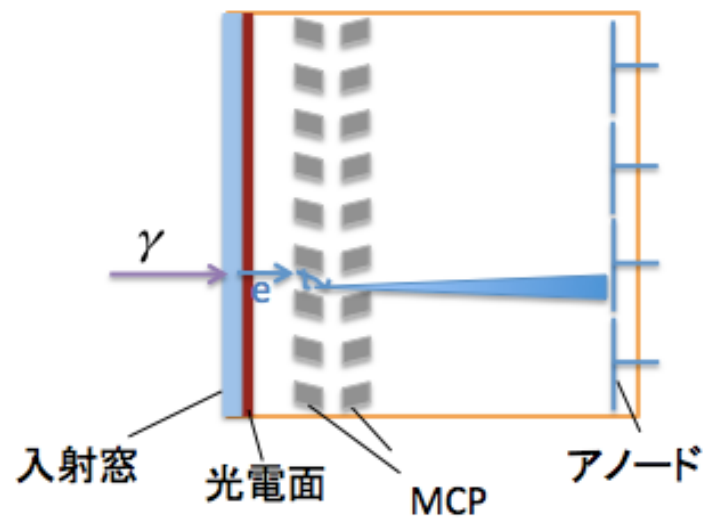


図 2: MCP-PMT 断面の概略図

1.2 MCP-PMT の基本特性

MCP-PMT の特性を以下にまとめる。

1.2.1 増幅率

一光電子の入射に対して陽極から出力される電子の数。MCP-PMT 全体の増幅率の変化は MCP の二次電子放出比に強く依存し、二次電子放出比は入射電子のエネルギー、つまり加速電場の強さに依存する。そのため、電源電圧を上げると増幅率も上がるが、二次電子放出比は入射電子のエネルギーの増大に対して単調増加ではないため、電源電圧を上げすぎると増幅率は低下する。二次電子として MCP から放出された分の電子は、高電圧電源からの電流で補充される。

1.2.2 時間分解能

光子の検出時間の測定精度を指す。不定性の主な要因として増幅過程での電子の経路のばらつきが挙げられる。MCP による電子増幅では、微細な穴の内部で増幅が行われるため、電子の増幅経路が制限され、ばらつきが小さく抑えられる。このため MCP-PMT は高い時間分解能を発揮できる。統計的に、増幅率が下がり電子数が減ると時間分解能は悪くなる。

1.2.3 量子効率 (QE)

量子効率は光電面に光子が入射したとき電子が放出される確率。光電面に光子が入射した時、必ず電子が放出される訳ではなく、光子の吸収や散乱、光電面内で電子の吸収が起こった場合電子は放出されない。

1.2.4 収集効率

光電面から放出された光電子が、陽極から読み出される確率で、MCP の開口率でほぼ決まる。MCP の開口率は 60%である。

1.2.5 検出効率

検出効率とは、実際に入射した光子が陽極から信号として読み出される確率をいい、量子効率と収集効率をかけ合わせたものになる。

1.3 Belle II 実験用 TOP カウンター

Belle II 実験は 2017 年開始予定の高エネルギー実験で、1998 年に CP 対称性の破れを検証することを目的として開始された Belle 実験から、ピークルミノシティを 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増強し、B 中間子からの稀崩壊事象を精密に測定することで、標準理論を超えた新しい物理の探索を主な目的としている。

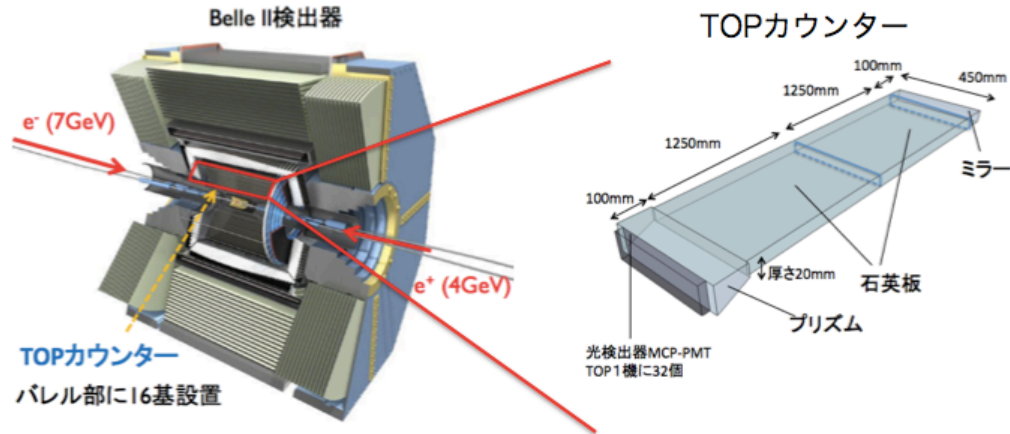


図 3: Belle II 検出器と TOP カウンター

TOP カウンターは、石英板中を通過する荷電粒子が発生させるチェレンコフ光を捉え、その放出角から粒子の速さを測定し、内層の検出器で測られた運動量と合わせることで質量を測定する粒子識別装置である。MCP-PMT は石英板の端に装着され、石英中を伝播してきた光子を検出してチェレンコフ光のリングを再構成する。ひとつの荷電粒子を測定するために必要な光子の検出数は $O(10)$ 個であり、MCP-PMT には一光子を以下の性能で検出できることが求められる。

340nm 付近での QE	24%以上 (平均 28%)
時間分解能	50ps 以下

1.4 増幅率と QE 低下

MCP-PMT 光電面の量子効率、使用とともに低下していくことがわかっている。その主な原因となるのが、残留ガスである。光電面は光電子を放出しやすいアルカリ金属の薄膜であり、MCP-PMT 内のガスと化学反応を起こし QE が低下する。残留ガスには、封止する際に管内に残った窒素や酸素などの大気ガスや MCP 表面の還元に使われる水素などがある。光電面の劣化には、二次電子が深く関わる。二次電子は MCP 表面に付着した残留ガスを離脱させる。離脱によって生じた中性ガスは光電面まで達することができる。また、二次電子は衝突によって残留ガスをイオン化する。発生した陽イオンは、電場によって加速され、光電面に到達する。このように離脱・イオン化されたガスの分子数は二次電子の総数に比例すると考えられる。図は測定により積算出力電荷量と QE の関係を表した過去の研究によるもの。

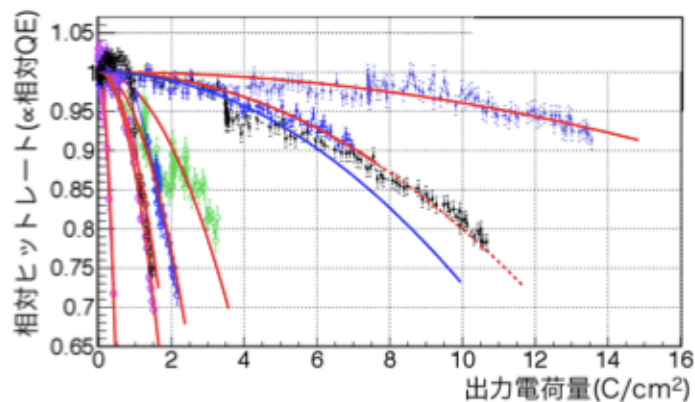


図 4: 積算出力電荷量と QE 低下の関係を表したグラフ。積算出力電荷量の単調減少関数でフィットできる。

この積算出力電荷量は MCP-PMT の増幅率に比例する。つまり、MCP-PMT を高い増幅率での運用することは、光電面の QE の低下を早めることになる。

1.5 本研究の目的

先に述べた特性から、MCP-PMT を、QE の低下を抑え長く使用するためには、増幅率をなるべく低く抑えたい。QE の低下で使用期間を決めるとすれば、例えば増幅率を半分にすれば2倍長く使用できることになる。既製品 MCP-PMT の増幅率は供給電圧によって調整可能である。しかし、従来のように抵抗チェーンにより一定比率で供給電圧を下げることで増幅率を抑えると時間分解能も悪化する。この抵抗チェーンについては2.2節でも改めて説明するが、現在の比率は詳細な研究結果に基づいたものではない。よって MCP-PMT をより低増幅率で使用できる電源の分圧比があると考えられる。Belle II 実験への適用を考え、現在の使用増幅率である 5.0×10^5 を、時間分解能を落とさずに半分の 2.5×10^5 にすることが本実験の目的である。Belle II 実験で使用される MCP-PMT は512本と大量であることや、ノイズ源となる電源を減らすことを考慮しても、抵抗チェーンを用いて電圧を供給することになる。よって最終的な目標はこの抵抗チェーンによる分圧比を決定することとした。寿命が短いタイプの約半数の MCP-PMT は、2020年頃のシャットダウン中に交換される。その際一緒に抵抗チェーンも本研究で得られた最適なものに交換できる。

2.2.2 ローパスフィルタ

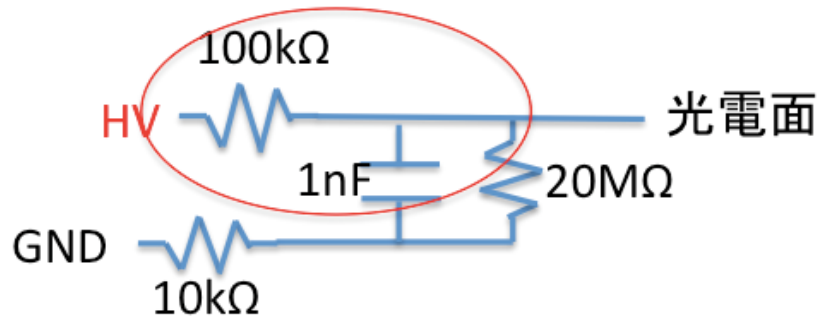


図 7: 赤丸で囲った部分がローパスフィルタとなる。

立ち上がり時間が $O(100ps)$ である MCP-PMT の出力信号の時間分解能を悪化させやすい、周波数の高いノイズをカットする目的。カットオフ周波数は約 $1.6 \times 10^4 Hz$ 。

2.3 解析手法

2.3.1 増幅率の算出

ADC により測定した電荷量分布の平均値から算出する。

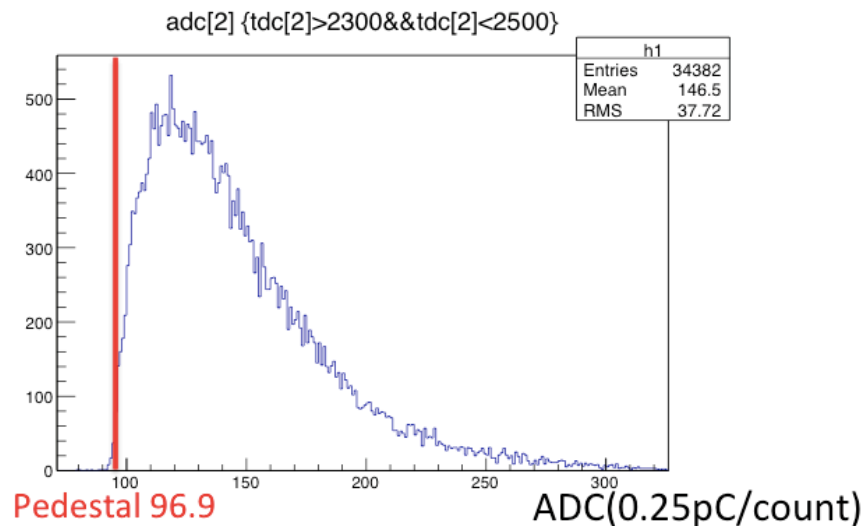


図 8: ADC 分布の例

2.3.2 時間分解能の算出

TDC 分布を二重ガウシアンでフィットしたときの第一成分の標準偏差を時間分解能とする。

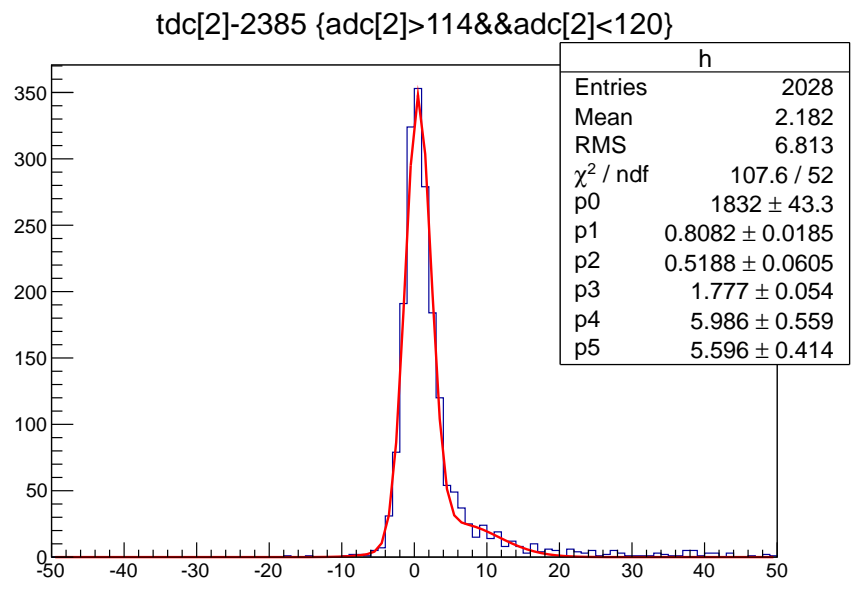


図 9: TDC 分布を二重ガウシアンでフィットした例

2.4 測定の戦略

MCP-PMT の加速電場は、『光電面-前段 MCP 入力』『前段 MCP 入力-前段 MCP 出力』『前段 MCP 出力-後段 MCP 入力』『後段 MCP 入力-後段 MCP 出力』『後段 MCP 出力-陽極』の五カ所にわけられる。これらのうち一カ所だけの電位差を変えた時の特性を測定していく。抵抗チェーンによりかかる電圧を次のページの表に記す。この値を参考に、電圧降下を考慮して電源電圧を設定する。

総電圧 (V)	3250	3200	3150	3100	3050	3000	2950	2900	2800	2700
光電面-前段 MCP 入力 (V)	191	188	185	182	179	176	173	170	164	159
前段 MCP 入力-前段 MCP 出力 (V)	842	829	816	803	790	777	765	752	726	700
前段 MCP 出力-後段 MCP 入力 (V)	889	875	862	848	834	821	807	793	766	739
後段 MCP 入力-後段 MCP 出力 (V)	796	784	771	759	747	735	722	710	686	661
後段 MCP 出力-陽極 (V)	489	481	473	466	458	451	443	436	421	406

3 測定結果

3.1 前段および後段 MCP

3.1.1 増幅率と時間分解能

前・後段の MCP 入力・出力電位差を変えた時の増幅率の変化を測定した。基準として従来の分圧で 7×10^5 ボルトの供給電圧から、各部分のみ個別に電位差を下げていき、測定を行った。

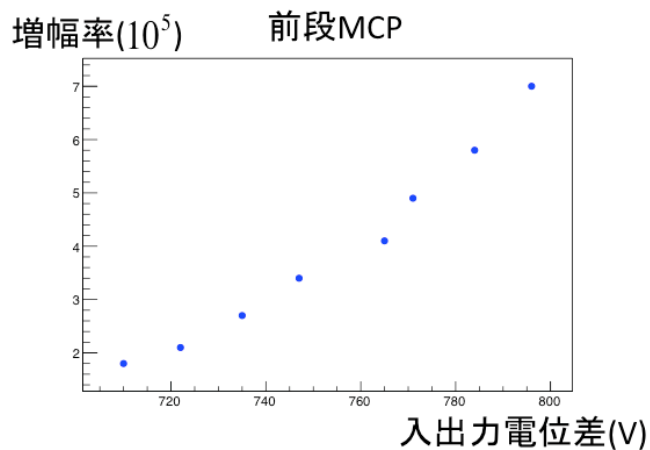


図 10: 前段 MCP 入出力電位差の変化と増幅率

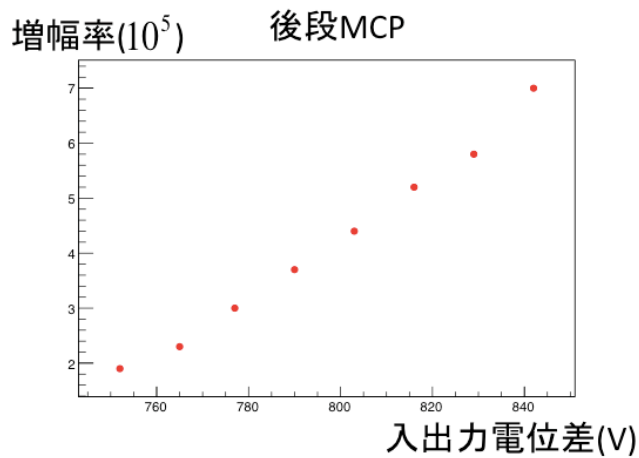


図 11: 後段 MCP 入出力電位差の変化と増幅率

3.1.2 時間分解能

前・後段 MCP の入力・出力間電位差を下げた時この 100V 程度の変化で 3-4 倍程度増幅率を変化させられることが確かめられた。次に、同じ測定データから、時間分解能の変化を見た。信号/ノイズ比が小さいと回路による時間分解能の悪化が支配的となるため、それを切り分けるため ADC10bin(2.5 pC) ごとに TDC 分布をガウシアンをフィットすることで時間分解能を評価した。

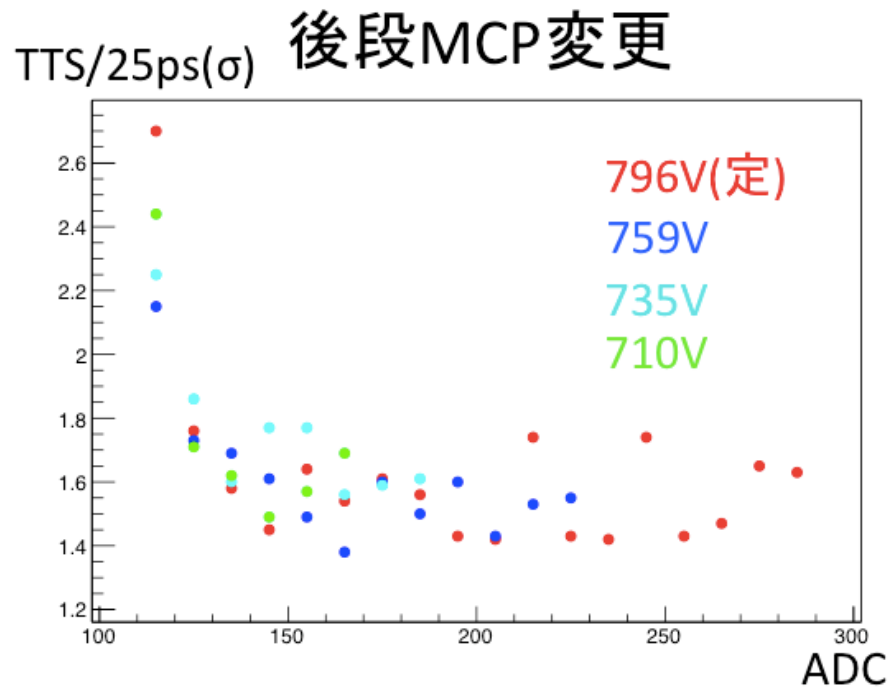


図 12: MCP 入力・出力間の電位差と時間分解能。各点の誤差は最大 0.1

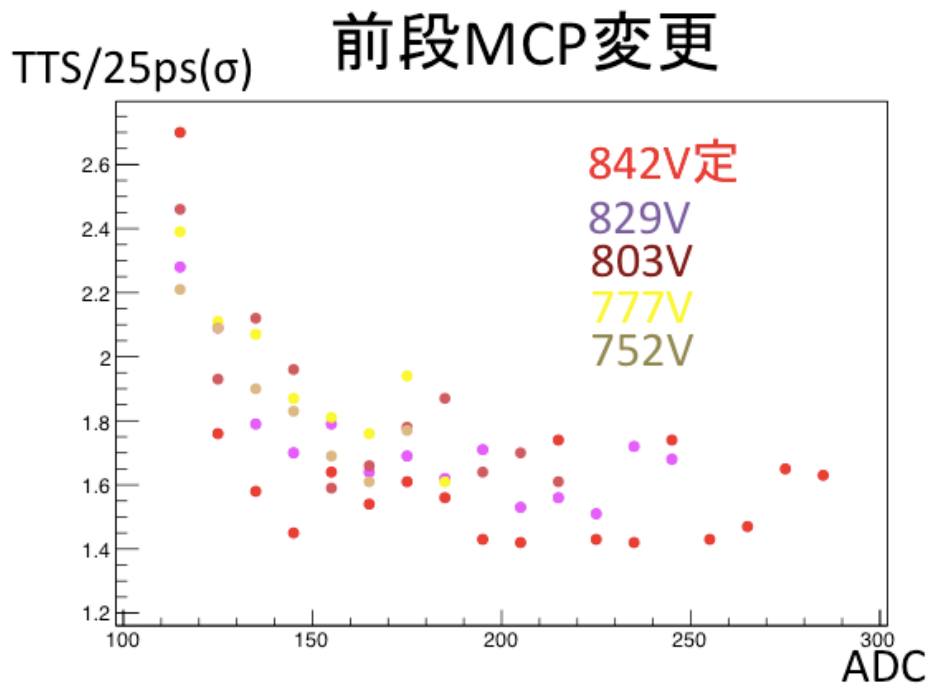


図 13: MCP 入力・出力間の電位差と時間分解能。各点の誤差は最大 0.1

後段 MCP 電位差の変更では、時間分解能はほとんど変化していない。それに対して、前段 MCP の電位差の変更では時間分解能が明確に悪くなっている。この結果から、後段の MCP のみ入出力間電位差を小さくして増幅率を抑えることが、有効であることがわかった。

3.1.3 検出効率

次に前段 MCP、後段 MCP それぞれの入力・出力間電位差を下げた時の検出効率をみた。

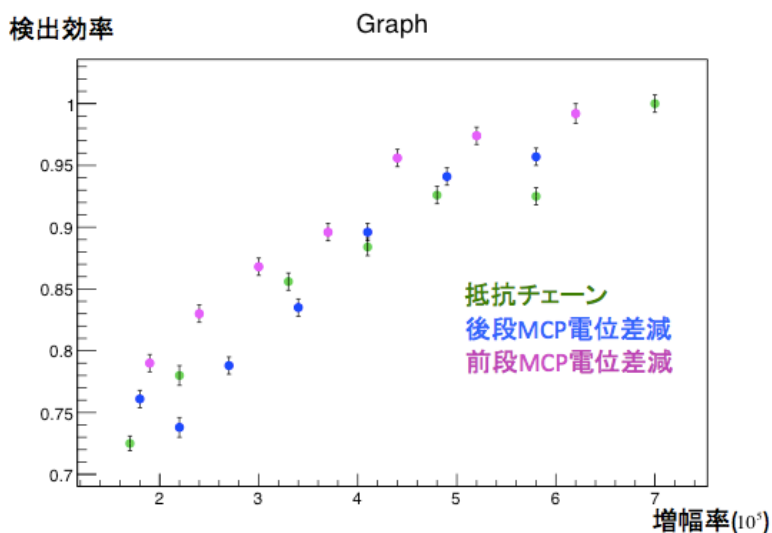


図 14: 検出効率の変化

検出効率の低下の原因としては、ディスクリミネータのスレッシュホールドにより波高の低い信

号がカットされてしまったことが考えられる。ディスクリミネータのスレッシュホールドによる信号のカットであれば、抵抗チェーンの使用などでノイズを低減させることで回復が見込める。このため、検出効率の低下については原因をより明確にさせておきたい。

3.2 光電面-前段 MCP 入力

光電面から前段 MCP 入力までの電位差と諸特性の関係。従来の分圧では、この部分の電位差は 160-200V 程度となる。

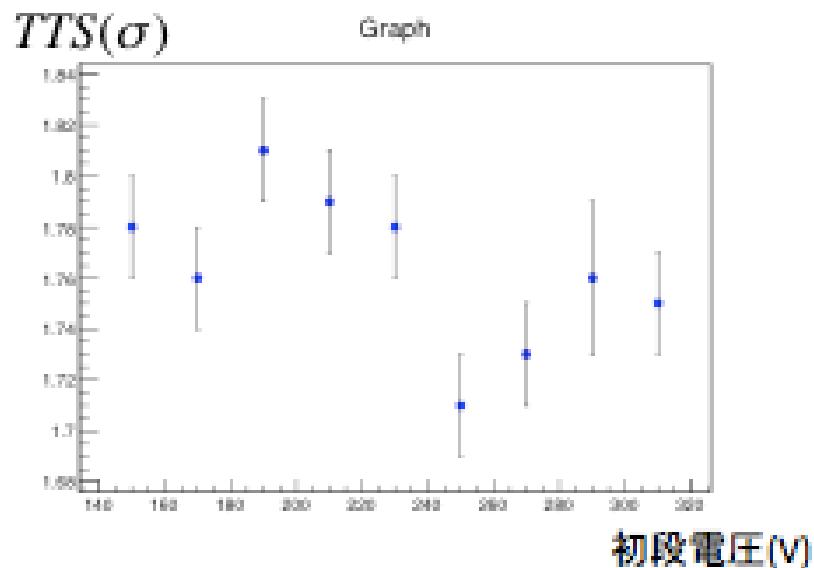


図 15: 前段 MCP-後段 MCP の電位差変化と時間分解能

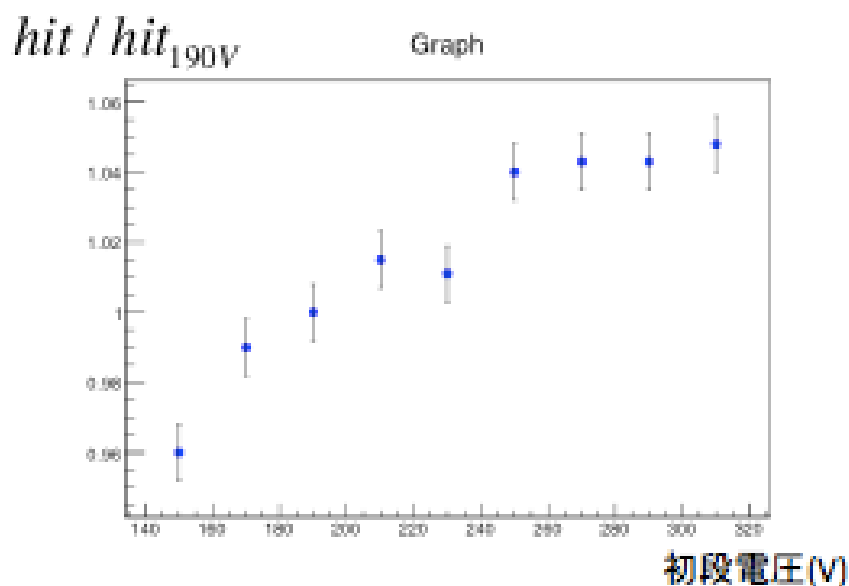


図 16: 前段 MCP-後段 MCP の電位差変化と検出効率

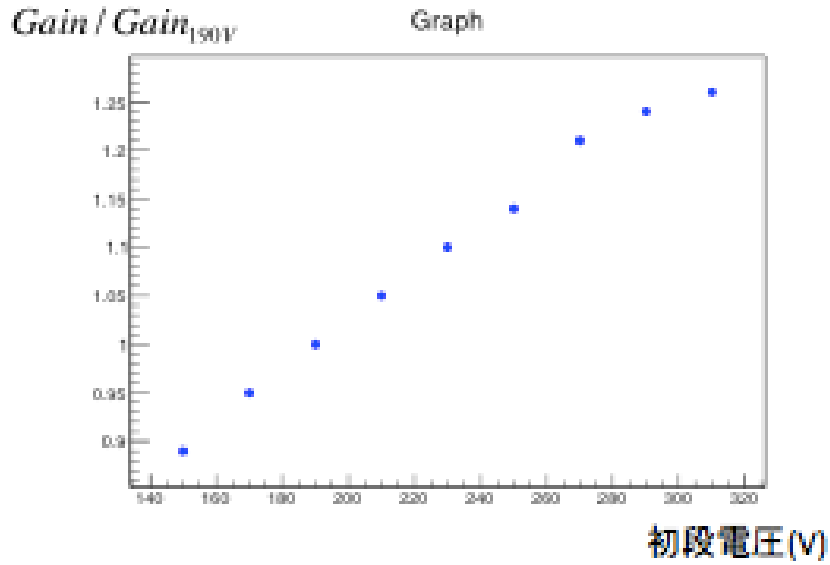


図 17: 前段 MCP-後段 MCP の電位差変化と増幅率

300V 程度にすることで、検出効率は 5%程度上がる。その際増幅率は 20-30%程度上がるが、MCP 入出力電位差の変更で十分補える。また、時間分解能については、ここまでの測定から、この部分の電位差は 250V 300V 程度になるように分圧するのが望ましいと考えられる。

3.3 前段 MCP 出力-後段 MCP 入力

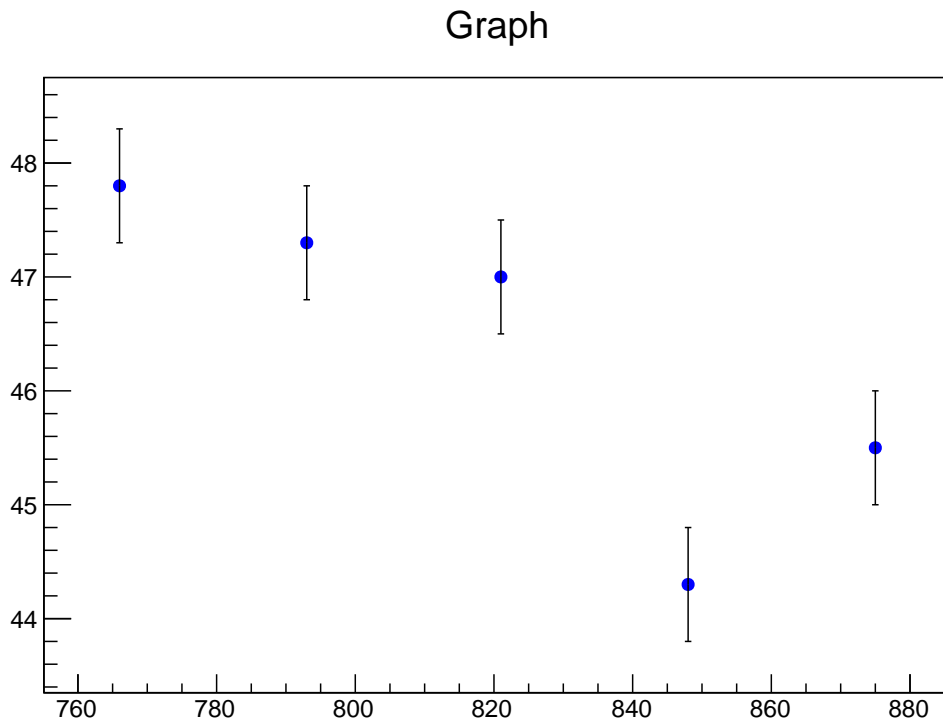


図 18: 前段 MCP-後段 MCP の電位差変化と時間分解能

Graph

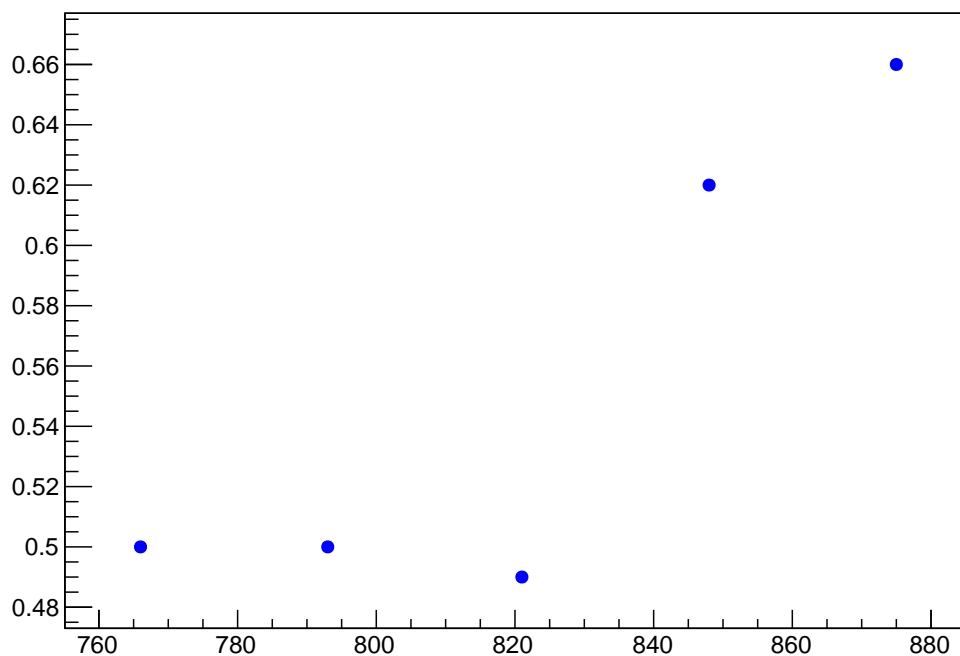


図 19: 前段 MCP-後段 MCP の電位差変化と増幅率

3.4 検討課題

3.4.1 レーザー光量の安定性

検出効率の変化が電位差の変化によるものなのか、また、MCP の前段と後段で検出効率に与える影響が異なるかを明らかにしたい。そのため、測定される検出効率に変化する要因として考えられる、レーザー光量の安定性を調べた。MCP-PMT への供給電圧を一定にした状態で、クロックで 100000 イベント (2 分) の測定を何度も行い、レーザーの電源を入れてからの時間とヒット数を見た。

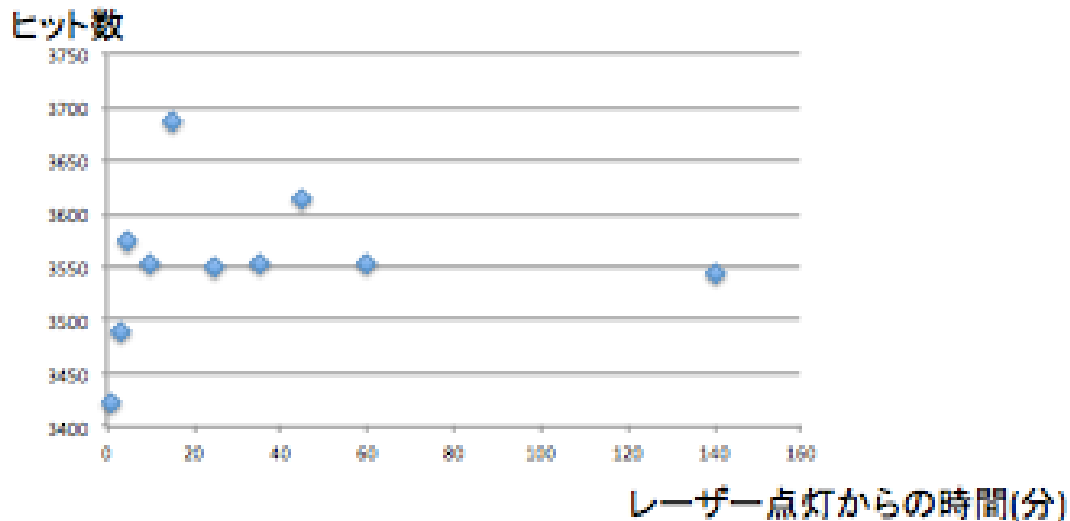


図 20: レーザーの電源を入れてからの時間とヒット数

レーザー点灯直後は光量が低く、最大7%程度ヒット数が変化した。このことから、検出効率の測定結果に見られる差が、レーザー光量の変動による可能性があることがわかった。再測定をして再現性を確認したり、参照用 PMT を設置してレーザーの光量を補正する必要がある。

4 結論

本研究では、MCP-PMT の長寿命化のための供給電圧分割比の最適化を目標とし、MCP-PMT の各電子加速電場と諸特性の関係を調べた。MCP1 枚の入出力電位差の変更で、3 倍以上増幅率を変化させることができた。さらに、前段 MCP の電位差を下げると増幅率を落とすと時間分解能が悪化するのに対して、後段 MCP の電位差を下げると増幅率を落としても時間分解能は悪化しないという測定結果を得た。また、光電面から前段 MCP 入力までの電位差を、従来の 190V 程度から 300V 程度にすることで、検出効率を約 5%改善できることがわかった。今後は、前・後段 MCP の入出力電位差と検出効率の関係を明らかにした上で、本結果の有効性を吟味する。その後、前・後段 MCP の入出力電位差の 2 カ所に注目し、前段の電位差を上げ、後段の電位差を下げた場合に、増幅率を抑えながら時間分解能を良くできないかを探る。そして最終的により適した供給電圧分割比を決定する。

謝辞

本研究を進めるに際して、ご指導いただいた飯嶋徹教授、居波賢二准教授、松岡広大特任助教をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝します。指導教員である飯嶋教授には、研究を開始から一緒に方針を考えてくださり、方向を見失わず研究を進めるための助言を数多くいただくことで、居波准教授、松岡特任助教には、忙しい中でも適切な助言をいただき、研究を進める上で大変な助けとなりました。早坂圭司准教授、鈴木一仁特任講師、加藤悠司研究員、佐藤優太郎研究員、前田陽祐研究員には、不自由なく研究生活を送れるよう配慮いただいたり、貴重な意見を数多くいただきました。グループの先輩である廣瀬茂輝さんには、適切なアドバイスを何度もいただきました。同期の佐野君には、学部生からの縁もあり、何度も助けていただきました。ATLAS グループの戸本誠准教授、堀井泰之助教、川出健太郎研究員、にも、鋭い意見をいただき、自身の研究を見直すよいきっかけを与えていただきました。後輩の大森雷太くん、小林一帆くん、宿谷琴子さん、野村侑矢くん、水越健太くん、趙阮秦さんからは、いつも刺激をもらうことができました。多くの方の協力を受けて本研究を遂行できたことを、この場を借りて深く御礼申し上げます。

5 参考文献

参考文献

- [1] 武市秀樹 修士論文 『Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の性能測定システムの構築』 (2012)
- [2] 廣瀬茂輝 修士論文 『Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の実機設置環境における特性評価』 (2013)
- [3] 米倉拓弥 修士論文 『Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の性能評価』 (2015)