

MPPC 比較測定 その3

概要

従来型と新型 2 種類の MPPC の比較測定結果を報告する。LED 光源を用いた測定では、供給電圧と増幅率および、増幅率とノイズ比の関係、そして波長変換ファイバー (WLSF) を用いた測定では、光量変化における MPPC と PMT の光電子数の比を調べた。また検出効率と平均光電子数の関係からクロストーク、そして PMT 光電子数において 2 種類の WLSF の波長領域での検出効率の関係性を比較した。

1. 従来型と新型 MPPC

従来型として S12572-100P は有効面積 3×3 mm²、ピクセル数 900 個、ピクセルピッチ 100 μ m をもつ。2015 年 4 月に浜松ホトニクス社は新型 MPPC: S13360 シリーズを発表した。従来型と比較して、低雑音、低クロストーク、低アフターパルスを唱っている。我々独自に比較測定を行い、PET 装置アップグレード、粒子識別装置アップグレードの推定する。千葉大が入荷した MPPC は S13360-1350CS, -3050CS, -6050CS, -6050PE の計 4 種類だ。型番の 4 桁中の前 2 桁は有効面積の一辺を、後 2 桁はピクセルピッチ幅を示し、そして最後の英語は CS はセラミック型、PE は表面実装型を示す。

2. 供給電圧と増幅率、ダークノイズの関係

まず従来型と新型 2 種類 -1350CS と -3050CS について HV-Gain と Gain-Noise の関係を EASIROC モジュールを使用して調べた。-6050CS と -6050PE は EASIROC の ADC では有意に分散ピークが現れず、読出し方法を後で考えることにする。LED 光源を当て、0, 1, 2 ... p.e. と離

散ピークの幅から増幅率を導き、供給電圧との関係を、そして LED 光源を当てないときのノイズ比と供給電圧との関係も調べる。LED 光源を当てたときのそれぞれの ADC 分布を図 1 に示す。これらの ADC は離散的なピークが現れていることが確認できる。このペDESTAL ピークの平均値を M_{ped} 、隣のピーク平均値は M すると増幅率 μ は以下の式で表せる。

$$\mu(V) = \frac{(M - M_{ped})C_{MPPC}C_{ADC}}{|e|}$$

ここで、 V は供給電圧 [V]、 C_{MPPC} は静電容量 [pF]、 C_{ADC} は EASIROC モジュールの変換係数 [mV/ADC]、 e は素電荷 1.60×10^{-19} C を表す。ちなみに、S12572-100P および、S13360-1350CS, S13360-3050CS の静電容量はそれぞれ 320 pF, 60 pF, 320 pF である。図 2 に示すように、HV-Gain は従来型および新型ともに良い線形性をもつ。従来型の供給電圧 65V に比べて新型は供給電圧 55V と低い設計である。測定精度は直線でフィッティングした関数との差から導き(図 3)、3%未滿の精度が得られた。

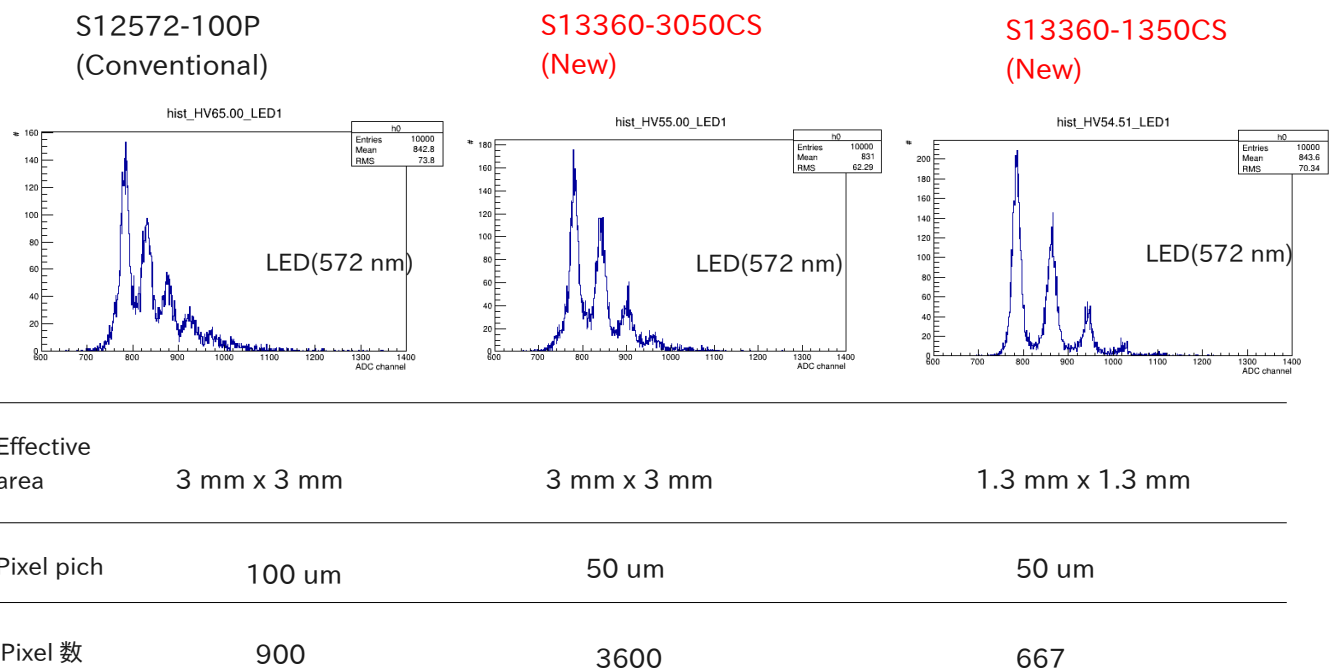


図1. 新型および従来型 MPPC の ADC 分布、有効面積、ピクセルピッチ、ピクセル数のリスト

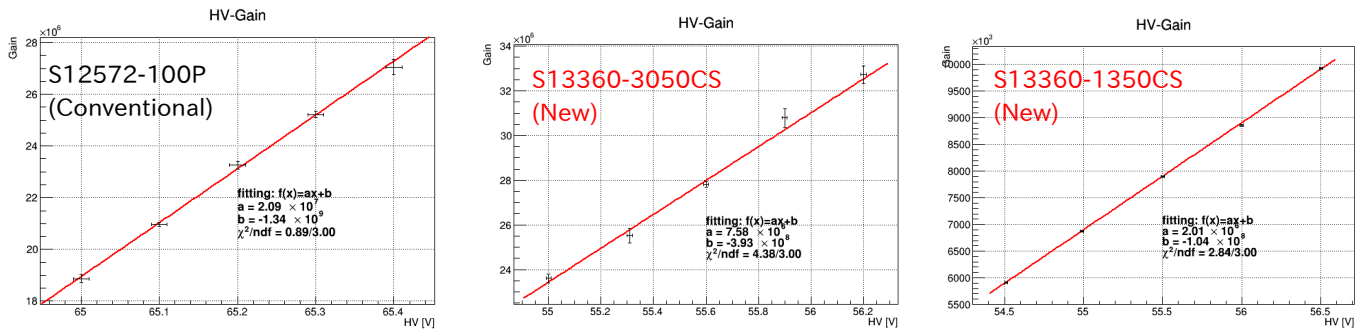


図2. 新型および従来型 MPPC の供給電圧と増幅率の関係

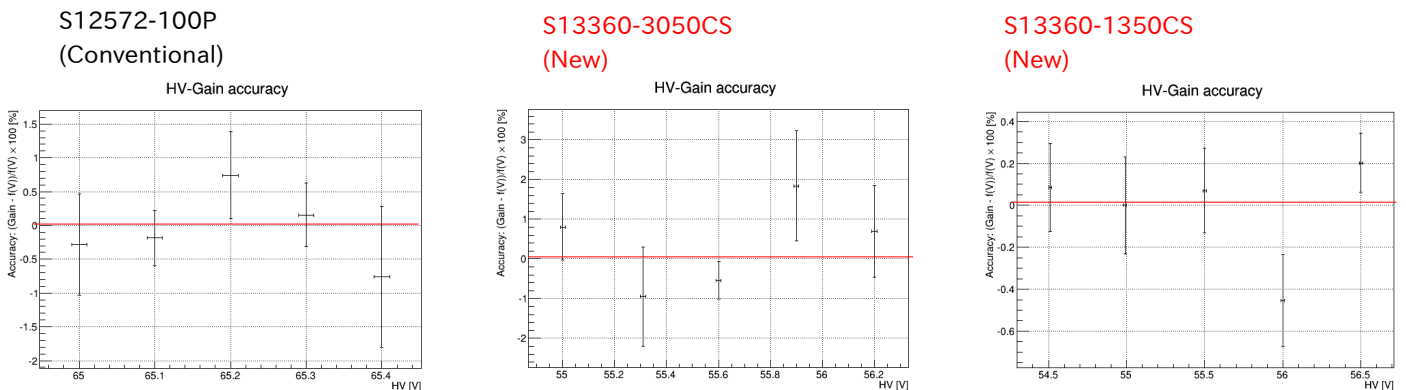


図3. 新型および従来型 MPPC の供給電圧と増幅率の測定精度

LED 光源を消したときの MPPC の ADC 分布からあるしきい値を超えた事象比から増幅率とノイズ比の関係を plot した (図 4)。測定結果として 0.5, 1.5, 2.5 p.e. をしきい値にした plot は従来型と新型を比較して 0.5 p.e. しきい値では -3050CS は 80% へ、1.5 p.e. は約半分へ、2.5 は 1 桁ノイズが落ちた。

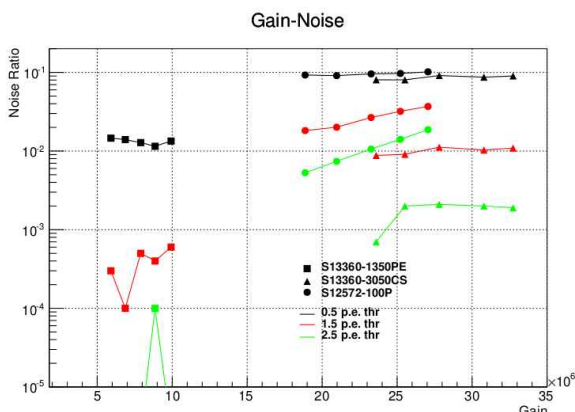


図 4. 新型および従来型 MPPC の供給電圧と増幅率の測定精度

-1350CS は増幅率が異なるが、ノイズは 1 桁落ちている。MPPC のダークノイズはピクセル数に依存している。従来型のピクセル数 900 個とくらべて新型のピクセル数は 3600 に増えているにも関わらず、ノイズは

あまり変わらないもしくは少し抑えられた。また -1350 と -3050 のピクセルは同質で、式(1)より増幅率と静電容量の関係、そしてピクセル数に比例関係があることから、増幅率の空白領域はつながる可能性がある。

3. 波長変換ファイバーを用いた比較測定

波長変換ファイバー(WLSF)は側面から LED 光源を吸収し、等方的に再発光、全反射条件を満たした光を末端まで伝搬する。LED 光源はちょうど PMT と MPPC の中心に設置することで、LED 光源が不安定でも同じ波長スペクトラム、同じ光量がそれぞれに入射されることが保証できると考えた (図 5)。波長変換ファイバー (Y-11) には吸収波長領域からピーク 470 nm の LED 光源を使用され、R-3 には 572 nm の LED 光源を使用される。

図 6 に MPPC と PMT それぞれの光電子数分布を示す。これら MPPC と PMT はそれぞれ EASIROC と CAMAC ADC において光電子数の校正を済ませている。3 種類の MPPC (S12572-100P, S13360-1350CS, S13360-3050CS)、2 種類の PMT (R9880U-210, R9880U-20: LED はそれぞれの感度波長に適用されている) を使用し、計 6 種類の関係を図 7 に示す。どれも良い線形成を

示す。この結果から傾きが同じ PMT を使って MPPC の量子効率の比較ができる。LED(470 nm) + WLSF(Y-11) において、S12572-100P で傾き $a=0.99$ に対して、新型では $a=0.21$ と $a=0.60$ がそれぞれ得られた。この結果は従来型よりも新型は検出効率が低いことを与える。本当に検出効率が従来型より悪化したのだろうか。MPPC の検出効率は供給電

圧によって変化する性質をもつので、それぞれの供給電圧のオーバー電圧具合が違ったのだろうか。また、MPPC と波長変換ファイバーの接着具合が毎回異なることが原因なのではないか。新型は従来型より低クロストーク、低アフターパルスで、従来型でクロストークが高く評価していたものを新型では抑えていると考えたと説明ができるのではないのか。

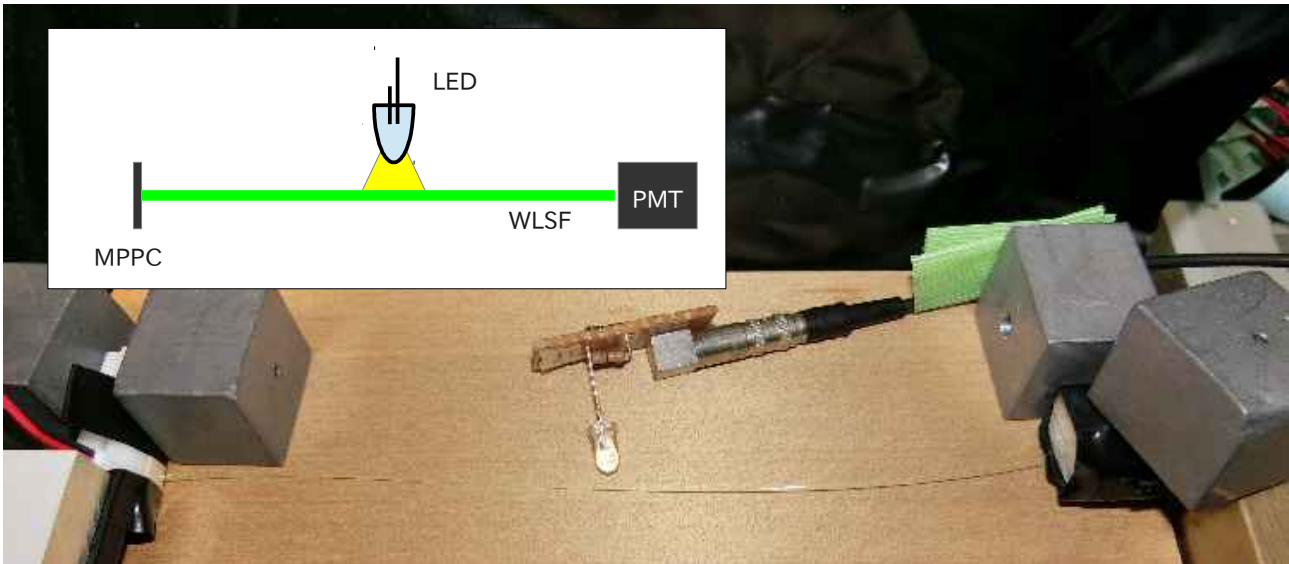


図5. 波長変換ファイバーを用いた MPPC と PMT 比較測定セットアップ

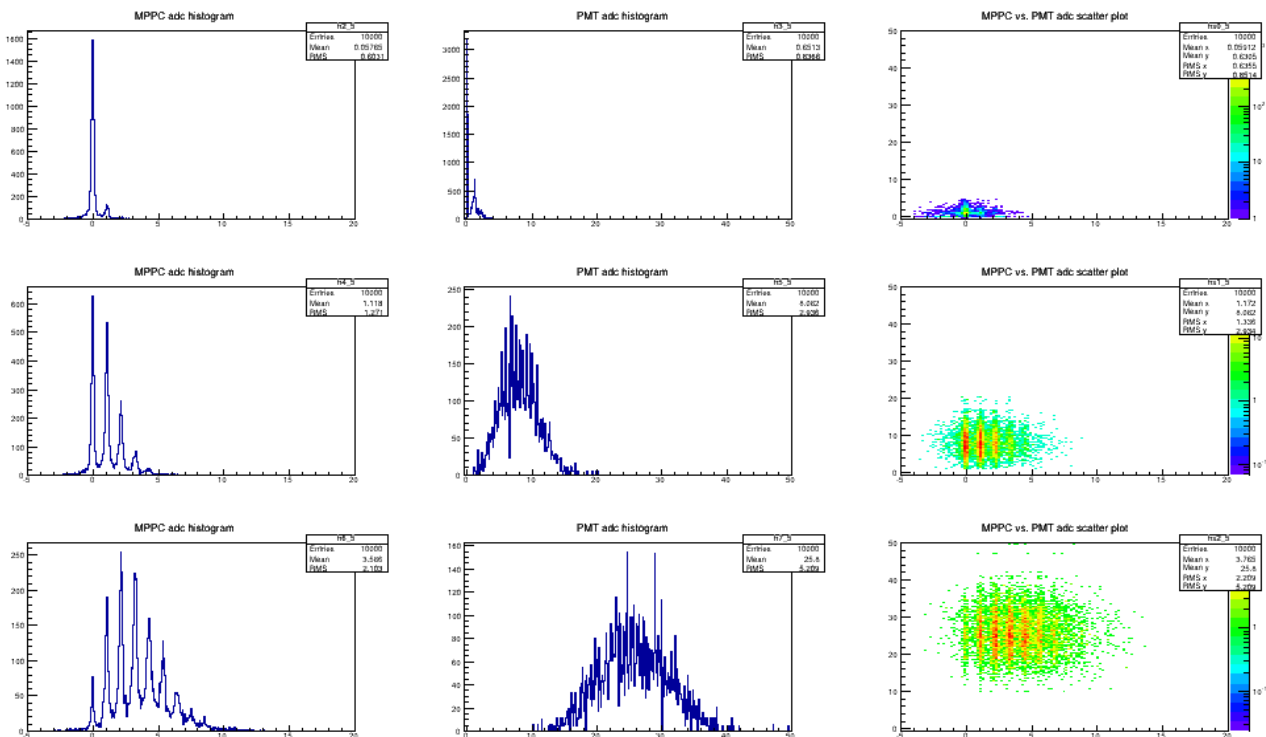


図6. MPPC: S12572-100P と PMT: R9880U-210 の LED(420 nm) + WLSF(Y-11) における平均光電子数の分布

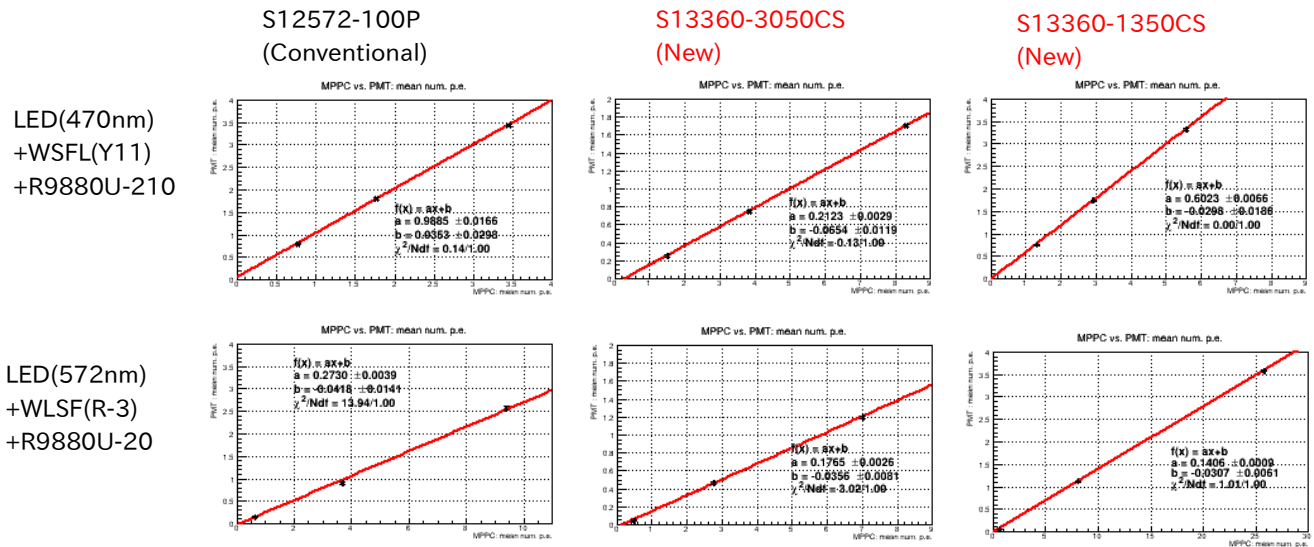


図 7. それぞれの光源および波長変換ファイバーにおける MPPC と PMT の光電子数の比較測定結果

4. 光電子数と検出効率の関係

PMTとの比較測定の結果からでは新型の係数 a が従来より低い値の結果が得られた。これでは「検出効率が悪化」したのかもしくは、「クロストークが抑えられた」のか判断できない。

そこで 0.5p.e.しきい値における検出効率と平均光電子数の関係をそれぞれ従来型と新型で比較した。その結果を図 8 に示す。統計学的で PMT の光電面における平均光電子数と検出効率の関係はポアソン分布：

$$P(k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

でよく説明される。赤破線はポアソン分布の k=0 近似の関数で、新型 MPPC の分布に近い。従来型はこの曲線から下回って緑太線に分布しているこ

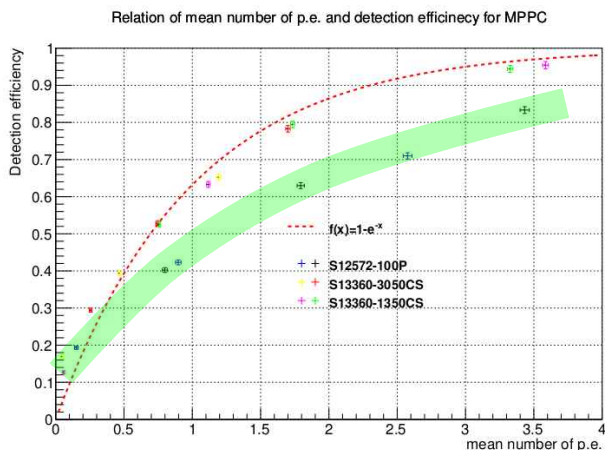


図 8. MPPC の検出効率と平均光電子数の関係

とから、一度検出されたがクロストークの影響で多く光電子数を見積もっていることを示している。

したがって、新型は従来型よりクロストークが抑えられていることがわかった。そして新型 MPPC は検出効率と光電子数のポアソン分布の関係性が成立していると言ってよく、性能が向上していると結論づけられる。

5. 検出効率比較

波長変換ファイバーからの光量を PMT と比較した測定では互いに比例した平均光電子数を確認できた。PMT の光電子数に対する MPPC の検出効率を 2 種類の波長領域そして、新旧 MPPC において比較した (図 9)。ファイバー (Y-11) から放出される光の波長は 470 nm にピークを持ち、(R-3)からは 600 nm にピーク波長を持つ。

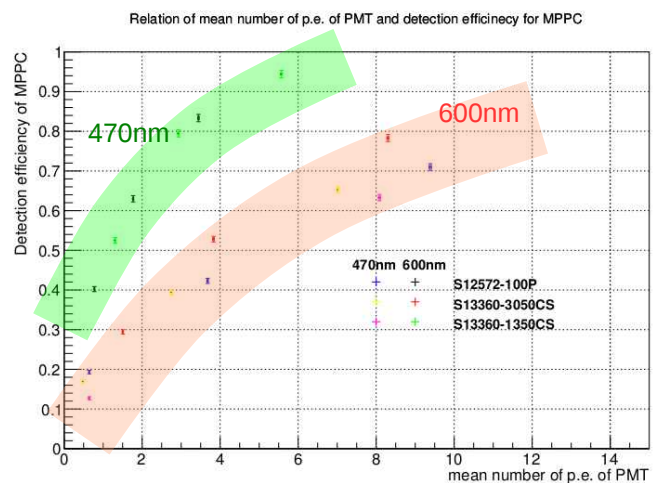


図 9. PMT 平均光電子数に対する MPPC の検出効率の関係。緑領域は Y-11 からの光源、橙領域は R-3 からの光源を示す。

図9の緑領域はY-11からの光源による検出効率の関係、そして橙領域はR-3からの光源によるもので新型および従来型でこれらの曲線から大きく離れていないと評価できる。つまり、検出効率は従来型と変化が見られないことが立証できる。

気になることは新型 S13360-3050CS の Y-11 からの検出効率が低い(黄点)。おそらくファイバー・MPPC 間の接続が緩かった可能性がある。再検査の必要があるだろう。

6. まとめ・今後の展望

従来型と新型 2 種類の MPPC の比較測定を実施した。供給電圧と増幅率は良い線形性を示し、ダークノイズはピクセル数に対して十分抑制されていることが確認された。波長変換ファイバーを用いた検出効率比較測定ではどれも良い線形成が見られた。検出効率と平均光電子数の関係から新型は従来型にクロストークが抑制されていることが確認できた。検出効率は従来型と同様であったと評価できた。以上を踏まえた結果、総合的に新型 MPPC は従来品と比較して性能が向上していると言える。

今後の展望:

1. 自作読出し回路を用いて MPPC の CAMAC ADC/TDC の読出しを可能にする。
2. 新型 MPPC を用いた PET の位置分解能測定
3. S13360-6050CS と-6050PE を読出し可能にする。