

CTA報告224： CTA大口径望遠鏡のための SiPMモジュールの開発(3)

糸川拓海^A

阿部和樹^B、猪目祐介^A、大岡秀行^A、岡知彦^A、奥村暁^{C,D}、折戸玲子^E、
片桐秀明^F、櫛田淳子^B、窪秀利^A、郡司修一^G、小林志鳳^{H,A}、齋藤隆之^A、
櫻井駿介^A、高橋光成^C、田島宏康^C、立石大^I、田中真伸^J、手嶋政廣^{A,L}、
寺内健太^K、寺田幸功^I、門叶冬樹^G、中森健之^G、西嶋恭司^B、野崎誠也^{A,L}、
野田浩司^{H,A}、橋山和明^A、Daniela Hadasch^A、Daniel Mazin^{A,L}、
溝手雅也^M、山本常夏^M、吉田龍生^F、
他CTA-Japan Consortium

^A東大宇宙線研、^B東海大理、^C名大ISEE、^D名大KMI、^E徳島大理工、
^F茨城大理、^G山形大理、^H千葉大理、^I埼玉大理、^JKEK素核研、^K京大理、
^Lマックスプランク物理、^M甲南大理工



■CTA大口徑望遠鏡 (LST) のカメラ

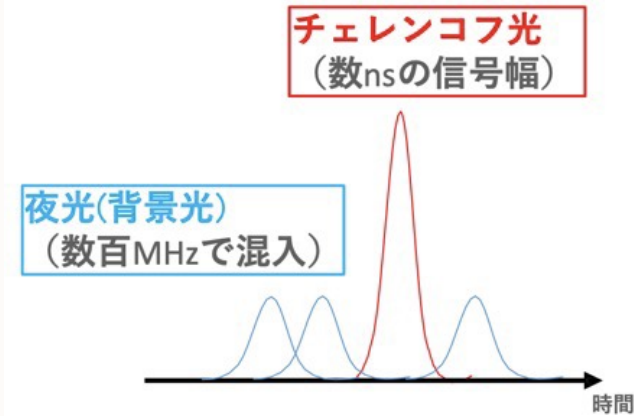
• LSTのカメラの役割

- ✓ 大気シャワーによって生じたチェレンコフ光を捉える
- ✓ 数nsで到来するチェレンコフ光と数百MHzで到来する夜光を弁別する
- ✓ シャワーのイメージからガンマ線のエネルギーと到来方向を推定する

✓ 現行のPMTカメラ

- 1855 PMTs (7 PMTs×265モジュール)
- QE~40%
- FWHM~3 ns
- ゲイン~ 4×10^4
- 動作電圧 = 1,000 ~ 1,400 V
- 電荷分解能~0.47 p.e.

■ チェレンコフ光に背景光が混入した信号のイメージ



↑茨城大：服部勇大氏、天文学会スライドより抜粋



Credit : G. Pérez



Credit : T.Saito

■ SiPMカメラによるLSTの高性能化

● SiPMの利点

- ✓ 高い光検出効率(PDE)~50%
- ✓ 高い電荷分解能
- ✓ 月光下での運用が可能
- ✓ 動作電圧 = 40~80 V

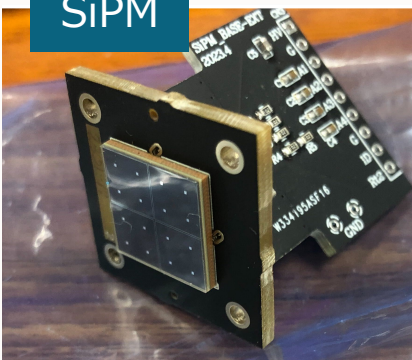
カメラの
高画素化



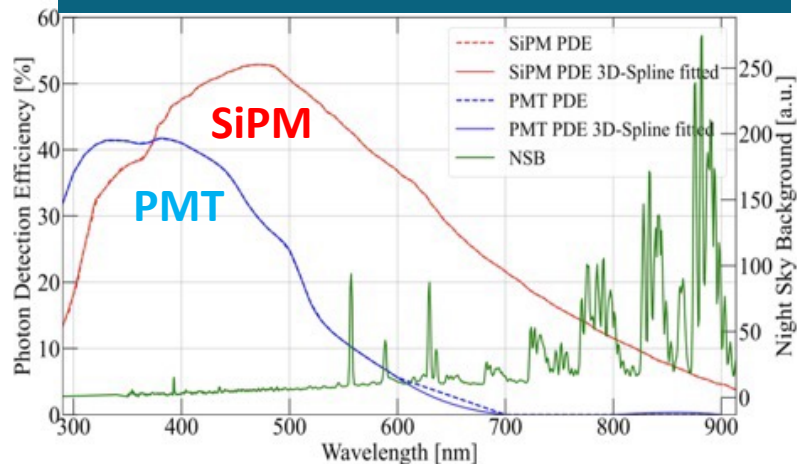
● SiPMカメラ実現時のインパクト

- ✓ 高PDE×高画素化によるガンマ線検出感度向上
- ✓ 観測時間増加による突発天体の検出数増加

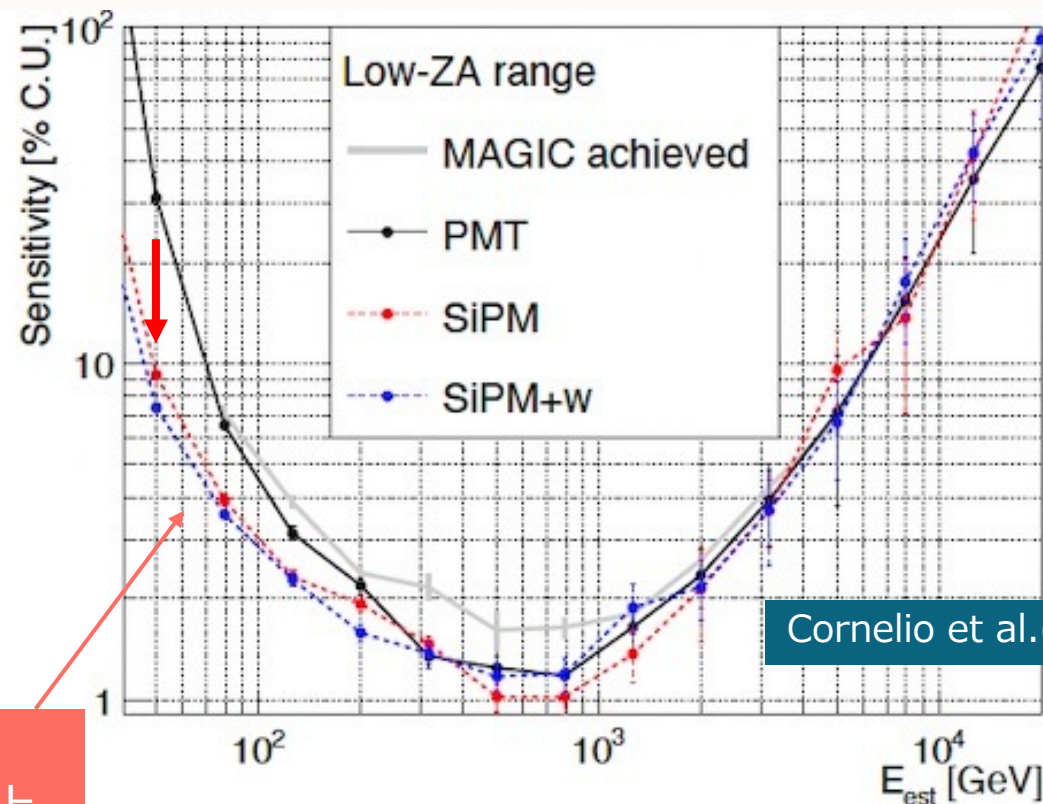
SiPM



波長ごとのSiPMとPMTのPDE比較



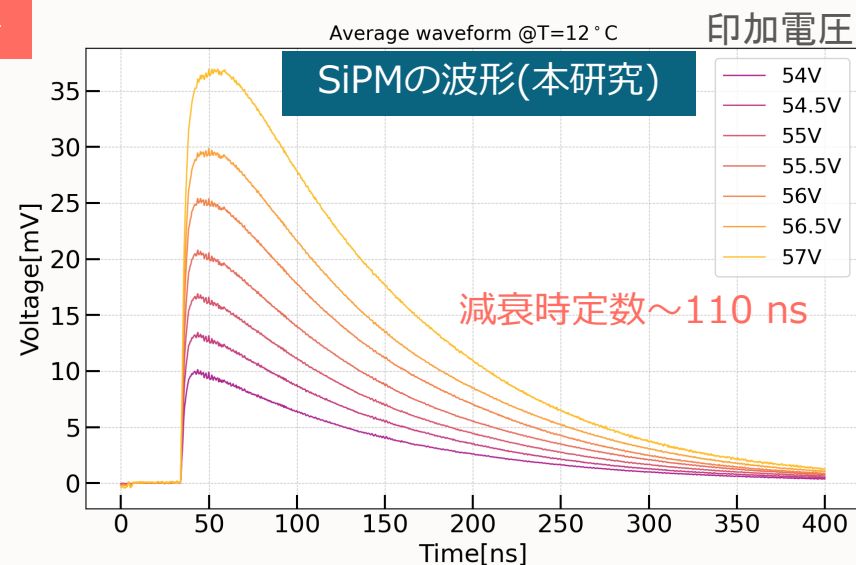
SiPMの導入によって、
低エネルギー側の感度向上



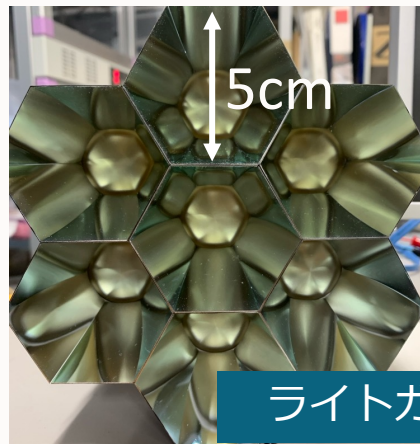
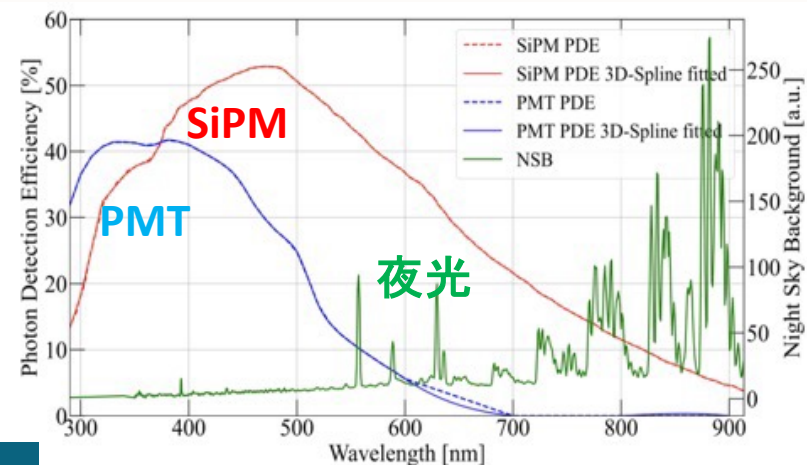
■ SiPMをLSTに採用する際の問題点

本講演の論点

- 有効面積が小さい
 - ✓ LSTのカメラモジュール(50mm四方/pixel)に比べて、1ch(6mm四方)が小さいため、2×2ch分の信号を合成して1chとして扱う
- 信号幅が長く、夜光とチェレンコフ光を弁別できない
 - ✓ 波形整形回路で信号のFWHMを3 ns以下に加工する
- 性能に強い温度依存性がある
 - ✓ 温度補償回路によって印加電圧を操作し、性能の温度依存性を補正する
- オプティカルクロストーク(OCT)により光電子数を誤計測する
 - ✓ SiPM表面の保護樹脂の除去により、OCT確率が低くなる
- 夜光が支配的な赤色光へのPDEが高い
 - ✓ ライトガイドによって赤色光をカットする
 - ✓ コーティングを直接素子正面に塗布して、赤色光をカットする研究もなされている



波長ごとのSiPMとPMTのPDE比較

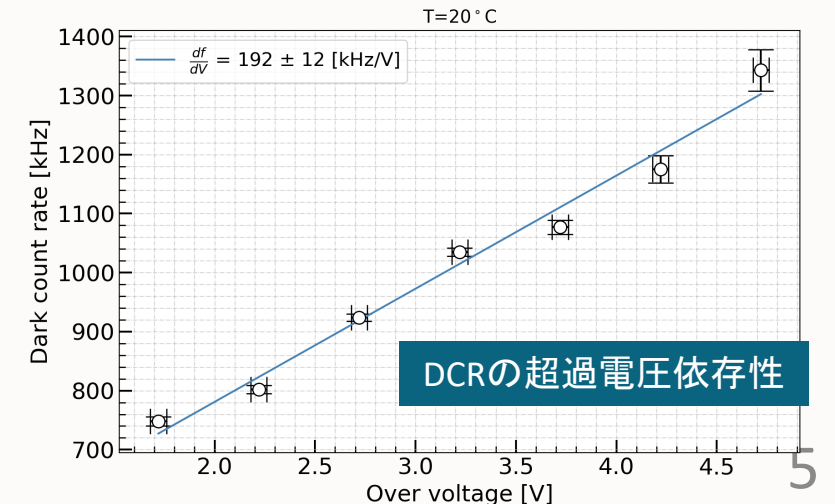
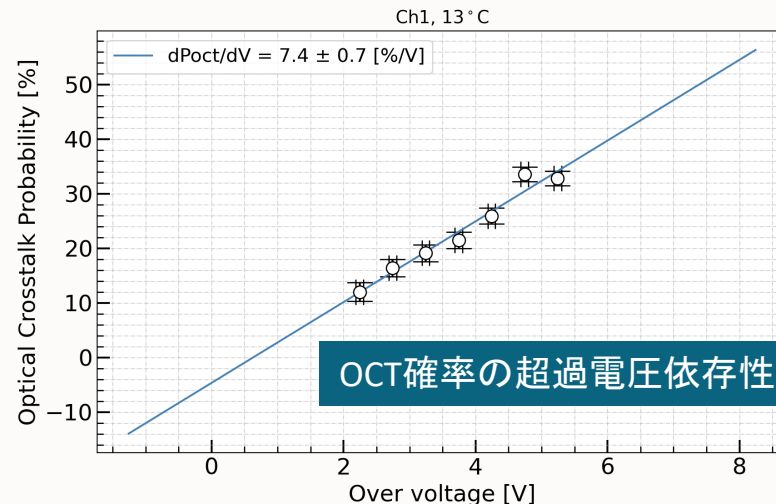
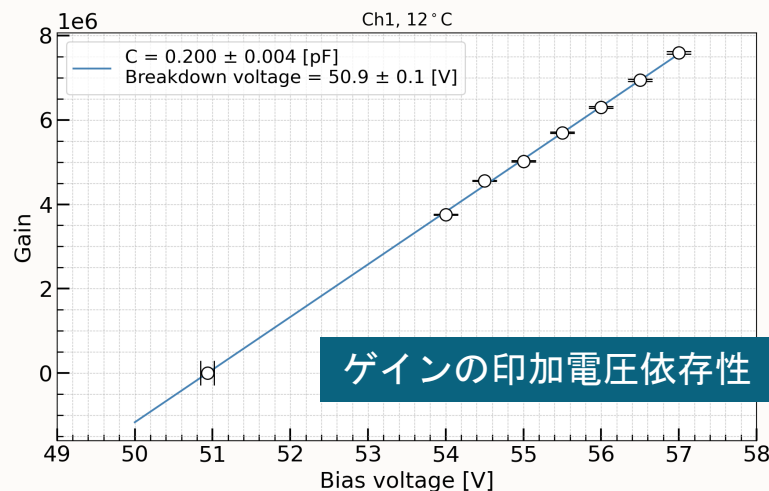
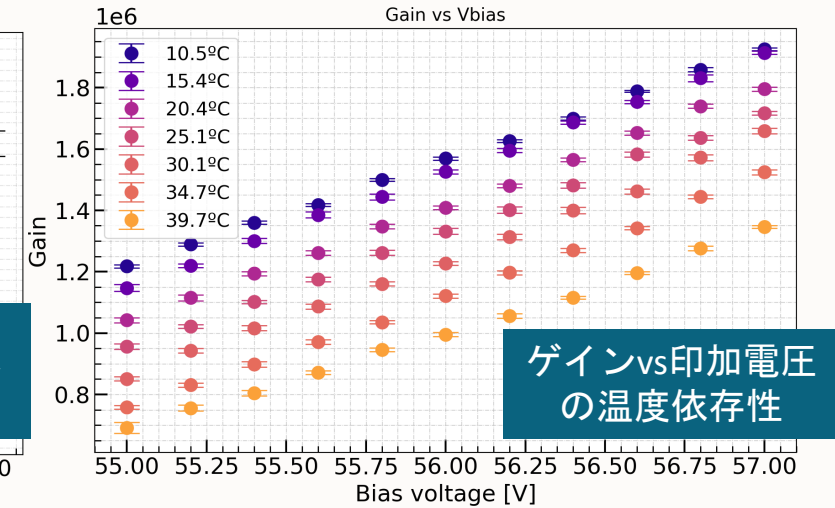
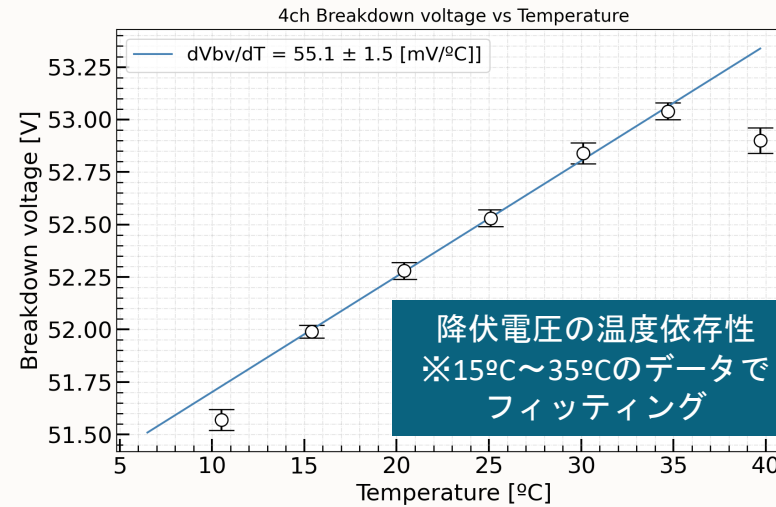


■ SiPM : S13361-2196 (浜松ホトニクス製) の基礎特性測定

セルサイズ : 75 μ m
ピクセル数/ch : 6,336

測定結果

- ✓ 波形 : 時定数 \sim 110 ns (次のスライド)
- ✓ ゲイン $\sim 4 \times 10^6$ @ $V_{ov} \sim 3$ V, 11 $^{\circ}$ C
- ✓ Dark count rate(DCR) $\sim 8 \times 10^5$ Hz @ $V_{ov} \sim 3$ V, 22 $^{\circ}$ C
- ✓ OCT確率 $\sim 20\%$ @ $V_{ov} \sim 3$ V, 13 $^{\circ}$ C (保護樹脂有り)
- ✓ 降伏電圧 ~ 52.2 V @ 20 $^{\circ}$ C

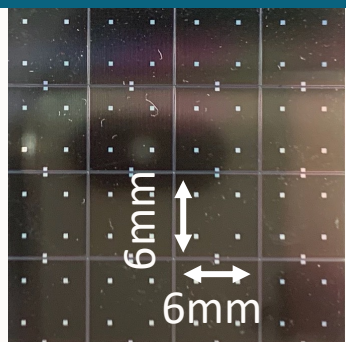


■ 先行研究の素子との違い

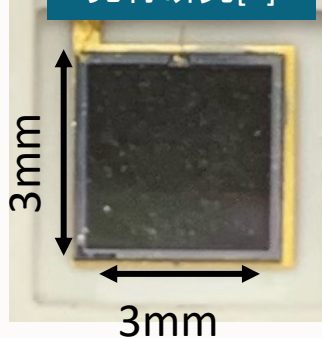
• SiPMアレイの構成

✓ 先行研究[1]: 4×4 → 本研究: 2×2

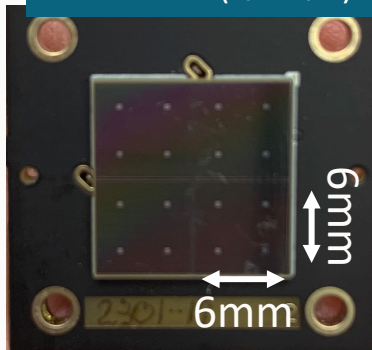
4×4アレイ(先行研究[1])



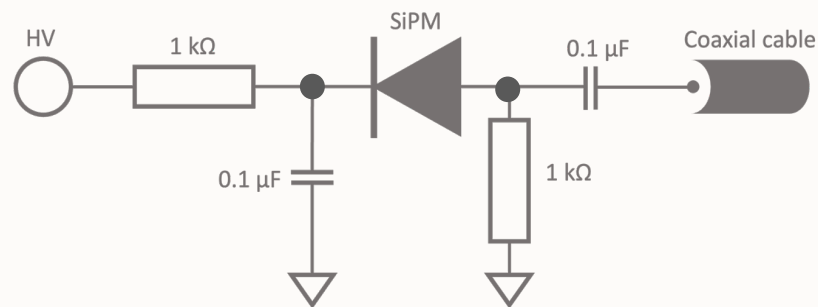
先行研究[2]



2×2アレイ(本研究)

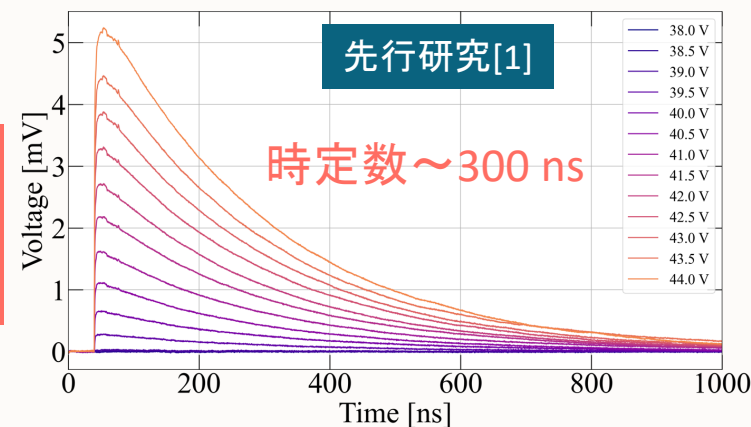
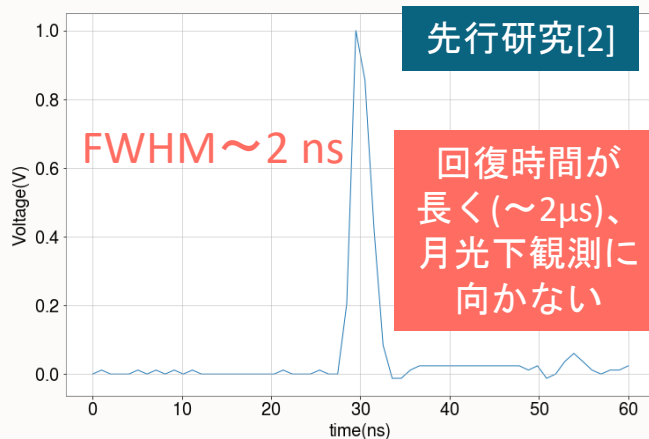
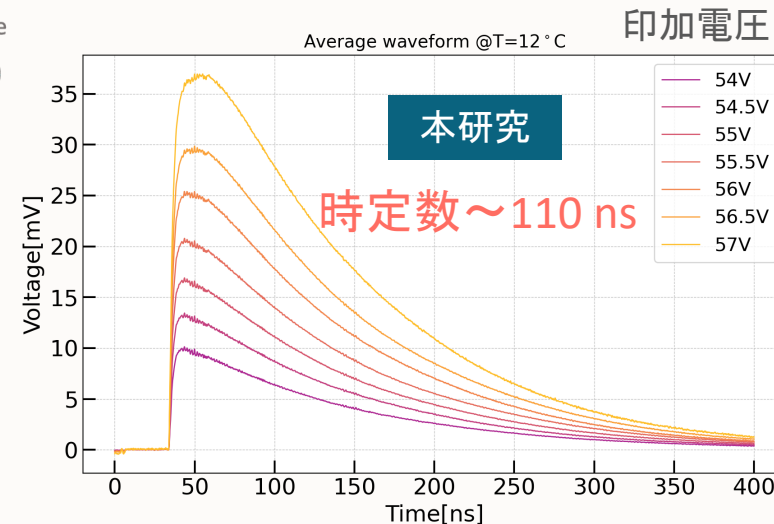


• 波形の違い



読み出し回路(本研究)

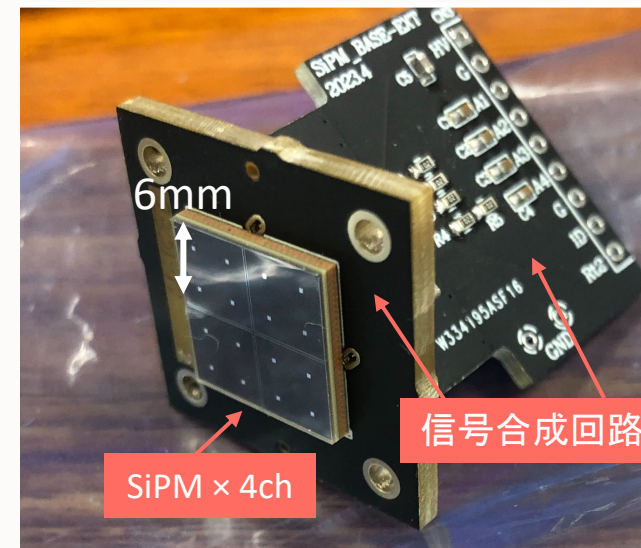
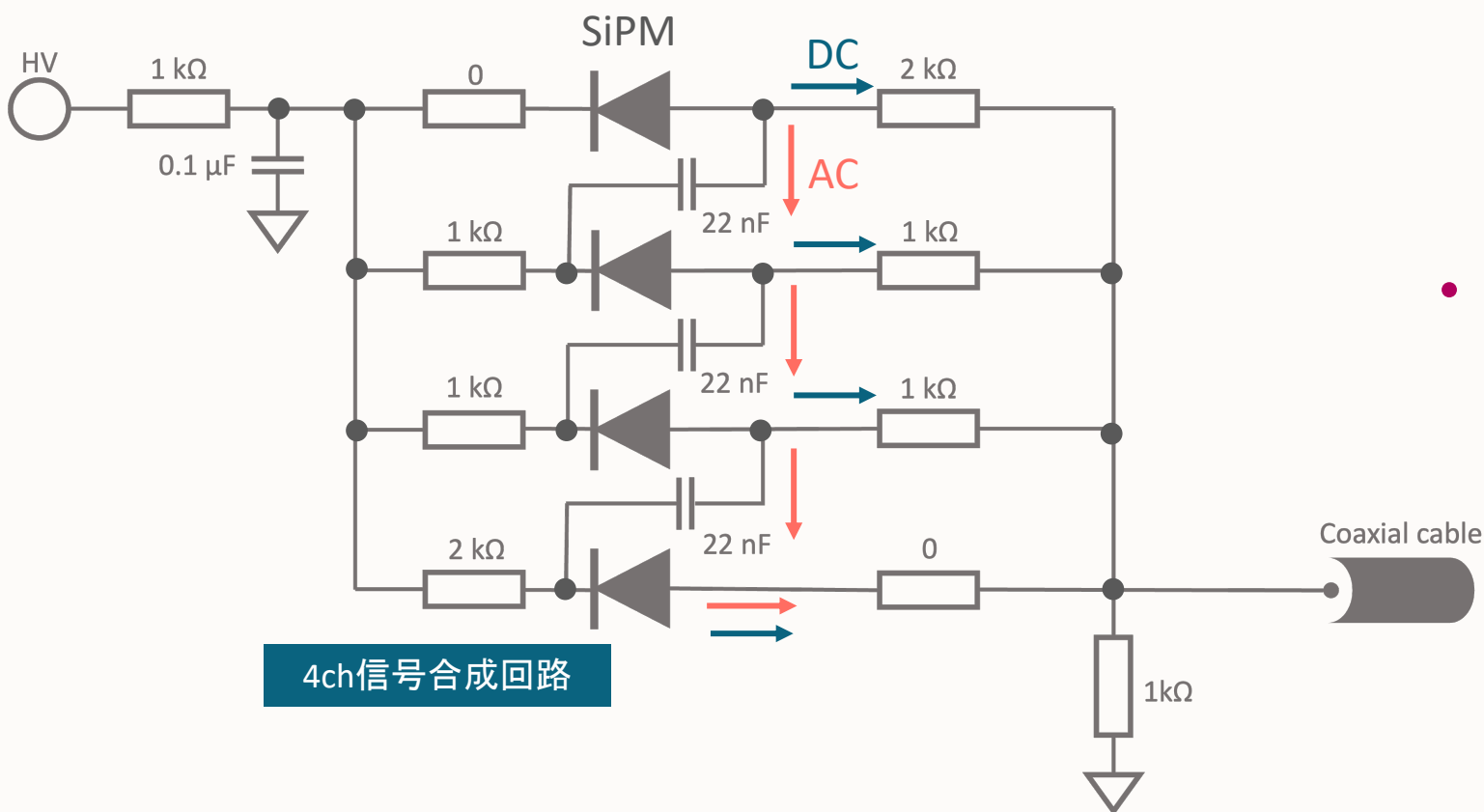
共通光源 : FWHM ~ 80ps
Inome et al. (2019)



■ 4ch信号合成回路

- 有効面積が小さい

- ✓ LSTに採用する際、4chを合成して1ピクセルにする



- MEG実験を参考にした信号合成

- ✓ 直流成分にとっては並列接続なので
キャパシタンスが4倍

- ✓ 交流成分にとっては直列接続なので
キャパシタンスが1/4倍

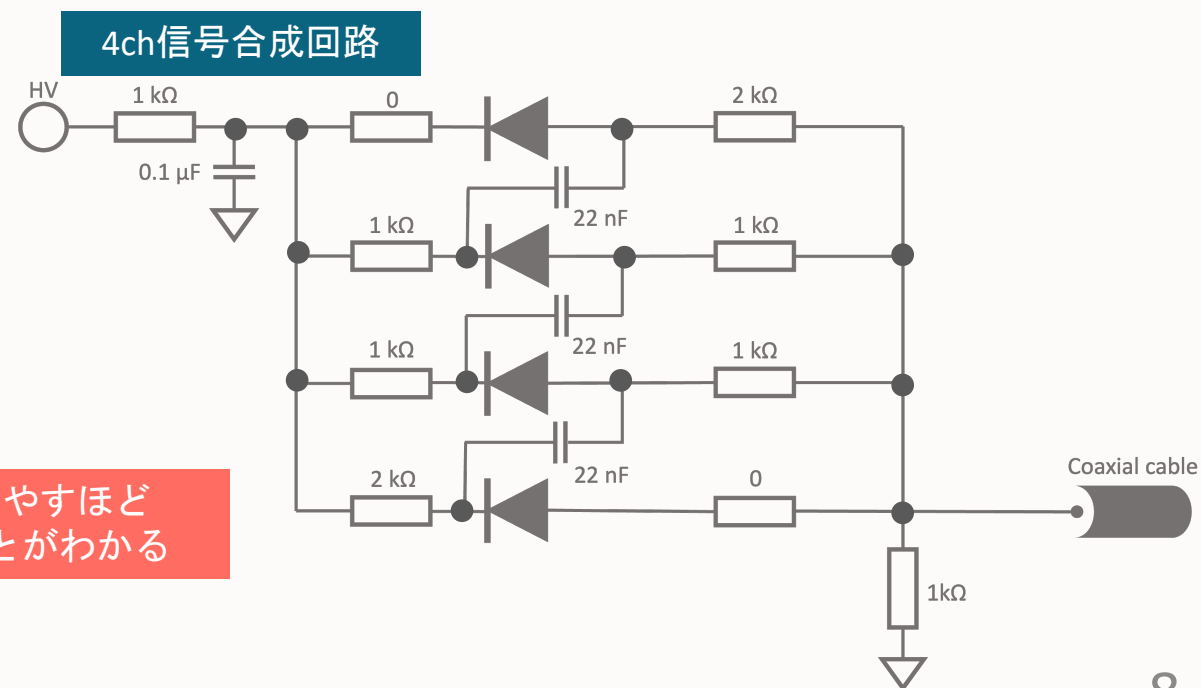
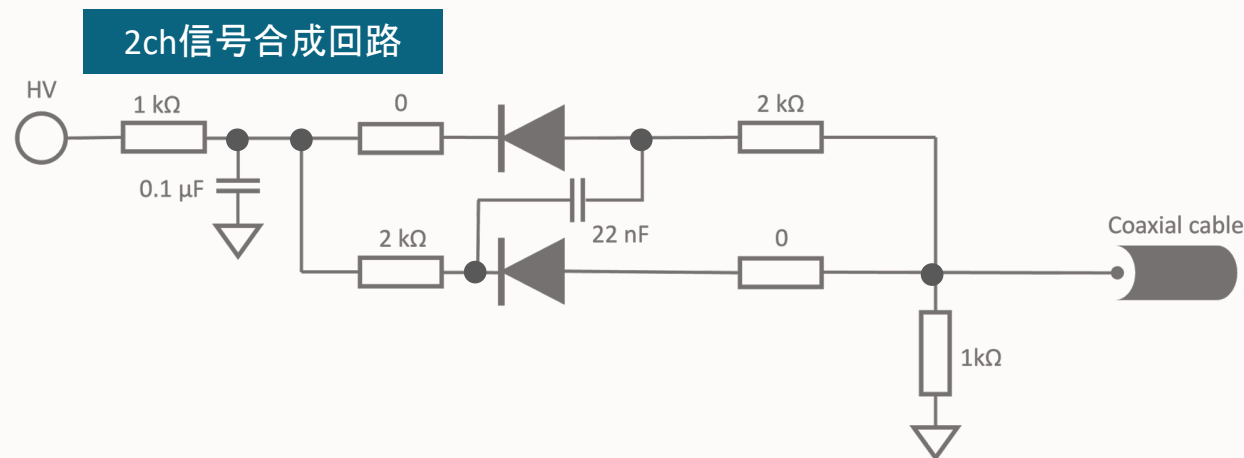
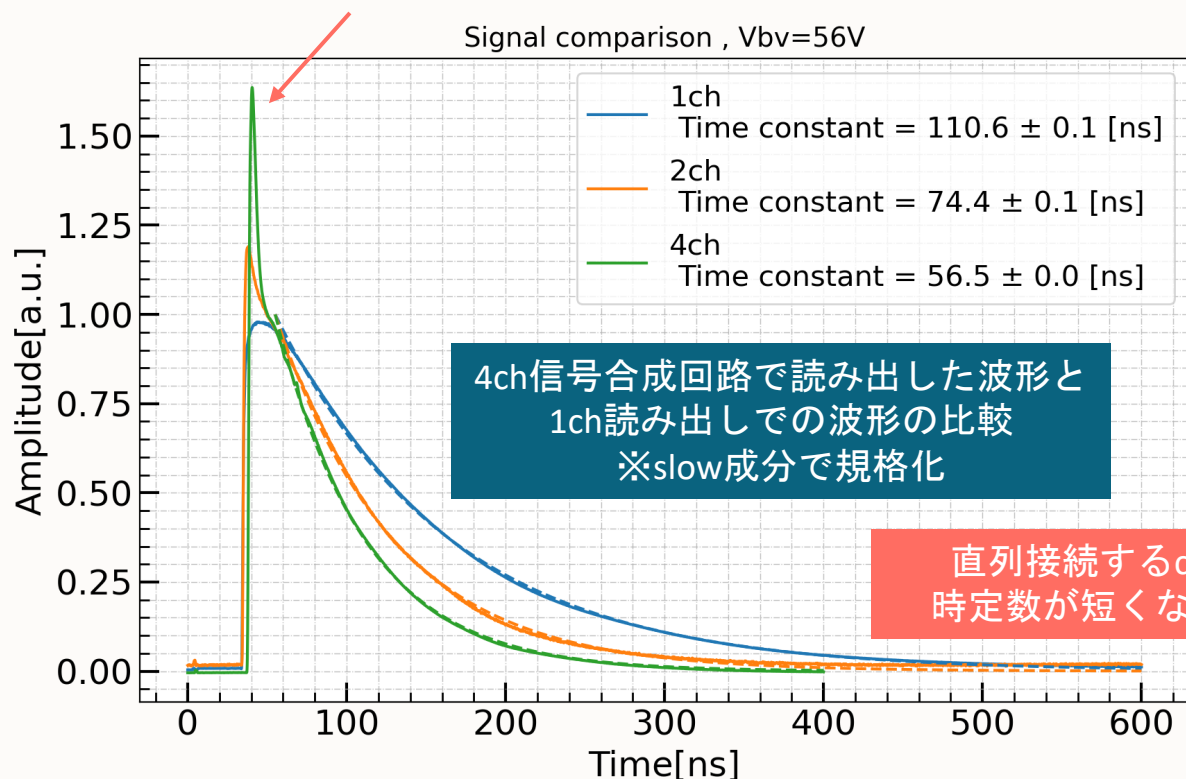
→ 信号の時定数が短縮される

4ch信号合成回路による信号幅短縮

- 信号合成回路でSiPM信号を読み出すと信号幅が短くなる

✓ SiPMが直列に接続されていることに起因

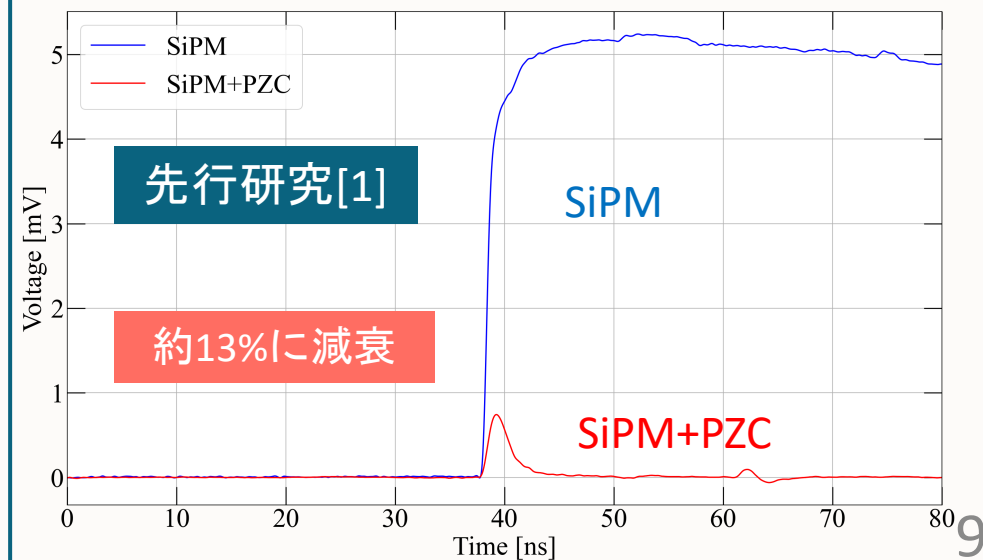
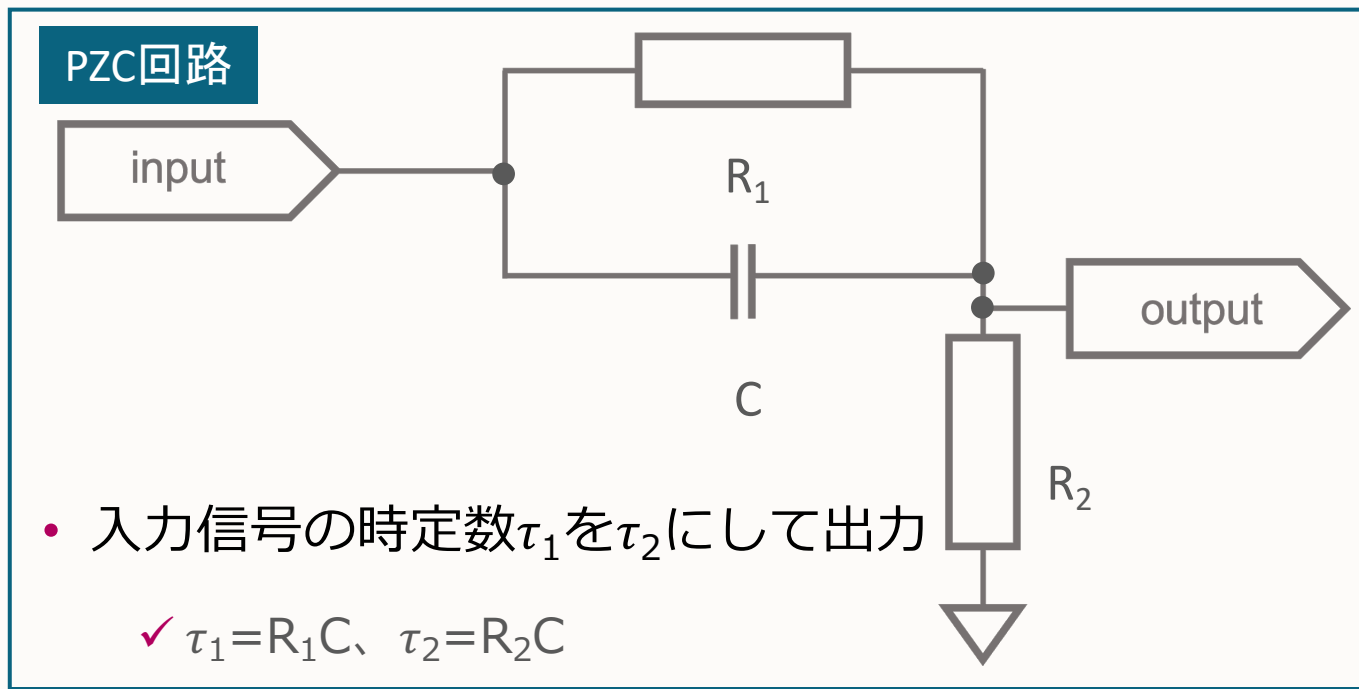
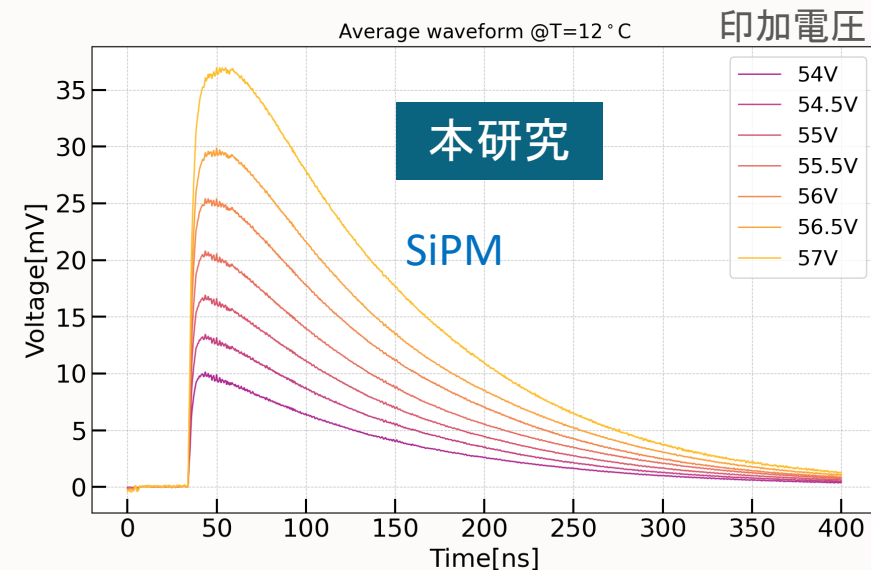
- 信号の時定数が短くなる
- fast成分が見えるようになる



■ Pole Zero Cancellation 回路：先行研究

- SiPMの波形はLSTに採用するには長すぎるため、FWHM~3 nsまで波形整形する必要がある

- ✓ 先行研究[1]では、PZC回路によってFWHM<3 nsを達成したものの、振幅が約13%に減衰
→本研究：低減衰も達成したい



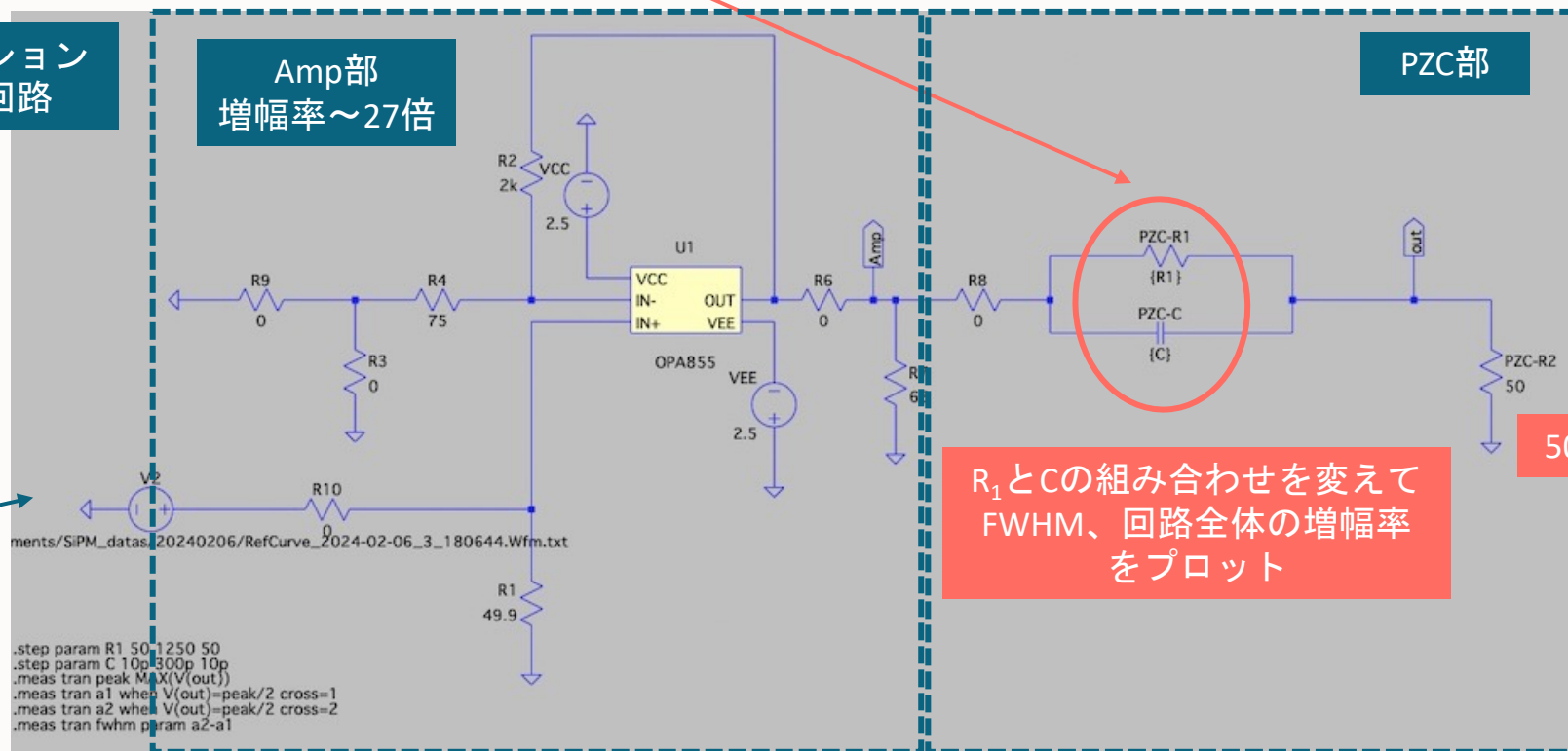
■PZC回路のパラメータ探索：セットアップ

- FWHM~3ns、**低減衰**を達成するために、回路シミュレーション(LTspice)でベストな回路パラメータを探索
 - ✓ 先行研究：実験ベースでのパラメータ決定→FWHM~2 nsを達成
本研究：シミュレーションベースでパラメータの組み合わせを検討
 - ✓ R_2 はLSTの読み出し回路の入カインピーダンス50Ωに固定
 $R_1 \cdot C$ の組み合わせをシミュレーションで検討

シミュレーション
を行った回路

Amp部
増幅率~27倍

PZC部



SiPM4ch合成信号を入力

R_1 とCの組み合わせを変えて
FWHM、回路全体の増幅率
をプロット

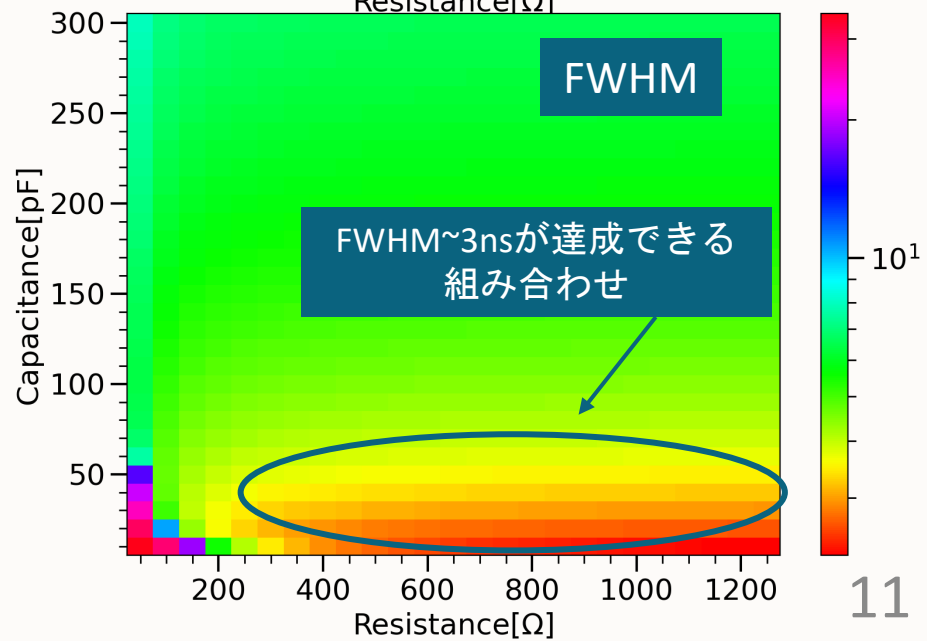
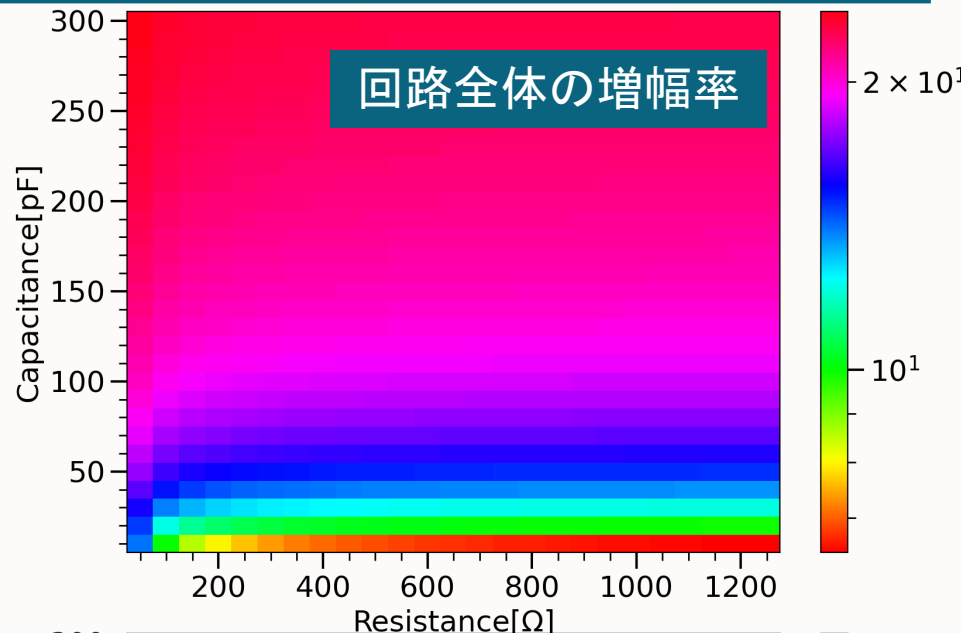
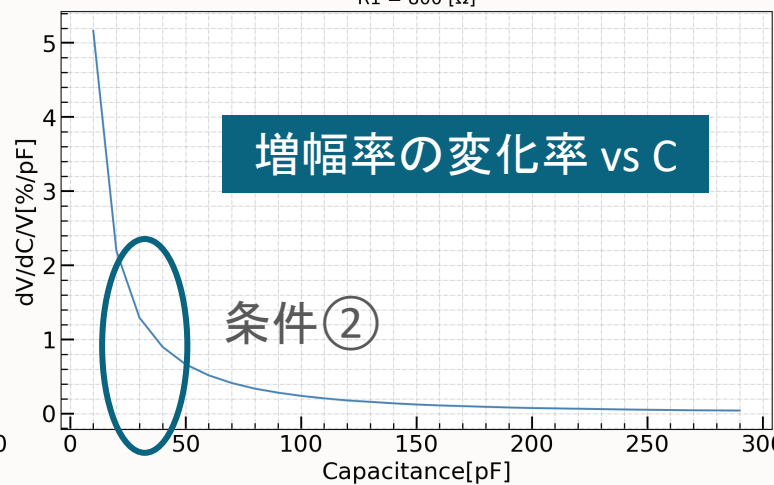
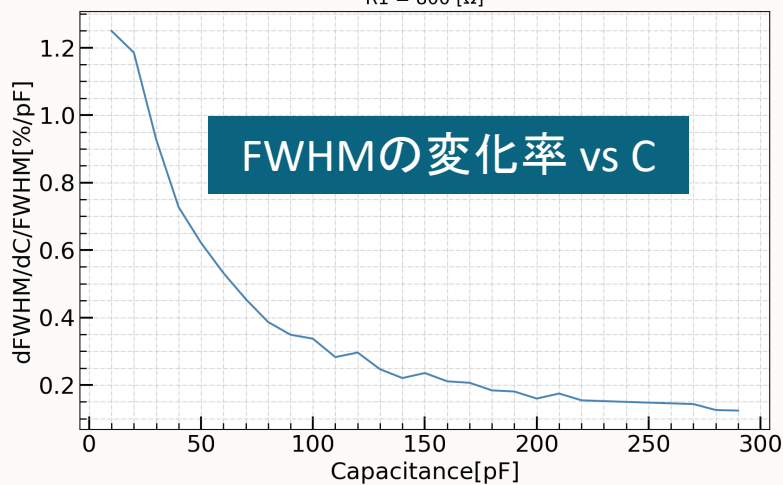
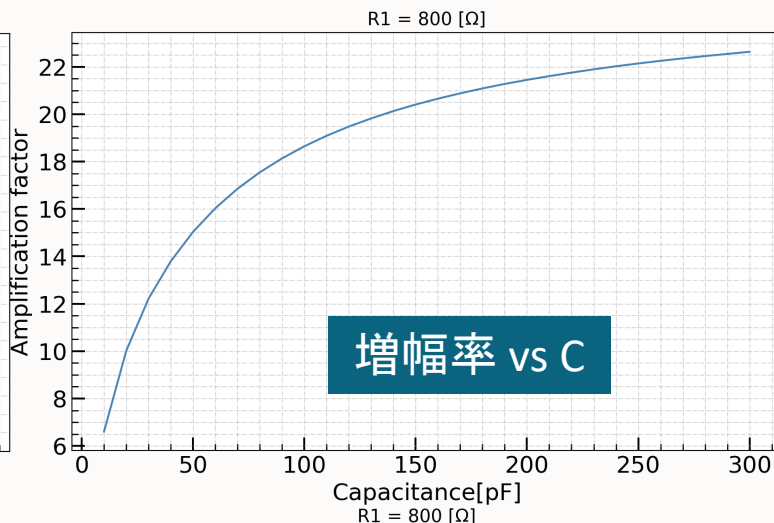
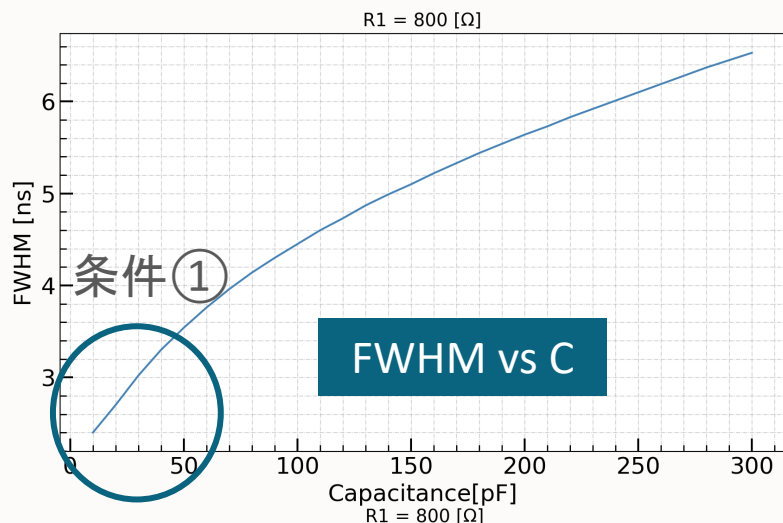
50Ωに固定

■ シミュレーション結果

- FWHM、増幅率はCに強く依存→Cに着目

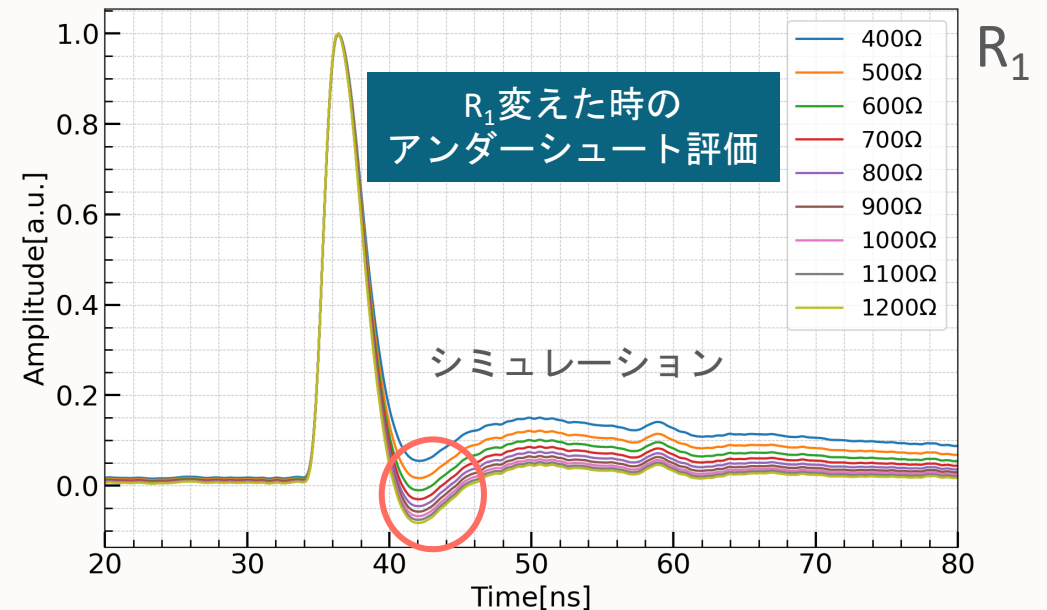
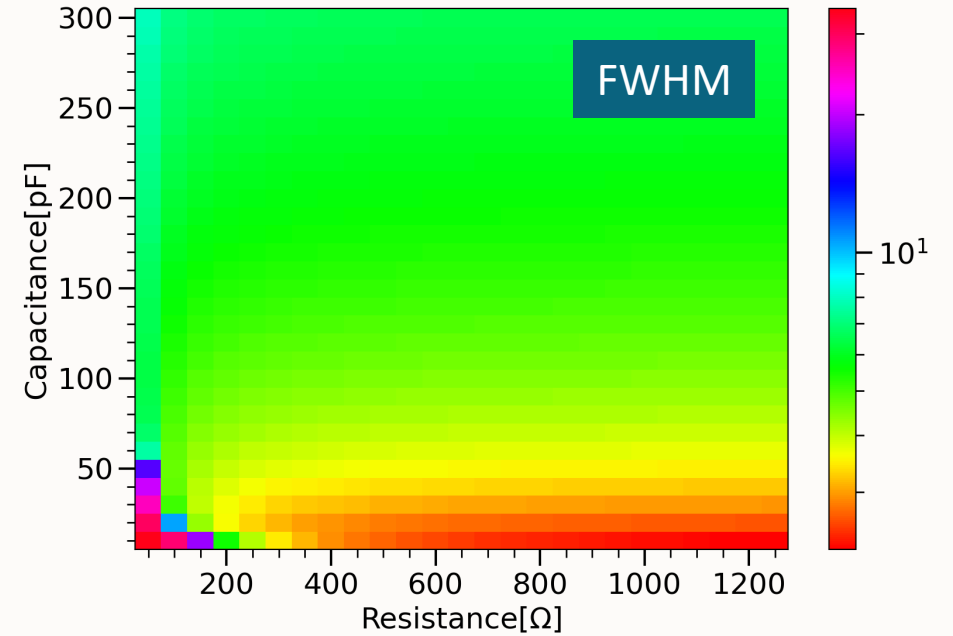
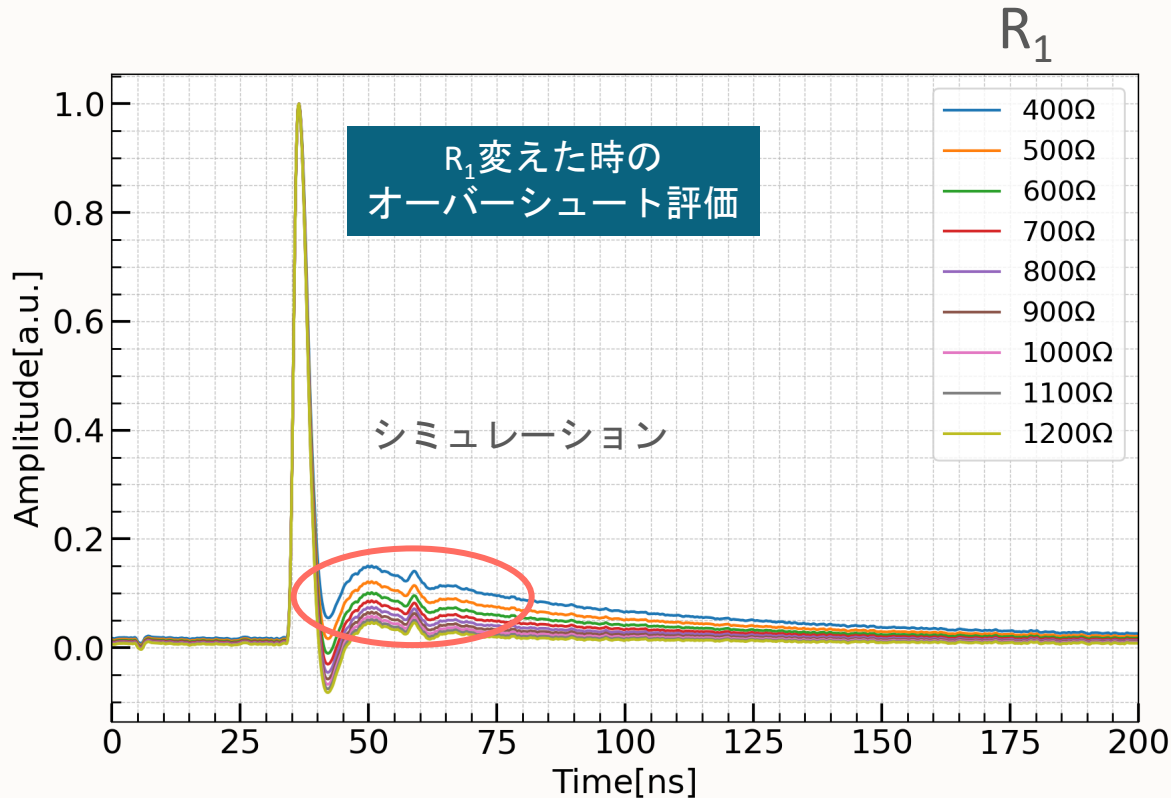
条件① : FWHM < 3 ns, 条件② : 増幅率の変化率 ~ 1%

→ C = 30 pF



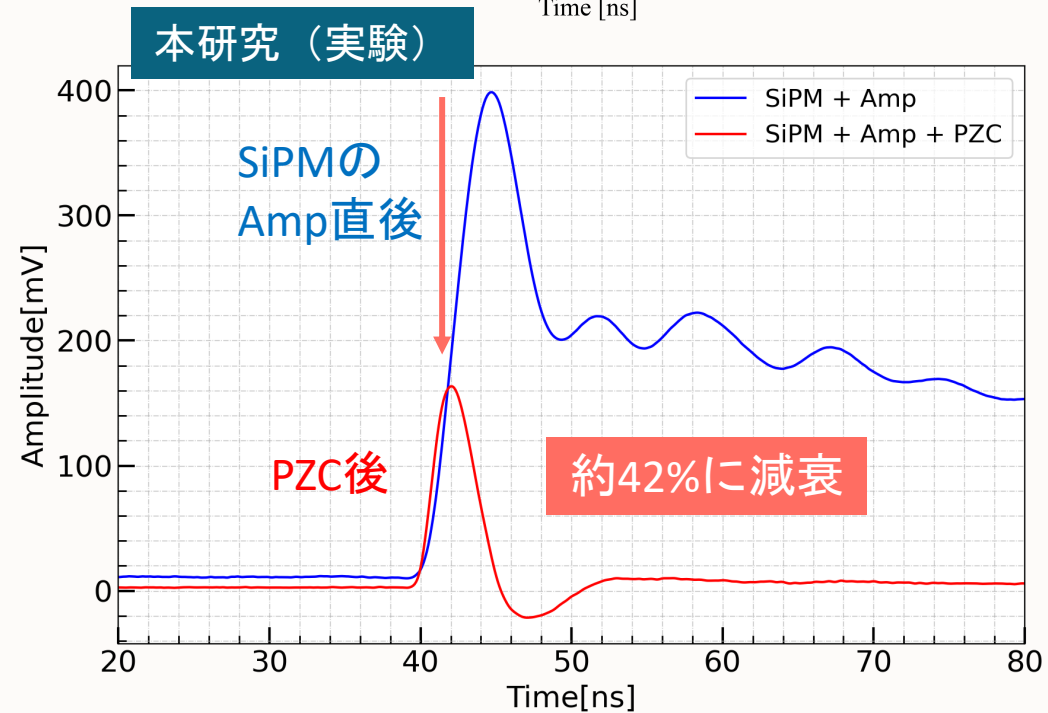
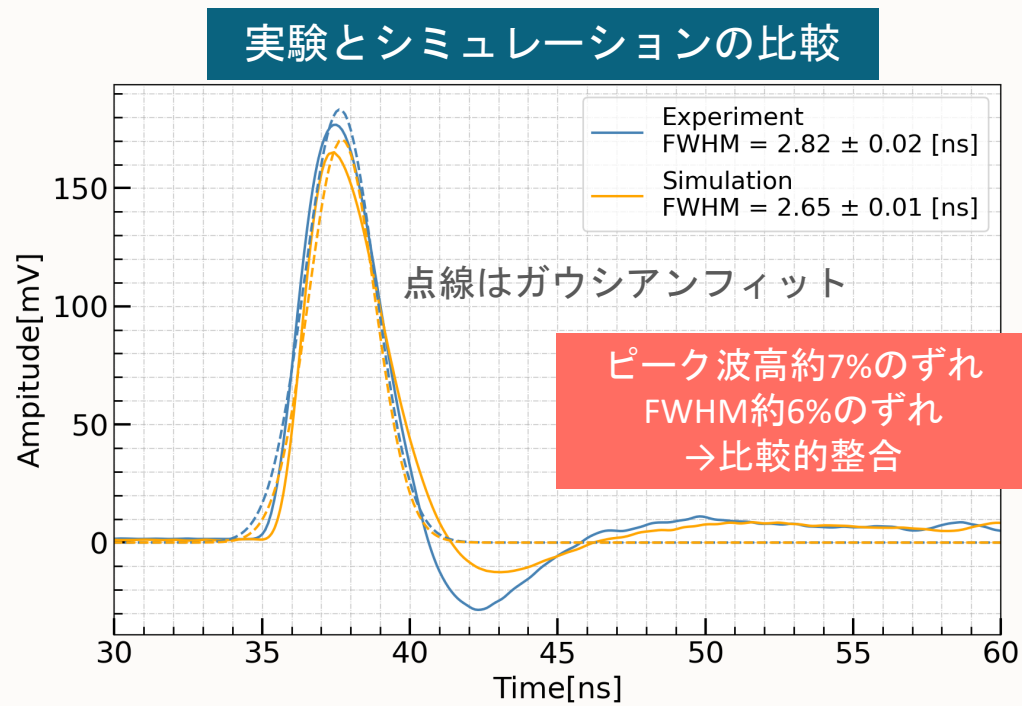
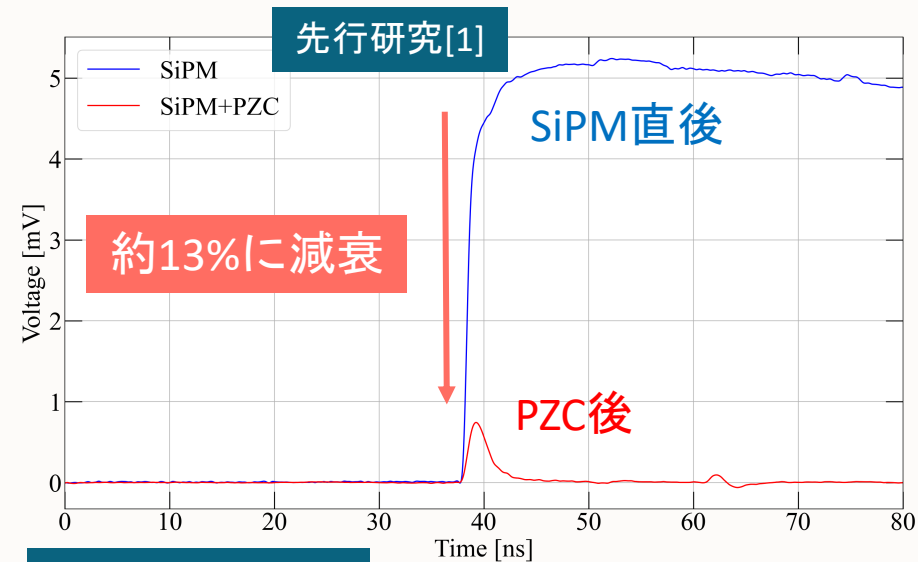
■ アンダーシュート・オーバーシュート評価

- オーバーシュート立ち下がり～50ns
アンダーシュート立ち上がり～4ns
- ✓ オーバーシュートを小さくする R_1 が好ましい
→ $R_1=1.1k\Omega$ に決定



■ PZC回路の動作確認

- シミュレーションと実験結果の比較で動作検証
 - ✓ FWHM : 実験値 2.82 ns, シミュレーション 2.65 ns
- 先行研究[1]との減衰率の比較
 - ✓ PZC回路での減衰率~約42%
 - 先行研究[1]に比べて振幅の減衰を約3.2倍改善



Summary

結果

- ✓ SiPMを直列に繋いだ4ch信号合成回路によって、fast成分が顕著になり、
slow成分の減衰時定数が約1/2に短縮
- ✓ シミュレーションベースのPZC回路開発によって、SiPM信号に最適な回路パラメータを効率的に検証
 - FWHM~2.8 nsを実現・信号の減衰を約3.2倍改善

今後の展望

- ✓ 温度補償回路の試作回路は製作済みで、
実測したゲイン温度係数に合わせて調整する
- ✓ LST初号機への試験搭載

