

ALICE実験 FoCal検出器用Siセンサーと LEDを用いたSiセンサー評価装置の開発

2025.3/3 卒業研究発表会

奈良女子大学高エネルギー物理学研究室4年

岩月小雪

目次

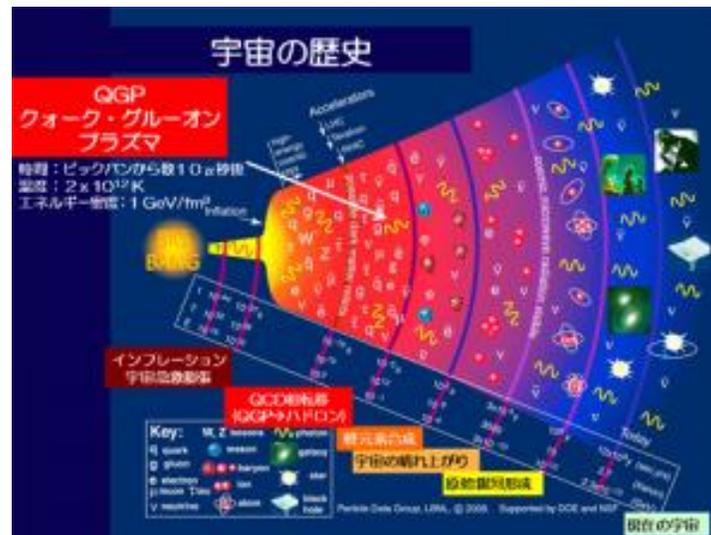
1. はじめに
2. 研究方法
3. 研究結果
4. まとめ

1.はじめに

QGPについて

Quark-Gluon Plasma (QGP)

- ビッグバンから数 $10\mu\text{s}$ 後に存在
- パarton(クォークやグルーオン)のまとまりが解けた状態を指す
- 実験より、衝突から生成までの時間が短いという問題がある(早期熱化問題)



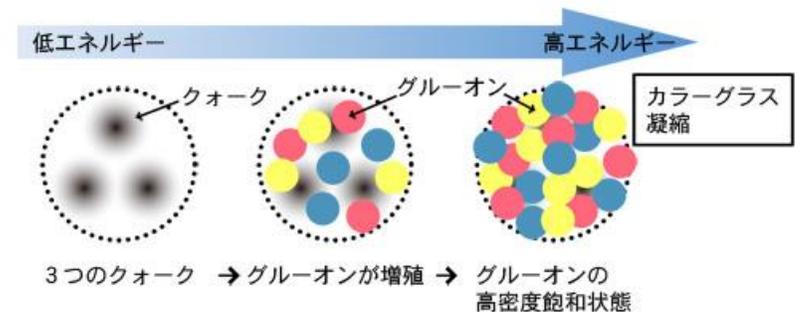
CGCについて

Color Glass Condensate (カラーグラス凝縮、CGC)

- 加速から得た高いエネルギーによりグルーオンが増殖してなる高密度飽和状態
- 粒子同士の衝突前にあらかじめ存在すると仮説
- CGCが存在すれば、早期熱化問題の解決に繋がるとされる
- 衝突時の強い衝撃で放出される直接光子からCGCの存在を実験的に調べられる

直接光子

- 直接光子はグルーオンの数に相関がある
- 衝突時に発生したもので、運動量が平均的に高い
- 崩壊の過程を挟まないため、直接光子は光子1つで検出



CERN_LHC_ALICE実験について

European Organization for Nuclear Research (CERN)

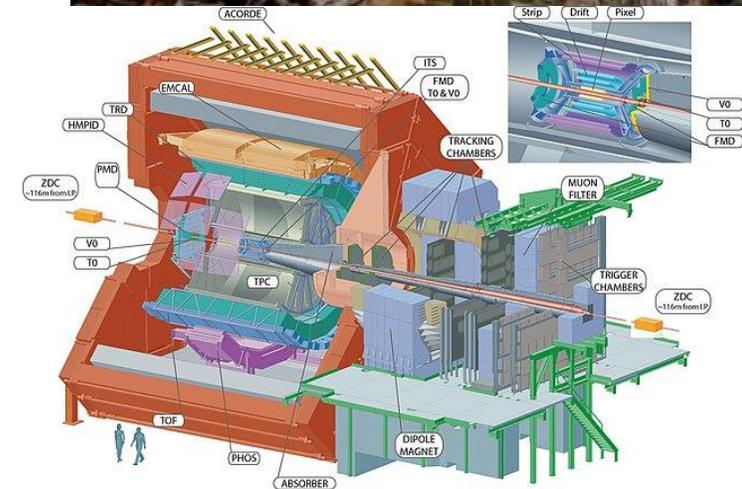
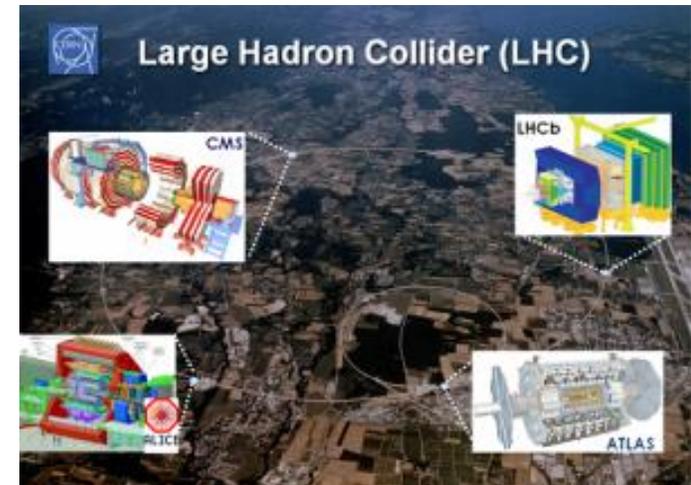
- 欧州原子核研究機構
- スイスとフランスの国境に位置

Large Hadron Collider (LHC)

- 全周27kmの世界最大のハドロン衝突型加速器
- 衝突核種は陽子+陽子、鉛+鉛、陽子+鉛
- 衝突エネルギーは最大5.36TeV(鉛+鉛)

A Large Ion Collider Experiment (ALICE実験)

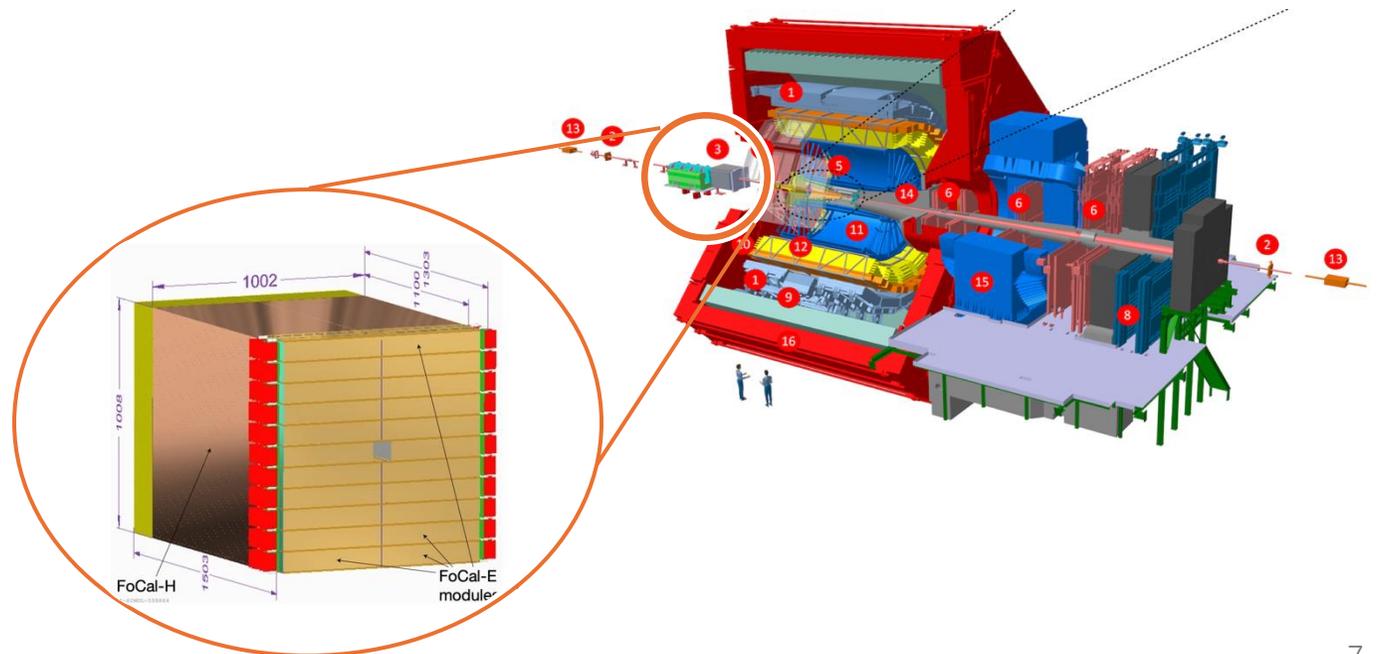
- CERNのLHCを利用した実験一つ
- 高エネルギー重イオン衝突に特化し、QGPの解明を目指す



FoCal検出器について

Forward Calorimeter (FoCal)

- ALICE実験のアップグレードのため、2030年に導入予定
- ビーム軸の前方に設置
- 電子や光子を測定するFoCal-Eと、ハドロンを測定するFoCal-Hの2つで構成



FoCal-E検出器について

FoCal-E

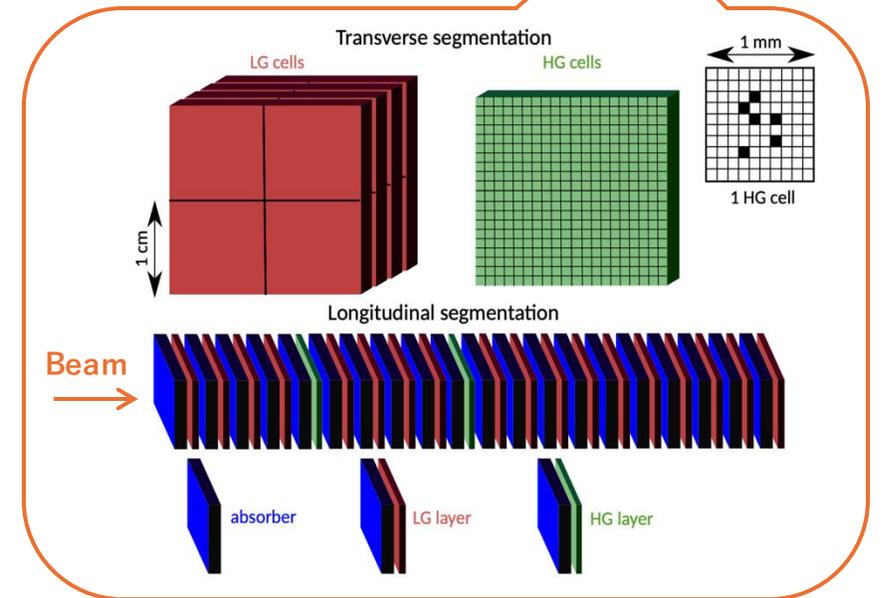
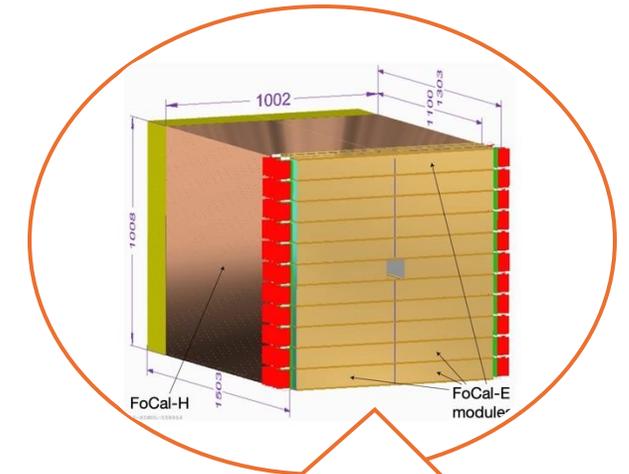
- 直接光子の検出を目的とした電磁カロリメータ
- 検出層と吸収層から構成

検出層

- Si (シリコン)を使用
- 通過する粒子の位置とエネルギーを検出

吸収層

- W (タングステン)を使用
- 電磁シャワーを起こし、粒子のエネルギーを落とす
- 放射長3.5mmに合わせ、厚さは3.5mm



研究目的

LED光を用いて検出層に使われるSiセンサーの
性能を評価する装置を開発する

2.研究方法

2-1. 増幅器の作成

2-2. LED光を使ったSiセンサーのテスト

2-1.増幅器の作成

用いる回路の構成

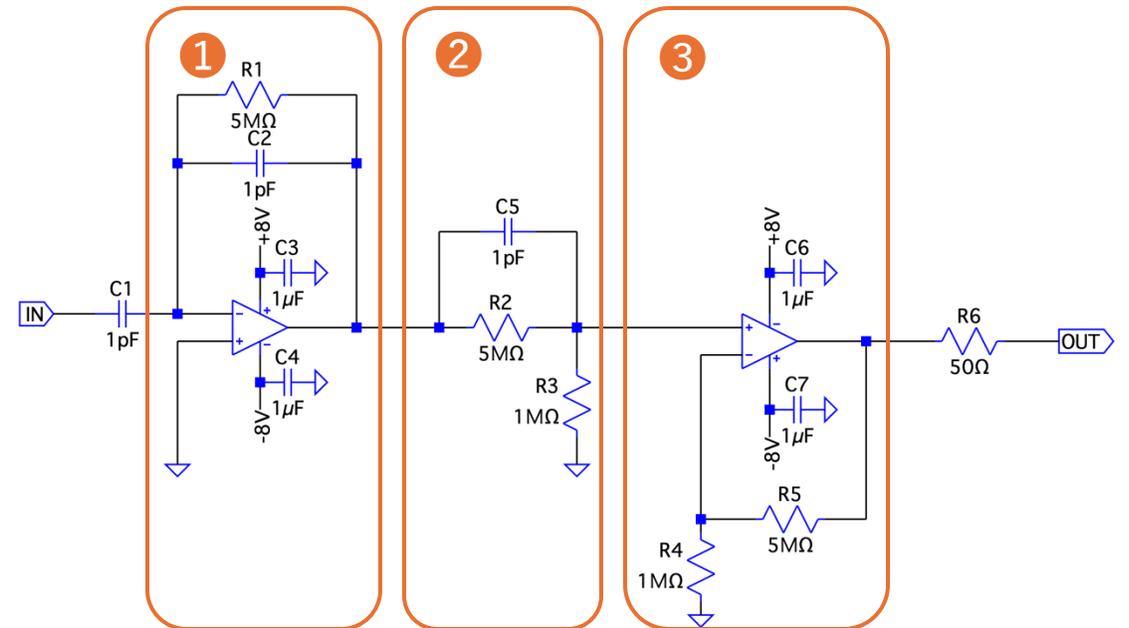
- ①電荷敏感増幅回路(CSA)
- ②Pole-Zeroキャンセル回路(PZC)
- ③非反転増幅回路

…増幅回路

…周波数特性を変える回路

…フォロワー回路

※①②③の回路を合わせて増幅器と呼ぶことにする



①電荷敏感増幅回路(CSA)

導入目的

- Siセンサーで発生した電荷を、回路内のコンデンサーで蓄積、電圧に変換

回路の特徴

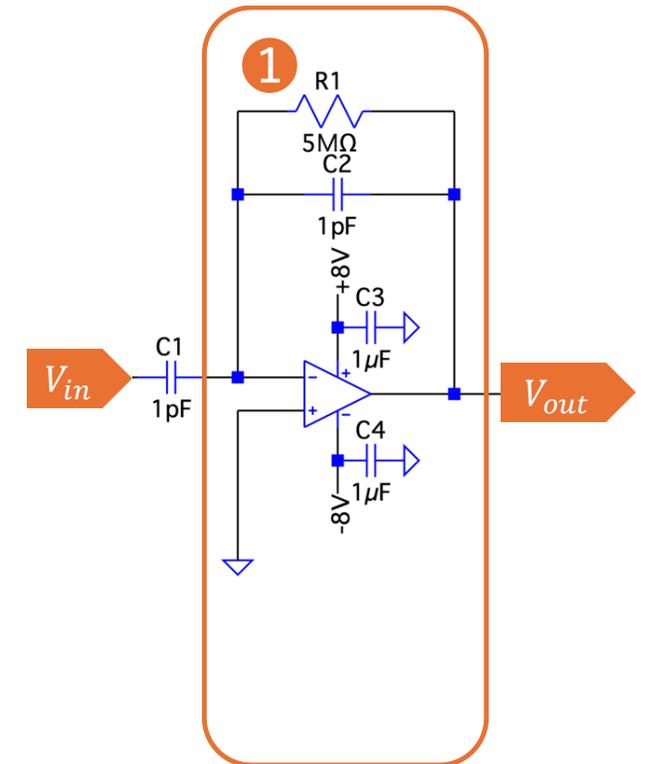
- コンデンサーのみでは、電荷の蓄積に限界を迎えそれ以上の信号を得られないため、電荷の逃げ道として抵抗を並列
- 時定数[s](電圧の大きさが1/e(約0.37倍)になるまでの時間)は抵抗値[Ω]×電気容量[F]

①への入力と出力の関係

$$V_{out} = \frac{C_1 V_{in}}{C_2} \exp\left(-\frac{t}{C_2 R_1}\right)$$

電流を電圧に変換

$$V = \frac{1}{C} \int \frac{dQ}{dt} dt$$



② Pole-Zero キャンセル回路(PZC)

導入目的

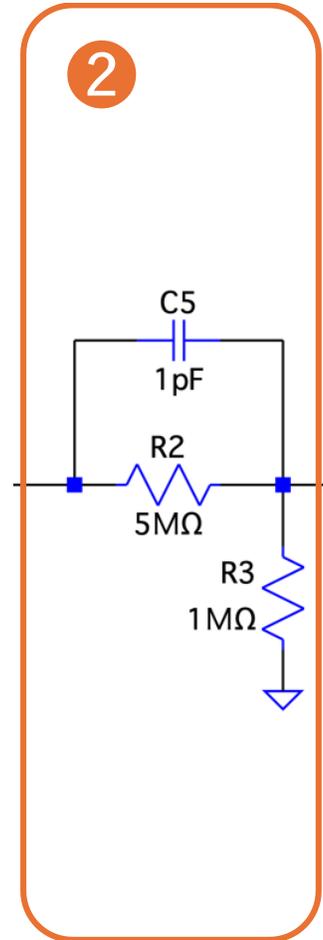
- CSAのポールを打ち消す

回路の特徴

- 入力電圧よりも出力電圧が下がる

②への入力と出力の関係(直流成分)

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times V_{in}$$



③非反転増幅回路

導入目的

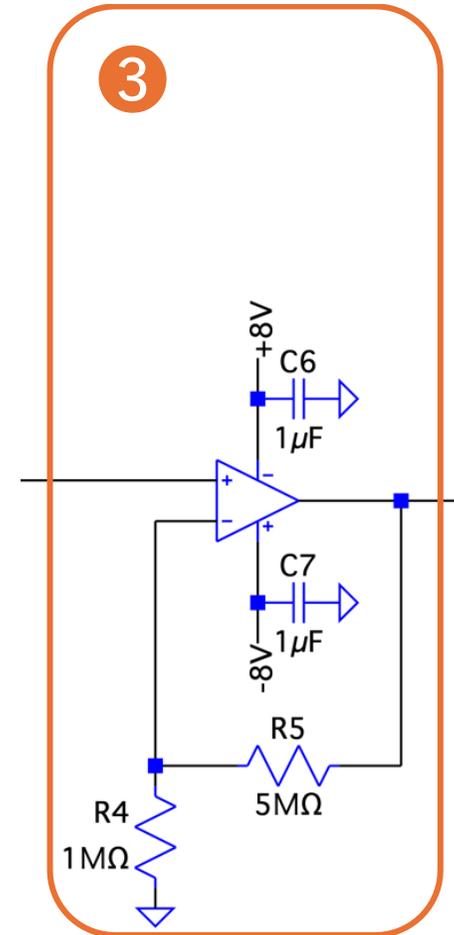
- Pole-Zeroキャンセル回路で下がった直流成分の電圧を元に戻す

回路の特徴

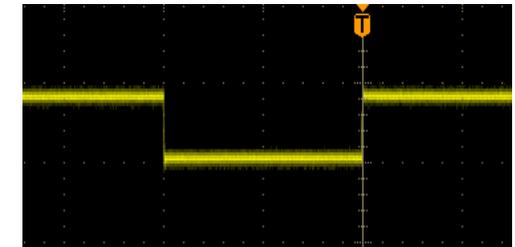
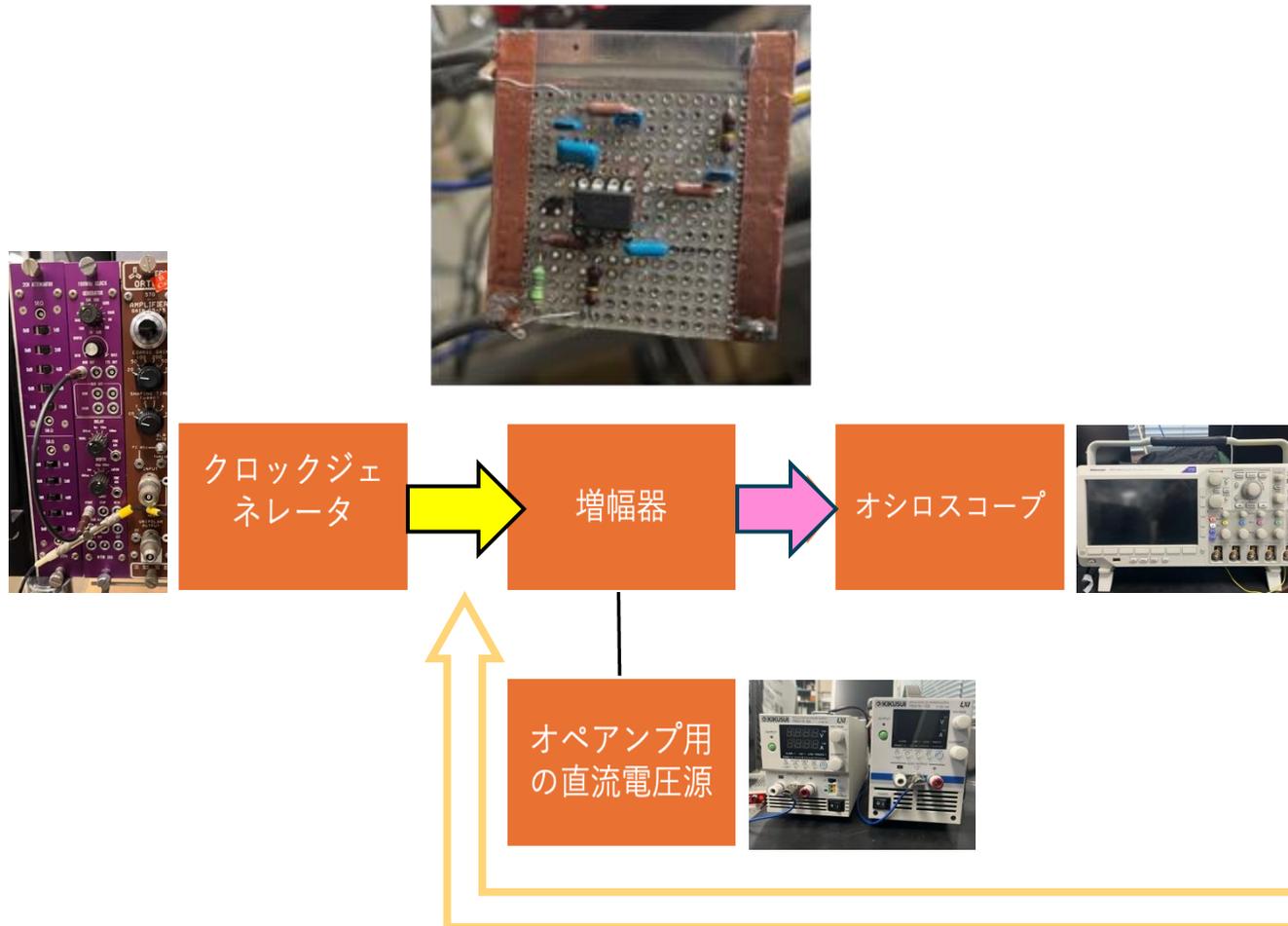
- 入力電圧よりも出力電圧を上げる

③への入力と出力の関係

$$V_{out} = \frac{R_4 + R_5}{R_4} \times V_{in}$$



作成した増幅器の動作確認のための セットアップ



テスト用入力電圧について

- 電圧:8.6mV
- width:20us
- 波形:下に凸の矩形波

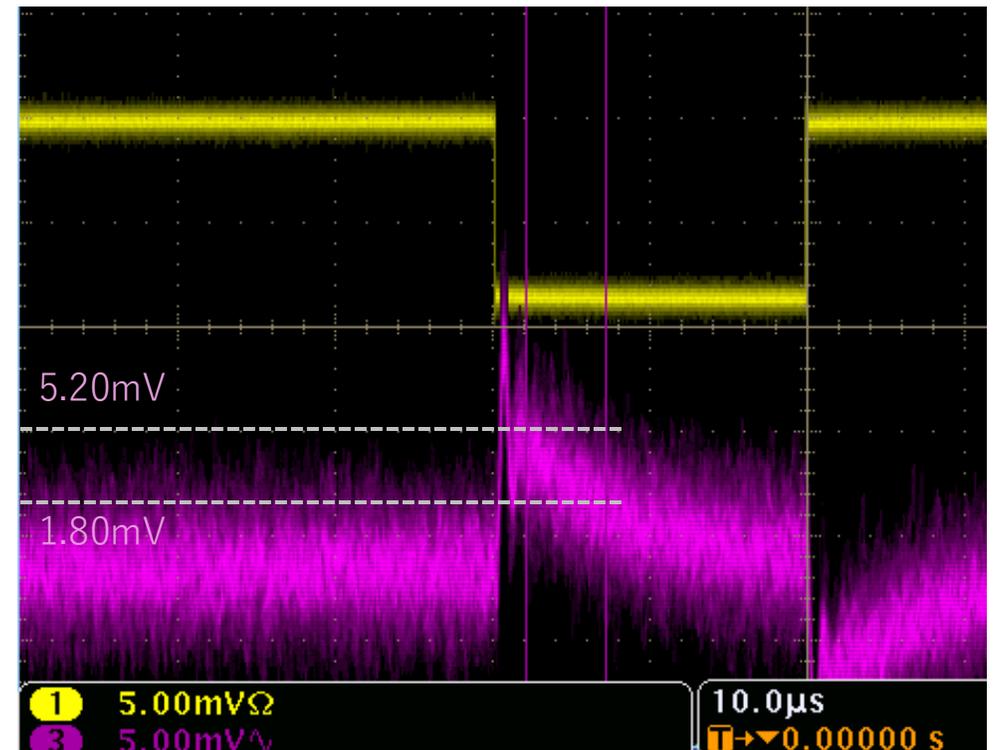
作成した増幅器の動作確認結果

増幅器の評価

- 入力パルスに合わせて出力電圧がコンデンサーの効果より増加・並列した抵抗の効果より減衰しているのを確認
- 作成した増幅器の時定数は $5\mu\text{s}$
- 右図より、 $5\mu\text{s}$ 程経ったとき、減衰後の電圧が減衰前の約0.346倍

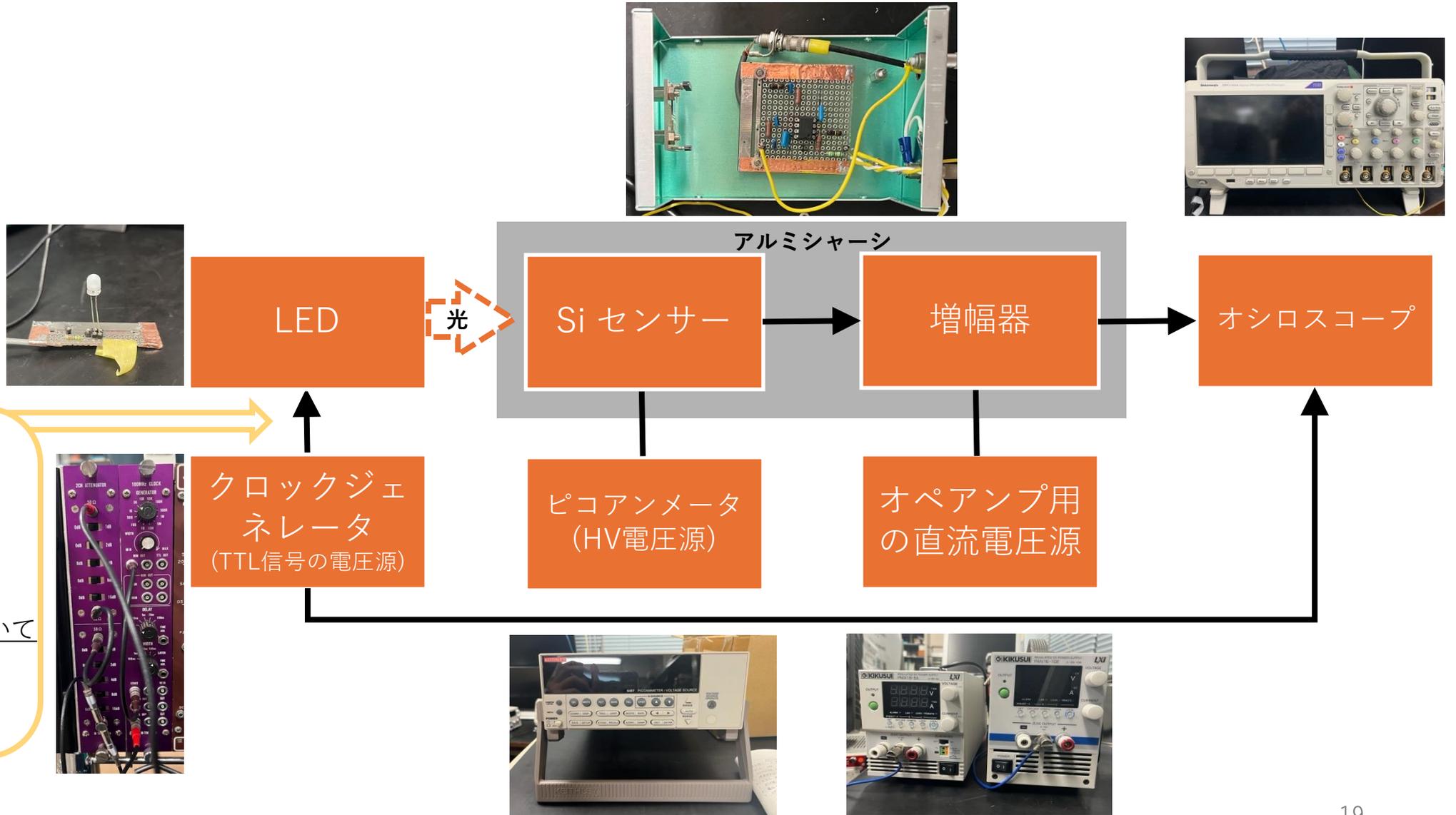
→凡そ期待通りの動作をしている

黄：入力電圧(電圧:8.6mV,width:20us,波形:矩形波)
赤：出力電圧(3つの回路)



2-2. LED光を使った Siセンサーのテスト

Siセンサーのテストのためのセットアップ全体像



使用したSiセンサーについて

センサーの情報

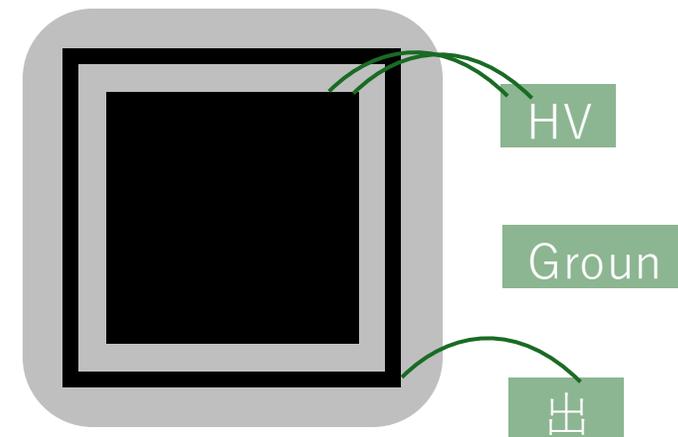
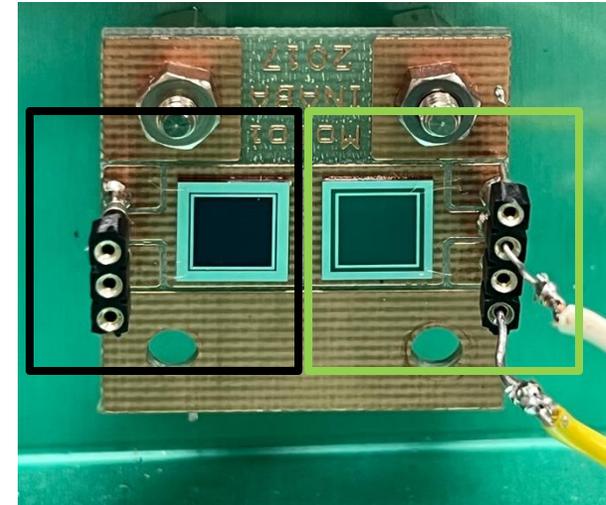
- N型PD (Photo Diode)
- 大きさ：6mm×6mm
- 緑：厚さ320 μ m

逆電圧をかけ、空乏層拡大

ピコアンメーターの設定

- 電圧：50V
- 電流リミット：25 μ A
- 実際に流れた電流：25nA程

右側を使用



Siセンサーのテストの方法

- LED光をSiセンサーに当て、増幅器を経て出力されたものをオシロスコープで見る

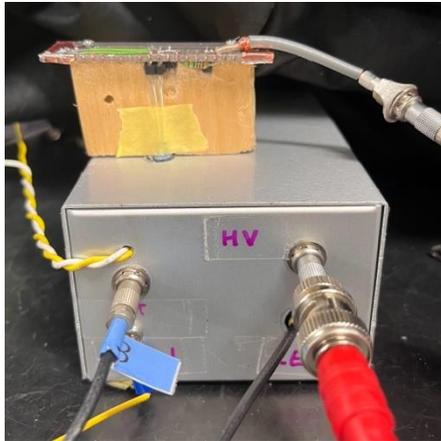
特に、

- LED光有、LED光無を比較しLED光に反応があるかを確認
- LED用TTL信号のwidthを変えて出力の様子を確認
(widthが時定数と比べ小さい場合、出力が十分現れないと考えた)

LEDの有無とは

LED有

- アルミシャーシの穴にLED電球を入れた状態



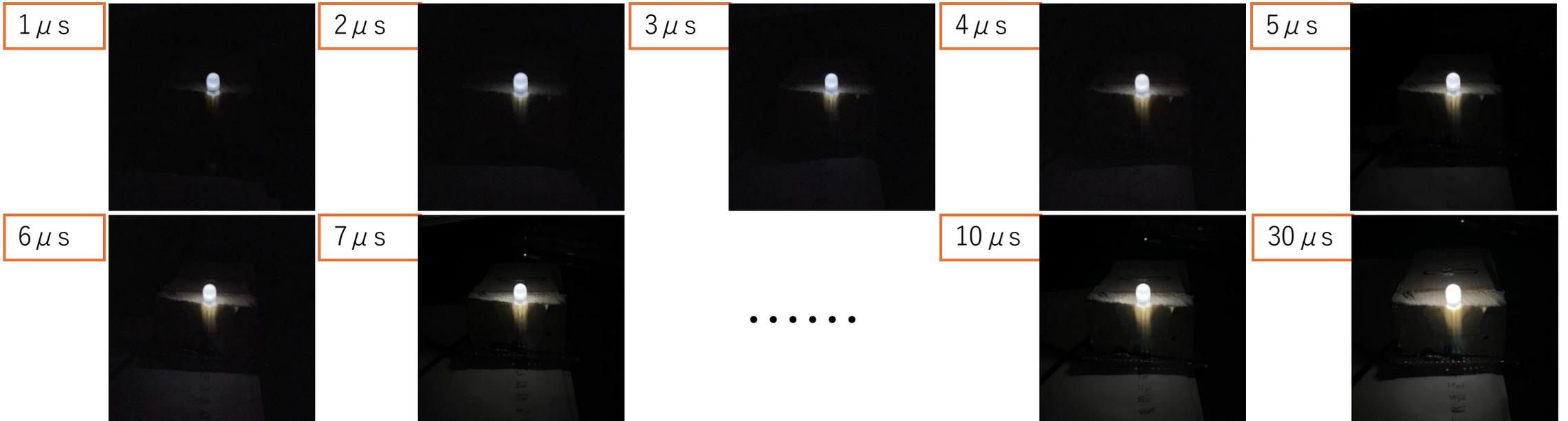
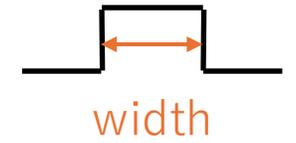
LED無

- アルミシャーシの穴にLED電球を入れていない状態



- この上に暗幕を被せて測定
- LED回路にTTL信号を流したまま、上のように比較した理由
→TTL信号を分岐させてオシロスコープにも入力、それが測定時のトリガーとなっている

width別のLED光の様子



入力電圧(電圧:3.8V,周波数:100Hz)

Siセンサーを通る粒子のエネルギー損失の見積り

Minimum Ionization Particle (MIP)のエネルギー

…荷電粒子が物質中を通過するときの最小のエネルギー損失

$$\frac{1}{\rho} \left\{ -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{min} \right\} \approx 3.5 \frac{Z}{A}$$

$$-(dE)_{min} = 3.5 \frac{Z}{A} \rho dx$$

$$V = -(dE)_{min} \times \frac{1}{E_{e-h}} \times e \times \frac{1}{C}$$

式の出典

["Particle Physics" 3rd edition],
B. R. Martin and G. Shaw, Wiley

Siは $\rho = 2.329 [\text{g}/\text{cm}^3]$ 、 $Z=14$ 、 $A=28$ 、また $dx=320 [\mu\text{m}]$ 、 $C=1 [\text{pF}]$ より

$$V = 3.5 \frac{14}{28} \frac{2.329 [\text{g}/\text{cm}^3] \times 320 [\mu\text{m}] \times 1.60 \times 10^{-19} [\text{C}]}{3.6 [\text{eV}] \times 1 [\text{pF}]}$$

つまり、Siセンサーを粒子1つ通過した場合、

- 最小のエネルギー損失は約0.13[MeV]
- 測定される電圧は約5.8 [mV]

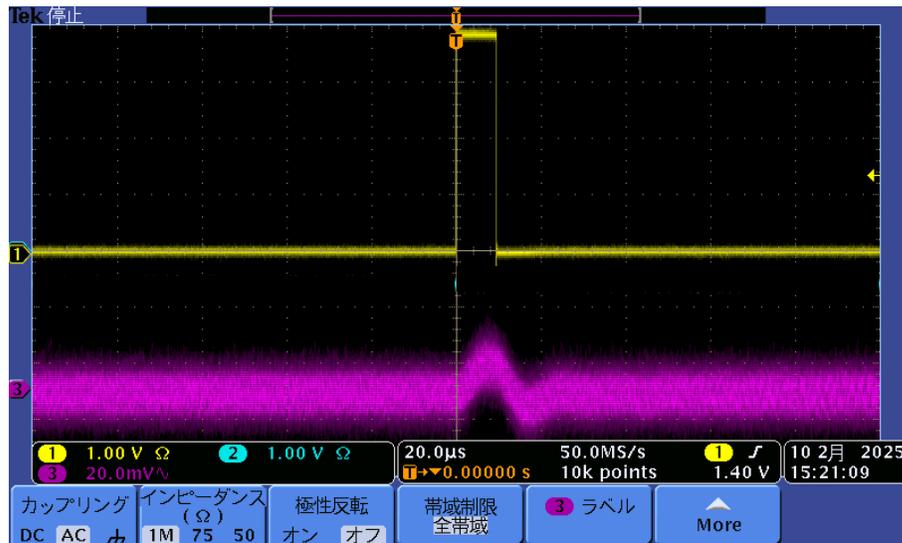
各記号について

- ρ : 密度 [g/cm^3]
- $-(dE)_{min}$: 最小のエネルギー損失量 [MeV]
- dx : 物質の厚み [cm]
- Z : 陽子数
- A : 原子番号
- E_{e-h} : electron-hole pairの生成に必要なエネルギー 3.6[eV]
- e : 電子1つの電荷 $1.60 \times 10^{-19} [\text{C}]$
- C : コンデンサーの電気容量 [F]
- V : 測定される電圧 [V]

3.研究結果

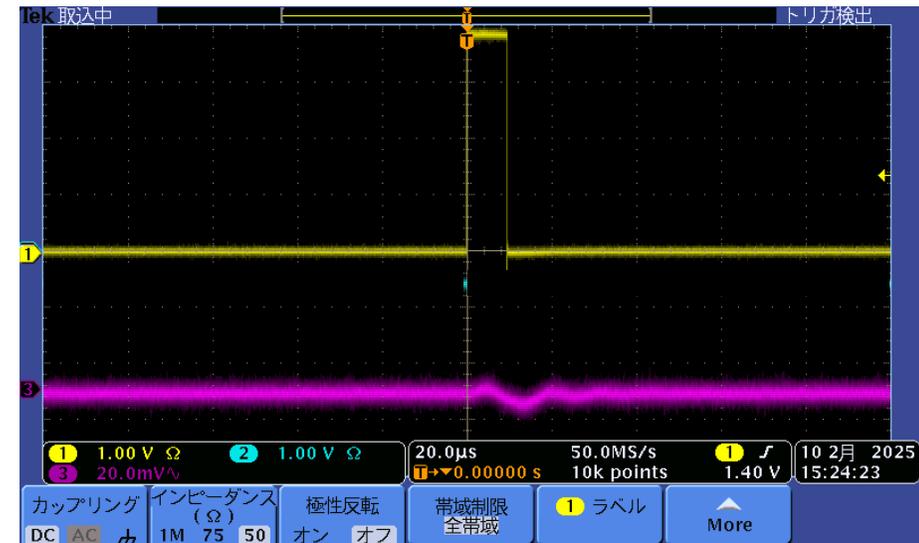
LED光を使ったSiセンサーのテスト結果

LED光有



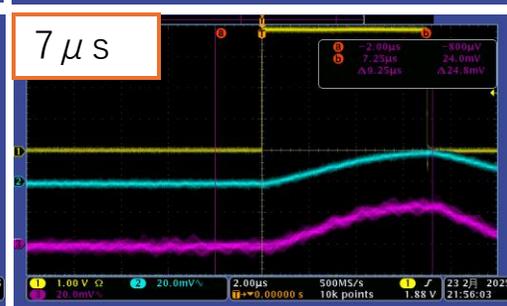
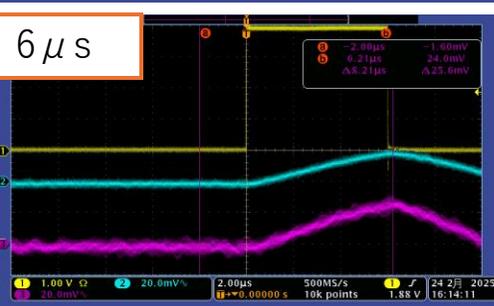
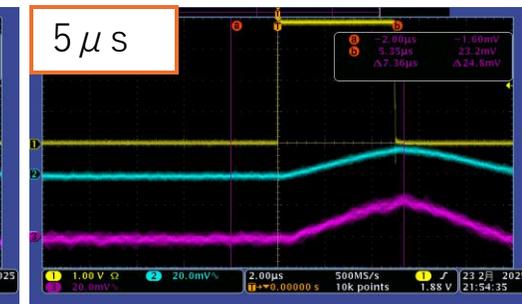
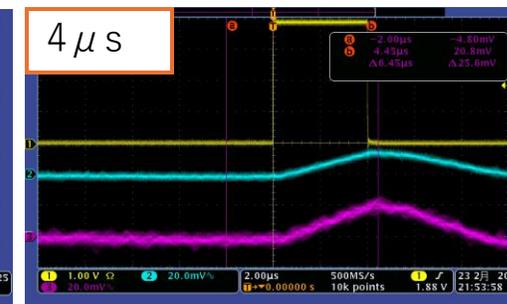
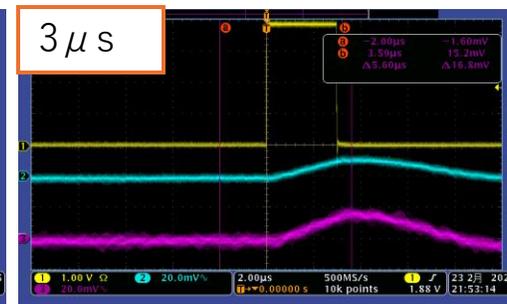
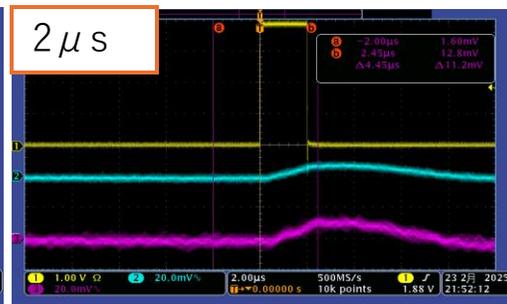
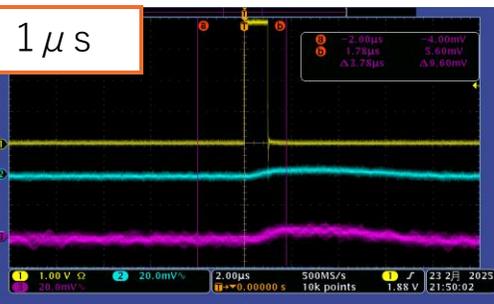
- LED光に反応した出力を確認
- 出力電圧の大きさは10~20mV

LED光無

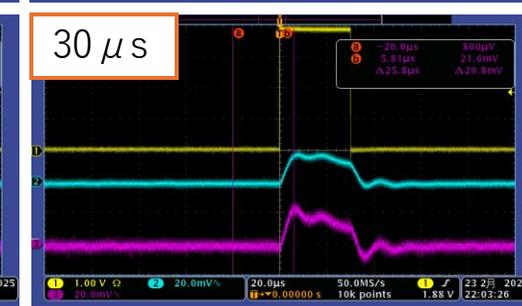
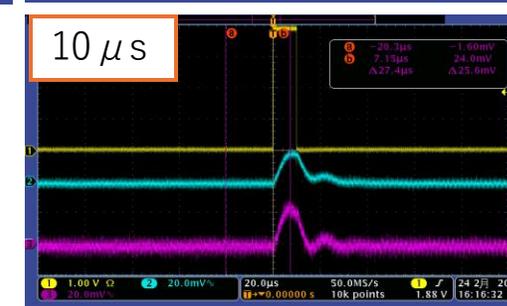


黄：入力電圧(電圧:3.8V,width:9.2us,周波数:100Hz)
赤：出力電圧(3つの回路)

LED用TTL信号のwidthを変えて測定 (LED有の場合)

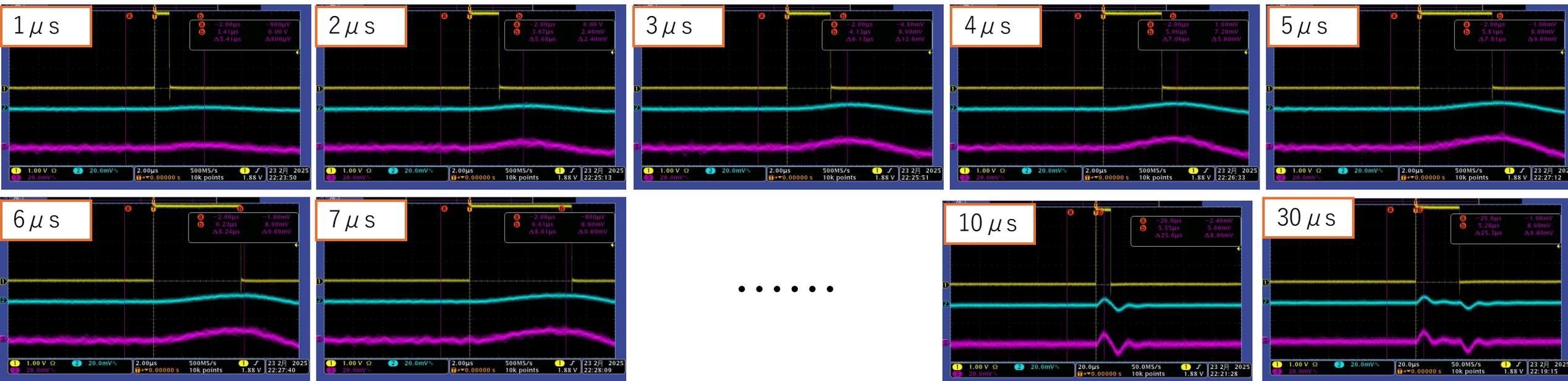


.....



黄：入力電圧(電圧:3.8V,周波数:100Hz)
青：出力電圧(CSAのみ)
赤：出力電圧(3つの回路)

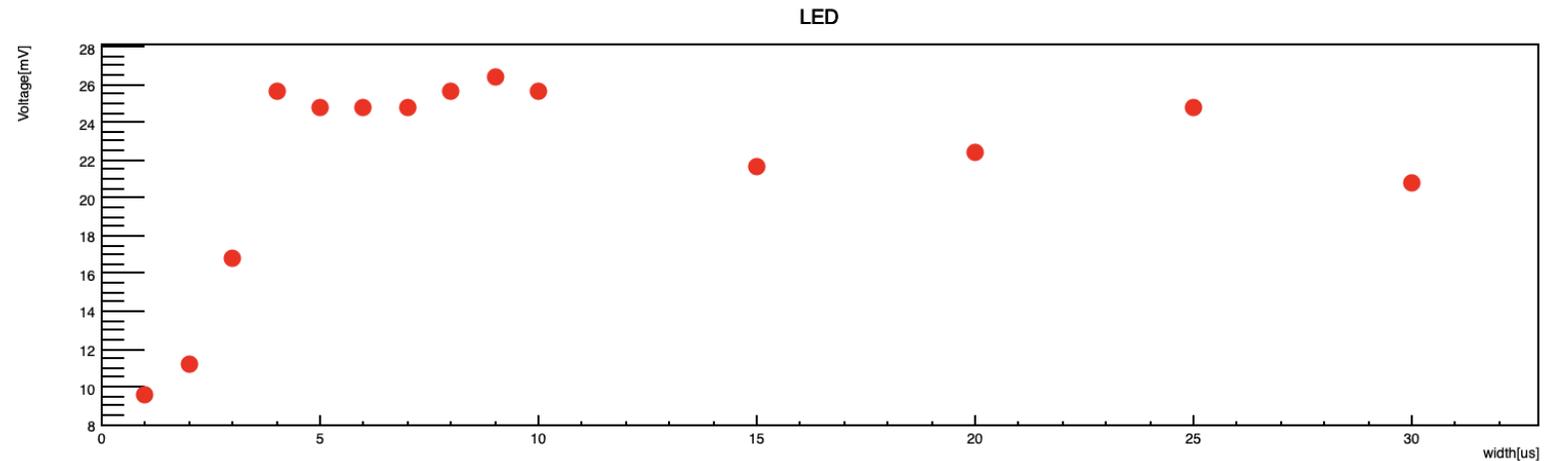
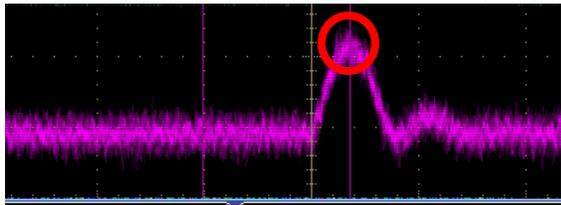
LED用TTL信号のwidthを変えて測定 (LED無の場合)



黄：入力電圧(電圧:3.8V,周波数:100Hz)
青：出力電圧(CSAのみ)
赤：出力電圧(3つの回路)

LED用TTL信号のwidthを変えて測定 (LED有の場合)のグラフ

データ取得方法
増幅器出力(赤)の最上部
を出力電圧として測定



widthが時定数より小さい場合、
出力電圧が十分現れていない

4.まとめ

まとめ

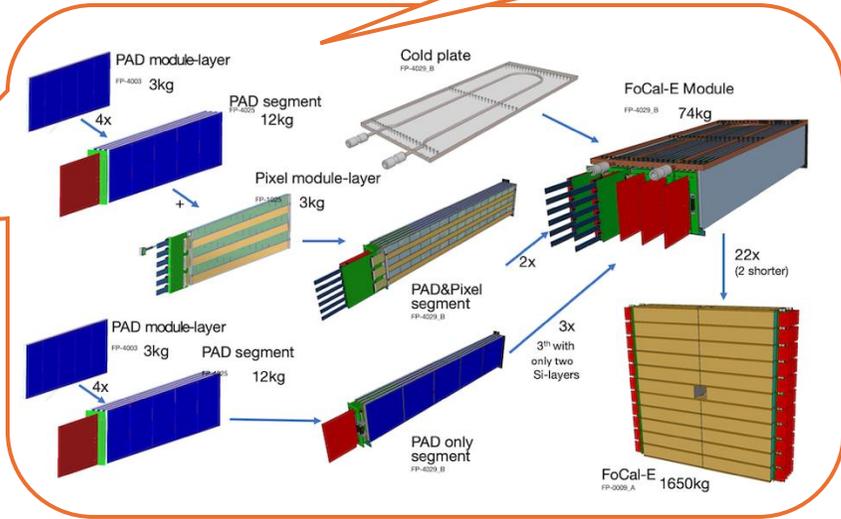
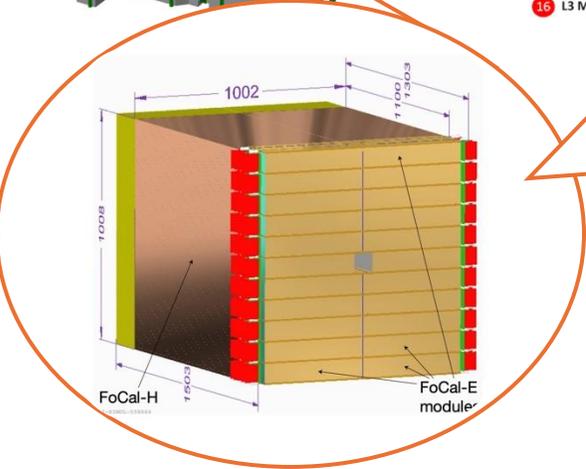
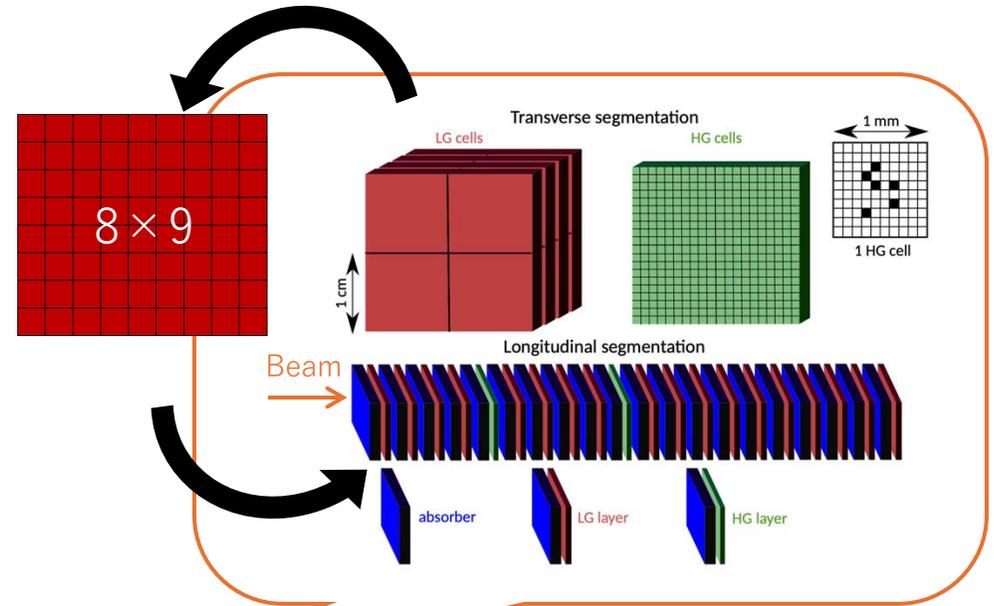
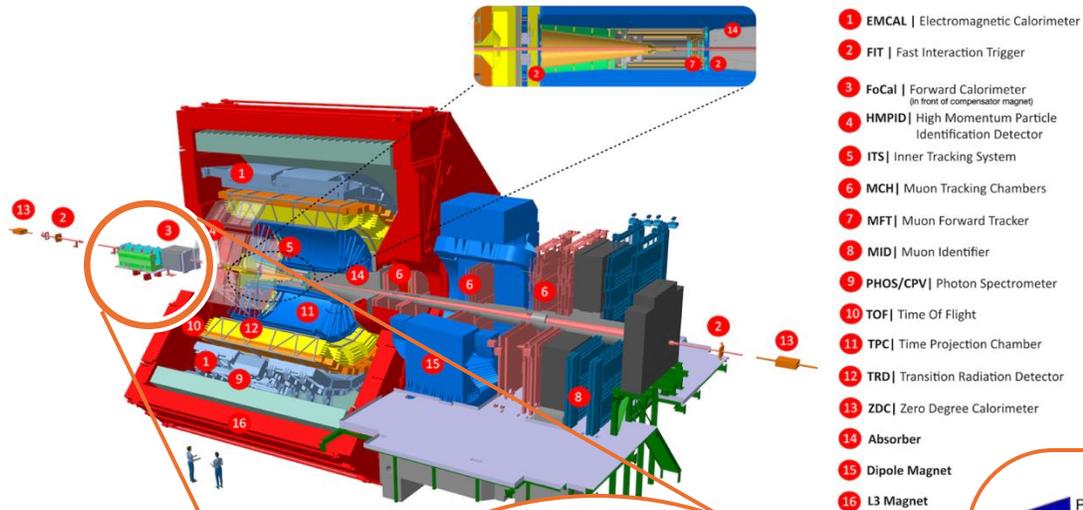
- FoCal-Eのために作られたSiセンサーを用いて、作成した増幅器を介し、LED光の信号を検出することに成功。
- 一方、その出力の定量的な評価ができていない。

今後の展望

- Siセンサーの性能を定量的に評価する方法を考える。

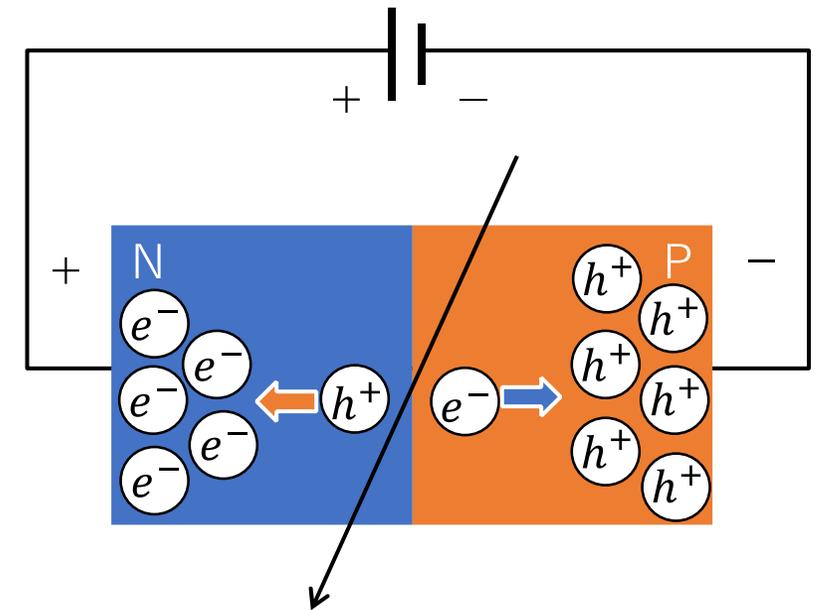
Back Up

FoCal-E検出器の構造



半導体検出器について

- PNダイオードに逆電圧を掛け空乏層を作る。
- 外部からのエネルギーにより、半導体内原子の価電子帯にいる電子が励起、最外殻電子が伝導帯に遷移することで、自由電子となる。
- 発生した電子が、陰極方向に移動。
- かけていた逆電圧から降下した電圧をオシロスコープ等で測定。
- 降下した信号は、ダイオードにかけている電圧が再び充電されるため、再び元に戻る。



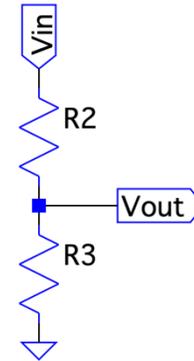
回路の説明補助

②への入力と出力の関係(直流成分)

$$V_{out} = i \times R_3$$
$$V_{in} = i(R_2 + R_3)$$

よって

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_2 + R_3} \times R_3$$
$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times V_{in}$$

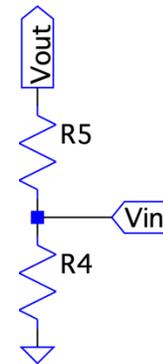


③への入力と出力の関係

$$V_{out} = i(R_4 + R_5)$$
$$V_{in} = iR_4$$

よって

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_4} (R_4 + R_5)$$
$$V_{out} = \frac{R_4 + R_5}{R_4} \times V_{in}$$



Pole-Zeroキヤンセル回路(PZC) 補足

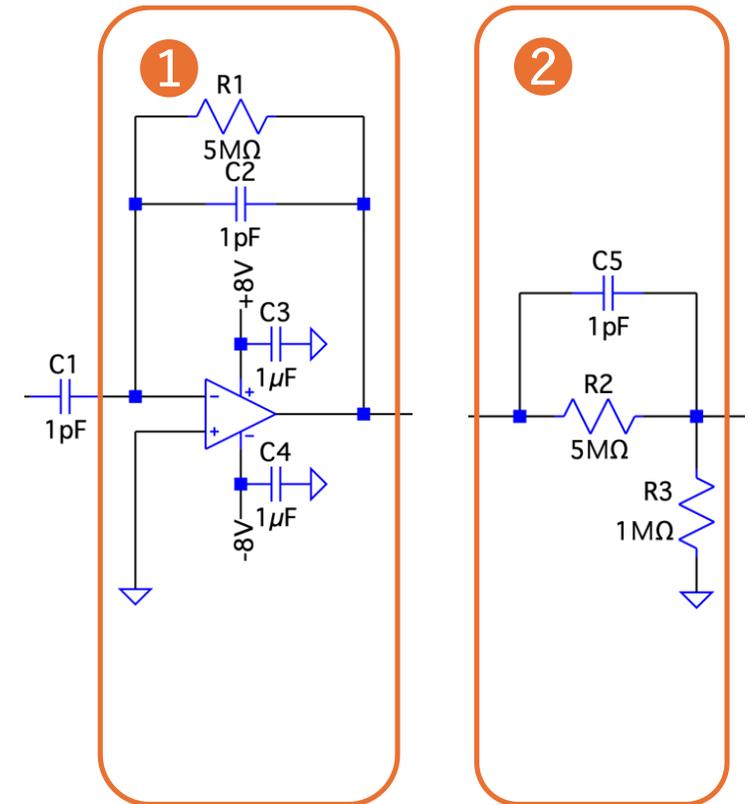
①CSAでのインピーダンス T_1

$$T_1 \equiv \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{C_1}{C_2} \exp\left(-\frac{t}{C_2 R_1}\right) = \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{s + \frac{1}{C_2 R_1}} = \frac{C_1 R_1}{1 + s C_2 R_1}$$

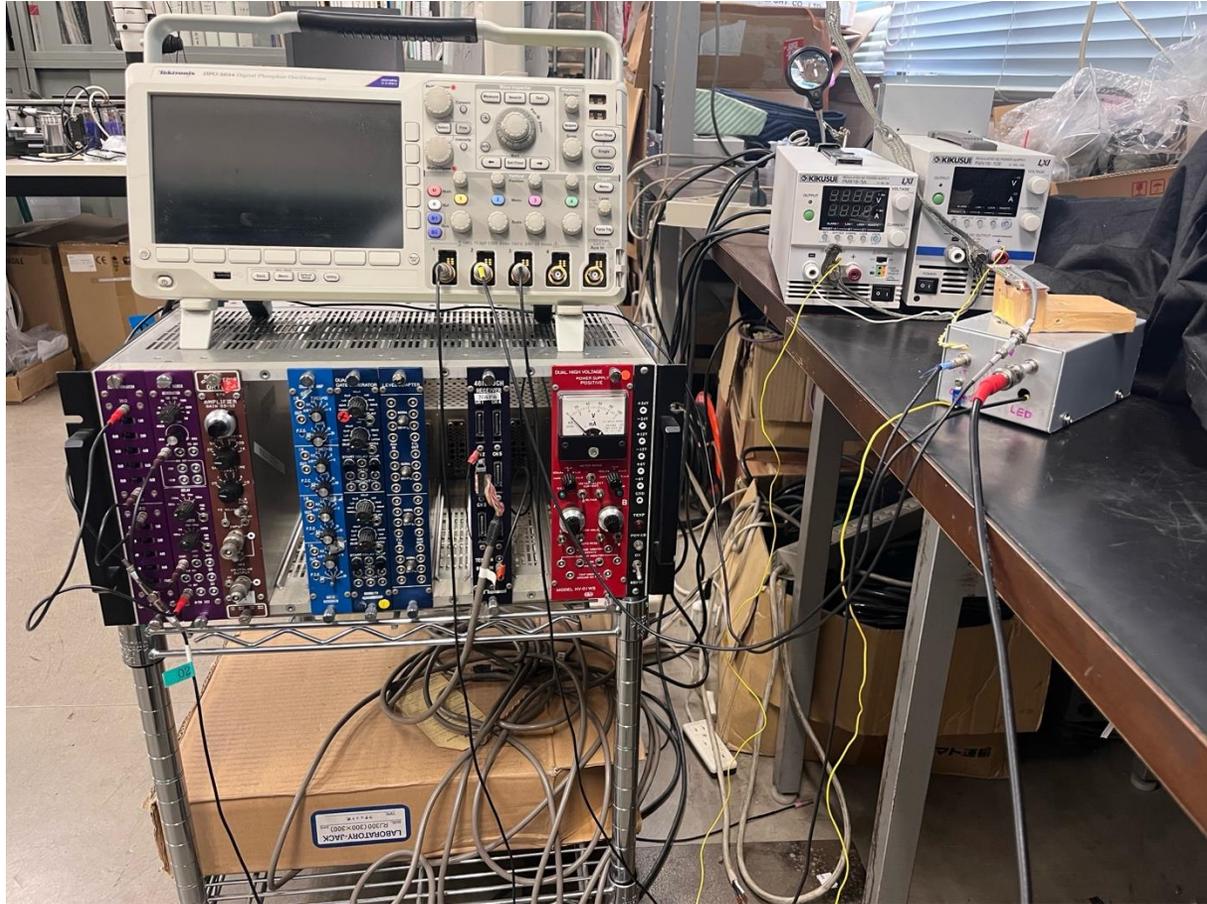
②PZCでのインピーダンス T_2

$$T_2 \equiv \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_3}{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + s C_5} + R_3} = \frac{R_3 (1 + s C_5 R_2)}{R_2 + R_3 (1 + s C_5 R_2)}$$

- $C_2 R_1 = C_5 R_2$ の時、CSAでの**ポール**がPZCの**ゼロ**と打消す
→PZCの導入によりインピーダンスが発散しない



測定器の全体像（引き）



使用機器について

オペアンプ

- LM6142

LED

- OSPW5111A-YZ (Opto Supply社)
- 白色発光

Siセンサー

- 別スライドに説明あり

オシロスコープ

- Tektronix DPO3034 Digital Phosphor Oscilloscope

クロックジェネレーター

- 100MHz CLOCK GENERATOR
- NIM信号やTTL信号の出力が可能
- 周波数範囲：100Hz~10KHz
- width範囲：40ns~120us
- ※オシロスコープで確認

ピコアンメーター

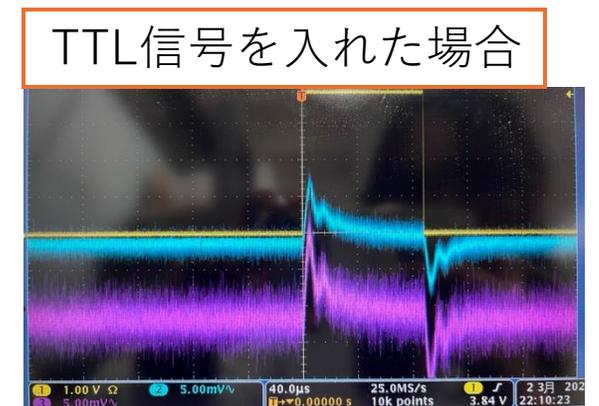
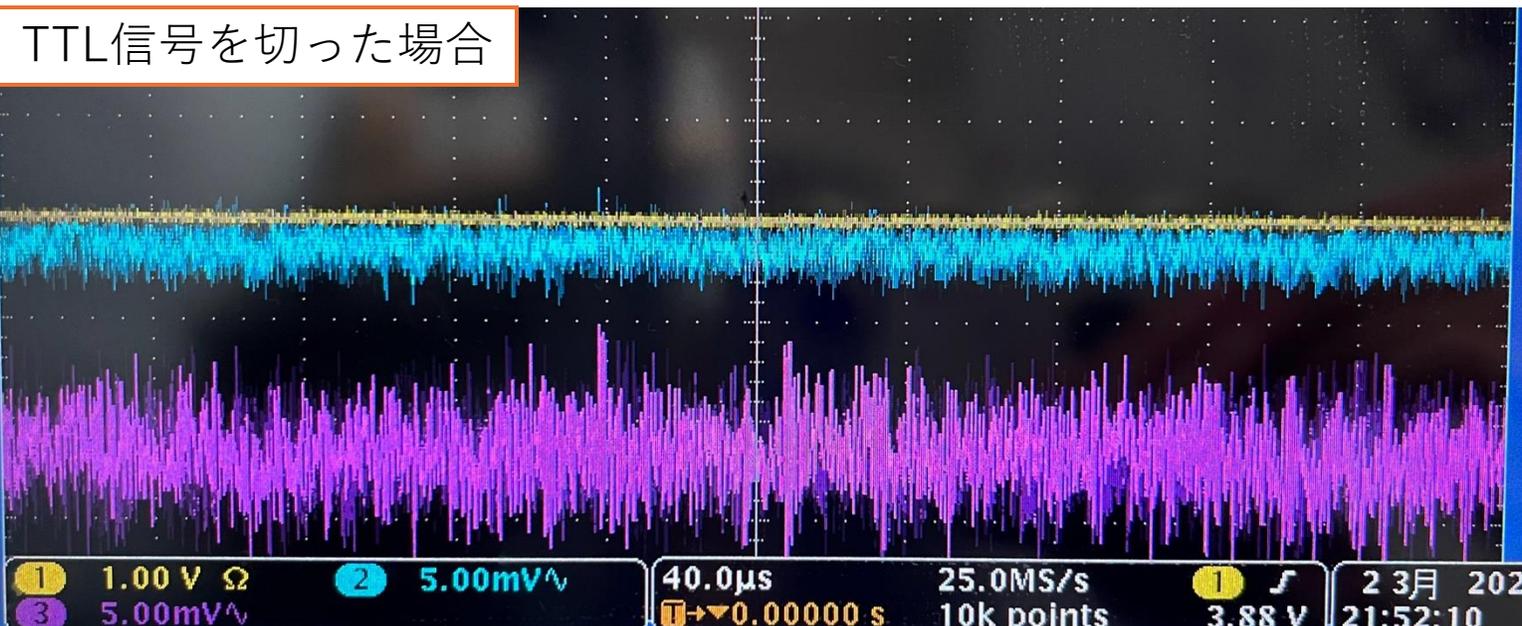
- KEITHLEY Model 6487

直流電源

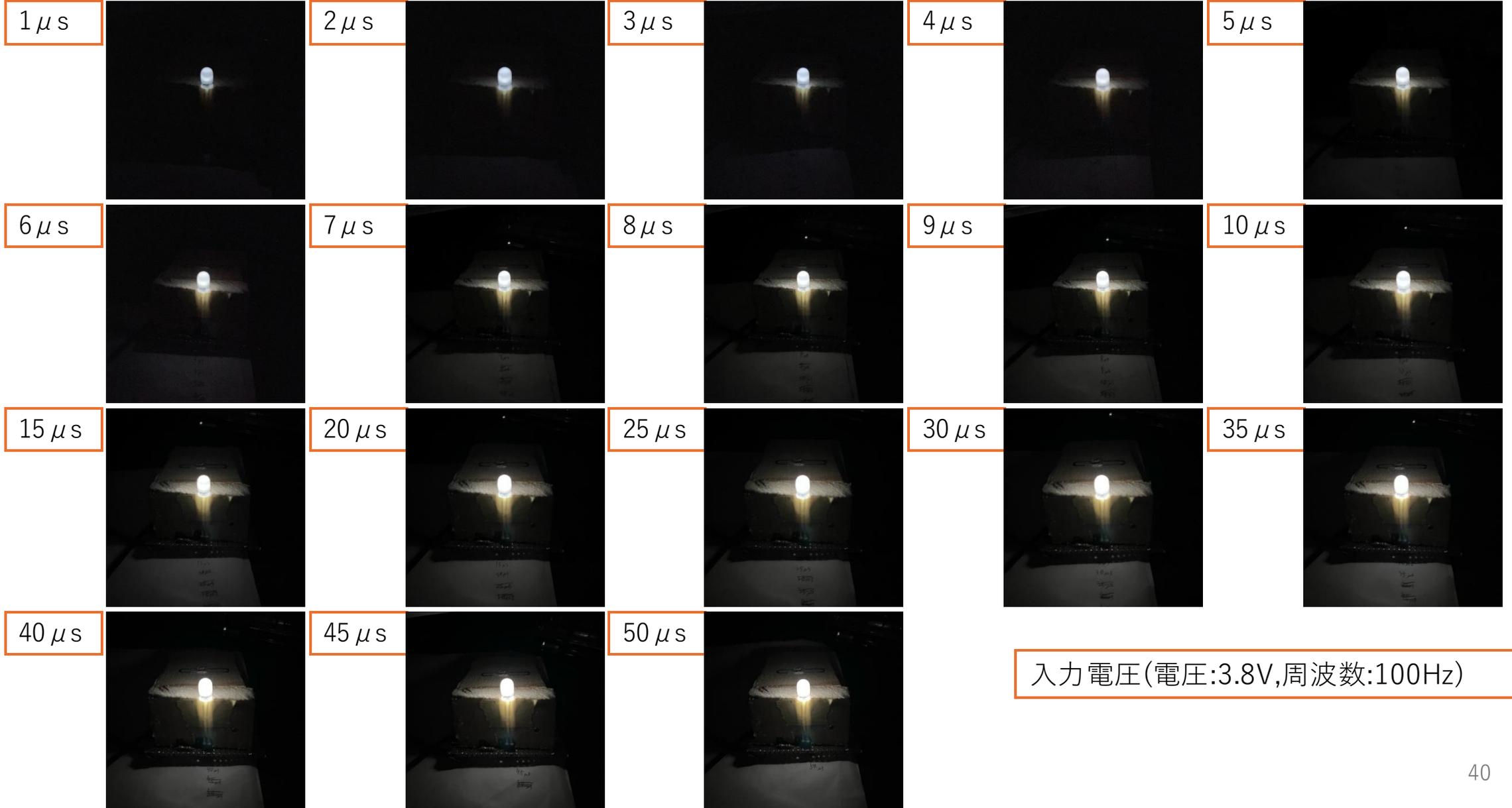
- - 電圧側：KIKUSUI PM18-5A
- + 電圧側：KIKUSUI PAN16-10E

LEDの有無とは（補足）

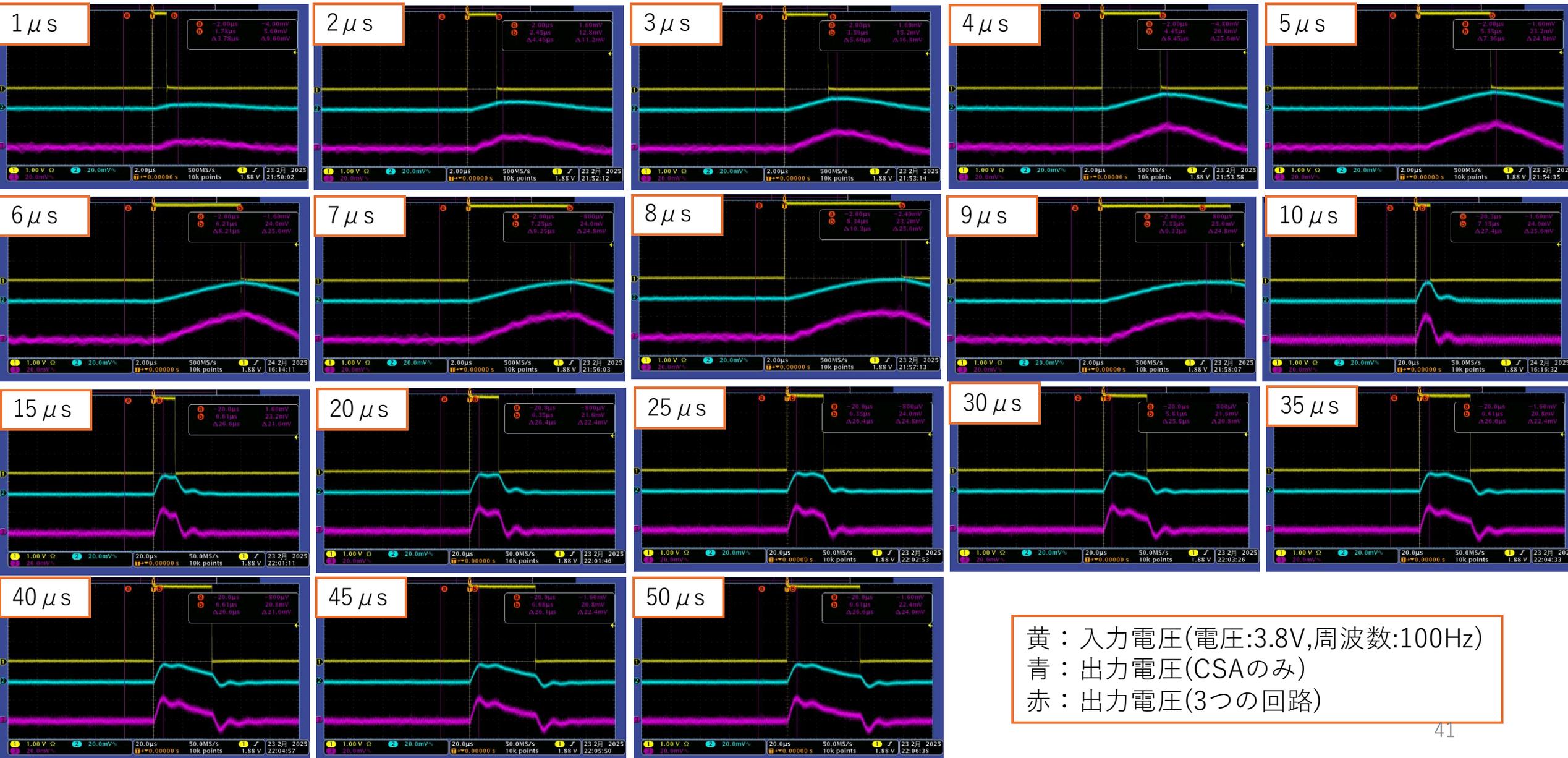
- LEDの有無を、LED回路にTTL信号を入力する/しないにより区別しない理由として、TTL信号を入力しない場合、トリガーにならず測定ができないため



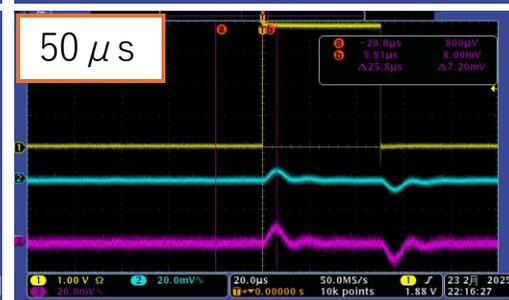
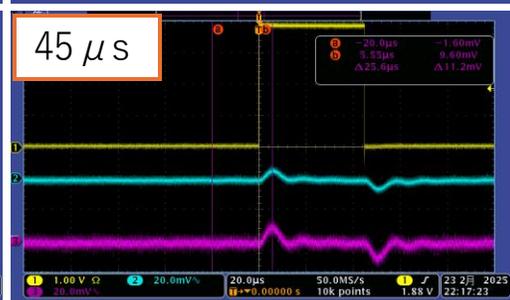
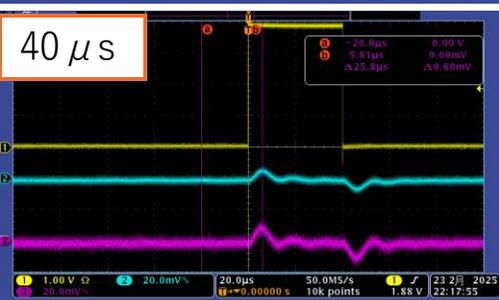
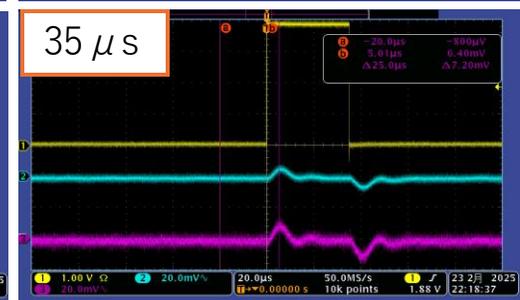
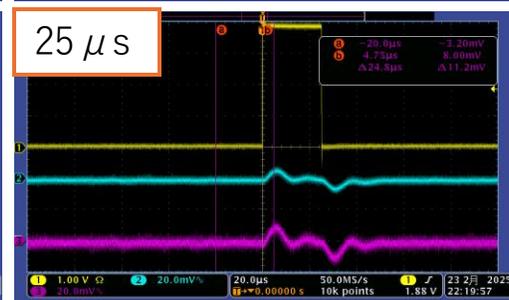
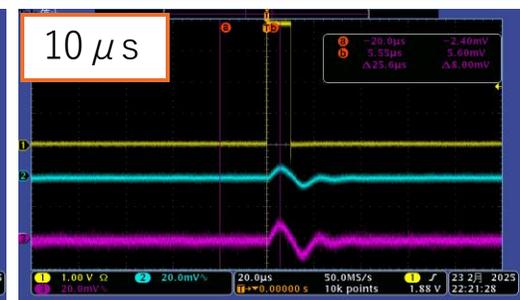
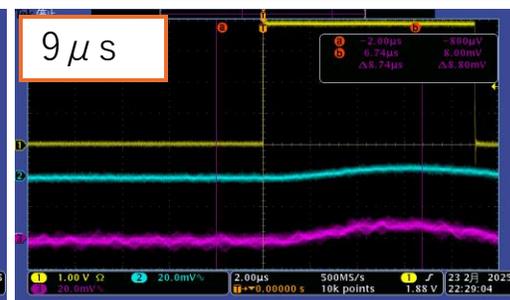
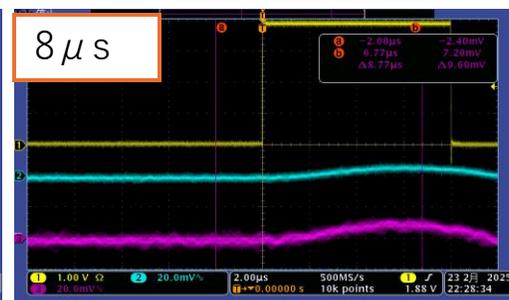
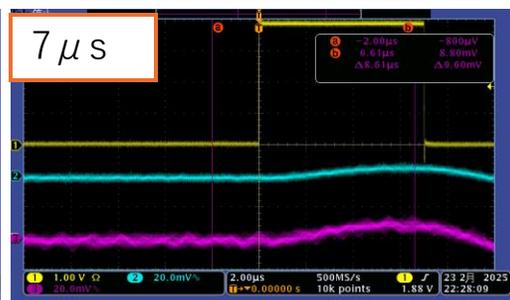
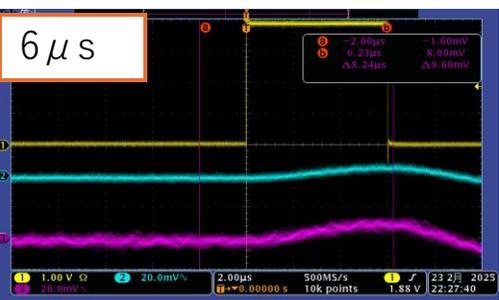
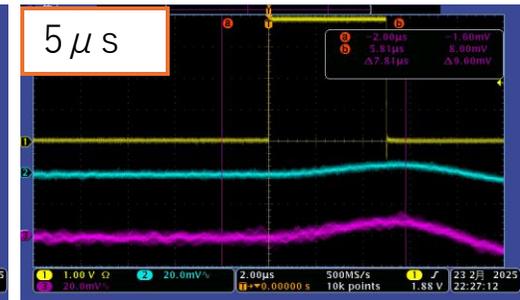
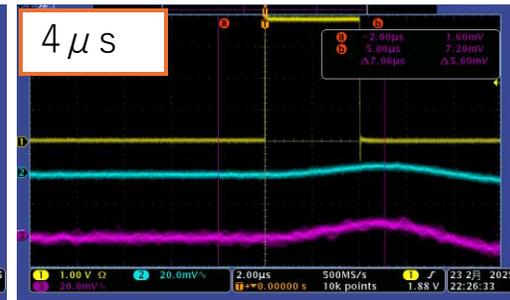
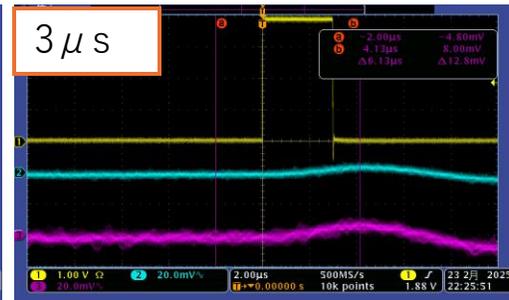
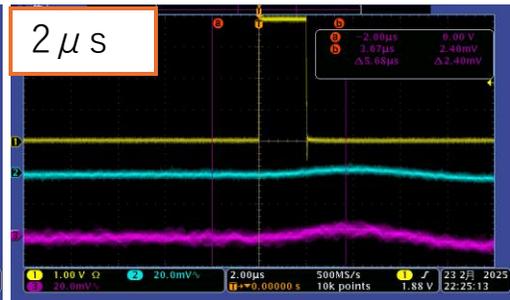
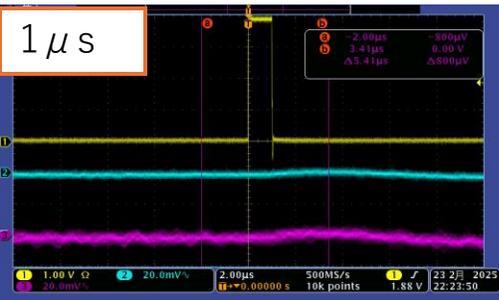
width別のLED光の様子



LED用TTL信号のwidthを変えて測定 (LED有の場合)



LED用TTL信号のwidthを変えて測定 (LED無の場合)



黄：入力電圧(電圧:3.8V,周波数:100Hz)
青：出力電圧(CSAのみ)
赤：出力電圧(3つの回路)

LED用TTL信号のwidthを変えて測定

