



# ILCのためのFPCCD読み出し回路の開発

3/20 東北大理 板垣憲之輔

東北大理、JAXA-ISAS<sup>A</sup>、高工研<sup>B</sup>

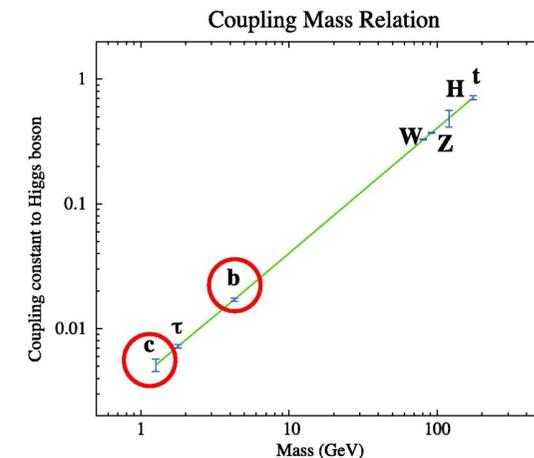
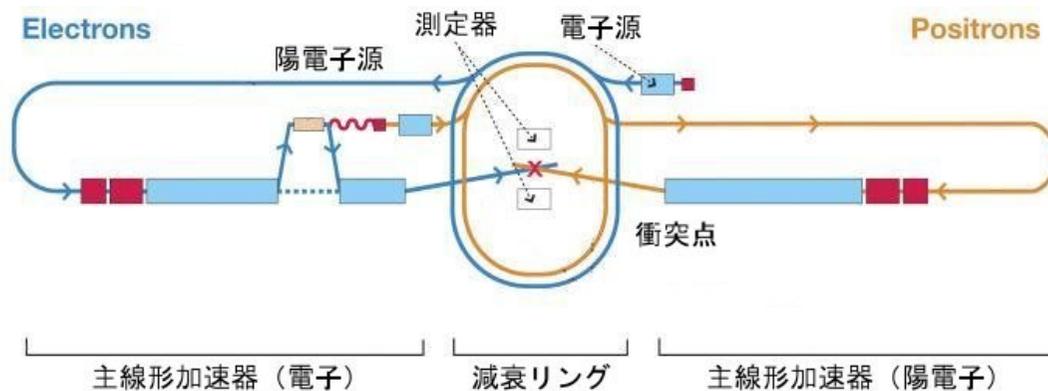
池田博一<sup>A</sup>、杉本康博<sup>B</sup>、田窪洋介、長嶺忠、宮本彰也<sup>B</sup>、山本均、吉田幸平

## 内容

- 国際リニアコライダー (ILC)
- FPCCDバーテックス検出器
- FPCCD用読み出し回路
- 試験
  - 読み出し回路単体での動作検証
  - FPCCDの読み出し試験
- 読み出しボード

# 国際リニアコライダー (ILC)

- 電子・陽電子衝突型線形加速器
  - 重心系エネルギー: 最大 500 GeV (アップグレード後: 最大 1 TeV)
  - 積分ルミノシティ (四年間):  $500 \text{ fb}^{-1}$



- **バーテックス検出器への要求**

- 高精度bクォーク, cクォーク同定のための高位置分解能

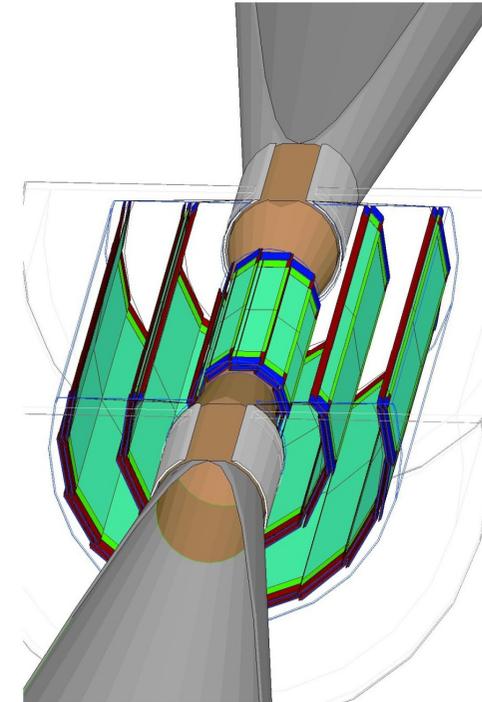
➤ 目標位置分解能 
$$\sigma = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu\text{m})$$

- ビームパイプからの距離: 数十 mm  $\Rightarrow$  ピクセル占有率: 抑える

→ **FPCCDバーテックス検出器を開発**

# FPCCDバーテックス検出器

- FPCCDバーテックス検出器
  - FPCCD (Fine Pixel CCD)
    - ピクセルサイズ:  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$
    - 有感層の厚さ:  $15 \mu\text{m}$ (全空乏)
  - 総チャンネル数: 6,080 チャンネル
    - $20,000 \times 128 \text{ pix/ch}$
  - 総ピクセル数: 約  $10^{10}$  ピクセル



- センサーが高精細であるため、ピクセル数が膨大
  - バーテックス検出器実現のためには、読み出し技術の確立が必須
  - FPCCD用読み出し回路を開発した

# 読み出し回路への要求と対策

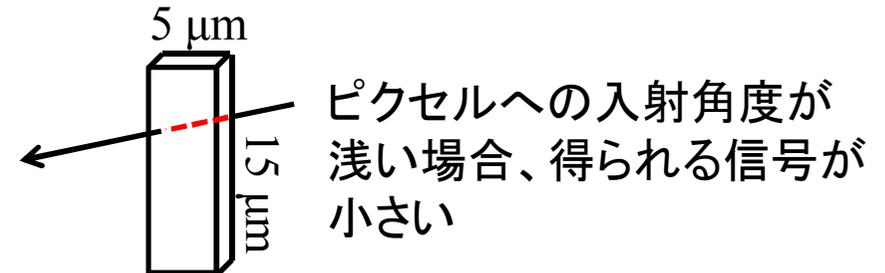
## □ 消費電力 < 6 mW/ch : クライオスタット内で冷却

- 読み出し回路での主な電力消費源 : ADC, 出力信号のドライブ
- 電荷再分配型ADCを使用 : 消費電力 ~ 10  $\mu$ W/ch
- 出力信号 LVDS : 消費電力 ~ 1.65 mW/ch

## □ 読み出し速度 > 10 Mpix/sec : 20,000 $\times$ 128 pix / 200 ms

- 5 Mpix/secの読み出し速度を持つADCを二つ用いる

ILC のビーム



## □ ノイズレベル < 30 電子 : 横方向粒子から得られる信号 : 小

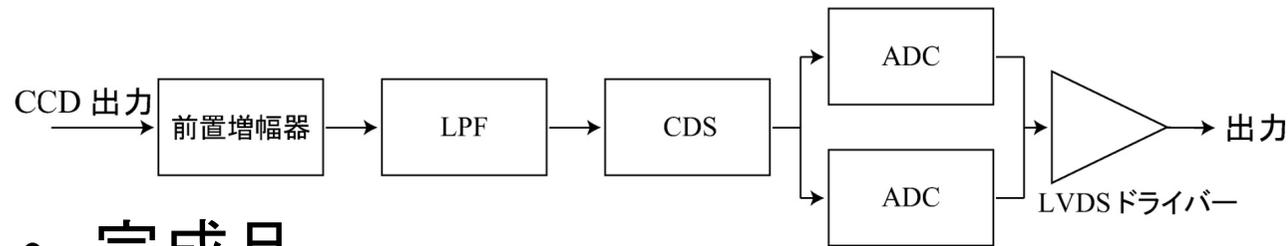
- ローパスフィルター、相関二重サンプリング回路(CDS)を使用

→ 以上を踏まえ、読み出し回路を設計開発

– 設計原案は池田博一氏 (JAXA-ISAS)による

# 読み出し回路の試作

- 読み出し回路のデザイン(1チャンネル)



- 完成品

0.35 $\mu$ m TSMCプロセス

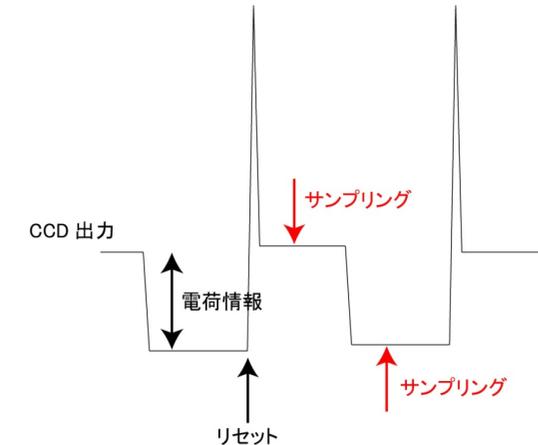
チップサイズ : 2.85 mm  $\times$  2.85 mm

チャンネル数 : 8

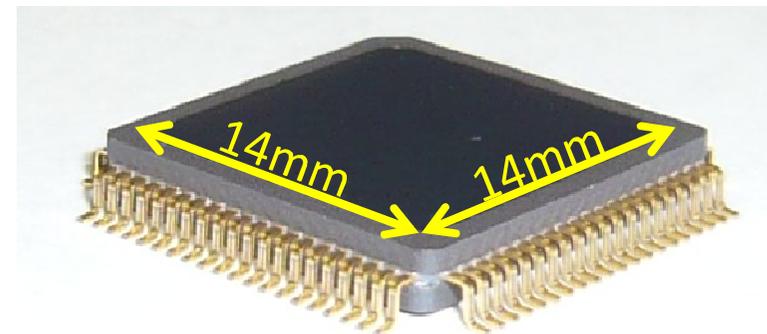
パッド数 : 80

パッケージ : QFP-80ピン

相関二重サンプリング



パッケージ

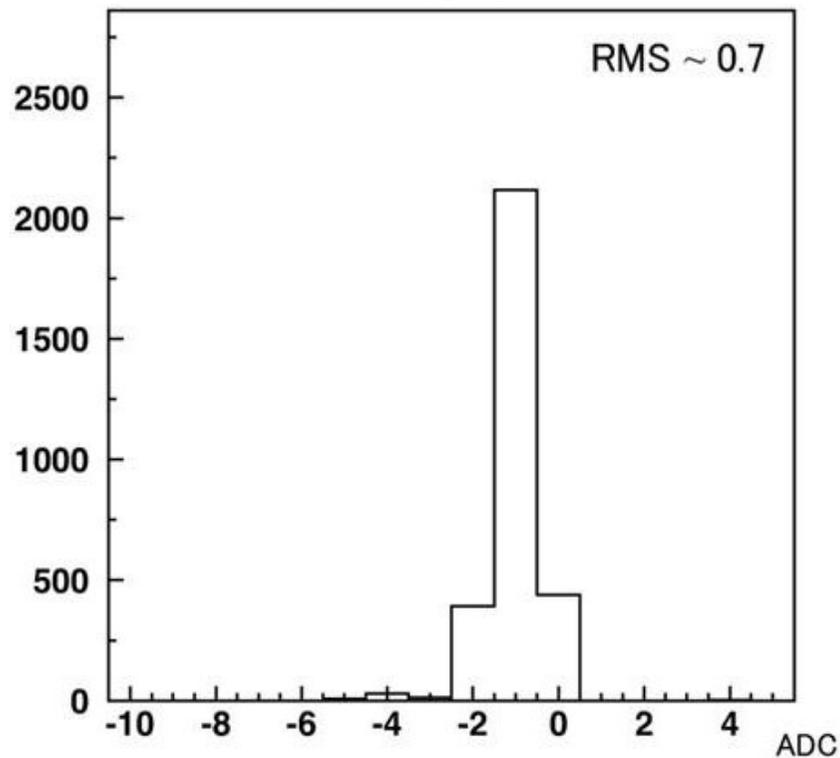


→ 一次試作品の性能を評価した

# ノイズレベルの測定

- ペDESTAL分布
  - 読み出し速度  $\sim 1.5$  Mpix/sec

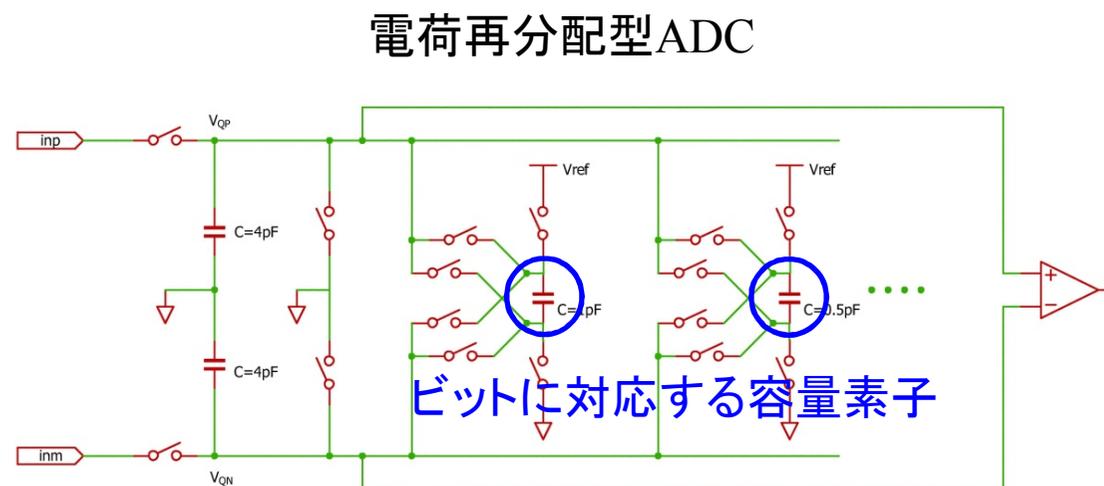
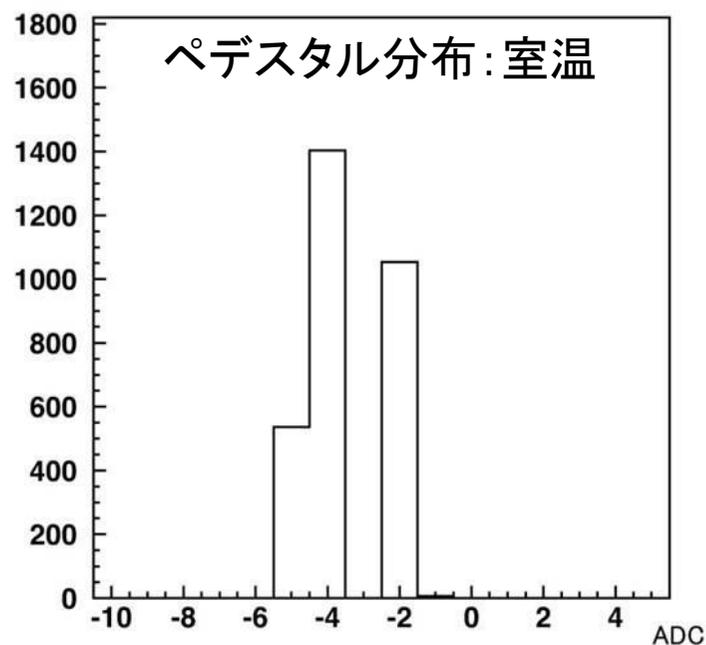
ペDESTAL分布:  $-10^{\circ}\text{C}$



- ノイズの見積り
  - RMS =  $0.7 \sim 28e$  (要求:  $30e$ )
  - ノイズの要求を満たせている

# ADCの改良点

- 出力しないADCカウントがある

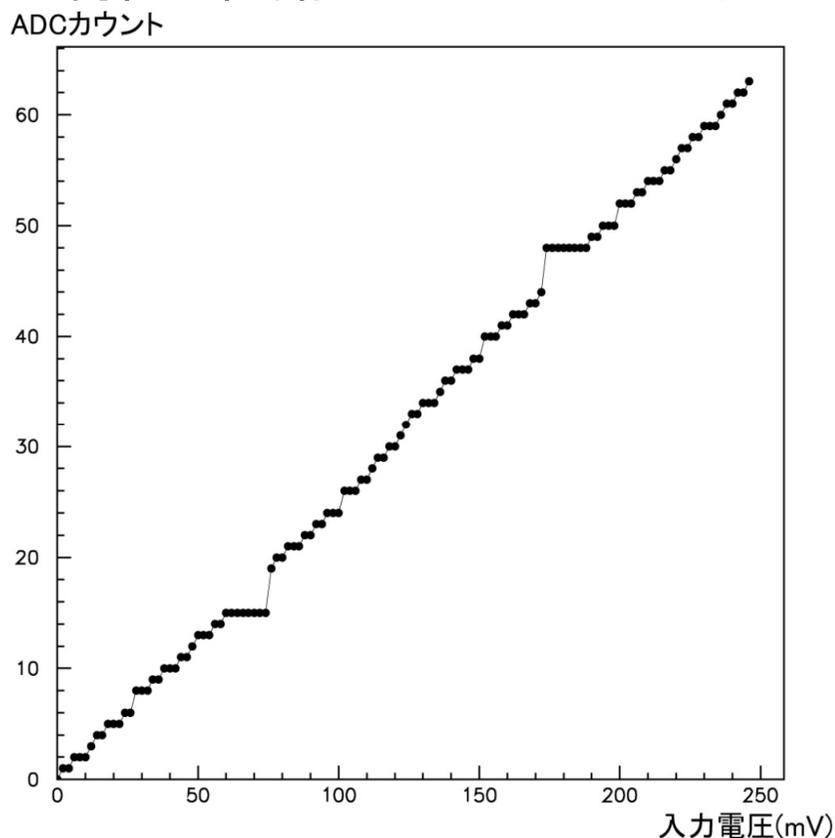


- ADCのビットに対応する容量素子の容量が浮遊容量により増大
  - 容量の比が 32:16:8:4:2:1 からずれている
- **原因**: 容量素子の接続を切り替えるスイッチ
- 容量に比例した個数のトランジスタをスイッチに使用することで解決を試みた

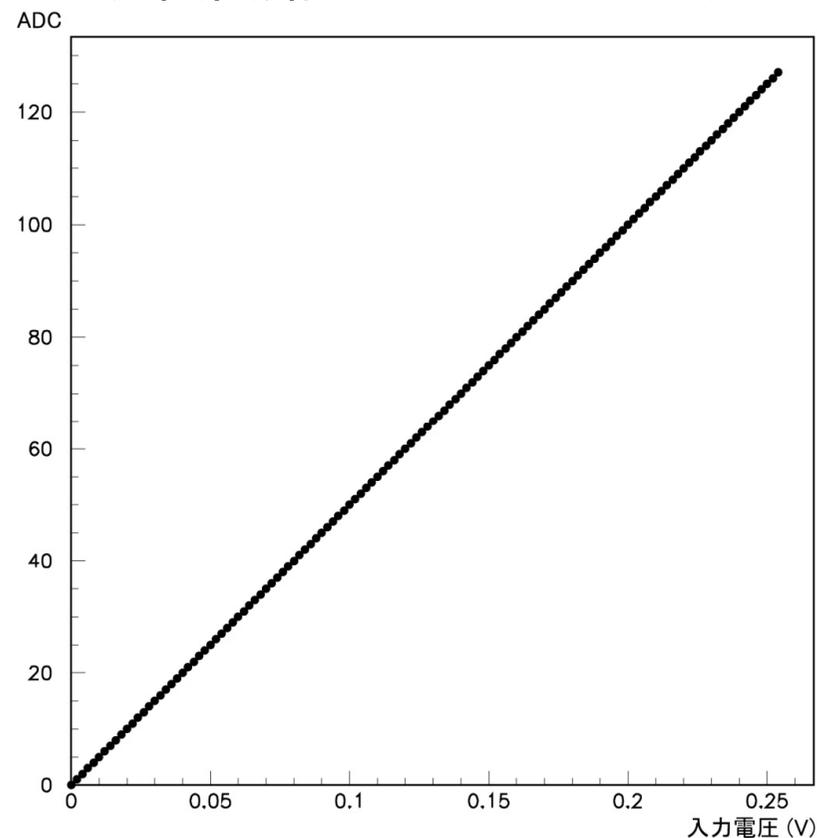
# ADCのシミュレーション

- プロセス情報なども含め詳細にADCのシミュレーションをおこなった

現行の回路でのシミュレーション



次回回路でのシミュレーション

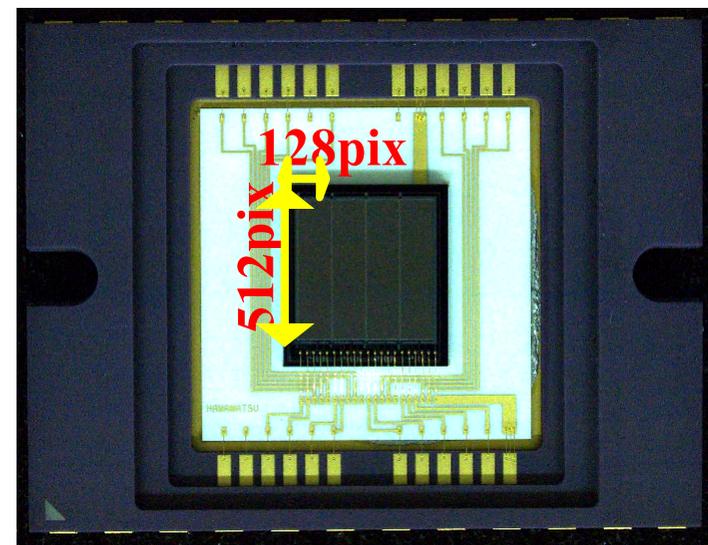


- 再設計したADCではすべてのADCが出力した  
→ 次回試作で出力しないADC問題の解決が見込める

# 試作FPCCDの読み出し

- 実機のFPCCD (最終目標)
  - ピクセルサイズ:  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$
  - 有感層の厚さ:  $15 \mu\text{m}$
  - チャンネル数: 32
  - $20,000 \times 128 \text{ pix/ch}$
- 試作FPCCD
  - ピクセルサイズ:  $12 \times 12 \mu\text{m}^2$
  - 有感層の厚さ:  $15 \mu\text{m}$
  - チャンネル数: 4
  - $512 \times 128 \text{ pix/ch}$

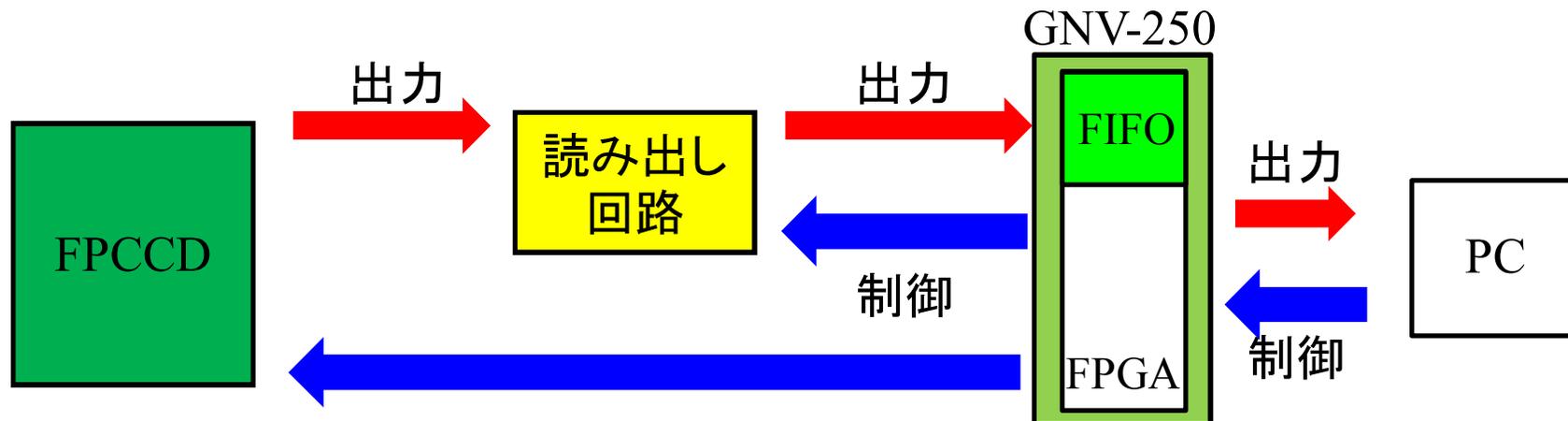
試作FPCCD



- 試作FPCCDを試作読み出し回路で読み出した

# FPCCDの読み出しセットアップ

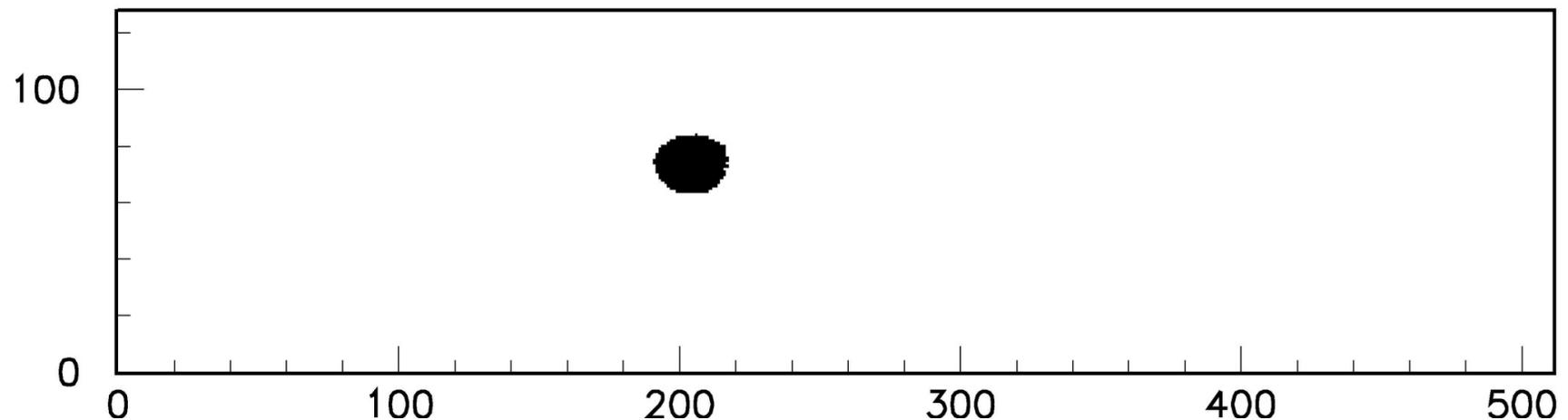
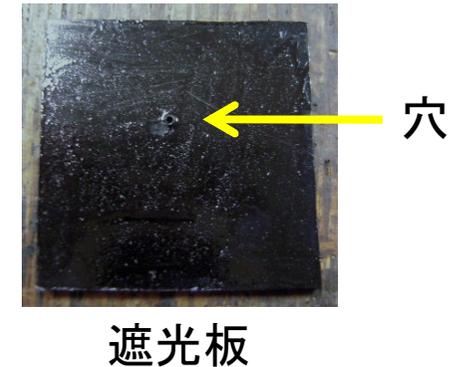
- 回路の制御とデータの取得にVMEモジュール(GNV-250)を使用



- 出力をVMEモジュールのメモリに一次保存してPCに送信
  - メモリ容量の限界から全ピクセルデータを保存できない
  - 7ビット情報を10ADCカウントを閾値として1ビットに落とす
  - 1チャンネル(512 × 128 pixel)のみ読み出す

# FPCCDの読み出し

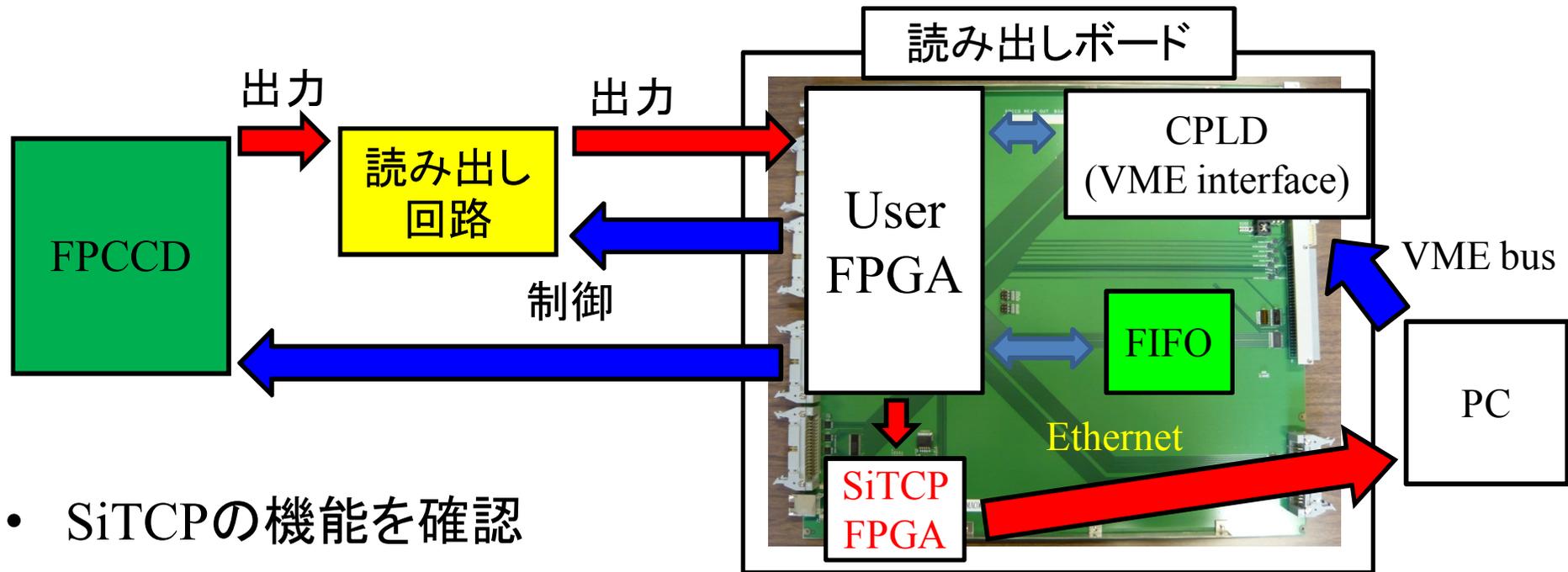
- 試作FPCCDを読み出した
- FPCCDに遮光板をかぶせ、LEDの光を照射
  - 照射時間:  $1 \mu\text{s}$
- 黒い部分が光に反応したピクセル



- 遮光板の穴の下のピクセルが光に反応している様子がわかる  
→ 現行の回路構成でFPCCDを読み出せる

# FPCCD読み出しボードの開発

- VMEモジュールを置き換える読み出しボードを開発
  - SiTCP用FPGAを実装
    - イーサネット経由でのデータ転送が可能
- FPCCDの全ピクセルを7ビットで読み出せる



- SiTCPの機能を確認
- 確認できた転送速度: 25 Mbps

→ 今後、読み出しボードを使用し、7ビット読み出しをおこなう

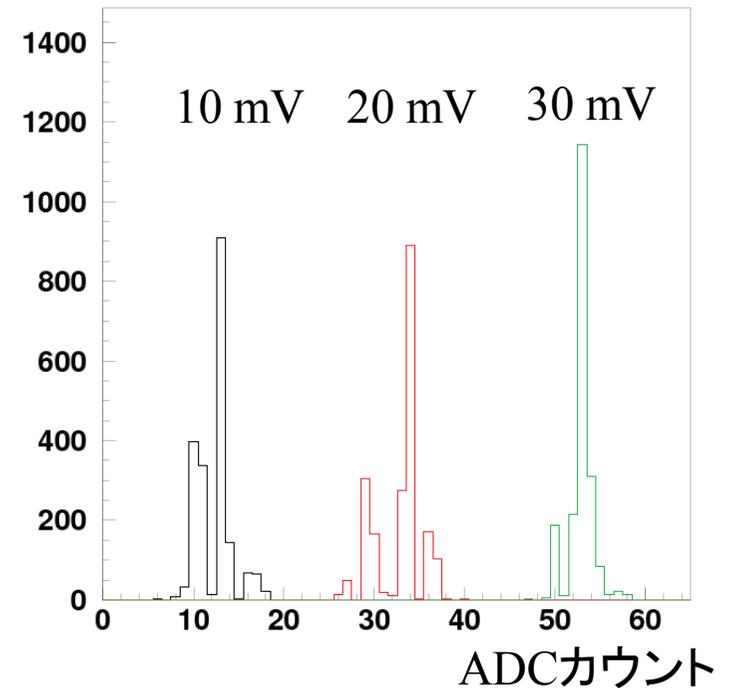
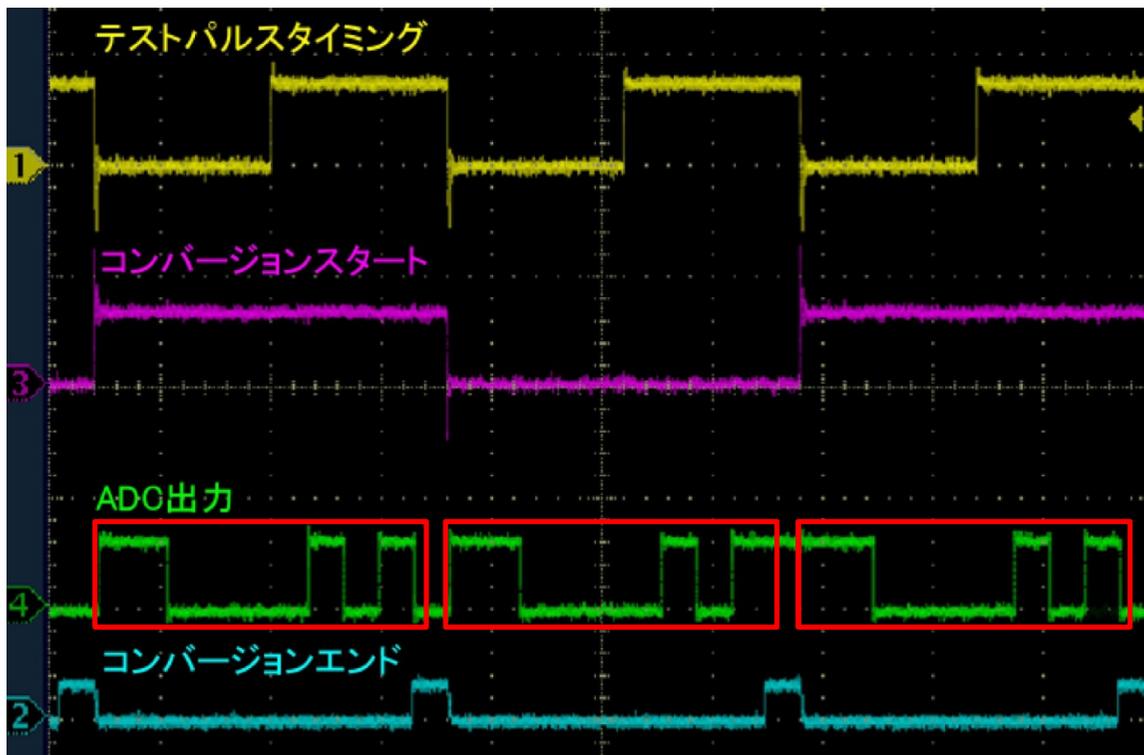
# まとめ

- FPCCD用読み出し回路を開発している
- 目標性能
  - 消費電力  $< 6$  mW/ch
  - 読み出し速度  $> 10$  Mpix/sec
  - ノイズレベル  $< 30$  電子
- 一次試作品の性能を評価
  - 読み出し速度  $\sim 1.5$  Mpix/sec
  - 一部のADCカウントを出力しない  $\Rightarrow$  次回試作で改善
  - ノイズレベル  $\sim 28$  電子
  - 試作FPCCDを読み出した
- 読み出しボードを開発
  - 転送速度  $\sim 25$  Mbps
  - 試作FPCCDを7ビットで読み出す



# 読み出し回路試験：動作確認

- テストパルスを入力し、動作確認をおこなった
  - 変換速度 10 kpix/sec , テストパルス 5 mV

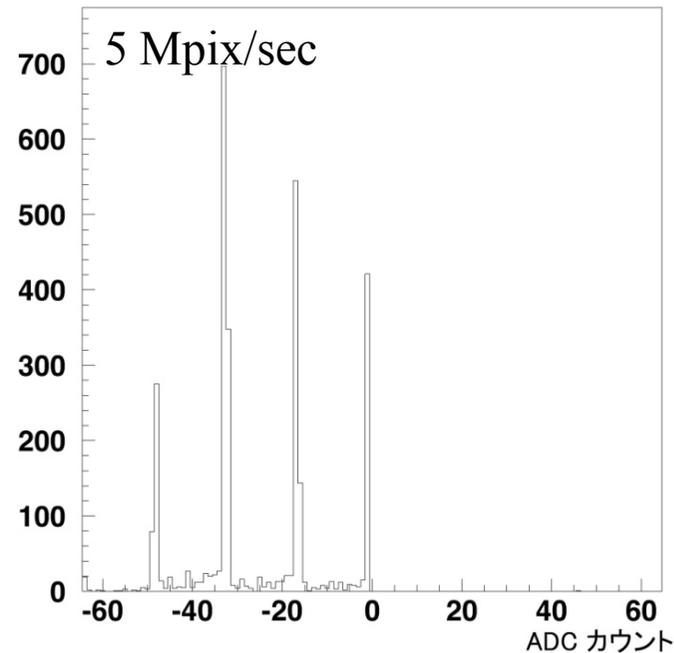
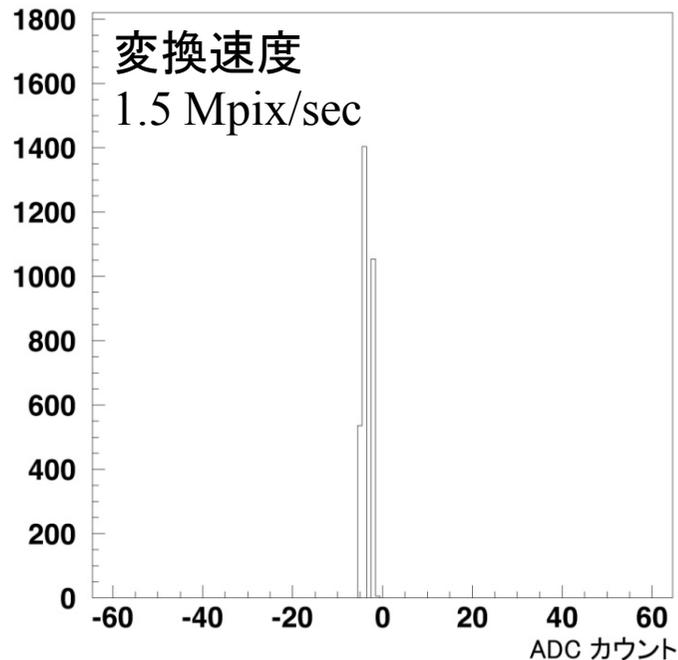


- 入力信号のタイミングで出力信号が得られた
- 信号電圧に対する感度を確認

# 試作読み出し回路の性能

- 読み出し速度  $\sim 1.5$  Mpix/sec
  - $\blacktriangleright$  1.5 Mpix/sec以上の変換速度でADC分布が広がる

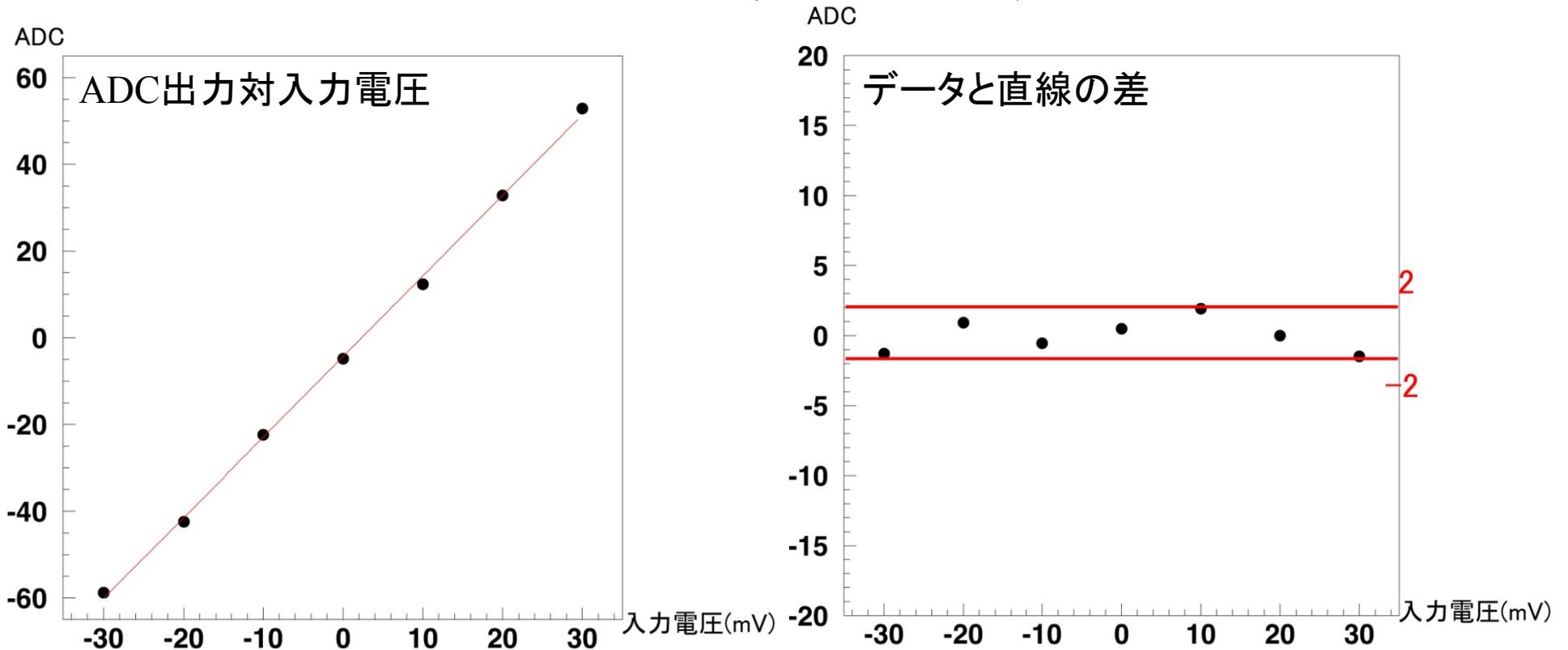
ペDESTAL分布



- $\blacktriangleright$  原因:コンパレータに流入する電流が不足  
→ 次回試作で電源を強化

# 読み出し回路試験：性能評価

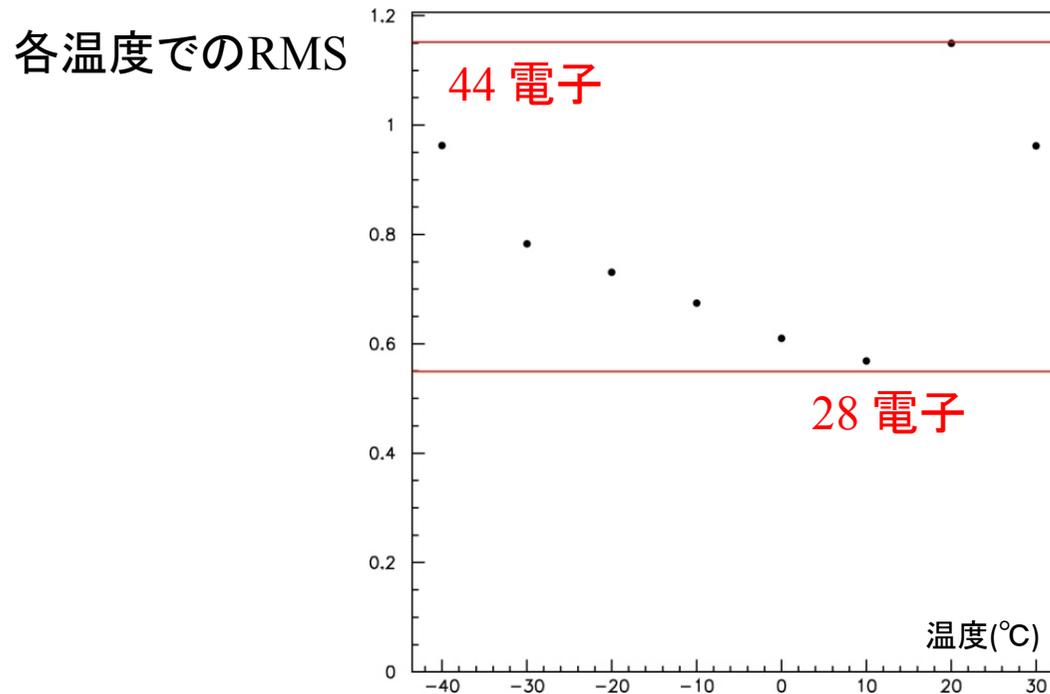
- 入力と出力の線形性を調べた
  - 入力電圧：-30 mV ~ 30 mV (10 mV 刻み)



- 線型性は **±80 電子以内**に収まる (1 ADCカウント = 40 電子)
- 出力されないADCの影響で悪くなっていると思われる

# RMSの温度変化

- 温度変化：ペDESTAL分布 ⇒ 移動  
出力されないADCカウント ⇒ 移動しない  
→ ペDESTAL分布の形が変わり、RMSが大きく変動



- 出力しないADCの影響でRMSが16 電子変化している
- 温度によるノイズの変化は16 電子より小さいと思われる

# Scilab でのシミュレーション

32 : 16 : 8 : 4 : 2 : 1



34.5 : 19 : 9.5 : 5.5 : 3 : 1.5

- 1を出力するのに1.5分の信号電圧が必要