



ILCのためのFPCCD読み出し回路の開発

9/14 東北大理 板垣憲之輔

東北大理、JAXA-ISAS^A、高工研^B

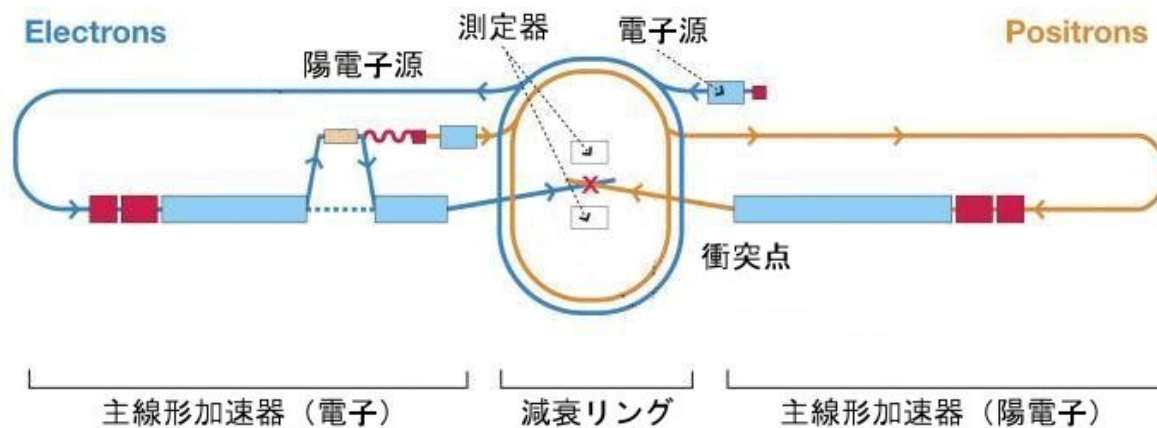
齋藤智之、池田博一^A、杉本康博^B、田窪洋介、宮本彰也^B、山本均

内容

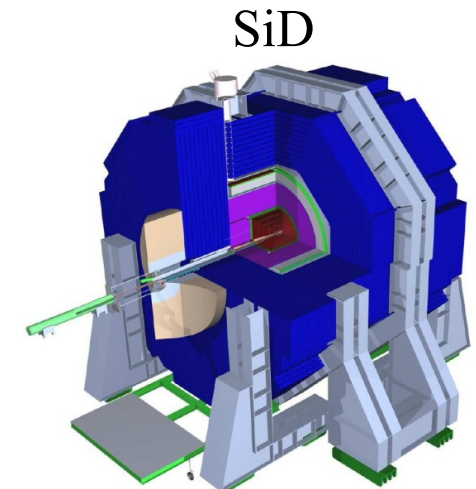
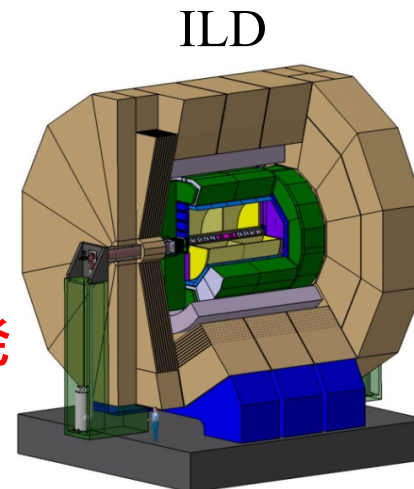
- 国際リニアコライダー (ILC)
- FPCCDバーテックス検出器
- FPCCD用読み出し回路
- 試験
- まとめ

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 fb^{-1}



- ILCの測定器
 - ILD → アジア、ヨーロッパ
 - SiD → 北米
- ILDのバーテックス検出器を開発



FPCCDバーテックス検出器

- バーテックス検出器への要求

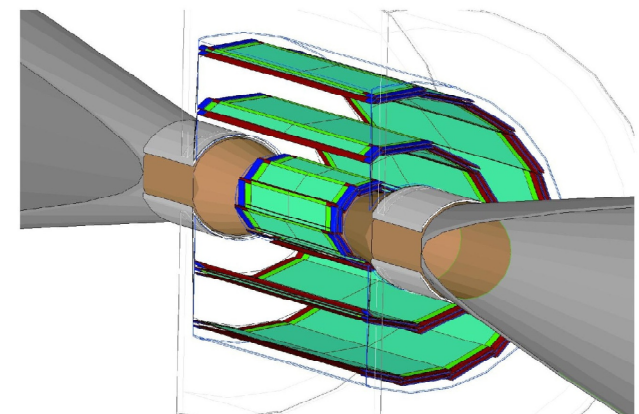
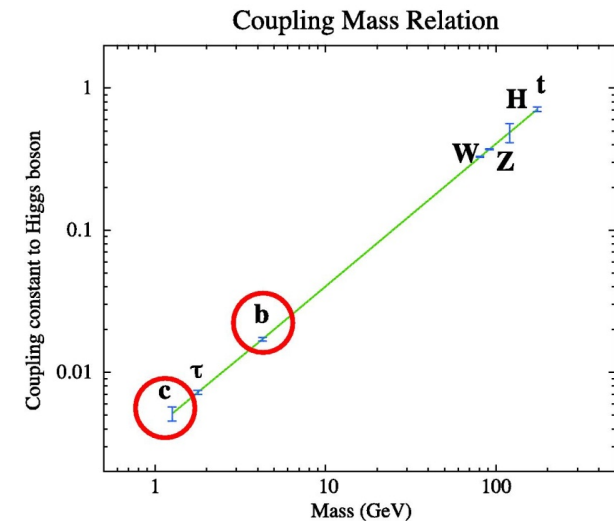
- ヒッグス($H \rightarrow bb, cc$)の精密測定のための高い位置分解能

$$\blacktriangleright \sigma = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu m)$$

→ **FPCCDバーテックス検出器を開発**

- FPCCDバーテックス検出器

- ピクセルサイズ: $5 \mu m \times 5 \mu m$
- 有感層の厚さ: $15 \mu m$ (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



FPCCDバーテックス検出器

- 優れた点

- 空間分解能

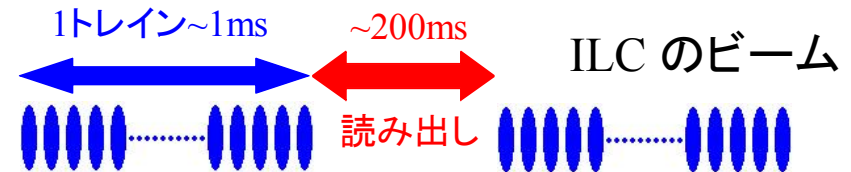
- » 高精細CCDによる

- 二粒子分解能

- » 全空乏化した有感層 → 信号電荷の熱拡散を抑制

- ビーム由来の高周波ノイズから影響を受けない

- » トレイン間に読み出すことを前提に開発している



- 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

- センサーが高精細であるため、ピクセル数が膨大

- 200 ms に全ピクセルを読み出さなくてはならない

→ FPCCD用読み出し回路の開発

読み出し回路のデザイン

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

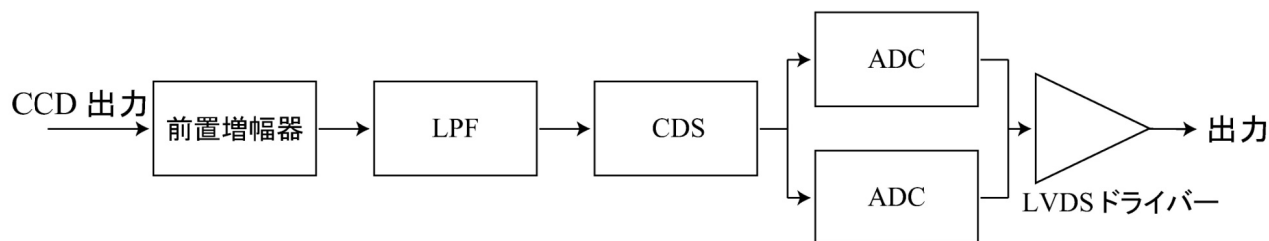
- 主な電力消費源 : ADC, 信号の出力回路
- 電荷再分配型ADCを使用 : 消費電力 ~ 10 μ W/ch
- 出力信号 LVDS : 消費電力 ~ 1.65 mW/ch

□ 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

□ ノイズレベル < 30 電子 : 信号レベル ~ 500 電子

- LPF、相関二重サンプリング回路(CDS)を使用



→ 以上のデザインで読み出し回路を製作

読み出し回路の試作

- 試作品

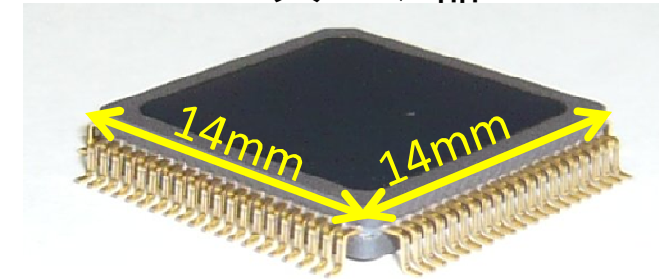
0.35 μ m TSMCプロセス

チップサイズ : 2.85 mm \times 2.85 mm

チャンネル数 : 8

パッケージ : QFP-80ピン

パッケージ品



- 試作品の単体性能

– 消費電力: ~ 13 mW (全体) $\rightarrow \bigcirc$

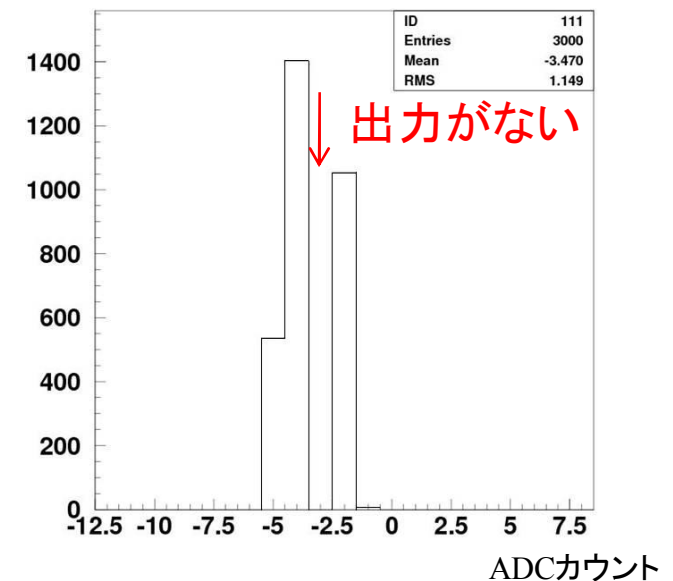
– ノイズレベル: ~ 28 電子 $\rightarrow \bigcirc$

– 読み出し速度: ~ 1.5 Mpix/sec $\rightarrow \times$

– 一部のADCカウントが出力しない

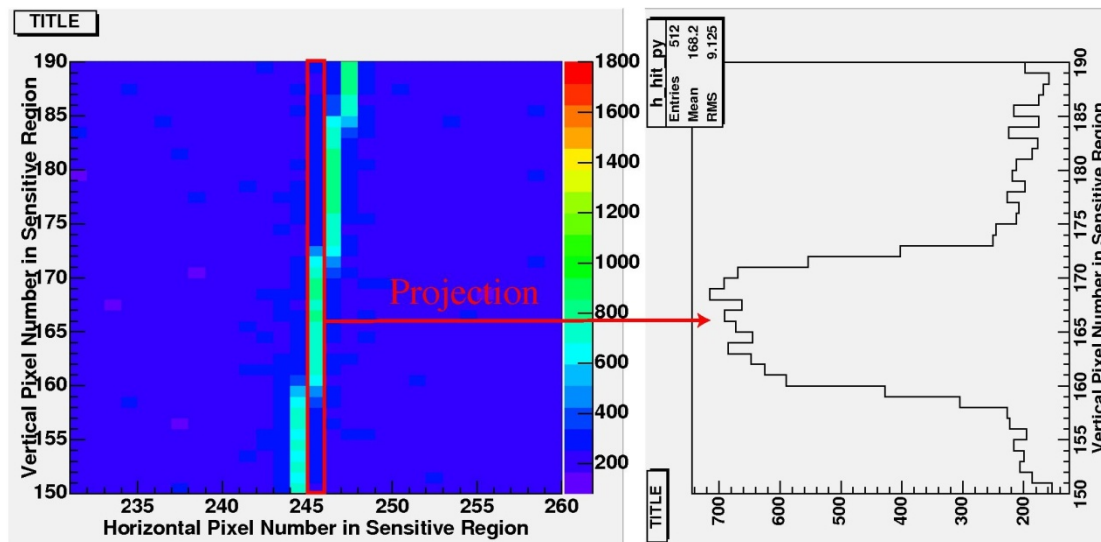
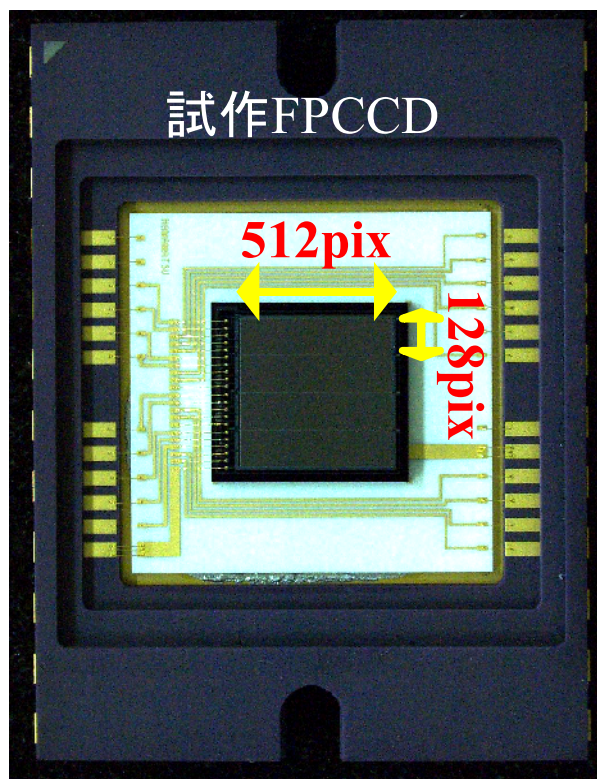
\Rightarrow 試作FPCCD の読み出し試験をおこなった

ペDESTアル分布



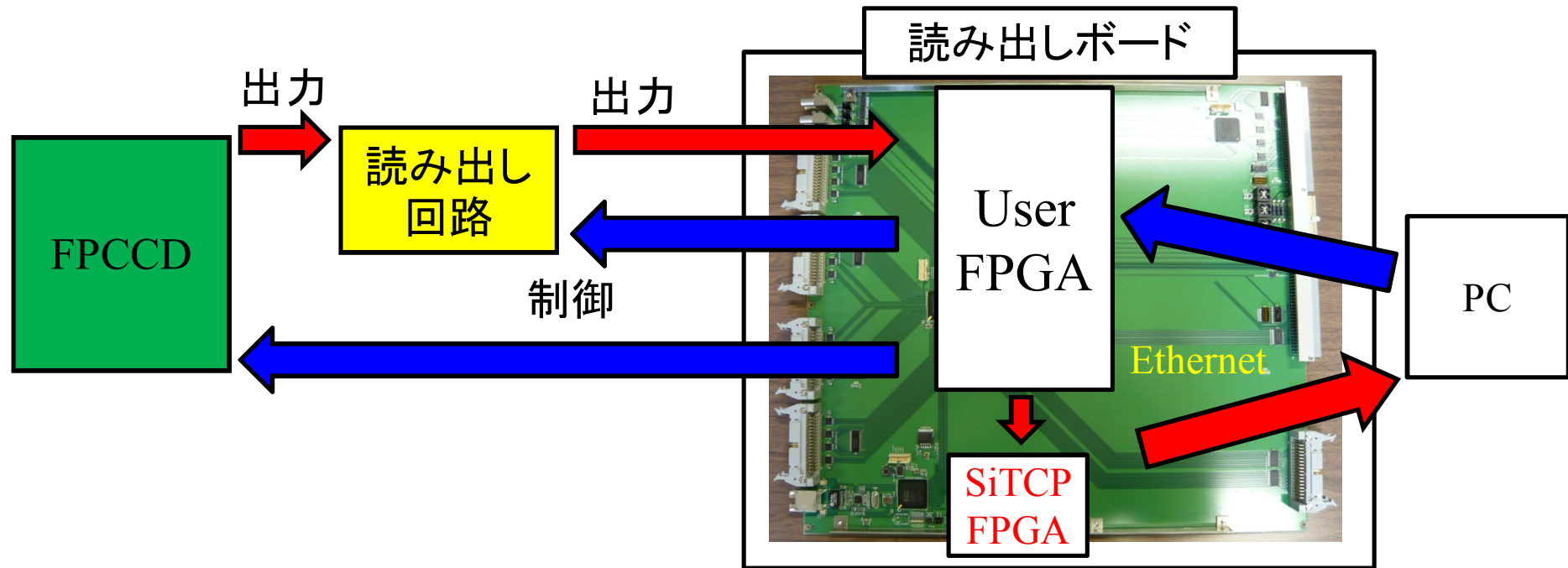
試作FPCCDの読み出し

- 試作FPCCD
 - ピクセルサイズ: $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ ← 実機: $5 \times 5 \mu\text{m}^2$
 - 有感層の厚さ: $15 \mu\text{m}$
 - $512 \times 128 \text{ pix/ch} \times 4 \text{ channel}$



FPCCD読み出しのセットアップ

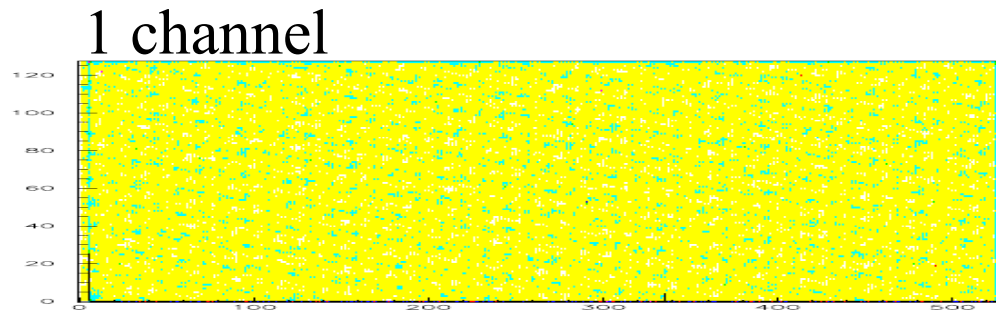
- FPCCD読み出し用ボード
 - User FPGA
 - FPCCDと読み出し回路の制御ロジックを実装
 - SiTCP FPGA
 - **イーサネット経由でのデータ転送が可能**



→ 試作FPCCD を試作読み出し回路を用いて評価した

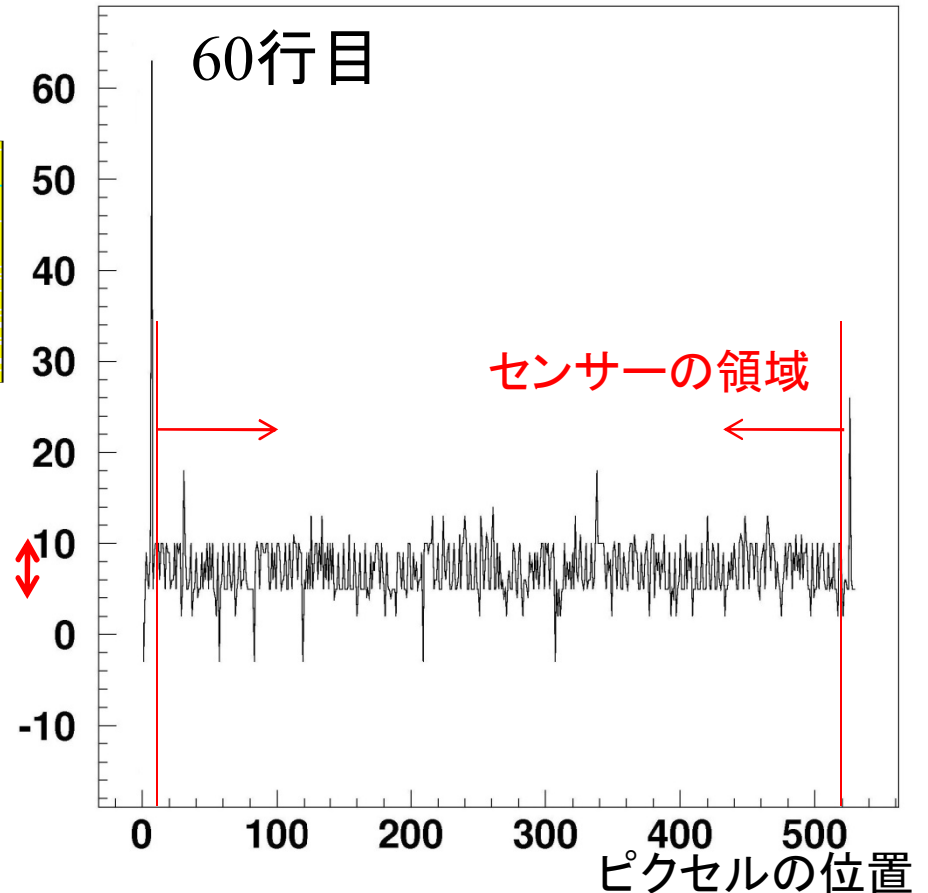
ペDESTアル：室温

- ペDESTアルをチェックした：室温



ピクセル間のばらつき

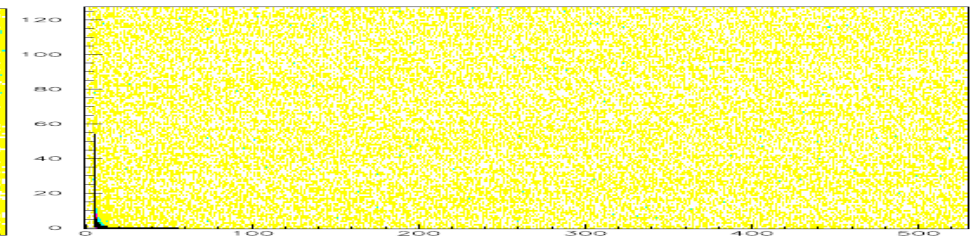
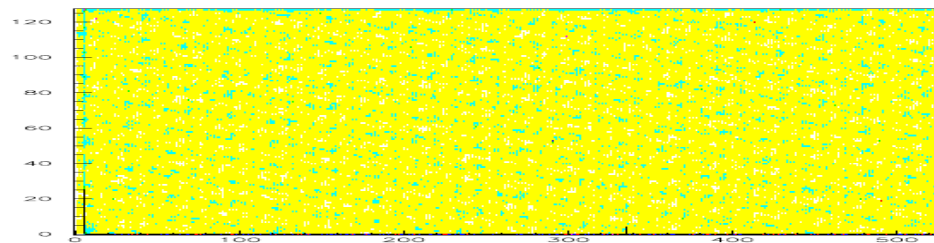
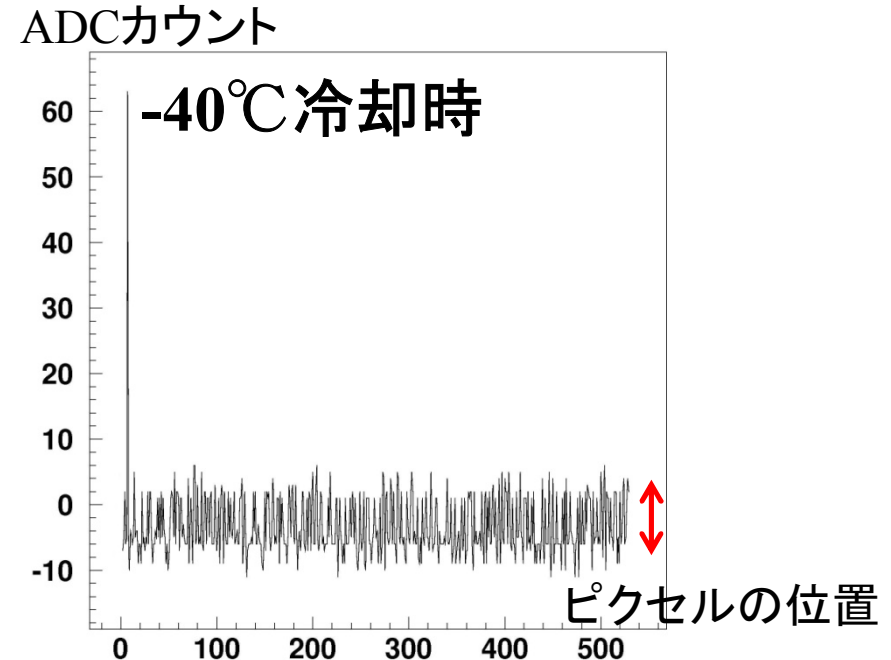
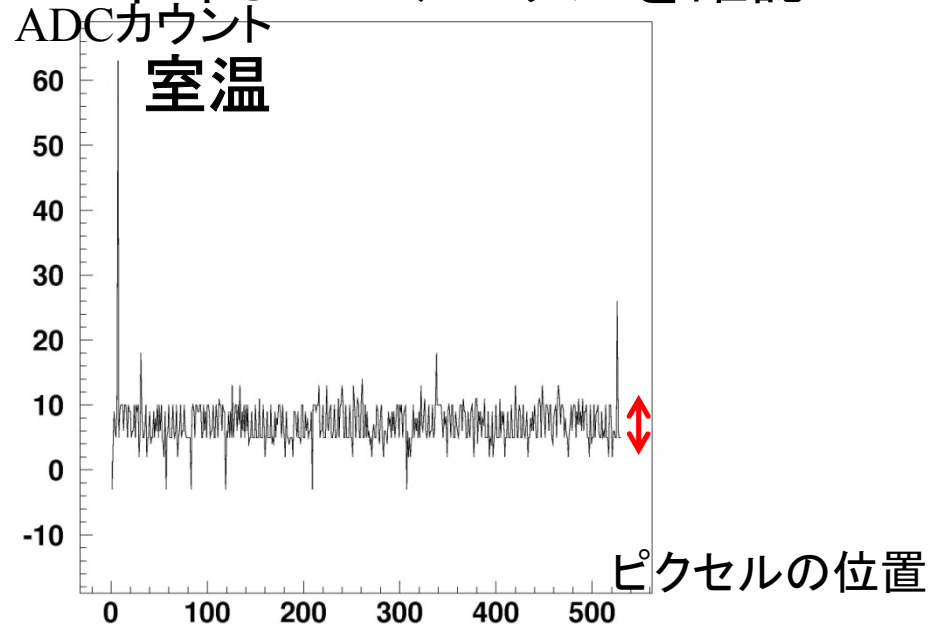
ADCカウント



- 両端のピークは最端のダミー部分 → センサーの領域外
 - ノイズがのっている
- ⇒ 冷却して、ノイズの変化を確認した

ペDESTラル

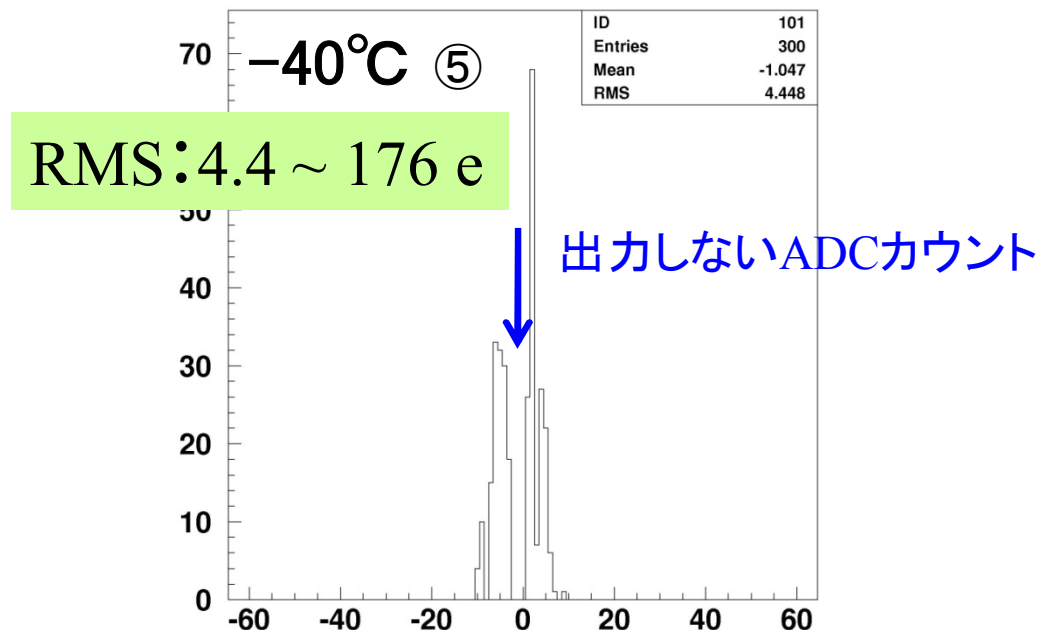
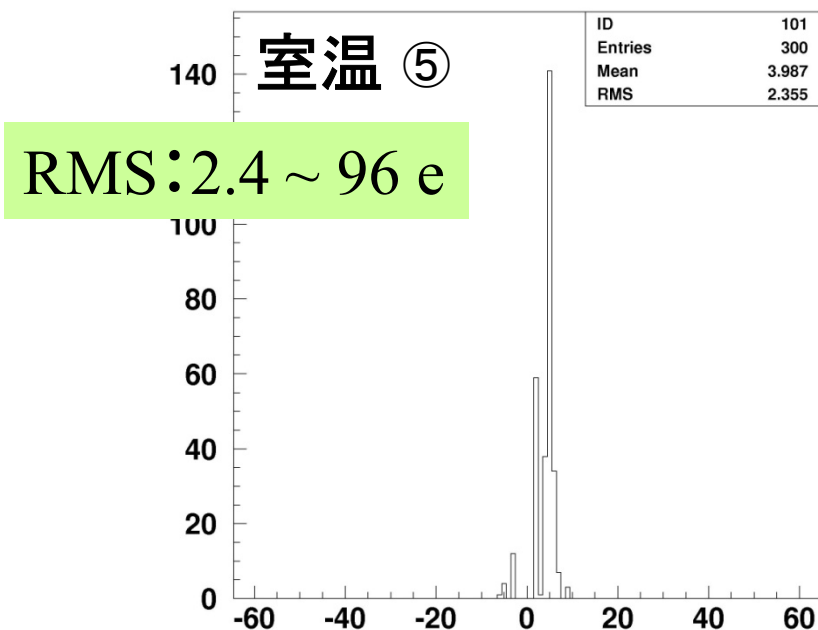
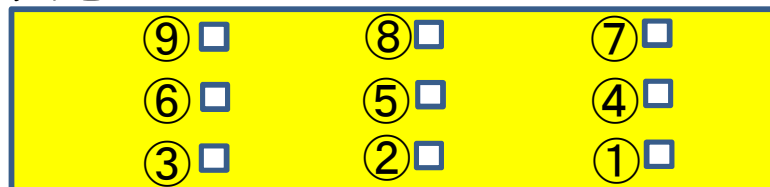
- 冷却してペDESTラルを確認



- 冷却することでノイズは抑えられた
 - ピクセルごとのばらつきは大きくなった
- ⇒ 1 pixel ごとのペDESTラルを見た

ペDESTAL:1pixel

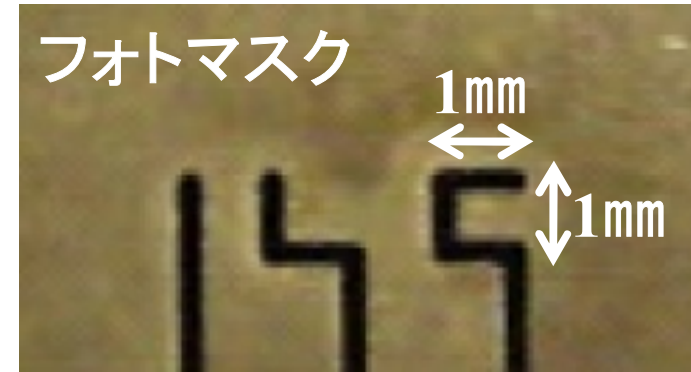
- CCD1pixelのペDESTAL分布を確認した
 - 300回読み出し
 - 9 pixelで確認



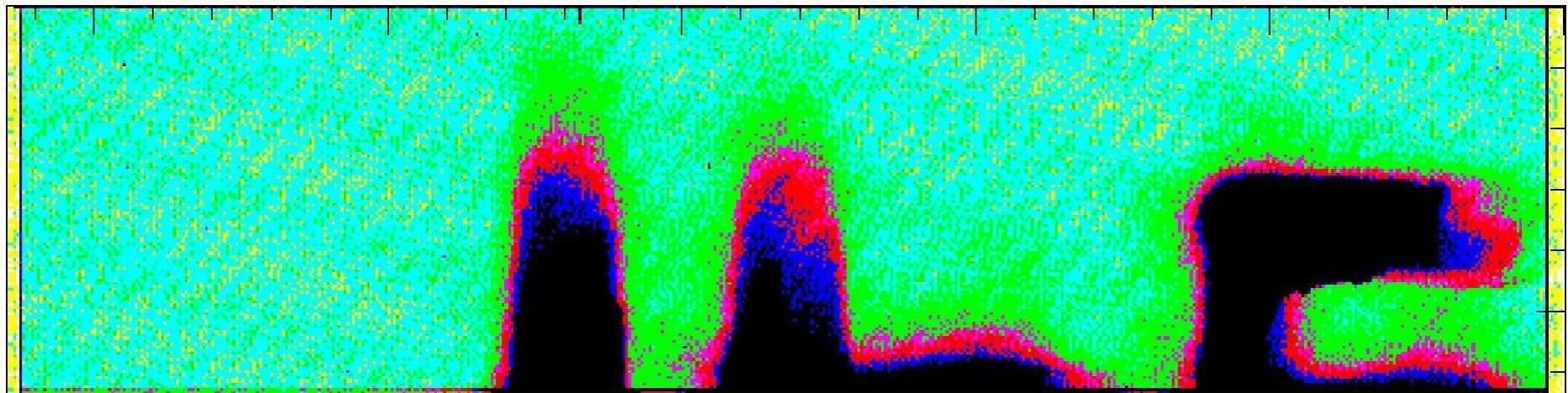
- 冷却すると広がる
 - ピクセルごとのばらつきが大きくなる原因
 - 出力しないADCカウントの影響
- 読み出し回路の問題 → 次回試作で改善

画像取得

- フォトマスクを被せ、二次元の画像を取得した
 - 光源: LED (0.2 s)
 - フォトマスク: ILC
 - 文字サイズ: 1 mm角
 - ピッチ: 0.2 mm



読みだした画像

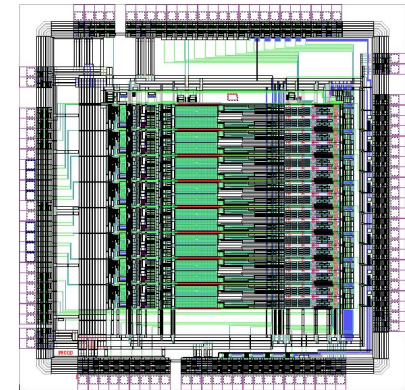


⇒ ILC を読み出せた

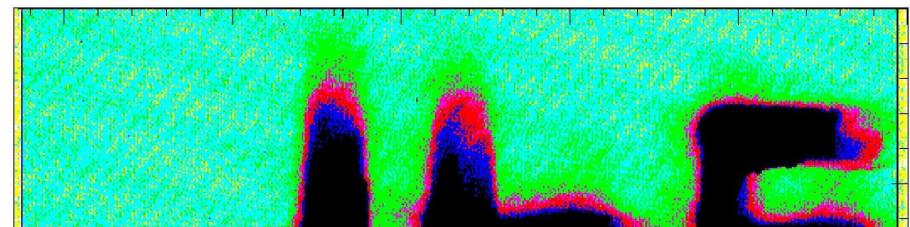
まとめ

- FPCCDバーテックス検出器を開発している
- 試作読み出し回路
 - 消費電力 $< 6 \text{ mW/ch}$ → ○
 - ノイズレベル < 30 電子 → ○
 - 読み出し速度 $> 10 \text{ Mpix/sec}$ → $\sim 1.5 \text{ Mpix/sec}$
 - 一部のADCカウントが出力しない
 - 読み出し回路の再設計・製作が進んでいる

新レイアウト



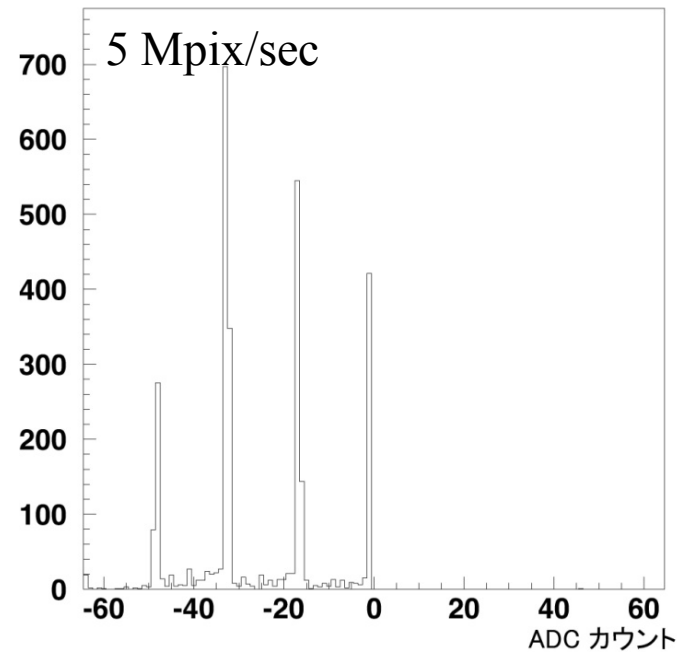
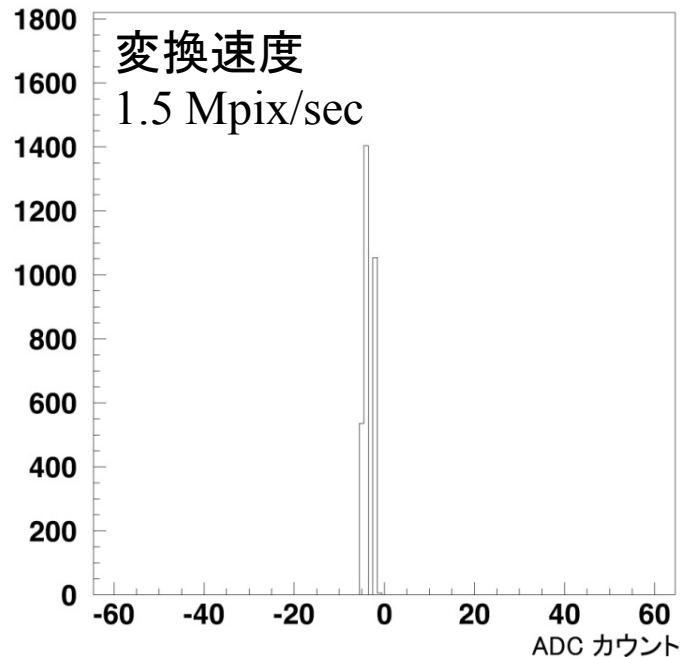
- 試作FPCCDの性能を試作読み出し回路で評価
 - 冷却するとペDESTALの中心に出力しないADCカウントが位置する
 - ペDESTALが広がる
 - 画像を取得



試作読み出し回路の性能

- 読み出し速度 ~ 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

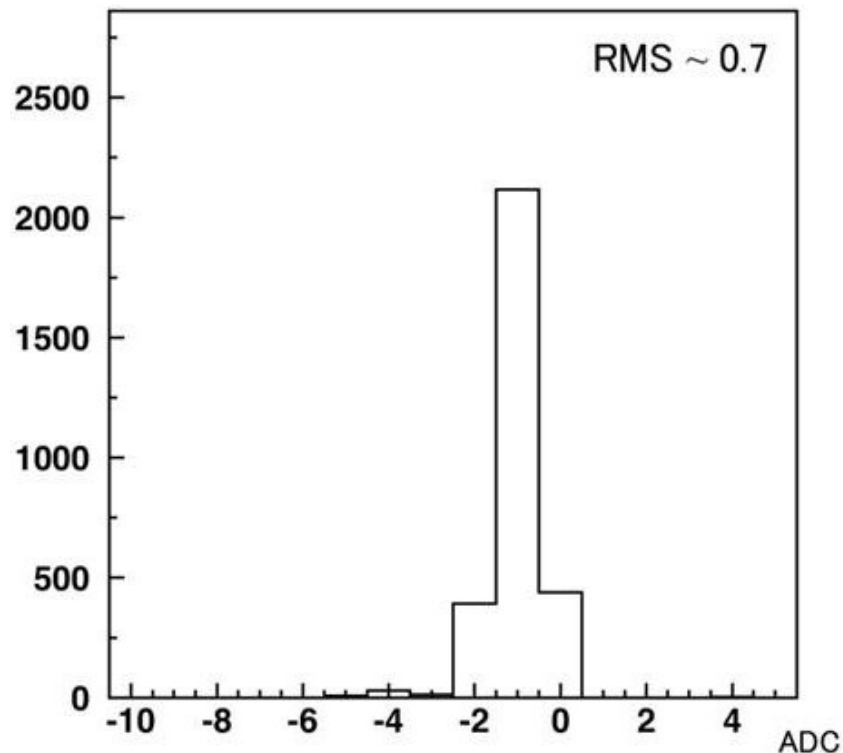


- \blacktriangleright 原因:コンパレータに流入する電流が不足
→ 次回試作で電源を強化

ノイズレベルの測定

- ペDESTAL分布
 - 読み出し速度 ~ 1.5 Mpix/sec

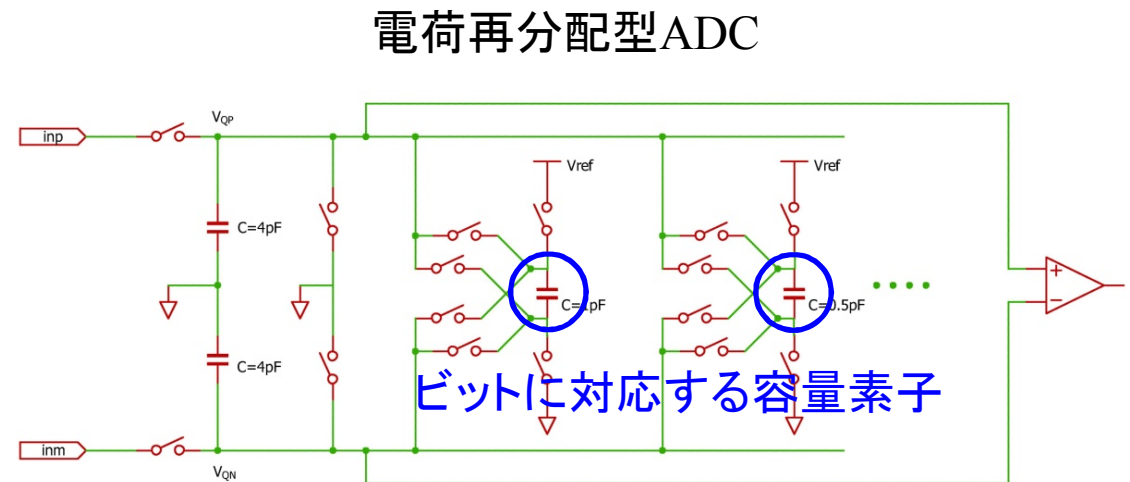
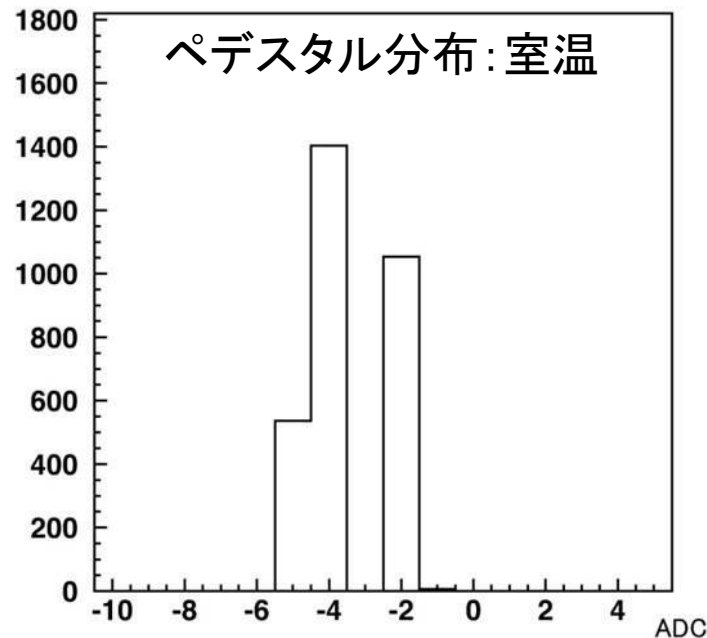
ペDESTAL分布: -10°C



- 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

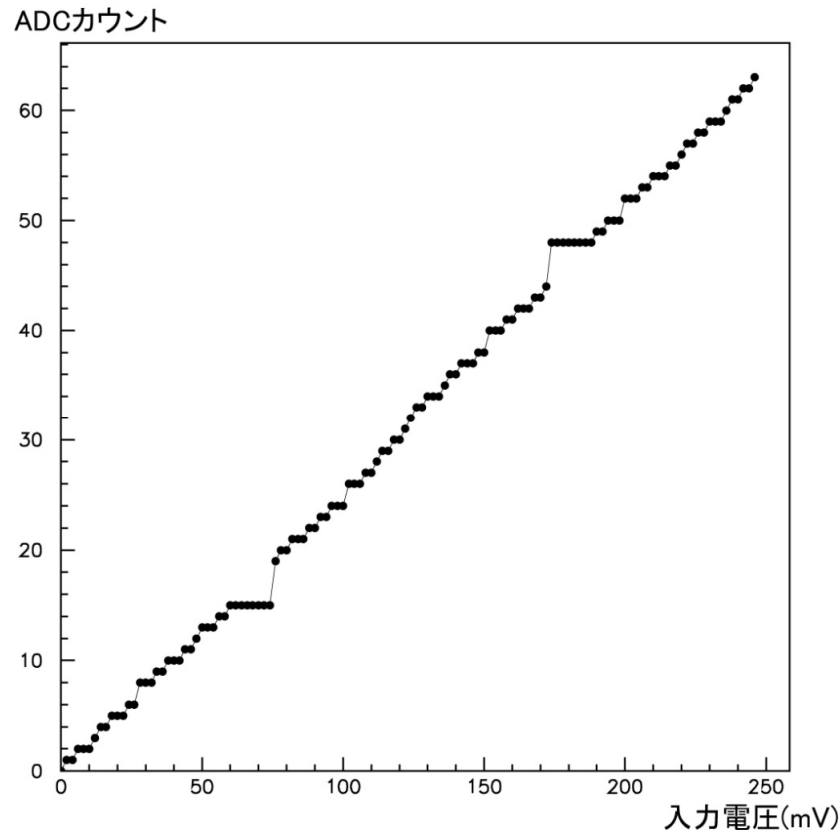


- ADCのビットに対応する容量素子の容量が浮遊容量により増大
 - 容量の比が 32:16:8:4:2:1 からずれている
- **原因**: 容量素子の接続を切り替えるスイッチ
- 容量に比例した個数のトランジスタをスイッチに使用することで解決を試みた

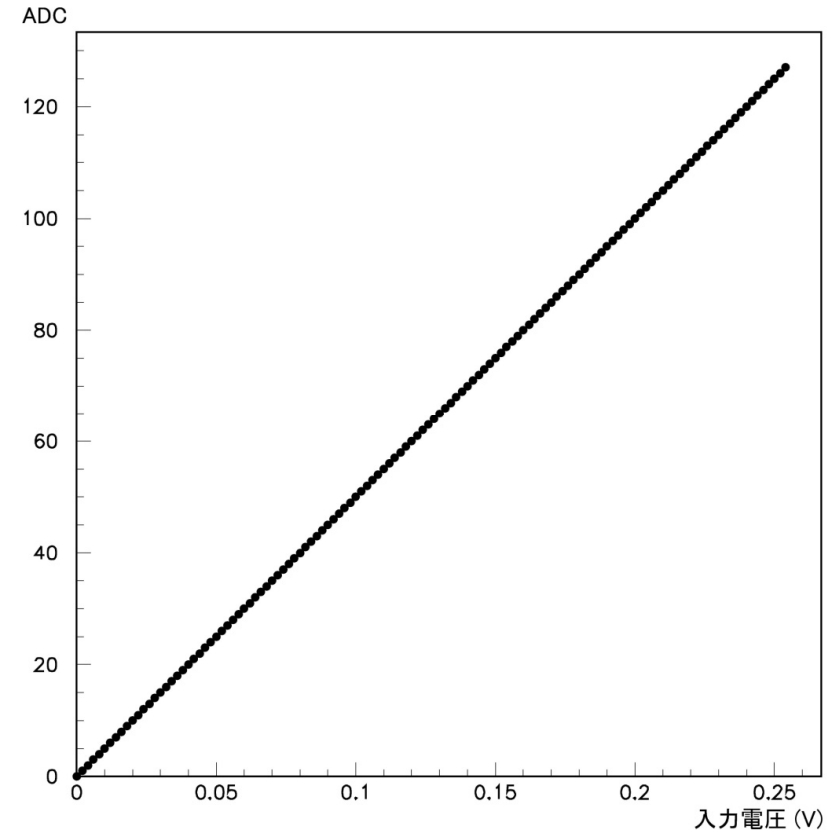
ADCのシミュレーション

- 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



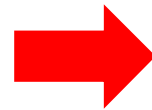
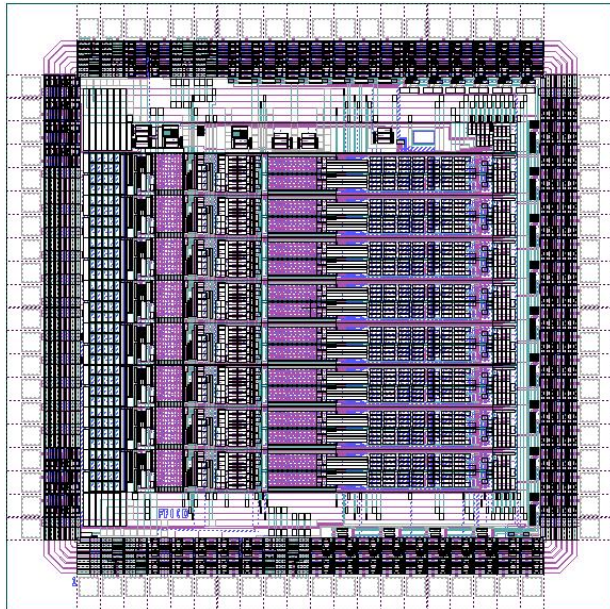
- 再設計したADCではすべてのADCが出力した
→ 次回試作で出力しないADC問題の解決が見込める

Layout design

○ Layout design was completed.

- 0.35 μ m TSMC process \Rightarrow the same
- Chip size : 2.85 mm x 2.85 mm \Rightarrow **4.3 mm x 4.3 mm**
- # of pad : 80 \Rightarrow **100**
- # of channel : 8 \Rightarrow the same

Old



New

