

SOI技術を用いた ILC衝突点ビームモニタ“ペアモニタ” の読み出し回路の開発

佐藤優太郎, 新井康夫^A, 池田博一^B, 田窪洋介,
長嶺忠, 山本均, その他SOIPIXグループ

東北大学, KEK^A, JAXA (宇宙航空研究開発機構)^B

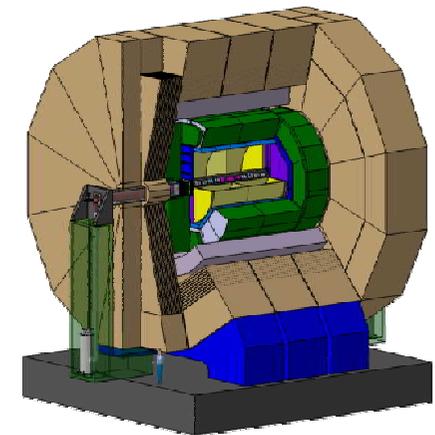
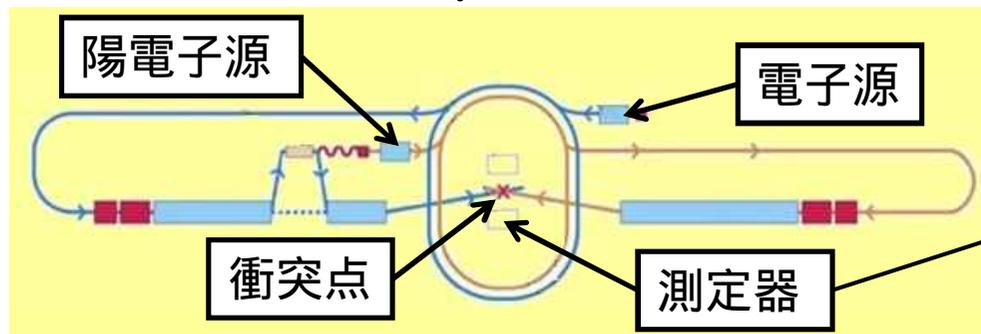
講演内容

1. イントロダクション
 - ILC
 - ペアモニタ
2. 読み出し回路の開発
 - デザイン・レイアウト
 - 動作試験結果
3. まとめ

ILC と衝突点ビームモニタ

ILC (International Linear Collider)

- 重心系エネルギー：最大 500 GeV (アップグレード → 1 TeV)
- 積分ルミノシティ (4年間) : 500 fb⁻¹
- ビームサイズ : $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (639\text{nm}, 5.7\text{nm}, 300\mu\text{m})$



→ 高ルミノシティを保つために、衝突点でのビーム測定が必要

衝突点ビームモニタへの要請

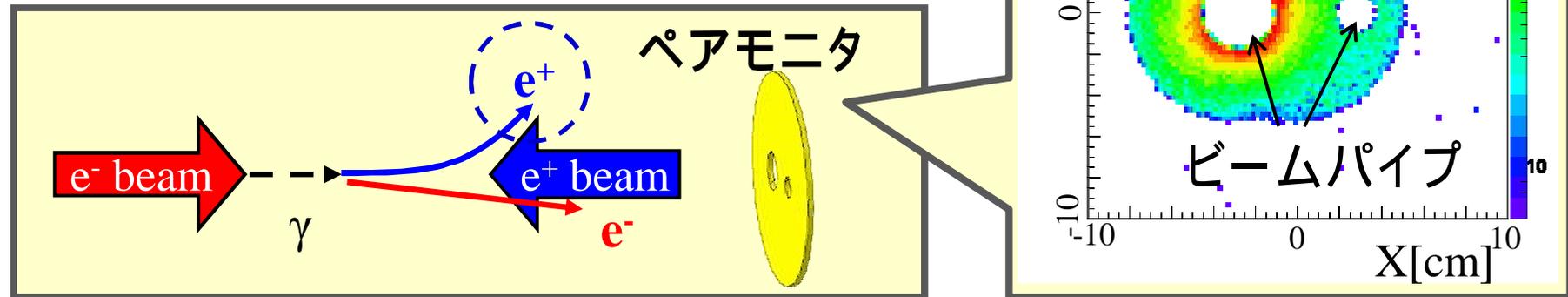
- ビームサイズ測定精度 : < ~10%
- 他の粒子検出器の障害にならないこと
- 素早いフィードバック

➔ **ペアモニタ (ILD の基本デザインの検出器)**

ペアモニタ

ビーム測定原理

- ビーム衝突時に e^+e^- ペアが大量に生成
- 対向するビームと同電荷粒子は大きく散乱
- 大きく散乱された粒子がビーム情報を持つ



ペアモニタは e^+e^- のヒット分布から、ビーム測定を行う

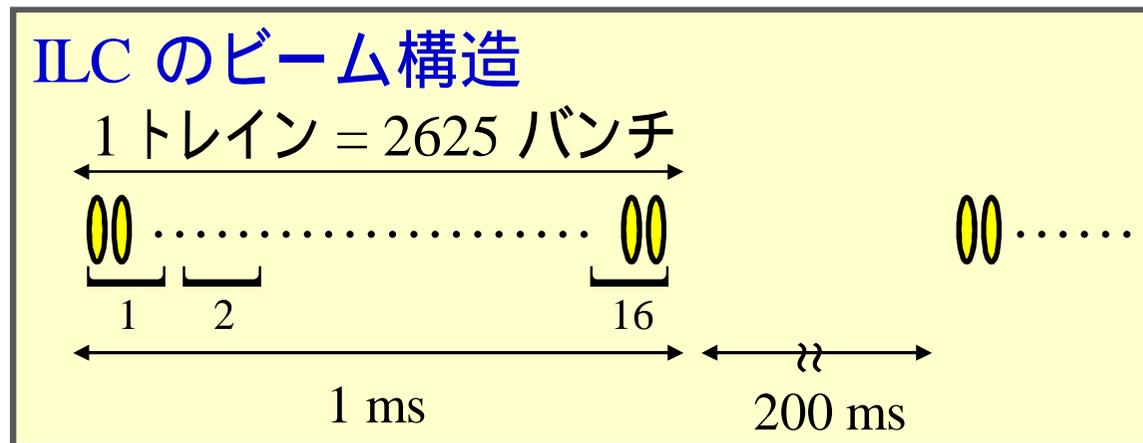
デザイン

- シリコン・ピクセル・センサー
- 半径 : 10 cm
- 衝突点から ~ 4 m の地点に設置予定

読み出し回路の開発

読み出し回路の設計思想

- ペアモニター上の e^+e^- のヒット分布の取得
 - トレインを16分割して、それぞれの部分でヒット数をカウント
 - カウントレート： $< 2.5\text{MHz}$ (1バンチ当たり1個のヒット)
 - エネルギーの情報が必要ではない
- トレイン間 ($\sim 200\text{ ms}$) で全てのデータを転送



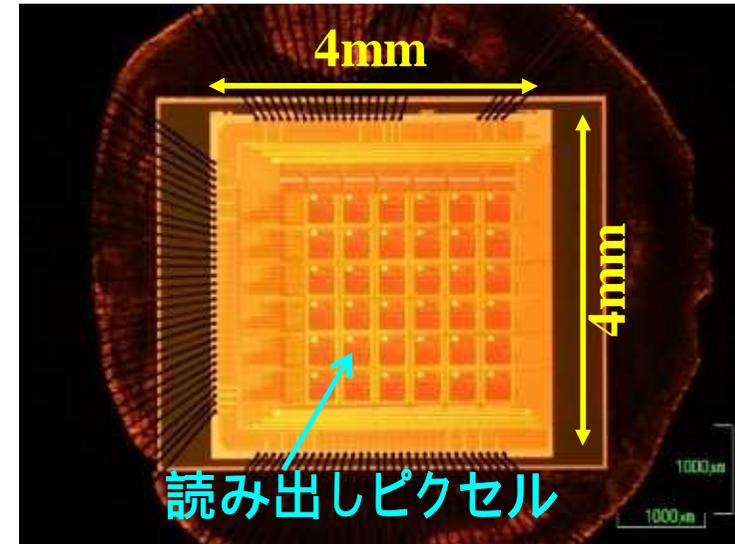
これらの設計思想の基にして回路の設計・製作が行われた。

試作回路

2008年10月にCMOS試作回路を製作した。

CMOS試作回路

- 製造プロセス : TSMC 0.25 μm CMOS
- チップ・サイズ : 4 x 4mm²
- ピクセル数 : 36 (= 6 x 6)
- ピクセル・サイズ : 400 x 400 μm^2
- パッケージ : PGA144



設計通りに動作することを報告した (@第64回年次大会)

SOI試作回路

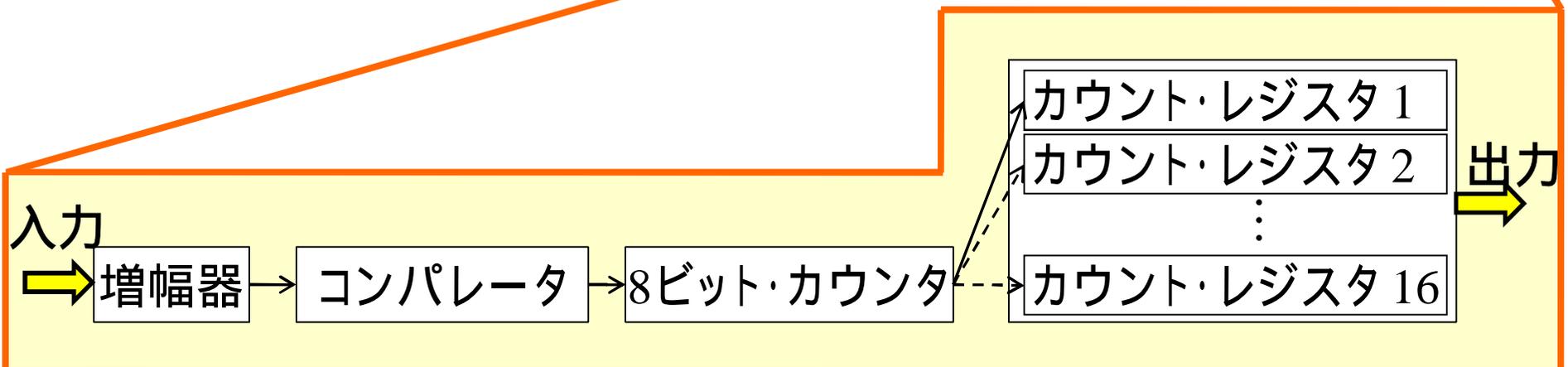
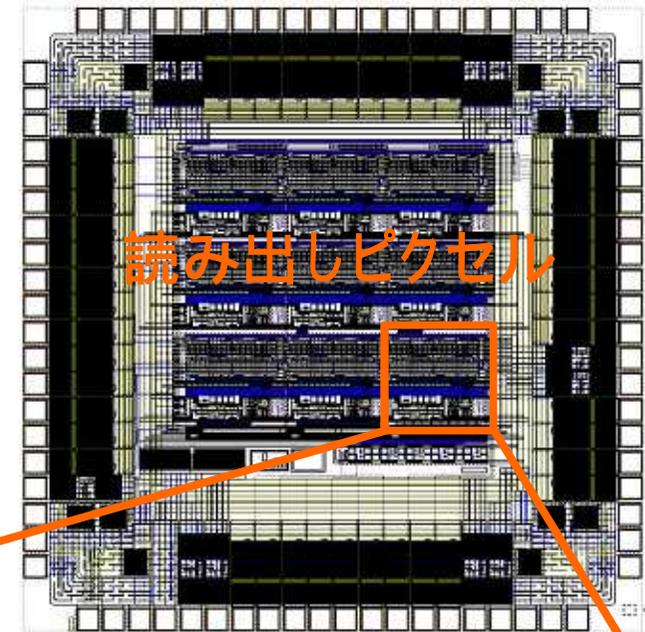
- KEKのMPW(Multi Project Wafer) Run に参加して、SOI (Silicon On Insulator) 試作回路を製作

SOI試作回路のデザイン

回路デザイン

- 9 (3 x 3) 個の読み出しピクセル
 - 増幅器
 - コンパレータ
 - 8ビット・カウンタ (ヒット数をカウント)
 - 16個のカウント・レジスタ (ヒット数を保存)
- シフトレジスタ (読み出しピクセルを指定)

レイアウト



SOI試作回路の製作

プロトタイプ回路

- 製造プロセス : FD - SOI CMOS 0.2 μm
- チップサイズ : 2.5 x 2.5 mm²
- パッケージ : QFP80
- **今回は読み出し回路部のみを製作**
- CMOS試作回路からの変更点
 - TOT(Time-Over-Threshold) 回路 → RC回路

パッケージ

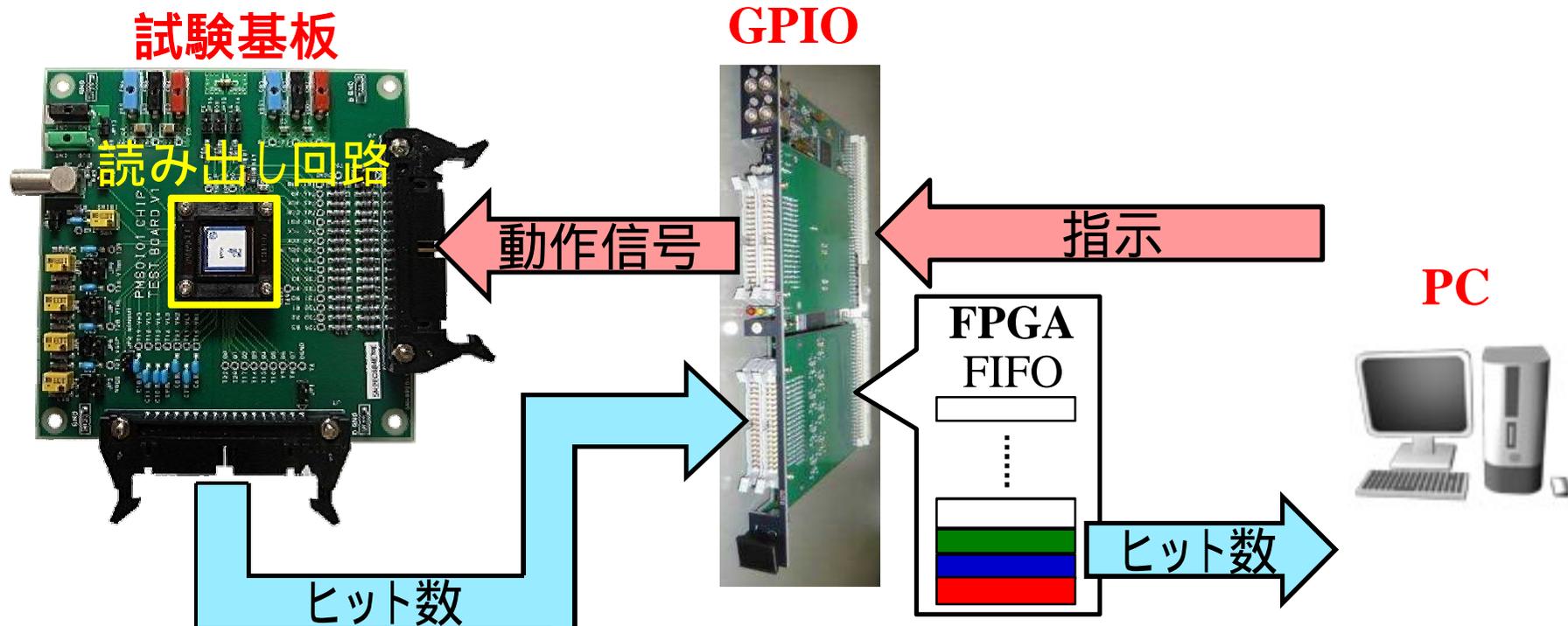


2009年8月に完成。
動作試験結果を報告する。

試験システム

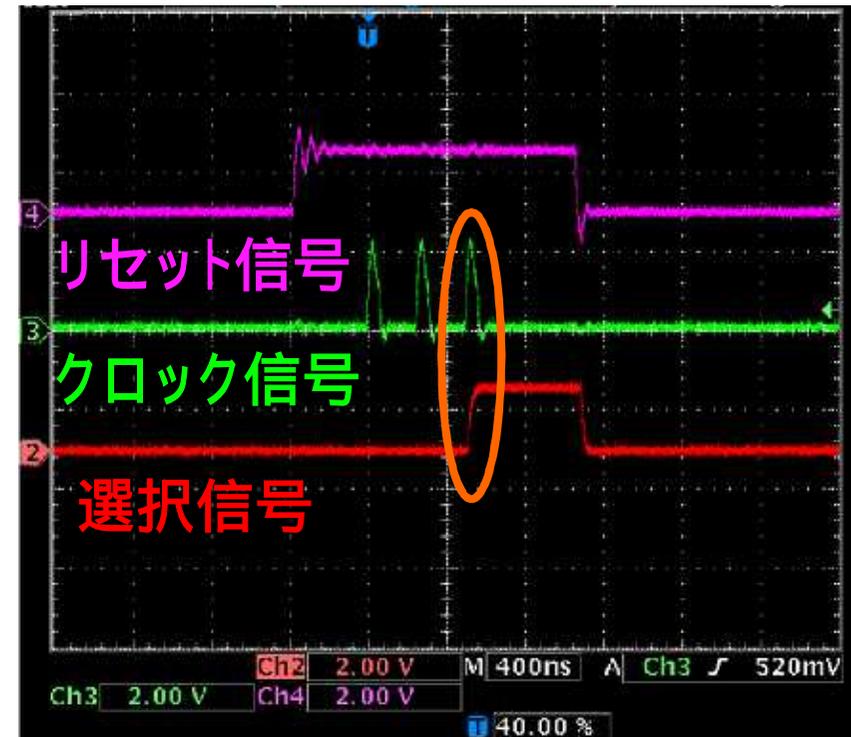
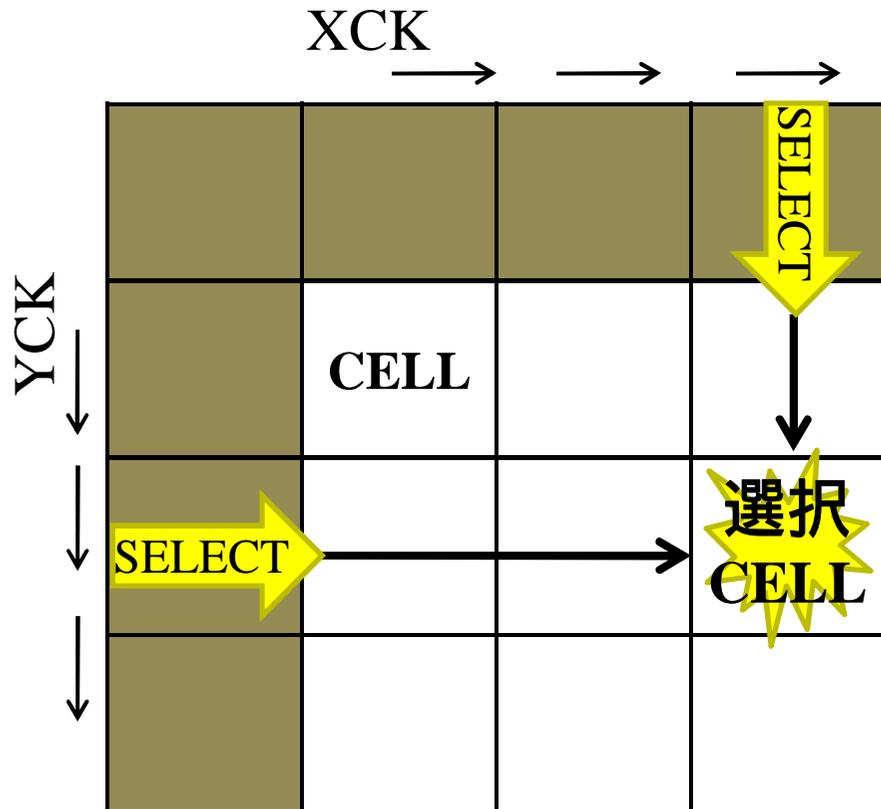
試験システム

- VME の試験システムを使用
 - KEK-VME 6U モジュール
 - 回路の制御と読み出しを担当
- テスト・ジョブの管理とGPIO モジュールの制御はPC で行う



ピクセル選択のためのシフトレジスタ

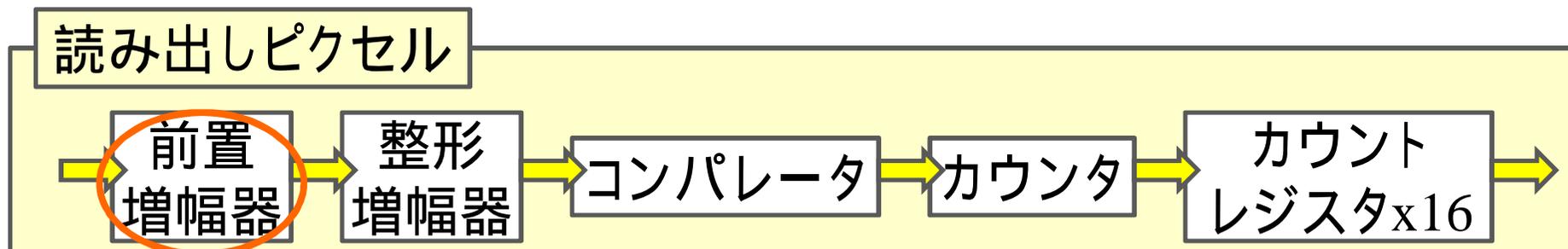
ピクセル選択のためのシフトレジスタの動作を確認した。



- クロックの3発目で、選択信号が立ちあがっている。

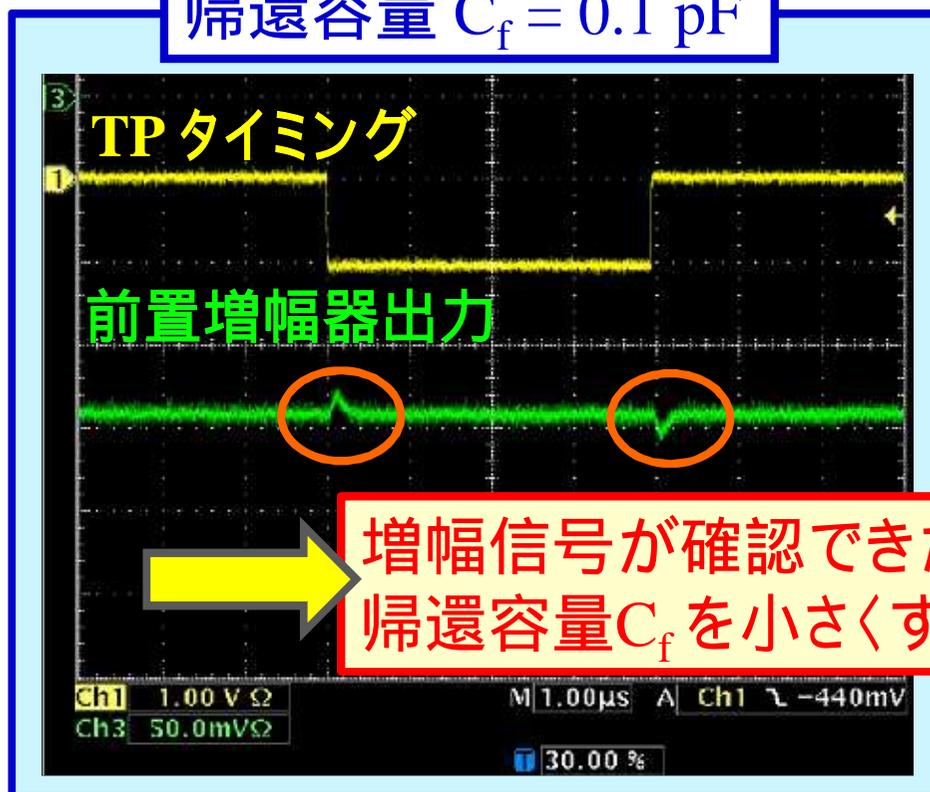
→ シフトレジスタが正常に動いている。

前置増幅器の出力

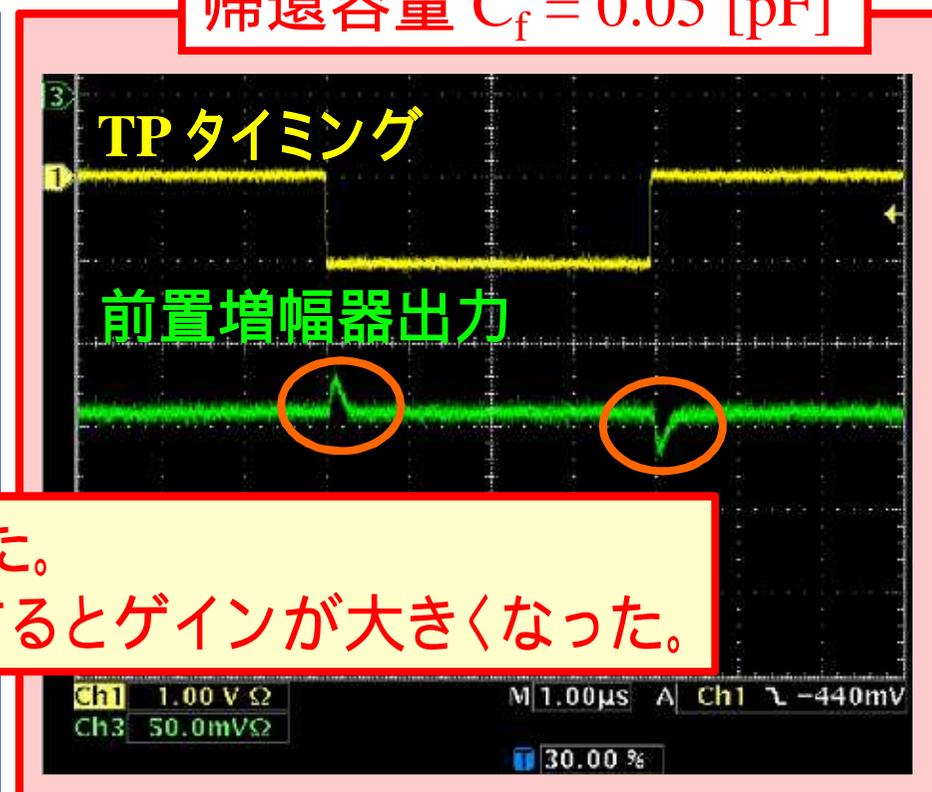


前置増幅器の出力を確認した。

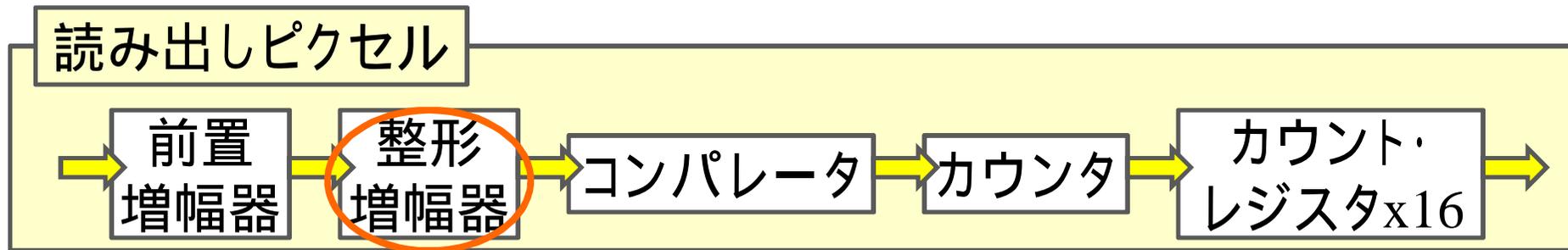
帰還容量 $C_f = 0.1 \text{ pF}$



帰還容量 $C_f = 0.05 \text{ [pF]}$

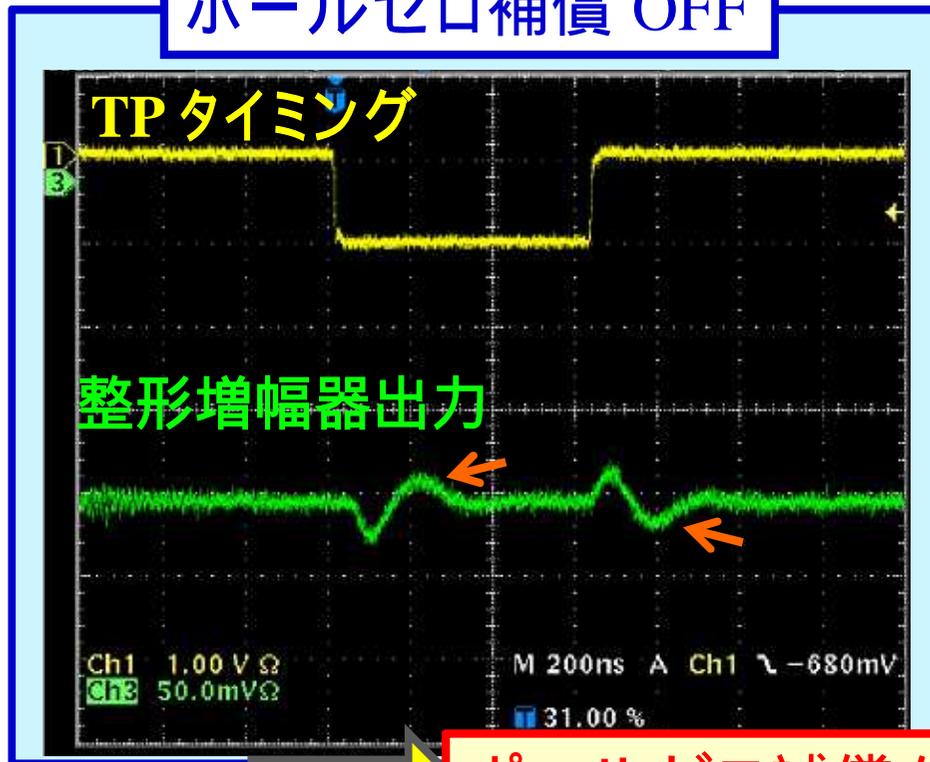


整形増幅器の出力

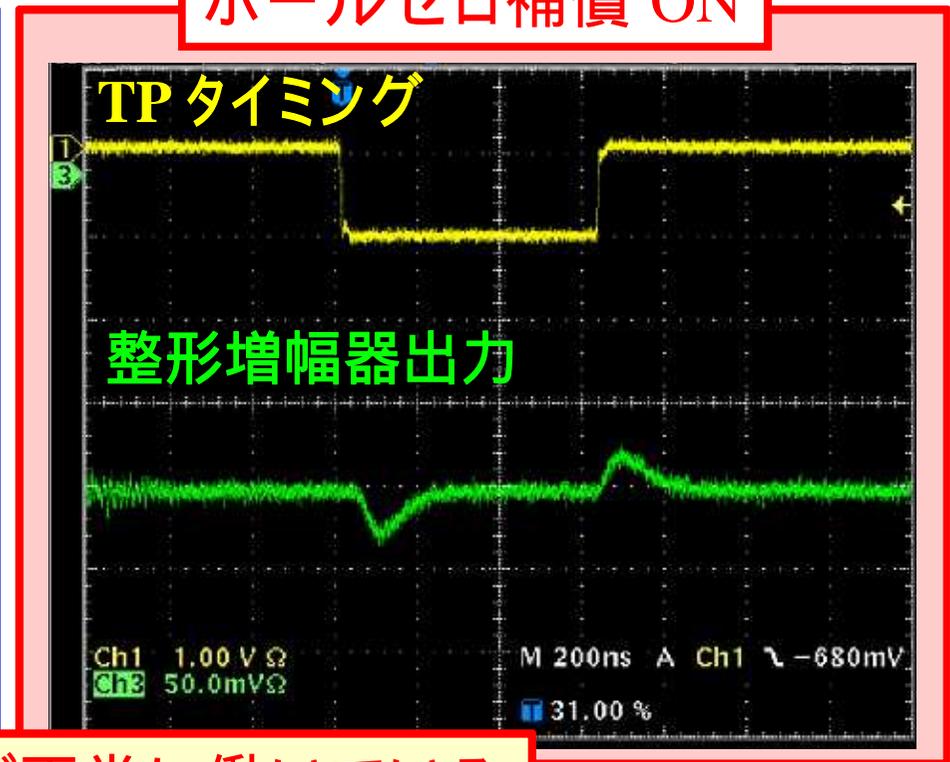


整形増幅器の出力を確認した。

ポールゼロ補償 OFF

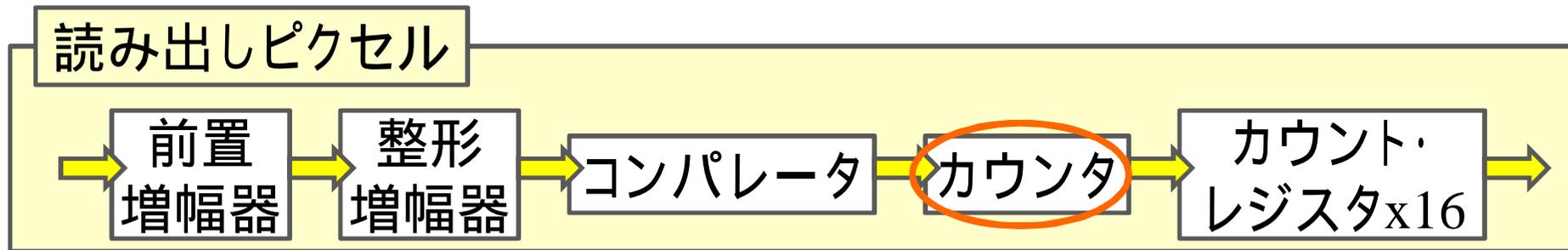


ポールゼロ補償 ON



ポールゼロ補償が正常に働いている

8ビット・カウンタの応答

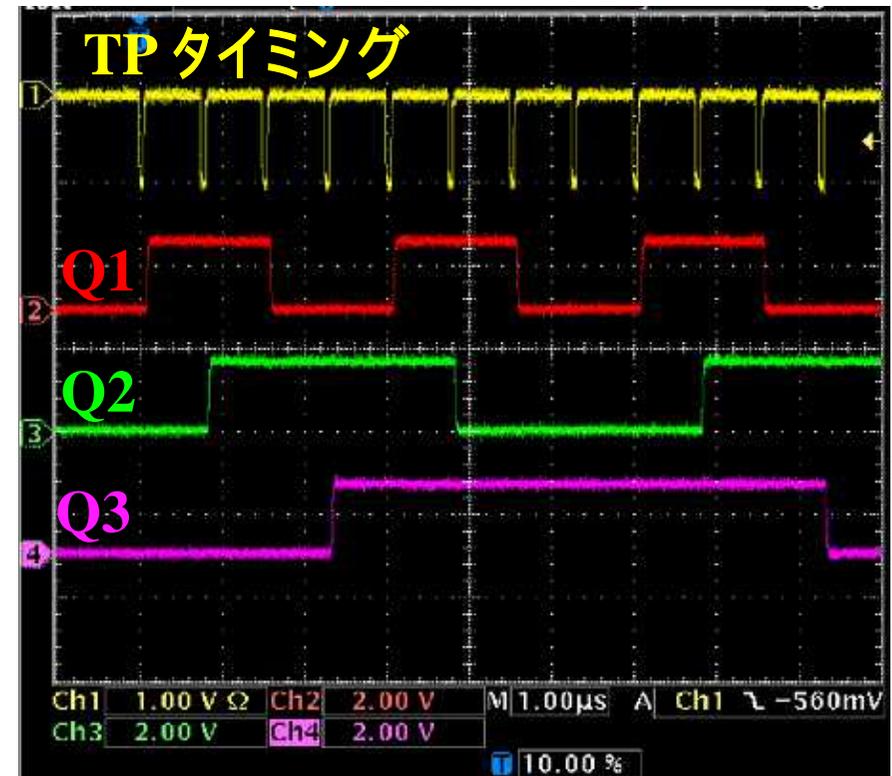


カウンタの応答を確認した。

- グレイコードを使用している。
 - 常に1ビットしか変化しない。

バイナリコード	グレイコード
000	000
001	001
010	011
011	010
100	110

Red arrows in the original image point to the bit that changes between adjacent rows: 0 to 1 in the second bit of 001, 1 to 0 in the second bit of 011, 1 to 0 in the second bit of 010, and 1 to 1 in the first bit of 110.

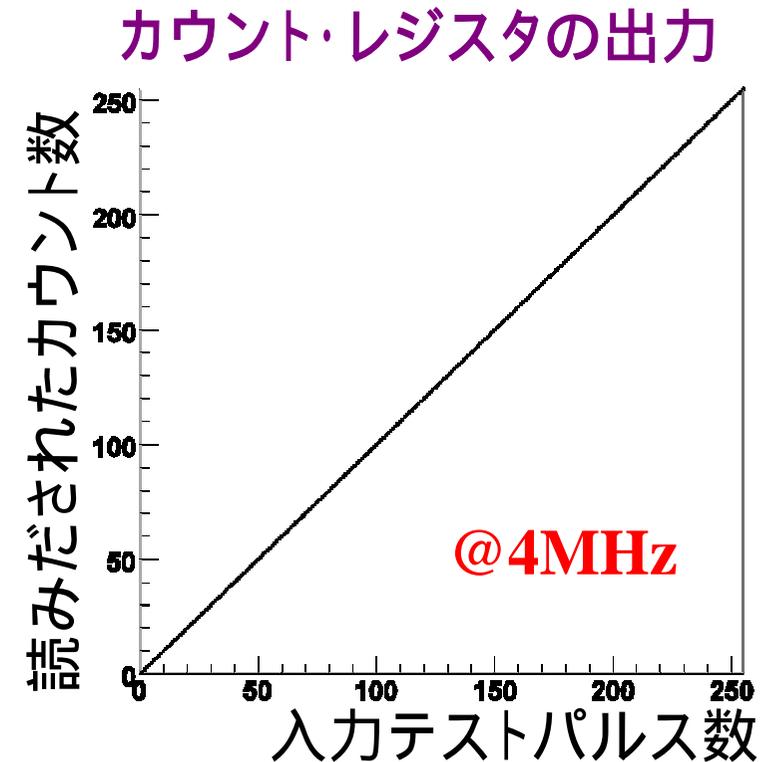
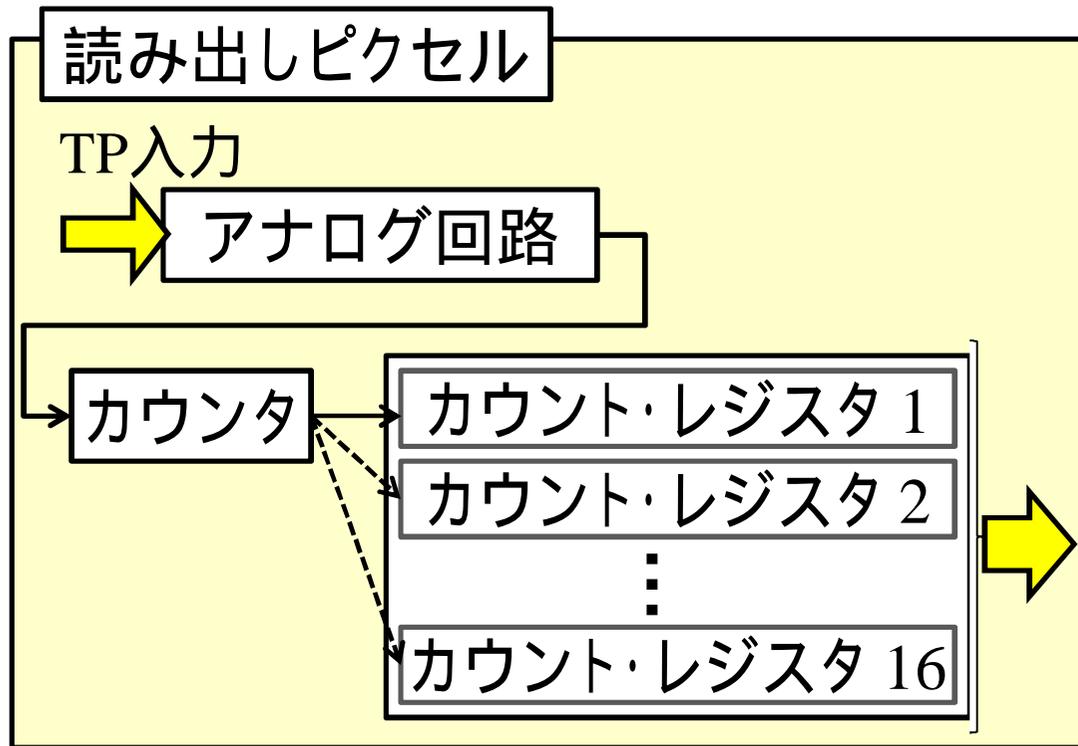


カウンタが正常に動いている

ヒットカウントの読み出し

カウント・レジスタの出力を確認した。

- カウント・レジスタを切り替えながら、テストパルス (4MHz) を入力した。



要求されるヒットレートにおいて、
ヒットカウントを正しく読み出せた。

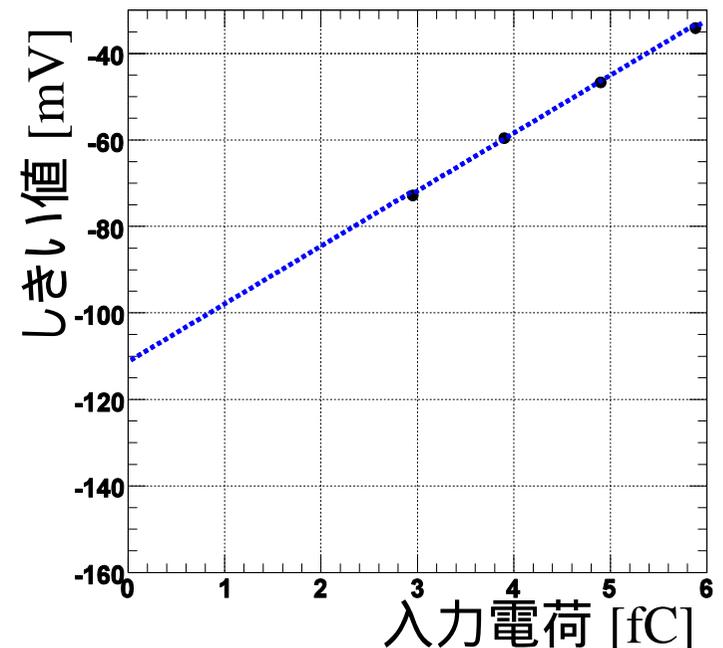
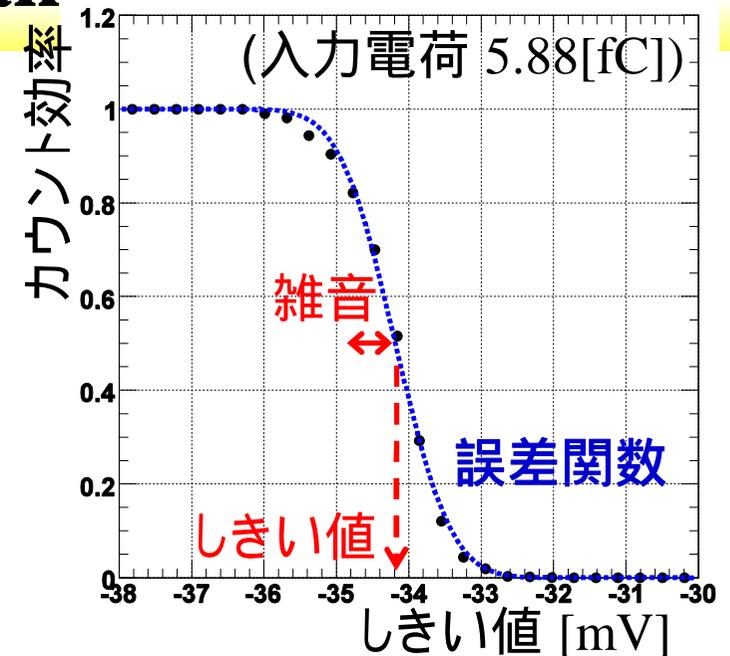
Threshold Scan

コンパレータのしきい値を変化させて、Threshold scan を行った。

- 誤差関数でフィッティングした。
 - しきい値 : -34.18 ± 0.008 [mV]
 - 雑音 : 0.6041 ± 0.01183 [mV]

雑音を等価雑音電子数に換算するため、増幅率を測定した。

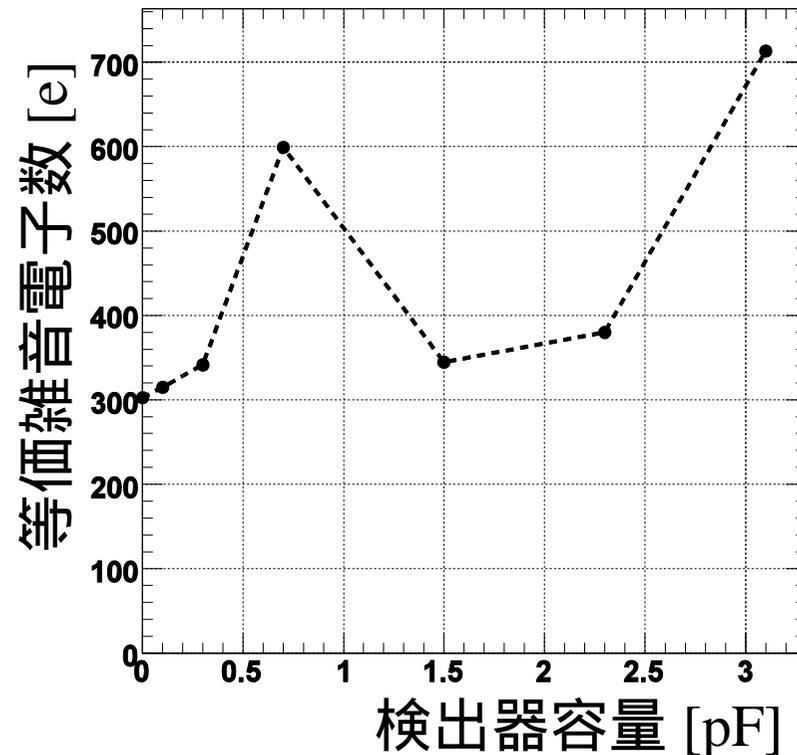
- 傾き → 増幅率 13.0 [mV/fC]



雑音の検出器容量依存性

求められた増幅率から、等価雑音電子数を見積もった。

- 読み出しピクセルには、それぞれ異なる検出器容量が付いている。



- 特定のセルの雑音が大きいの原因追究中
- 検出器容量が数pFの場合、等価雑音電子数は300~700 [e] 程度

→ 典型的な信号(~20,000 [e]) に比べて雑音は十分小さい

まとめ

- ILC では高ルミノシティ維持のために衝突点でのビームサイズ測定が必要。
→ペアモニタ (ILDの基本デザインの検出器)

ペアモニタのための読み出し回路の開発を進めている。

- SOI技術を用いた試作回路を製作し、動作試験を行った。
 - 要求性能を満たし、動作することを確認した。
 - 雑音が典型的な信号レベルに対して十分小さいことを確認した。
 - ✓ 特定のセルの雑音が大きい原因の追究。