



TOHOKU  
UNIVERSITY



# 国際リニアコライダーのための Fine Pixel CCD崩壊点検出器 の中性子耐性評価

2016年3月21日 JPS@東北学院大学

村井峻亮

石川明正、宮本彰也<sup>A</sup>、杉本康博<sup>A</sup>、Constantino Calancha<sup>A</sup>、  
佐藤比佐夫<sup>B</sup>、池田博一<sup>C</sup>、山本均

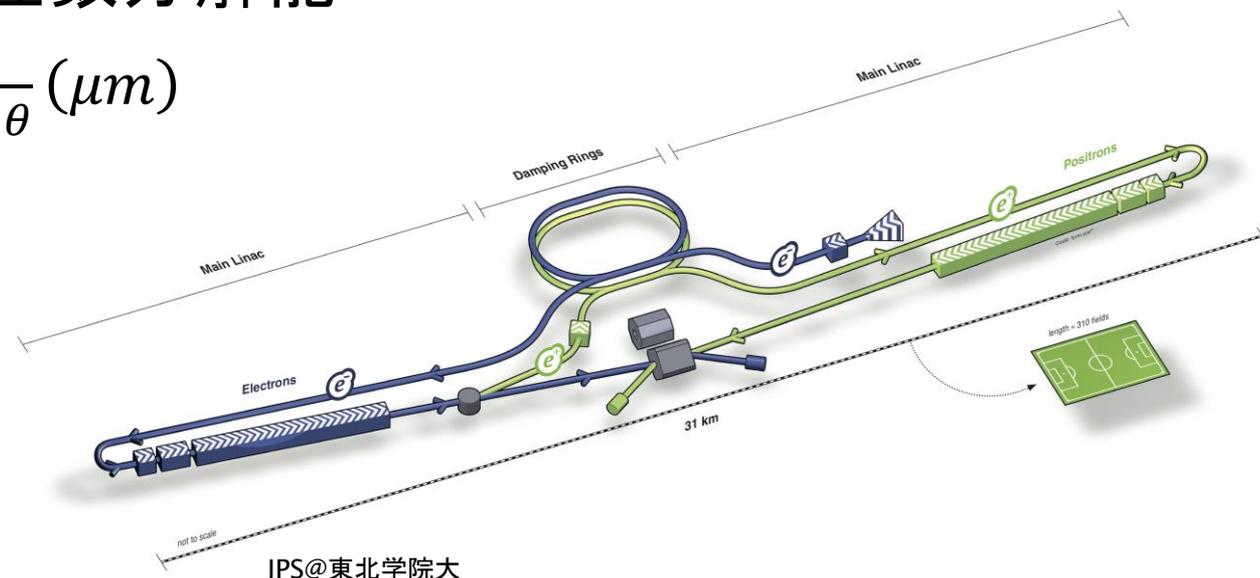
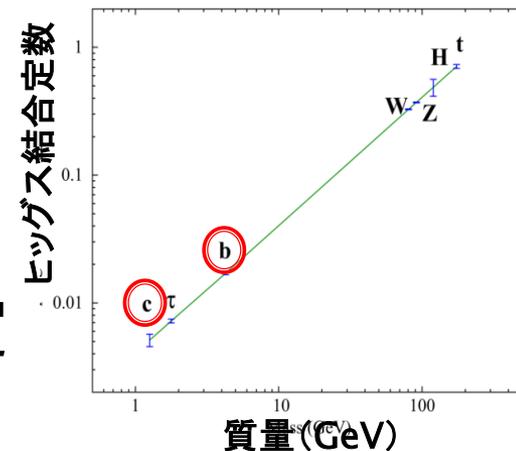
東北大理、高工研<sup>A</sup>、信州大理<sup>B</sup>、JAXA<sup>C</sup>

# 国際リニアコライダー(ILC)実験

- ▶  $e^+e^-$ 衝突型の線型加速器
  - 重心系エネルギー: 250~500GeV(→1TeV)
  - ルミノシティ:  $1.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} @ 500 \text{GeV}$
- ▶ 主な目的としてヒッグスの結合定数の測定
  - b,cクォークの識別→崩壊点検出利用
- ▶ 要求される衝突径数分解能

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

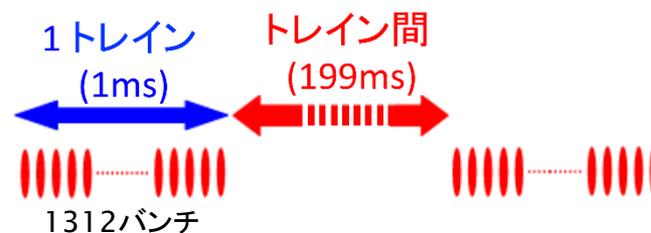
質量と結合定数の関係



# ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ 正確なトラッキングのためにピクセル占有率数%以下が要求される
  - 通常サイズ( $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ )のピクセル検出器で1トレイン信号を蓄積すると、最内層(半径1.6cm)で占有率が10%以上

- ▶ 占有率を下げる2つの方法
  - ① 1トレイン中に何回も読み出す
  - ② ピクセルサイズを小さくする



ILCのビーム構造

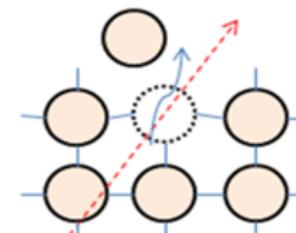
②を採用したのが



**Fine Pixel CCD**  
= FPCCD

ピクセルサイズ  
 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ で  
ピクセル占有率~数%  
を達成!

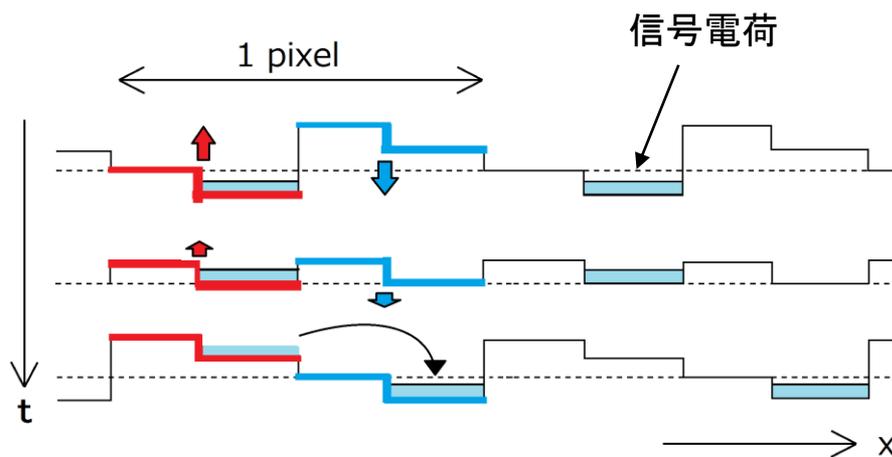
# 放射線ダメージ



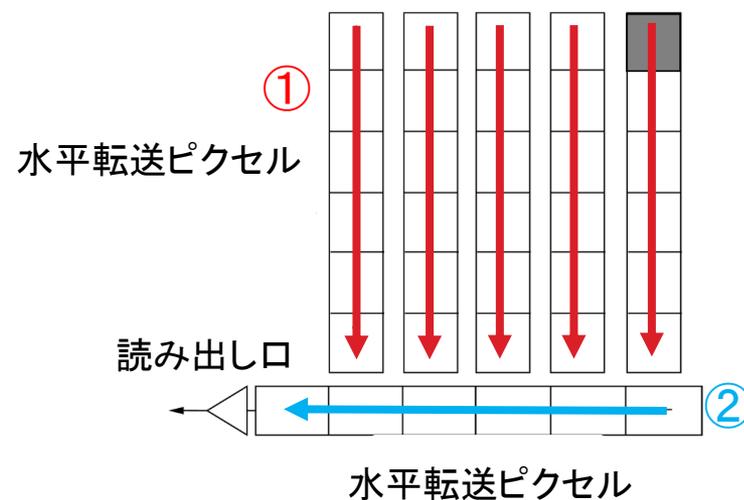
格子欠陥イメージ図

## ▶ 半導体(Si)の格子欠陥

- 中性子や高エネルギー電子などによって起こされる
- 様々なノイズの原因となる (Dark current、RTN, etc.)
- CCDでの信号転送時に電荷損失が起こる
  - 格子欠陥にトラップされる



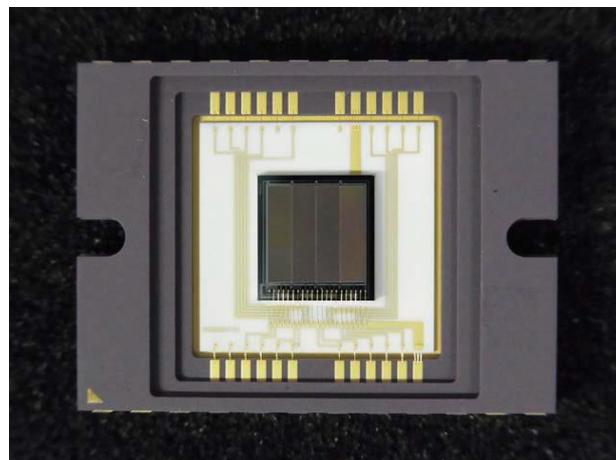
CCDのポテンシャル図



CCDの概要図

# 中性子ビームテスト

- ▶ 日付: 2014/10/15-17
- ▶ 場所: CYRIC@東北大学(東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター)
- ▶ Fluence:  $1.78 \times 10^{10} n_{eq}/cm^2$  (1.5h)
  - ILCのビームタイム $10^7$ 秒が2つの検出器(ILD, SiD)に分けられるとすると、重心系エネルギー250GeVでのILC稼働19年に相当する。
- ▶ CCD試作機
  - ピクセルサイズ:  $(6\mu m)^2$
  - ピクセル数: 1024x255
  - 浜松ホトニクス製
  - 型番: CPK1-14-CP502-07

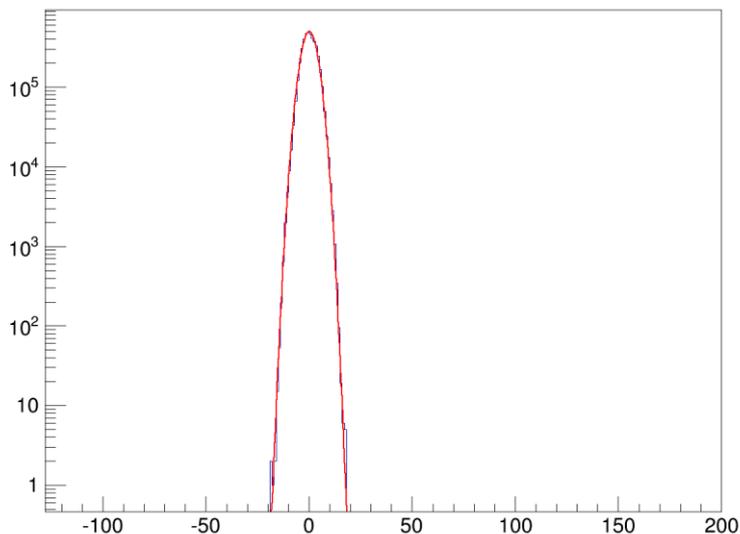


# 中性子耐性の測定項目

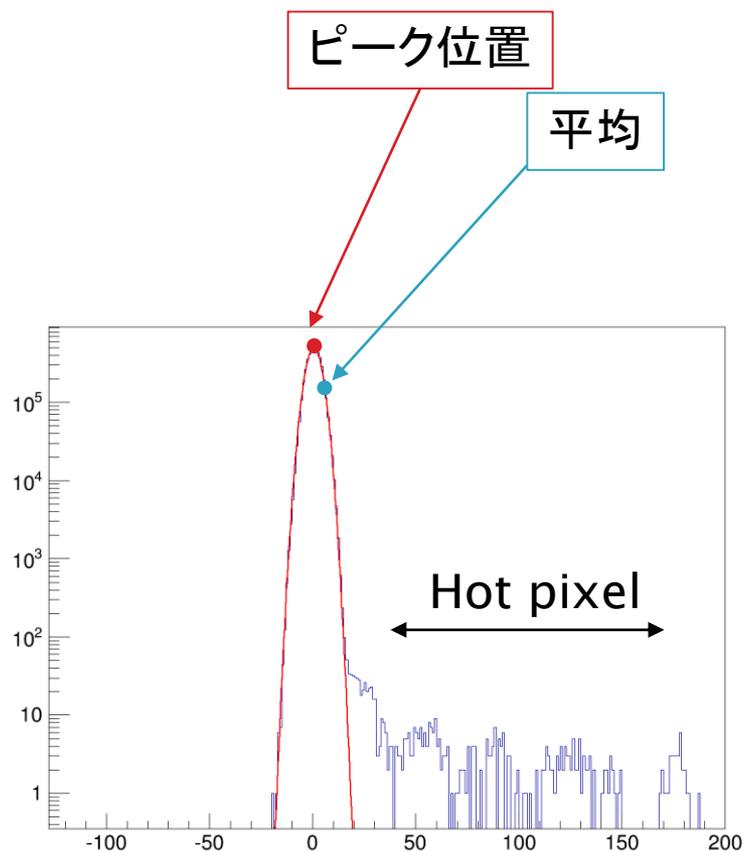
- ▶ Dark currentと、蓄積時間でのdark charge
  - ILC実験では蓄積時間は200msec
- ▶ Hot pixel fraction
- ▶ CTI(Charge transfer inefficiency)
  
- ▶ これらのアニーリング効果
  - 中性子照射後、3、9、23、199日後に測定した。
  - CCDチップは室温(23℃)で保管された。

# Dark current

- ▶ 蓄積時間: 5, 10, 30, 60sec
  - Dark chargeは蓄積時間に比例するため、一次関数でフィットし比例係数をDark currentとする。
- ▶ 温度:  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$
- ▶ Hot pixelの影響
  - ピーク位置: ガウシアンのみを考慮
  - 平均: Hot pixelの影響も含む



照射前 蓄積時間5sec@ $-40^{\circ}\text{C}$

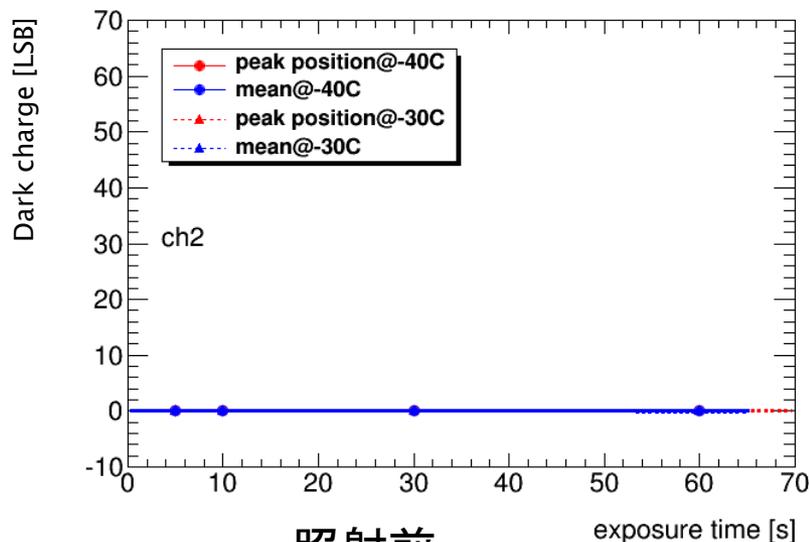


照射後 蓄積時間5sec@ $-40^{\circ}\text{C}$

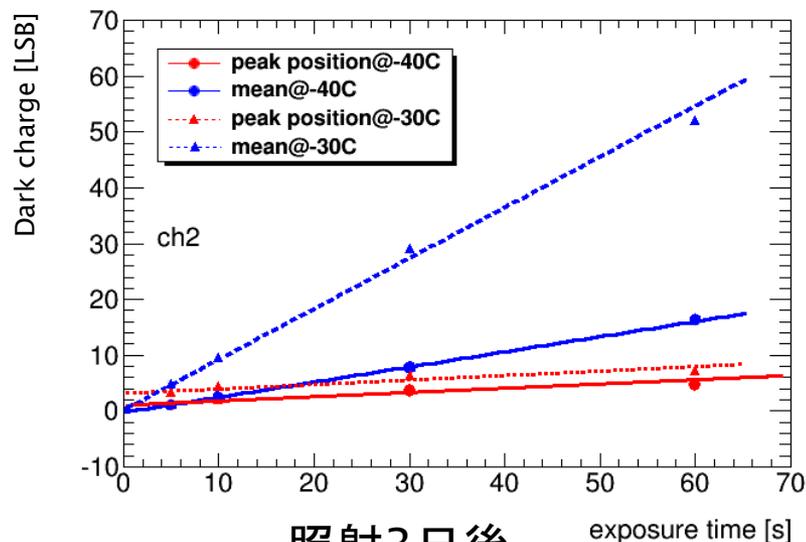
# Dark currentと200msでのdark charge

- ▶ Dark current(傾きに対応)
  - 照射前:  $-30^{\circ}\text{C}$ 以下でほぼ0
  - 照射後:  $-40^{\circ}\text{C}$ で0.27[LSB]と増加がみられるが、pedestalの幅よりも小さい ( $\sigma=3.42$ [LSB])
- ▶ 200msでのDark charge
  - Dark currentの値を1/5にスケールすることで計算

| 200msでの dark charge | $-30^{\circ}\text{C}$ [LSB (= 14e)] | $-40^{\circ}\text{C}$ [LSB (= 14e)] |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 平均                  | $(1.8 \pm 0.001) \times 10^{-1}$    | $(5.4 \pm 0.005) \times 10^{-2}$    |
| ピーク位置               | $(1.6 \pm 0.003) \times 10^{-2}$    | $(1.5 \pm 0.002) \times 10^{-2}$    |



照射前



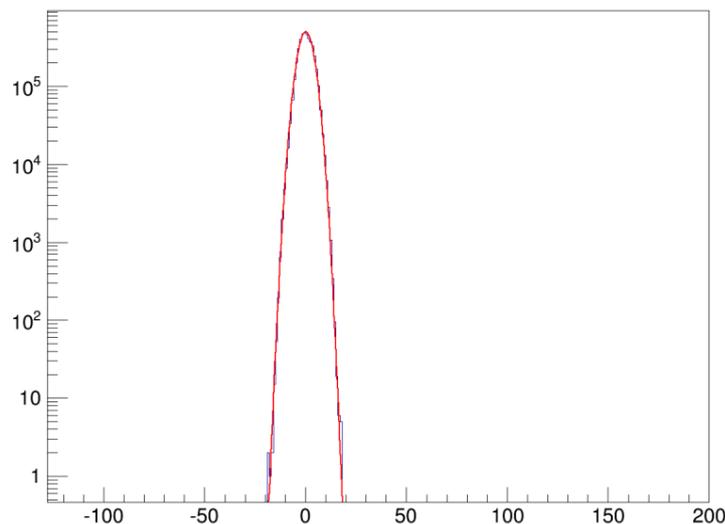
照射3日後

# Hot pixel

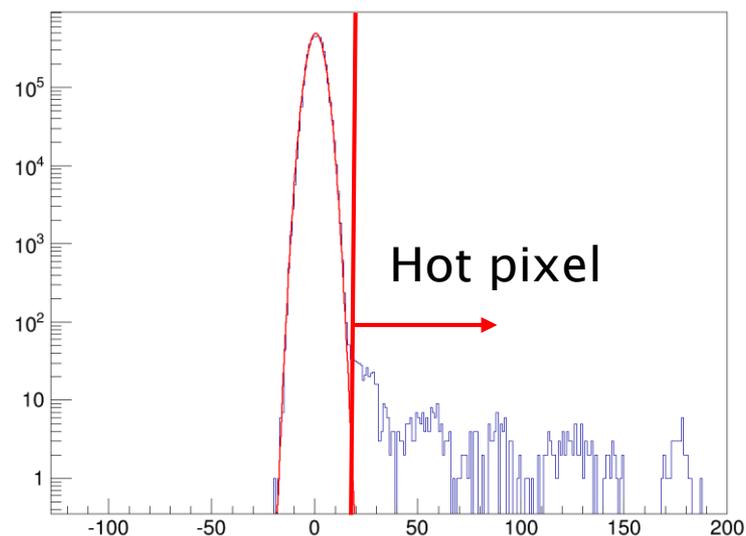
## ▶ Hot pixelの定義

- 通常のピクセルのdark chargeの値よりも大きな値を持つものをhot pixelと呼び、ここでは $5\sigma$ 以上のdark chargeを持つものをhot pixelとした。(1イベントごとにhot pixelかどうか判定する)

## ▶ 中性子照射後にhot pixelの増加が見られる



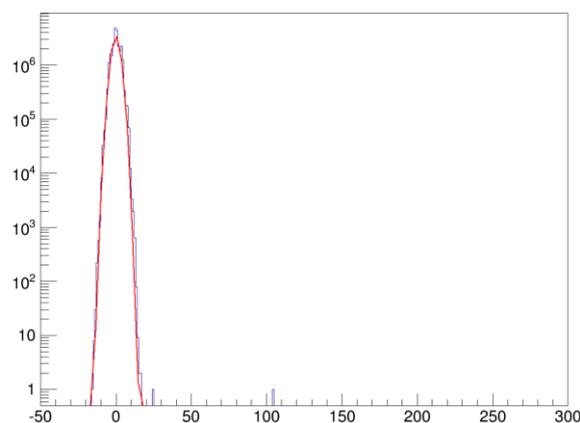
照射前 蓄積時間5sec@-40°C



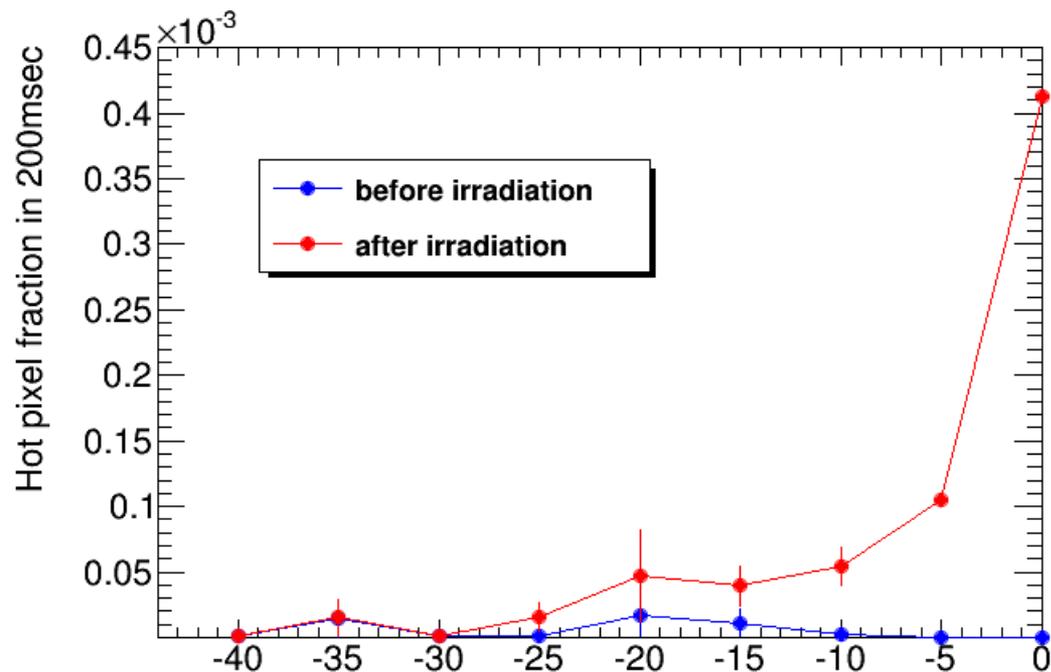
照射後 蓄積時間5sec@-40°C

# Hot pixel fraction (温度依存性)

- ▶ 蓄積時間200msecの場合、 $-40^{\circ}\text{C}$ にすることでhot pixel fractionは中性子照射前後ともに十分に抑えられる。
  - 中性子照射前:  $(7.49 \pm 1.91) \times 10^{-7} @ -40^{\circ}\text{C}$
  - 中性子照射後:  $(1.03 \pm 0.19) \times 10^{-6} @ -40^{\circ}\text{C}$



照射後 蓄積時間200sec@ $-40^{\circ}\text{C}$



ホットピクセルと温度の関係 Temperature [C]

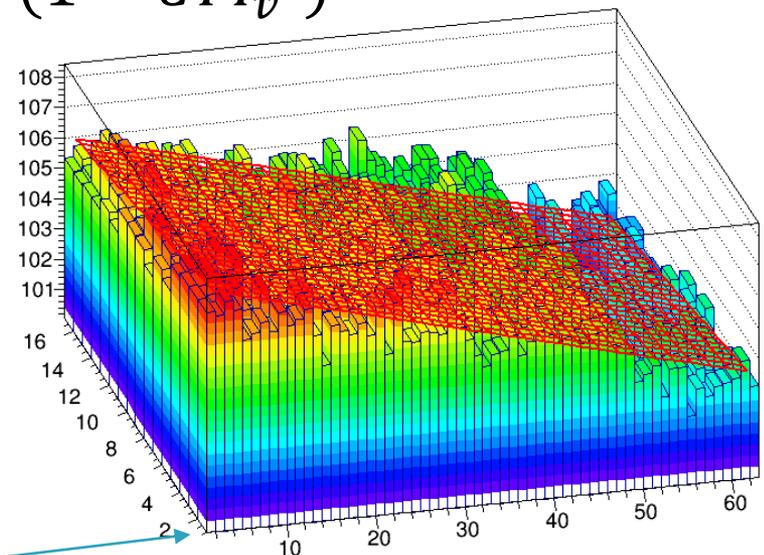
# CTI (Charge Transfer Inefficiency)

- ▶ CCDは信号電荷をピクセルからピクセルに転送し最後に読み出す。理想的には電荷は完全に転送されるが、格子欠陥によってトラップされ電荷損失が起こる。
- ▶ CTI(電荷転送非効率)
  - CTIをピクセルからピクセルに一回転送したときの非効率と定義する
  - 信号電荷を $Q$ とすると、水平方向に $x$ 回、垂直方向に $y$ 回転送後には下の式で示される $f(x,y)$ になる。

$$f(x, y) = Q(1 - CTI_h)^x (1 - CTI_v)^y$$

$\left\{ \begin{array}{l} CTI_h: \text{水平方向のCTI} \\ CTI_v: \text{垂直方向のCTI} \end{array} \right.$

中性子照射後のFe55からのX線のシグナルの大きさの分布。それぞれの区画が16x16ピクセルに対応



(0,0) が読み出し口

# CTI

## ▶ 結果

- $CTI_h = (3.49 \pm 0.03) \times 10^{-5}$
- $CTI_v = (6.34 \pm 0.10) \times 10^{-5}$

### 照射前CTIの参考値

ピクセルサイズ( $12\mu\text{m}$ )<sup>2</sup>FPCCD

$$CTI_h = (1.84 \pm 0.55) \times 10^{-5}$$

$$CTI_v = (4.66 \pm 0.10) \times 10^{-5}$$

浜松ホトニクス製CCDは

標準的に $CTI = 1.0 \times 10^{-5}$ を実現

- ▶ 実際の実験では一つの読出し口につき13000×128ピクセルが割り当てられる。最も読出し口から遠いピクセルは水平方向に13000回、垂直方向に128回転送される。

$$(1 - 3.49 \times 10^{-5})^{13000} \times (1 - 6.34 \times 10^{-5})^{128} = 0.63$$

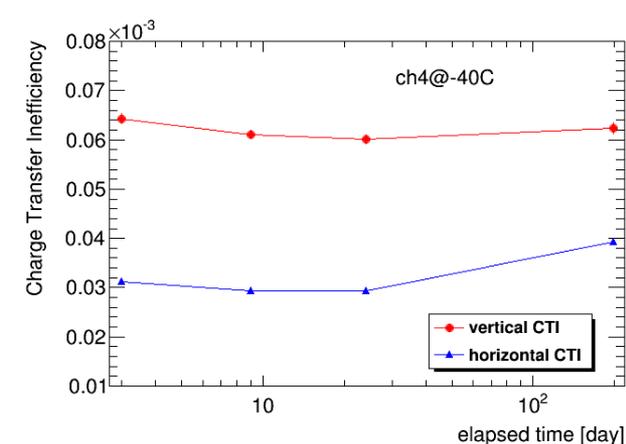
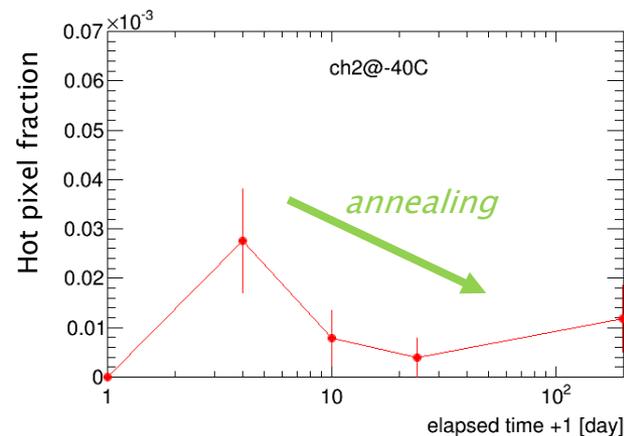
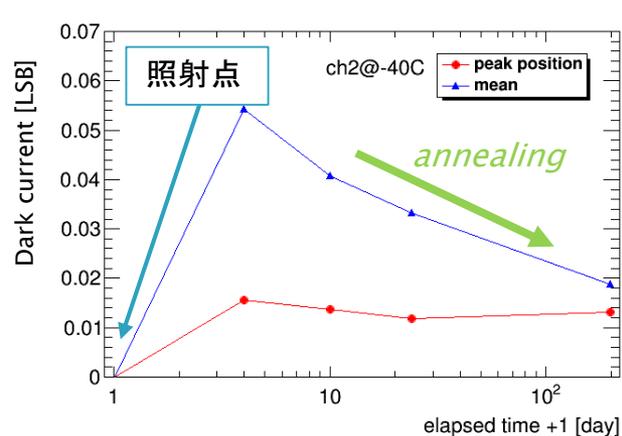
- ▶ 最も遠いピクセルでも信号は63%残る。(最大36%の損失)
  - 検出効率、位置分解能には影響なし

# アニーリング効果

- Dark current, hot pixel fraction, CTIそれぞれについて中性子照射後、3、9、23、199日後に測定し変化を見る

| 項目                        |       | 測定結果    |
|---------------------------|-------|---------|
| Dark current              | ピーク位置 | なし      |
|                           | 平均    | 時間経過で減少 |
| Hot pixel fraction (5sec) |       | 時間経過で減少 |
| CTI                       |       | なし      |

- Dark currentの平均はhot pixelの影響を含むため、Hot pixel fractionにアニーリング効果がみられることと無矛盾



Dark current

Hot pixel fraction

CTI

# まとめ

- ▶ ILC実験の崩壊点検出器の候補となっているFPCCDの中性子耐性について試験した。
  - Dark current、hot pixelは中性子照射により増加したが、十分に小さい。
  - CTIについては、照射後は最大で信号電荷が36%損失する。検出効率、位置分解能には影響なし

# 今後

- ▶ これらの項目についてクロックパルスの電圧、周波数依存性を調べる。
  - 高周波数、低電圧で駆動させるため