

# ILCのための崩壊点検出器 Fine Pixel CCD についての研究

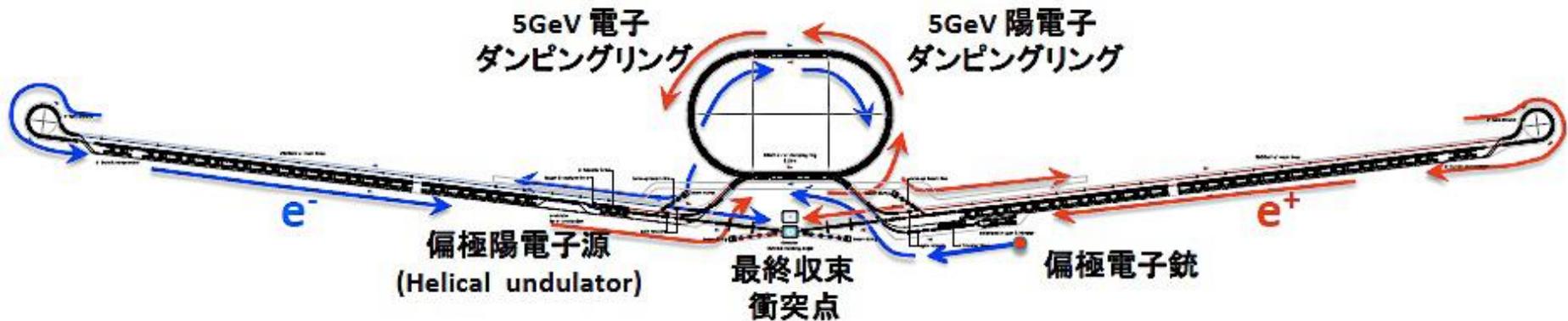
4年生発表

東北大学素粒子実験グループ

村井峻亮

# 国際リニアコライダー (ILC)

- 電子陽電子を衝突させる線形型の加速器
- 重心エネルギー: 250GeV~500GeV(→1TeV)
- ルミノシティ:  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} @ 1 \text{ TeV}$
- 全長: 約30km



# ILCの目的、測定精度

- ヒッグスの精密測定がしたい

- $H \rightarrow bb, H \rightarrow cc, \dots$  etc

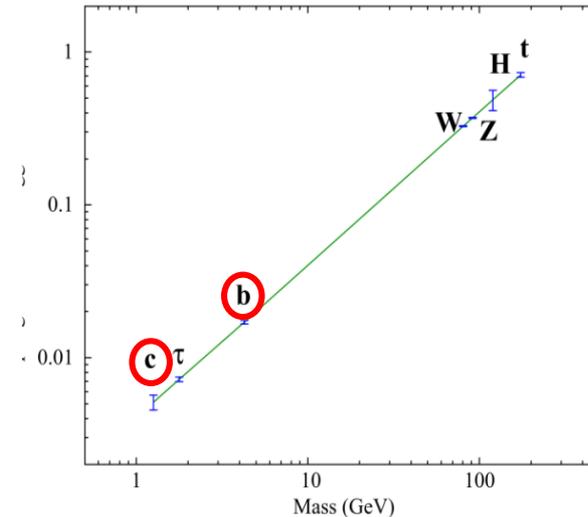


- b,cクォークの識別

- b-jet は3つの崩壊点を持ち c-jet は2つの崩壊点を持つことを利用する
- 崩壊点を精密に測定できれば識別可能！

- 衝突径数分解能  $\sigma \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu m)$  が要求される

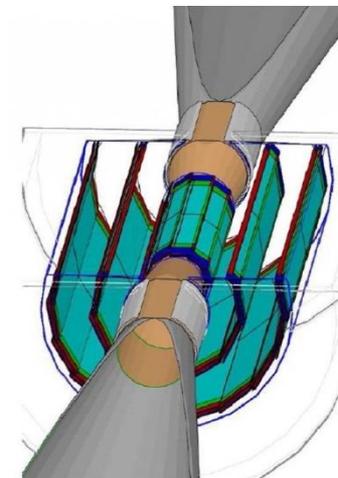
ヒッグスの質量と結合定数



# ILCの崩壊点検出器

## 特徴

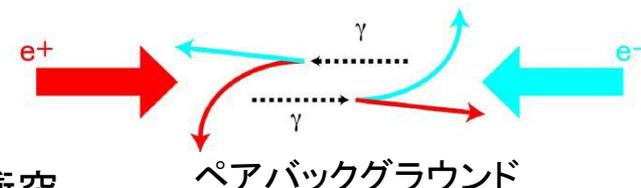
- バックグラウンド排除のため2層×3層の構造
- b,cの寿命が短いため( $\sim 1\text{ps}$ )高い衝突径数分解能が必要
- 衝突点の近くに配置(最内層半径1.6cm)
- 精密な飛跡再構成のためピクセル占有率 $\leq 1\%$ が必要



ILC崩壊点検出器

## 問題点

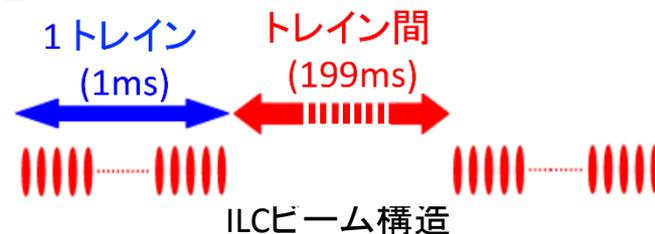
- ペアバックグラウンドにより電子陽電子が大量に生成されピクセル占有率増加
- ILCのビームは1トレイン=1312バンチとして199msの間隔で衝突  
→ $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ピクセルの場合、1トレインデータを蓄積するとピクセル占有率10%以上



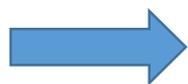
ペアバックグラウンド

## 解決策

- ① トレインを分割し読みだすことで占有率を下げる  
→CMOS(フランス)等(ビーム由来の高周波ノイズが問題)
- ② 1トレインデータを蓄積するが、ピクセルを小さくし占有率を下げる



ILCビーム構造



Fine Pixel CCD

# Fine Pixel CCDの特徴

## • 高精細ピクセルを用いたCCD

- ピクセルサイズ:  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$
- 総ピクセル数: 約 $10^{10}$ ピクセル
- 全空乏型
- トレイン間で読み出し

## 利点

- 高い位置分解能、衝突径数分解能
- ピクセル占有率の低下
- 高い2粒子分解能
- ビーム由来のノイズの影響を受けない

## 課題

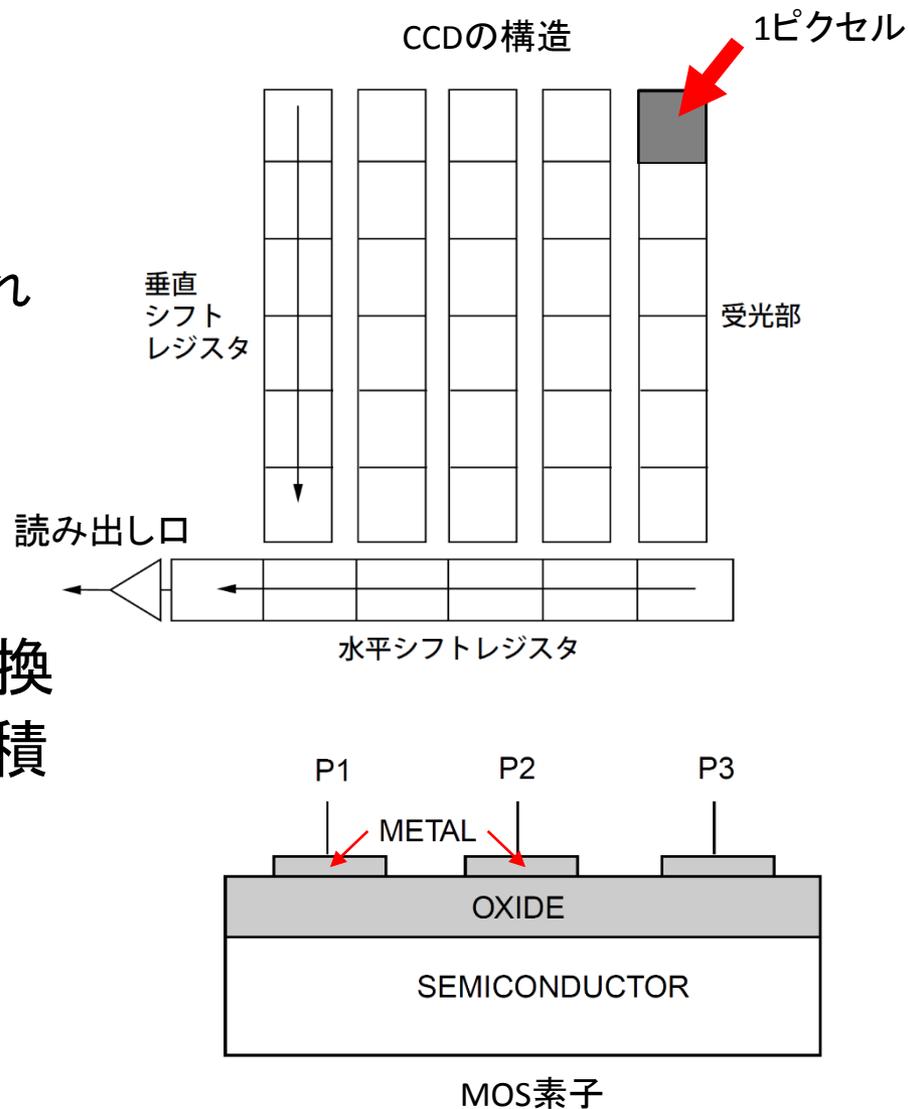
- 読み出し速度が遅い → トレイン間で読み出す
- 放射線ダメージを受けやすい
  - CCDの半導体に格子欠陥が発生し、信号電荷がトラップされる
  - 大きなピクセル数のため転送回数が増え、トラップ頻度が増える

# CCD概要

- CCDとは
  - 主にイメージセンサーとして使われる半導体素子
  - MOS素子が並んでできている

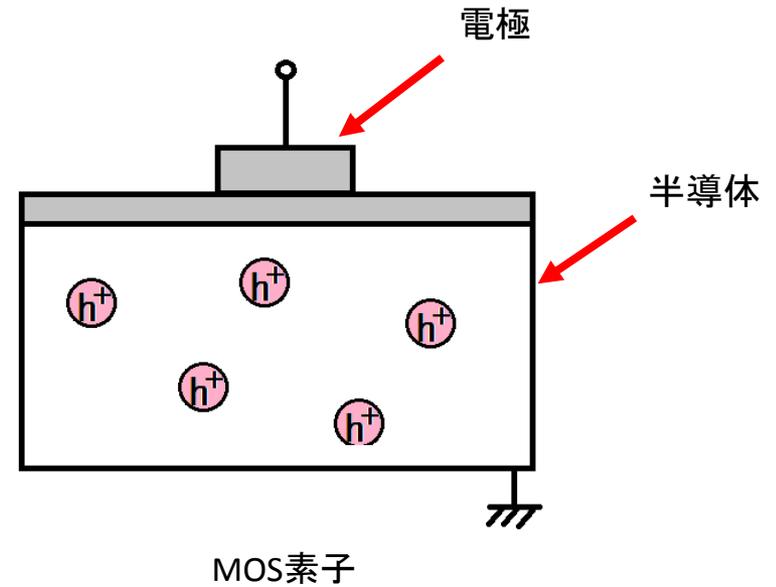
## • 検出の流れ

- ① 光子、荷電粒子を電荷に変換
- ② 信号電荷をピクセル中に蓄積
- ③ 電荷の垂直転送
- ④ 電荷の水平転送
- ⑤ 検出



# 電荷の発生、蓄積

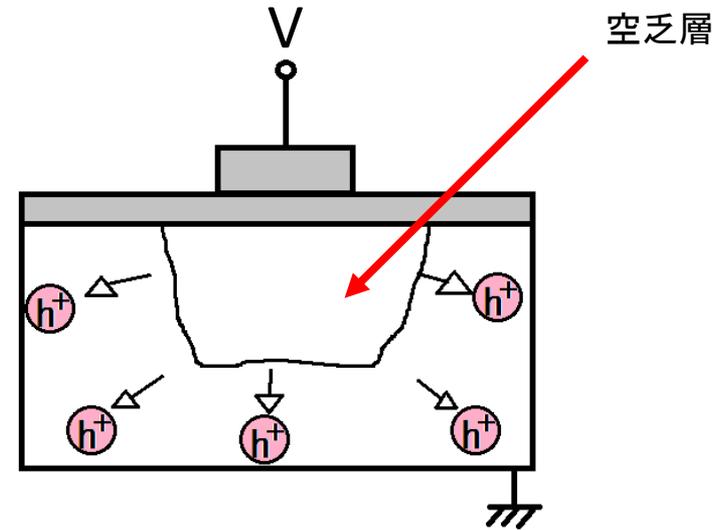
## ① 半導体中に正孔が存在



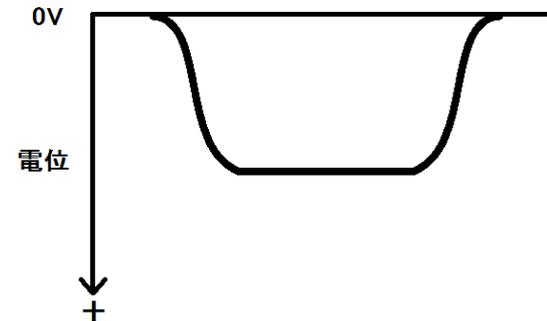
ポテンシャル図

# 電荷の発生、蓄積

- ① 半導体中に正孔が存在
- ② 正の電圧を加えることで電極下の半導体の電位が上昇し、正孔が周りへ逃げる  
→空乏層の形成



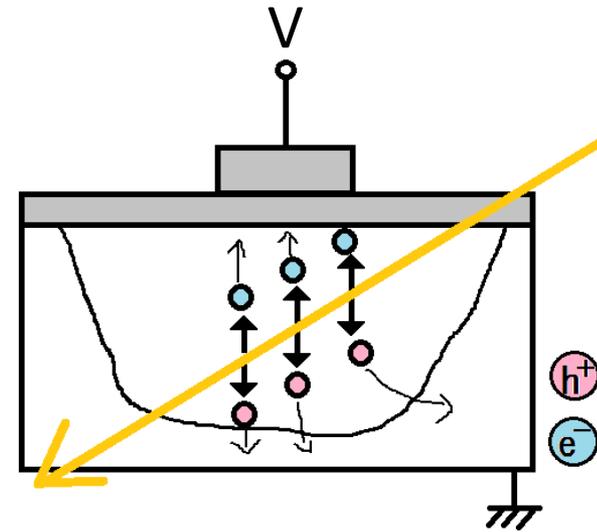
MOS素子



ポテンシャル図

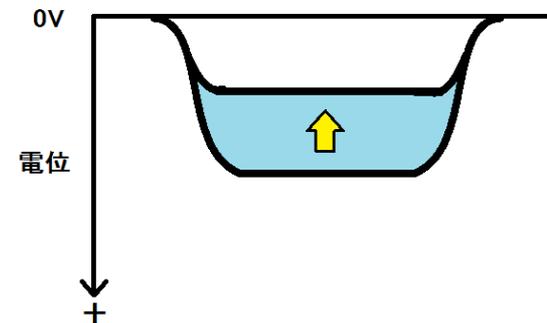
# 電荷の発生、蓄積

- ① 半導体中に正孔が存在
- ② 正の電圧を加えることで電極下の半導体の電位が上昇し、正孔が周りへ逃げる  
→空乏層の形成
- ③ 荷電粒子が空乏層を通過すると、電子正孔対が生成される  
→正孔は周りへ逃げ、電子は電位の高い表面へ蓄積。電位が減少する



荷電粒子

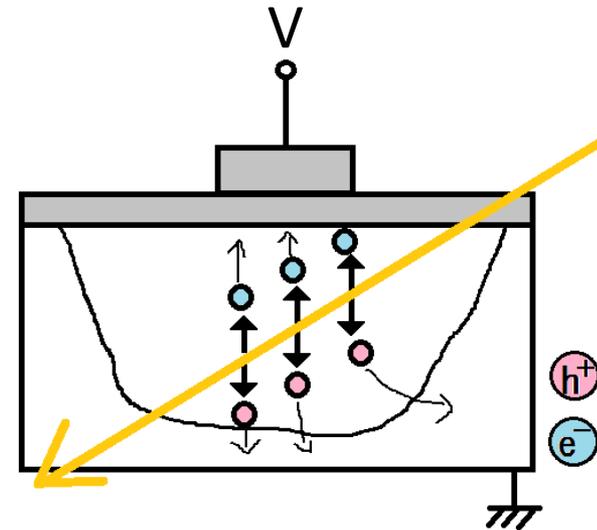
MOS素子



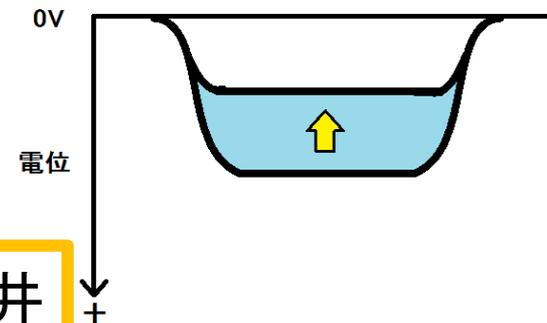
ポテンシャル図

# 電荷の発生、蓄積

- ① 半導体中に正孔が存在
- ② 正の電圧を加えることで電極下の半導体の電位が上昇し、正孔が周りへ逃げる  
→空乏層の形成
- ③ 荷電粒子が空乏層を通過すると、電子正孔対が生成される  
→正孔は周りへ逃げ、電子は電位の高い表面へ蓄積。電位が減少する



MOS素子



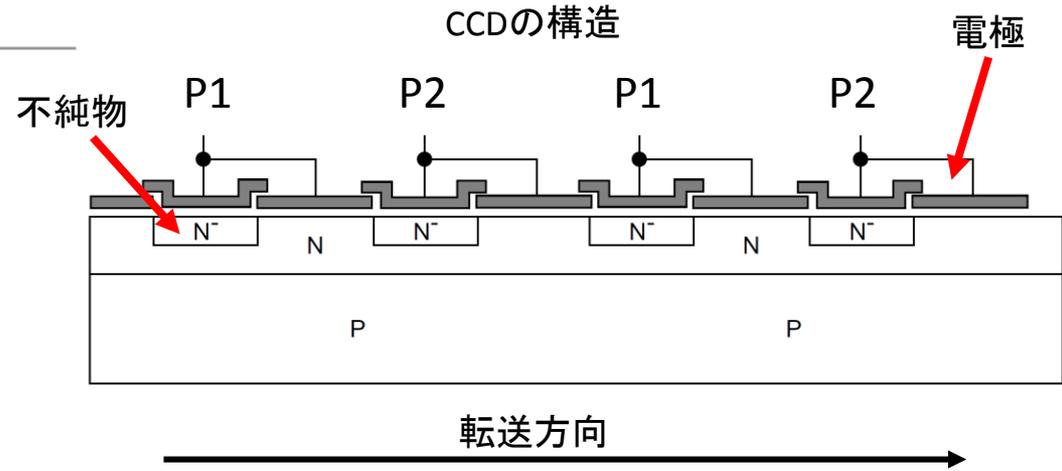
ポテンシャル図

各電極の下にポテンシャルの井戸のようなものができる、荷電粒子が通過すると電荷が溜まる

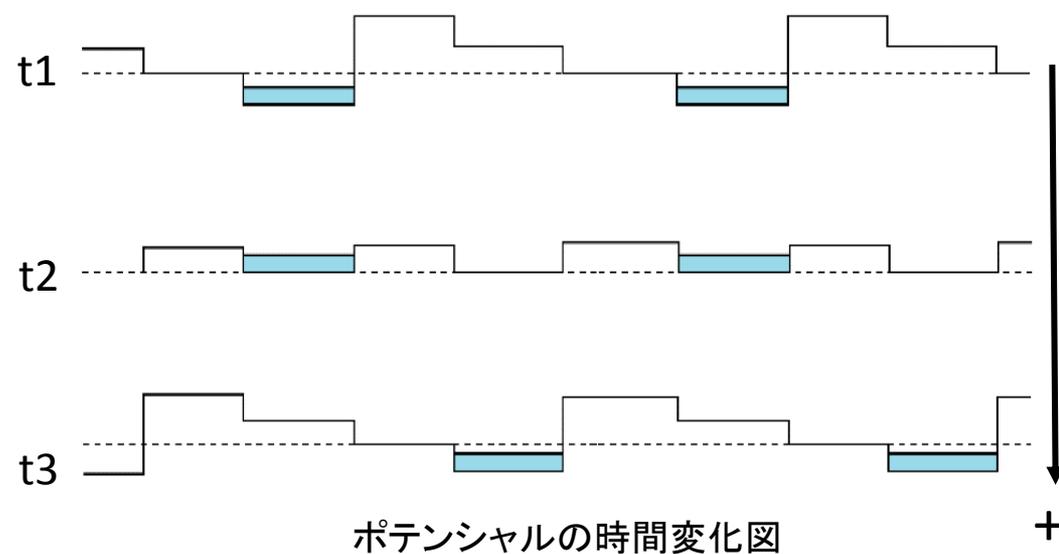
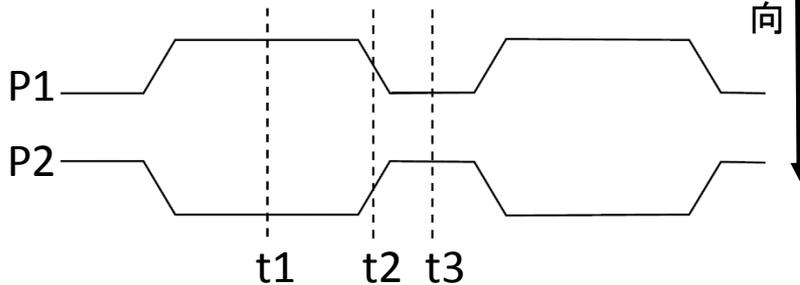
まとめ

# 電荷の転送

- 電極にかけるパルス電圧を制御することで、ポテンシャルの井戸に溜まった電荷をバケツリレーのように転送する
- 同じ電圧がかかる電極の下の不純物の濃度に差を作ることで、常に電位差を作り出す
- t2はパルスが変化し電位が変わっていく状態
- 4つの電極で1ピクセル

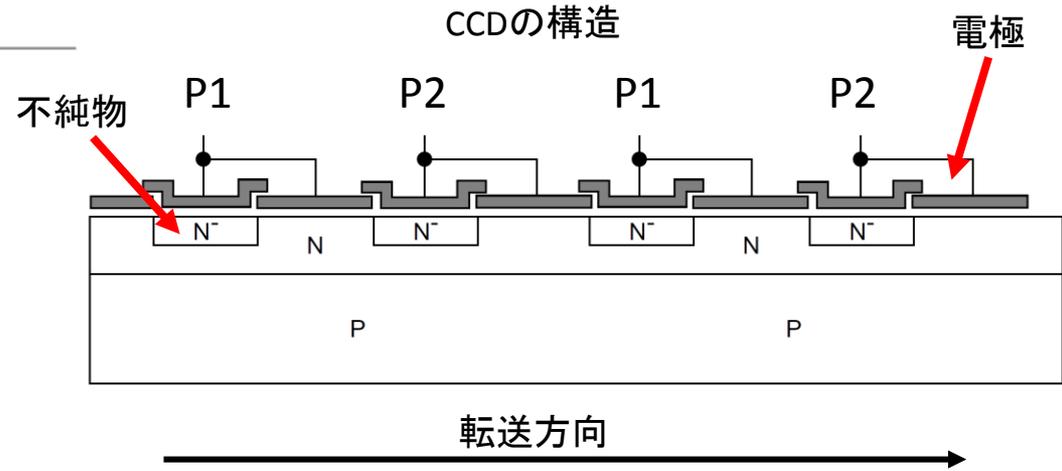


パルス電圧の時間変化図

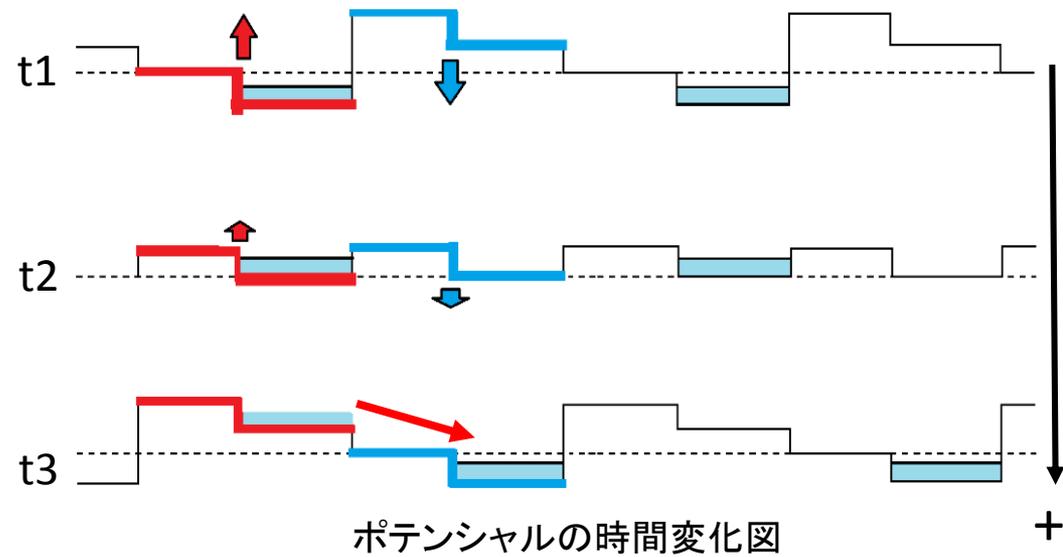
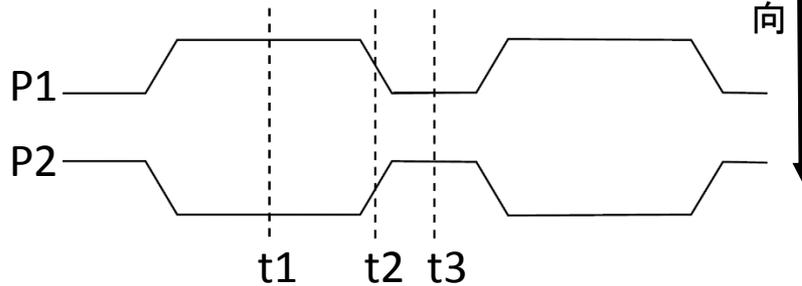


# 電荷の転送

- 電極にかけるパルス電圧を制御することで、ポテンシャルの井戸に溜まった電荷をバケツリレーのように転送する
- 同じ電圧がかかる電極の下の不純物の濃度に差を作ることで、常に電位差を作り出す
- t2はパルスが変化し電位が変わっていく状態
- 4つの電極で1ピクセル

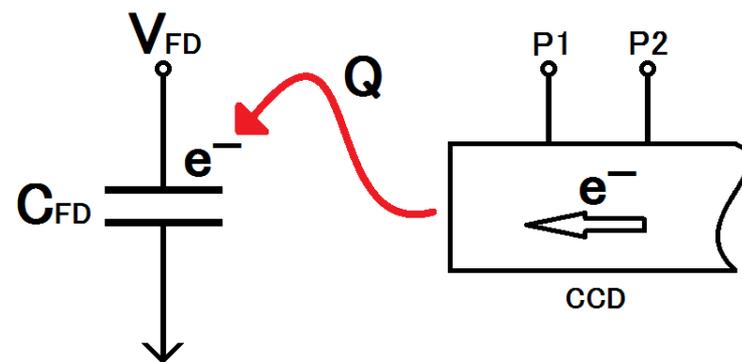


パルス電圧の時間変化図



# 電荷の検出

- ① コンデンサに電荷を送る
- ② 送られた電荷によってコンデンサの電圧が変化する
  - ・ 右の式によって電荷を電圧に変換する
- ③ 電圧の変化が信号となる
- ④ コンデンサの電荷をリセットする



電荷検出原理

$$\Delta V_{FD} = \frac{Q_{FD}}{C_{FD}}$$

## 転送効率

- CCDは理想的には電荷を100%転送するが、実際は格子欠陥などにより電子がトラップされ転送損失が存在する
- 1ピクセル間の電荷転送効率をCTEと定義し、 $n$ 回転送後の損失
  - ここで生成時と読み出し時の信号電荷をそれぞれ $S=1, S'$ とする

$$S' = 1 \cdot CTE^n = (1 - CTI)^n \sim 1 - n \times CTI$$

$\because CTI \ll 1$

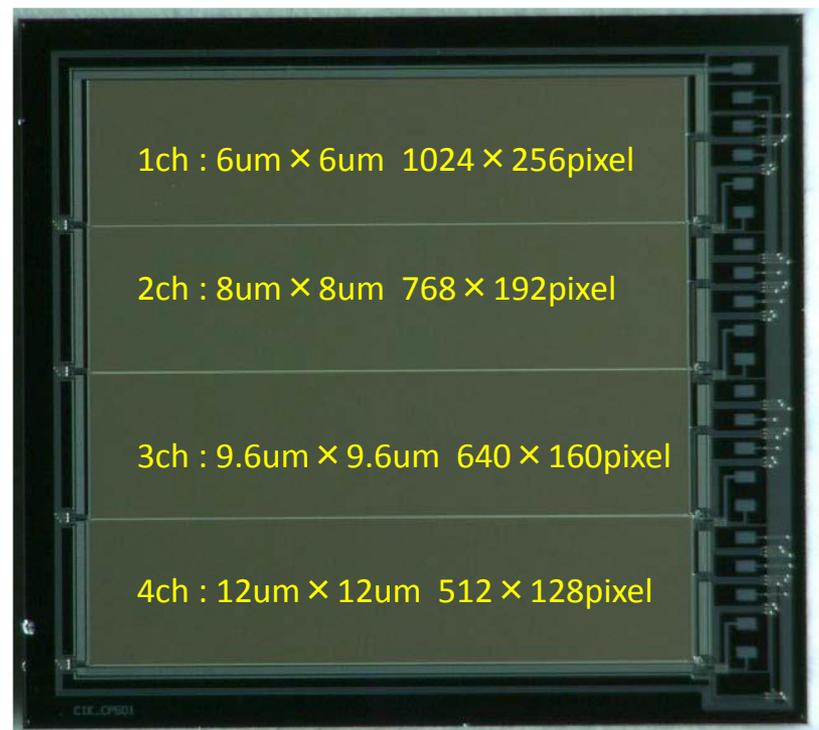
$$\underline{\text{転送損失} = n \times CTI}$$

[CTI(Charge Transfer Inefficiency):電荷非転送効率  
[CTI=1-CTE

 CTIを測定しFPCCDの性能を評価

## FPCCD試作素子

- 全部で4チャンネルあり、各チャンネルごとにピクセルの大きさと数が異なる
- 1チャンネルは水平転送不良があり使用しない
- 今回は2～4チャンネルのCTI測定を行った

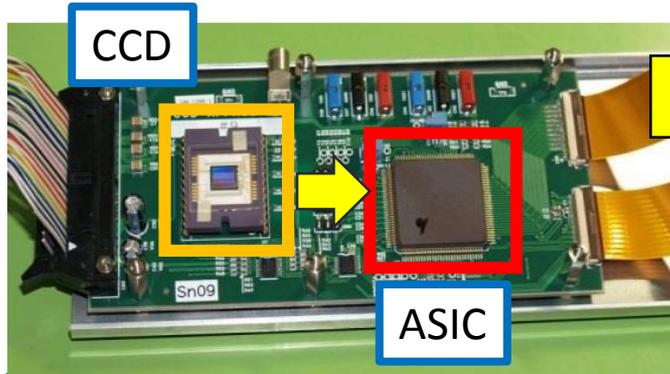


2010年度試作同様品

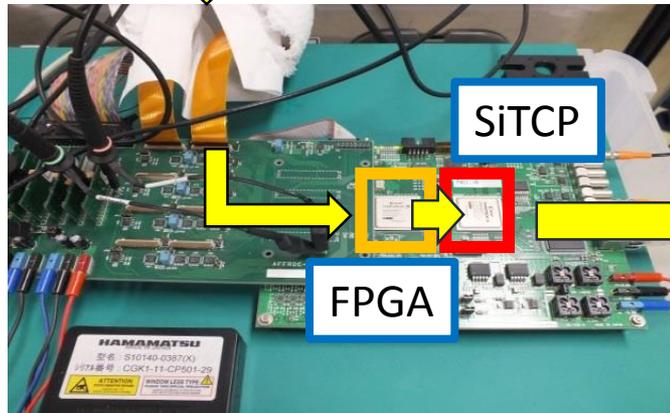
# セットアップ

信号読み出しの流れ

CCD ⇒ ASIC ⇒ FPGA ⇒ SiTCP ⇒ PC



信号



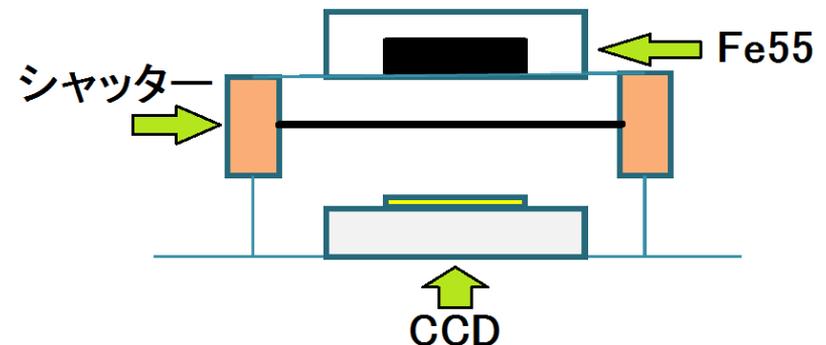
PC



恒温槽

# CTIの測定

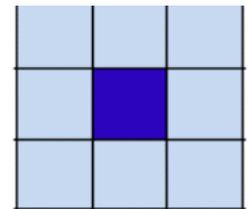
- Fe55が出す $\gamma$ 線はFPCCD内で約1600電子を落とす
  - 実際に荷電粒子が入射する状況を再現
- シャッターを開閉し $\gamma$ 線照射した場合としてない場合を測定
- 5秒照射、1秒読み出しを1イベントとし、照射時は8000イベント、非照射時は100イベント測定した
- FPCCDを $-40^{\circ}\text{C}$ に保ち暗電流を抑制
- 今回は電荷転送の速度を決めるパルス電流を25MHzで測定した
- 線源とCCDは十分に近く、 $\gamma$ 線は一様に照射されている



## CTI計算方法(1)

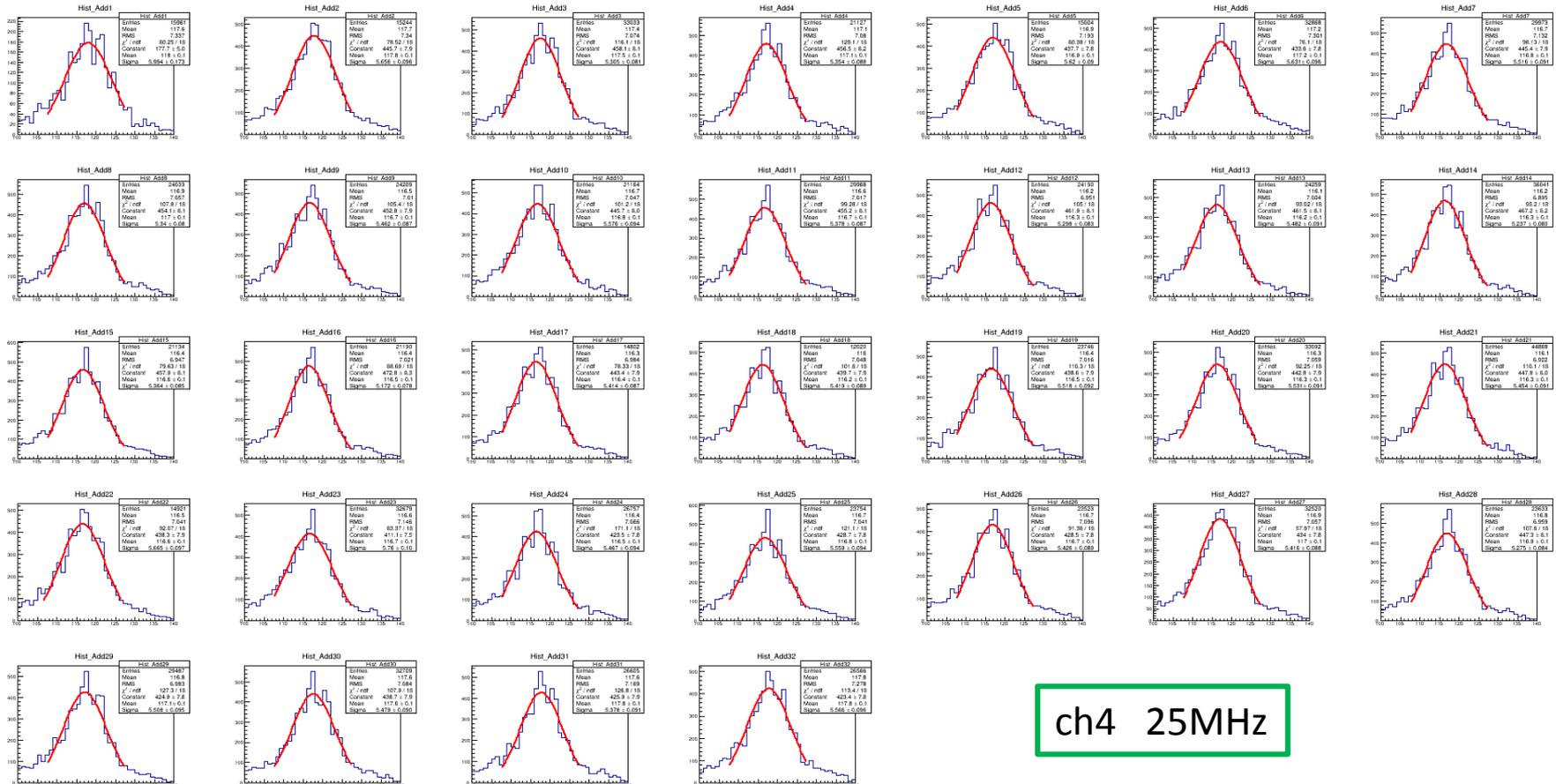
- ①  $\gamma$ 線照射せず測定した値の平均をピクセルごとにとりペDESTALとする
- ② シングルヒットイベントを選定する
  - シングルヒットイベントとは、粒子が1つのピクセルのみ通過したイベントのこと
  - $\gamma$ 線が複数のピクセルを通過すると生成される電子数が変わり、CTIを計算するとき不都合
  - 1つのピクセルのみ通過すれば生成される電子数は同じはず
  - 選定条件

- 中心の信号がペDESTALの $5\sigma$ より大きい
- 周りの8ピクセルの信号がペDESTALの $5\sigma$ より小さい



# CTI計算方法(2)

③ それぞれのチャンネルを1領域16×16pixelとして分割し、1領域毎にシングルヒットイベントのADC値(電子数に相当)でヒストグラムを作りガウシアンでフィット



ch4 25MHz

## CTI計算方法(3)

### ④ シングルヒットイベントのピークのグラフを作る

- X軸:水平領域番号
- Y軸:垂直領域番号
- Z軸:各領域のシングルヒットイベントのガウシアン<sup>o</sup>のピーク位置(電子数に相当)

### ⑤ グラフを次の関数でフィットする

$$f(x, y) = Aa^x b^y$$

$$\begin{cases} a = 16 \times CTE_x \\ b = 16 \times CTE_y \end{cases}$$

( CTE:電荷転送効率 )  
CTI=1-CTE

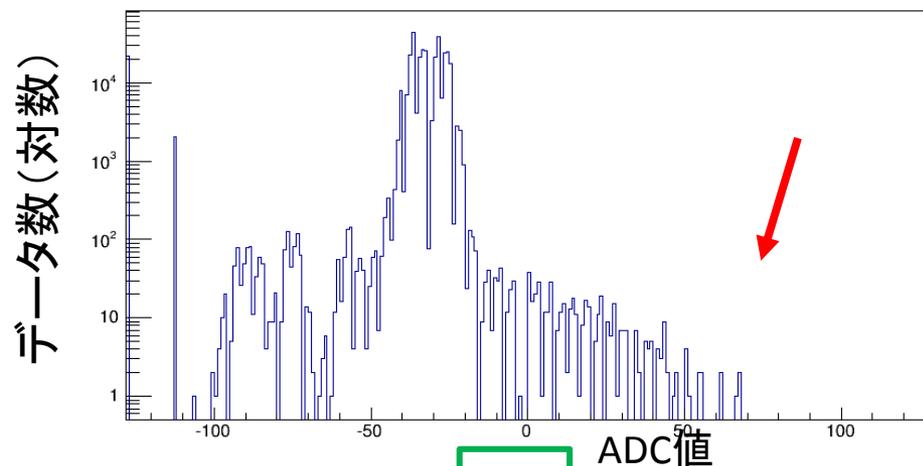


フィット結果よりCTIを決定！

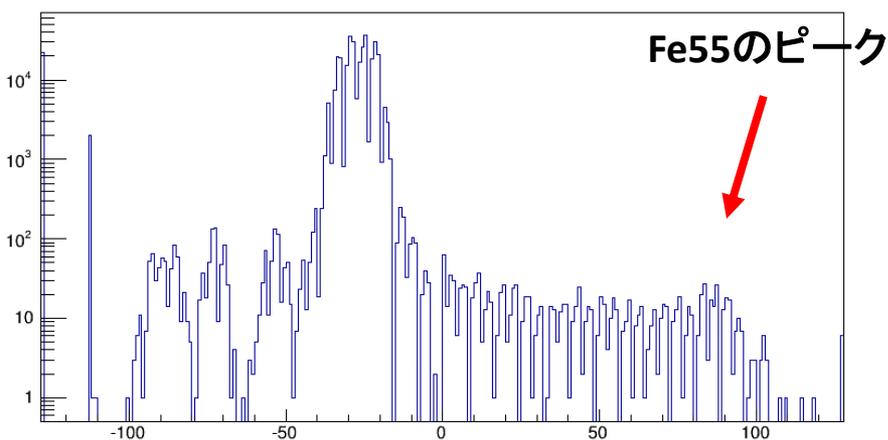
# 結果

- 図は1イベントのデータの各チャンネルごとのヒストグラム
- ch2ではFe55のピークを見ることができなかったため、シングルヒットイベントのグラフを作るためにはより詳しい解析が必要

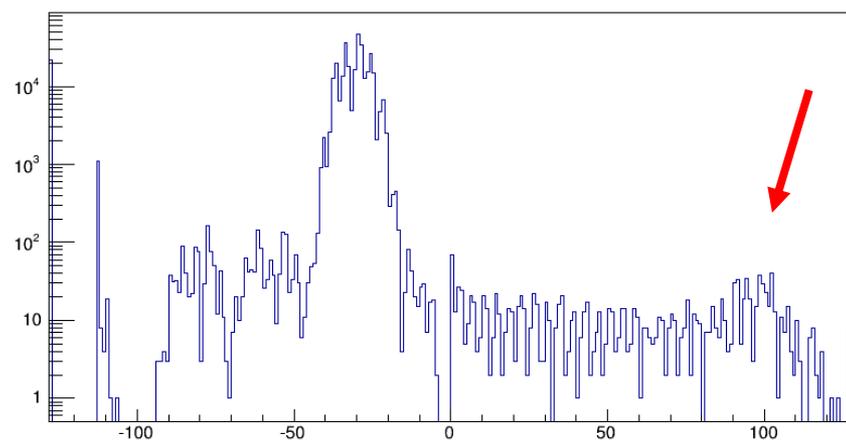
ch2



ch3



ch4

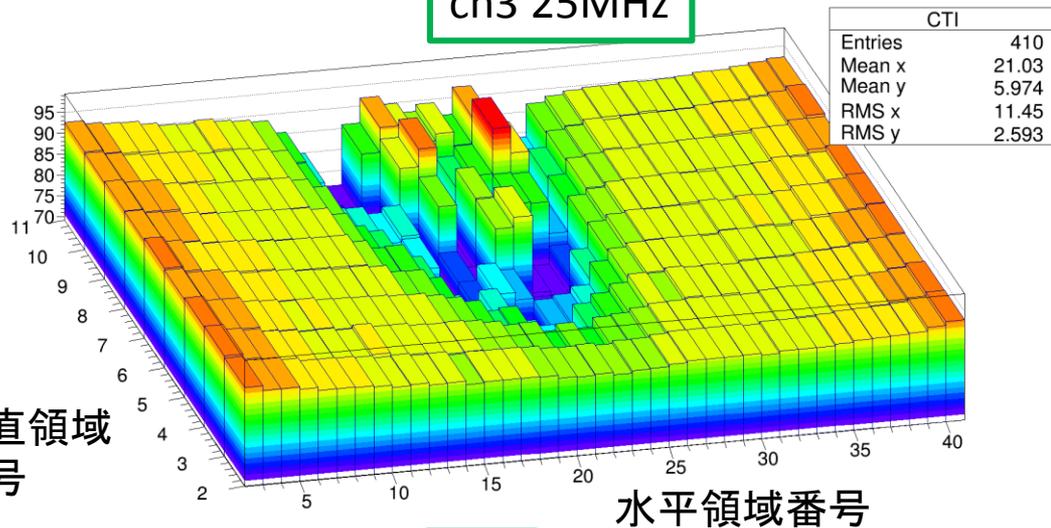


# 結果

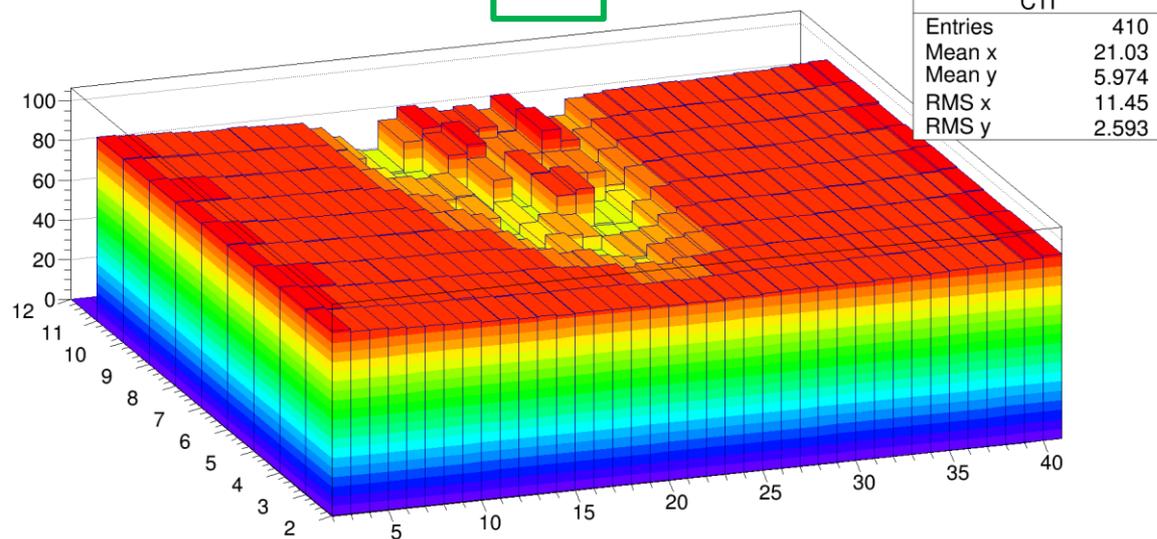
ガウシアンピーク

垂直領域  
番号

ch3 25MHz



ch3



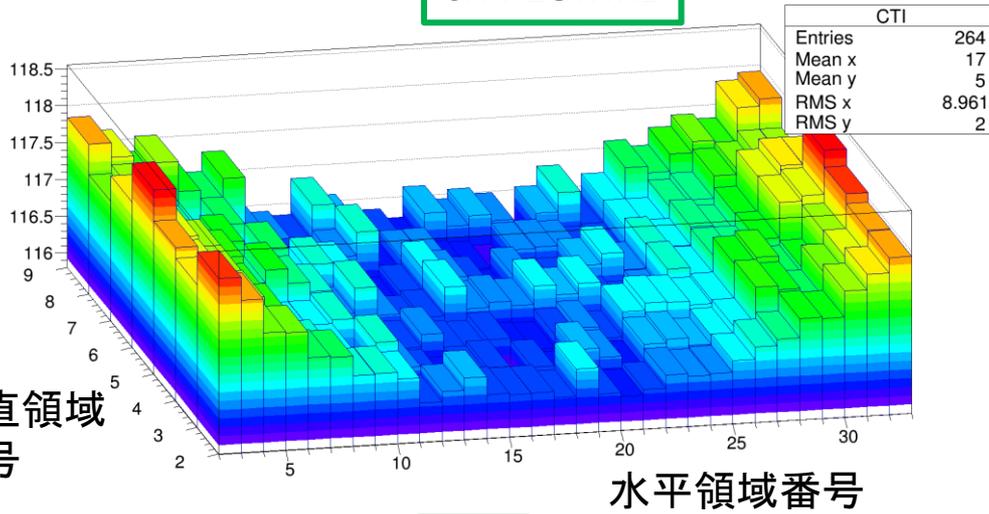
- CTIは非常に小さいため( $\sim 10^{-5}$ )ほかの影響によりCTIの効果は見えなかった
- 特に真ん中のへこみは大きく信号が減っているので原因を調べる必要がある

# 結果

ガウシアンピーク

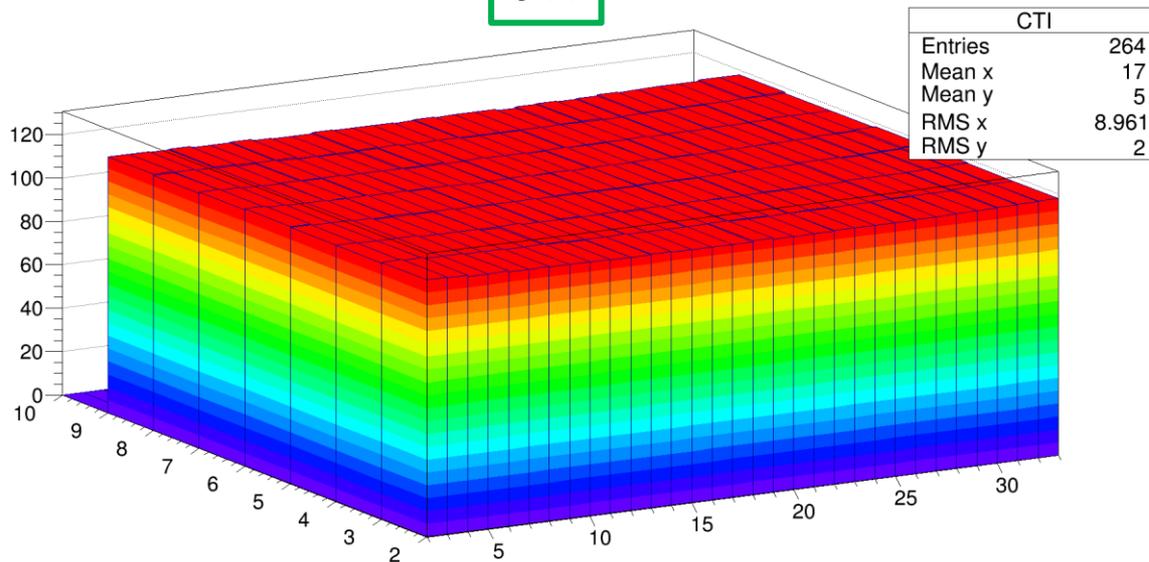
垂直領域  
番号

ch4 25Mhz



水平領域番号

ch4



- ch3同様、CTIは非常に小さいため( $\sim 10^{-5}$ )ほかの影響によりCTIの効果は見えなかった

# まとめと今後

---

## まとめ

- ILCの崩壊点検出器にはFPCCDが有力な候補となっている
- FPCCDの性能検査のためCTIを測定したが、ほかの影響が大きくCTIを計算できなかった
- $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ピクセルの水平転送において転送不良が存在

## 今後

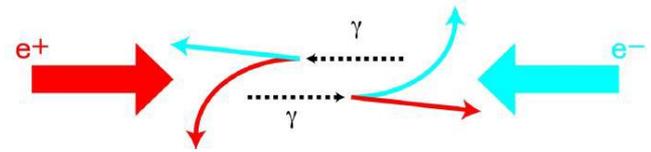
- 今回の結果の原因を探り、CTIを計算できるようにする
  - パルスの周波数を変えて変化を試みる
- 放射線ダメージによりCTIは劣化するのでその影響を測定する

ありがとうございました

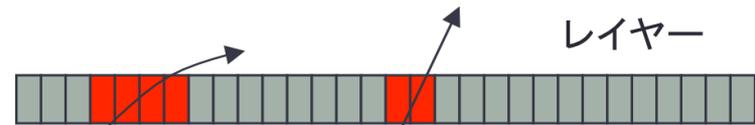
Back up

# ペアバックグラウンド排除

- ピクセルが小さいと、クラスタの大きさからペアバックグラウンドかシグナルかを判断することができる



ペアバックグラウンド



クラスタ

クラスタ



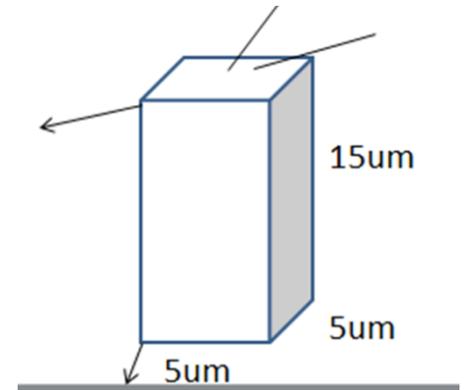
ペアバックグラウンド  
クラスタ大

シグナル  
クラスタ小

# 要求性能

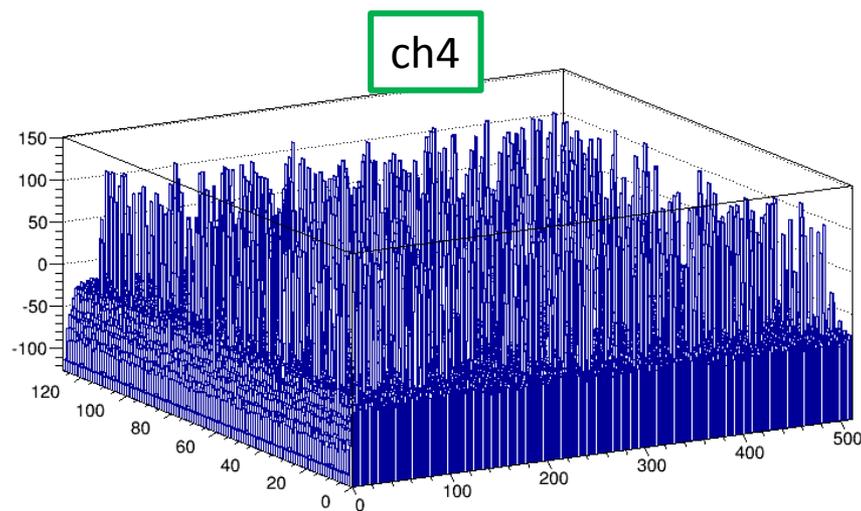
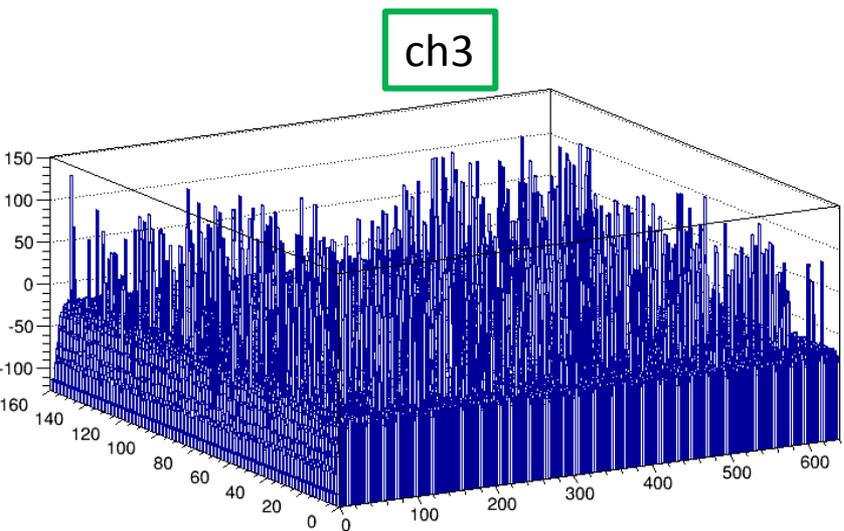
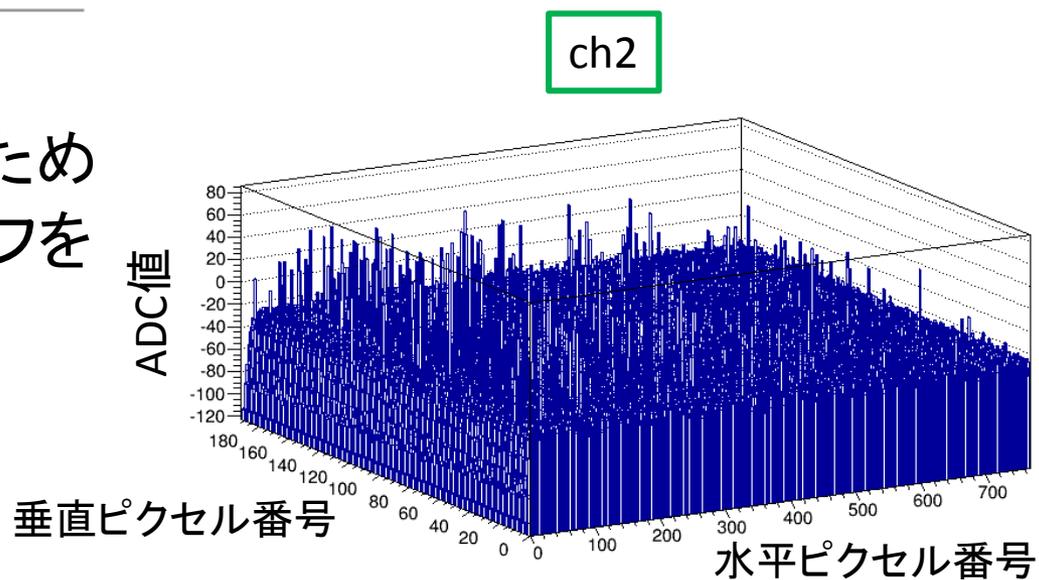
---

- 読み出し速度 > 10Mpixel/s(100MHz)
  - トレイン間隔約200msで1チャンネルの全ピクセル 20000 × 128pixelの読み出し
- ノイズ < 50電子
  - 浅い角度で粒子が入射すると、500電子程度しか落とさないため
- 消費電力 < 6mW/ch
  - 温度を-40°Cに保つため(温度が高くなると熱励起による電子が増加、放射ダメージによるトラップ準位が~-20°Cに存在)



# 結果

・ch1のヒット数が少なかったため  
シングルヒットイベントのグラフを  
作成することができなかった



# 結果

ガウシアンピーク

垂直領域  
番号

ch2 6MHz

CTI_colz	
Entries	588
Mean x	17.35
Mean y	6.996
RMS x	12.32
RMS y	3.161

水平領域番号

ch2 z

CTI_colz	
Entries	588
Mean x	16.09
Mean y	6.999
RMS x	10.97
RMS y	3.162

- 水平領域番号45以上では統計が足りなかったなのでカットしてCTIを計算した。

100

80

60

40

20

12

10

8

6

4

2

5

10

15

20

25

30

35

40

45

# 結果

ch2 6MHz

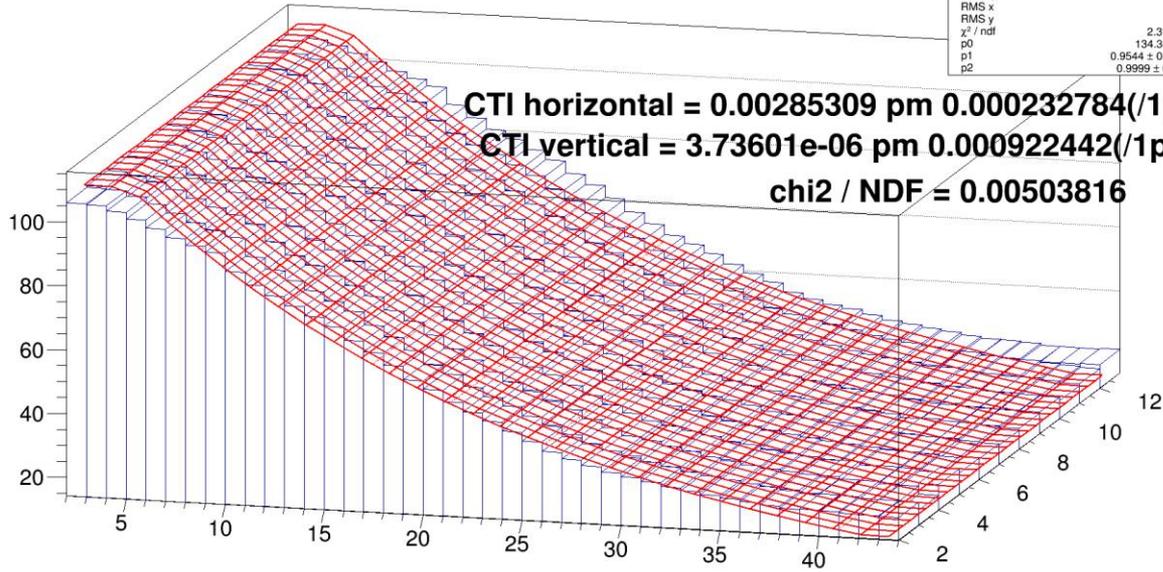
CTI

CTI	
Entries	588
Mean x	16.09
Mean y	6.999
RMS x	10.97
RMS y	3.182
$\chi^2 / \text{ndf}$	2.313 / 459
p0	134.3 ± 20.14
p1	0.9544 ± 0.003725
p2	0.9999 ± 0.01476

CTI horizontal = 0.00285309 pm 0.000232784(/1pixel)

CTI vertical = 3.73601e-06 pm 0.000922442(/1pixel)

chi2 / NDF = 0.00503816

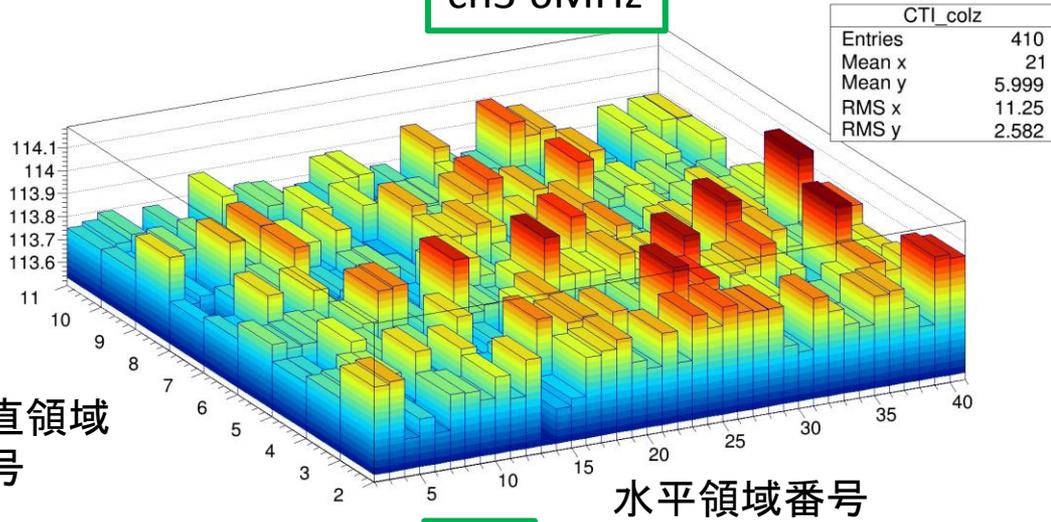


# 結果

ガウシアンピーク

垂直領域  
番号

ch3 6MHz



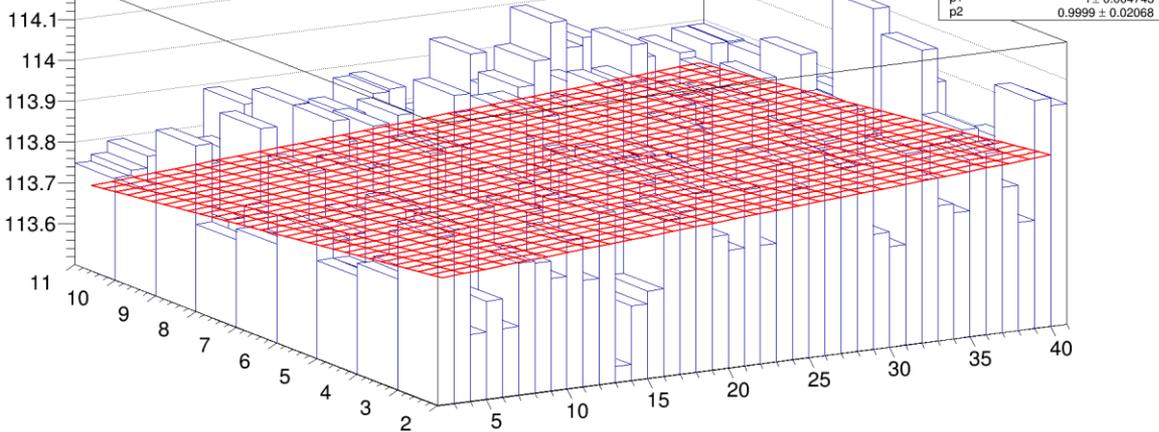
水平領域番号

ch3

CTI horizontal =  $-1.41999e-06$  pm  $0.000296467/(1\text{pixel})$

CTI vertical =  $6.19305e-06$  pm  $0.00129241/(1\text{pixel})$

$\chi^2 / \text{NDF} = 8.25027e-07$



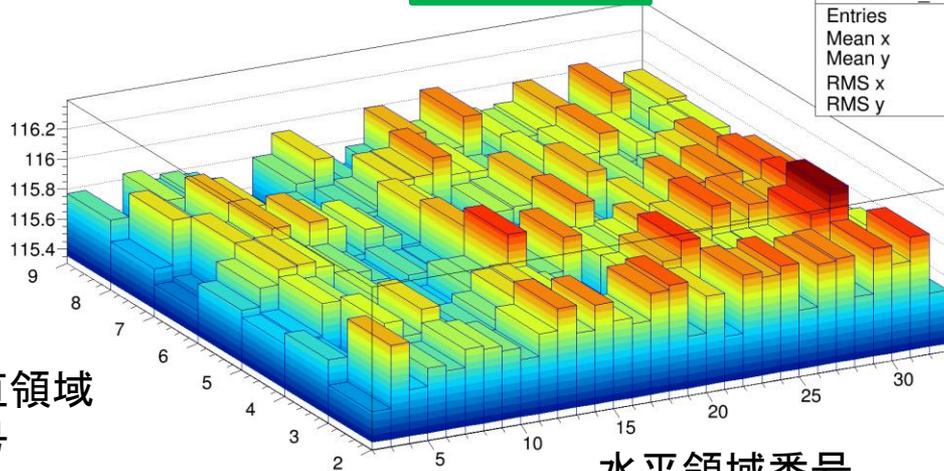
# 結果

ガウシアンピーク

垂直領域  
番号

ch4 6MHz

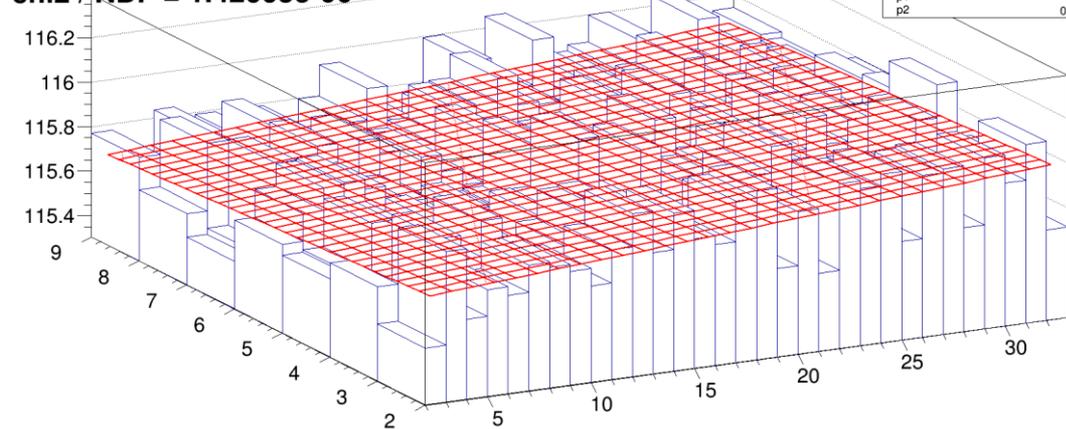
CTI_colz	
Entries	264
Mean x	17
Mean y	5
RMS x	8.944
RMS y	2



ch4

CTI horizontal =  $-3.42808 \times 10^{-6}$  pm 0.000474511/(1pixel)  
CTI vertical =  $6.95547 \times 10^{-6}$  pm 0.00212251/(1pixel)  
 $\chi^2 / \text{NDF} = 1.42663 \times 10^6$

CTI	
Entries	264
Mean x	17
Mean y	5
RMS x	8.944
RMS y	2
$\chi^2 / \text{ndf}$	0.0003053 / 214
p0	115.8 ± 27.69
p1	1 ± 0.007592
p2	0.9999 ± 0.03396

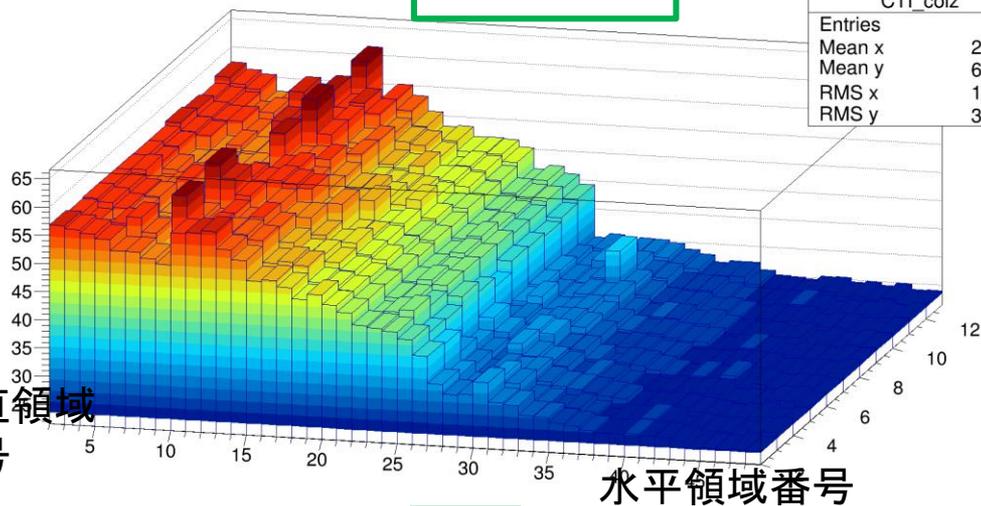


# 結果

ガウシアンピーク  
垂直領域  
番号

ch2 25MHz

CTI_colz	
Entries	588
Mean x	20.86
Mean y	6.995
RMS x	13.04
RMS y	3.162



ch3

CTI	
Entries	588
Mean x	20.86
Mean y	6.995
RMS x	13.04
RMS y	3.162
$\chi^2 / \text{ndf}$	3.747 / 514
p0	65.825 ± 9.264
p1	0.9773 ± 0.00317
p2	0.9993 ± 0.01398

CTI horizontal = 0.00142114 pm 0.000198135(/1pixel)

CTI vertical = 4.46765e-05 pm 0.000873825(/1pixel)

$\chi^2 / \text{NDF} = 0.00729044$

