

宇宙史研究センター ワークショップ
素粒子構造研究部門

SOI ピクセル検出器を用いた KEK PF-AR テストビームライン用 望遠鏡システムの性能評価

Performance evaluation of telescope system
with SOI pixel detectors for KEK PF-AR test beamline

大森匠, 鈴木尚紀, 原和彦, 山田美帆^A, 坪山透^B, 武田彩希^C, 三住京也^C,
他 KEK SOIグループ

筑波大学, 産技高専^A, 高工研^B, 宮崎大学^C

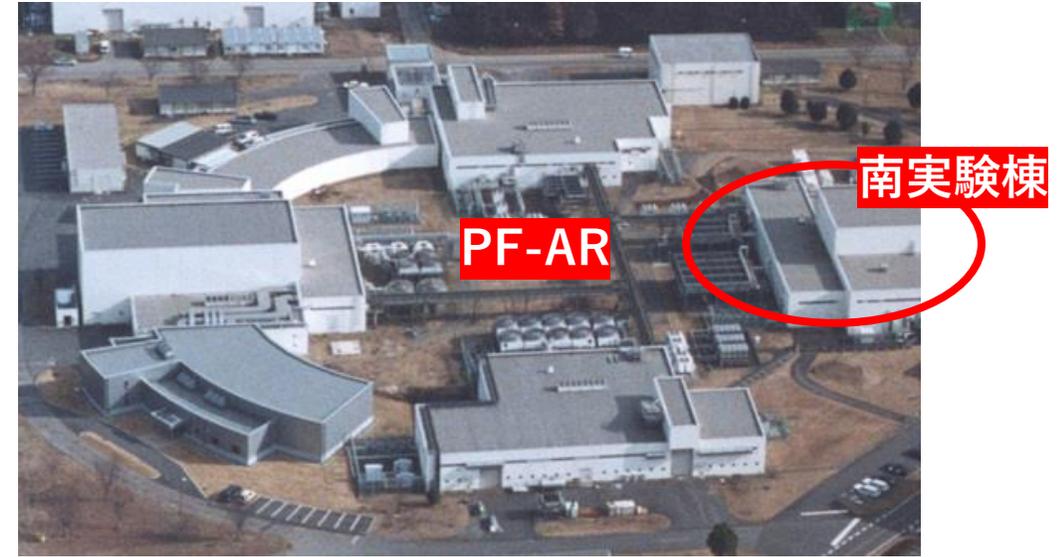
研究の動機と目的

周回周期1.257 μ sのシングルバルク
50-65mAで運転

- KEKに検出器の性能評価用 1~5 GeV/c 電子ビームライン PF-AR TB が完成し、
 今月、初ビームが観測された

動機

- 飛跡を**高精度**に再構成するテレスコープシステムを設置したい
 ↳ SOIセンサーをトラックーとして使用

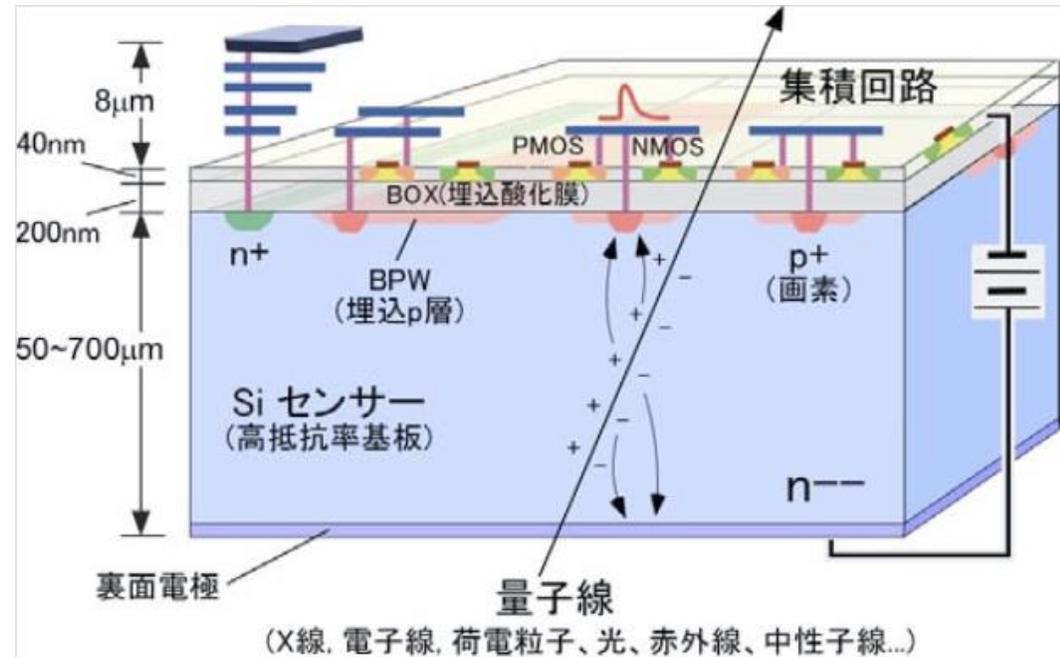


目的

- ① テレスコープシステムを用いた飛跡の最適な再構成方法
 ↳ ELPHの820MeV/c陽電子ビームを用いて評価
- ② PF-AR TBにおける5GeV/c電子ビームに対する再構成分解能の予想
 ↳ 運動量スキャン(200~820MeV/c)と120GeV計算値による評価

SOI ピクセル検出器

Silicon-On-Insulator 技術を用いて酸化膜上にトランジスタを形成したモノリシック型検出器
酸化膜によりセンサー層と回路層が電気的に分離



特長

- 低物質質量→多重散乱の抑制
- ピクセルの微細化→高位置分解能の実現

本研究で用いたSOIピクセル検出器
INTPIX4NA

INTPIX4NAチップ
300um厚,
ピクセルサイズ17um

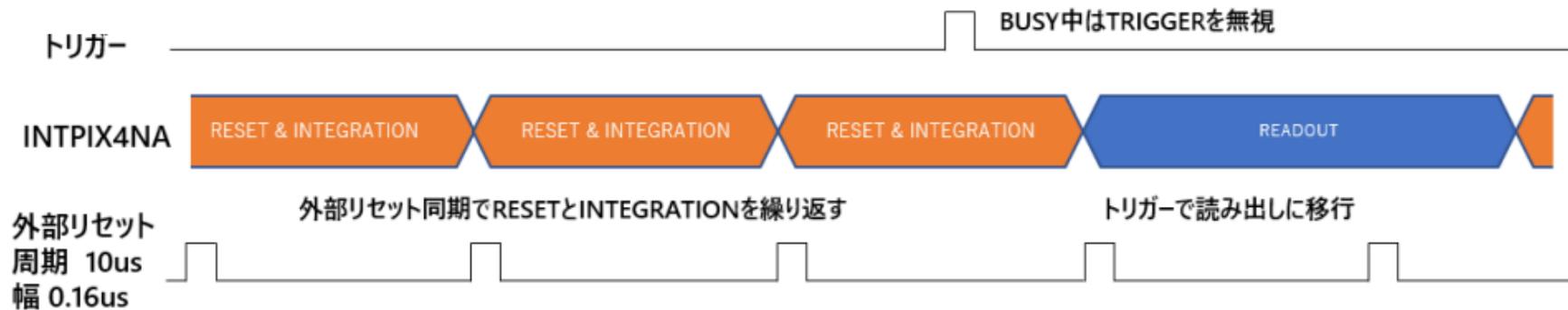
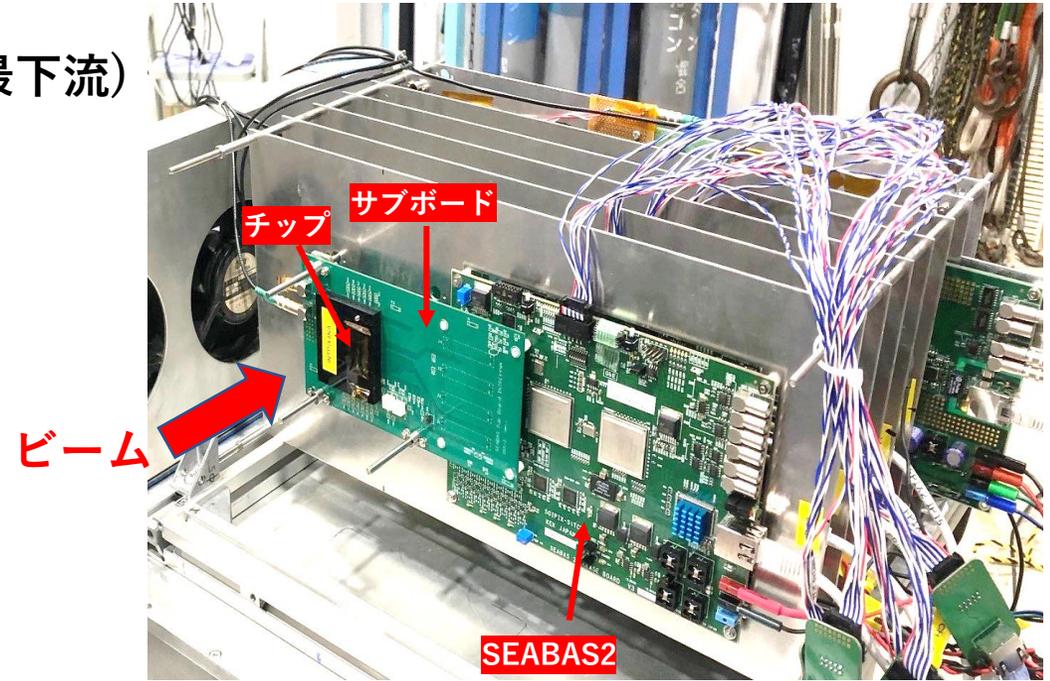
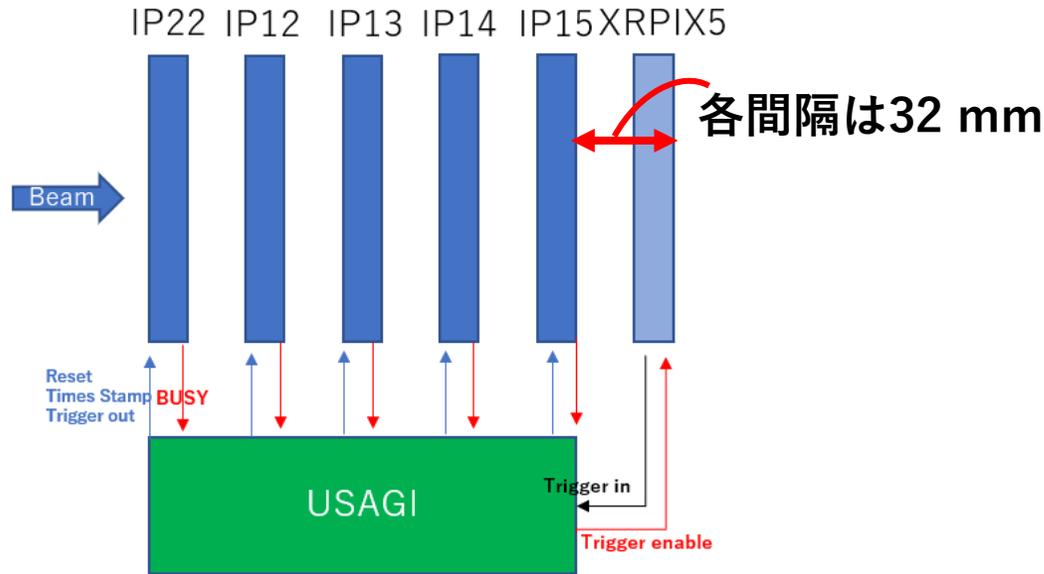


INTPIX4とはセンサー厚のみが異なる。

同型センサINTPIX4(500um厚)
はFNAL120GeV
陽子ビームテスト (2018)
で位置分解能~1.5umを達成

テレスコープシステムの概要

- トラッカー-INTPIX4NA (5枚)+トリガー用ピクセルセンサー(最下流)

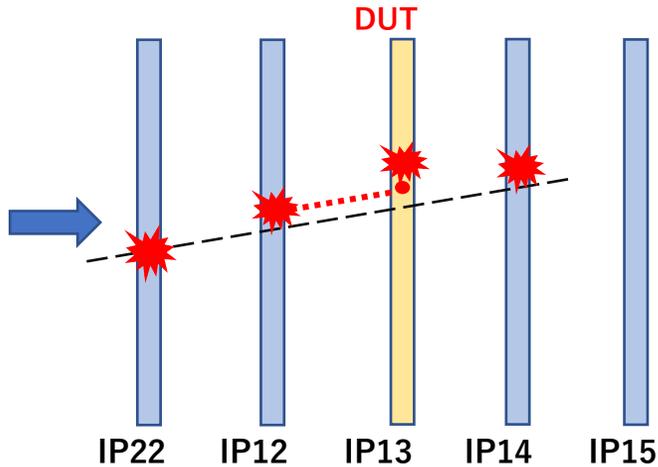


- DUT, トラッカーのいくつかの組み合わせでトラッキングを考える

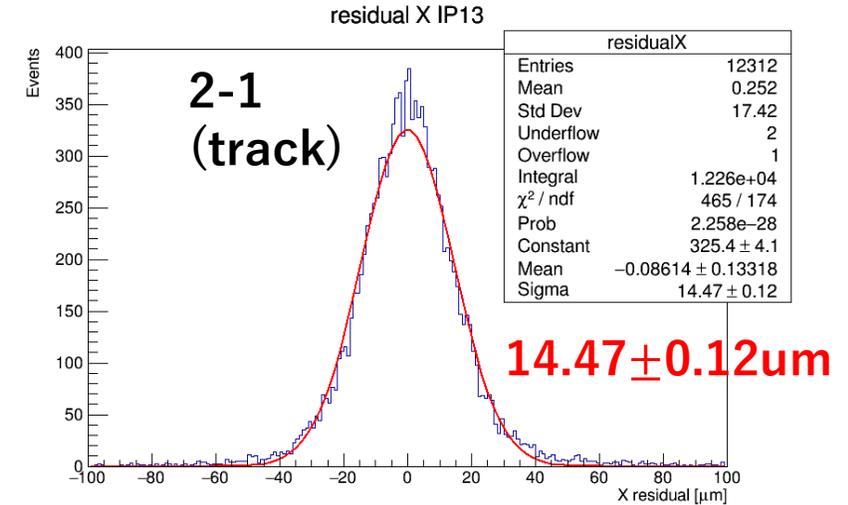
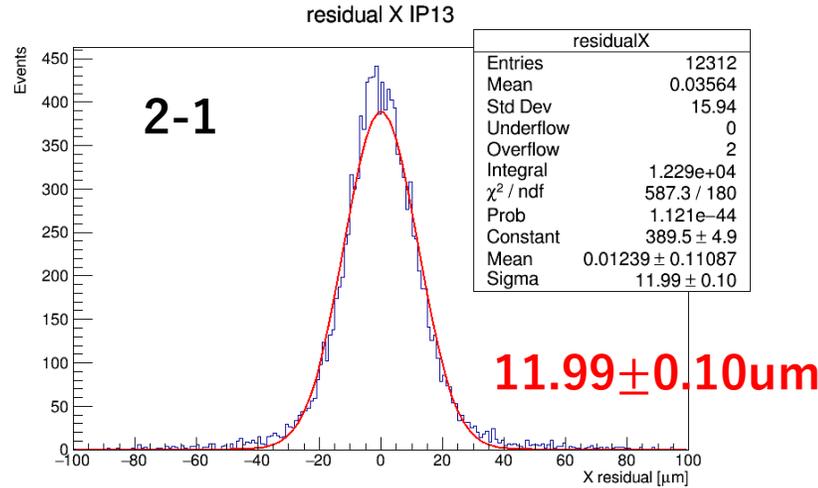
DUTが薄い(～300um)場合(820MeV/c陽電子ビーム)

- IP22,12,14 でのヒット位置を直線フィット(トラック)

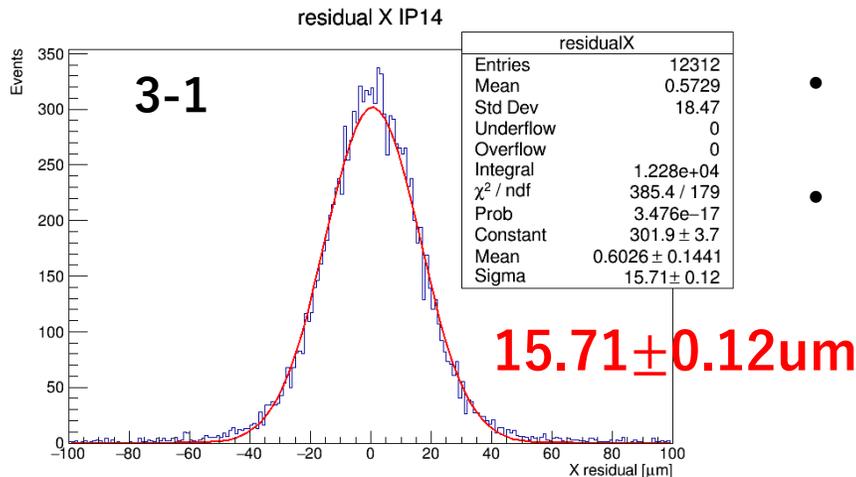
→トラックに平行な直線をIP12からIP13(DUT)に外挿



- トラックからDUT上の再構成位置を決定
→わずかに劣るため左の方式を採用



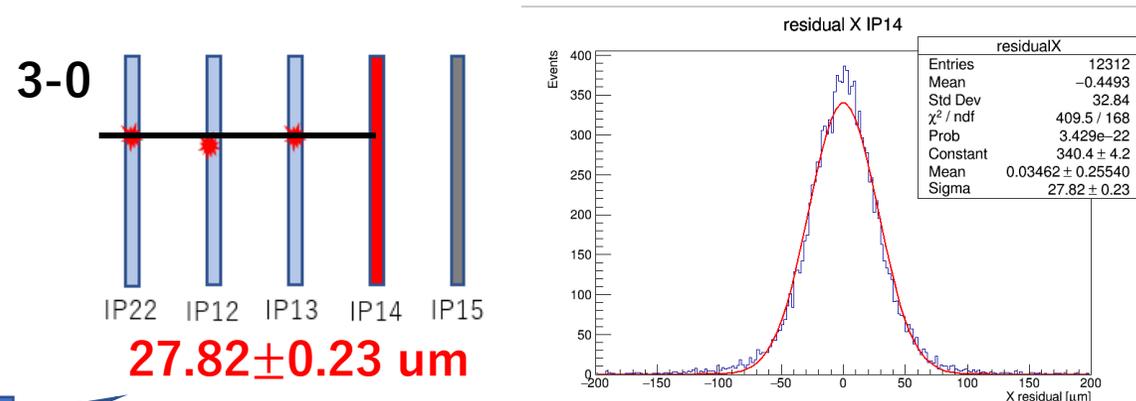
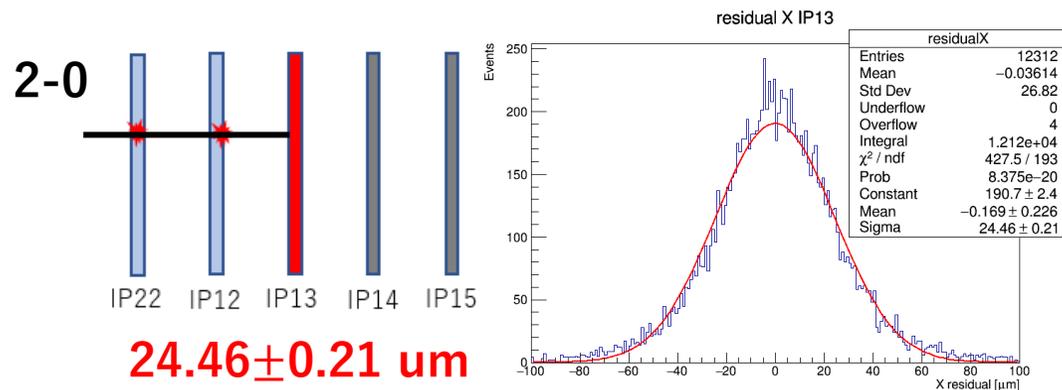
- 上流3枚+下流1枚でトラック(DUT=IP14)



- 2-1と3-1を比較
→低運動量では単にトラックの枚数を増やすと、散乱により不利
- 2-1トラックが最適なトラック方式(再構成分解能～12μm)

DUTが厚くビームが止まる場合(820MeV/c陽電子ビーム)

- DUTより下流のセンサーは使えない
- 上流2枚トラックと上流3枚トラックの結果



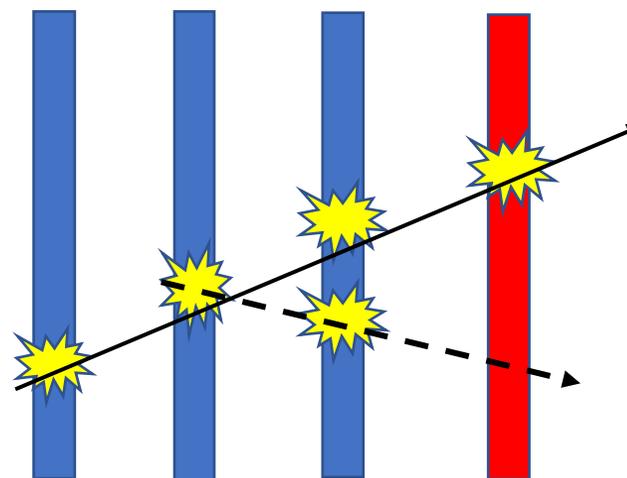
ここでもトラックを増やすと不利

ただし複数ヒット(ノイズ等)があると。。。

2枚トラックではトラックが2本引けてしまう

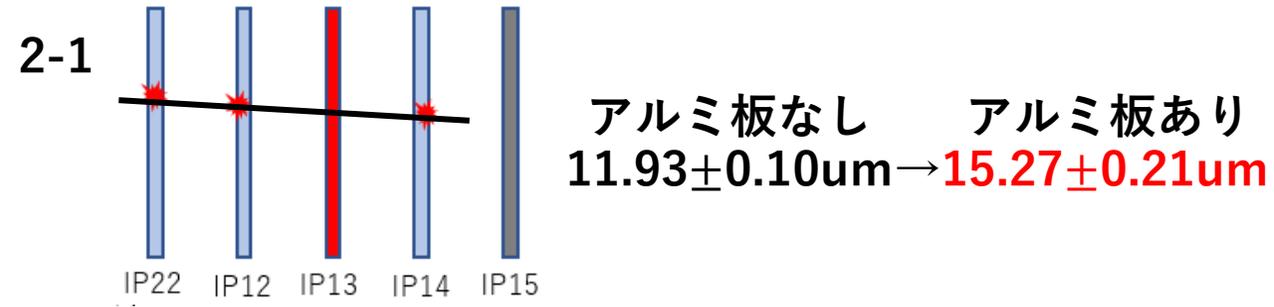
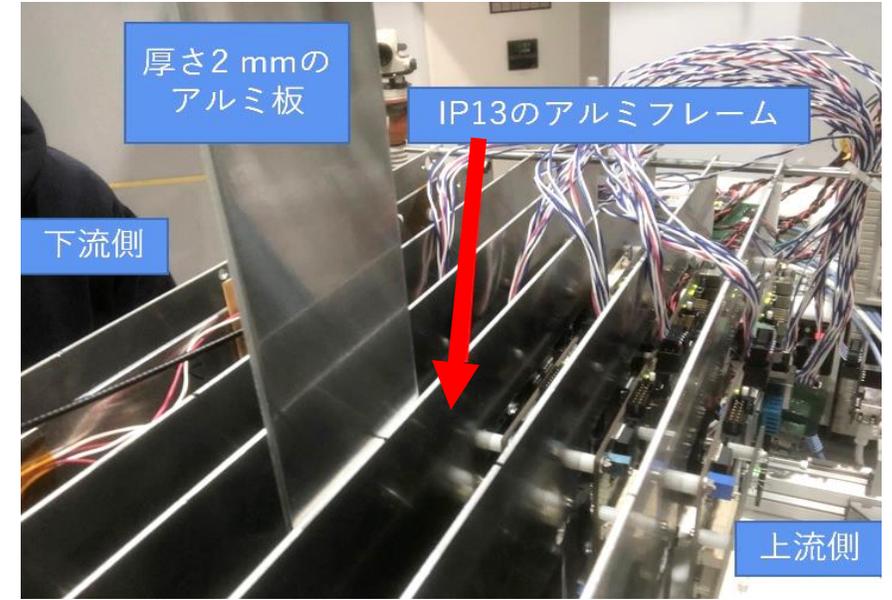
↓
3枚トラックだとより正確にトラック可能
ただし散乱により不利

↓
最終的なトラックはDUT直前2枚で引く

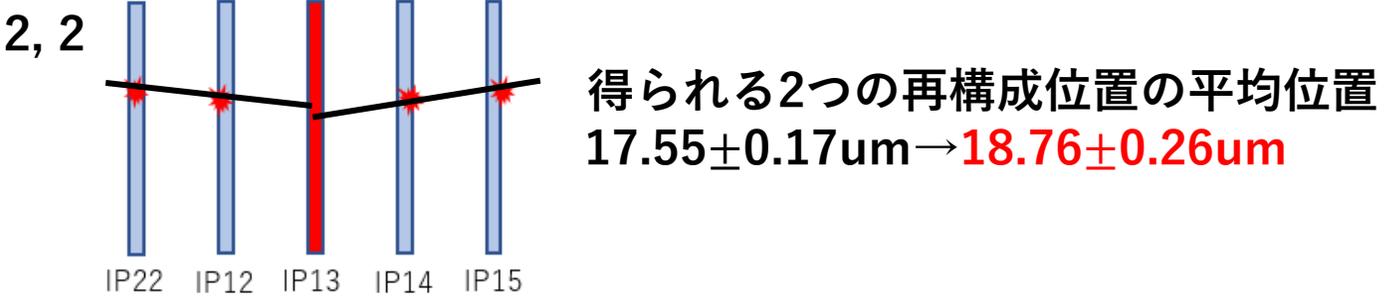


DUTが厚いがビームが通過する場合(820MeV/c陽電子ビーム)

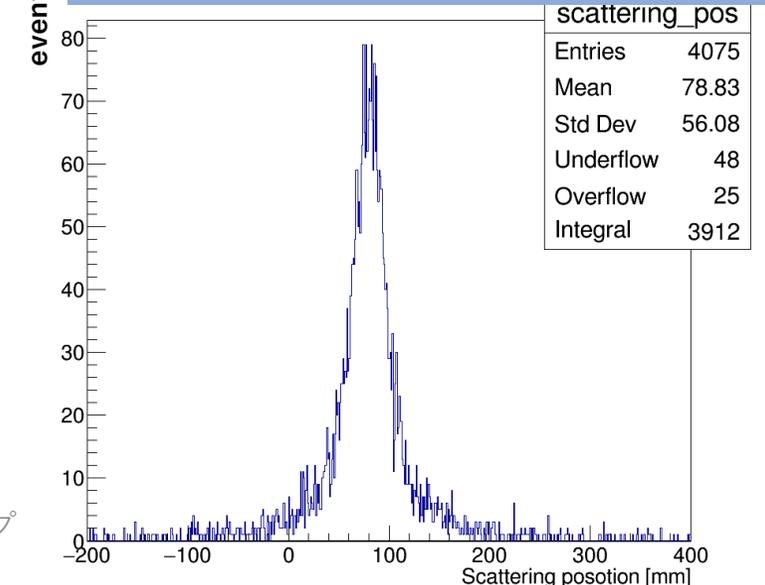
- IP13の下流(IP22の前面から78mm)に2mm厚アルミ板を挿入し模擬試験を実施



- 上流2枚、下流2枚を用いた2本のトラックを考える
最近接点を与える位置 → 散乱位置 78.83 mm



アルミ板を挿入したときの散乱位置

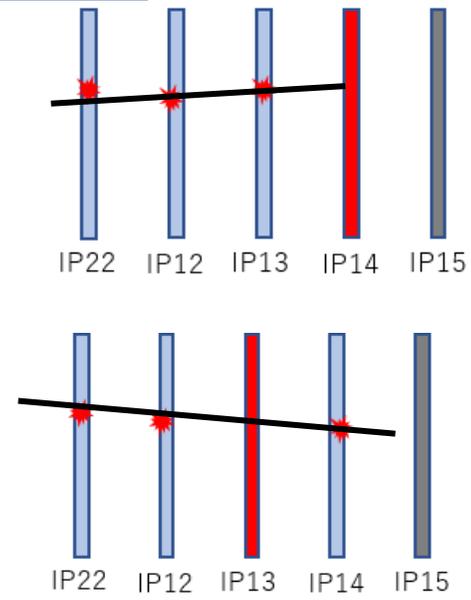
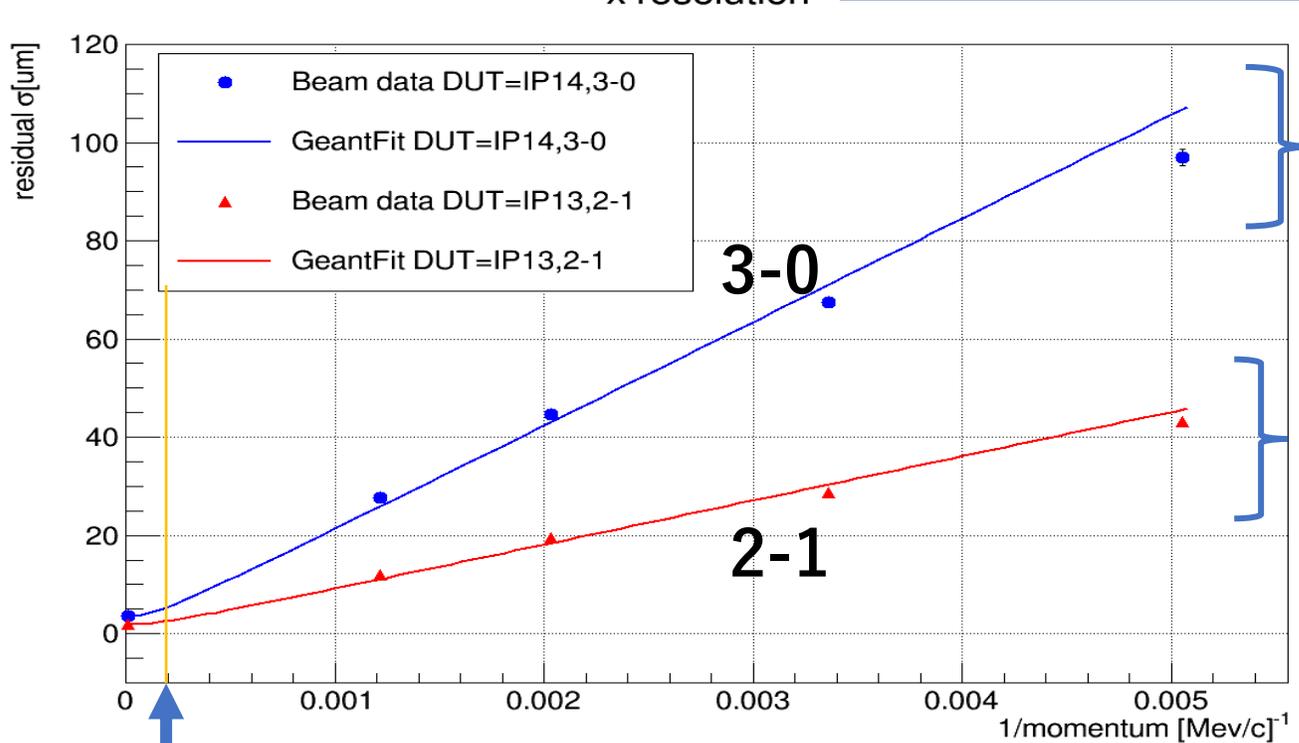


- 2mmアルミ板程度ではいまだに2-1が最良である
ただし、2-1は多重散乱により飛跡再構成分解能は低下
- 2, 2はDUTの厚さの影響を受けていない

運動量スキャン

- 陽電子ビームの運動量 $p=200, 300, 500, 820 \text{ MeV}/c+120\text{GeV}$ における計算値
 →関数 $\sigma = \sqrt{\sigma_{int}^2 + (k/p)^2}$ によるフィット結果から $5\text{GeV}/c$ に対する再構成分解能を計算

σ_{int} : INTPIX4NAの位置分解能
 k : 定数



5GeV/cに対して
 $5.73 \pm 0.25 \mu\text{m}$

$2.68 \pm 0.14 \mu\text{m}$

- 運動量に反比例→多重散乱の影響が支配的
- 5GeV/cにおける位置分解能を推定

5GeV/c

まとめ

PF-AR TBへの設置に向け開発したテレスコープシステムの再構成分解能評価をELPHにおける200~820MeV/c陽電子ビームを用いて行った。

① 820MeV/c における評価

- DUTが薄い(~300um)場合
 - 2-1トラッキングの3枚目における再構成位置分解能が最良~12um
- DUTが厚くビームが止まる場合
 - 3-0により正確なトラックを識別し、最終的に2-0でDUT上の再構成位置を決定
- DUTが厚いがビームが通過する場合
 - 2mmアルミ板程度では2-1が最良な分解能 ~15um ←DUTの厚さに依存
 - 2, 2はDUTの影響を受けずに評価可能 ~18um

②

- 運動量スキャンと120GeV/c計算値から
 - 5GeV/cにおける再構成性能を推定

課題

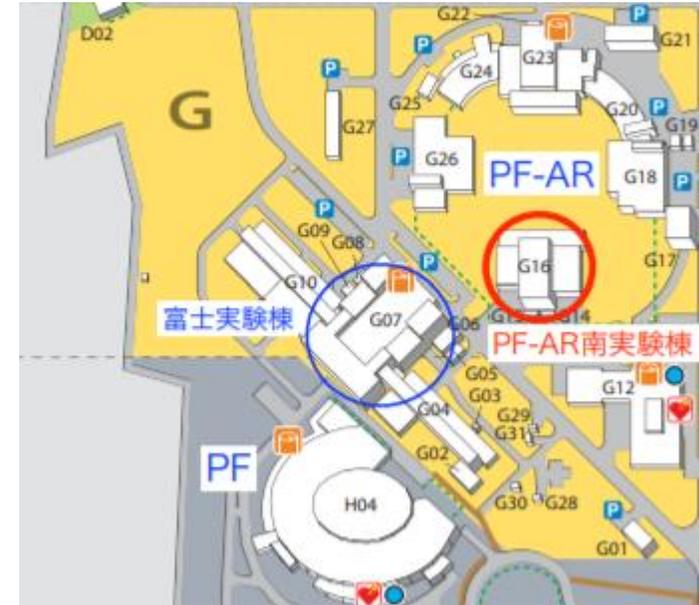
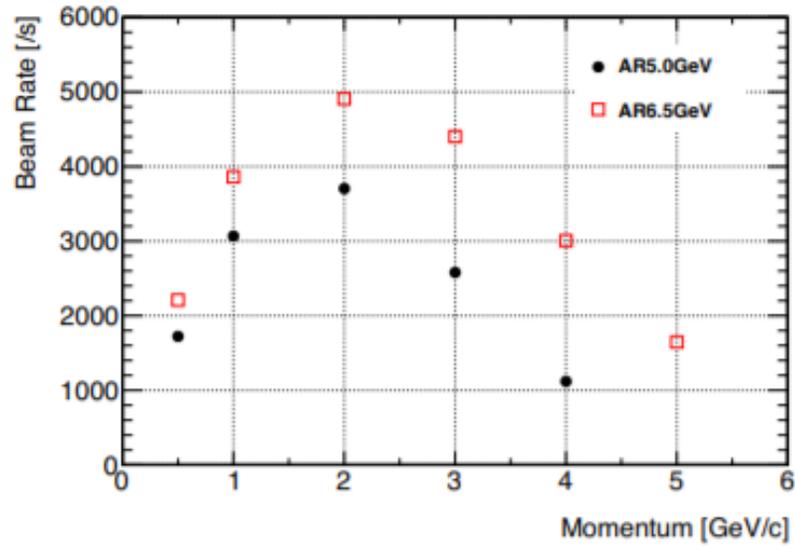
- フレームレートの向上(現在センサー全面読み出し~25Hz)
 - 読み出しのFPGAにゼロサプレッション(ヒット情報のみのデータ送信)を導入(300Hzまで向上する予想)

PF-AR TB におけるチップサイズ当りの
ビームレート~300Hzに対応

Back Up

PF-AR テストビームライン

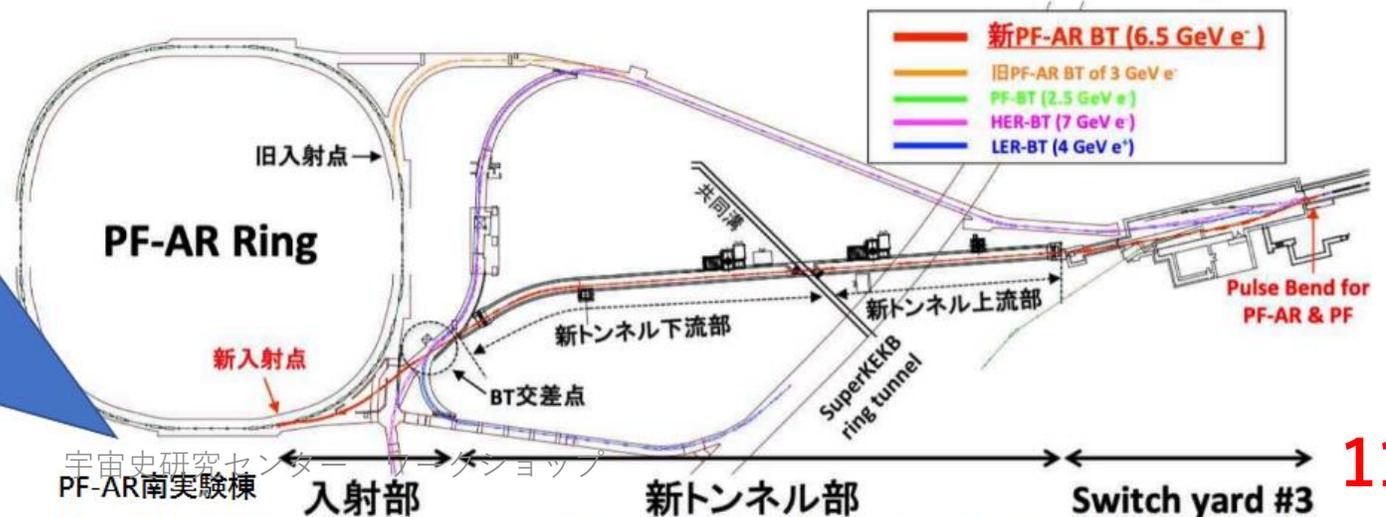
- Cuコンバータ
- 5~6.5 GeVの蓄積電子ビームからdi-magにより取り出し
- ビームレート最大 5 kHz の見込み
- 周回周期1.257usのシングルバルク



放射光源である蓄積電子ビームの寿命と安定性が最優先



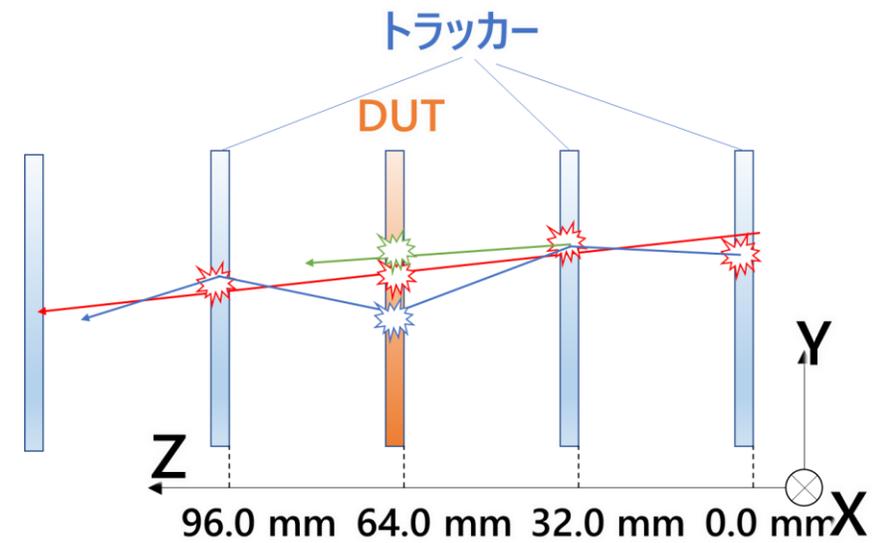
電子ビームの取り出しイメージ



センサ薄化 Geant4シミュレーション

各運動量の位置分解能評価

- センサ厚を300 μm / 130 μm 厚 / 60 μm 厚に設定
- SN比からノイズを再現(SN=237), 各ピクセル10 σ でカット
 - ➔ 荷電重心法で位置を計算
- 電荷の広がり $\sigma_{\text{sim}}=9.0\mu\text{m}$ に設定
 - ➔ 上流 2 枚/下流 1 枚で飛跡再構成



運動量 [GeV]	300 μm 厚	130 μm 厚	60 μm 厚
1	8.72 ± 0.09	5.95 ± 0.05	4.76 ± 0.06
2	4.56 ± 0.04	3.23 ± 0.03	3.67 ± 0.04
3	3.07 ± 0.03	2.41 ± 0.02	3.33 ± 0.03
4	2.36 ± 0.02	2.06 ± 0.02	3.31 ± 0.03
5	1.90 ± 0.02	1.83 ± 0.01	3.36 ± 0.03

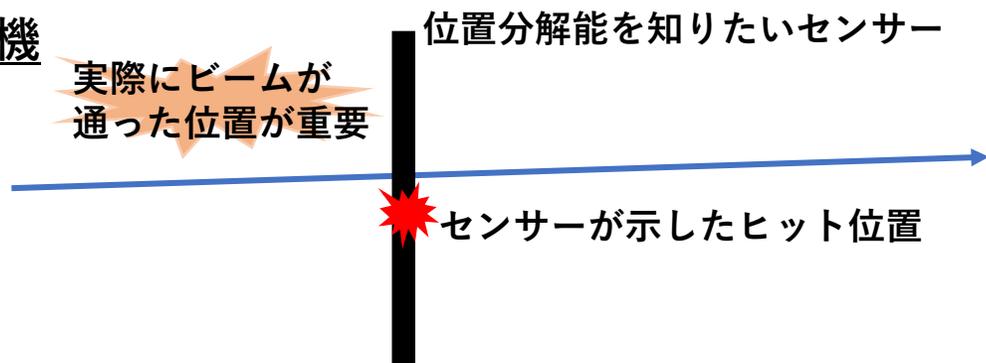
薄すぎると信号量が落ちて位置分解能が劣化する300 μm 厚の方がよさそう？

テレスコープシステムの開発動機

背景

- 高エネルギー実験の測定器開発・評価用の1-5GeV/c 電子ビームライン “KEK PF-AR TB”が2022年完成

動機



- 高い位置精度で再構成するためのテレスコープシステムをPF-AR TB に設置したい

→SOIピクセル検出器 **INTPIX4NA** を用いて、テレスコープシステムの開発を行った

低物質量
高位置分解能

目的

- GeVオーダーのビームは多重散乱の影響を受けやすい
→東北大学電子光理学研究センター(ELPH)にて

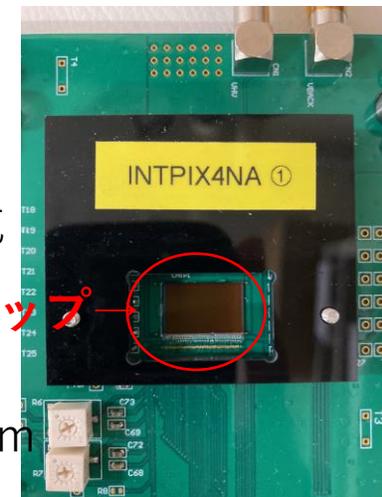
800MeV/c陽電子ビームを用いて飛跡再構成分解能が最良となる再構成方式を探る

本研究で用いるSOIピクセル検出器
INTPIX4NA

同型センサー INTPIX4
(500um厚)はFNAL120GeV
陽子ビームテスト (2018)
で位置分解能~1.5umを達成

INTPIX4NAチップ

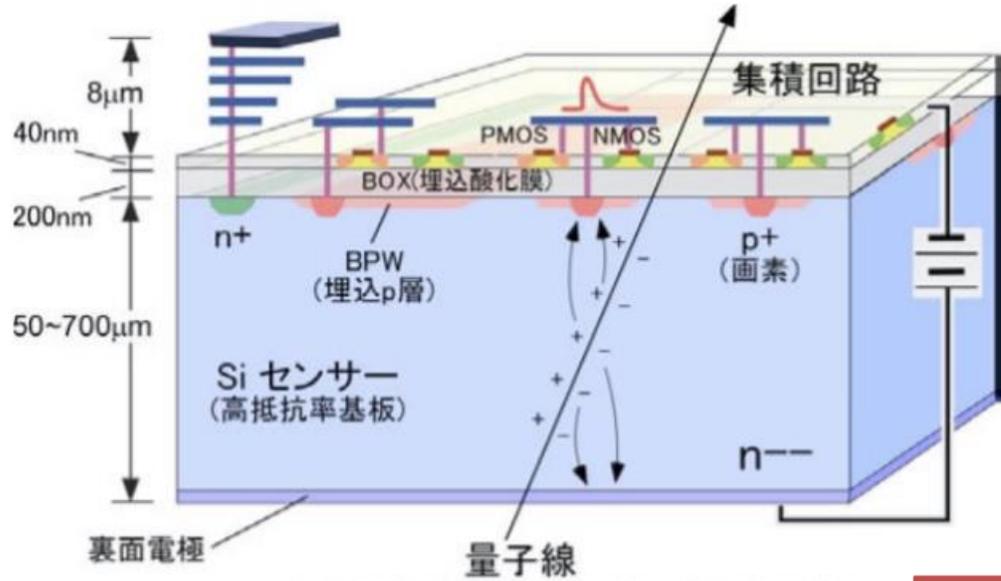
300um厚,
ピクセルサイズ17um



→INTPIX4とはセンサ-厚が異なる。
位置分解能は~1.5umとして解析している。

SOI (Silicon-On-Insulator) ピクセル検出器とは

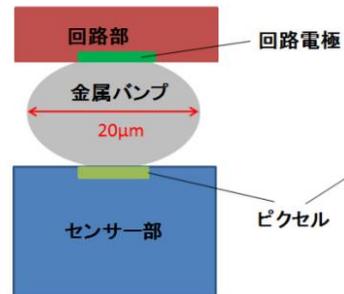
- センサー層と回路層が絶縁膜で分離されたモノリシック型の荷電粒子検出器



(X線、電子線、荷電粒子、光、赤外線、中性子線...)
<http://rd.kek.jp/project/soi/research.html>

ハイブリッド半導体検出器→

- ハイブリッド型検出器に比べて
 - 低物質質量→多重散乱の抑制
 - ピクセルの微細化→高位置分解能

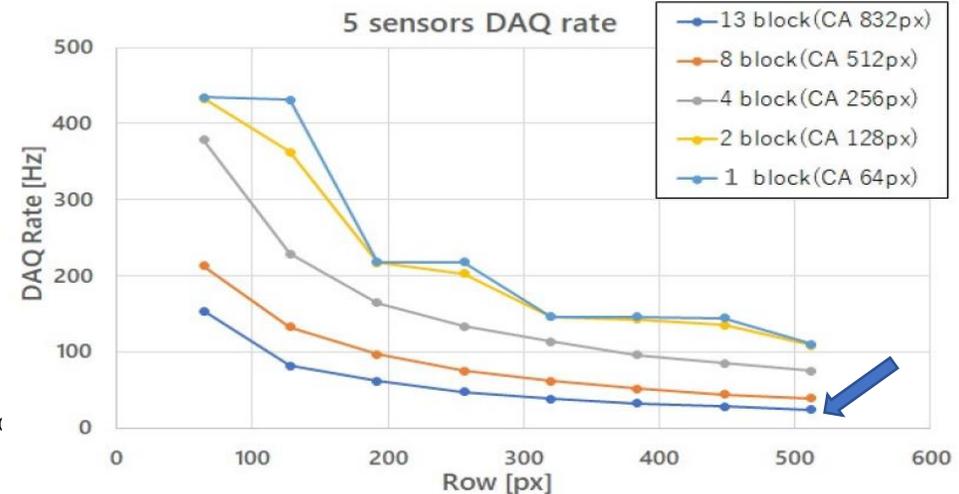


<https://rd.kek.jp/project/soi>

本研究で用いるSOIピクセル検出器
INTPIX4NA

同型センサー INTPIX4
(500μm厚)はFNAL120GeV
陽子ビームテスト (2018)
で位置分解能~1.5μmを達成

INTPIX4NAチップ



る。

テレスコープシステムの概要

- KEK PF-AR TBライン(電子ビーム1-5GeV)におけるセンサーの性能評価に有用なテレスコープ(飛跡再構成)システムの開発

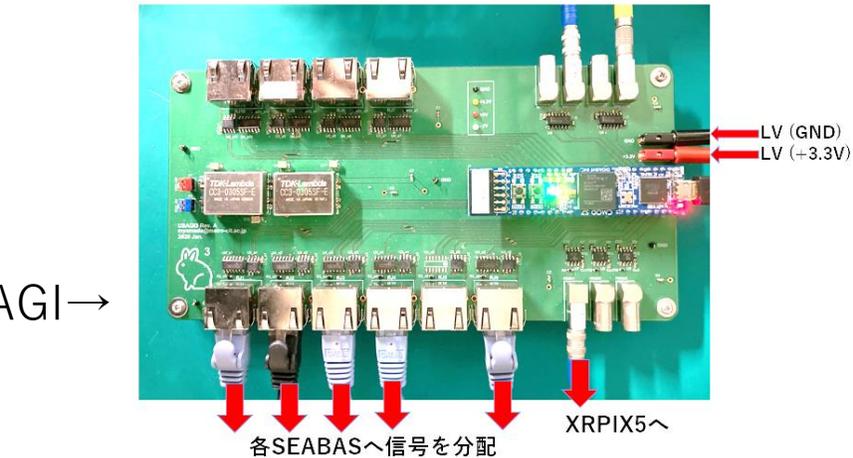
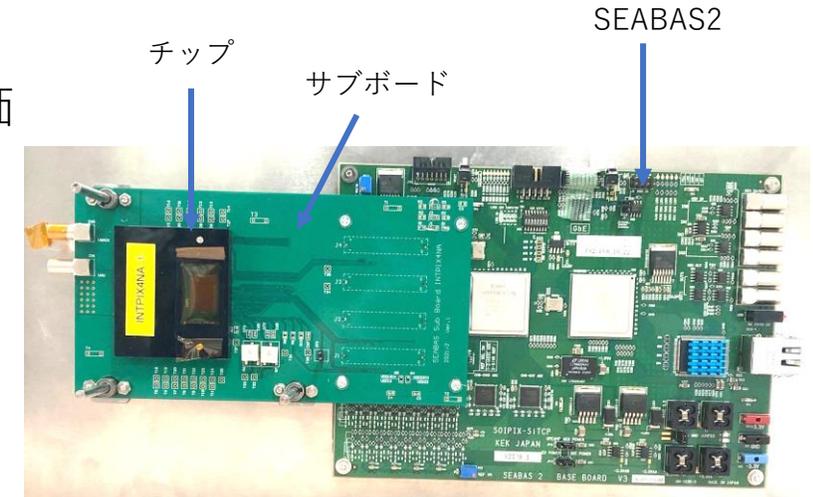
トラッカーINTPIX4NA

トリガー検出器XRPIX5

SOI ピクセル検出器

→読み出し領域を指定できる(ROI)

トリガーの選択とフレームレートの向上

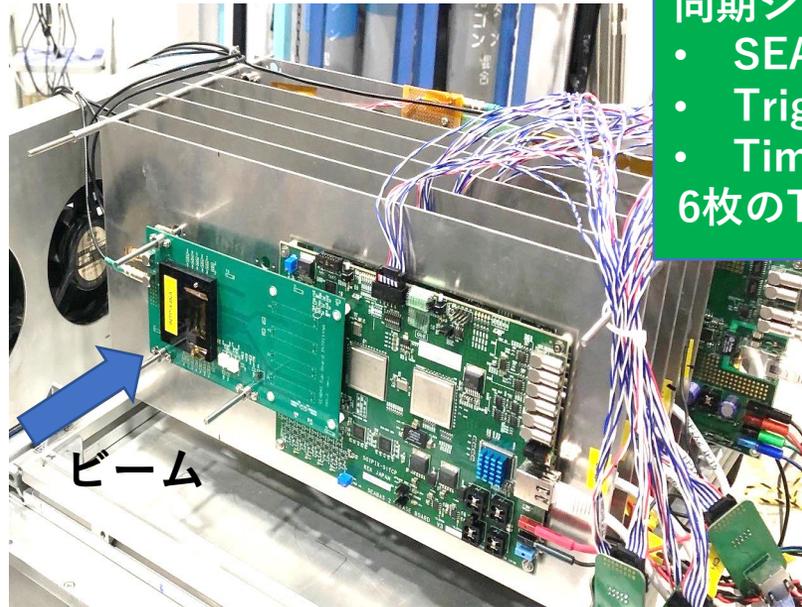
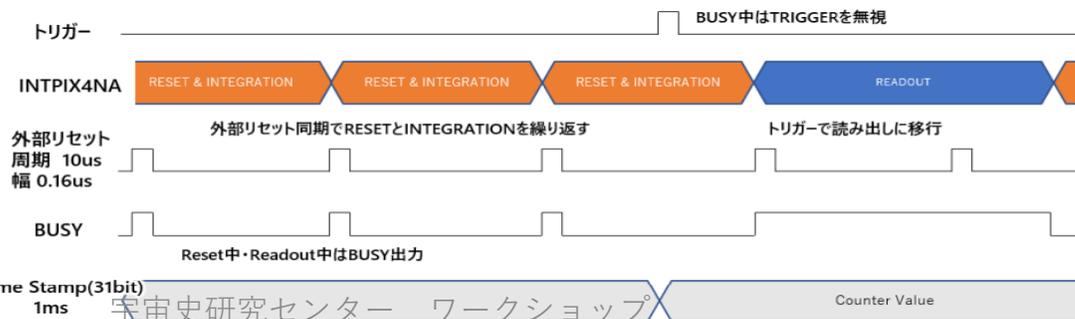


同期システム

- SEABAS2へ定期的Reset(100kHz)
 - Trigger信号→読み出し開始
 - Time Stamp(1kHz)
- 6枚のTime Stampが一致したデータを解析



USAGI→



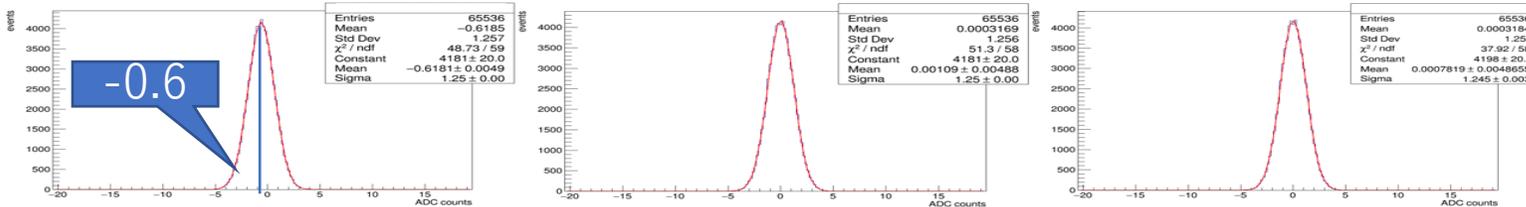
センサー間隔 32 mm

ペDESTAL評価(ELPH データ)

- 各ピクセルのペDESTALを予め求める
- フレーム毎にこのペDESTAL全体が揺らぐ
→揺らぎ分の平均を差し引いて補正をする
- 2種類の補正方法

①平均値をセンサー全体で計算する **global 補正**
 ②ブロックごとに計算する **block 別補正**

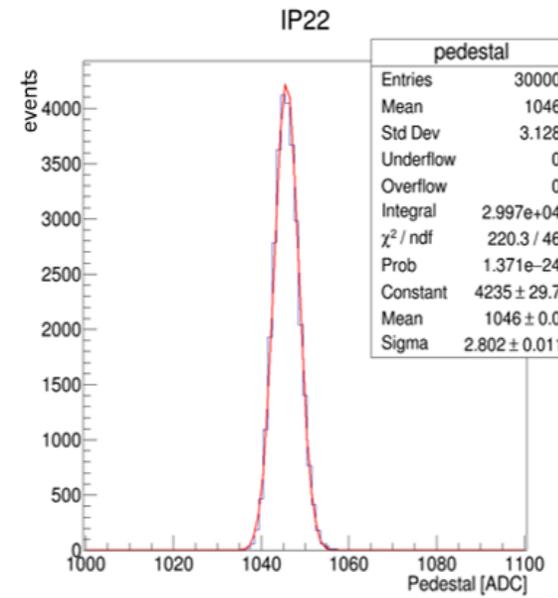
1000th frame 全ピクセルのペDESTAL分布
 このフレームでは補正による違いは顕著でない↓



補正なし

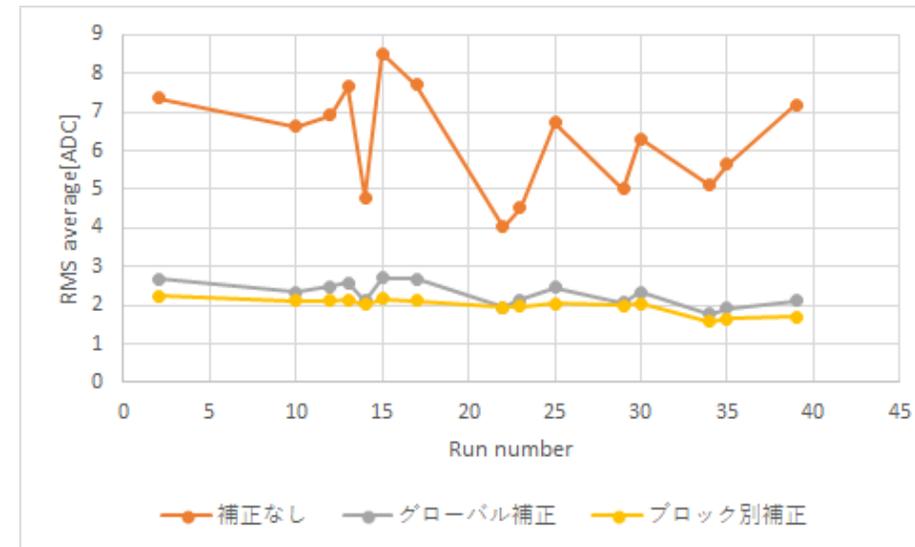
global 補正

block 別補正



←1pixel(CA128,RA128)
 ペDESTAL分布

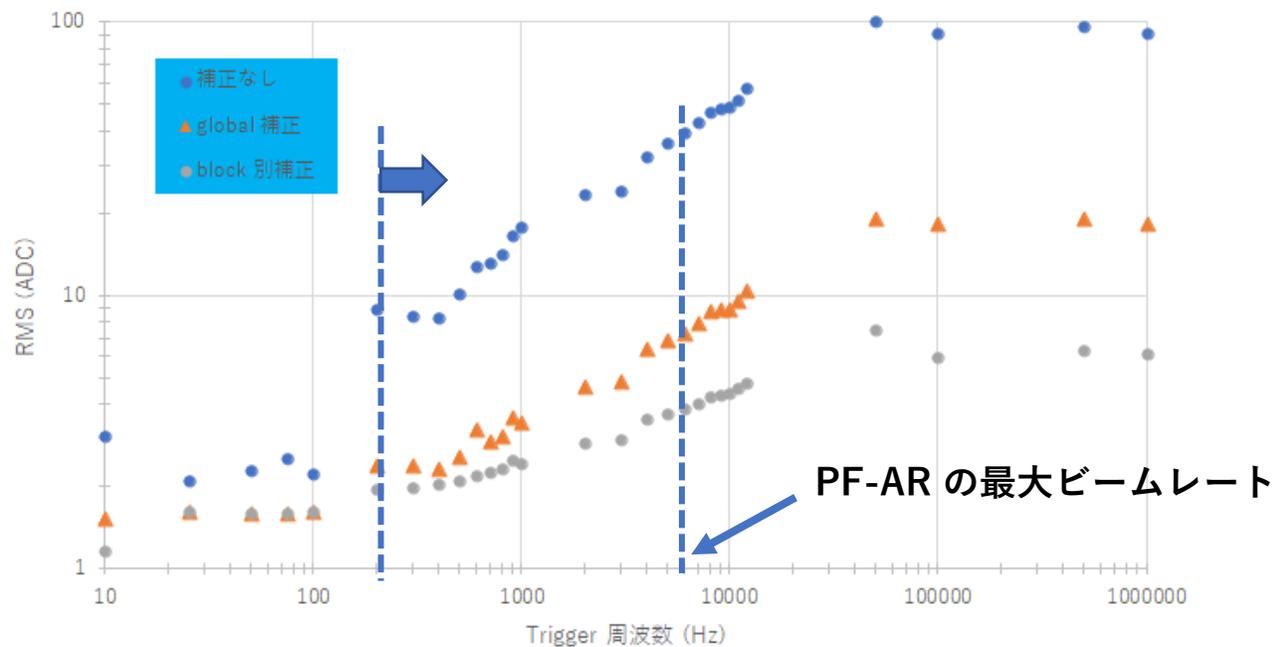
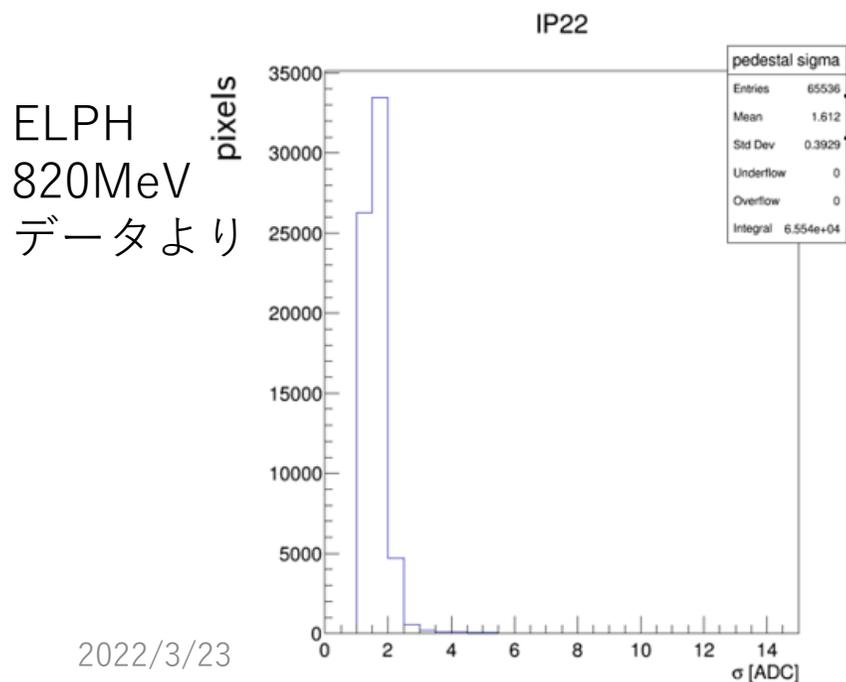
↓ RUN毎のRMS



ペDESTAL評価(ELPH+筑波大)

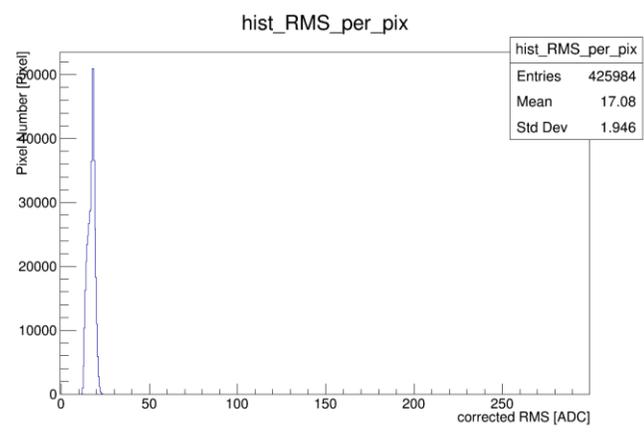
- PF-AR ビームレート + Run毎のばらつき
→ Block 別補正で解析
- 各ピクセルのペDESTALの σ を計算し、
その平均値をセンサーのノイズとして評価した

PF-AR ではさらに高レート
ファンクションジェネレータで
レートを変えて
外部トリガーを入力

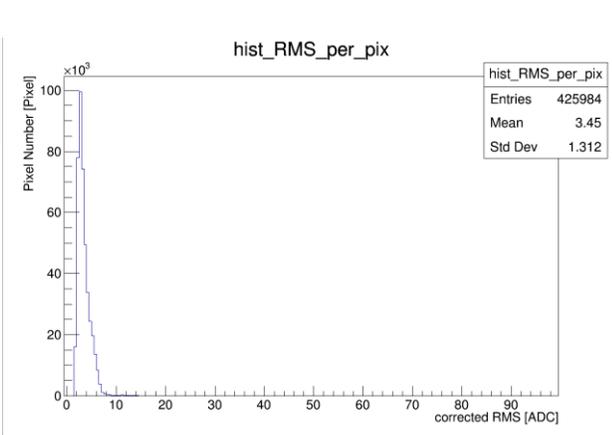


↑ ペDESTALの揺らぎの周波数依存性

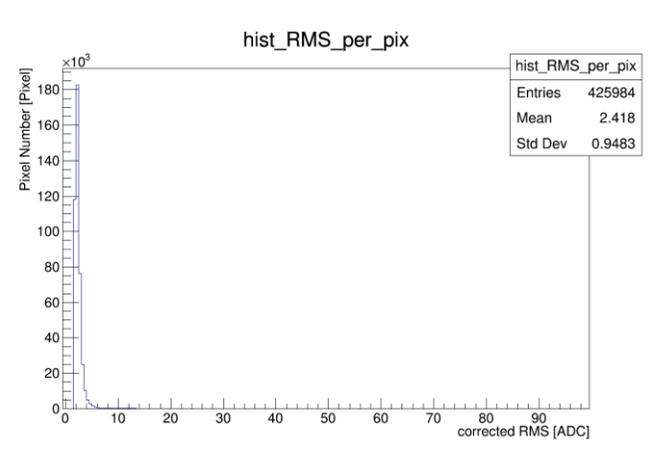
Ex 1kHz
 5枚同期測定
 IP22
 遮光あり



補正なし



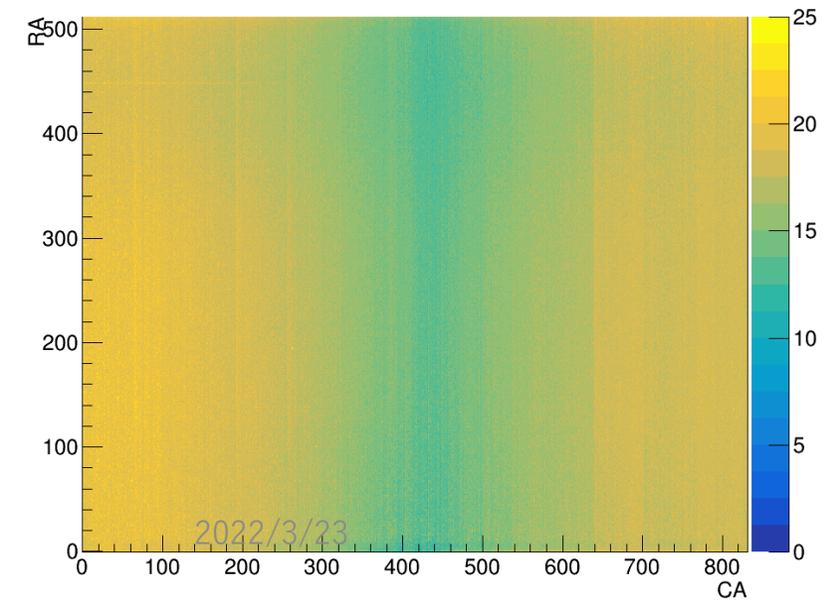
グローバル補正



ブロック別補正

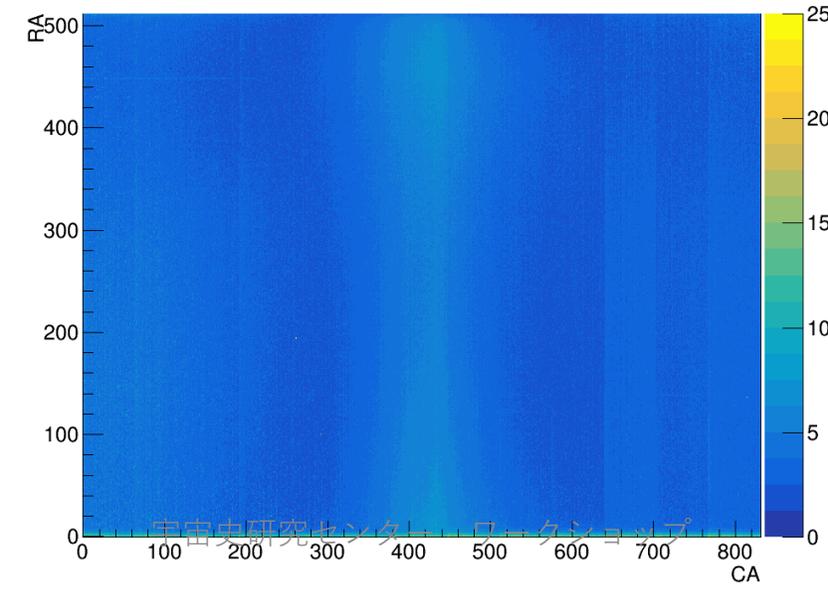
補正なし

find_worse_pix



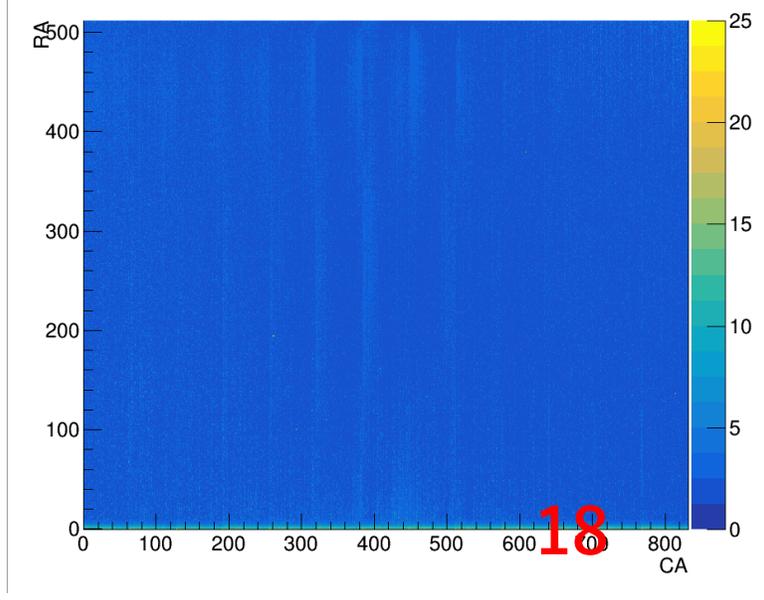
グローバル補正

find_worse_pix



ブロック別補正

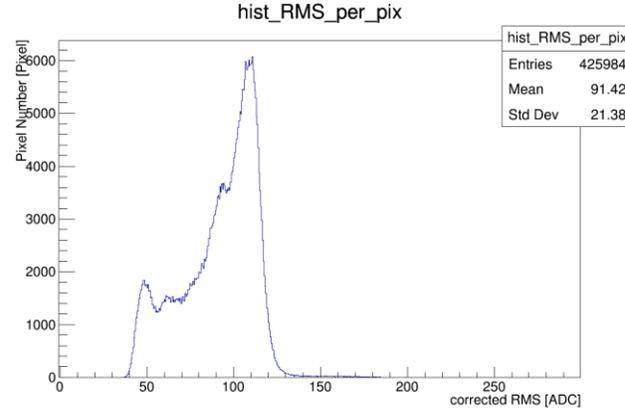
find_worse_pix



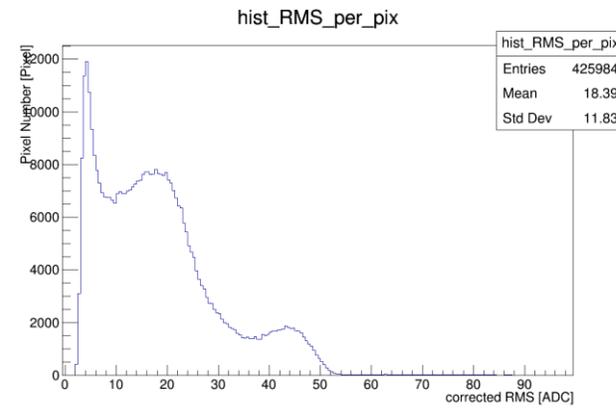
2022/3/23

宇宙空間研究センター ロボットシミュレーション

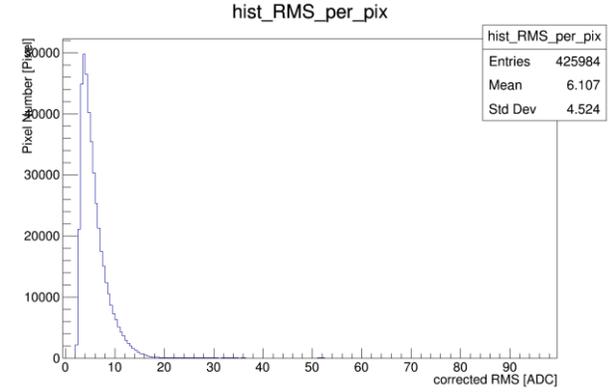
Ex 1MHz 5枚同期測定 IP22 遮光あり



補正なし



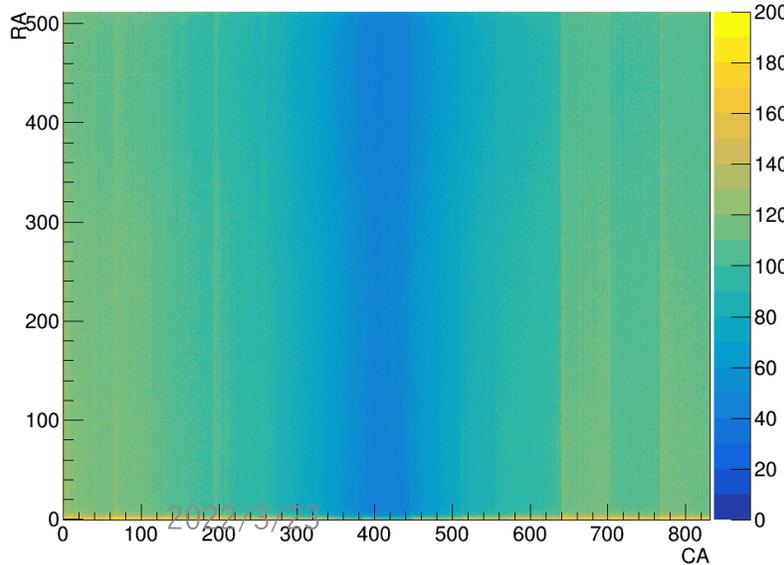
グローバル補正



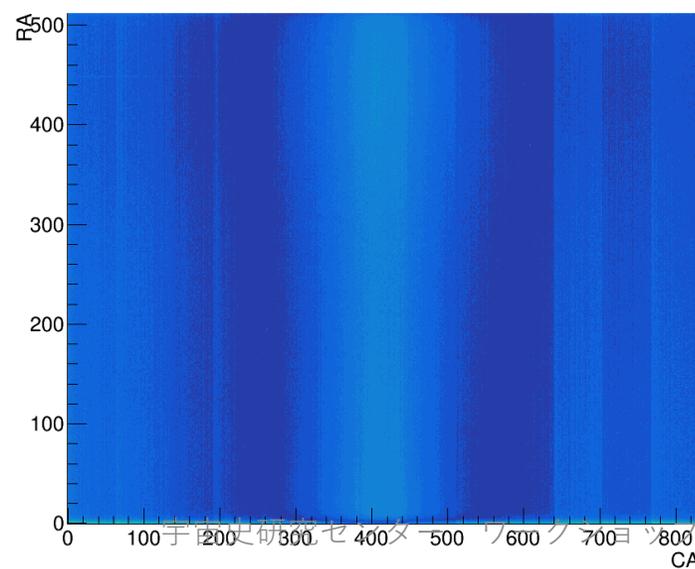
ブロック別補正

7ch(CA中央)付近のRMSが補正なしでは最も低い。グローバル補正では5, 9chといった、CA中央のすぐ両側付近が最も低く、ブロック別補正だとチャンネル毎のRMSの差はほとんど見られず、チャンネル境界付近のRMSがわずかに高いことがわかる。

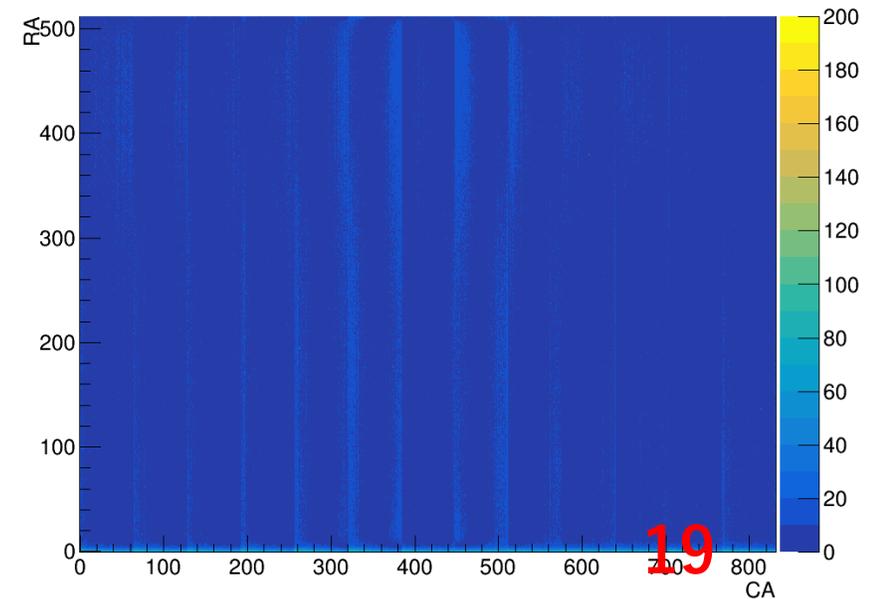
補正なし
find_worse_pix



グローバル補正
find_worse_pix



ブロック別補正
find_worse_pix



クラスタリングとクラスタ電荷量(ELPHデータ)

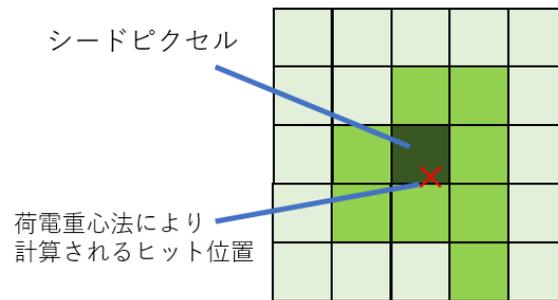
- ヒットピクセル(シードピクセル)の特定

1フレームにおいて最大ADC値をもつ
センサー端3pix以内には作らない

- クラスタ

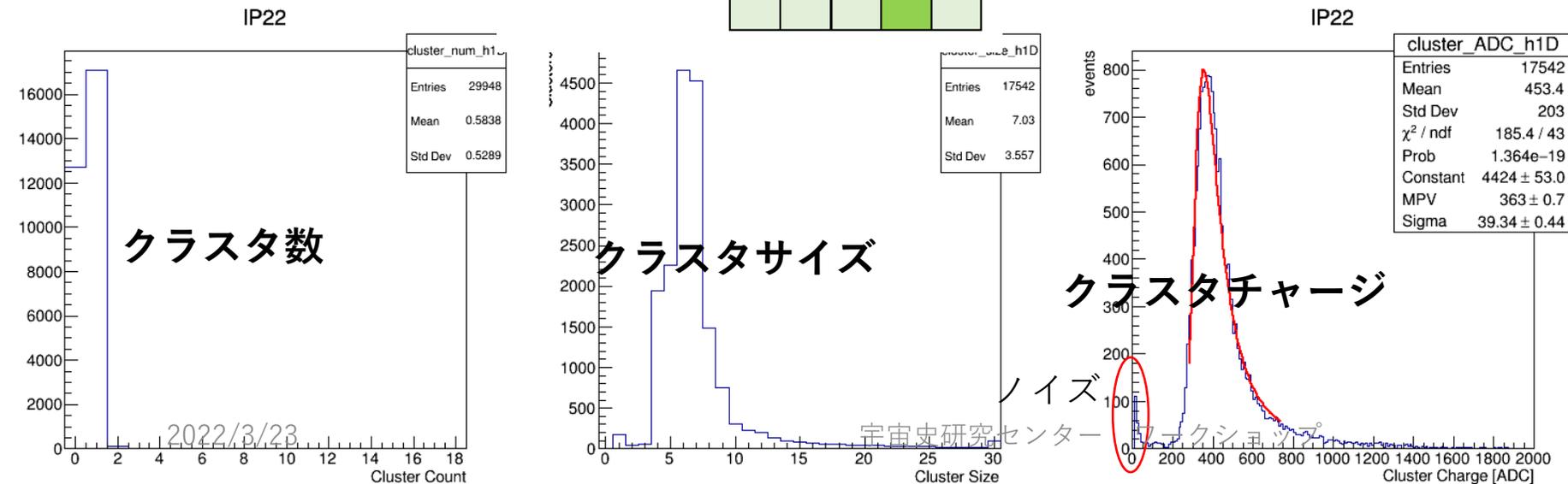
シードピクセル中心に上下左右10ピクセル範囲

- ヒット位置の特定



INT4NA	ノイズ[ADC]	S/N
IP22	1.6	225
IP12	1.8	181
IP13	1.8	186
IP14	1.8	148
IP15	1.6	230

- MIP によるLandau 分布が得られた
→ピーク値とノイズ分布から S/N を計算



様々なトラッキング方法と位置分解能評価 (823.26MeV/c e^+ ビーム)

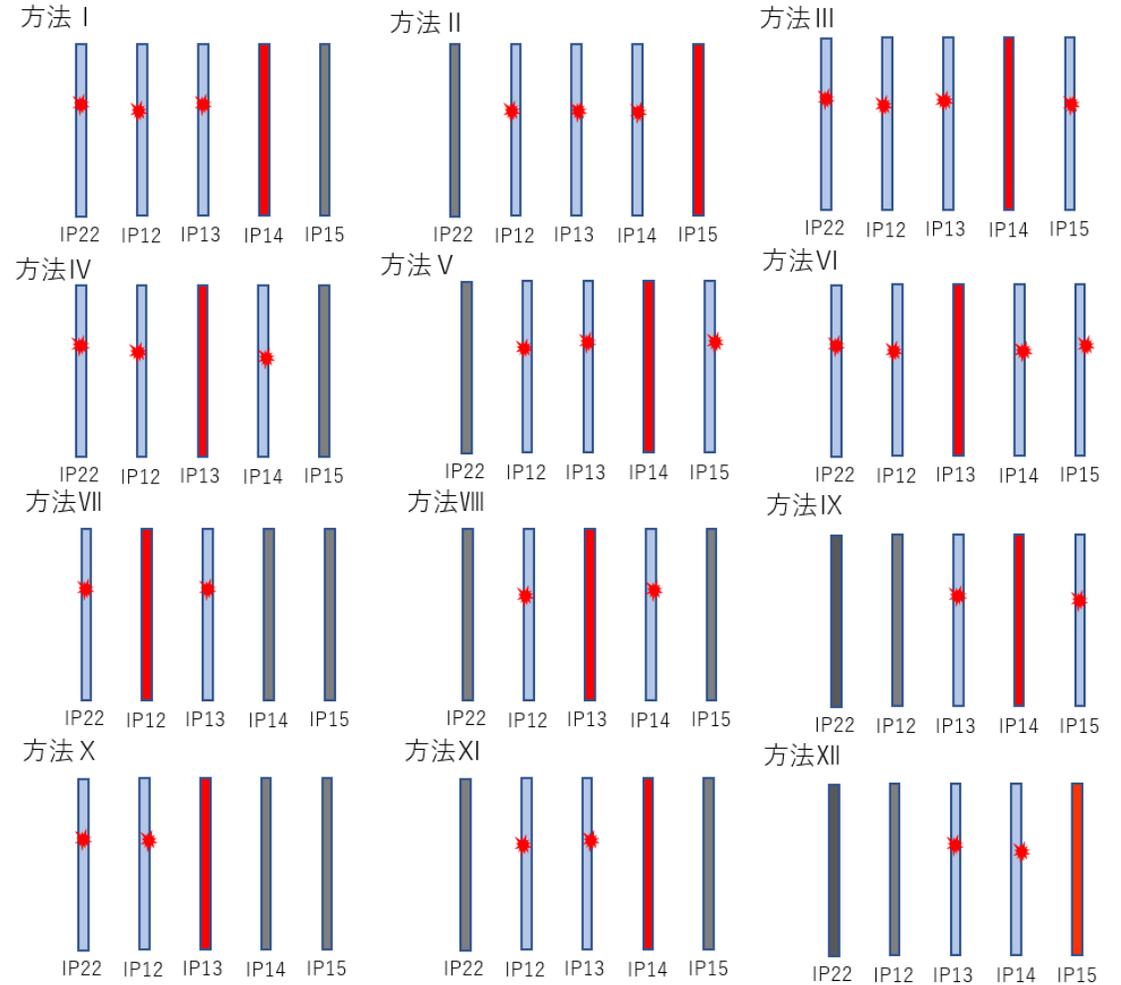
方法	X 方向 [um]	Y 方向 [um]
I (3-0)	27.82±0.23	28.32±0.24
II (3-0)	28.77±0.24	29.60±0.20
III (3-1)	15.71±0.12	14.44±0.12
IV (2-1)	11.93±0.10	11.90±0.10
V (2-1)	12.52±0.11	12.78±0.11
VI (2-2)	19.21±0.16	19.13±0.16
VII (1-1)	12.42±0.11	12.26±0.11
VIII (1-1)	12.39±0.11	12.41±0.11
IX (1-1)	12.99±0.12	13.30±0.10
X (2-0)	24.12±0.20	24.03±0.20
XI (2-0)	24.43±0.21	24.47±0.21
XII (2-0)	25.61±0.24	26.10±0.20

数字はトラックに
用いた枚数

最も良い
位置分解能

散乱をがある場合、
最も良いはず、

複数のトラッキング方法を DUT を変えて試行
赤色センサー=DUT, 灰色センサーは使わない

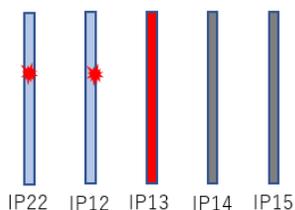


- 多重散乱の影響は少ない
- 3-0のほうが2-0より正確なトラッキングができるはず

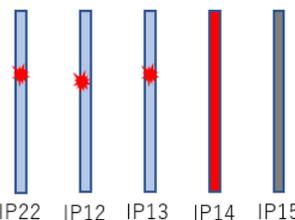
χ^2 カットによる散乱事象の除去

χ^2 カットを使うと散乱の大きな事象を除去できる

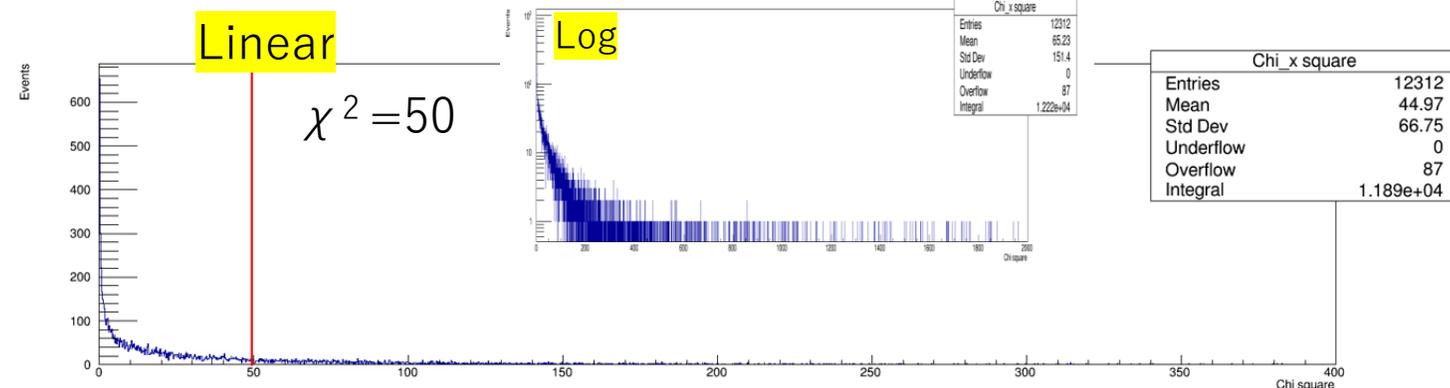
- $\chi^2 = \sum_{tracker} \left(\frac{x_{trk} - x_{hit}}{\sigma_{int}} \right)^2$ で計算した
- x_{trk} :トラック位置
- x_{hit} :ヒット位置
- σ_{int} :固有の位置分解能 $\sim 1.5\mu\text{m}$



$\left\{ \begin{array}{l} x: 24.12 \pm 0.20 \text{ } \mu\text{m} \\ y: 24.03 \pm 0.20 \text{ } \mu\text{m} \end{array} \right.$



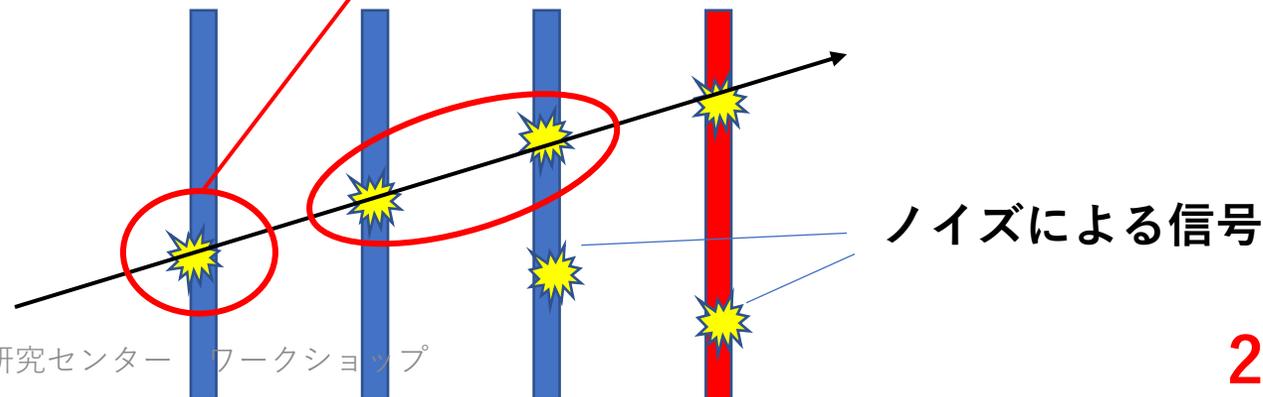
$\left\{ \begin{array}{l} x: 27.82 \pm 0.23 \text{ } \mu\text{m} \\ y: 28.32 \pm 0.24 \text{ } \mu\text{m} \end{array} \right.$



$\left\{ \begin{array}{l} x: 24.44 \pm 0.27 \text{ } \mu\text{m} \\ y: 24.83 \pm 0.24 \text{ } \mu\text{m} \end{array} \right.$

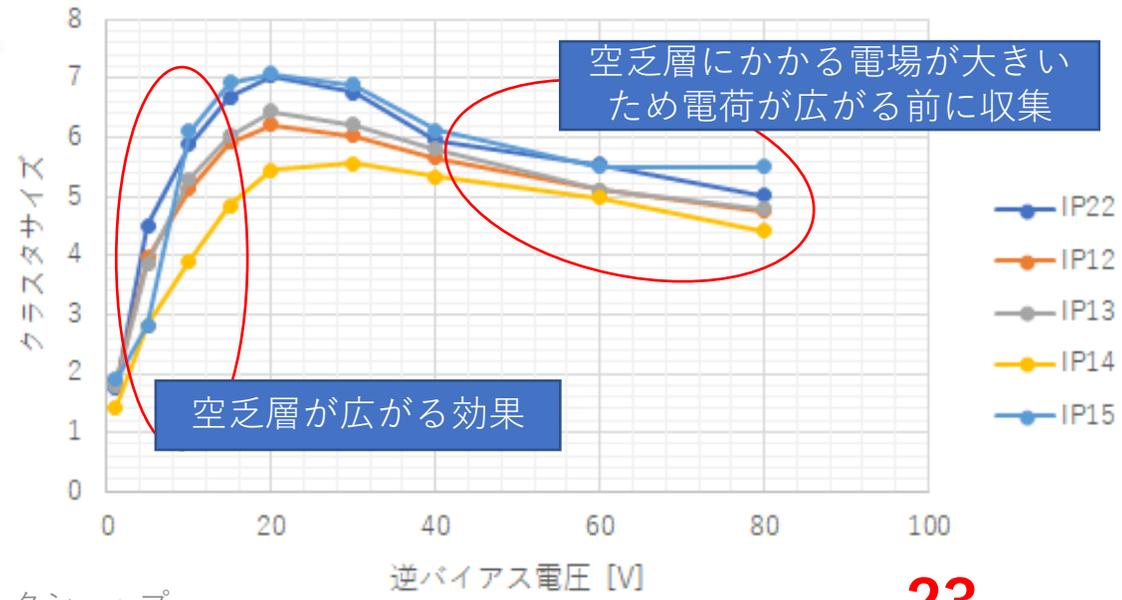
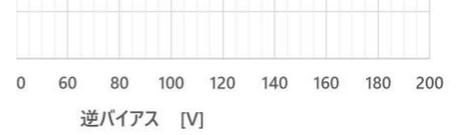
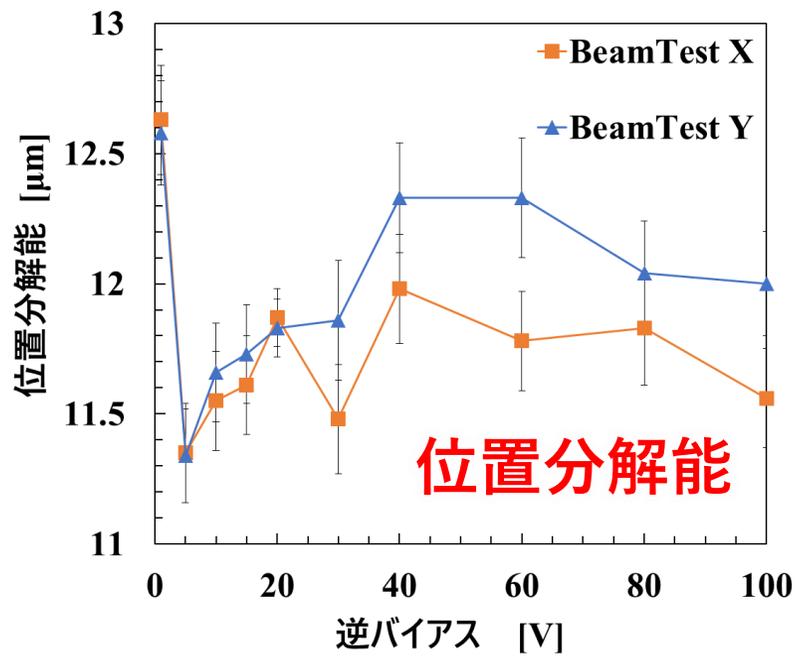
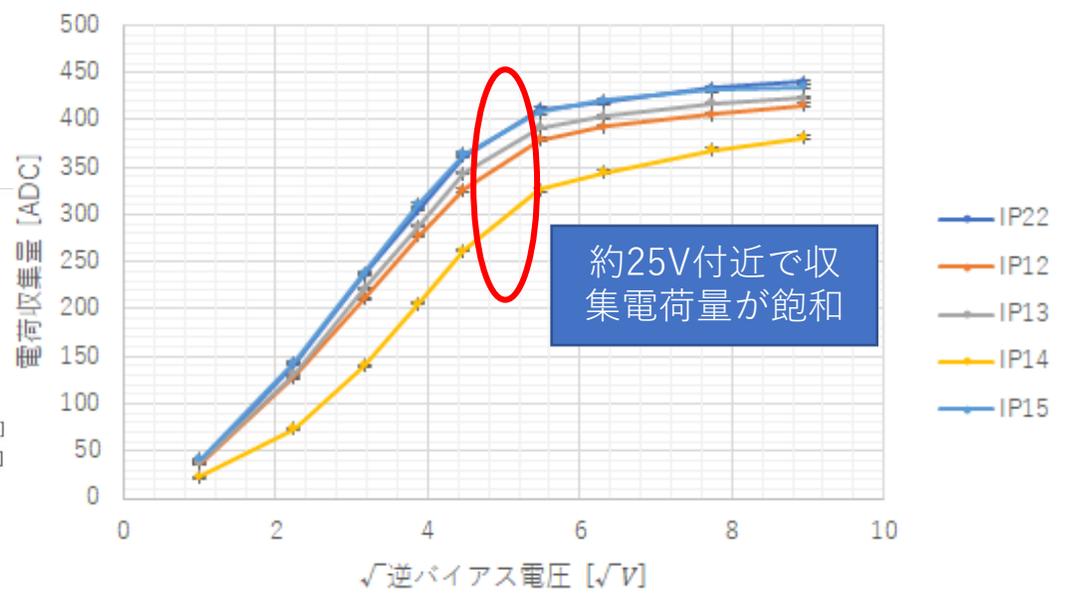
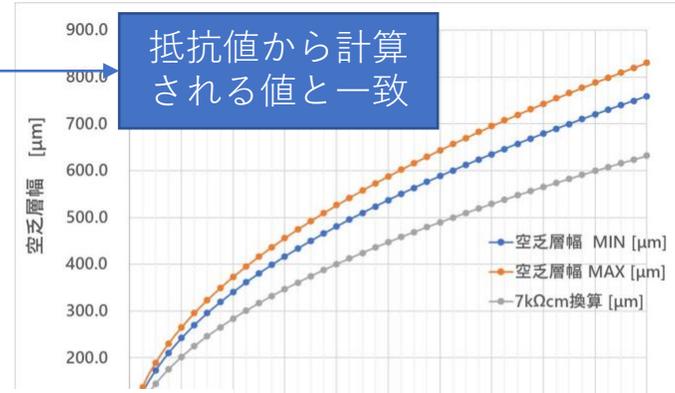
やはりこのヒット情報は必要

3-0 は散乱を起こしている事象を含むことで、位置分解能が悪くなっていることがわかった
→やはり3-0による飛跡の再構成は必須だが、最終的な飛跡の位置は2-0でやると良い



INTPIX4NA 全空乏化電圧の測定

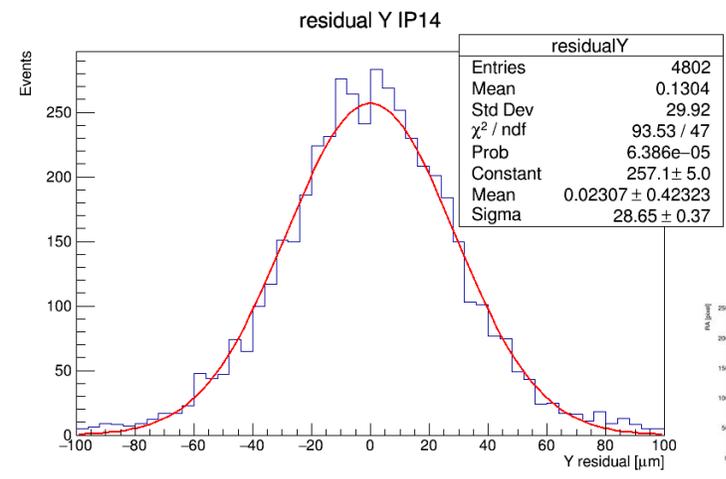
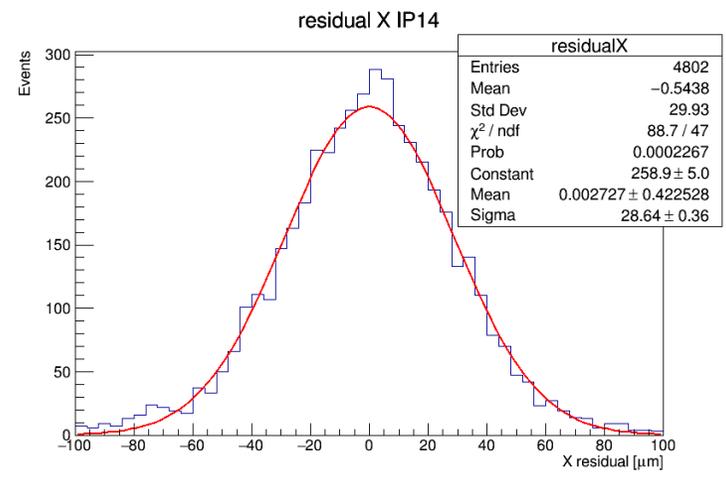
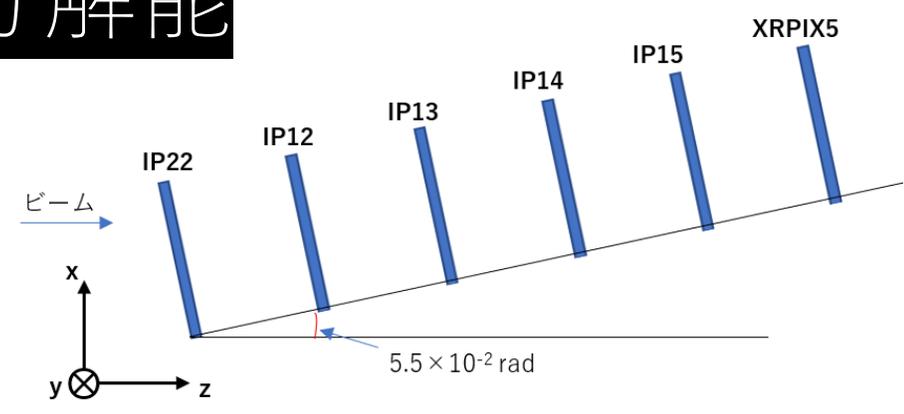
- INTPIX4NA に印加する逆バイアス電圧を1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 Vと変化させた。
- 空乏化電圧は約25V



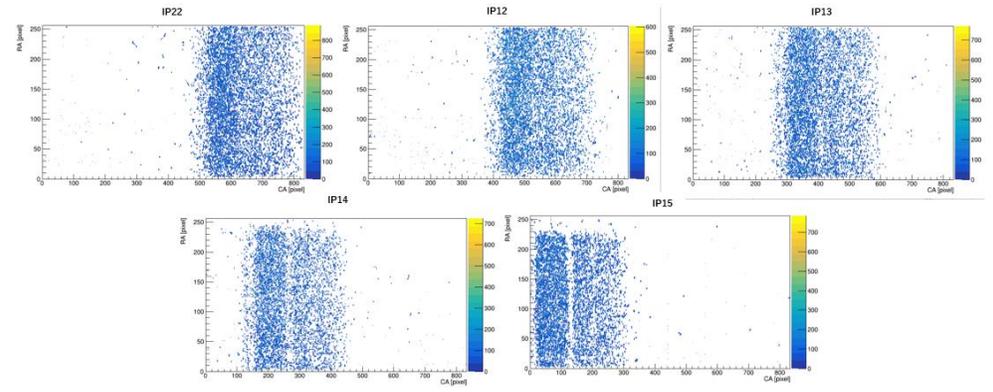
斜めに入射するビームに対する位置分解能

- テレスコープを傾けて位置分解能評価を行った。

DUT=IP14,(3-0)

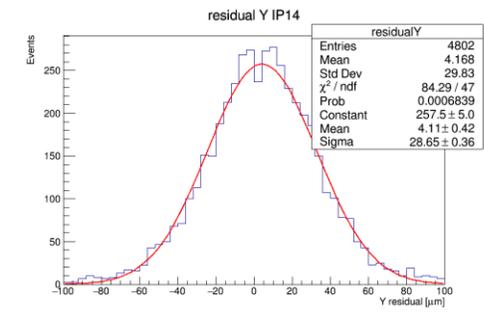
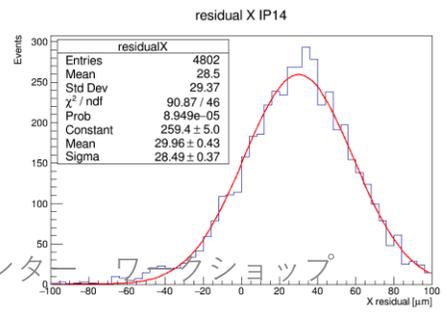


↓ クラスタ分布から傾きが確認できる

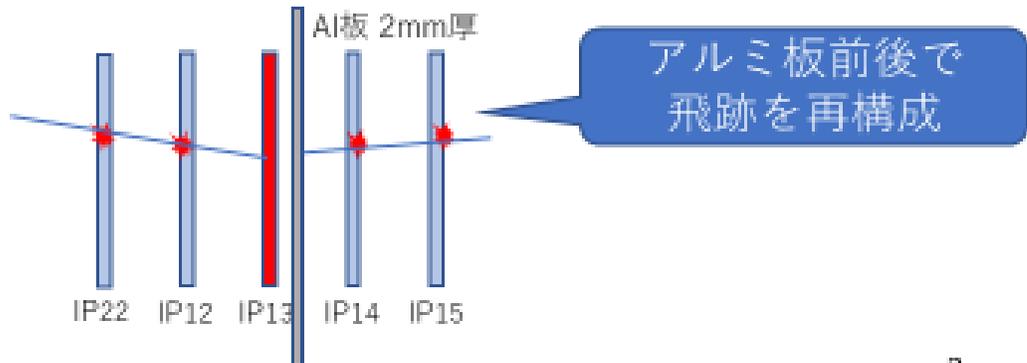


→ 823.26 MeV/c と同等の位置分解能

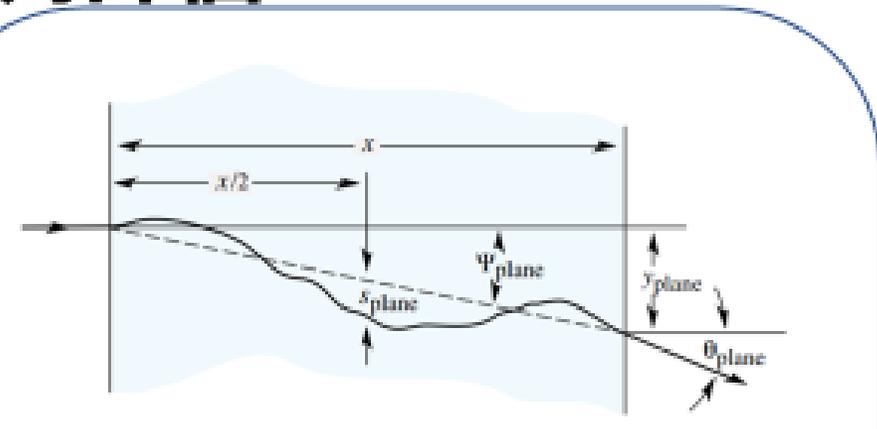
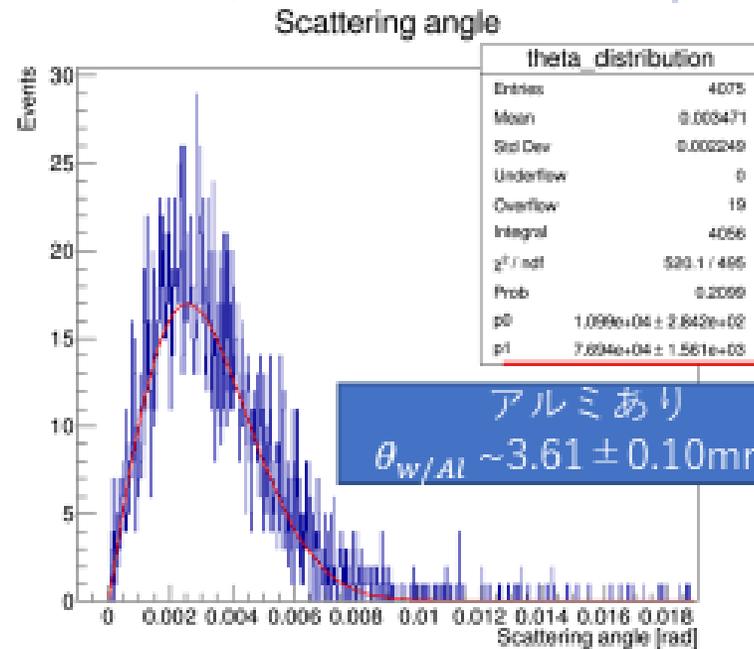
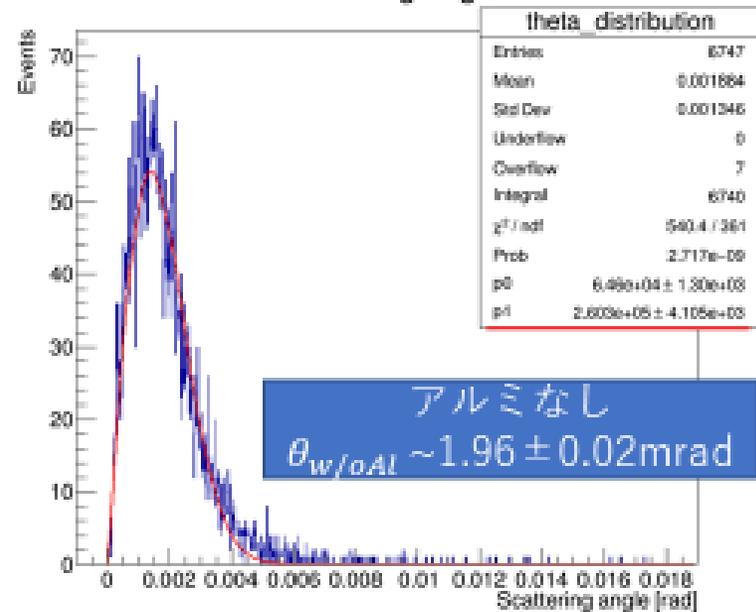
- ROIの変更によりアライメントの修正が必要であった



DUT による多重散乱を仮定した散乱角評価



- 散乱角分布(フィット関数 $y = ax e^{-(x/\theta)^2}$)



Bethe-Bloch

PDG(Particle Data Group)より

$$\theta_{plane} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right) \right]$$

粒子の電荷 $z=+1$,
 粒子の運動量 $p=823.26\text{MeV}$
 アルミの厚さ $x=0.20\text{cm}$
 Alの放射長 $X_0=8.9\text{cm}$
 $\beta \sim 1$

計算された Al 板2mmによる散乱角
 $\rightarrow \theta_{Al} = 2.45\text{mrad}$
 300um Si による散乱角
 $\rightarrow \theta_{Si} = 0.96\text{mrad}$

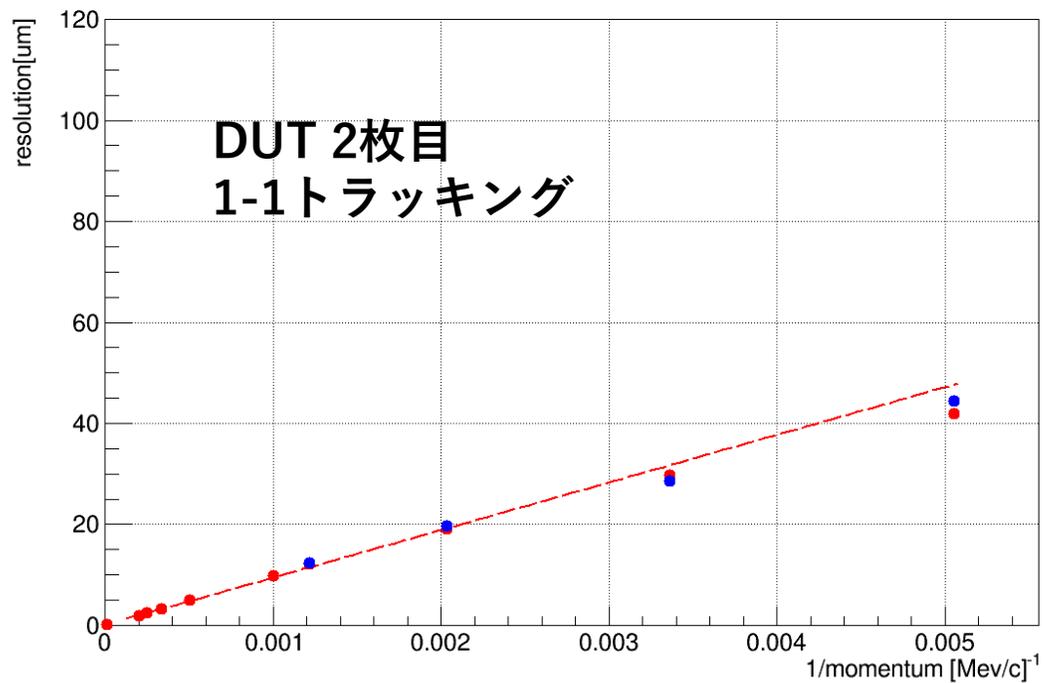
- $\sqrt{\theta_{w/Al}^2 - \theta_{w/oAl}^2} = 3.03 \pm 0.12 \text{ mrad}$

2022/3/23

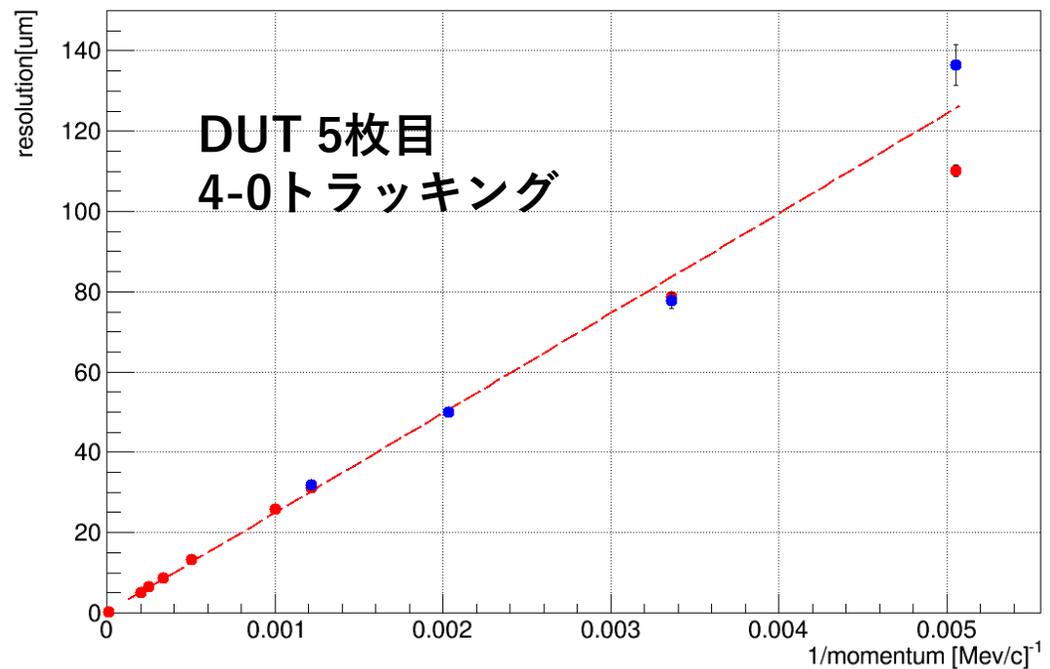
IP12, 13, 14とアルミ板による散乱は2.96 mrad
 測定値と誤差の範囲で一致

運動量スキャン

x resolution

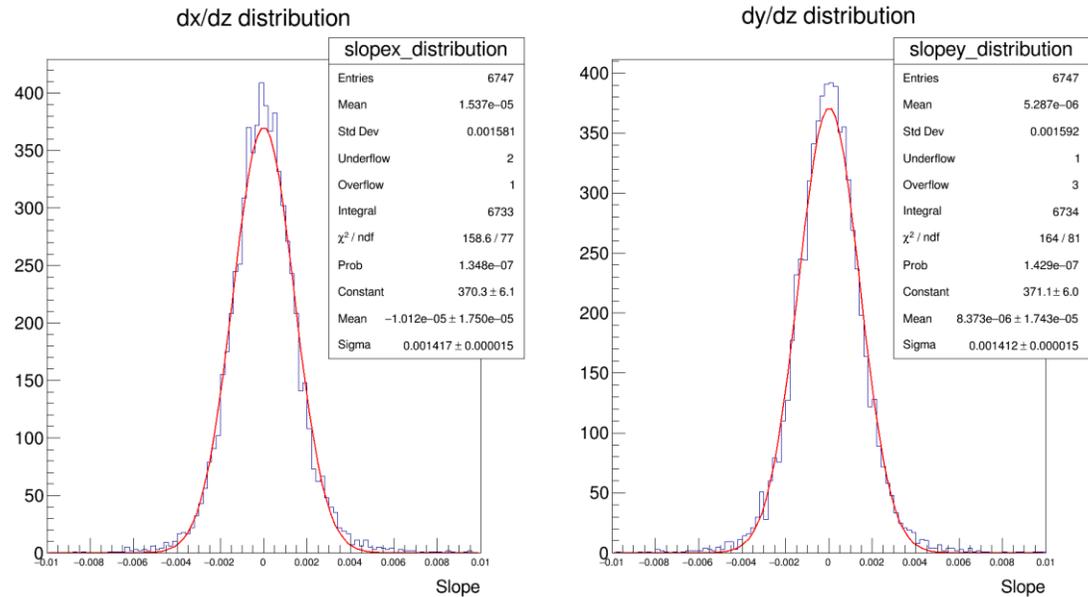


x resolution

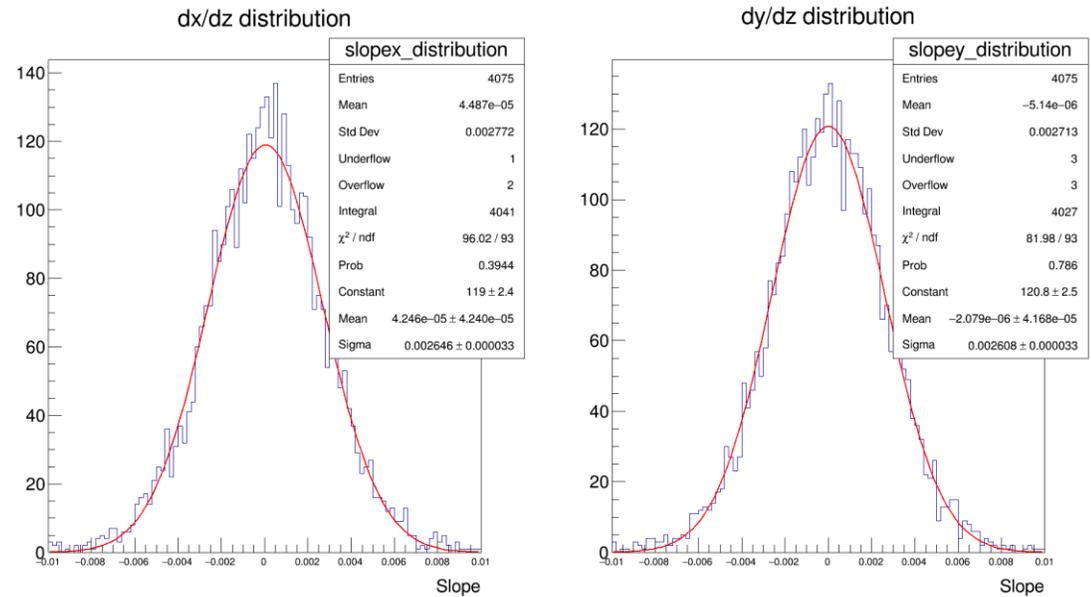


120GeV/cで。。。
2-1 3.5 μm
3-0 1.84 μm

IP=13入射前後の傾きの差

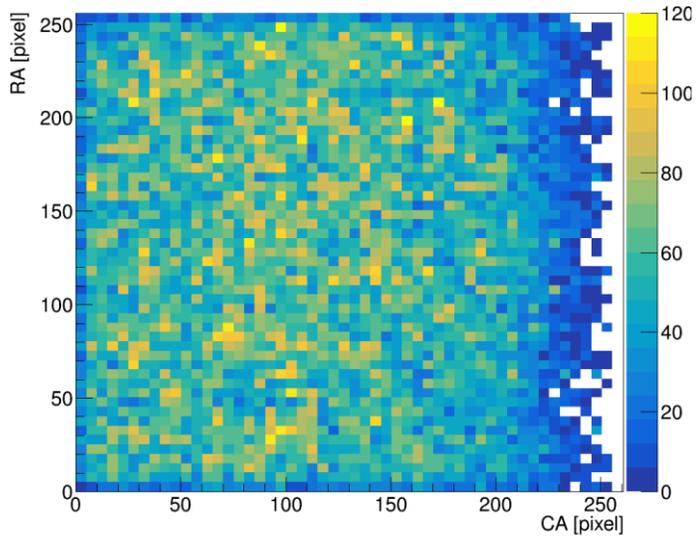


IP13+アルミ板入射前後の傾きの差

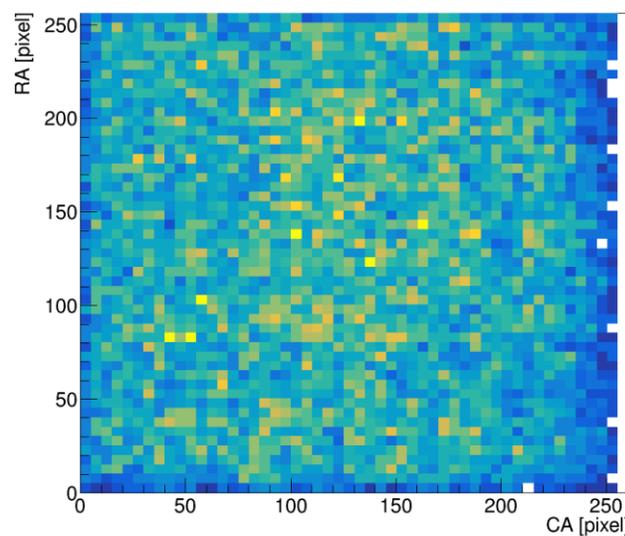


アルミ板入射角 $\sim 0\text{rad}$

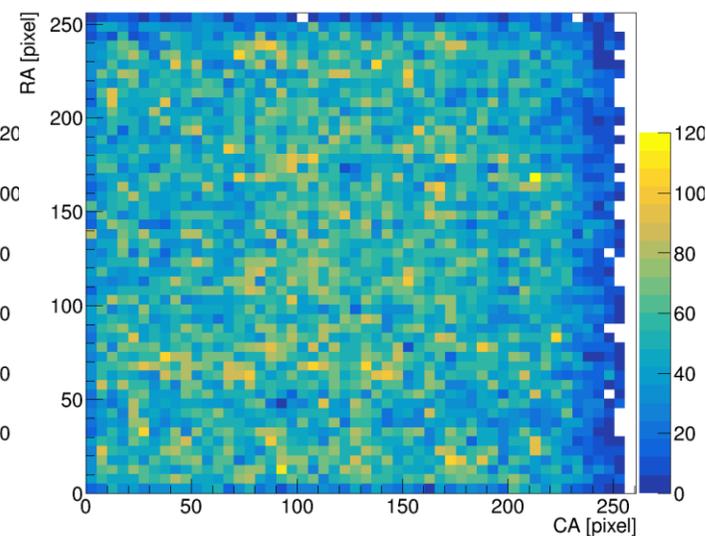
IP22 Beam Profile



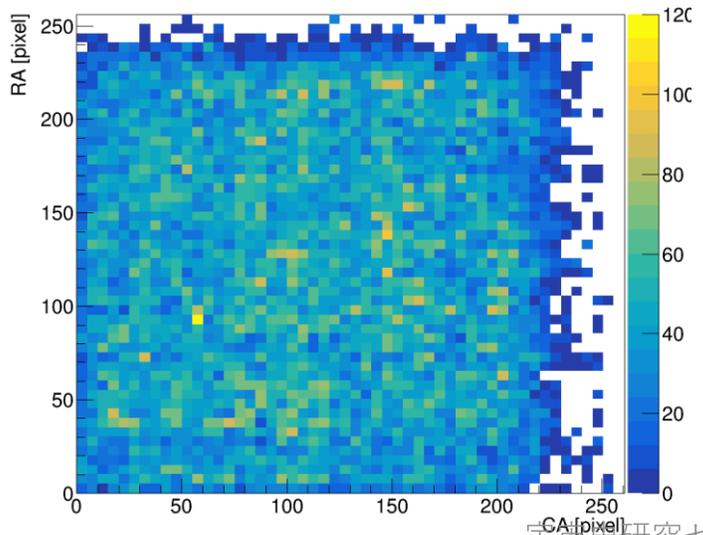
IP12 Beam Profile



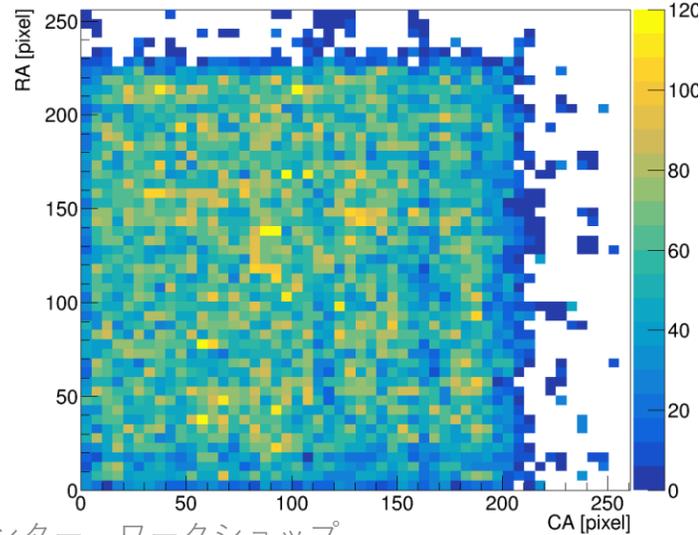
IP13 Beam Profile



IP14 Beam Profile

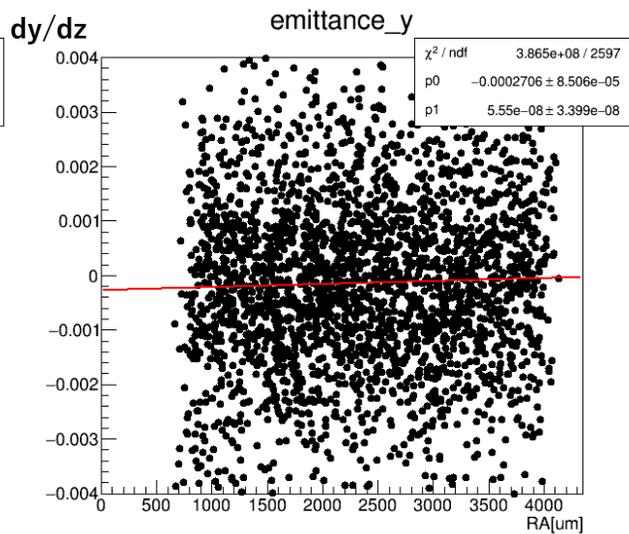
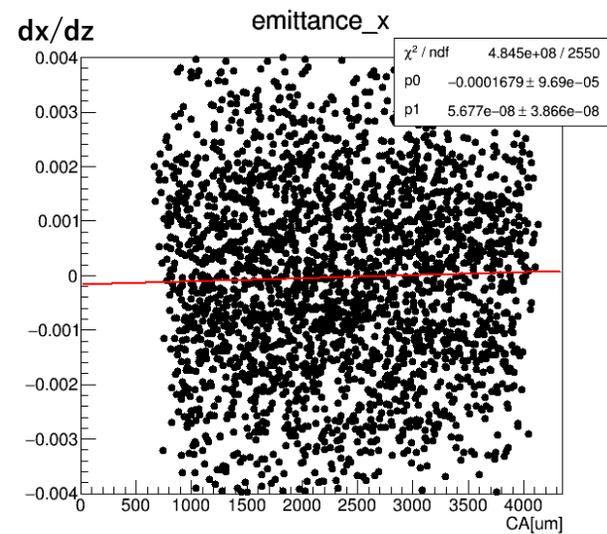
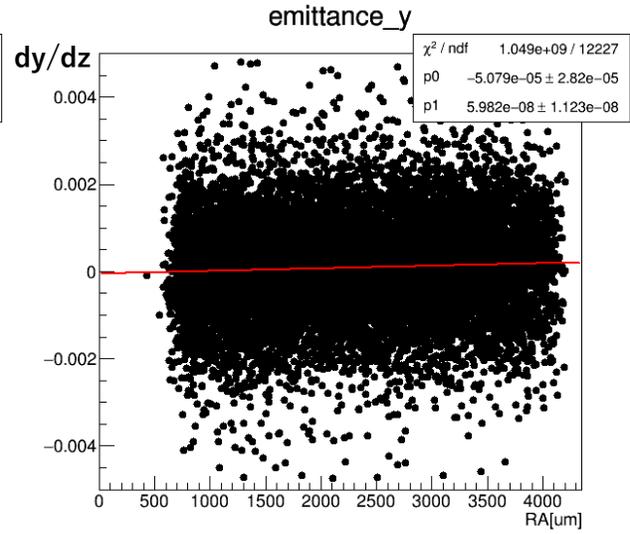
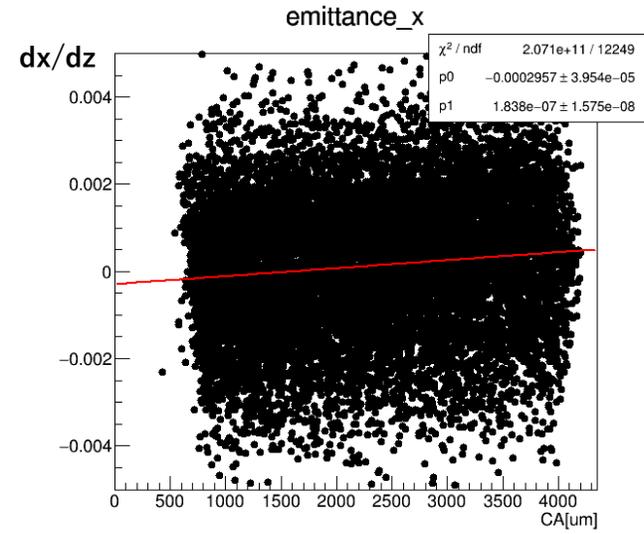


IP15 Beam Profile



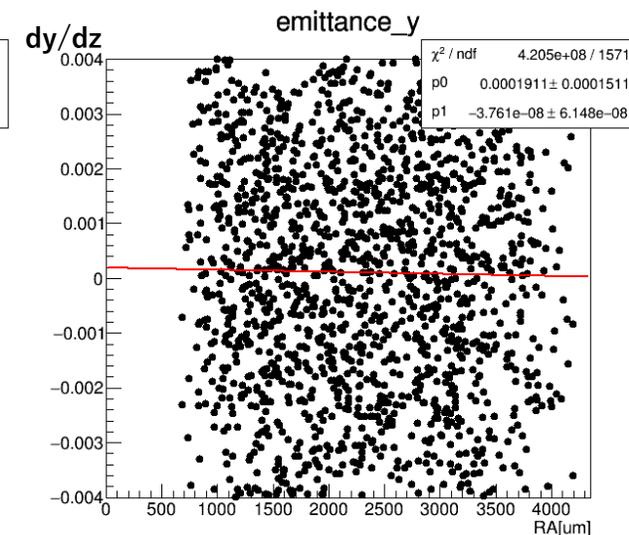
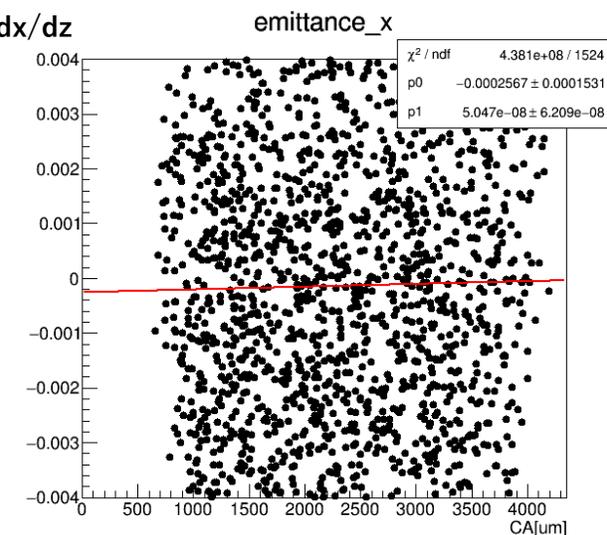
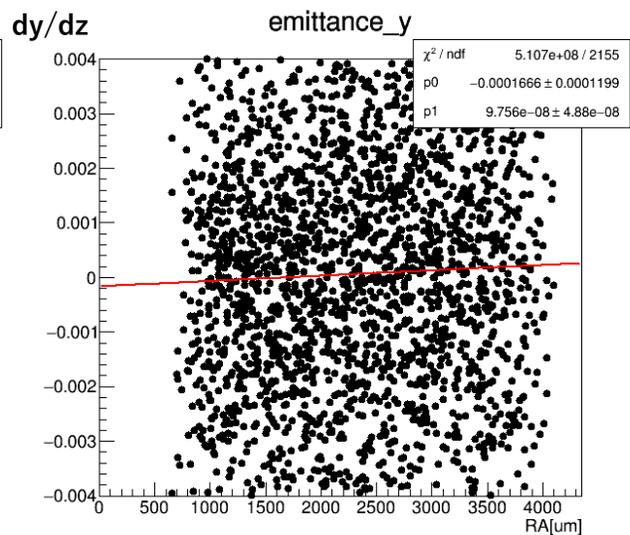
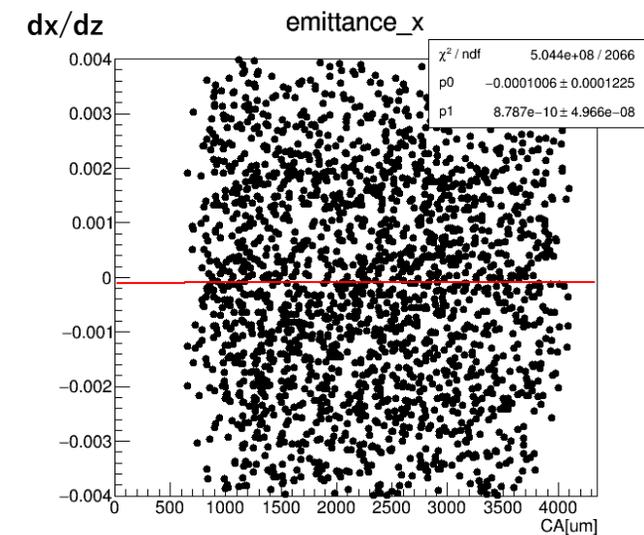
823.26MeV/c

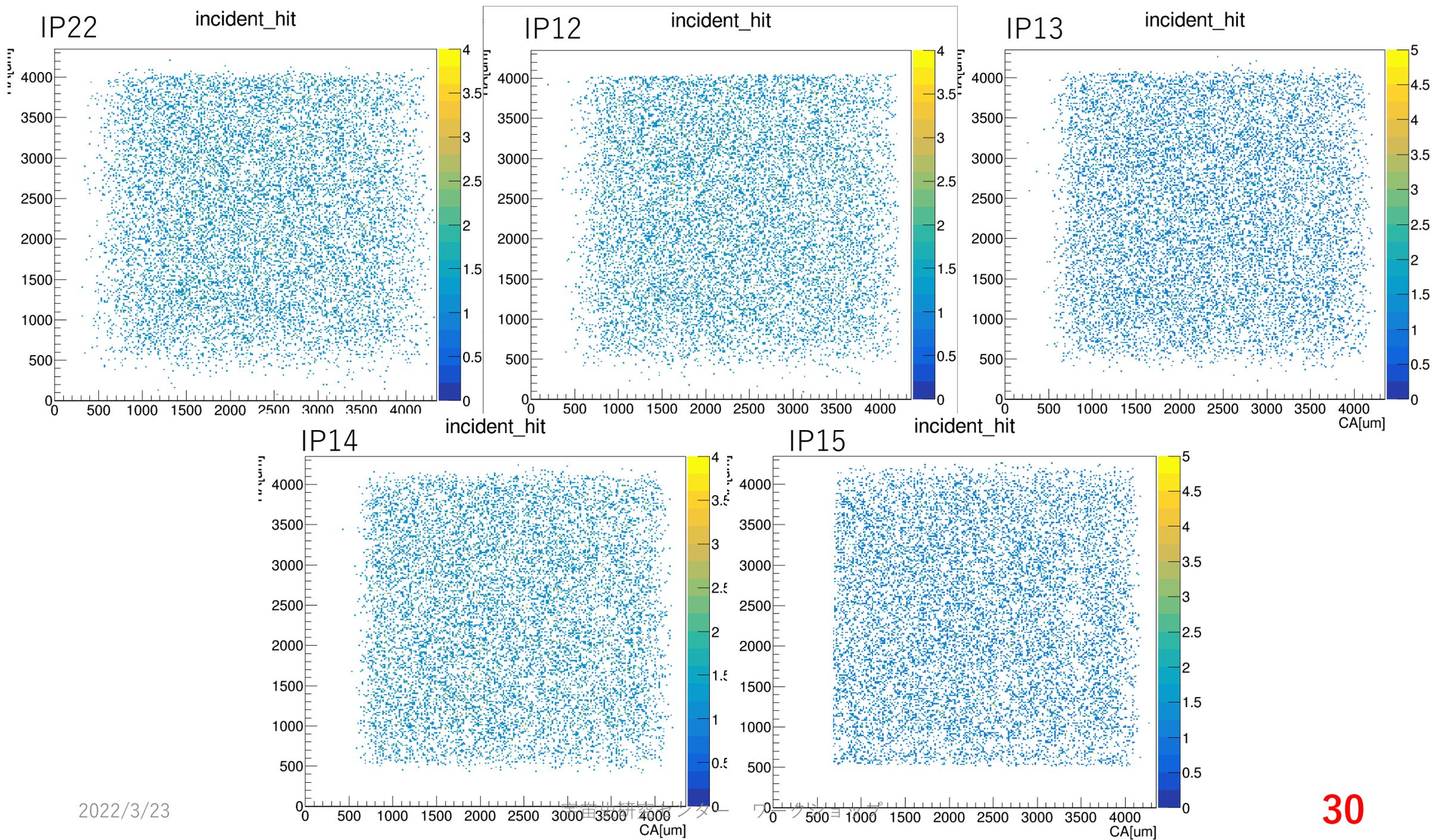
492.50MeV/c

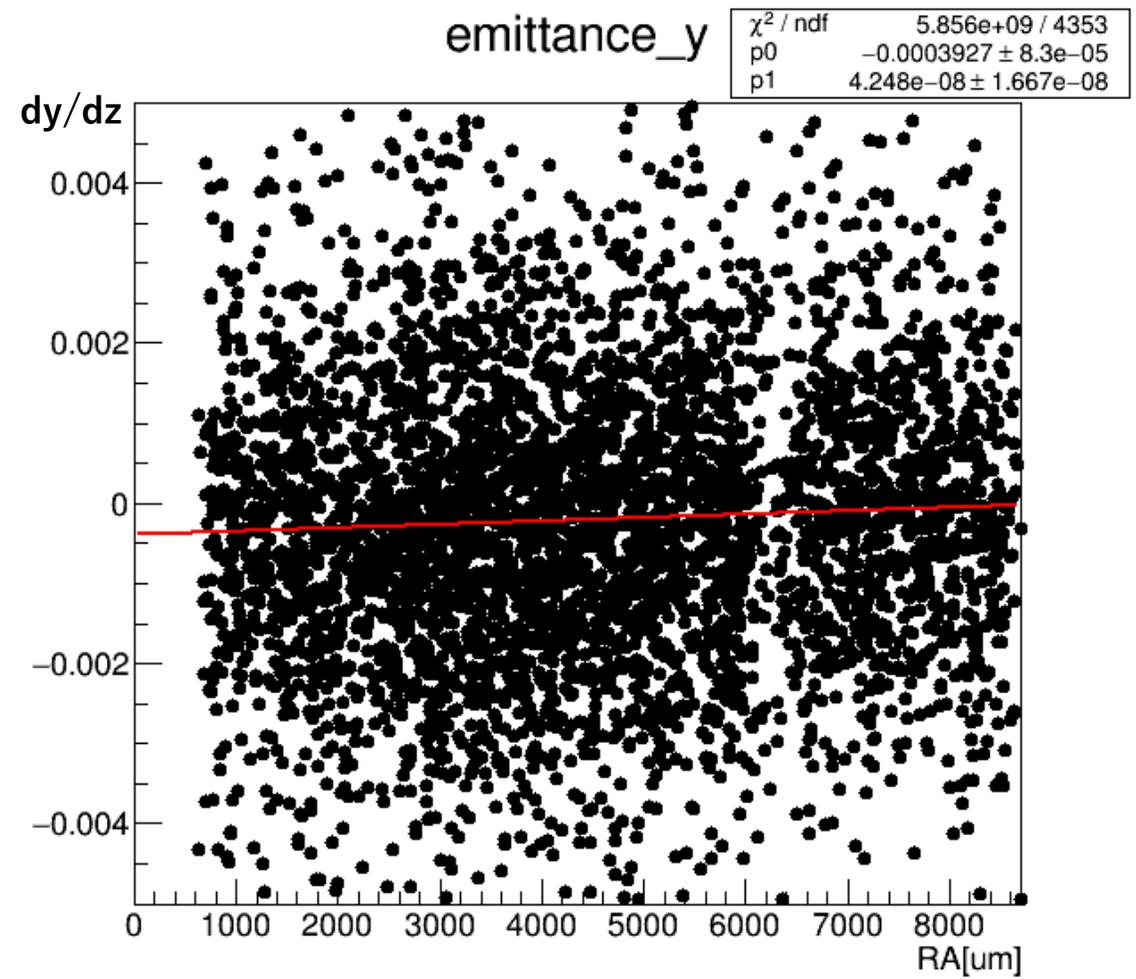
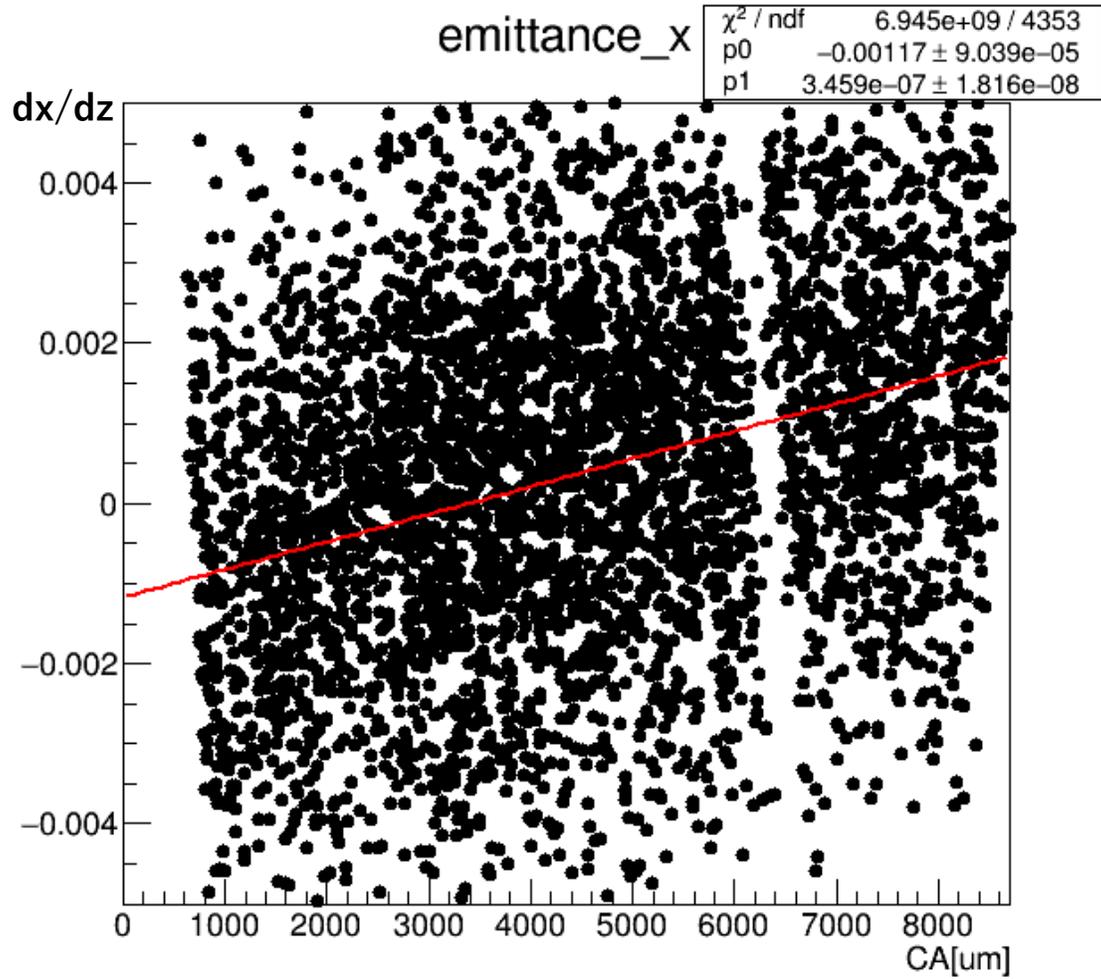


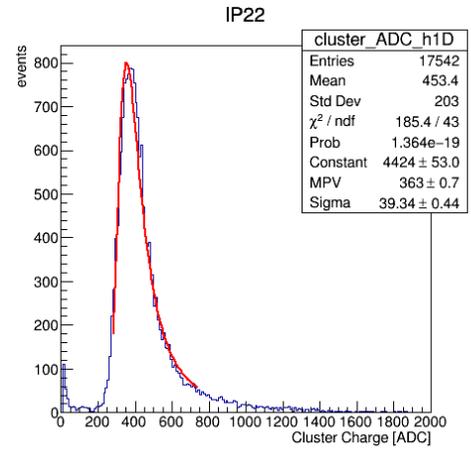
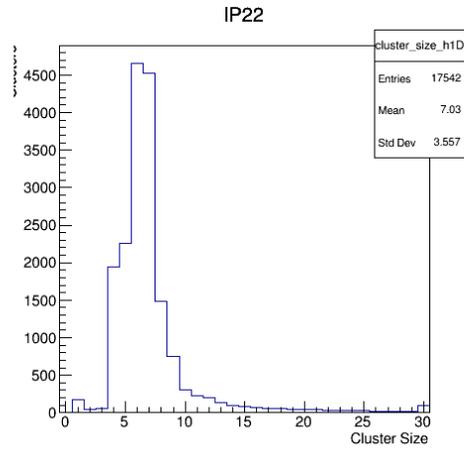
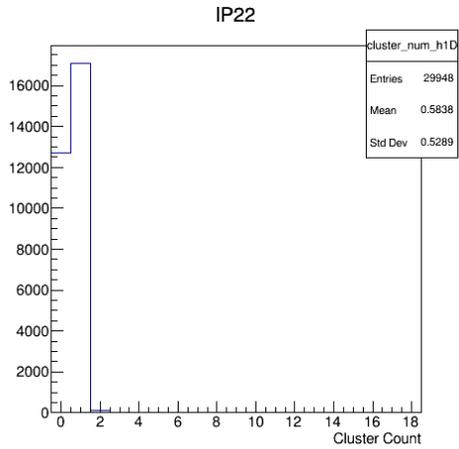
297.30MeV/c

197.94MeV/c

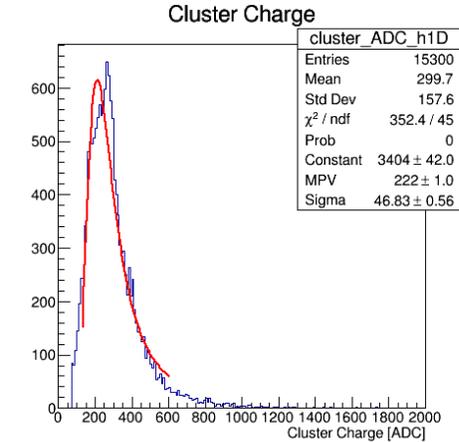
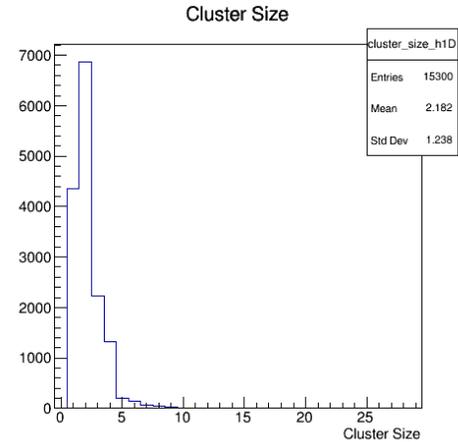
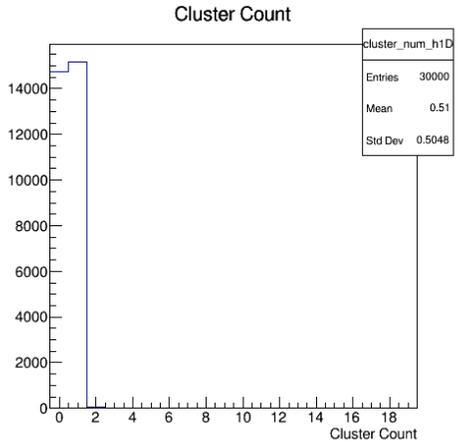






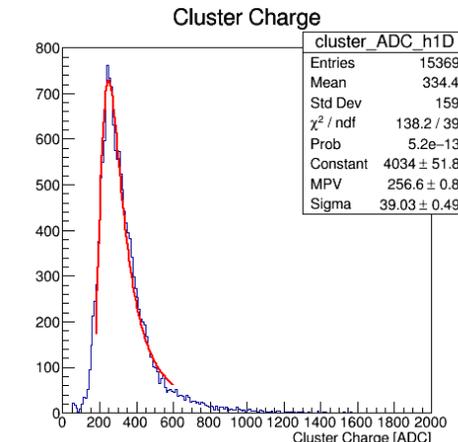
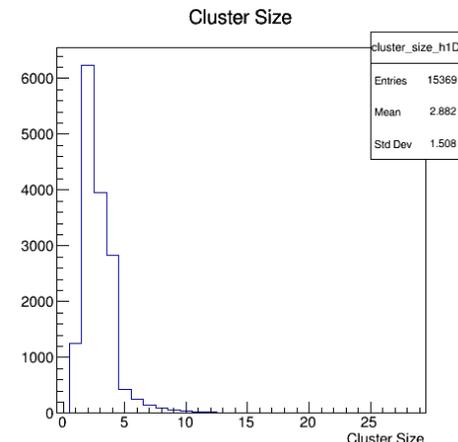
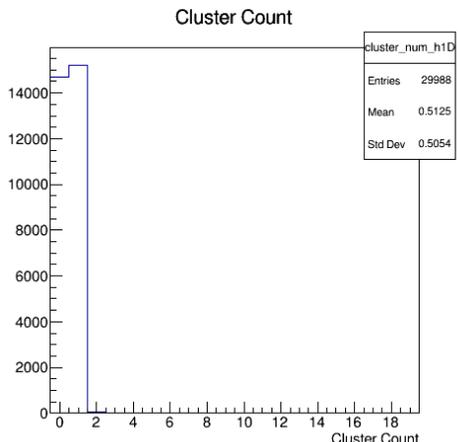


Each pixel Pedestal + 10 σ カット



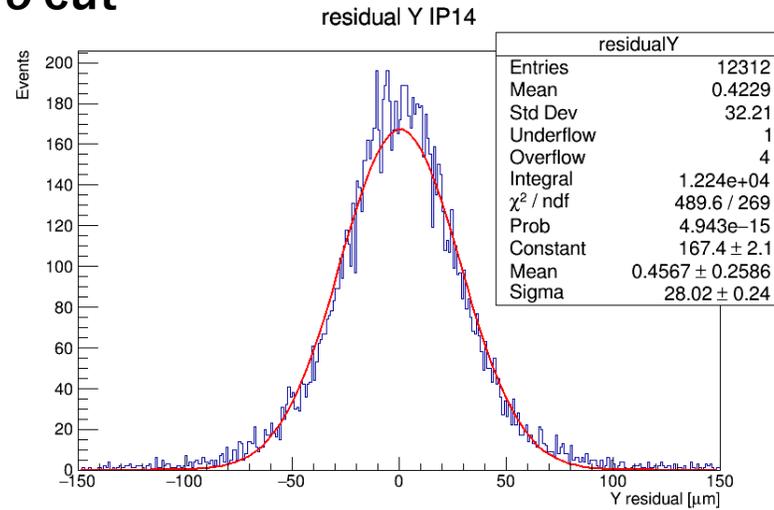
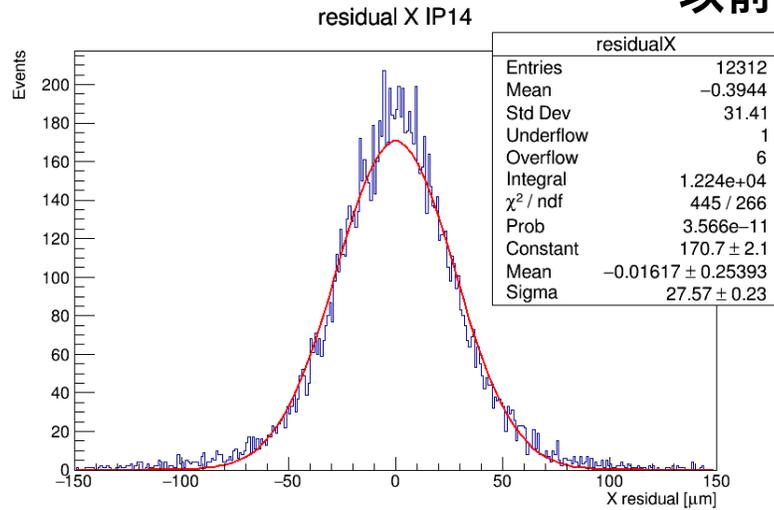
Global pedestal ave
+ threshold 70ADC
(IP14 90ADC)

ヒットピクセル
450以上の
イベント+
センサー端
10ピクセル
破棄

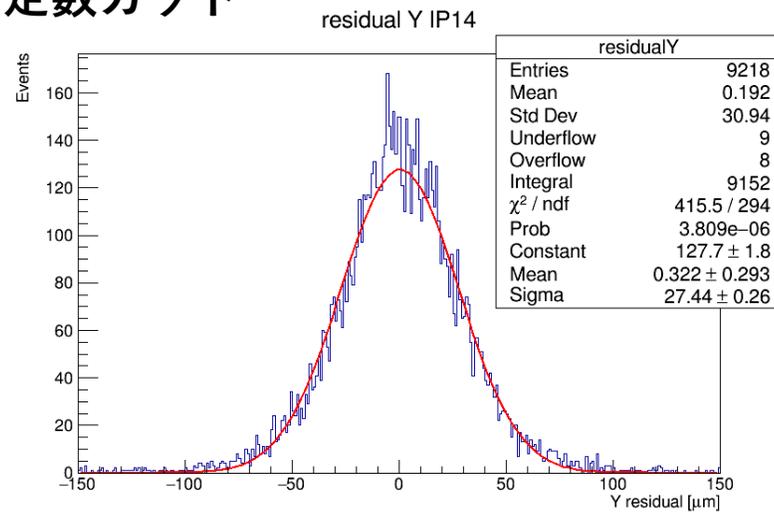
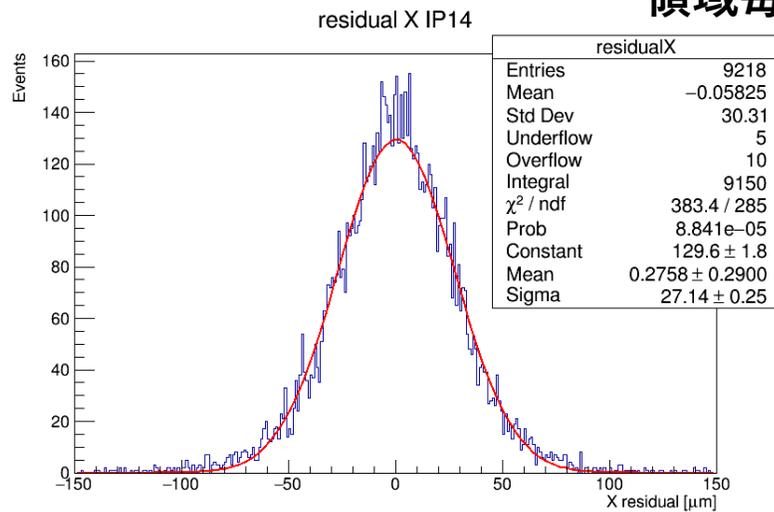


block pedestal ave
+ threshold 50ADC
(IP14 70ADC)

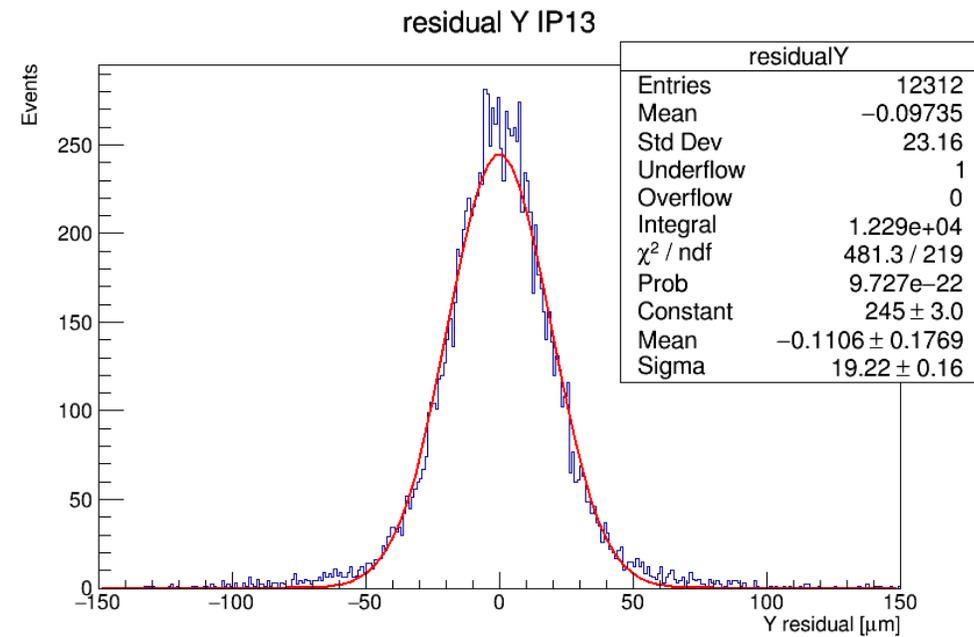
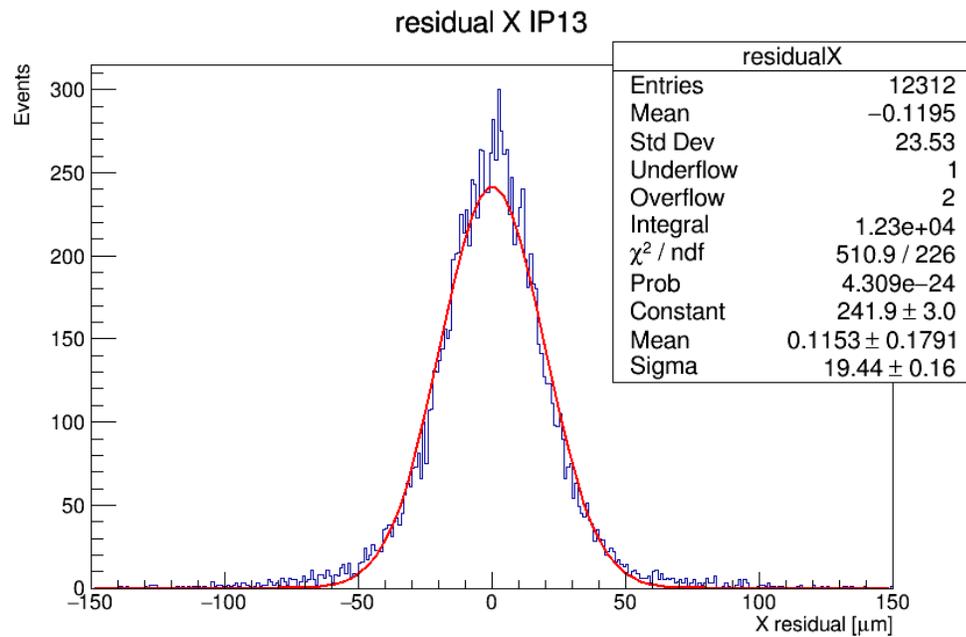
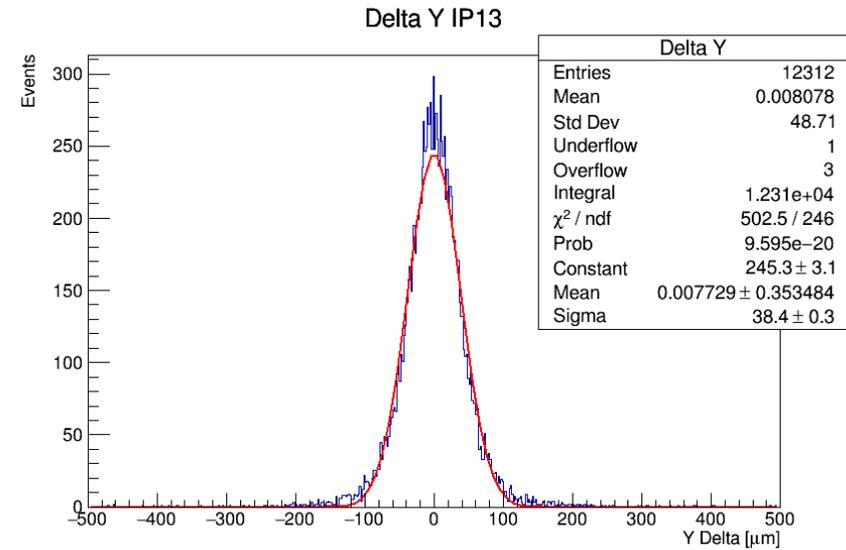
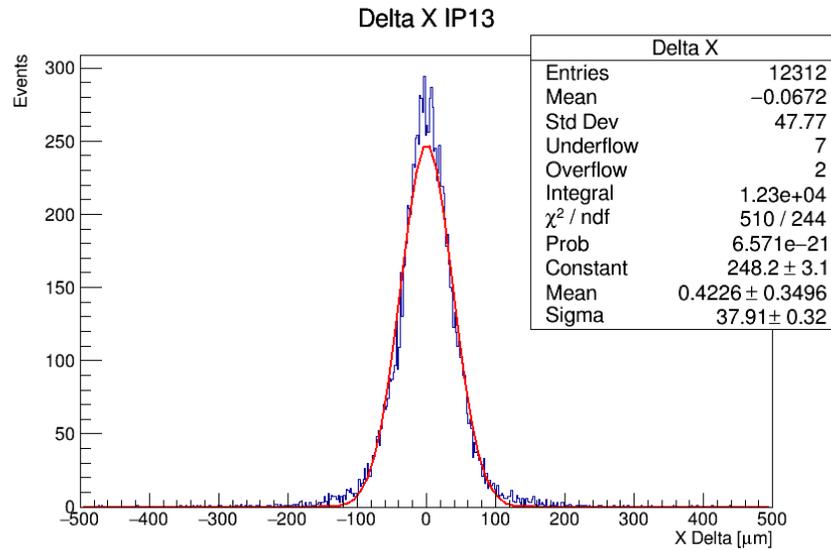
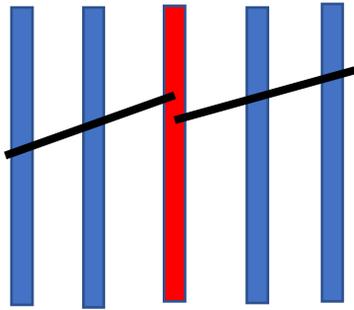
以前10 σ cut

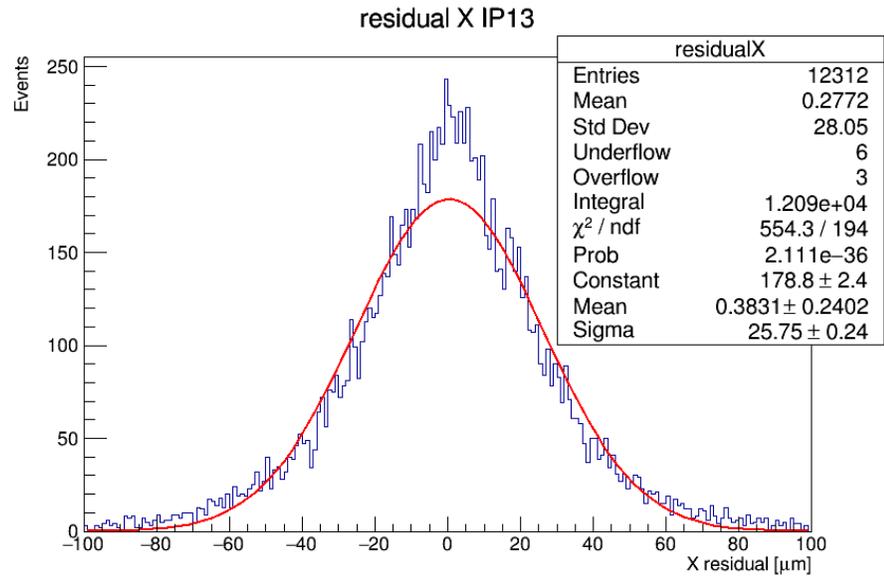


領域毎に定数カット

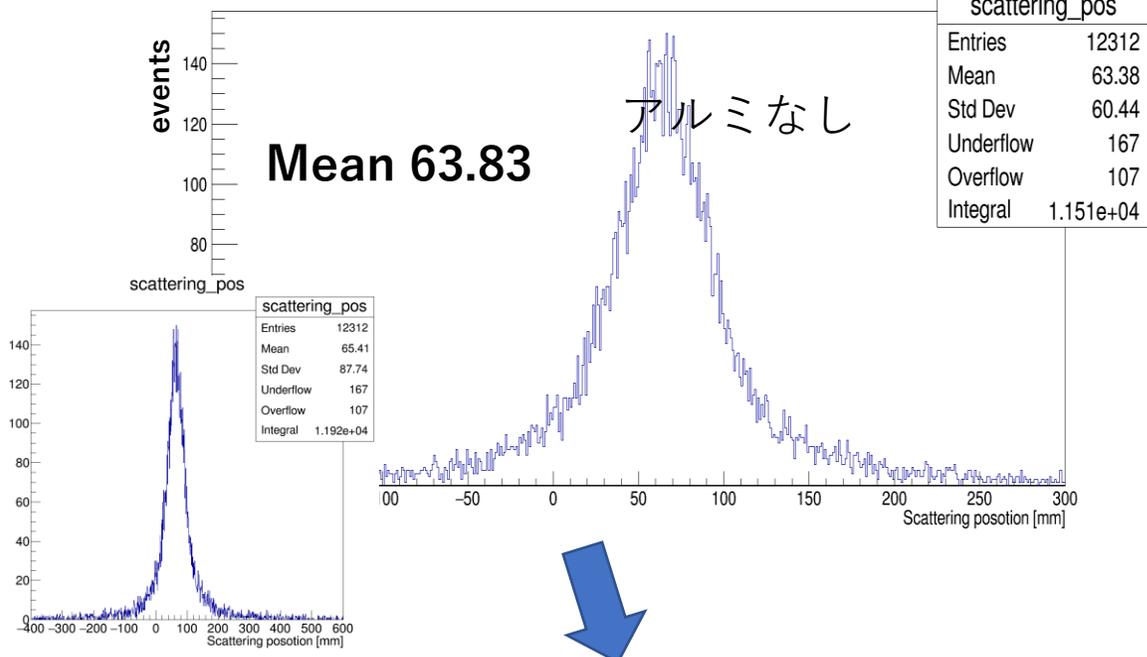


2-2aveにおけるアライメント補正

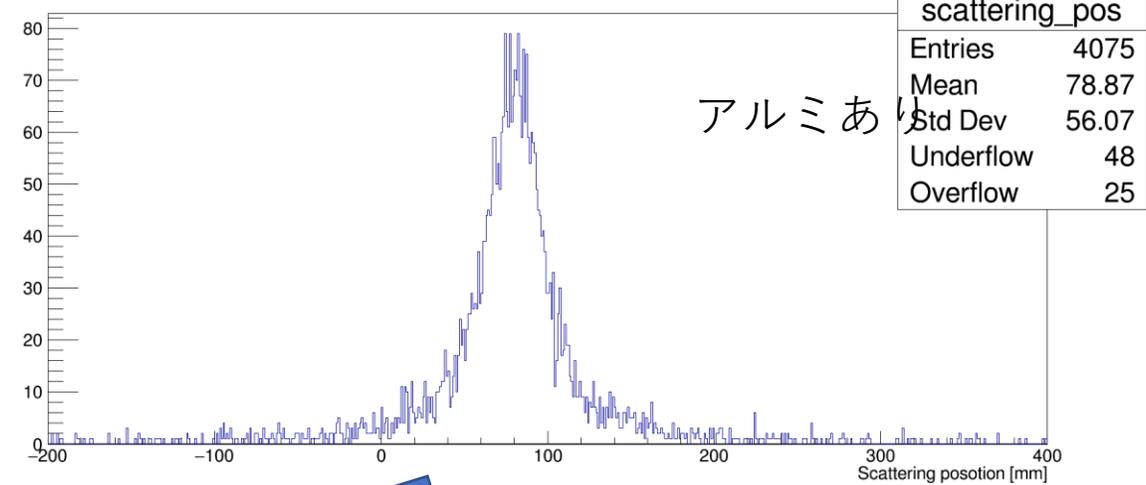




scattering_pos



scattering_pos



補正後residual

