

# DCミューオンビームによる 元素マッピングに向けた ドリフトチェンバーの開発

大阪大学理学研究科 久野研究室

博士前期課程2年

堀孝之



## 目次

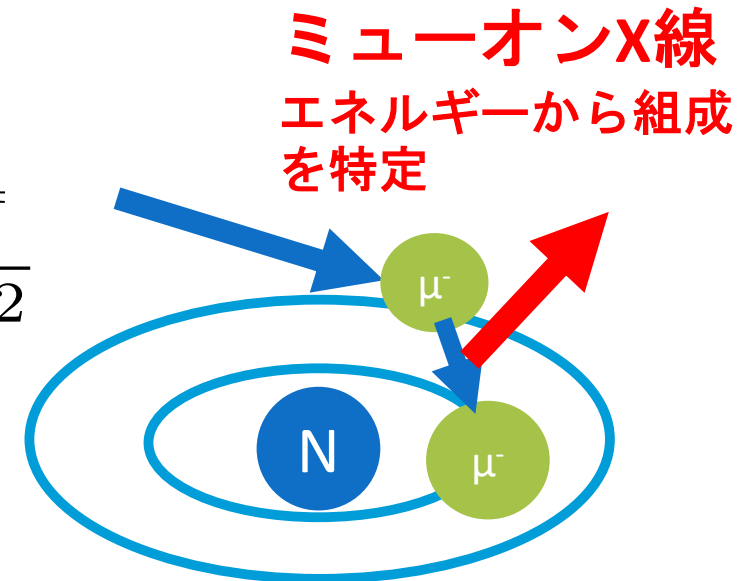
- 研究背景
- 飛跡検出器の要請
- ドリフトチェンバーの仕様
- 低エネルギー陽子による性能評価実験
- 元素マッピング時ミュオン停止位置の予想精度
- まとめ

# 研究背景: ミューオンX線による非破壊元素分析

## ■ ミューオンX線の特徴

ボーアの式における  
原子軌道の粒子の  
運動エネルギー

$$E_n = -\frac{Z^2 m e^4}{8 \epsilon_0 n^2 h^2}$$
$$\frac{m_\mu}{m_e} \sim 200$$



ミュオンX線は電子の蛍光X線に比べ200倍ものエネルギーを持つ

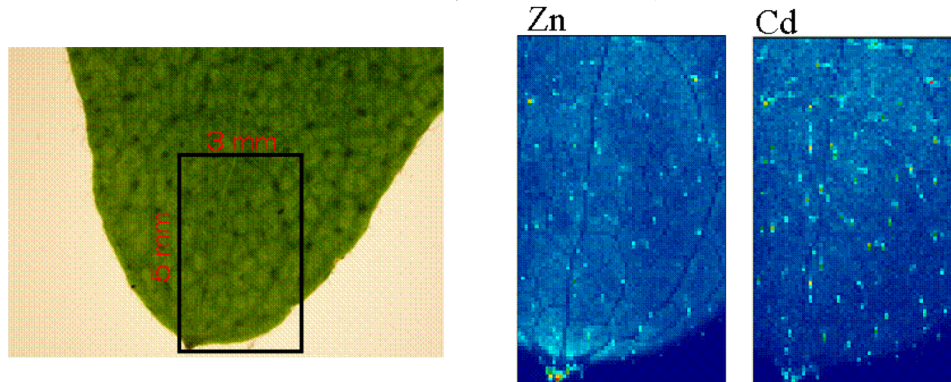
- 軽元素も分析可能
- 電子の蛍光X線: 物質中深さ $\sim 100\mu\text{m}$ まで分析可能  
ミュオンX線:  $\sim 10\text{mm}$ まで可能

ミュオンX線は隕石や考古学資料等、組成が未知の試料の非破壊元素分析への利用が期待される

@大阪大学 核物理研究センター DCミュオンビーム

# 研究背景: 非破壊元素マッピングについて

## 放射光を用いた非破壊元素マッピング(SPring8)



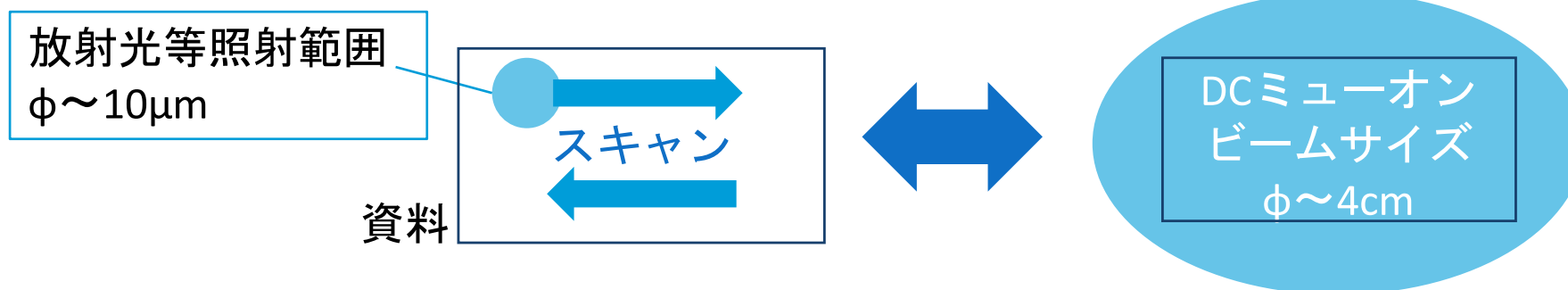
カドミウム蓄積植物の高エネルギー蛍光X線分析  
<http://www.spring8.or.jp/wkg/BL37XU/solution/lang/SOL-0000001575>

### ■ 放射光を利用したマッピング

ビームサイズを $10\mu\text{m}$  オーダーまで絞ってスキャン (左下図)

### ■ DCミュオンビームを利用したマッピング

ビームサイズが $\sim 4\text{cm}$ で、同様の手法は使えない(右下図)



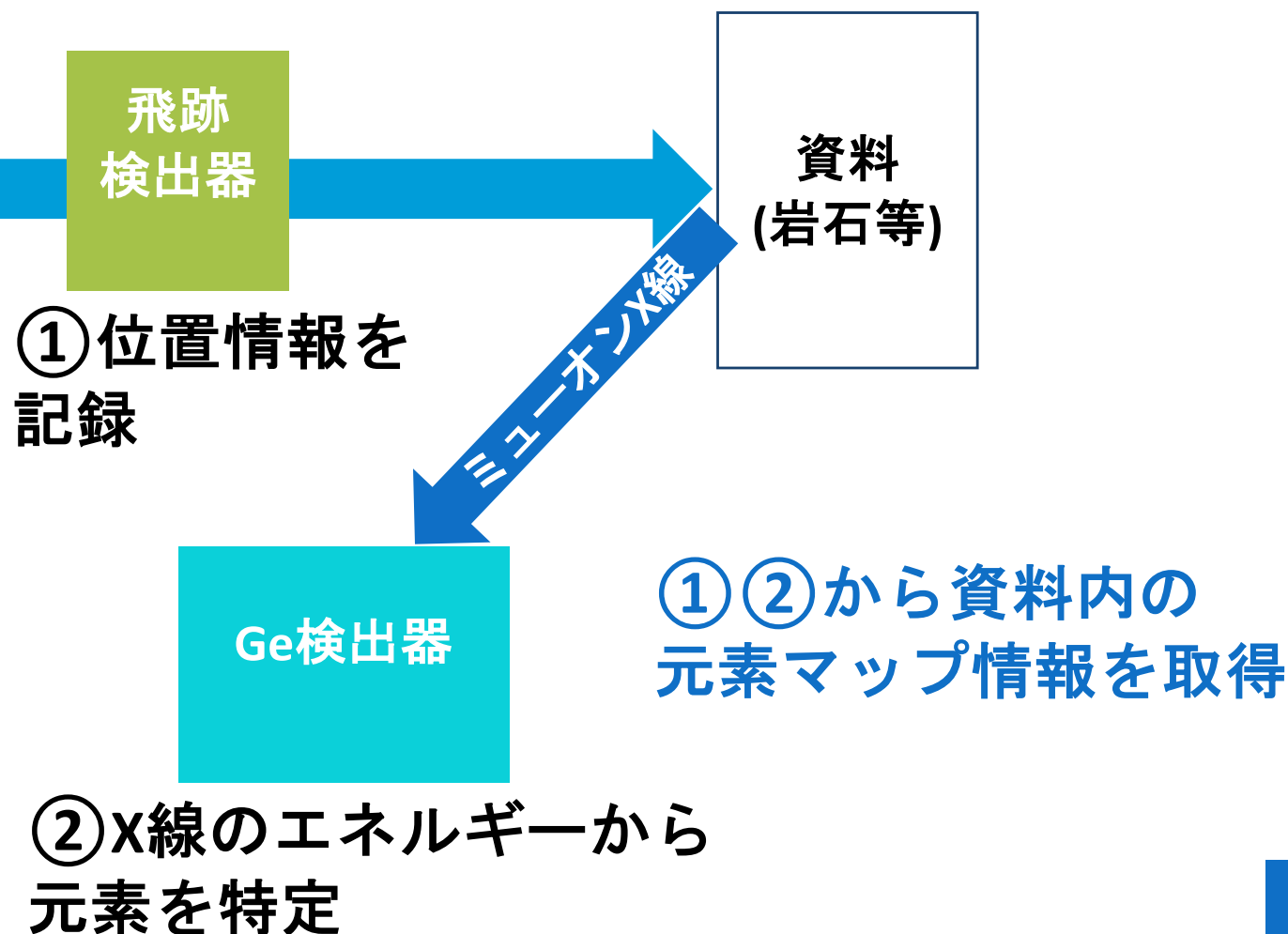
➡ ミュオン1つ1つが資料中のどこに止まったか確かめてマッピング

## 研究目的

100 $\mu$ mの位置精度をもつミュオン元素マッピングの実現

## 実現方法

ミュオン1つ  
1つを測定  
ミュオン



## 飛跡検出器の要請

### ■ 想定

- 資料は隕石等の岩石（主成分 $\text{SiO}_2$ ）
- 大きさは数cm、1mm程度の深さの分析  
→ DCミュオン  $p \sim 30\text{MeV}/c$
- ビームのレート:  $\sim 10\text{kHz}$ , ビームサイズ:  $\sim 4\text{cm}$

### ■ 位置の決定精度に関わる要素

1. 試料内部での多重散乱
2. 検出器内部での多重散乱
3. 検出器自体の位置分解能の性能

### ■ 飛跡検出器への要請

- 検出器内部での多重散乱を抑える
- 飛跡検出器の位置予想精度  $\leq$  試料内部での多重散乱

30MeV/cのミュオン入射時 **74 $\mu\text{m}$** （シミュレーション）



# ドリフトチェンバーの仕様

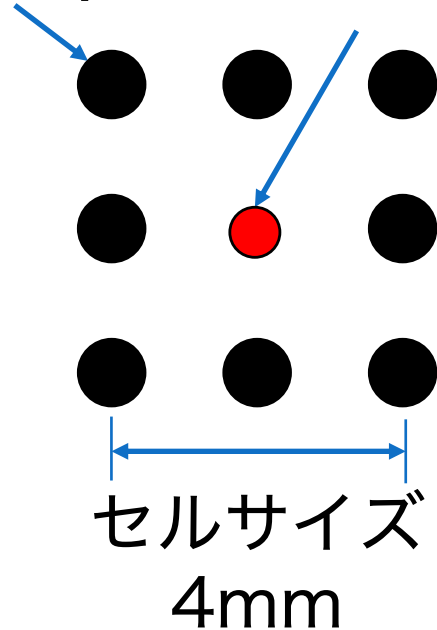
## ガス、セル、レイヤーの仕様

ガス：He :  $iC_4H_{10}$  = 90:10 1気圧

チェンバー内部での多重散乱の影響を小さくする為に、物質量の小さいHeベースのガスを使用

セル

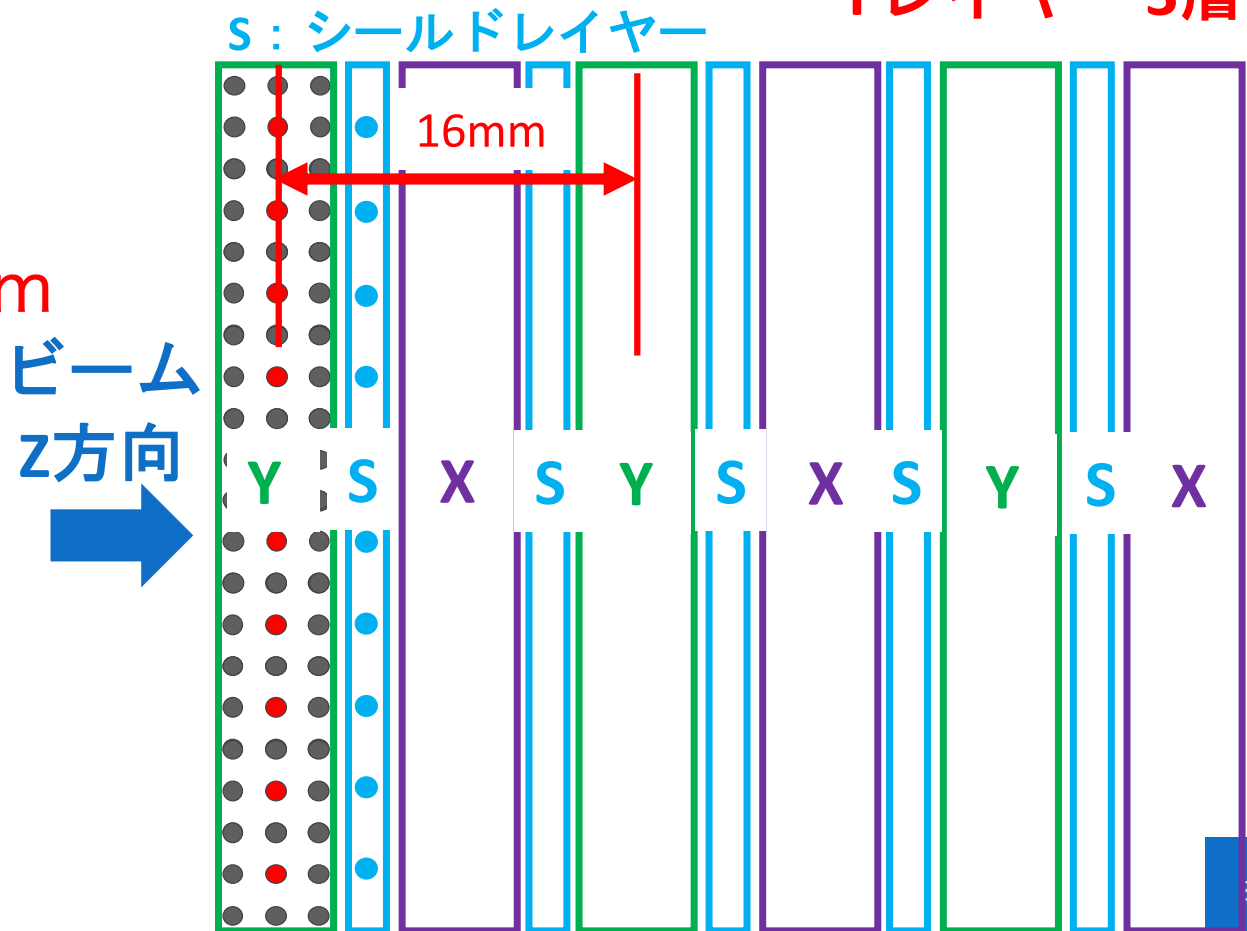
フィールド  
ワイヤ  
(Ag- Al)  
 $\Phi$  80  $\mu$ m



センス  
ワイヤ  
(Au W)  
 $\Phi$  20  $\mu$ m

レイヤー

Xレイヤー-3層  
Yレイヤー-3層

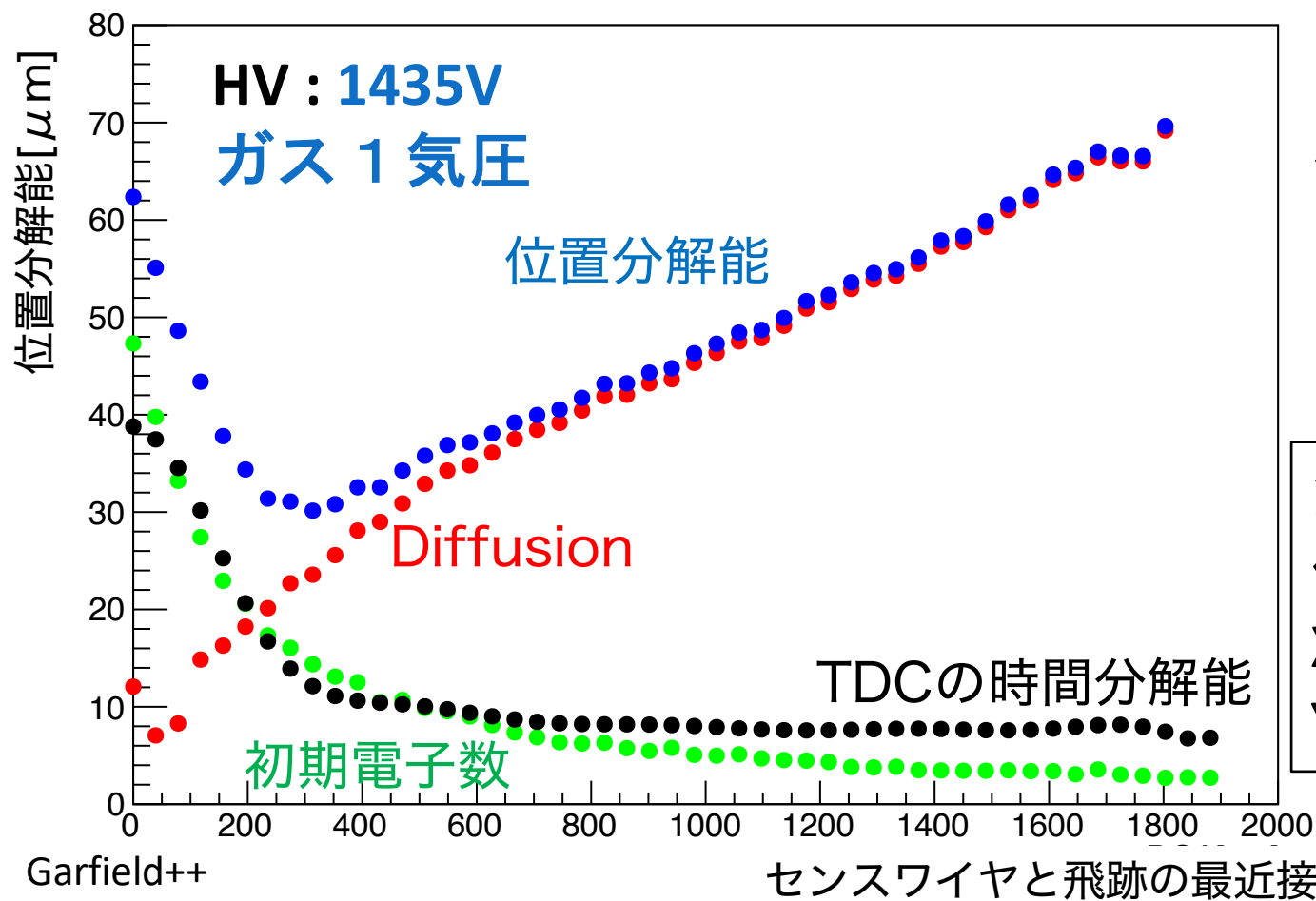




## シミュレーションによる予想性能

➤ 30MeV/c の  $\mu^-$  を入射した場合の 1 セルの位置分解能

➤ 1 電子で閾値を超えると想定

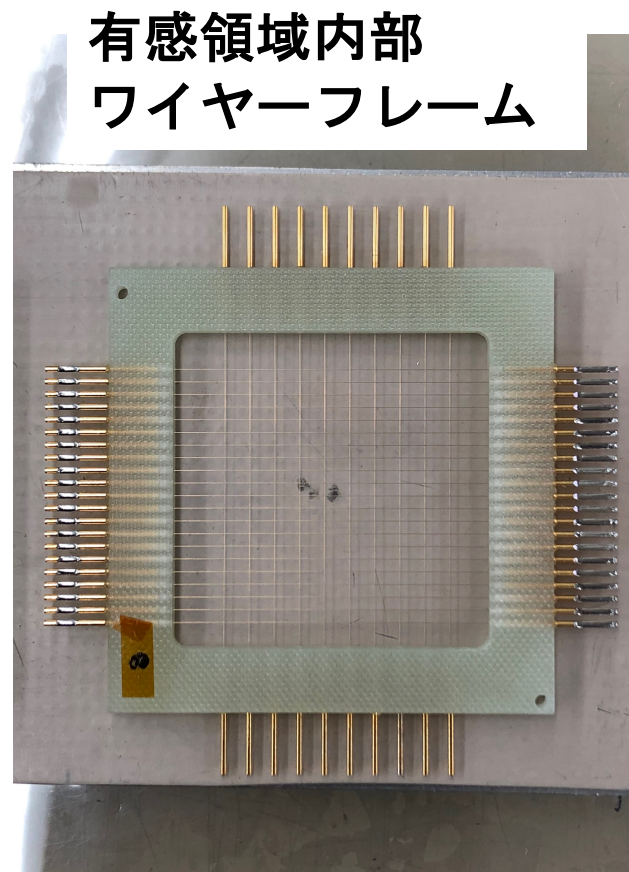
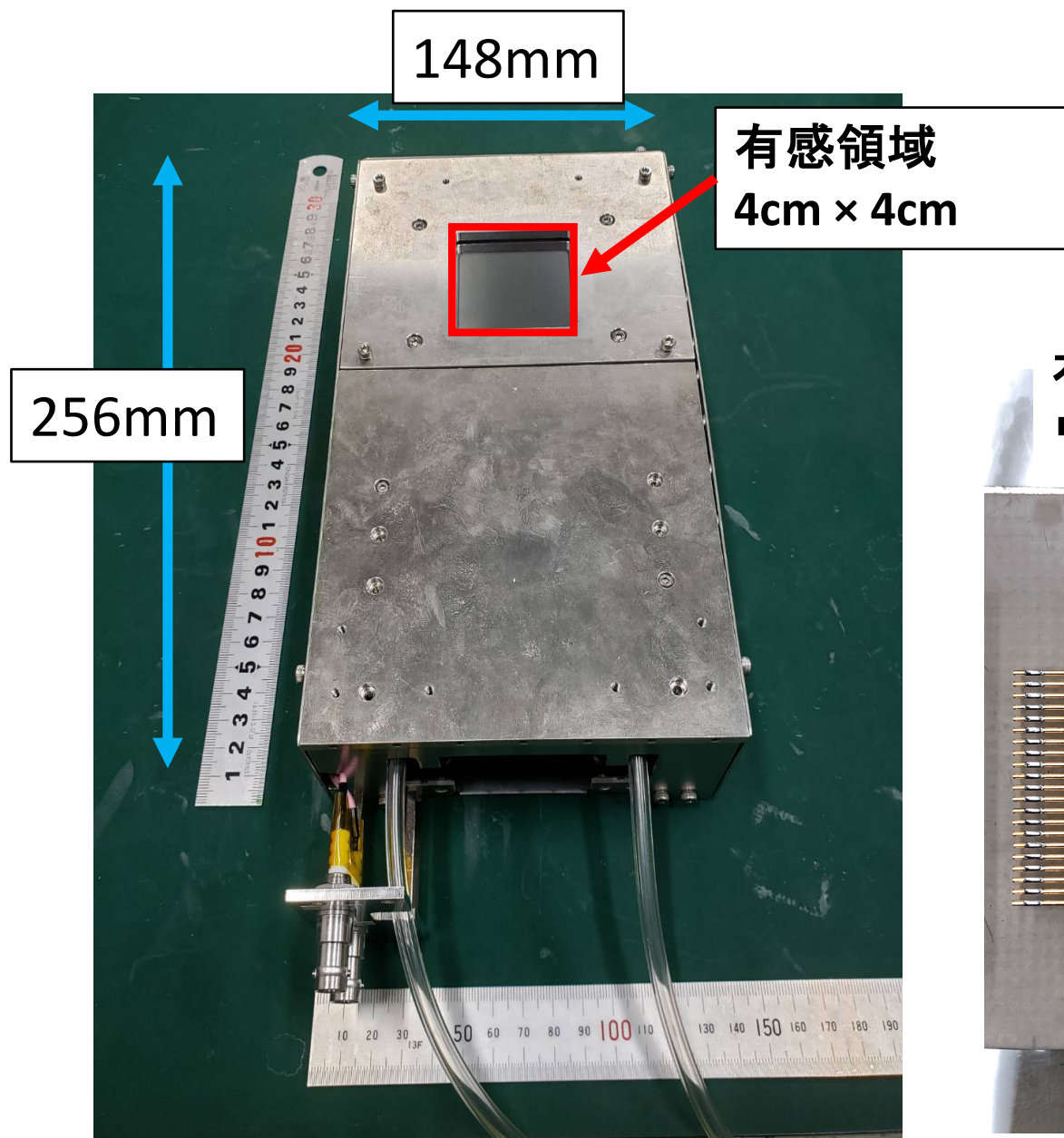


1 セルの  
位置分解能  
平均  $\sim 50 \mu\text{m}$

資料表面での  
位置予想精度  
Xレイヤー  $75 \mu\text{m}$   
Yレイヤー  $98 \mu\text{m}$

→ 飛跡検出器の要請を満たしている

# 製作したドリフトチェンバー

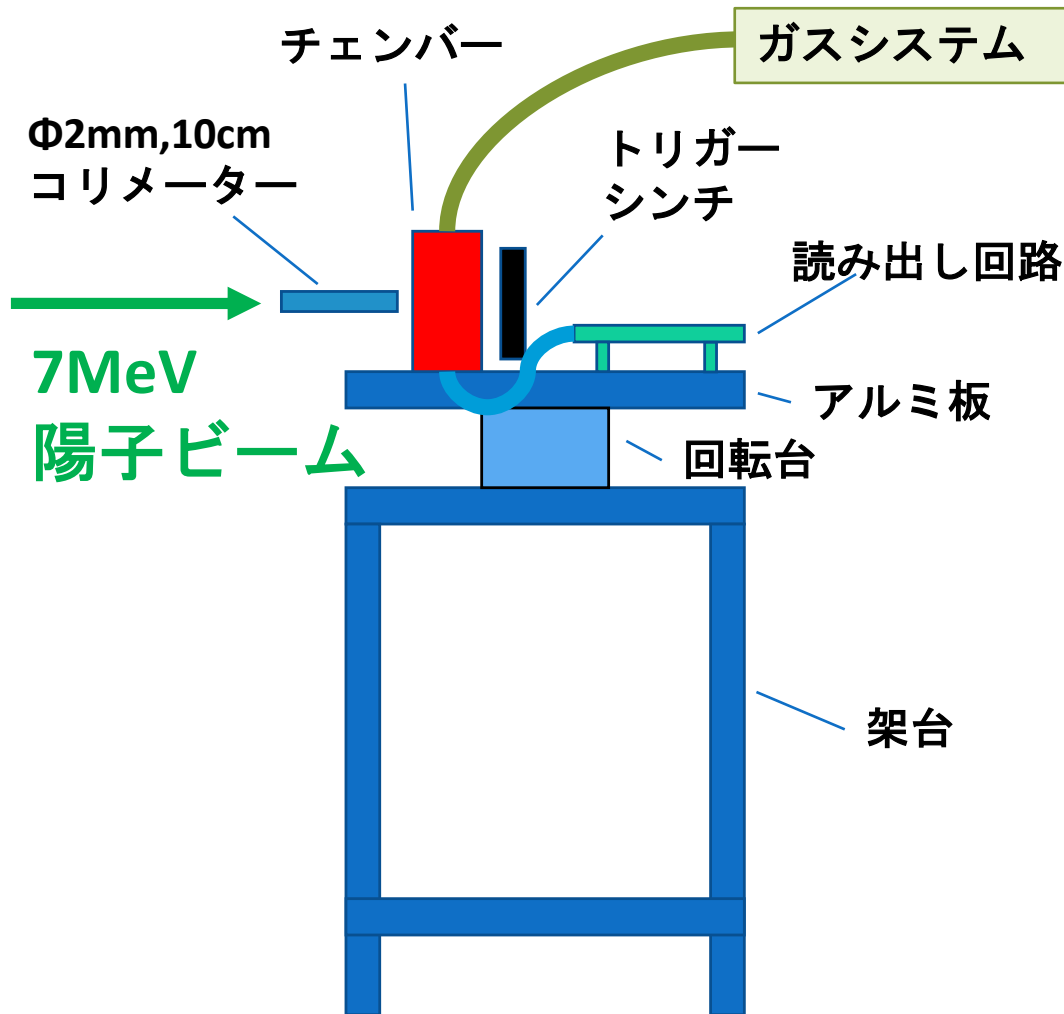




# 低エネルギー陽子による 性能評価実験

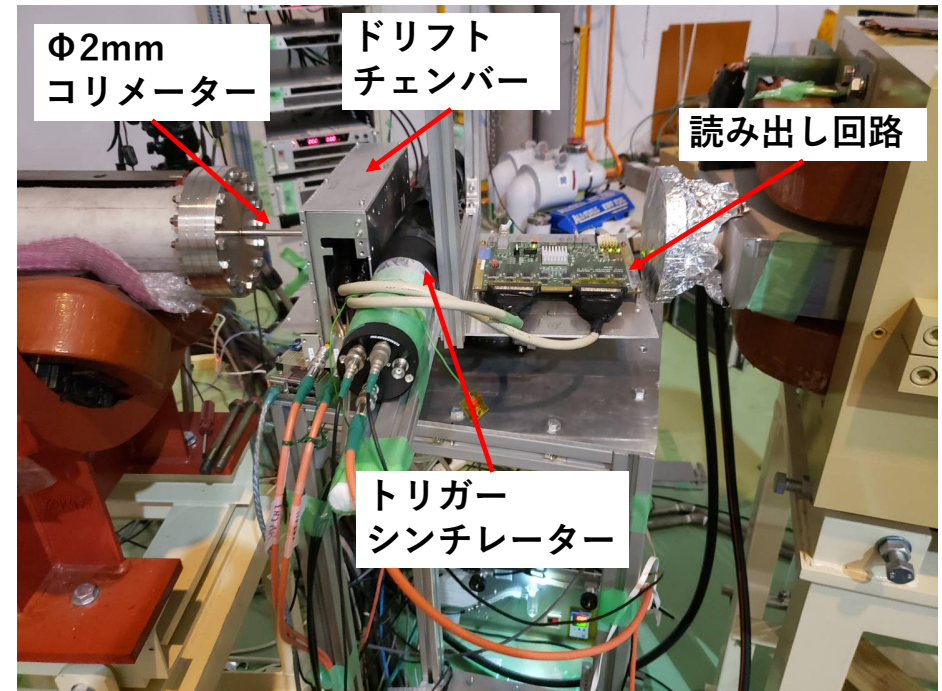
# セットアップ

陽子ビーム施設  
京都大学複合原子力科学研究所

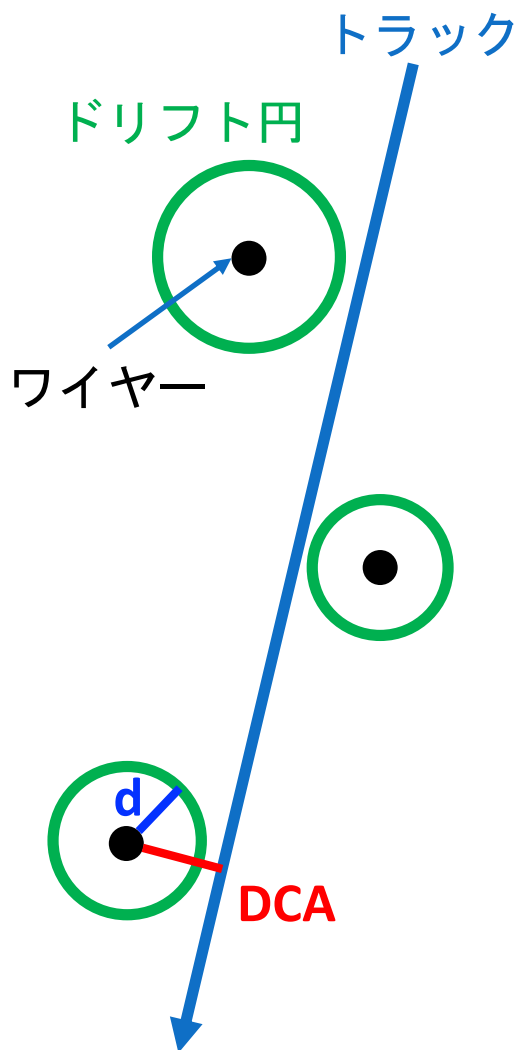


読み出し回路  
ハヤシレピック RP-1212  
最小分解能 1ns

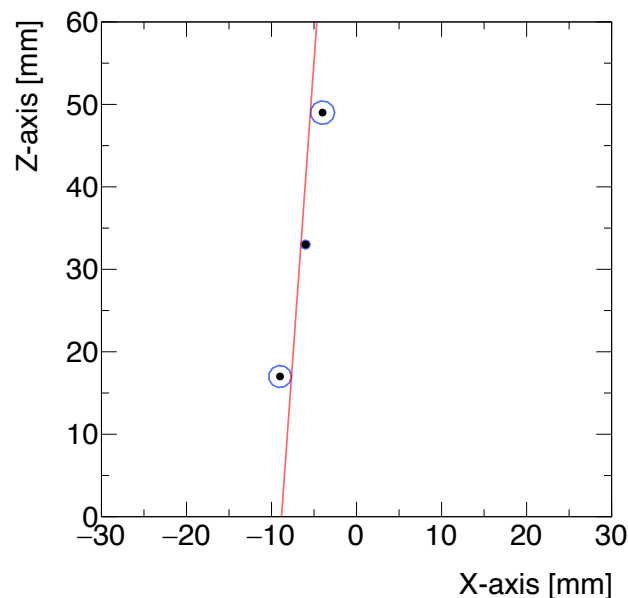
読み出し回路の取得情報  
TDC:時間情報  
ADC:エネルギー情報



# ドリフトチェンバーにおけるトラッキング



1. TDCデータから得られるドリフト時間をドリフト距離に変換(XT変換関数)
2. ドリフト距離 $d$ を半径とする円を3つ描く
3. DCA(トラックとワイヤーとの距離)とドリフト距離 $d$ との差 $DCA-d$ を3レイヤーそれぞれについて取る
4.  $DCA-d$ の2乗和平方根が最小値をとるようにトラックを引く



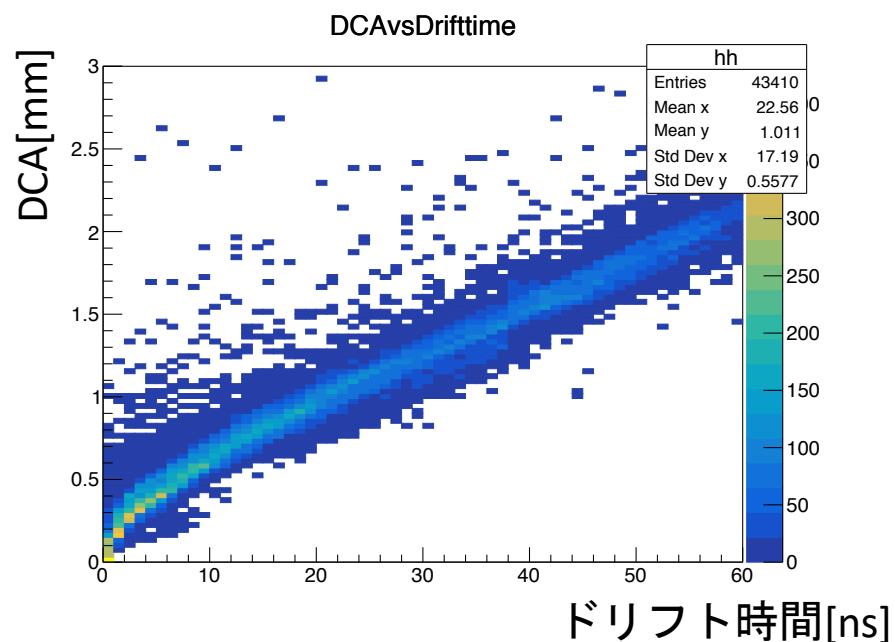
# XT変換関数の最適化

ドリフト時間からドリフト距離への変換：XT変換関数を用いる

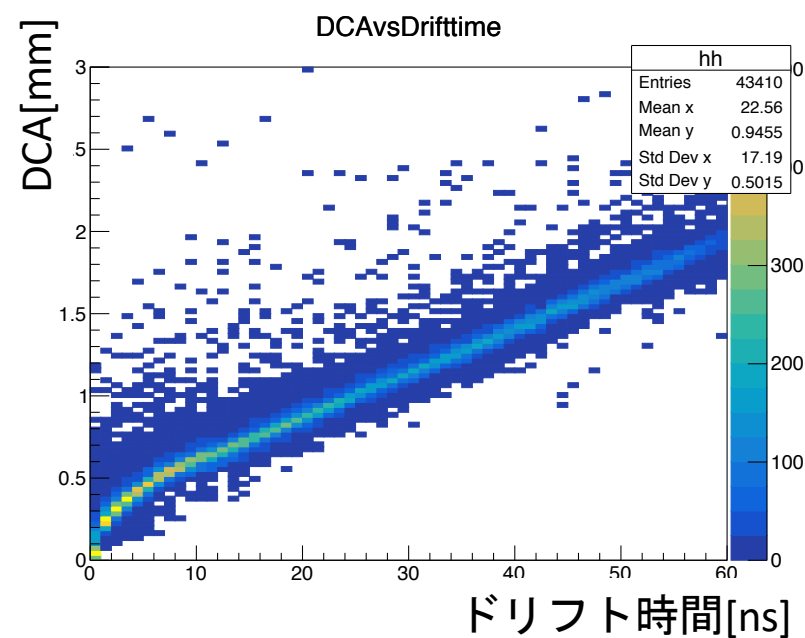
## XT変換関数

1回目：ドリフト時間の積分分布を5次関数、1次関数でフィット  
実データを使ってXT変換関数を最適化

2回目以降：横軸にドリフト時間、縦軸にDCAを取る分布を平方根、1次関数でフィット



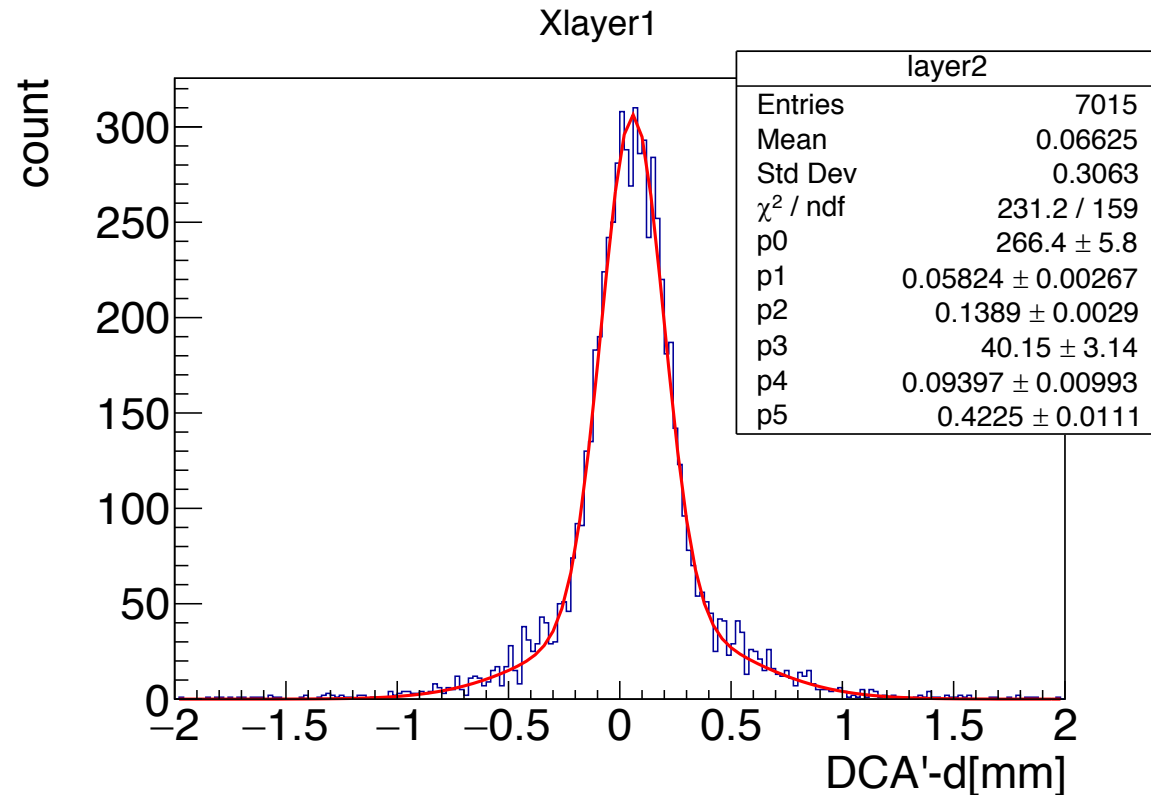
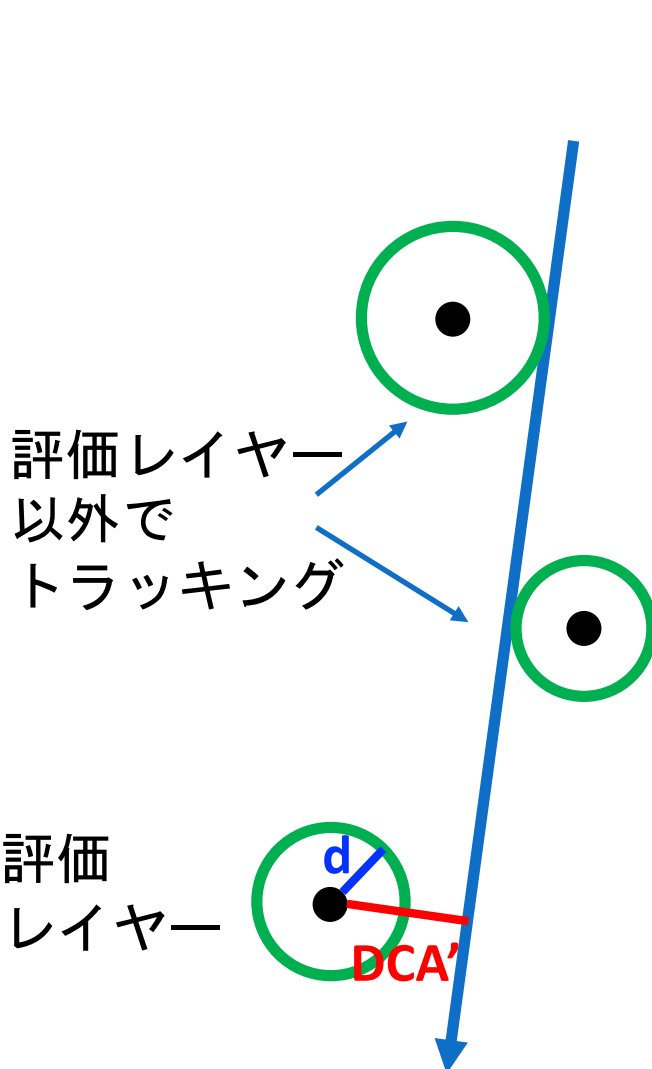
最適化前



最適化後

## 位置分解能の定義

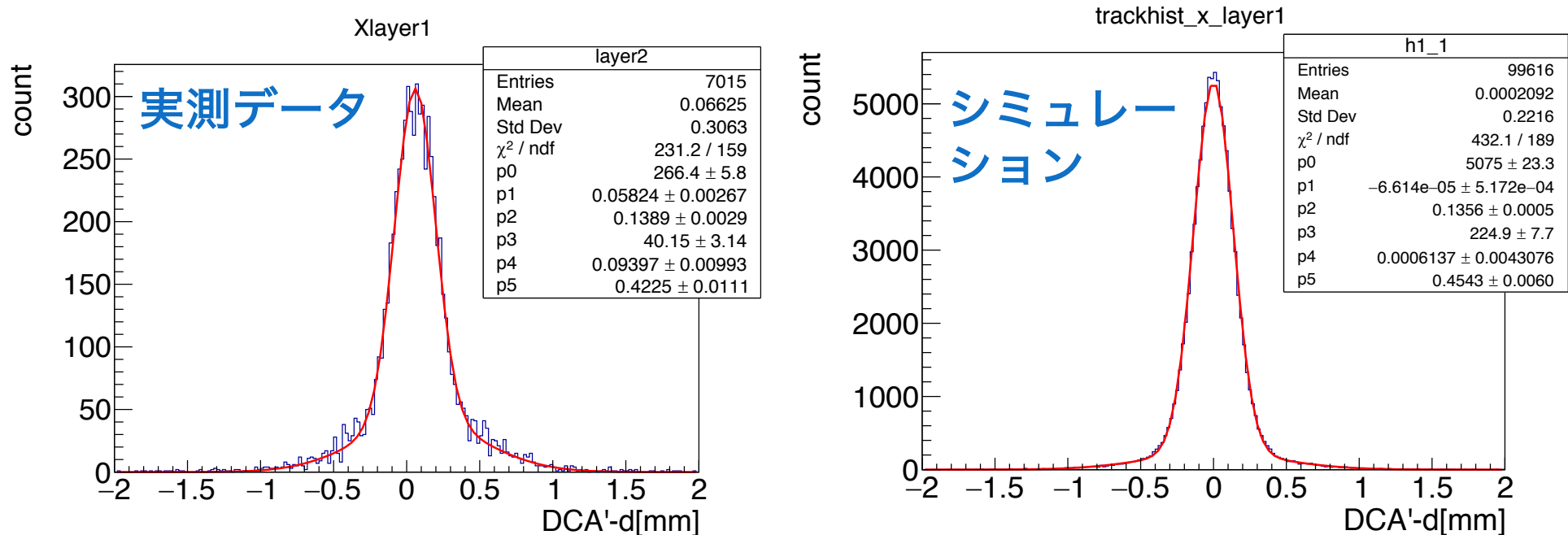
- 評価レイヤー以外の2層を使ってトラッキング  
その際のDCA'とドリフト距離dの差DCA'-d値で残差分布を作成



テール成分を見分けるために  
2ガウシアンでフィット  
→定数部分が大い方のガウシアン  
の標準偏差 $\sigma$ を位置分解能とする

## 残差分布の比較

実測データとシミュレーションそれぞれについて作成した残差分布を比較 例：Xレイヤー1層目



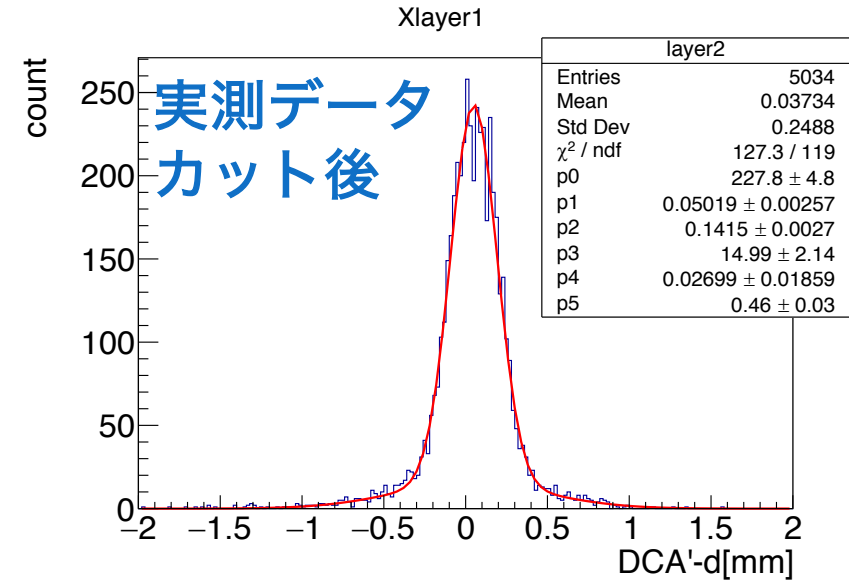
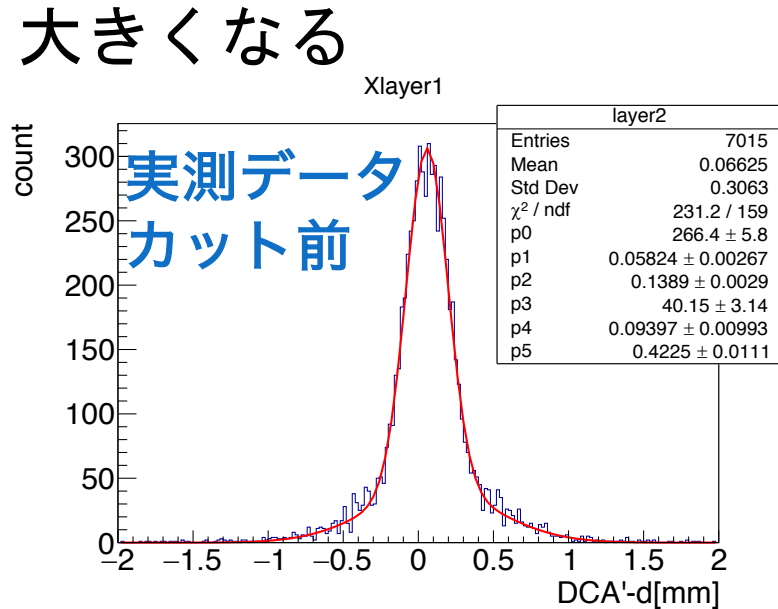
※シミュレーションは7MeVの陽子入射時

実測データはシミュレーションと比較してテール成分が大きい  
→ワイヤーによる多重散乱以外の原因 TDCの最小分解能

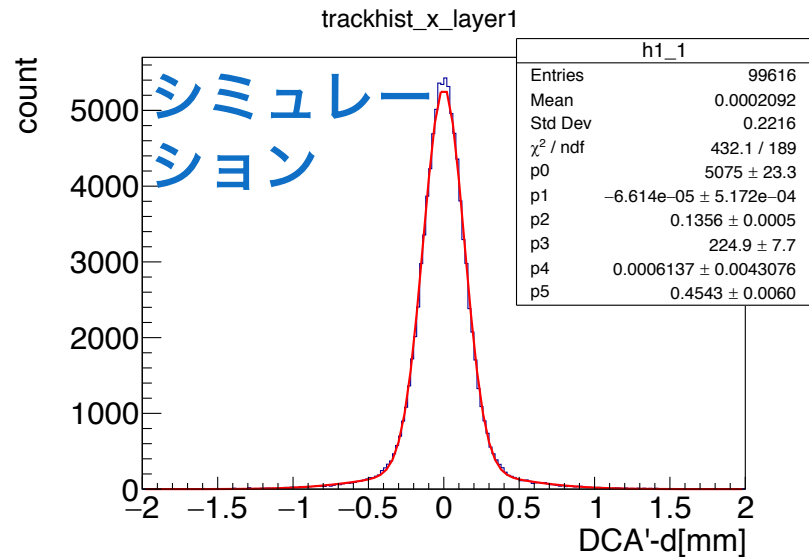


# TDCの最小分解能の影響

ワイヤー近傍は電場が大きく、ドリフト速度が速い  
→ドリフト時間が小さい領域ではTDCの最小分解能1nsの影響が大きくなる

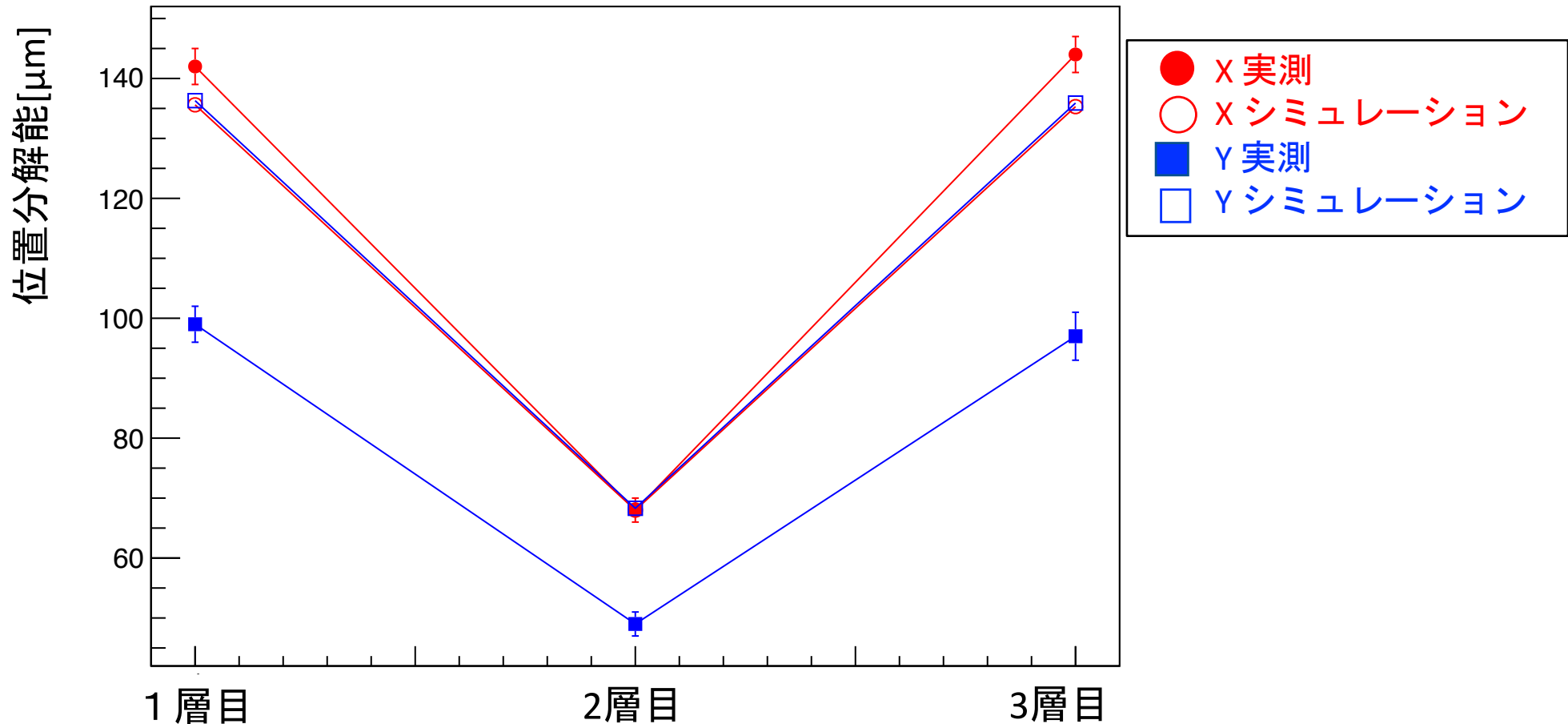


ドリフト時間0~2nsの場合をカット  
→テール成分が小さくなった



## レイヤーごとの位置分解能

実測とシミュレーションによる位置分解能を比較



Xレイヤーの位置分解能：シミュレーションとほぼ一致  
Yレイヤーの位置分解能：シミュレーションより良い結果  
(ドリフト時間0~2nsをカットした場合の結果)

## 陽子ビームによる性能評価実験の結果と考察

### 性能評価試験の結果

ドリフト時間0~2nsをカットした場合

Xレイヤーの位置分解能：シミュレーションとほぼ一致

Yレイヤーの位置分解能：シミュレーションより良い結果

### 考察

- Yレイヤーの位置分解能がシミュレーションより良い結果  
→セル内の陽子の入射位置に偏りがあった

位置分解能のDCA依存性により、Yの方が位置分解能が良くなった可能性

今後、シミュレーションで再現して評価する

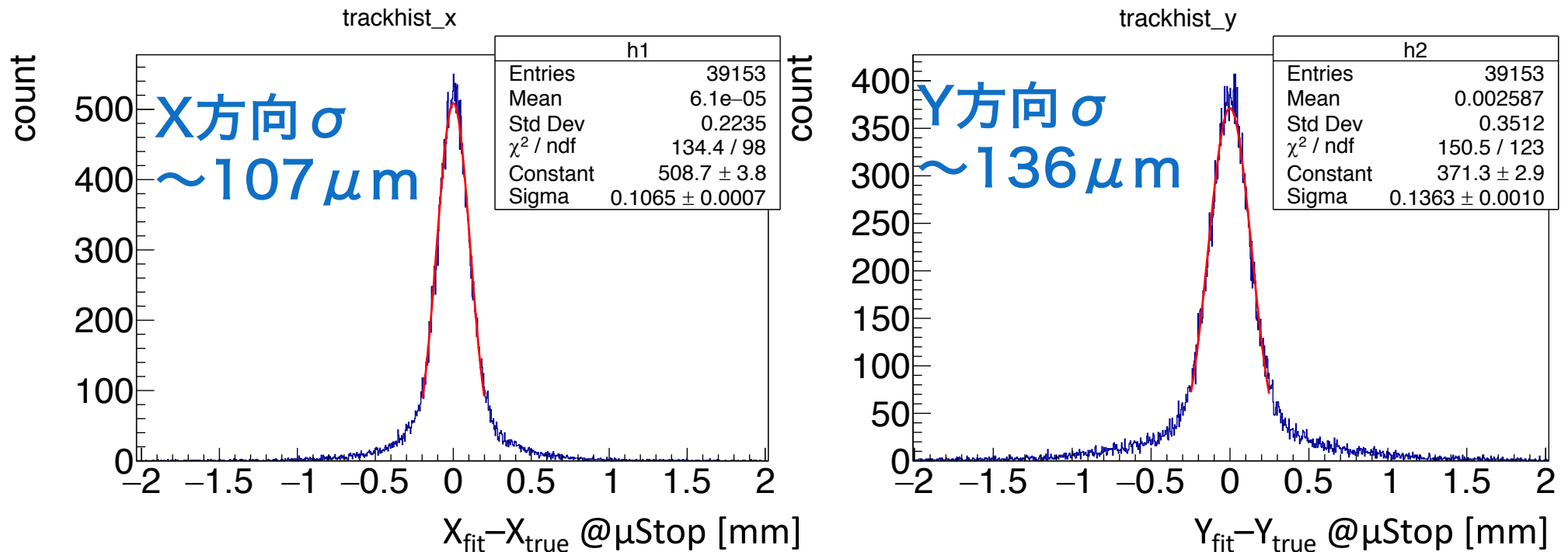
- ドリフト時間の小さい領域を評価できていない  
シミュレーションにTDCの時間分解能の寄与を含めることで評価できる可能性がある

# 元素マッピング時ミュオン停止位置の予想精度

位置分解能は概ねシミュレーションでの見積もり通り

シミュレーションでミュオン停止位置の予想精度を見積もる

- チェンバーの下流2mmの位置に資料(SiO<sub>2</sub>)を置く
- p=30MeV/cの $\mu^-$ を入射
- 資料内部での多重散乱の効果も加え、ミュオンの予想停止位置と実際の停止位置の残差分布を作成



100  $\mu\text{m}$ 程度の位置精度  $\sigma$  でミュオン停止位置が測定できる

## 開発したドリフトチェンバーの性能まとめ

- 1セルの位置分解能：平均 $50\mu\text{m}$
- 飛跡検出器の位置予想精度：Xレイヤー $75\mu\text{m} \sim 74\mu\text{m}$   
飛跡検出器の要請を満たす設計
- 性能評価実験の結果：  
シミュレーションと同程度以上の性能を実現
- 多重散乱の寄与を含めたミュオン停止位置の予想精度  
X方向  $107\mu\text{m}$ , Y方向  $136\mu\text{m}$   
目的の精度を実現可能

目指す精度を実現するドリフトチェンバーを開発できた

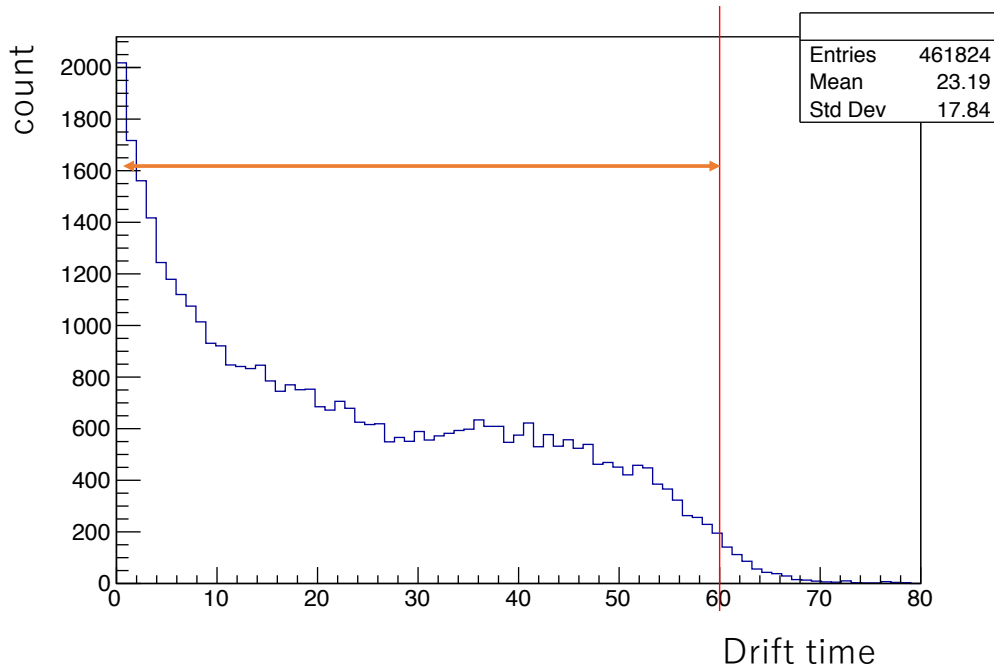
## まとめ

- ミューオンX線による非破壊分析で非破壊元素マッピング手法の確立を検討しており、DCビームを用いてミューオン1つ1つの飛跡を検出することによりこれを実現する。
- ドリフトチェンバーの仕様をシミュレーションを元に決定した。
- 低エネルギー陽子による性能評価試験の結果、ドリフト時間0~2nsを除く領域ではシミュレーションと同等以上の位置分解能を実現していることが確認できた。
- 元素マッピング時に予想されるミューオン停止位置の予想精度はドリフトチェンバーから2mmの距離に資料を置いた場合Xレイヤー107 $\mu$ m、Yレイヤー136 $\mu$ mである。

Back up

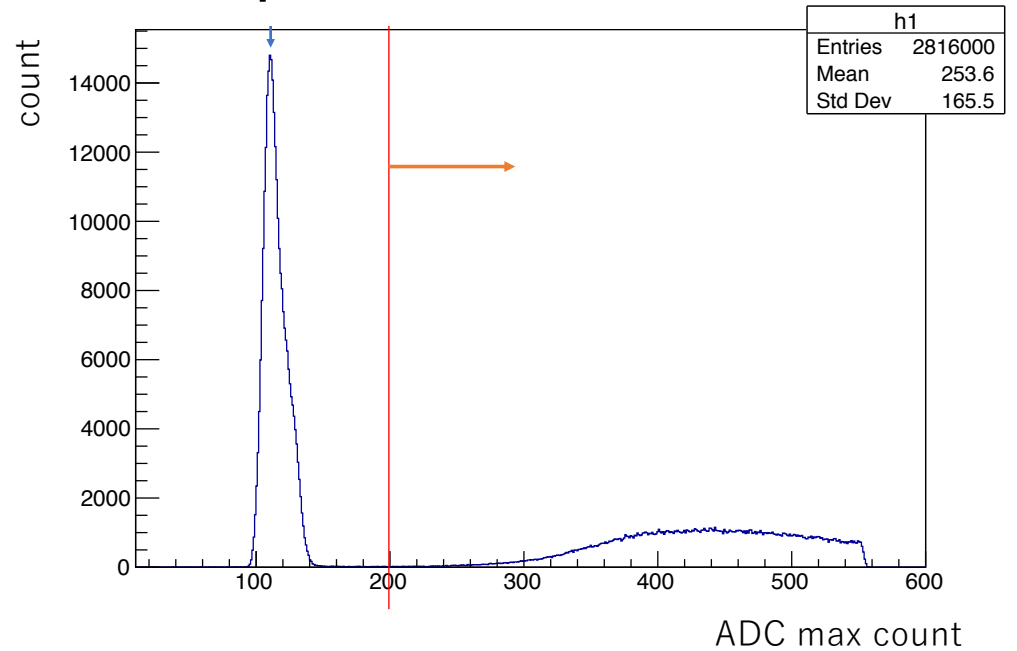
# イベント選択

ヒット選択：ドリフト時間と波高について



ドリフト時間が0～60ns

ノイズ

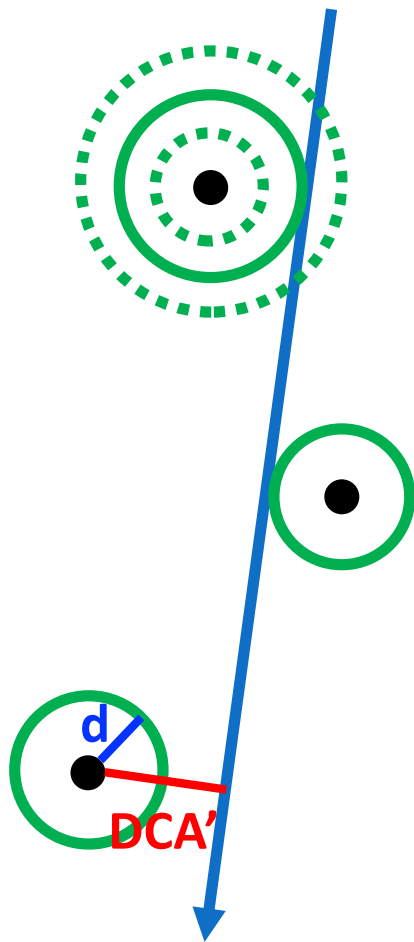


ADCの最大カウント（波高）  
が200以上

イベント選択: ヒットが6レイヤー全てに1つずつ

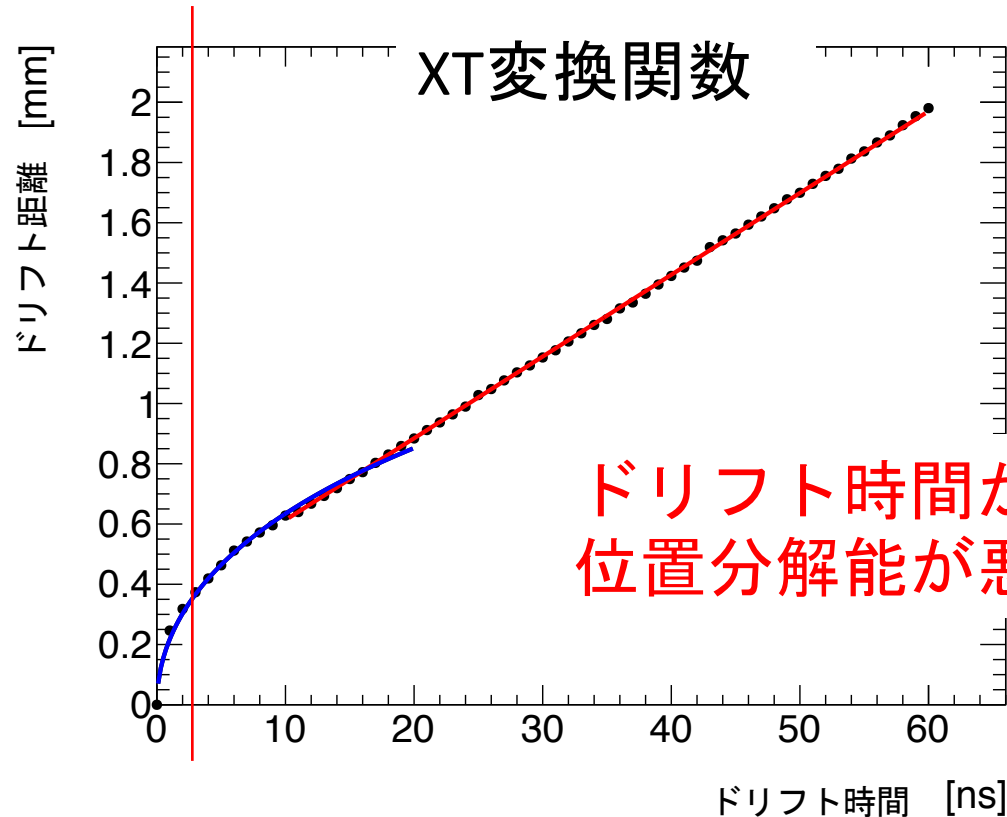


## TDCの最小分解能の影響



ドリフト円の半径=ドリフト距離は離散的な値を取る(TDCの最小分解能1ns)

→残差DCA'-dが離散的な値を取る



ドリフト時間が小さい時、  
位置分解能が悪くなる

ドリフト時間によるカット：ドリフト時間0~2nsをカット  
→テール成分が小さくなった

## 陽子ビームによる性能評価実験の結果と考察

### 性能評価試験の結果

ドリフト時間0~2nsをカットした場合

Xレイヤーの位置分解能：シミュレーションとほぼ一致

Yレイヤーの位置分解能：シミュレーションより良い結果

### 考察

➤ Yレイヤーの位置分解能がシミュレーションより良い結果

→ Yレイヤーの方がテール成分が大きかった

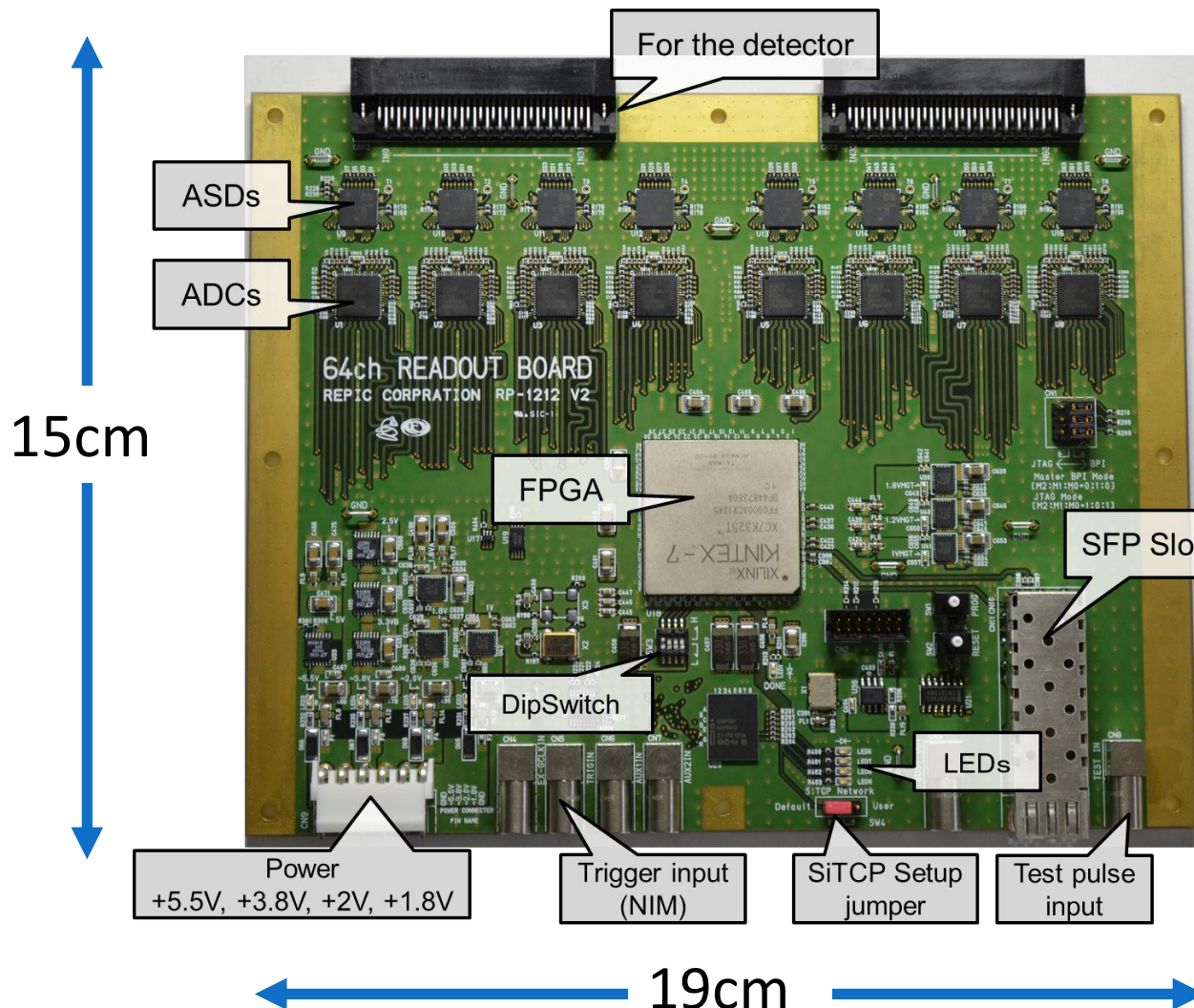
本来位置分解能の評価に使用されるべきデータがテール成分に含まれ、解析時に使用されないことで位置分解能が良く見えた

➤ ドリフト時間の小さい領域を評価できていない

シミュレーションにTDCの時間分解能の寄与を含めることで評価できる可能性がある

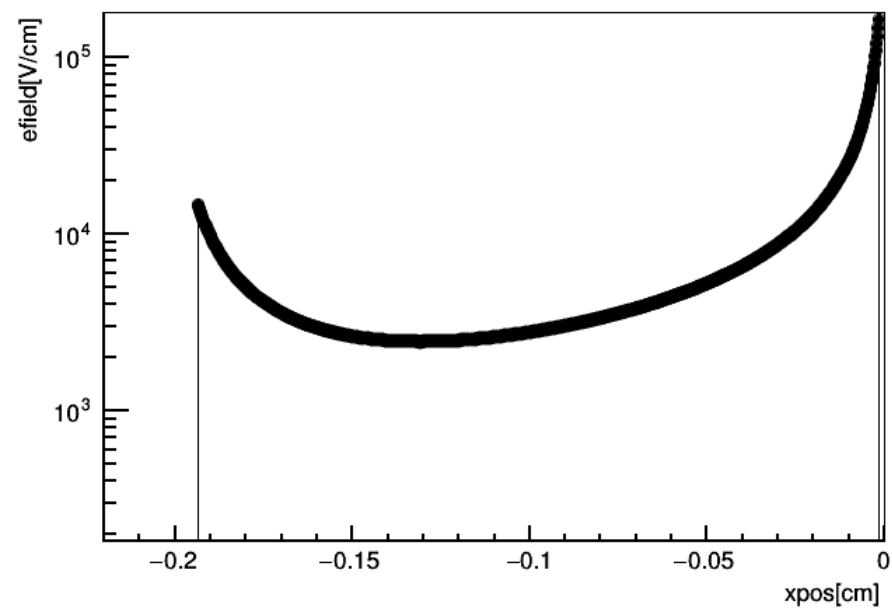
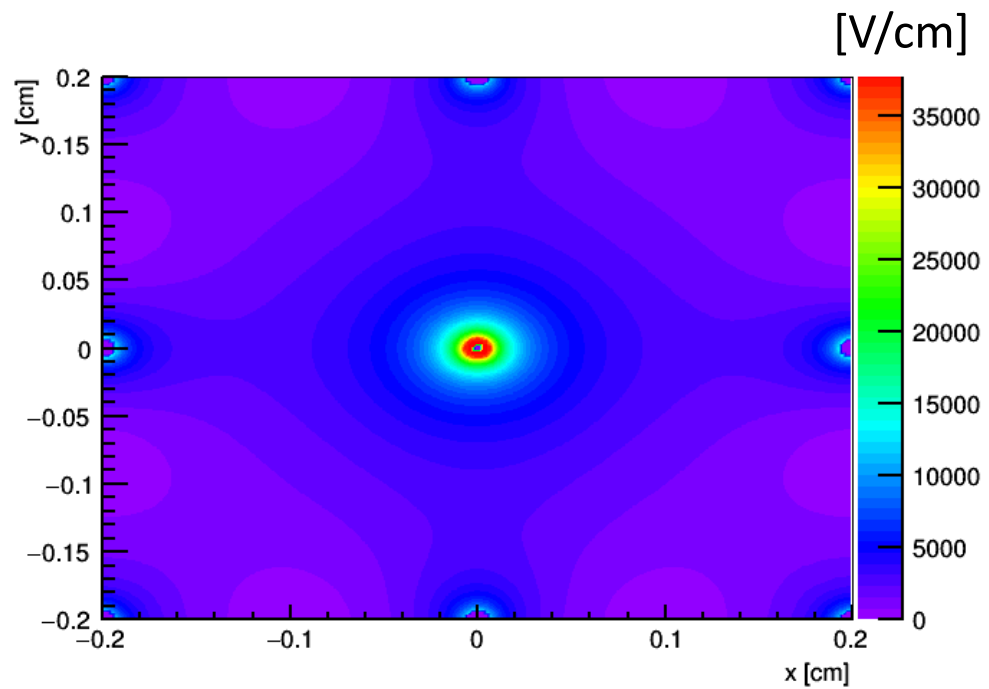
## 読み出し回路

読み出すセンスワイヤの本数：60本  
→ハヤシレピック 64ch READOUT BOARDを使用



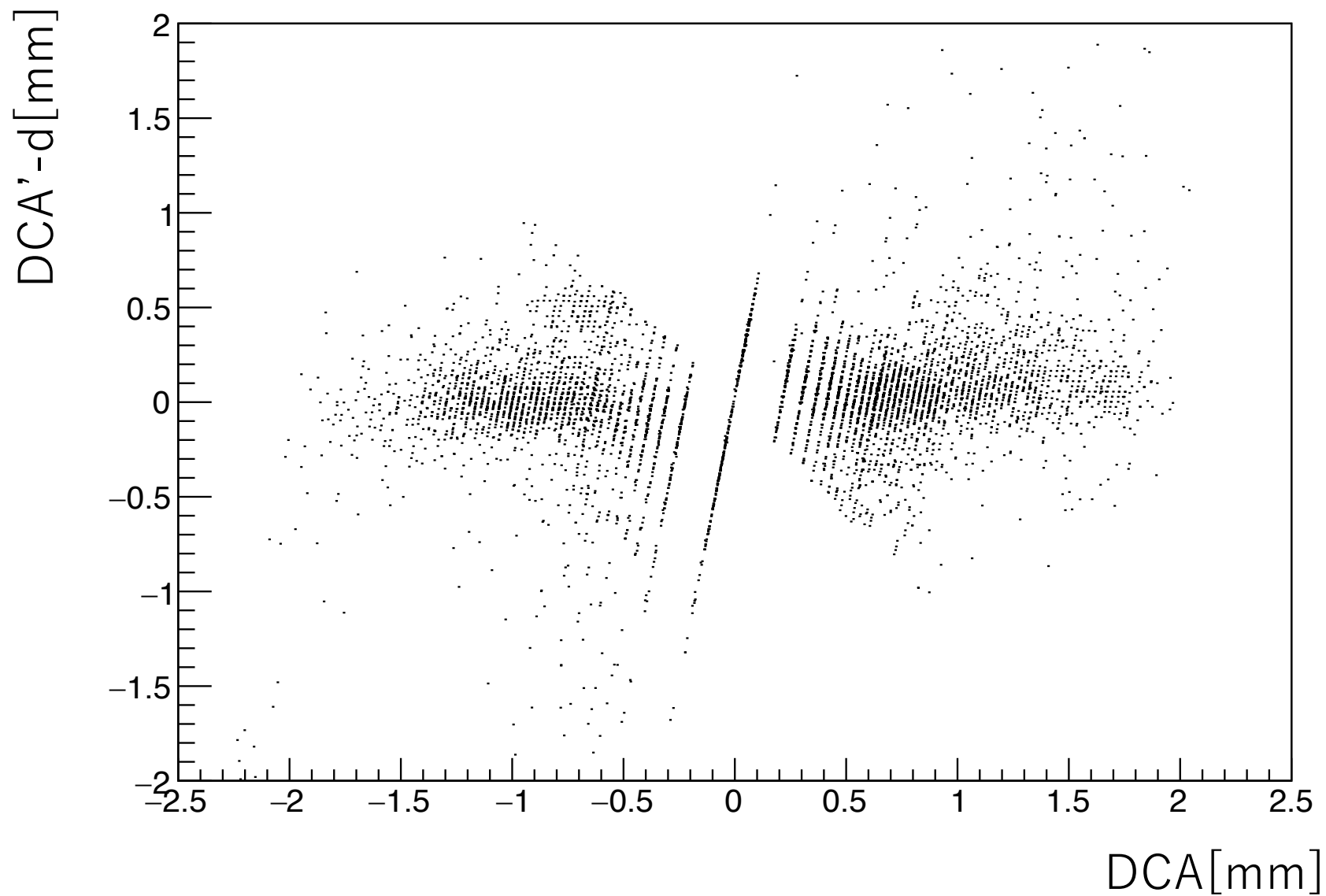
- アナログ波形  
サンプリング周波数  
31.25MHz
- TDC時間分解能 1ns

# セル内の電場

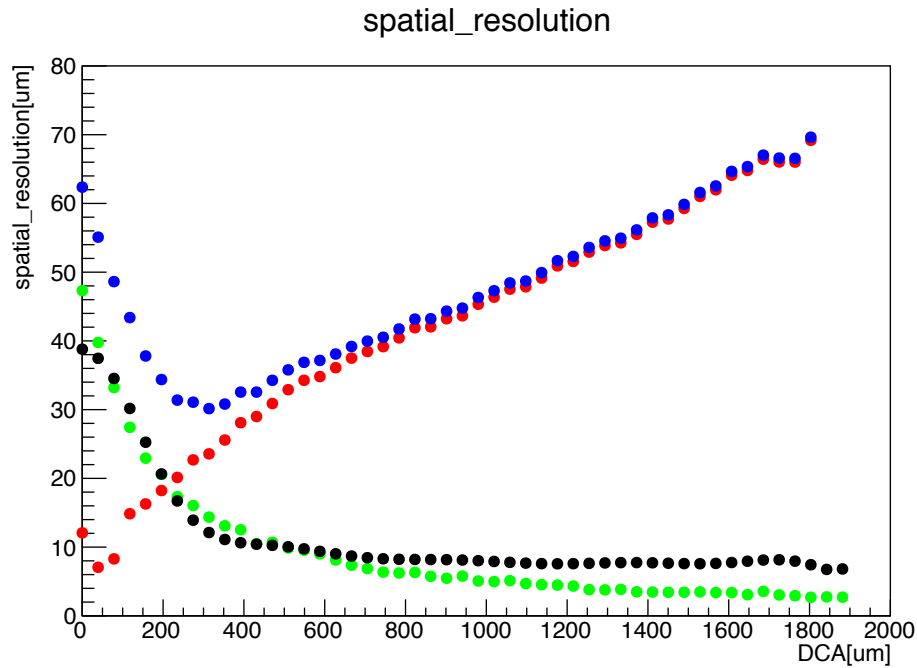


## テール成分

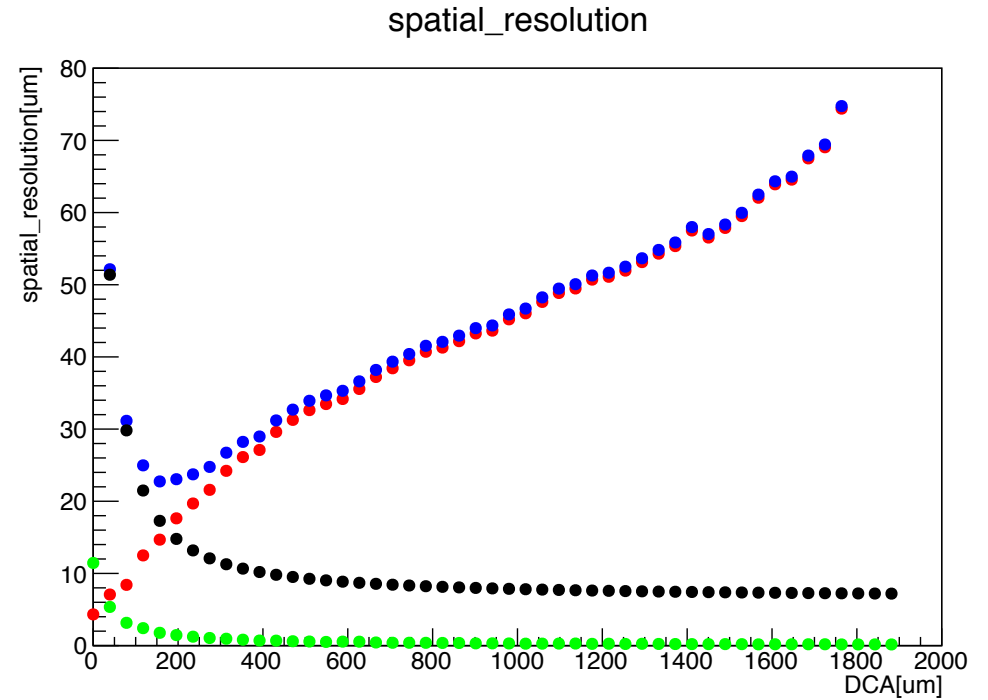
residual:track\_DCA {hit\_Z==9}



# 陽子とミューオンの位置分解能の比較

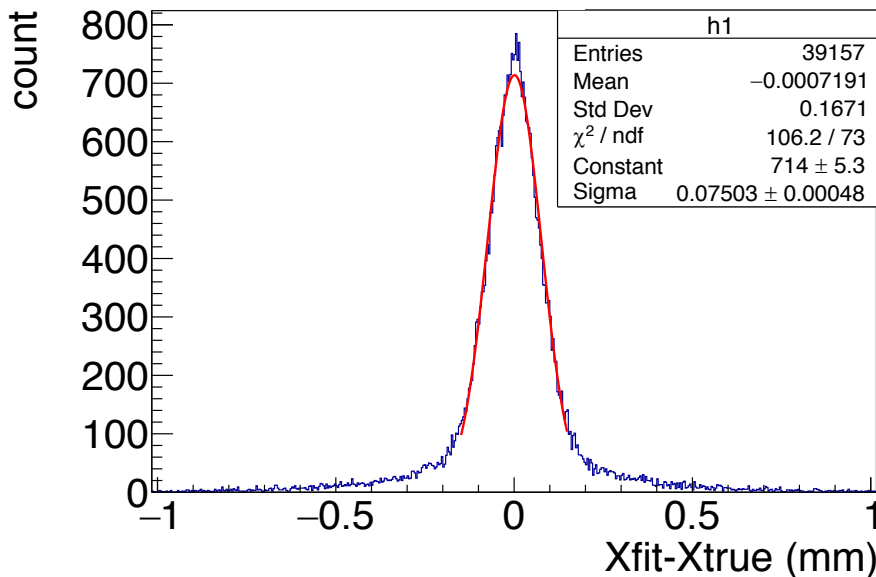
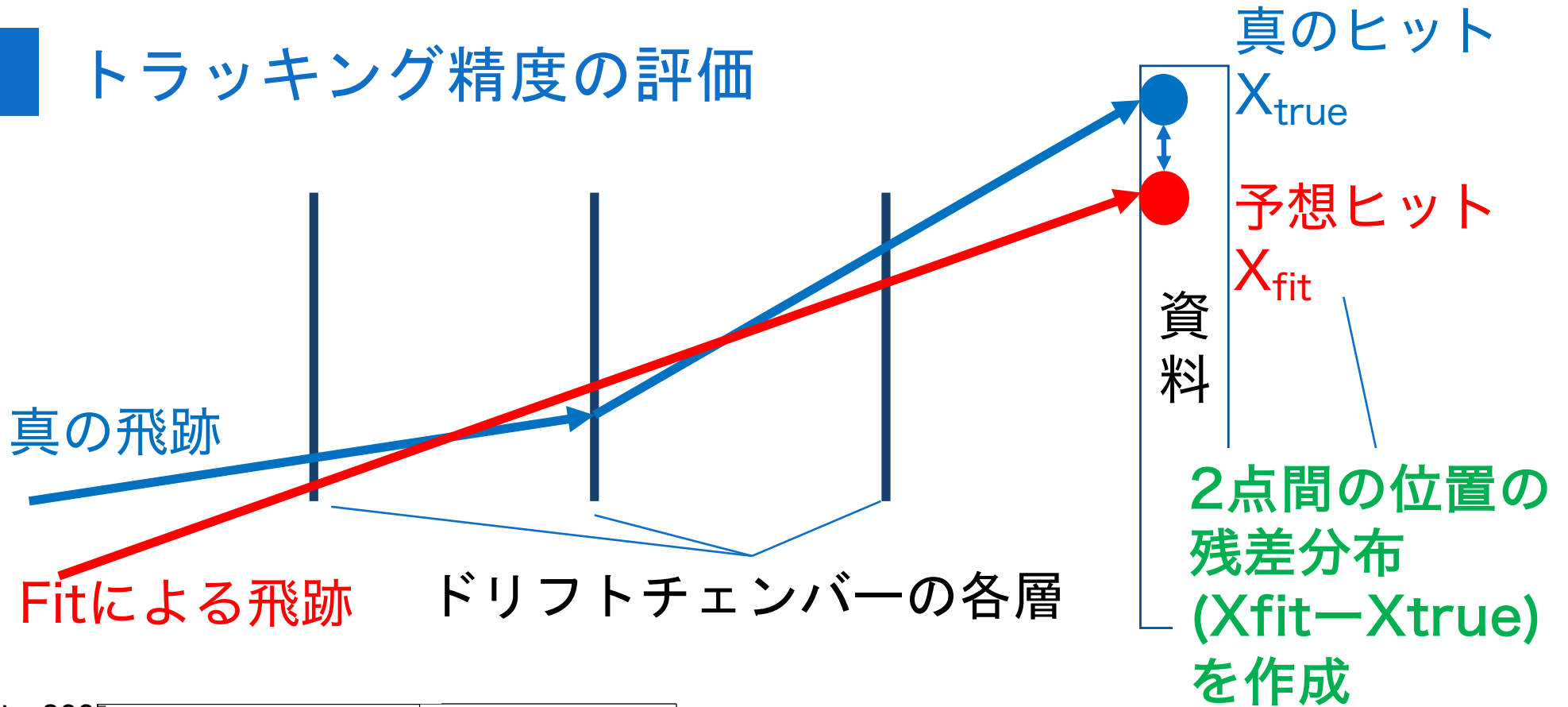


ミューオン



陽子

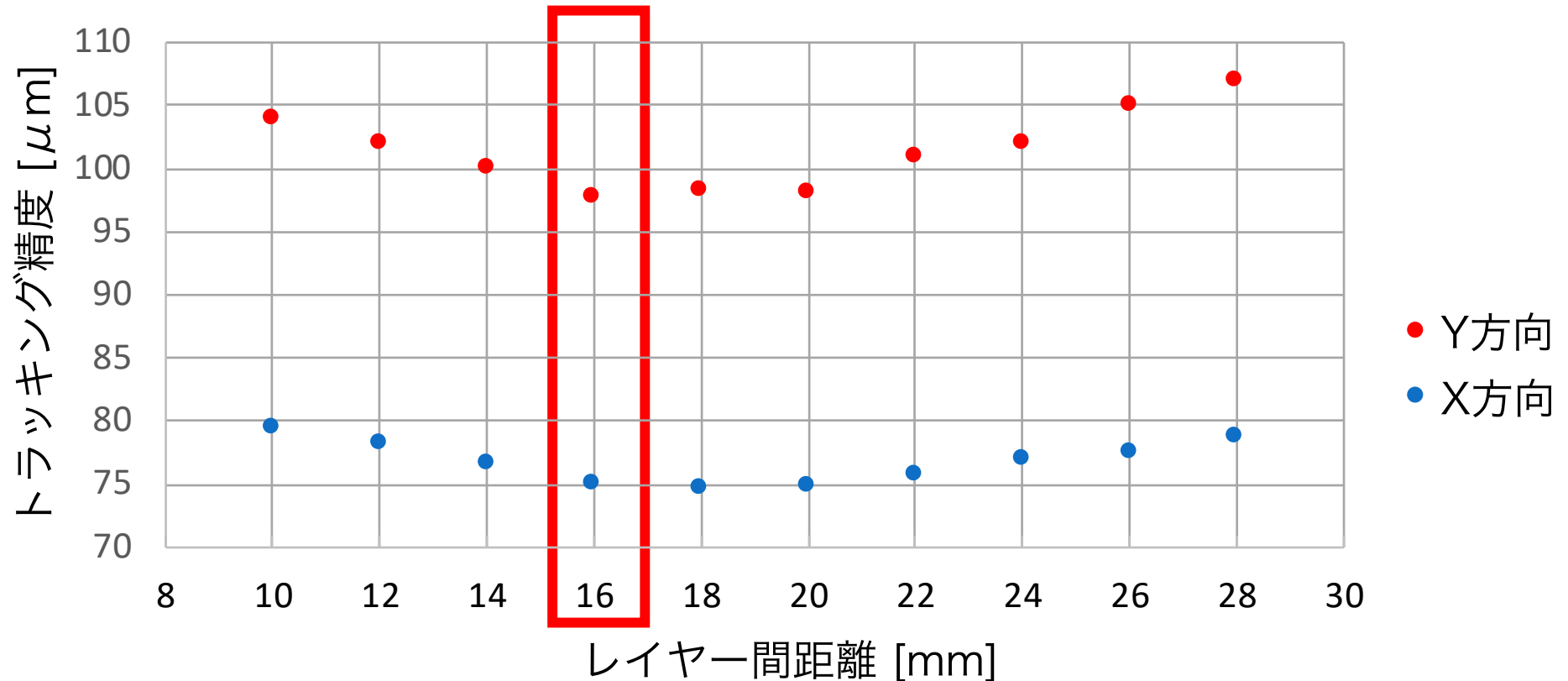
# トラッキング精度の評価



残差分布をガウシアンでフィット  
→標準偏差 $\sigma$ をトラッキング精度とする

# シミュレーションによるレイヤー間距離の最適化

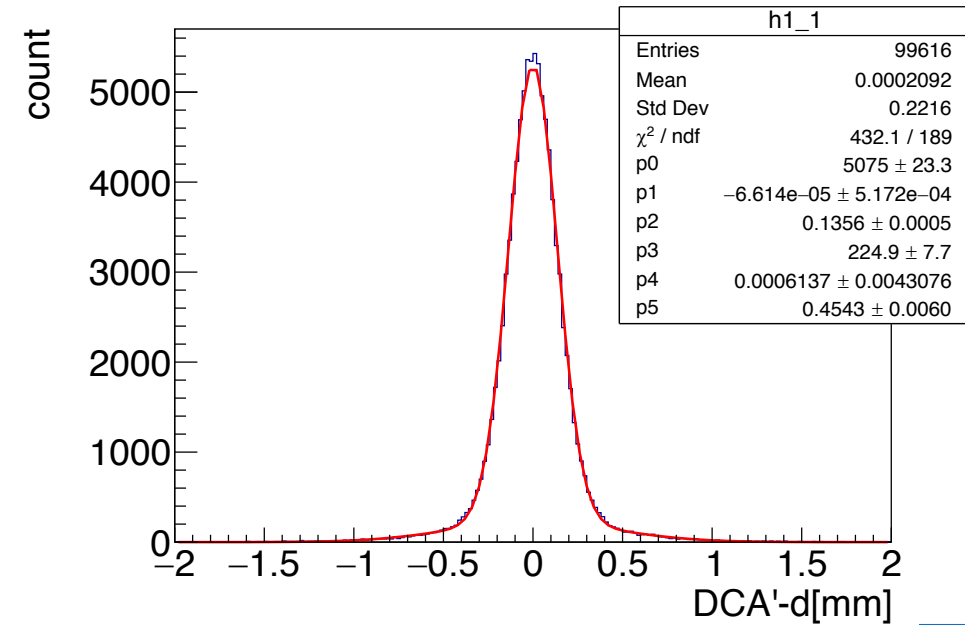
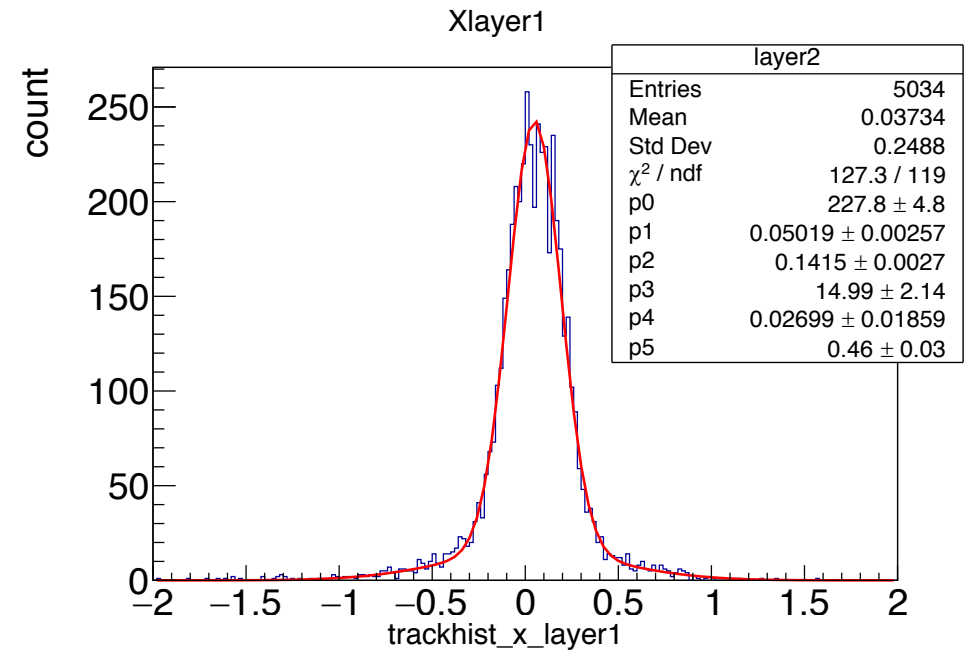
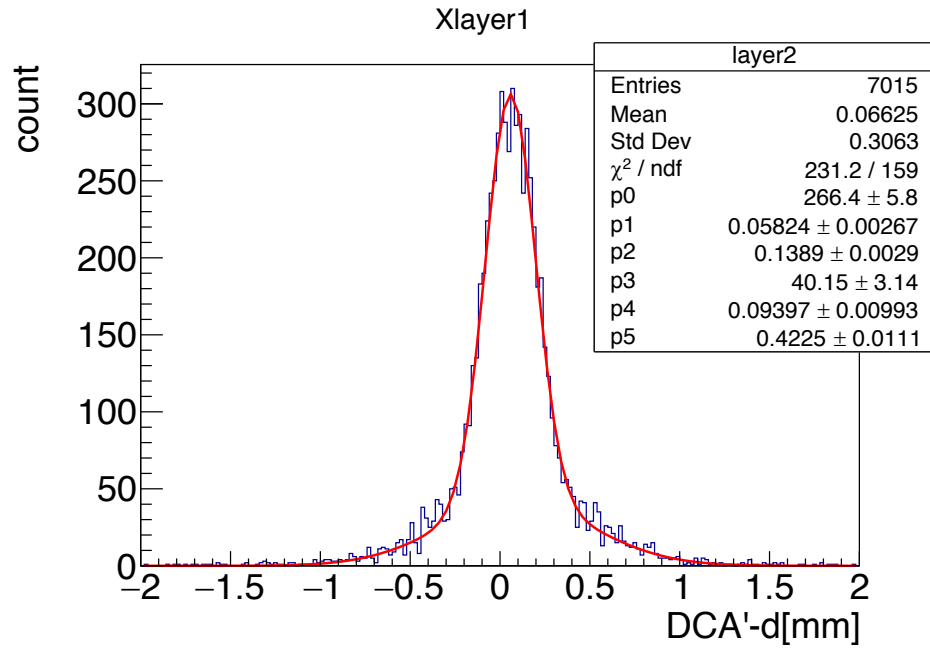
レイヤー間距離=同じ方向のセンスワイヤ間の距離



- チェンバーの2mm下流の資料表面での位置精度
- センスワイヤ間の距離を16mmに決定
- 検出器の要請(飛跡検出器の位置分解能  $\leq$  試料内部での多重散乱74μm)を満たす



# テール成分



## 試料内での多重散乱

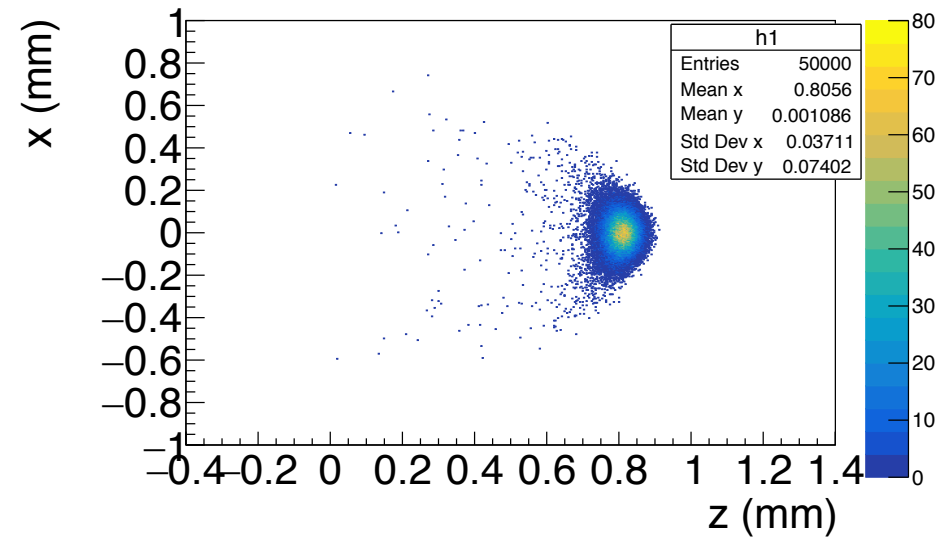
### 設定

- ビーム： $\mu$ -ペンシルビーム  
( $\Delta p/p=0$ )
- 試料： $\text{SiO}_2$

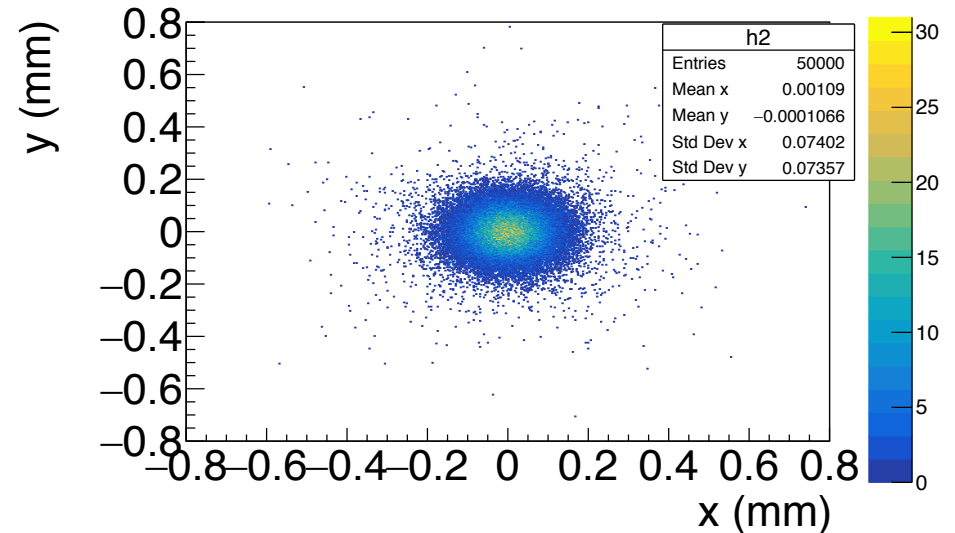
運動量 [MeV/c]	停止深さの 平均位置 [mm]	停止位置 広がり [ $\mu\text{m}$ ]
30	0.81	74
32.5	1.1	97
35	1.4	124

位置分解能 $74\mu\text{m}$ 以下で物質量を小さくしたドリフトチェンバーを開発する

### Beam stop 30MeV/c z-x

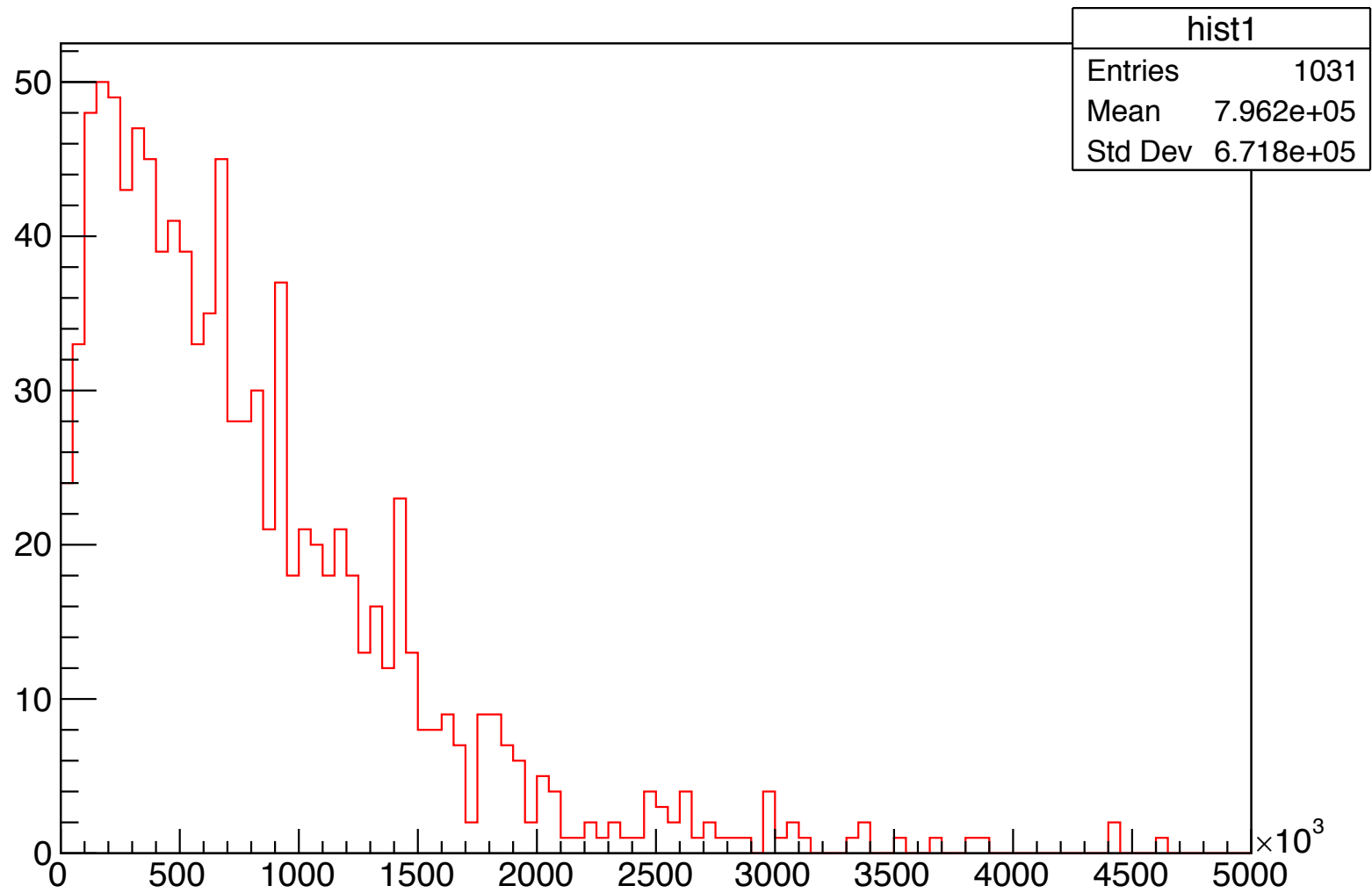


### Beam stop 30MeV/c x-y



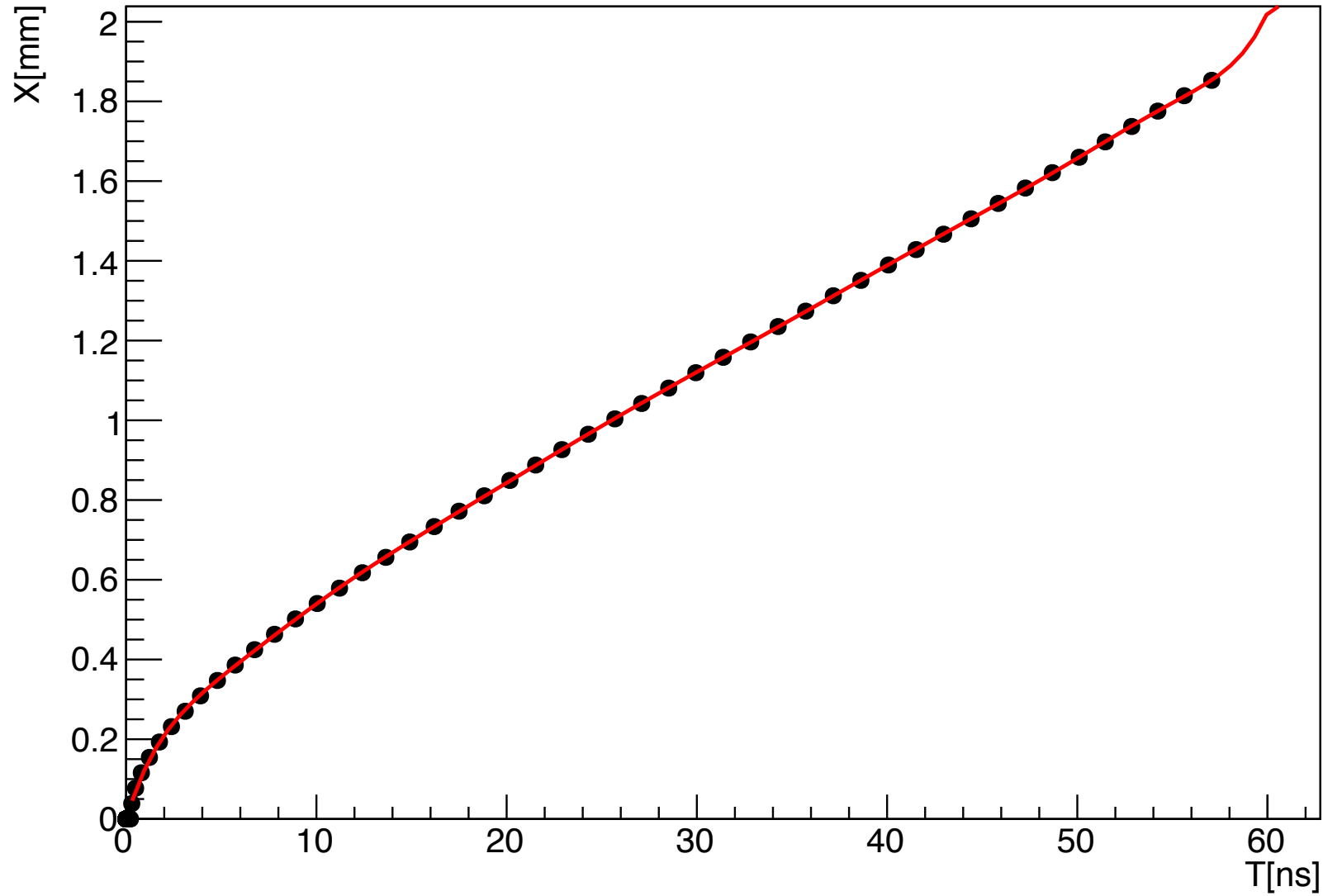
# ゲイン計算

hist1





# XTカーブ

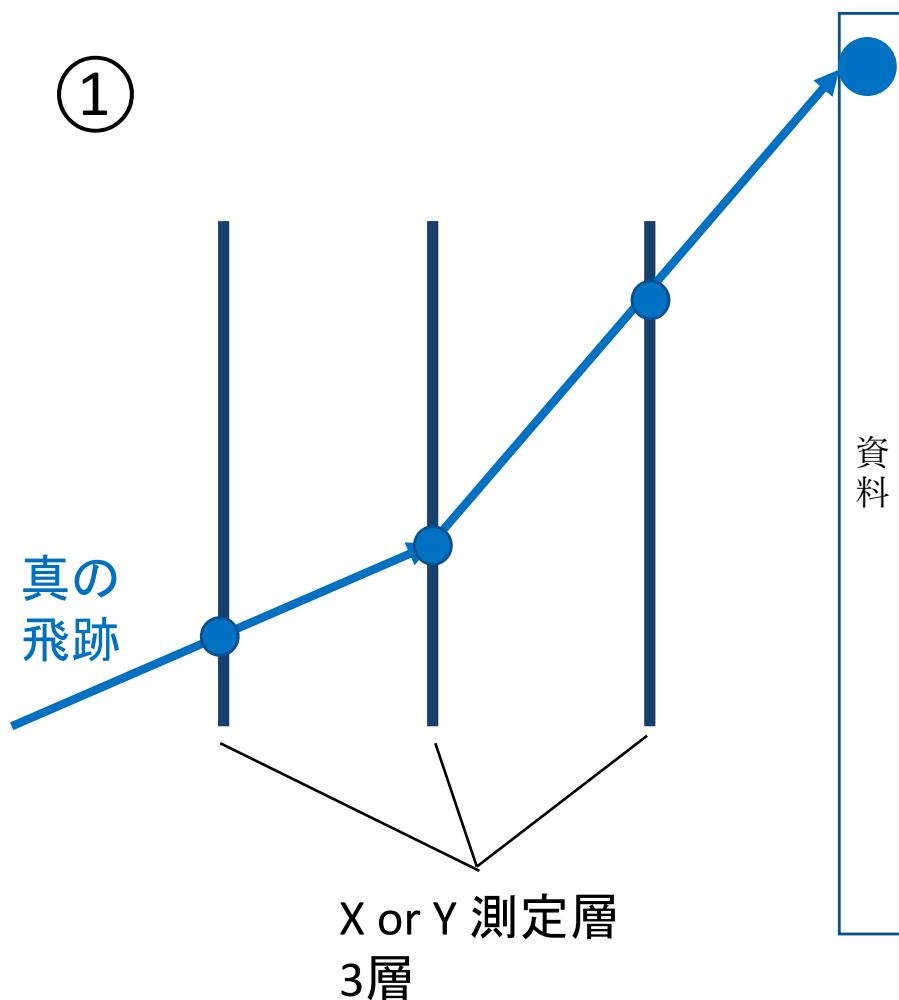


## トラッキング精度分布の定義

### トラッキング精度分布

粒子の飛跡をどの程度正確に構成できるかの指標の分布

資料での真のヒット位置とトラッキングから導いた予想ヒット位置との差の分布



以下の方法でヒストグラムを作成

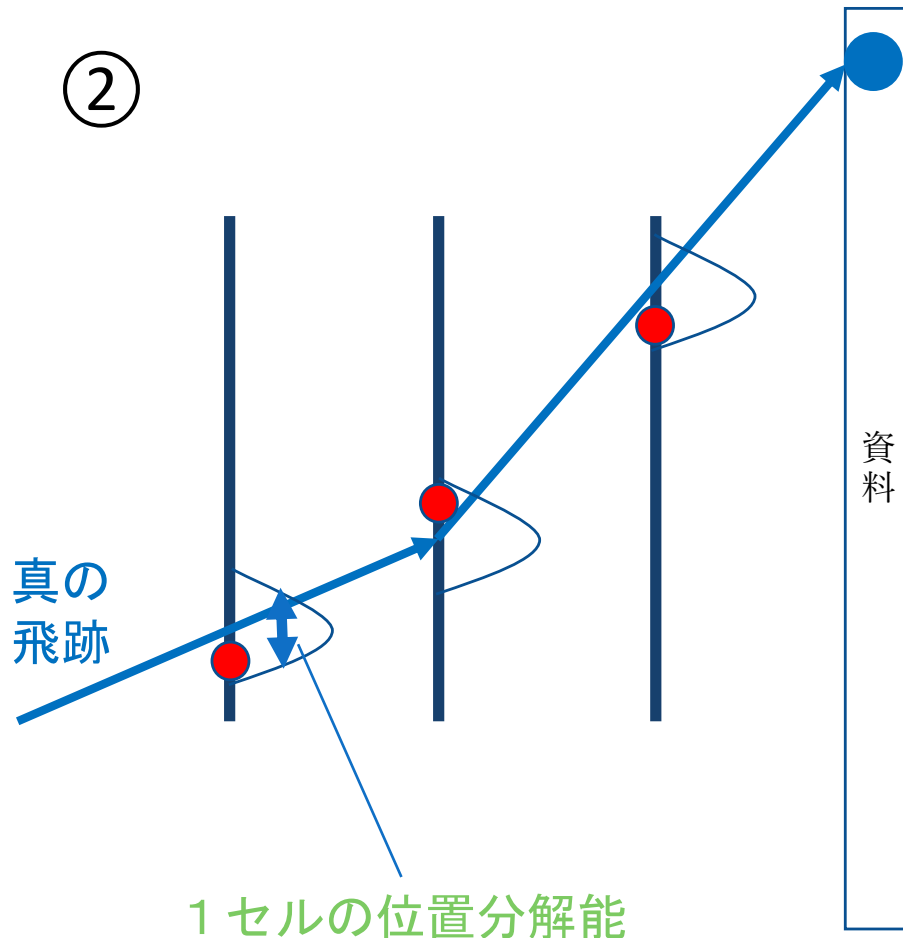
- ① 各層でヒット位置情報を記録（シミュレーション）
- ② 1セルの位置分解能に従いヒット位置情報を鈍らせる
- ③ ②の3点を1時間数でfitし、資料の位置での予想ヒット位置を導く
- ④ 資料での真のヒット位置と④のヒット位置との差をヒストグラムに詰める

## トラッキング精度分布の定義

### トラッキング精度分布

粒子の飛跡をどの程度正確に構成できるかの指標の分布

資料での真のヒット位置とトラッキングから導いた予想ヒット位置との差の分布



以下の方法でヒストグラムを作成

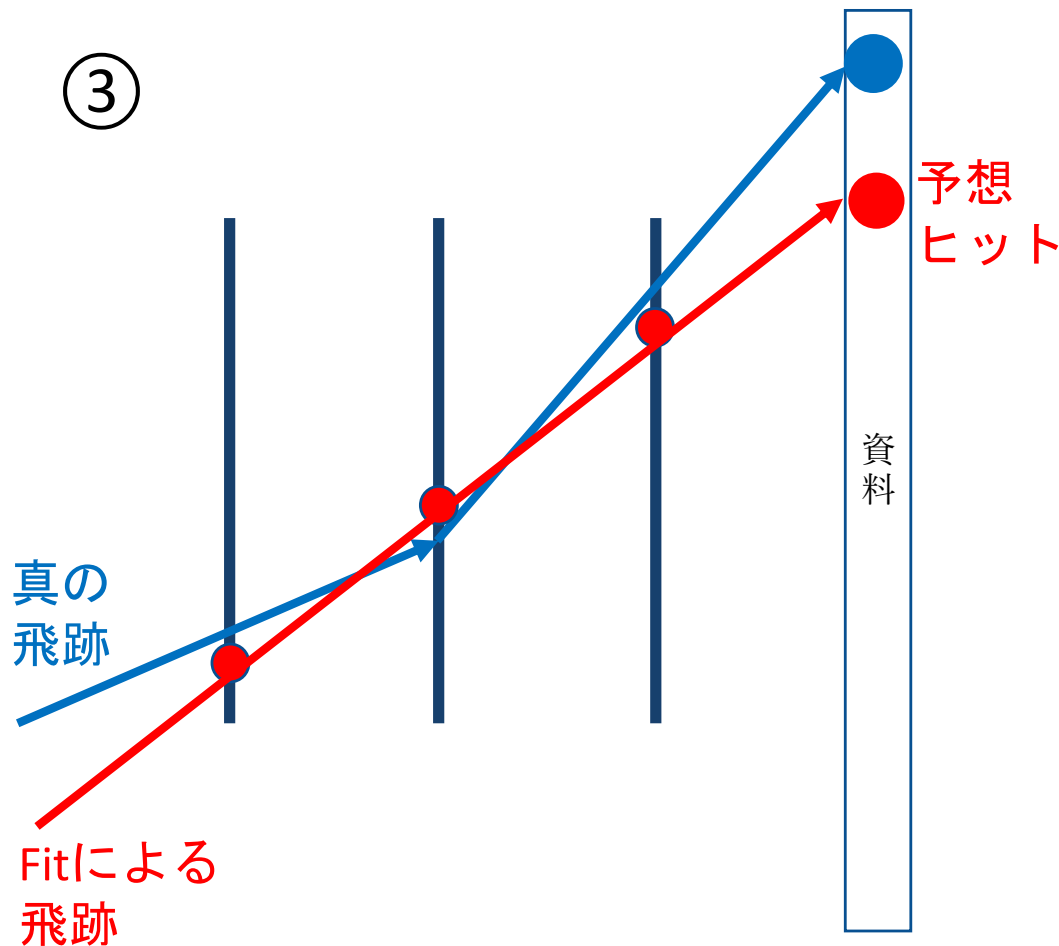
- ① 各層でヒット位置情報を記録（シミュレーション）
- ② 1セルの位置分解能に従いヒット位置情報を鈍らせる
- ③ ②の3点を1時間数でfitし、資料の位置での予想ヒット位置を導く
- ④ 資料での真のヒット位置と④のヒット位置との差をヒストグラムに詰める

## トラッキング精度分布の定義

### トラッキング精度分布

粒子の飛跡をどの程度正確に構成できるかの指標の分布

資料での真のヒット位置とトラッキングから導いた予想ヒット位置との差の分布



以下の方法でヒストグラムを作成

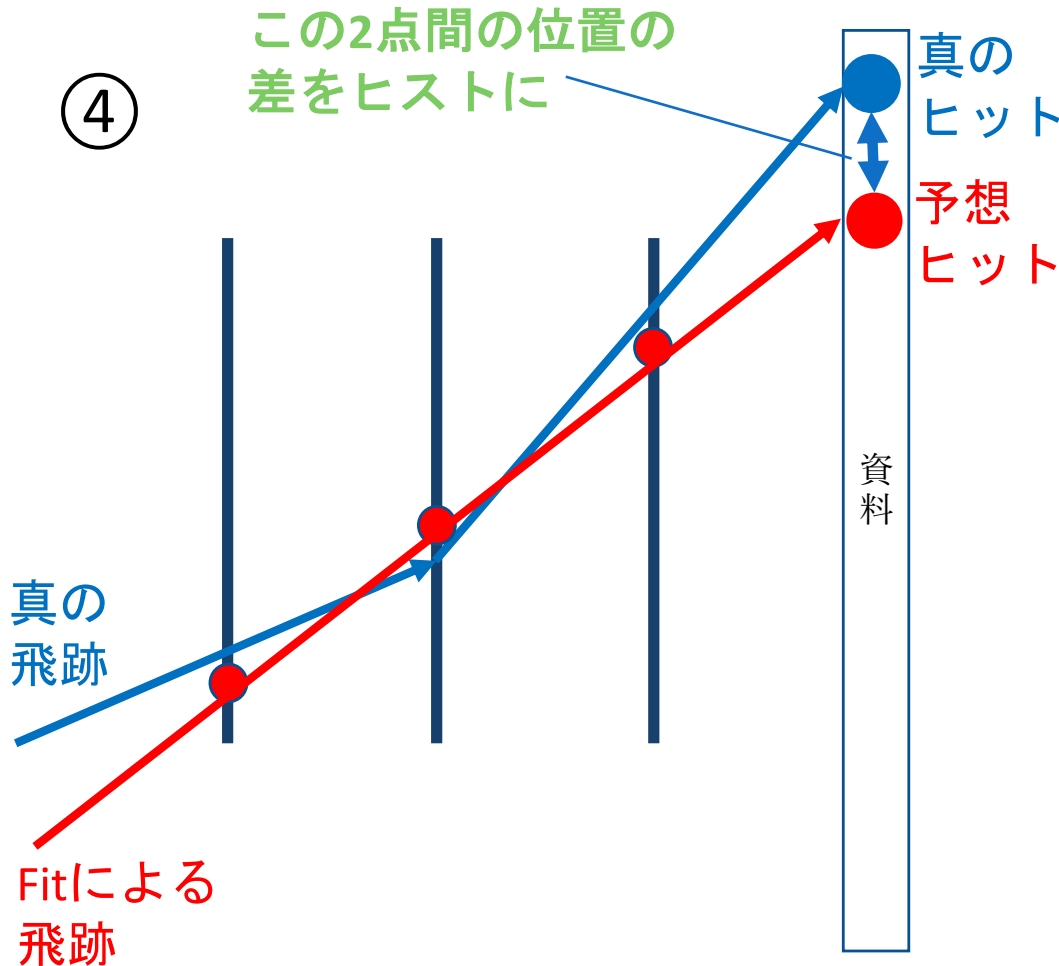
- ① 各層でヒット位置情報を記録（シミュレーション）
- ② 1セルの位置分解能に従いヒット位置情報を鈍らせる
- ③ ②の3点を1時間数でfitし、資料の位置での予想ヒット位置を導く
- ④ 資料での真のヒット位置と④のヒット位置との差をヒストグラムに詰める

# トラッキング精度分布の定義

## トラッキング精度分布

粒子の飛跡をどの程度正確に構成できるかの指標の分布

資料での真のヒット位置とトラッキングから導いた予想ヒット位置との差の分布

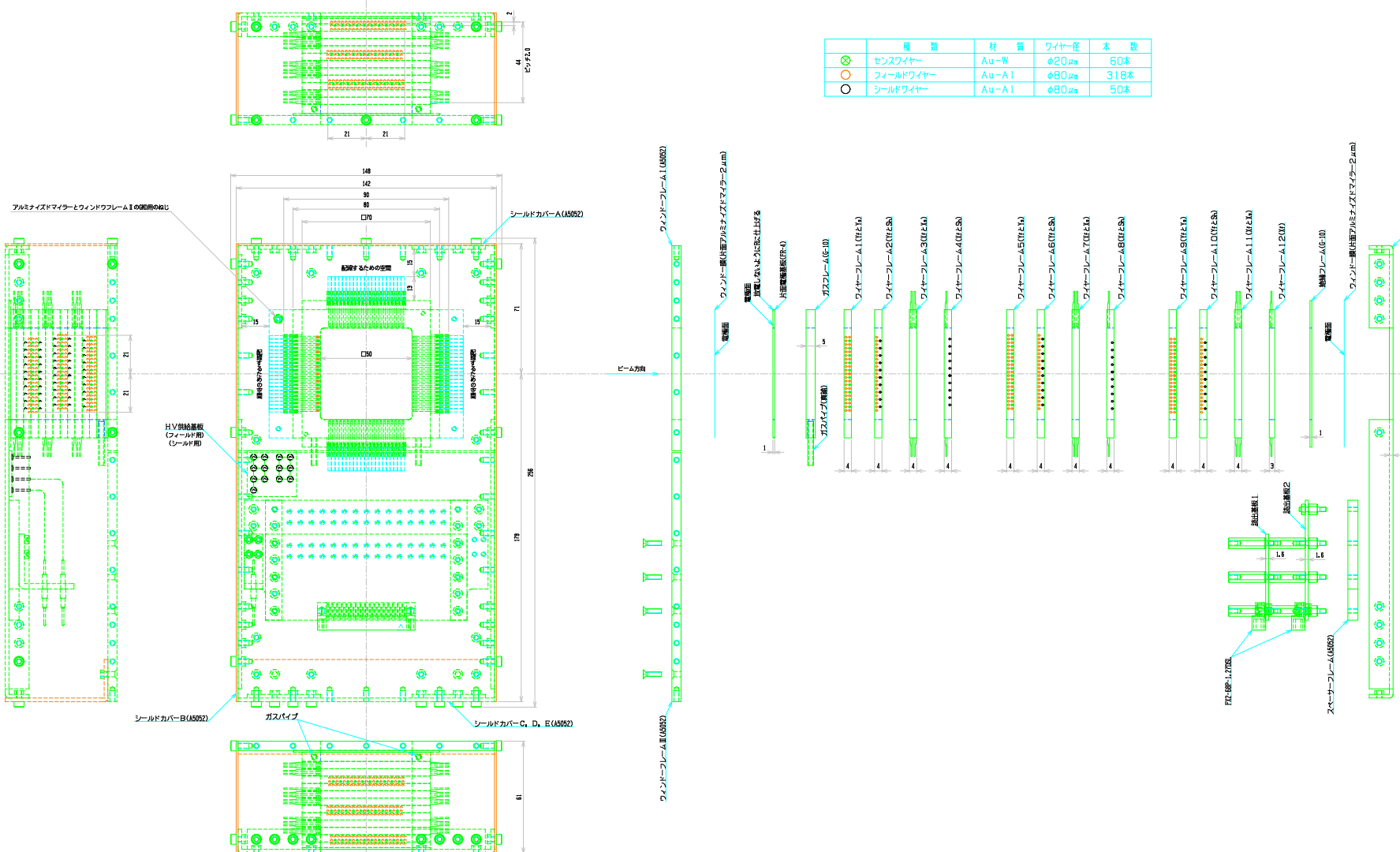


以下の方法でヒストグラムを作成

- ① 各層でヒット位置情報を記録（シミュレーション）
- ② 1セルの位置分解能に従いヒット位置情報を鈍らせる
- ③ ②の3点を1時間数でfitし、資料の位置での予想ヒット位置を導く
- ④ 資料での真のヒット位置と④のヒット位置との差をヒストグラムに詰める



# ワイヤーの配置：実際の図面



	種類	材質	ワイヤー径	本数
○	センサワイヤー	Au-W	φ20µm	60本
⊗	シールドワイヤー	Au-A1	φ80µm	318本
○	シールドワイヤー	Au-A1	φ80µm	50本

△		材質	-	数量	1	3-d. ANGLE PROJECTION	ハヤシレピック株式会社 第4事業部
△		表面処理	-	備考	-	名称	
△		設計・製図	平尾	年月日	2019-07-11	DC-760 ver.201907110940	
△		検図・承認				組立図	
訂正	内容	年月日				尺度	1/1
						単位	1.0mm
						分類	760
						図番	A-1

## ガス、セルの仕様

### ガス

使用するガス：He :  $iC_4H_{10}$  = 90:10

- 久野研究室COMET実験のドリフトチェンバーで使用されているものと同じガス
- チェンバー内部での多重散乱の影響を小さくする為に、物質量の小さいHeベースのガスを使用

### セル

セル形状：正方形セル

- センスワイヤを中心に対称な電場を形成

セルサイズ：4mm

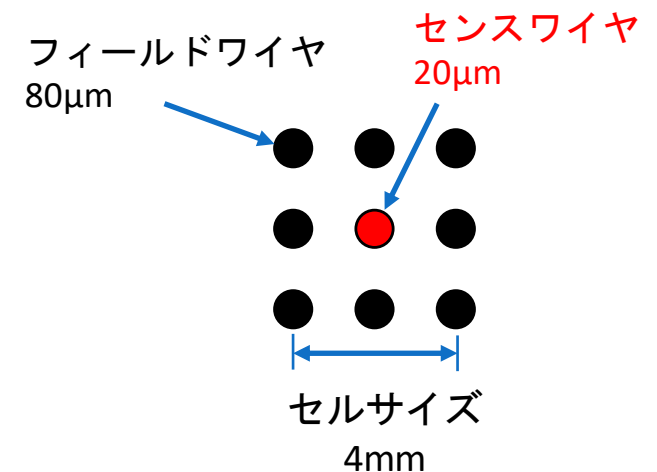
- Diffusionの効果を小さくするために、技術的に実現可能な最小サイズに設定

センスワイヤ径：20 $\mu$ m

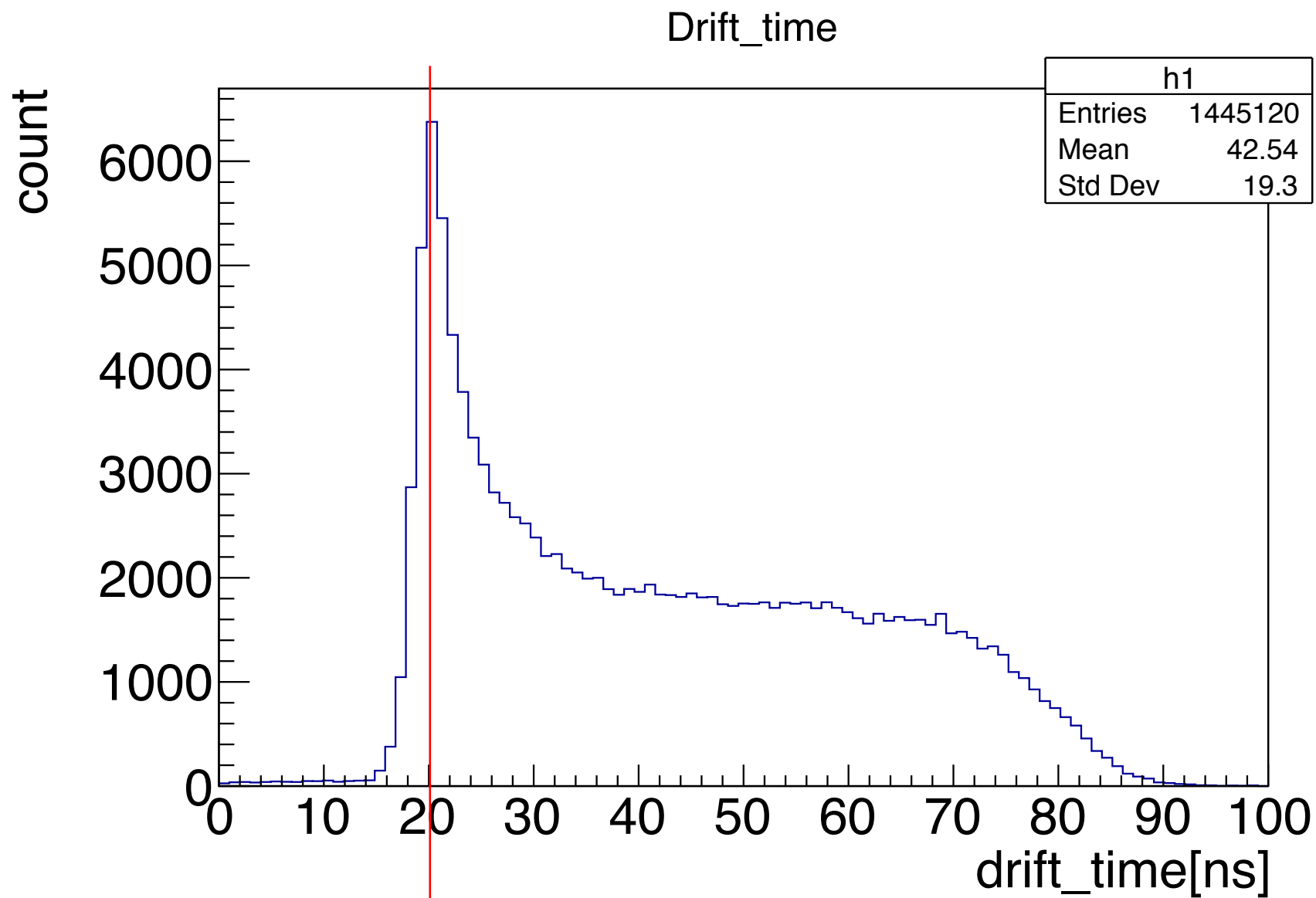
- 小さい電圧で高いゲインを出し、かつ多重散乱の影響を減らすため、細めに設定

フィールドワイヤ径：80 $\mu$ m

- 多重散乱の影響を減らすため、表面電場が20kVを越えない範囲で細めに設定

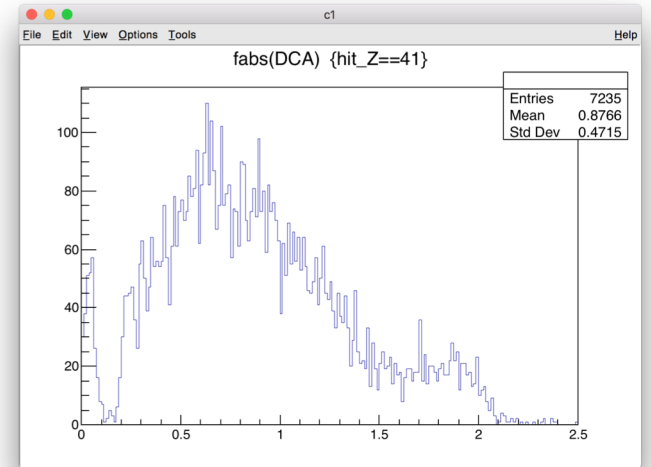
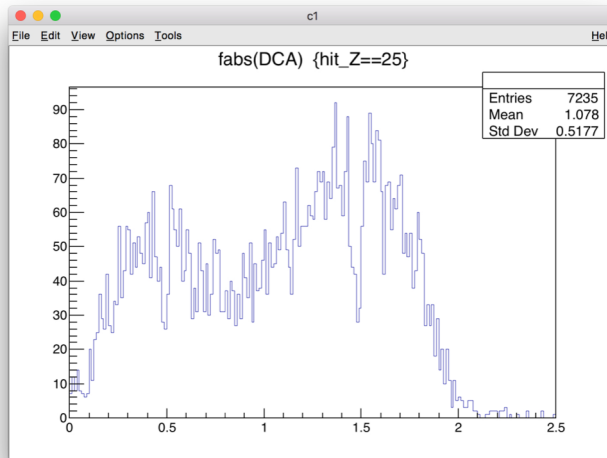
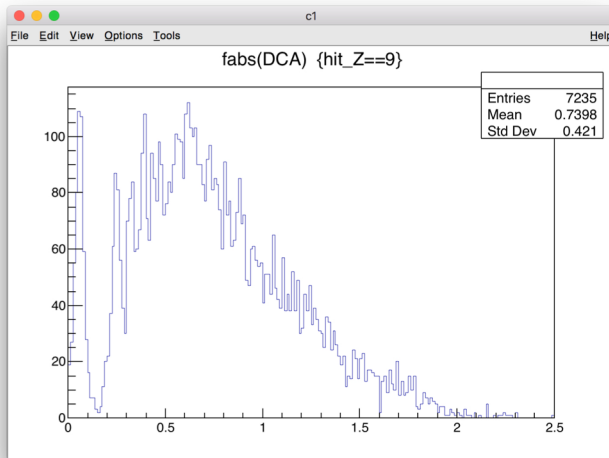


## ドリフト時間のゼロ点の決定



# DCAの分布

Yレイヤー



Xレイヤー

