

COMET CDCにおける 宇宙線を用いた性能評価試験

ICEPP Symposium 24th

大阪大学大学院 久野研究室 M2

沖中香里

目次

1. イントロダクション
 - COMET
 - COMET CDC
 - 宇宙線を用いた性能評価試験
2. 宇宙線試験
 - セットアップ
 - 位置分解能の求め方
 - 位置分解能のレイヤー依存性
 - ヒット検出効率
 - 位置分解能の入射角度依存性
3. まとめ

COMET Phase-I

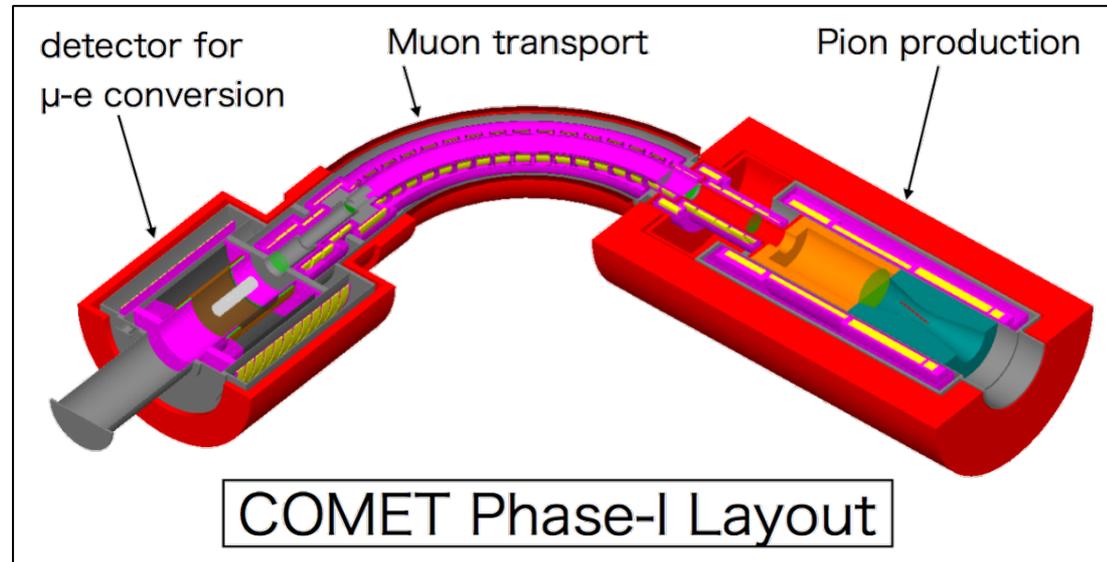
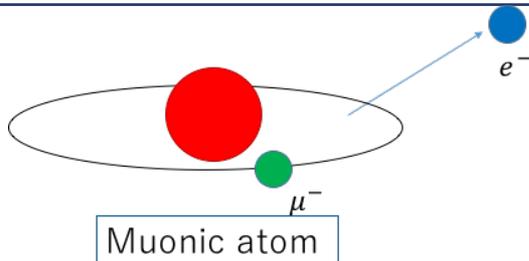
荷電レプトンフレーバー非保存過程の1つであるミュオン電子転換過程の探索を目指す。COMET Phase-Iでは分岐比 3×10^{-15} を到達目標感度としている。

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の場合...

標準モデル
分岐比 $\sim 10^{-54}$

$\mu^- N \rightarrow e^- N$ の場合...

新物理
分岐比 $\sim 10^{-15}$



COMET Phase-Iでは
ミュオン電子転換過程検出に、
円筒型ドリフトチェンバー (CDC)を用いる

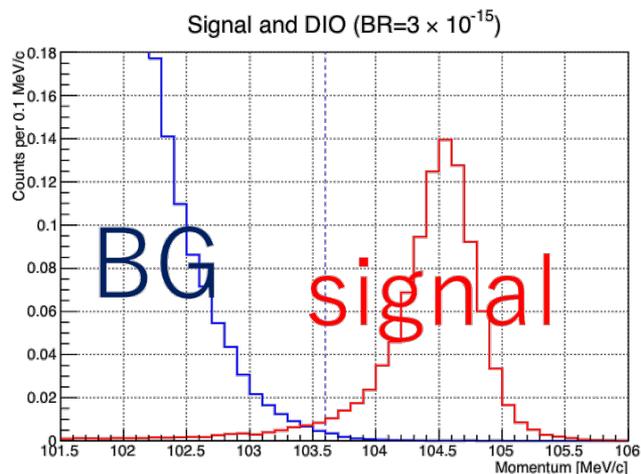
COMET CDC

μe 転換過程: $\mu^- + Al \rightarrow e^- + Al$

放出される電子のエネルギー $\rightarrow 105 \text{ MeV}/c$

$$E_{\mu e} = m_{\mu} - B_{\mu} - E_{recoil}$$

背景事象: $\mu^- + Al \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu} + Al$

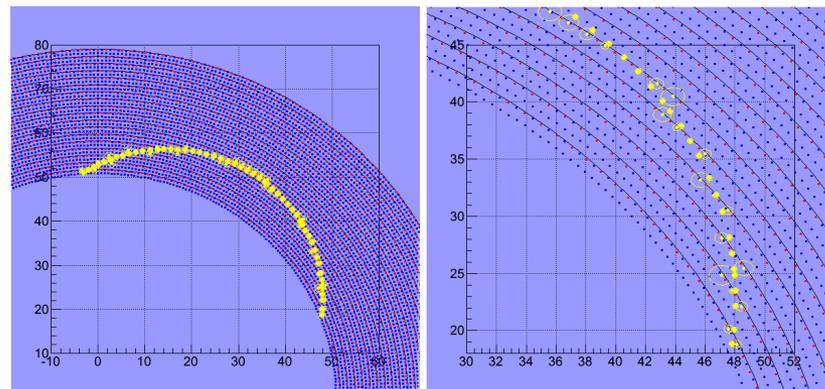


CDCによって再構成された
 μe 転換過程信号と背景事象の運動量分布
(シミュレーションより)

COMET CDCへの要求性能

— 運動量分解能 $\sigma_p < 200 \text{ keV}/c$
($105 \text{ MeV}/c$ 電子に対して)

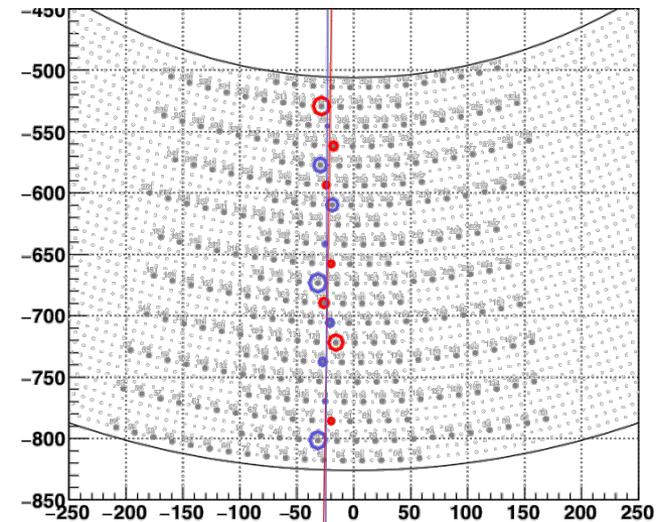
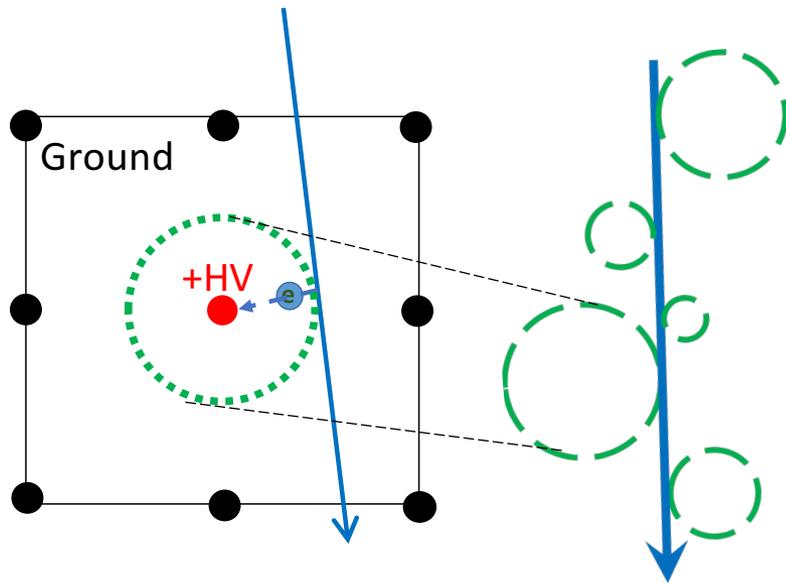
— 位置分解能 $< 250 \mu\text{m}$



COMET CDC

ドリフトチェンバーの原理

荷電粒子がチェンバー内のガスを電離し、電子を生成。
陽極で受けた信号の時間情報からドリフト円を描き、複数のヒットから飛跡を再構成する。



CDCのヒットと飛跡の図

COMET CDC

COMET CDCの特徴

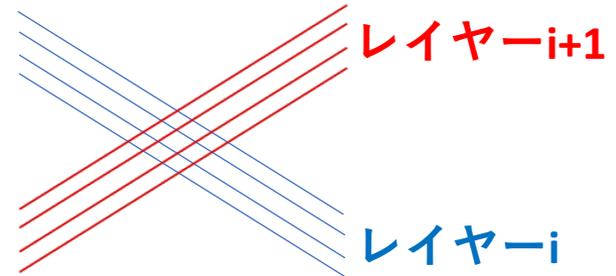
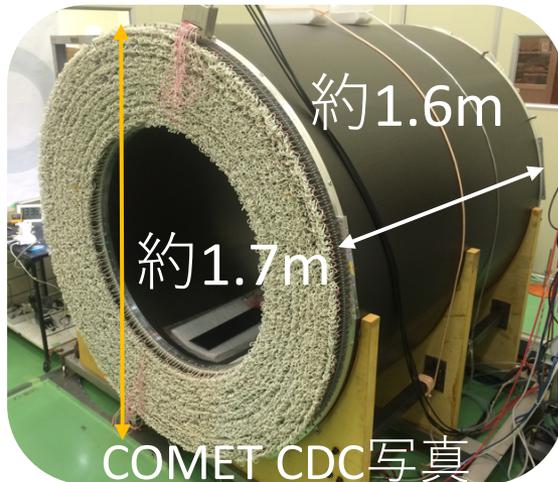
ワイヤー

オールステレオワイヤー
センスワイヤー Au-W
フィールドワイヤー Al

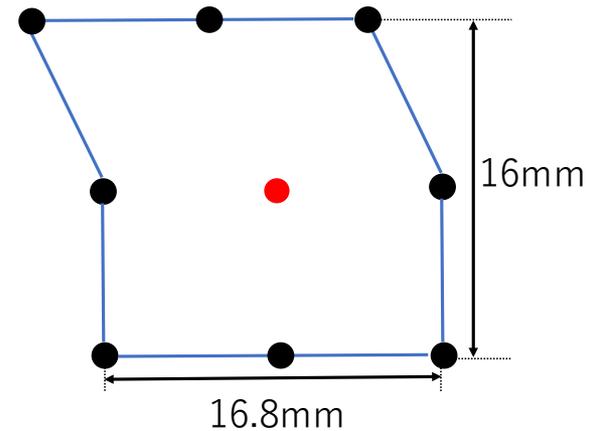
ガス

ヘリウム:イソブタン=90:10
...多重散乱を減らすため

磁場 ...1T



全レイヤーがそれぞれ異なるステレオ角を持つ



セルの形状

COMET CDC

COMET CDCの特徴

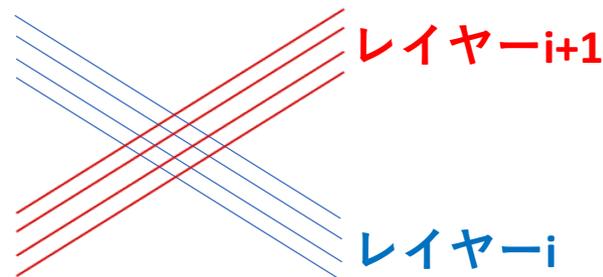
ワイヤー

- オールステレオワイヤー
- センスワイヤー Au-W
- フィールドワイヤー Al

ガス

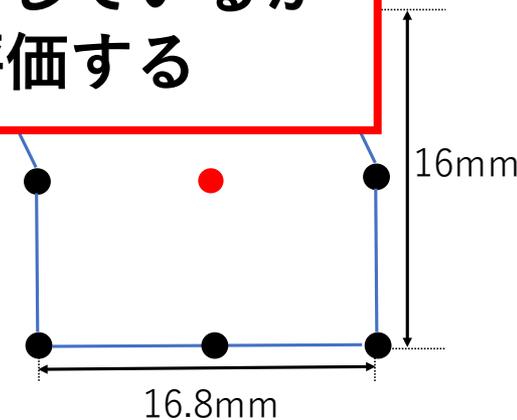
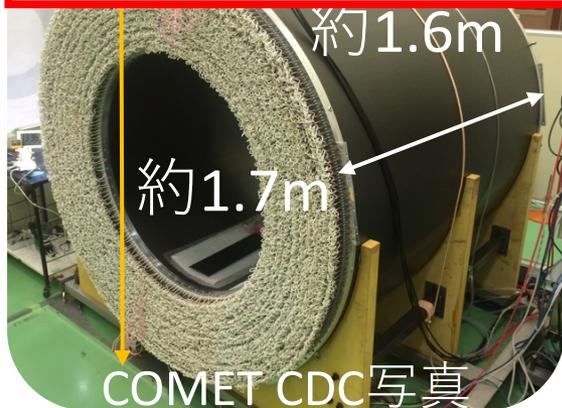
- ヘリウム
- ...多重散乱

磁場 ...1T



全レイヤーがそれぞれ異なるステレオ角を持つ

COMET CDCが要求性能を満たしているか
宇宙線を用いた試験で評価する



セルの形状

宇宙線を用いた性能評価試験

これまでの試験

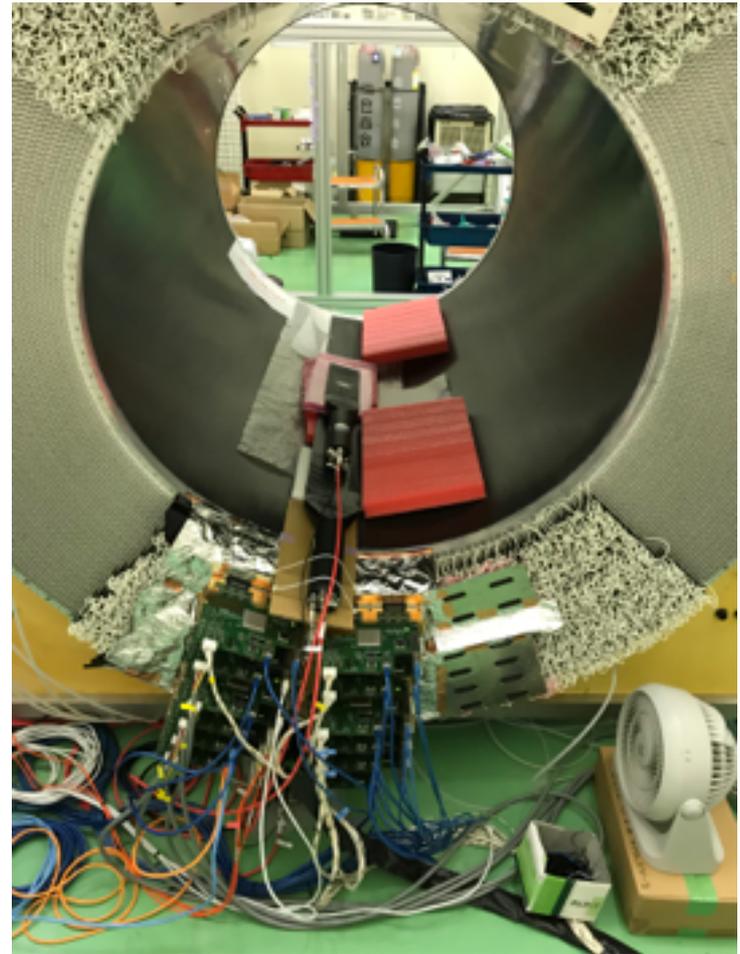
- 2016年夏～@KEKつくばキャンパス
- 2016年秋 1回目のデータ収集
- 2017年秋 2回目のデータ収集

2017年夏 読み出し領域を拡大
→より大きなイベント数を確保
CDCのZ軸依存性の評価が可能に。

1回目
約20万イベント

2回目(今回)
約500万イベント

イベントが増えたことで、
より詳細な評価が可能に！



宇宙線を用いた性能評価試験

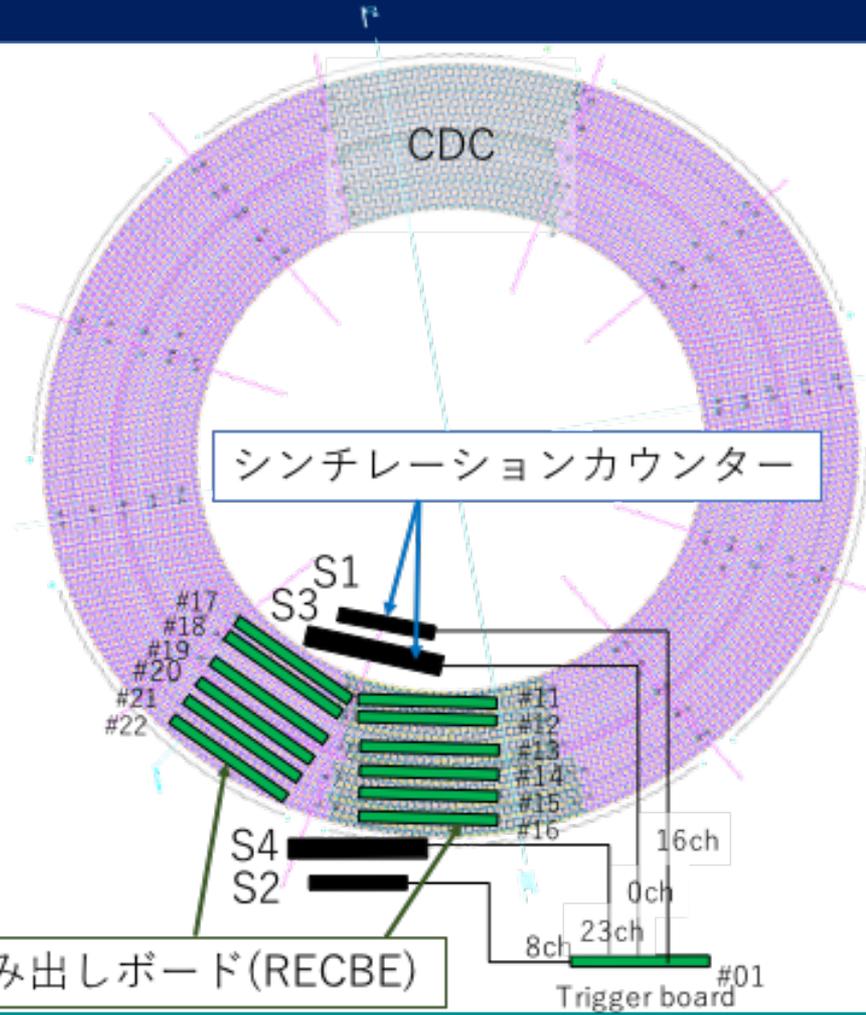
本研究では、、、

1. 位置分解能の値から、CDC実機がCOMET Phase-Iに必要な性能を満たしているか確認した。

読み出し領域の拡大により、これまでよりイベント数増

2. セルの特徴などを考慮し、より詳細に位置分解能を求め、さらに位置分解能が向上する余地がないか初めて調査した。

本試験のセットアップ



全チャンネルのうち約10%の読み出し領域

トリガー
S3とS4のコインシデンス

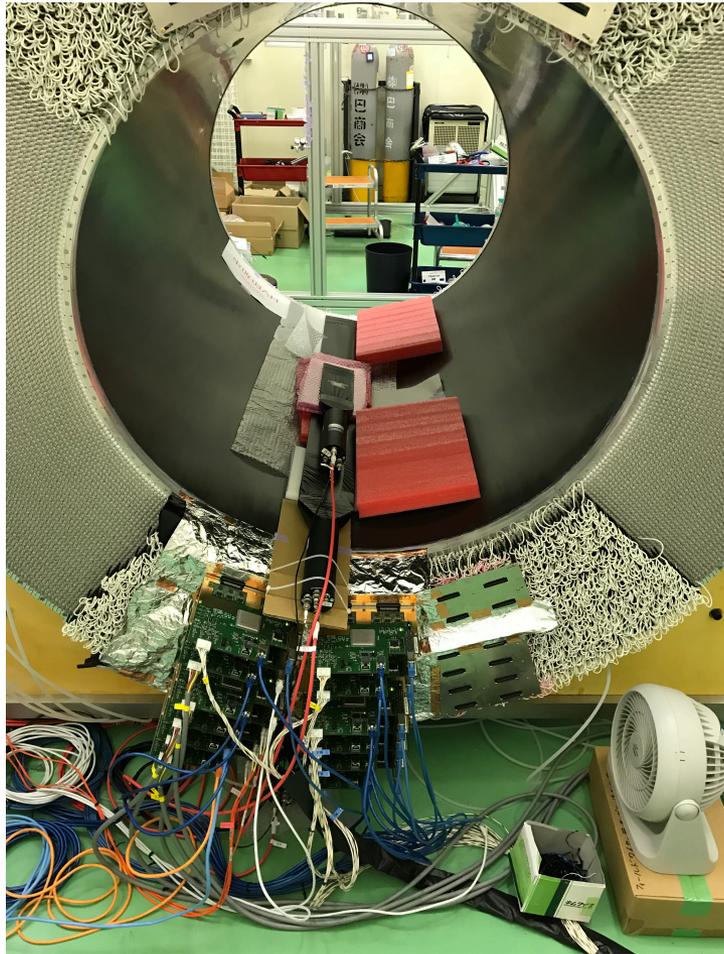
混合ガス
ヘリウム:90CCM + イソブタン:10CCM

磁場
なし

印加電圧
全レイヤー 1750~1850V

印加電圧[V]	計測時間[hour]	イベント数
1850	43	5.7×10^5
1825	71	1.0×10^6
1800	164	2.3×10^6
1775	40	3.9×10^5
1750	27	5.9×10^5

本試験のセットアップ



宇宙線試験の様子

トリガー

S3とS4のコインシデンス

混合ガス

ヘリウム:90CCM + イソブタン:10CCM

磁場

なし

印加電圧

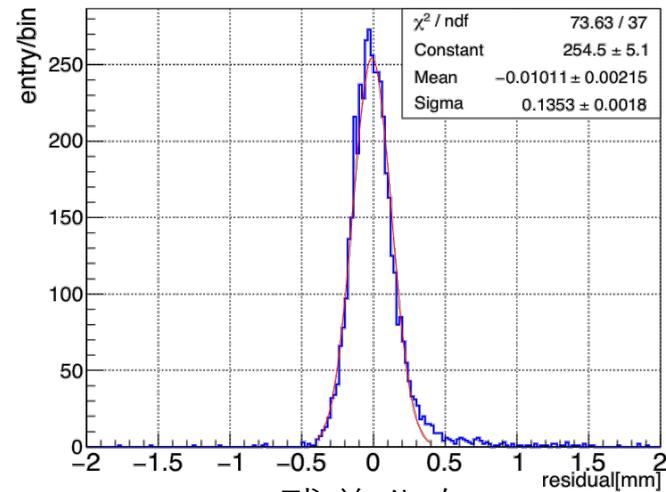
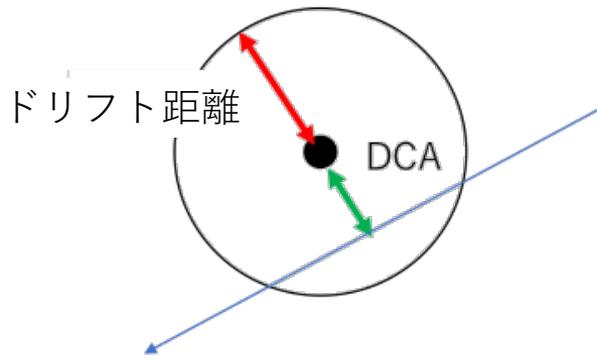
全レイヤー 1750~1850V

印加電圧[V]	計測時間[hour]	イベント数
1850	43	5.7×10^5
1825	71	1.0×10^6
主に 1825V のデータを用いた		
1775	40	3.9×10^5
1750	27	5.9×10^5

位置分解能の求め方

- 位置分解能 σ_{intr} は、残差分布から求める。

残差=ドリフト距離-センスワイヤーと飛跡の最短距離



残差分布

*DCA = Distance of Closest Approach
→センスワイヤーと飛跡の最短距離

位置分解能 σ_{intr} は、残差分布をガウスフィッティングしたときの標準偏差 σ_{res} に対応する。

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma_{\text{intr}}^2 + \sigma_{\text{track}}^2}$$

σ_{intr} ... 検出器固有の位置分解能
 σ_{track} ... 飛跡再構成による誤差

位置分解能のレイヤー依存性

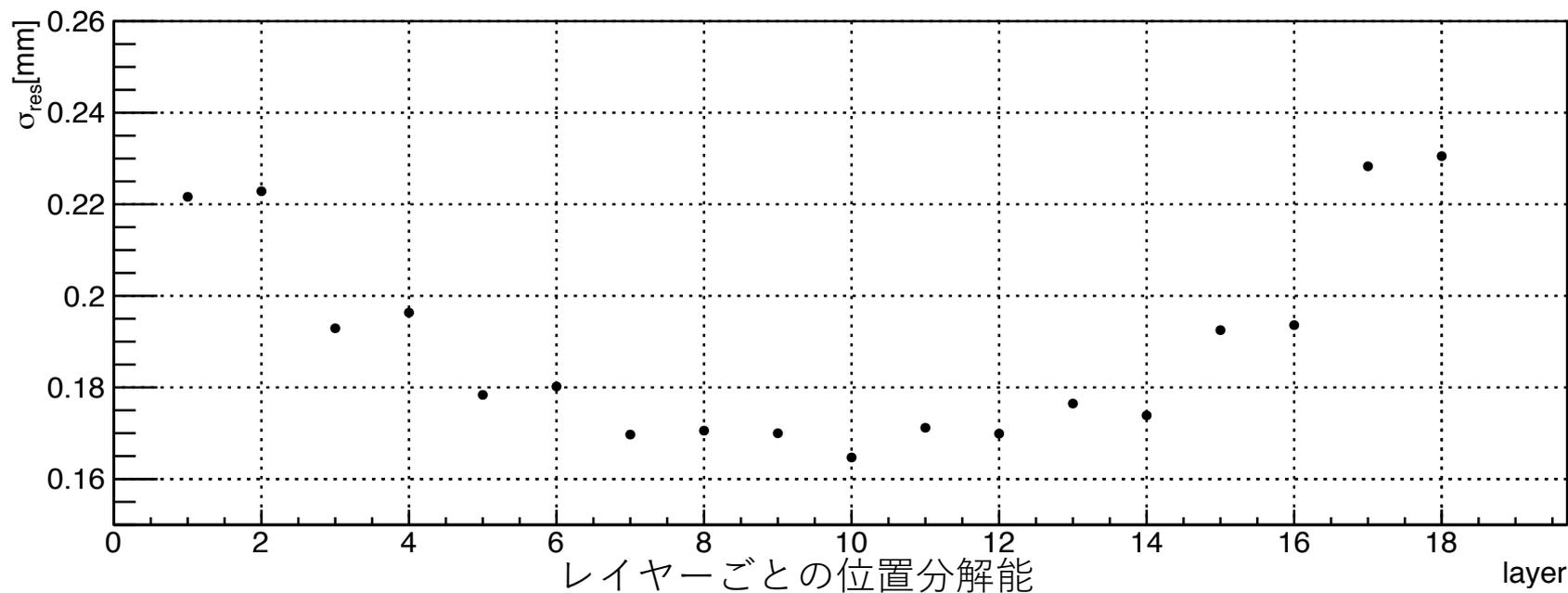
端のレイヤーほど大きな位置分解能を持つ。

→飛跡再構成誤差が端のレイヤー側ほど大きくなるため。

中央のレイヤーでの平均位置分解能が約 $170\mu\text{m}$ であることより、

固有位置分解能は**約 $170\mu\text{m}$ 以下**

COMET Phase-Iに必要な性能を保持していると確認できた。



ヒット検出効率

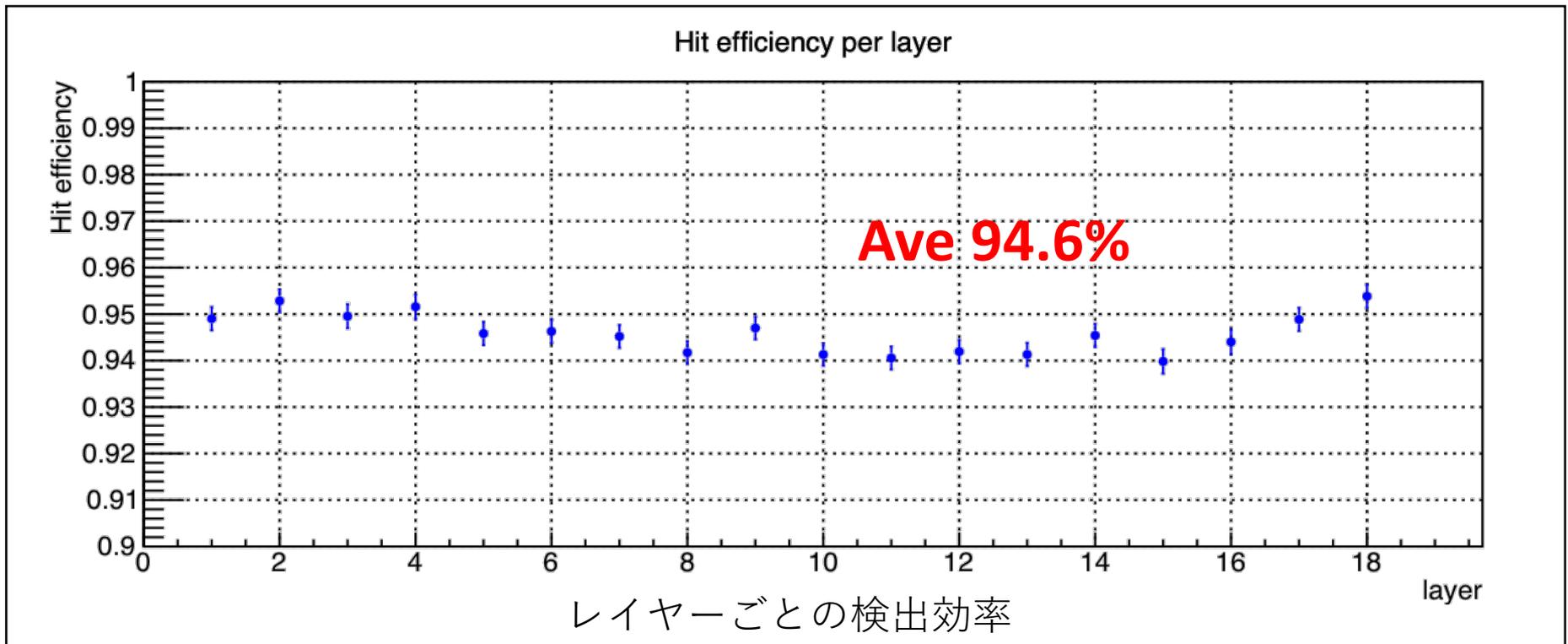
イベント条件

飛跡再構成のp値>0.05

ヒットが1つのみのレイヤー数 ≥ 15

ヒットが複数あるレイヤー数 ≤ 1

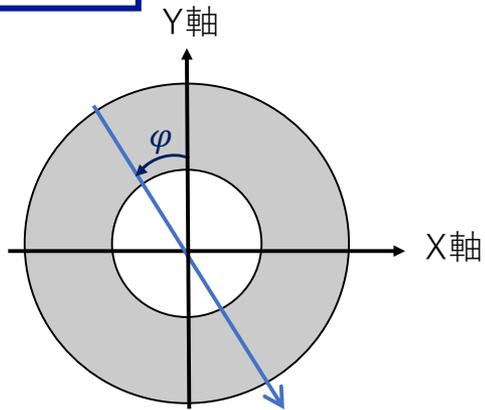
$$\text{ヒット検出効率} = \frac{\text{ヒット(残差} < 3\sigma\text{)を持つイベント数}}{\text{選択されたイベント数}}$$



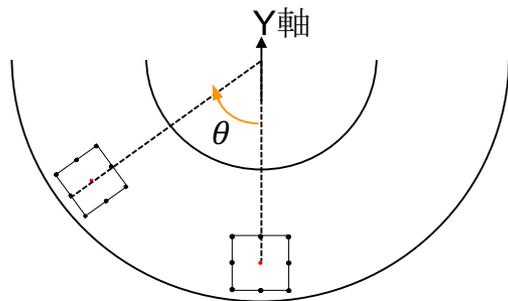
位置分解能の入射角度依存性

入射角度の定義

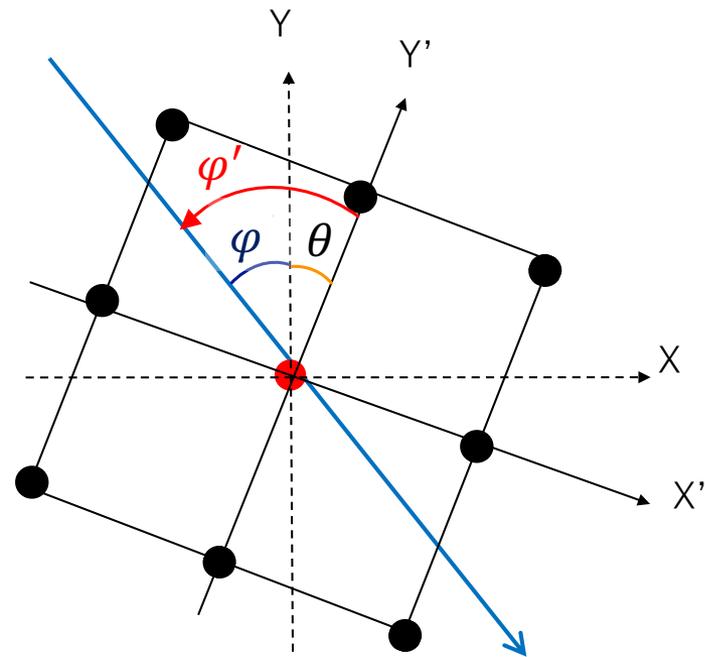
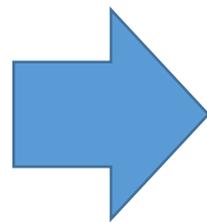
各セルのY'軸と飛跡がなす角から入射角度 φ' を定義した。



飛跡とCDCのY軸がなす角 φ



CDC Y軸とセルのY'軸のなす角 θ

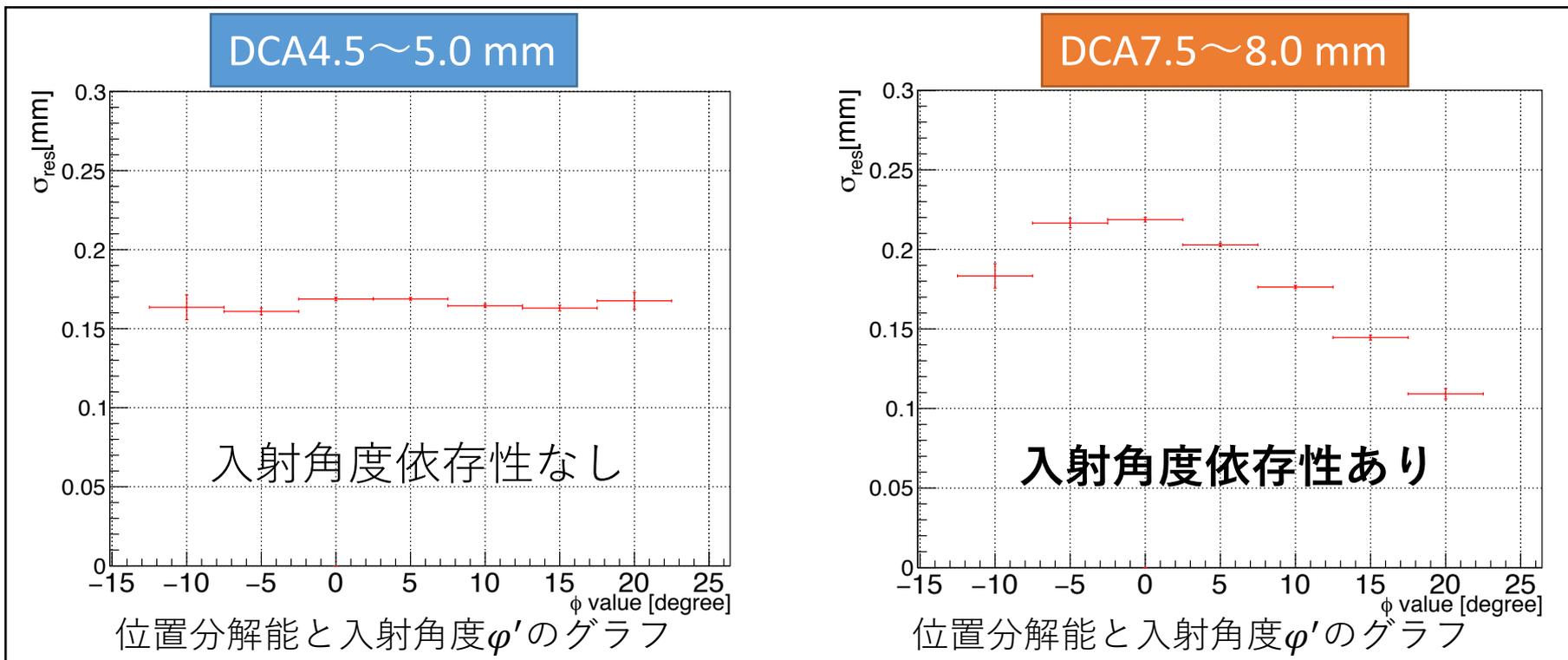


$$\varphi' = \varphi + \theta$$

位置分解能の入射角度依存性

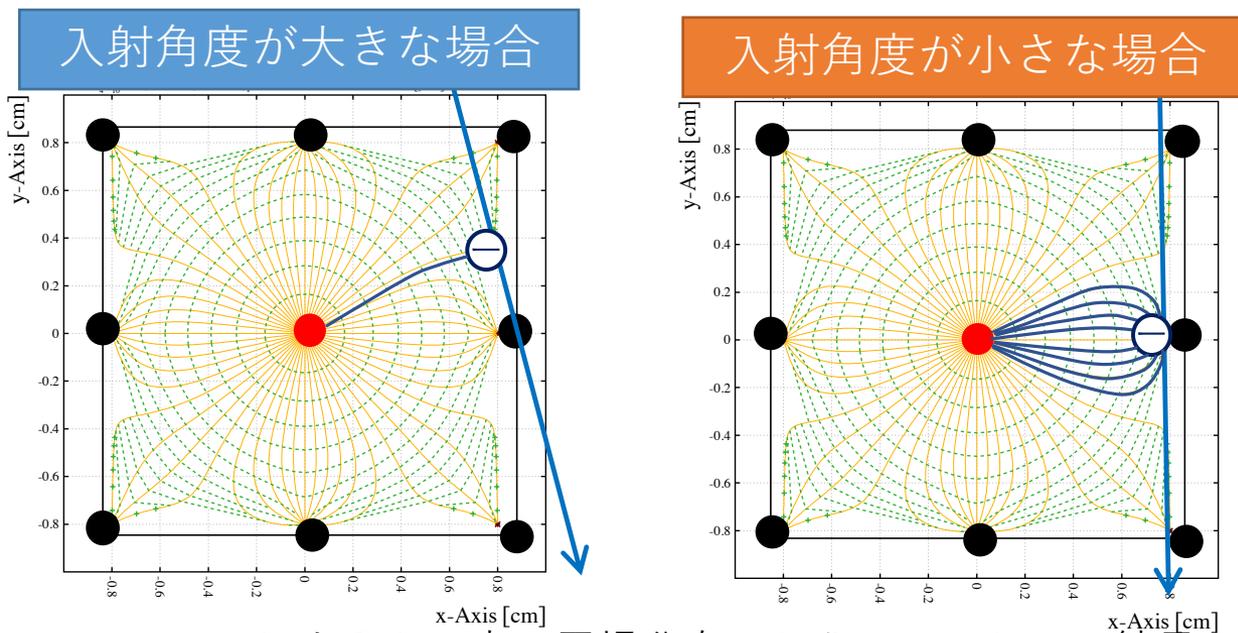
DCA0.5mmごとに位置分解能と入射角度 ϕ' のグラフを作成。
DCA7.0mm以降で、入射角度依存性を確認することができた。

DCA7.0mm以降では、入射角度が小さいと位置分解能が大きくなる。



位置分解能の入射角度依存性

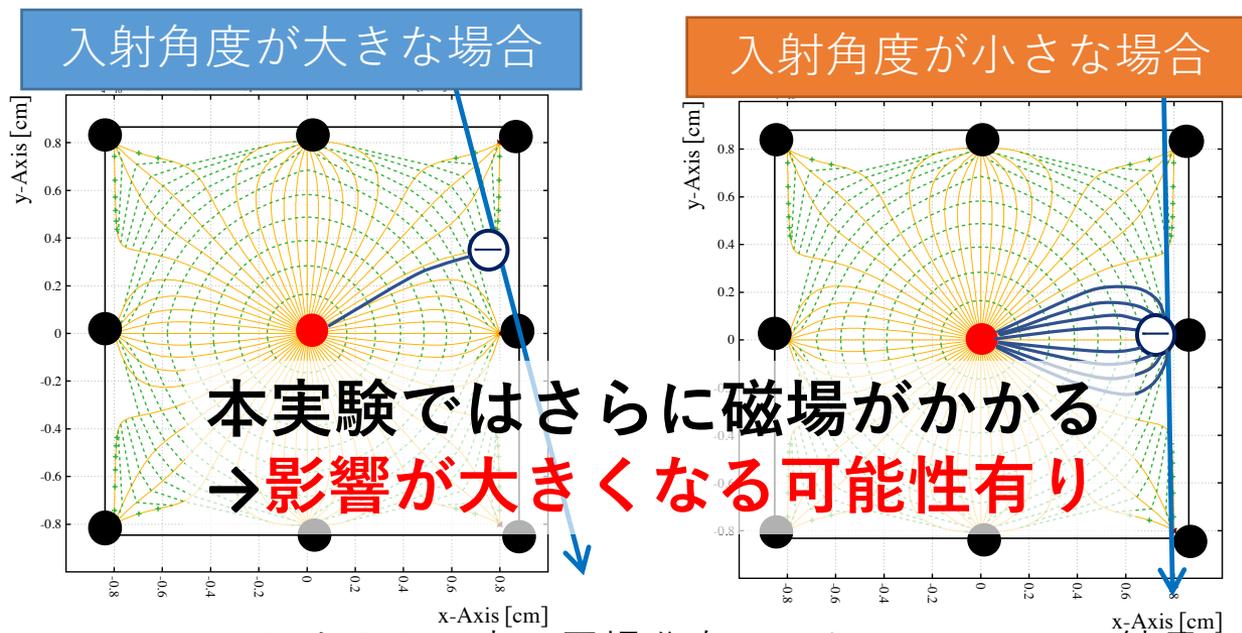
フィールドワイヤー周辺は電場の歪みあり。
同じDCA値をもつ飛跡でもドリフト距離の値が幅を持って
てしまう。
→位置分解能が悪化



Garfieldによるセル内の電場分布のシミュレーション結果
: ヘリウム90%イソブタン10%、印加電圧1800Vでの結果

位置分解能の入射角度依存性

フィールドワイヤー周辺は電場の歪みあり。
同じDCA値もつ飛跡でもドリフト距離の値が幅を持って
しまう。
→位置分解能が悪化

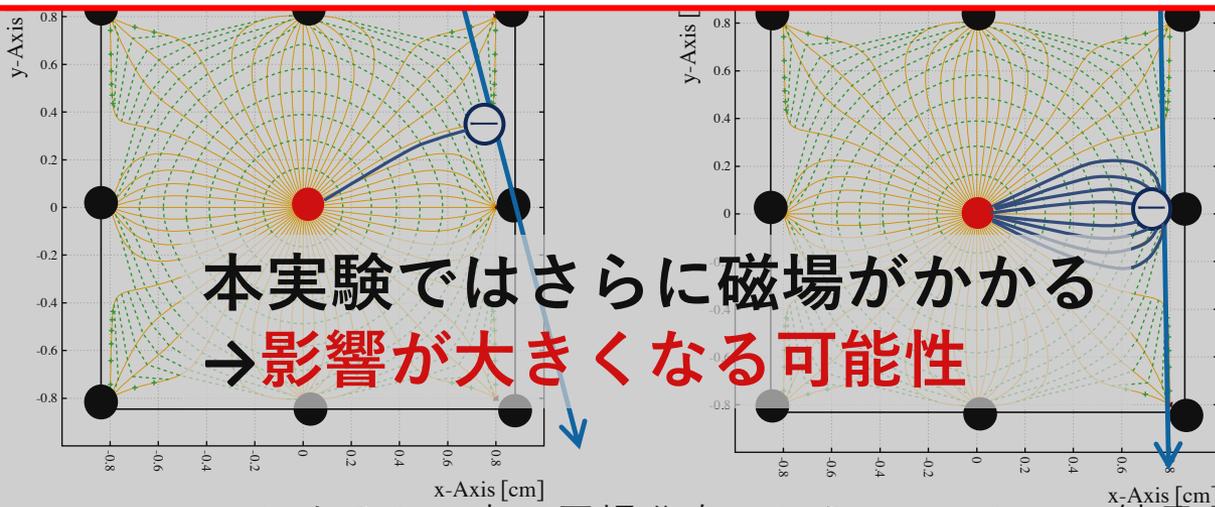


Garfieldによるセル内の電場分布のシミュレーション結果
:ヘリウム90%イソブタン10%、印加電圧1800Vでの結果

位置分解能の入射角度依存性

入射角度が 0° 付近かつDCAが7.0mm以降を通過する飛跡
→フィールドワイヤー近傍を通る
フィールドワイヤー周辺は電場の歪みあり。
同じDCA値もつ飛跡でもドリフト距離の値が幅を持ってしまう。
→位置分解能が悪化

今後より詳細な調査をする必要がある。



Garfieldによるセル内の電場分布のシミュレーション結果
:ヘリウム90%イソブタン10%、印加電圧1800Vでの結果

まとめ

- COMET CDCの性能評価試験を進めている。
- 昨年秋、読み出し領域を拡大後初めてデータを収集した。
- CDC実機においては、位置分解能などについて初めて詳細に評価した。

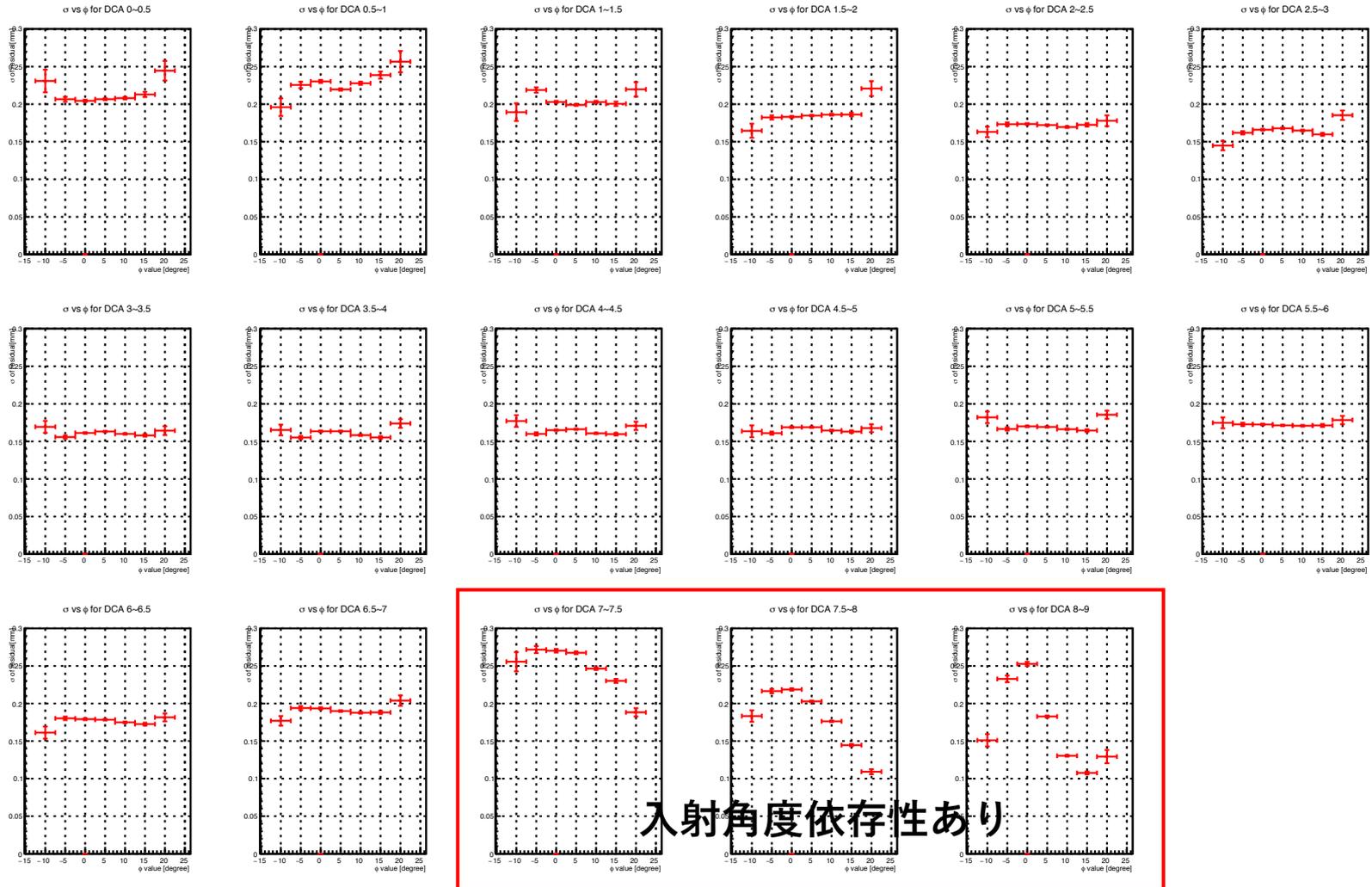
- 固有位置分解能が約 $170\mu\text{m}$ 以下であることがわかった。
位置分解能についてはCDCはCOMET Phase-Iに必要な要件を満たしていることがわかった。
- 全レイヤーの平均ヒット検出効率は94.6%であった。
- 位置分解能の飛跡入射角度依存性があることを確認した。
- フィールドワイヤー近辺での電場の歪みから、位置分解能が悪化してしまう可能性があることがわかった。

今後の課題

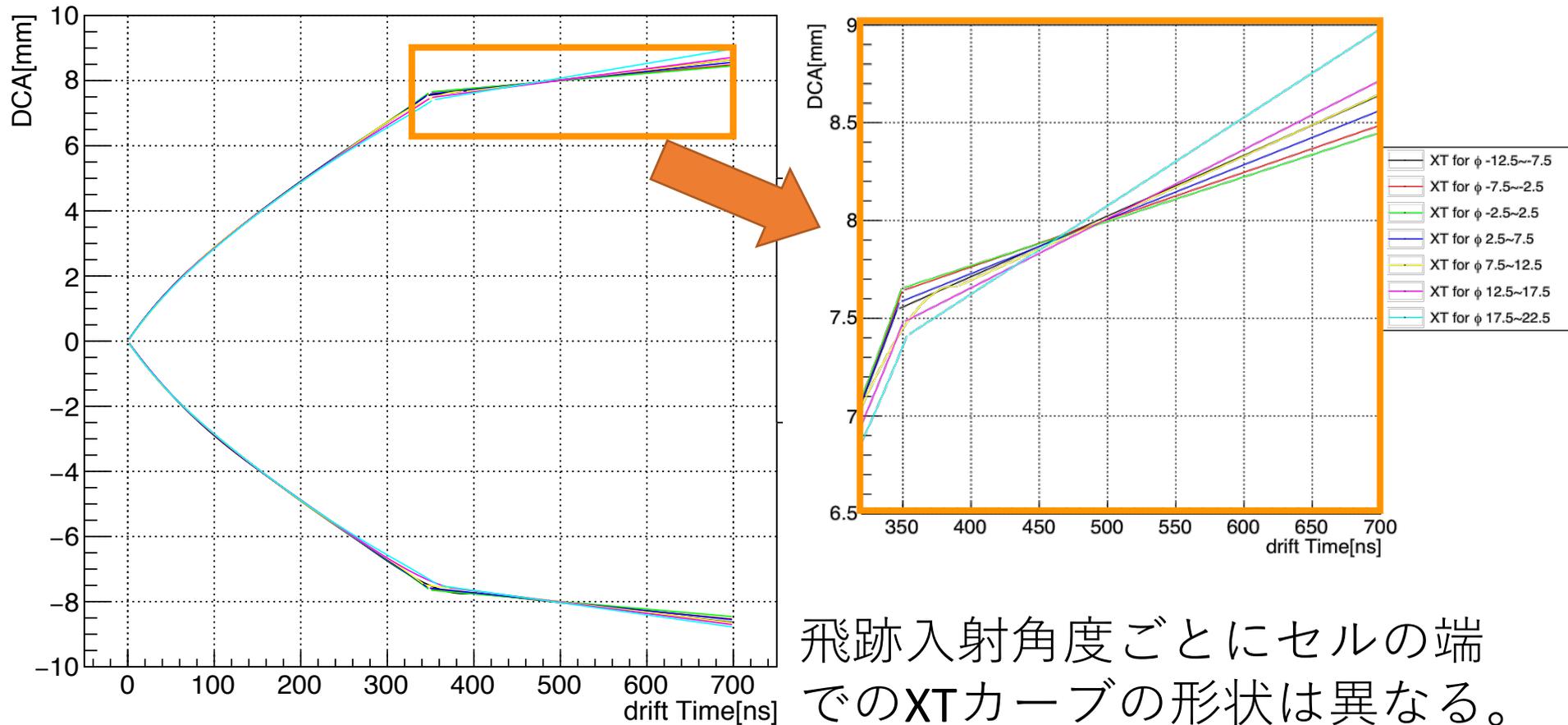
- 入射角度依存性より、XTカーブをセルの形状、ドリフト距離ごとに細かく作成すれば位置分解能が改善する可能性がある。そのためにも、より多くのイベント数を収集する必要がある。
- 実際には電子は円を描くような飛跡を作る。本試験では、鉛直方向からの入射について調査したが、円周方向に走る飛跡や同じレイヤーの複数のセルを通る飛跡についても調査する必要がある。
- 本試験では、CDCのZ軸方向の読み出し領域を拡大したにも関わらず、 β 依存性がみられなかった。より入射角度の大きな飛跡のデータを収集する必要がある。

Back up

位置分解能の入射角度依存性



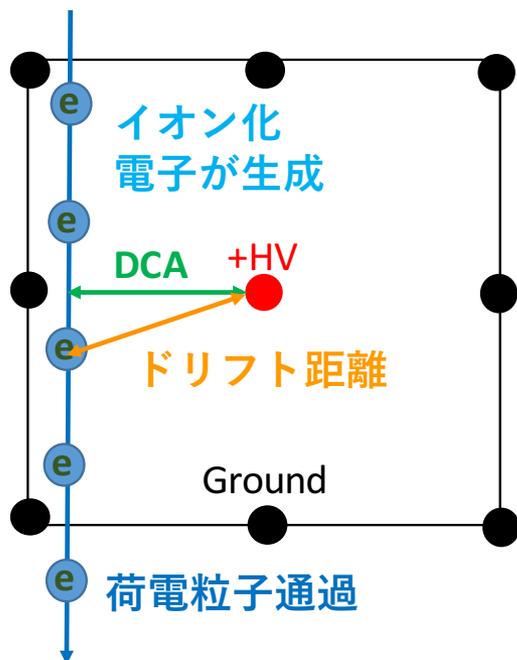
XTカーブの入射角度依存性



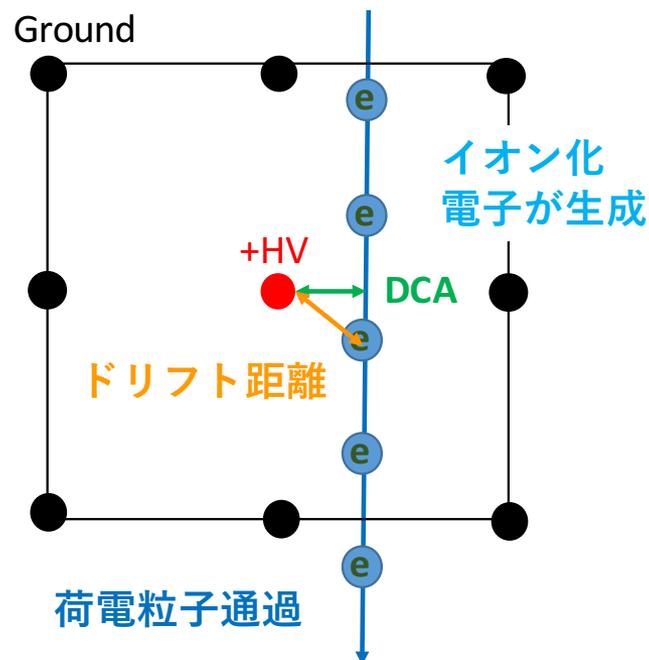
初期電子数による影響

粒子がセル中心を通過した時、初期電子数が少ないと、ドリフト距離がDCAより大きくなる可能性が高い。

セル端を通る場合



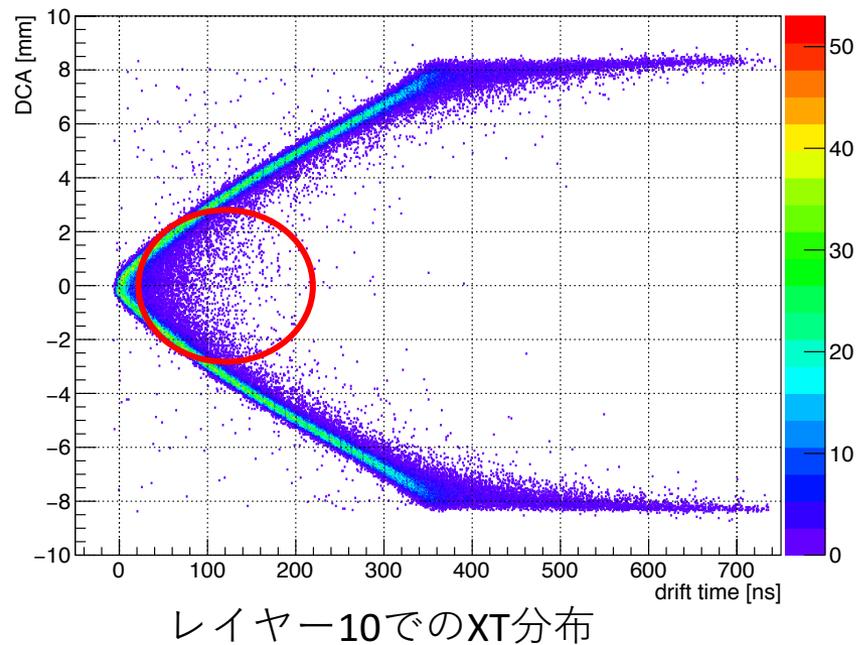
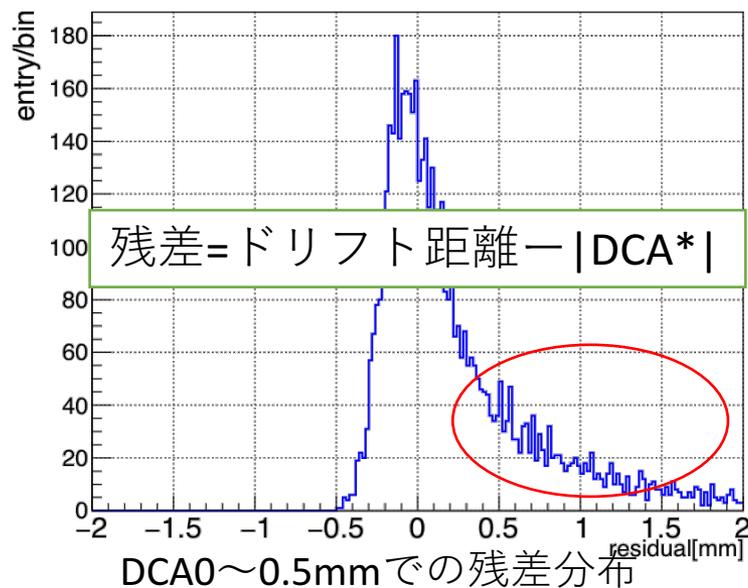
セル中心近くを通る場合



初期電子数による影響

粒子がセル中心を通過した時、初期電子数が少ないと、ドリフト距離がDCAより大きくなる可能性が高い。

センスワイヤー近傍での残差分布の形状や、XT分布を見ると、実際にセンスワイヤー近傍ではドリフト距離がDCAより大きくなっている傾向が見える。



検出効率の定義による違い

ヒット条件を $3\sigma \rightarrow 5\sigma$ にした場合の検出効率を求めた。

イベント条件

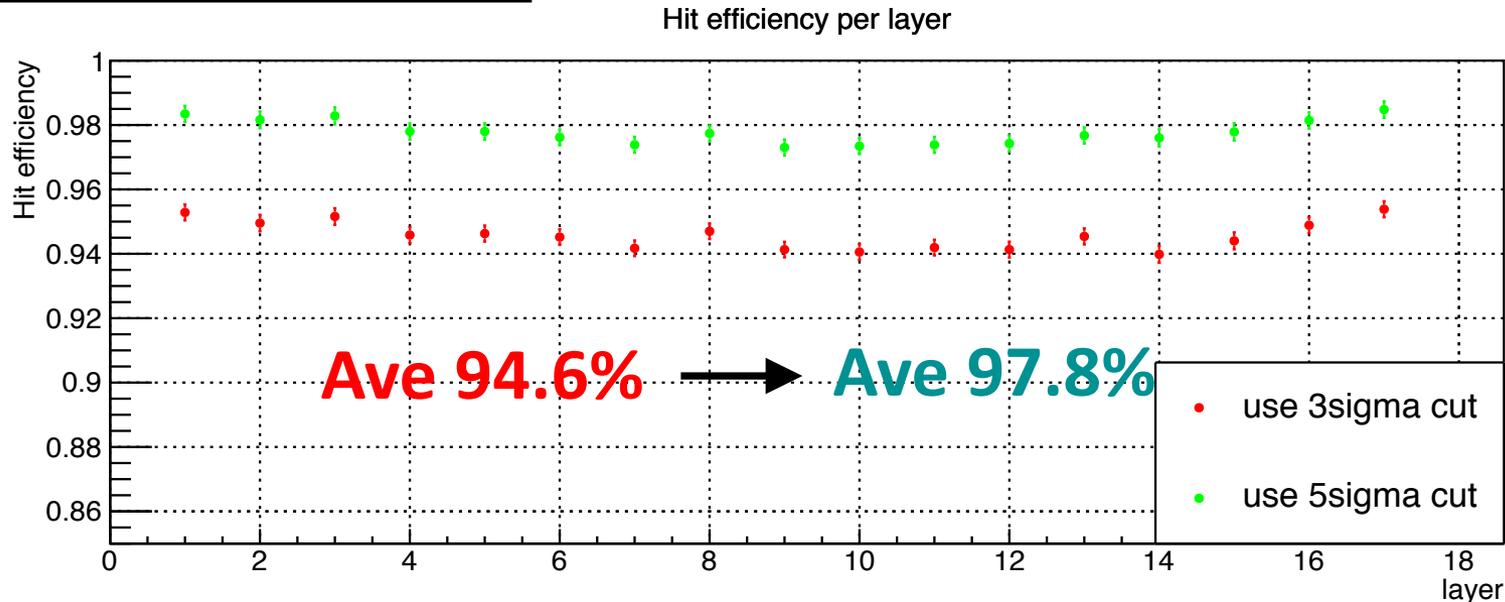
飛跡再構成のp値

ヒットが1つのみのレイヤー数 ≥ 15

ヒットが複数あるレイヤー数 ≤ 1

$$\text{ヒット検出効率} = \frac{\text{ヒット(残差} < 5\sigma) \text{を持つイベント数}}{\text{選択されたイベント数}}$$

レイヤーごとの検出効率



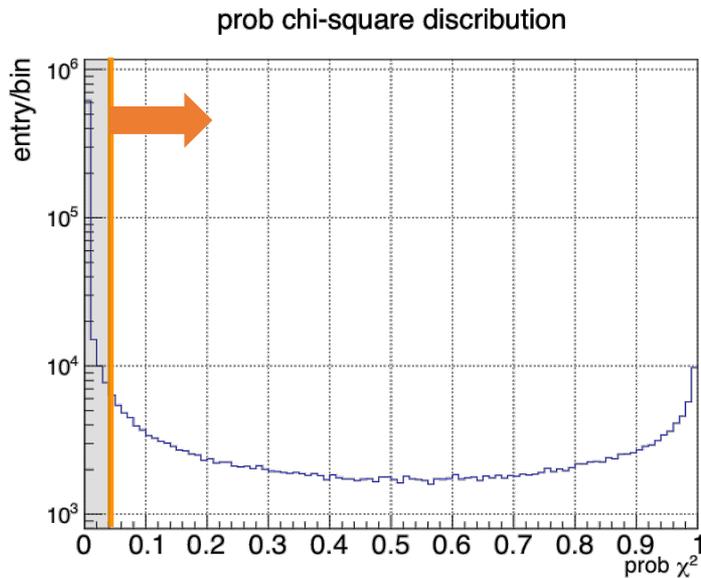
飛跡の選定条件

イベント選定条件

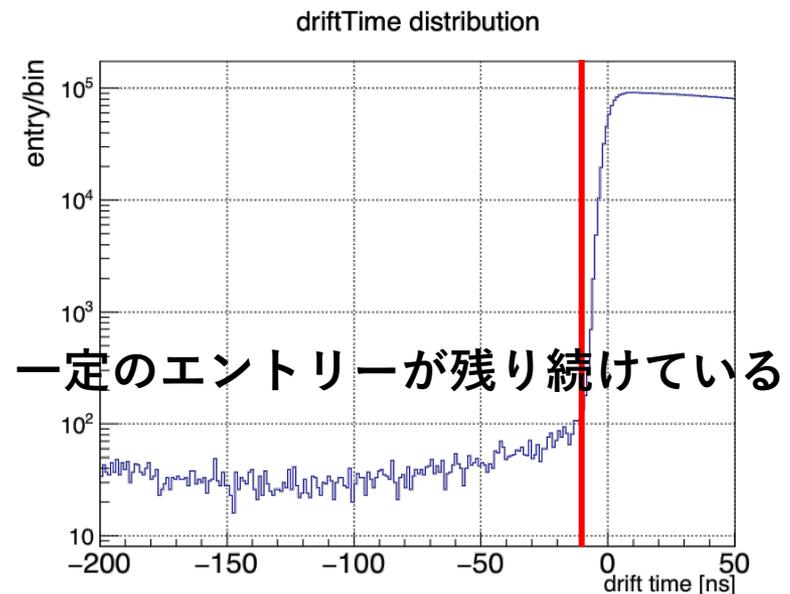
- 飛跡再構成のp値
- ヒットが1つのみのレイヤー数 ≥ 15
- ヒットが複数あるレイヤー数 ≤ 1

ヒット選定条件

- ドリフト時間 $> -10\text{ns}$
- レイヤー上で残差が最小値のヒット



飛跡再構成の有意確率分布

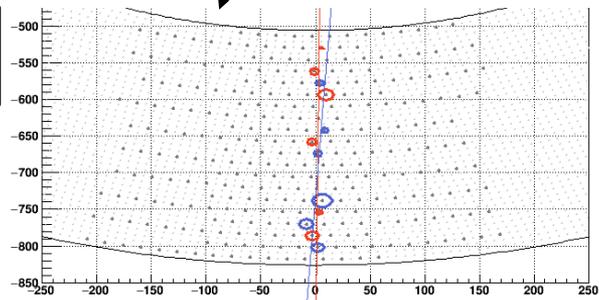
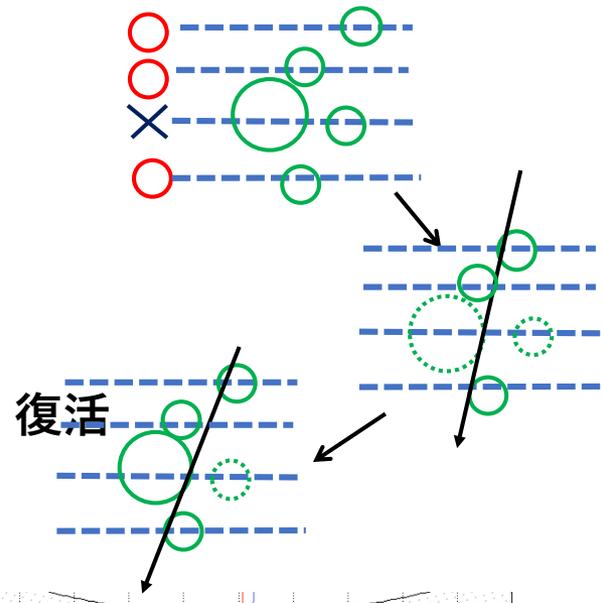
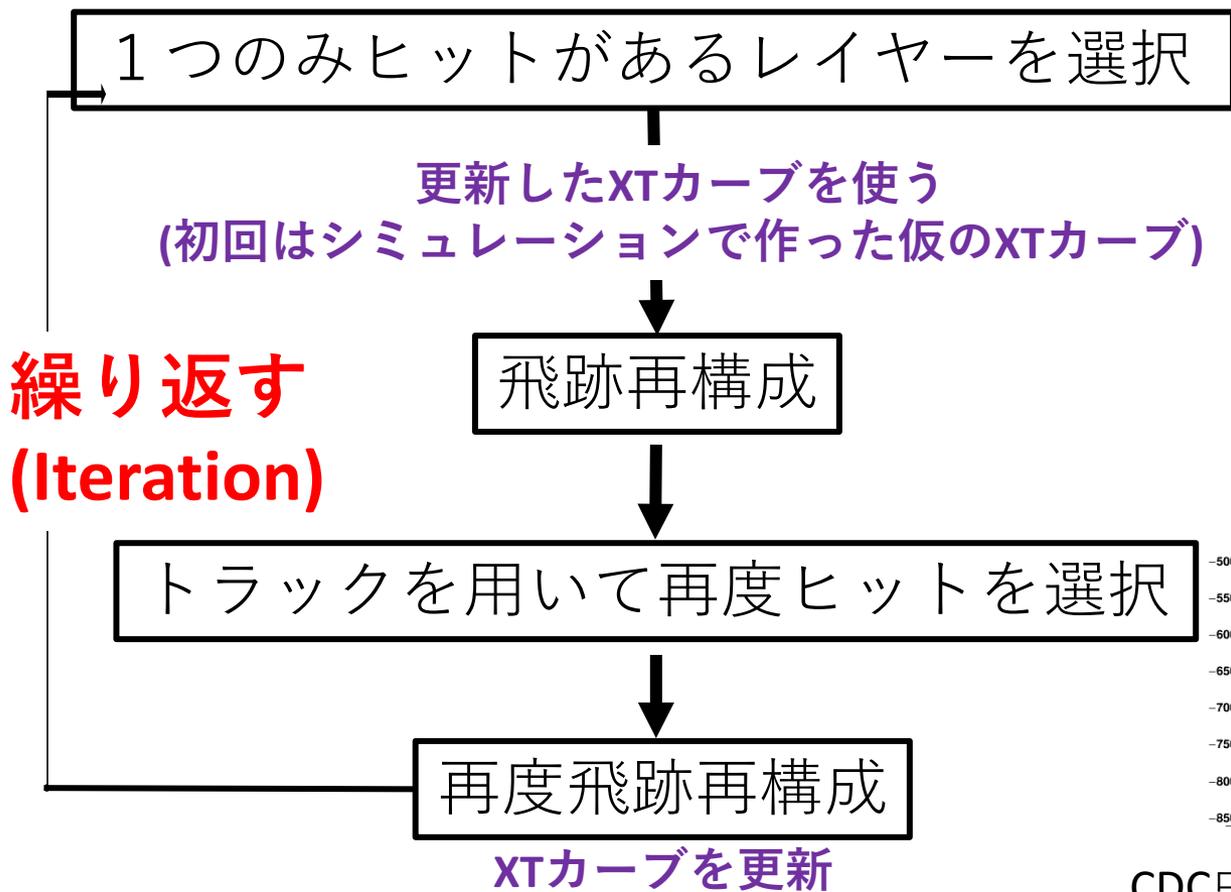


一定のエントリーが残り続けている

ドリフト時間0ns近辺での分布

飛跡再構成

ノイズなどを除くためにHit selectionを行う



CDC中心の平面での飛跡の様子

XTカーブの求め方

イベント条件

飛跡再構成のp値>0.05

ヒットが1つのみのレイヤー数 ≥ 15

ヒットが複数あるレイヤー数 ≤ 1

XT分布のヒット条件

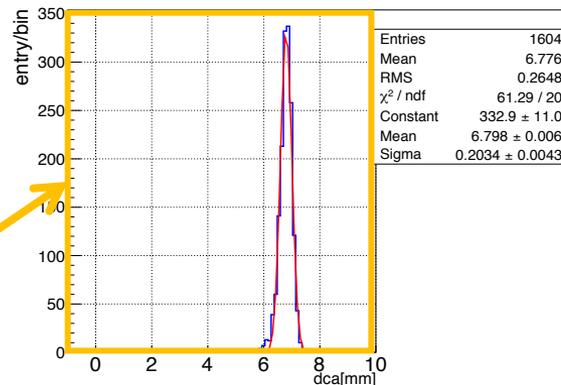
テストレイヤー上でのヒット

レイヤー上で残差が最小のヒット

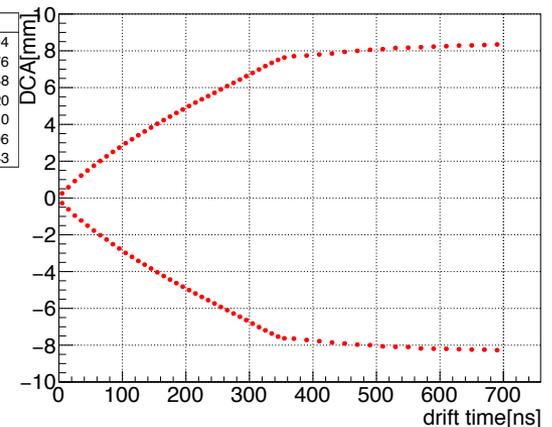
ドリフト時間ごとにDCA分布を作成。

ガウスフィッティングのピーク値を求める。

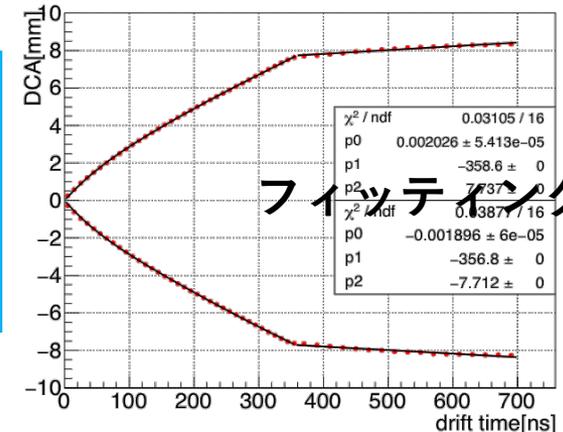
DCA(driftTime300~310ns) for layer10 iteration3



XT for layer10 for run171-173

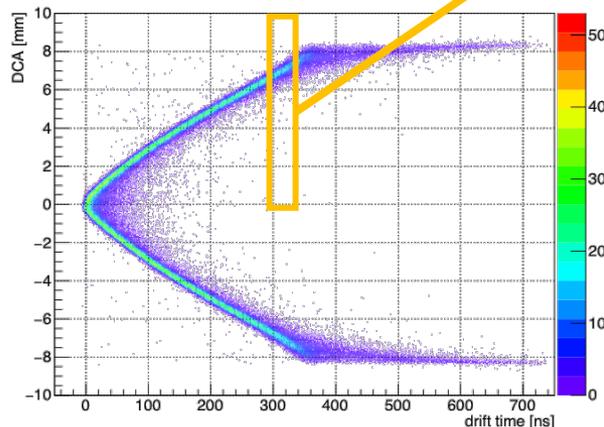


XT for layer10 for run171-173



フィッティング

XT Curve for testlayer 10



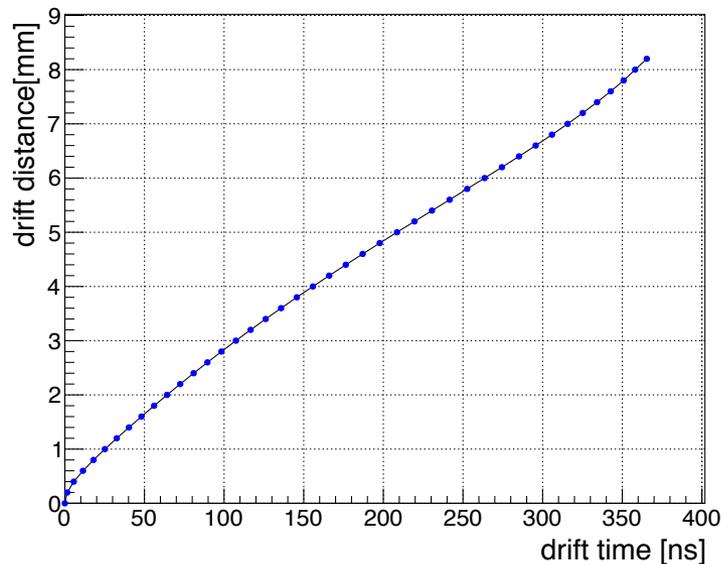
フィッティング関数

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \dots & t < 0\text{ns} \\ \text{5次関数} & \dots & 0\text{ns} \leq t < T_{\text{fit}} \\ \text{1次関数} & \dots & T_{\text{fit}} \leq t < 700\text{ns} \\ \text{N/A} & \dots & 700\text{ns} < t \end{cases}$$

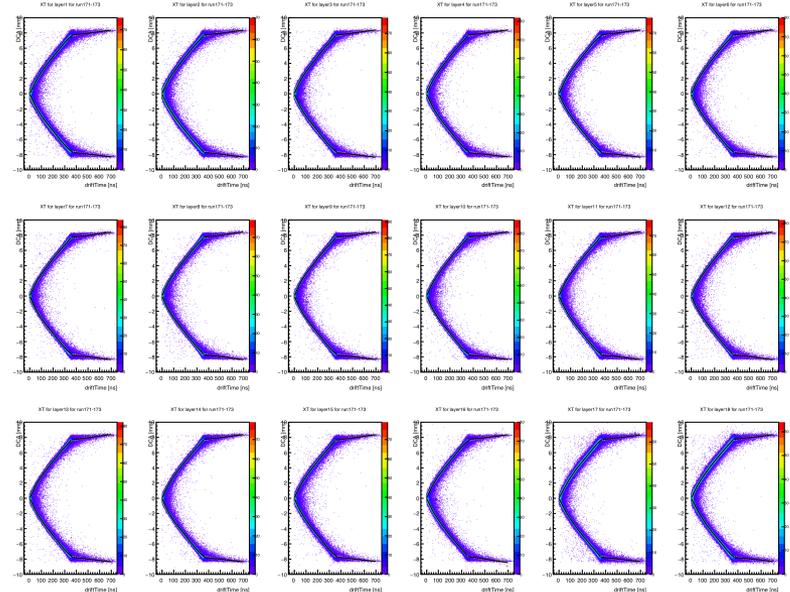
XTカーブの作成

- XTカーブは、飛跡再構成を繰り返し行うことでよりCOMETCDCに対応したXTカーブを求めている。
- 初回はGarfieldのシミュレーション結果を用いた。
- その後はレイヤーごとにXTカーブ作成、更新した。

XT curve by garfield

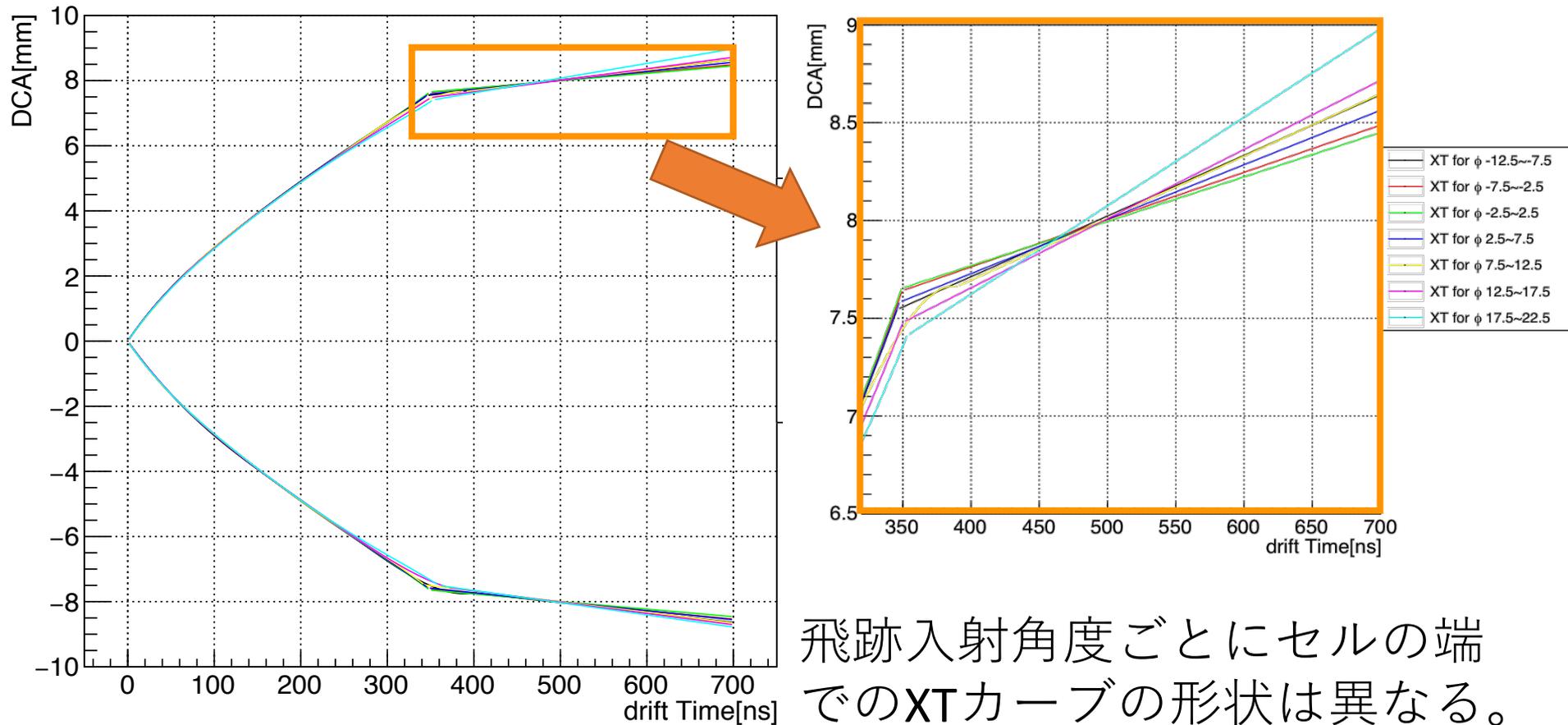


GarfieldによるXTカーブ



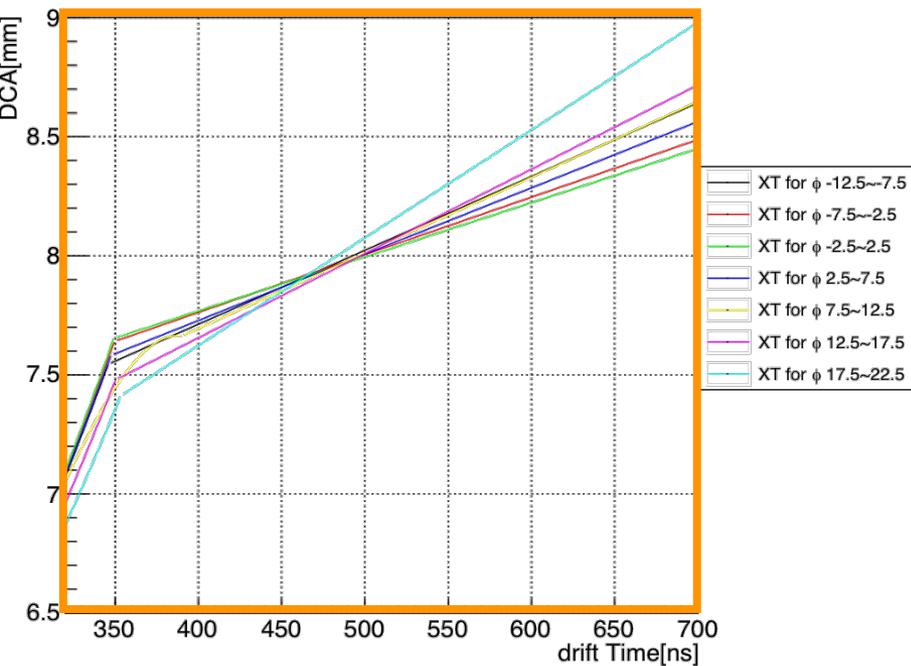
レイヤーごとに作成したXTカーブ

XTカーブの入射角度依存性

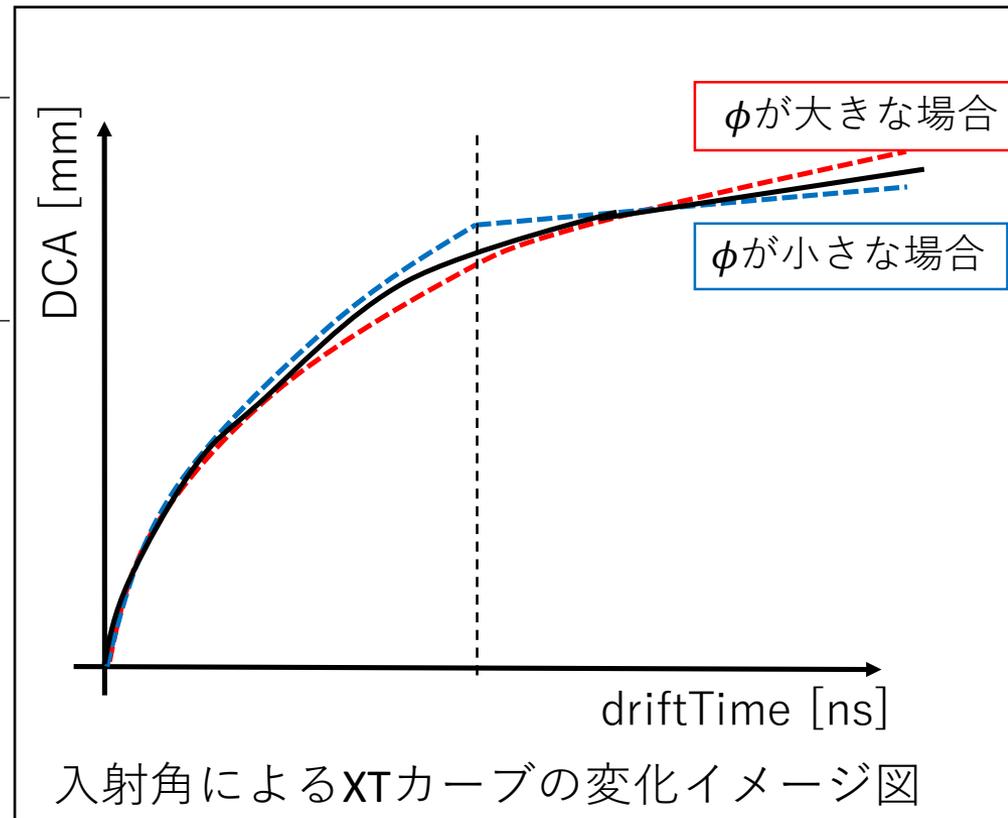


飛跡入射角度ごとにセルの端でのXTカーブの形状は異なる。

XTカーブの入射角度依存性



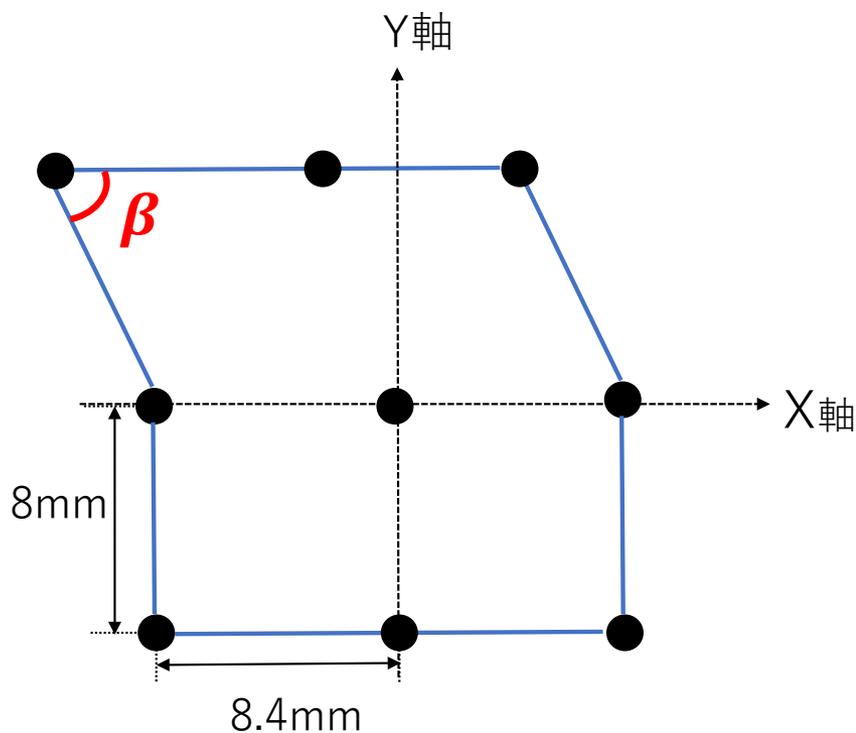
飛跡入射角度ごとにセルの端でのXTカーブの形状は異なる。



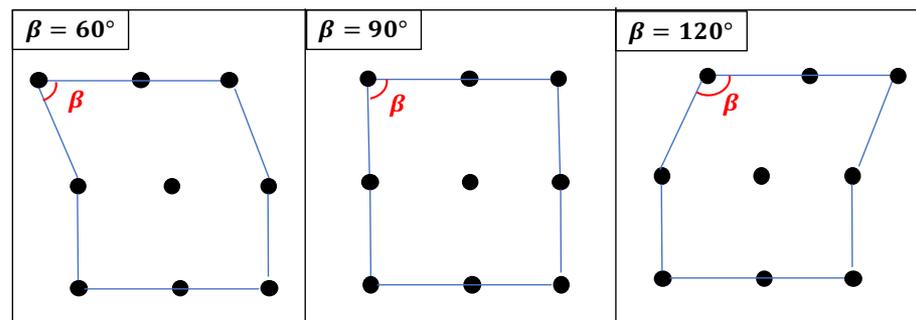
入射角によるXTカーブの変化イメージ図

Z軸座標と角度 β の関係

- COMET CDCでは全レイヤーがステレオしており、セルにおける角度 β が少しずつ変化する。
- この角度 β の変化はZ座標に対応する。

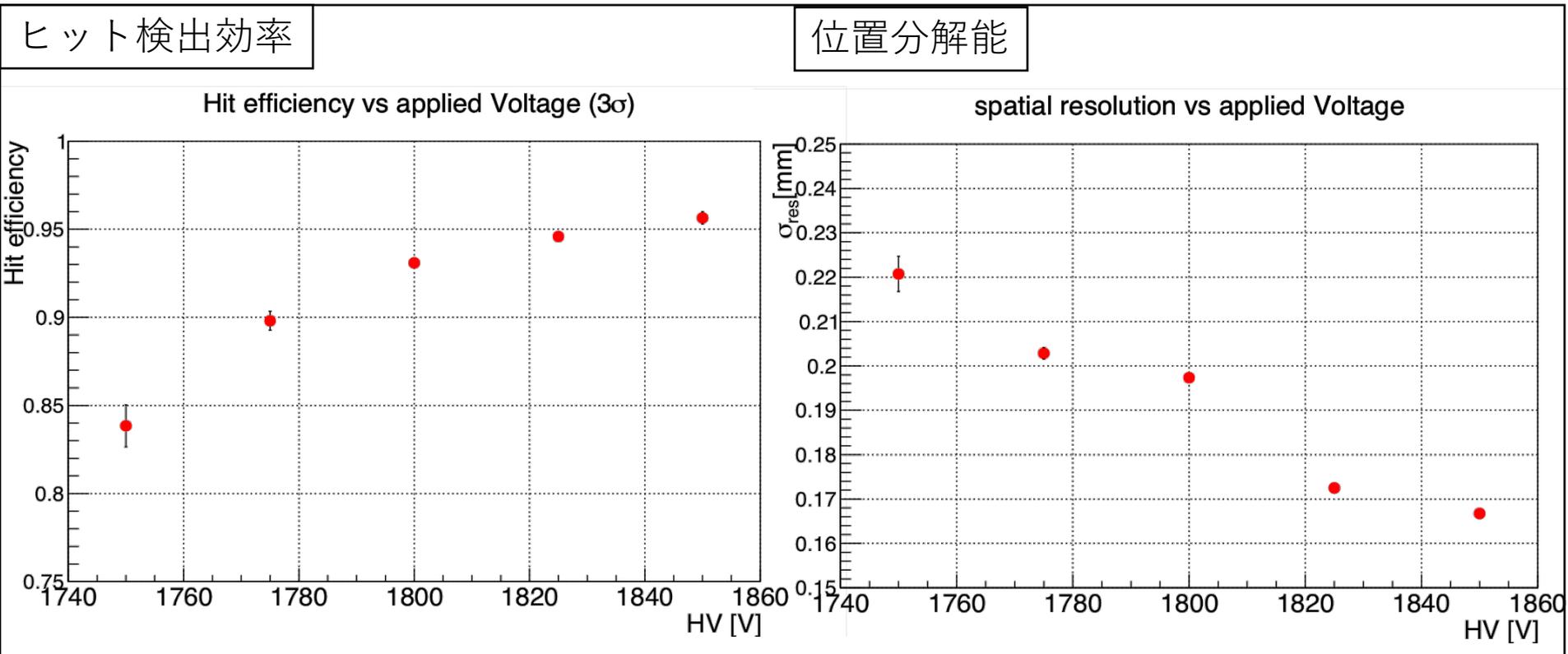


COMET CDCはオールステレオワイヤー
→セルにおける角度 β がZ座標に応じて、
繰り返し変化する。



印加電圧依存性

- 印加電圧が高いほど、ヒット検出効率、位置分解能共に改善する。



要求性能の設定

運動量分解能への影響

$$\left(\frac{\sigma_{pt}}{P_t}\right)^2 = (aP_t)^2 + b^2$$

-位置分解能

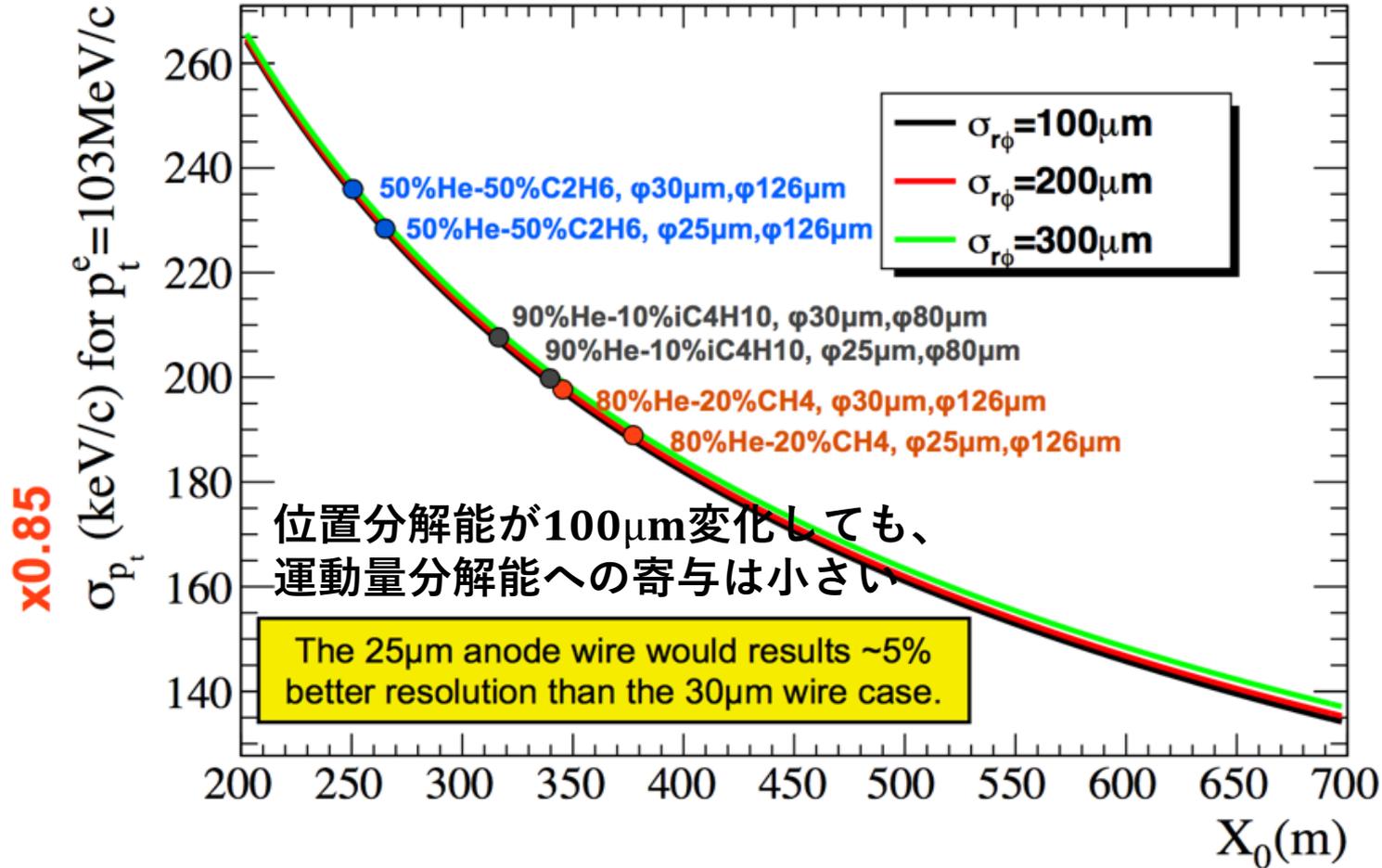
$$a = \frac{\sigma_{r\phi}}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}}$$

-多重散乱

$$b = \frac{0.054}{LB} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \frac{L}{X_0}\right]$$

B	磁場 (T)
L	飛跡の長さ (m)
$\sigma_{r\phi}$	そのポイントでの位置分解能 (m)
N	計測ポイント数
X_0	ガス内での放射長 (m)
P_t	横運動量 (GeV/c)

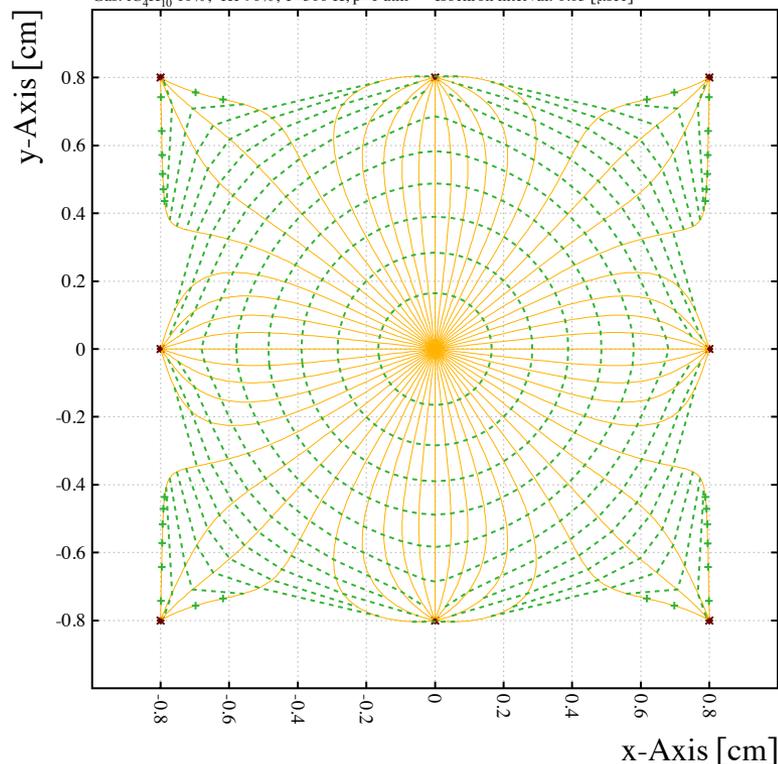
σ_p vs X_0 for 30 μm and 25 μm



セル内の電場分布

Positron drift lines from a wire

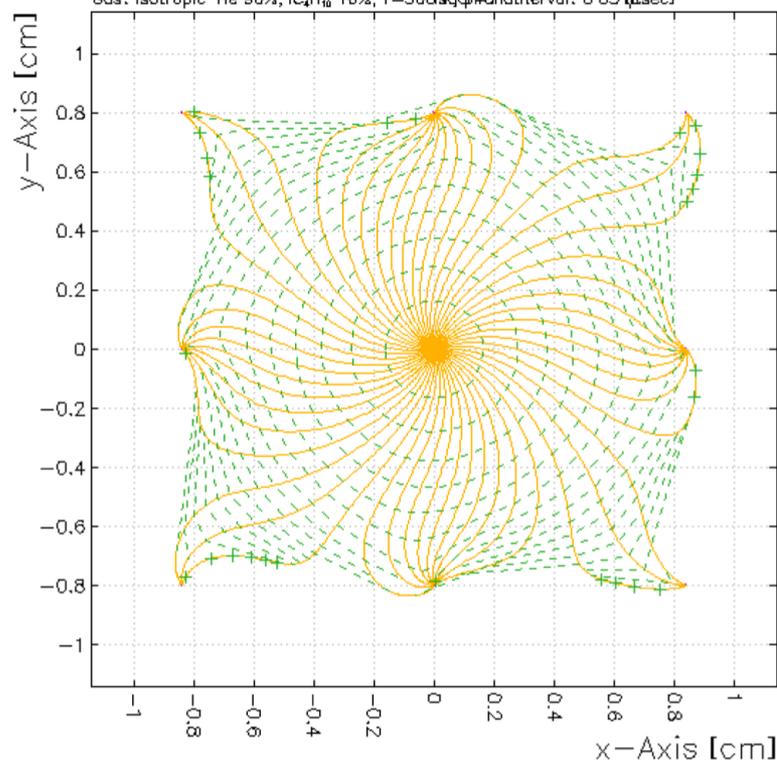
Cell: CometCdcTest02 with 1800V and 0T (25um, 130um)
Gas: iC_4H_{10} 10%, 3He 90%, $T=300$ K, $p=1$ atm Isochron interval: 0.05 [μ sec]



磁場なし

Positron drift lines from a wire

Gas: isotropic 3He 90%, iC_4H_{10} 10%, $T=300$ K, $p=1$ atm Isochron interval: 0.05 [μ sec]

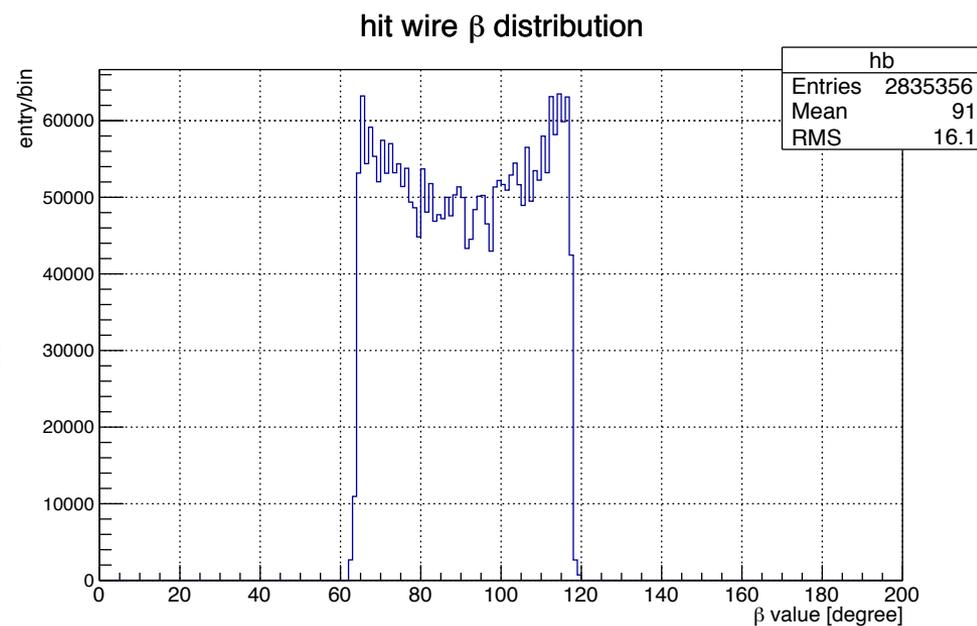
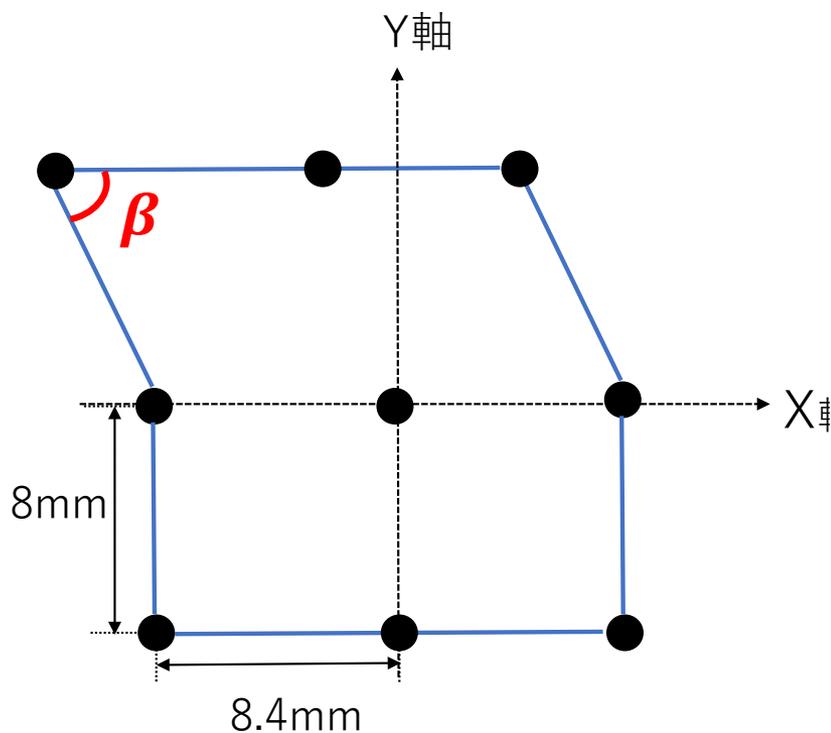


磁場あり(1T)

磁場がかかるとフィールドワイヤー近辺での電場の歪みは大きくなる

Z軸座標と角度 β の関係

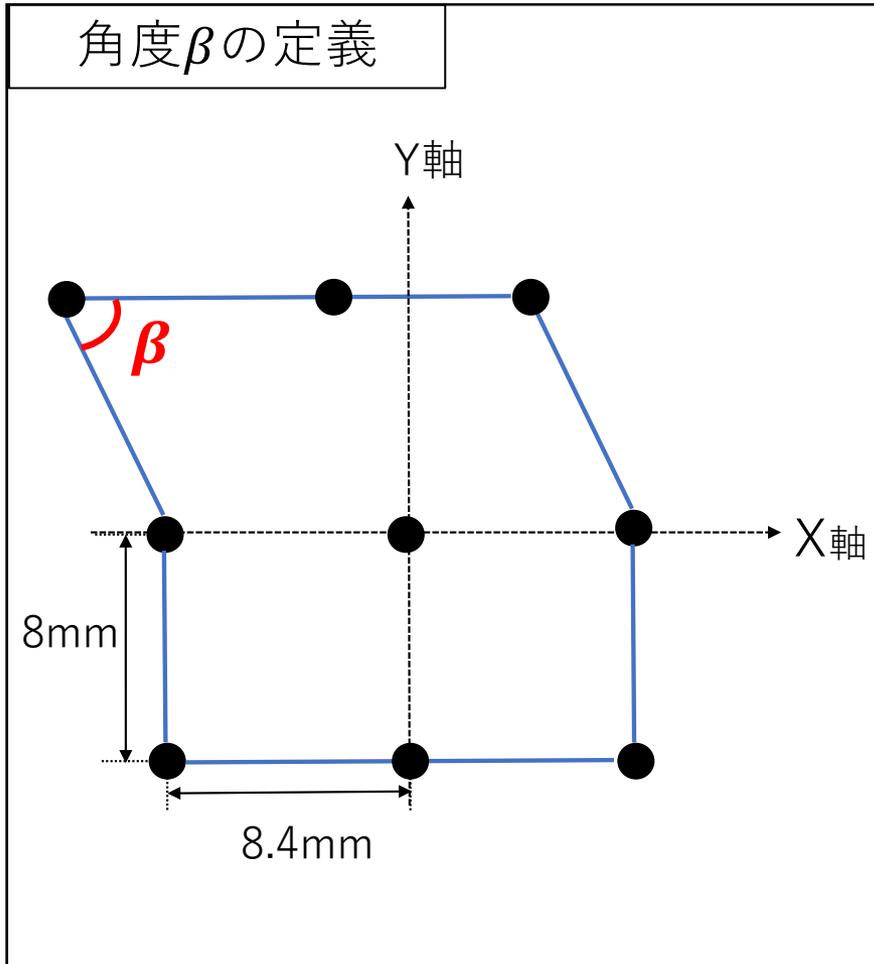
- COMET CDCでは全レイヤーがステレオしており、セルにおける角度 β が少しずつ変化する。
- この角度 β の変化はZ座標に対応する。



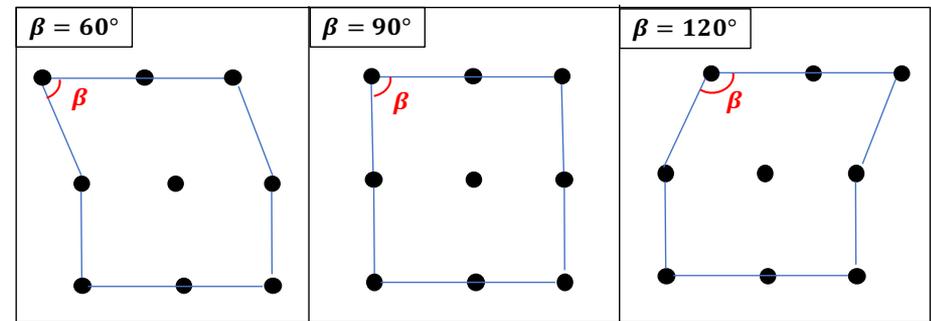
ヒットワイヤーの角度 β 分布

位置分解能の β 依存性

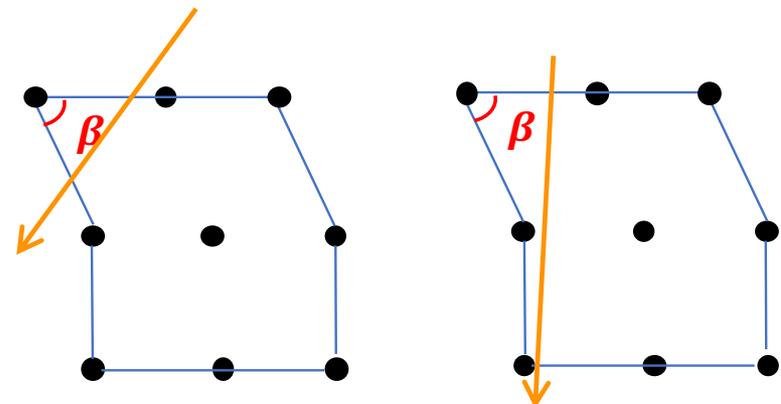
角度 β の定義



COMET CDCはオールステレオワイヤー
→セルにおける角度 β が繰り返し変化する。

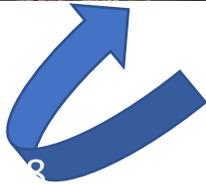
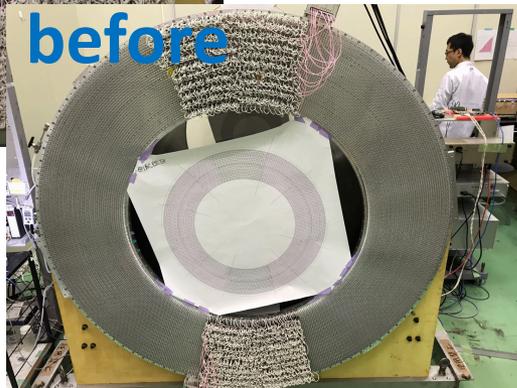
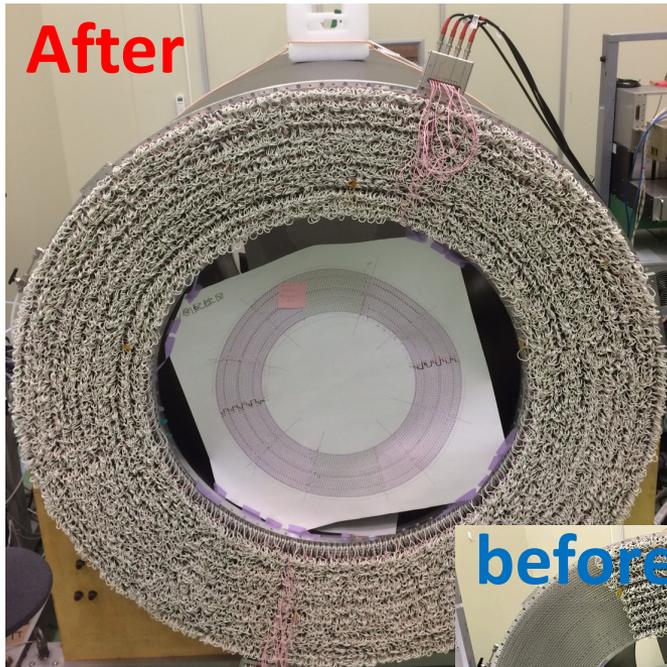


入射角度が大きいと、角度 β の影響を受けやすい

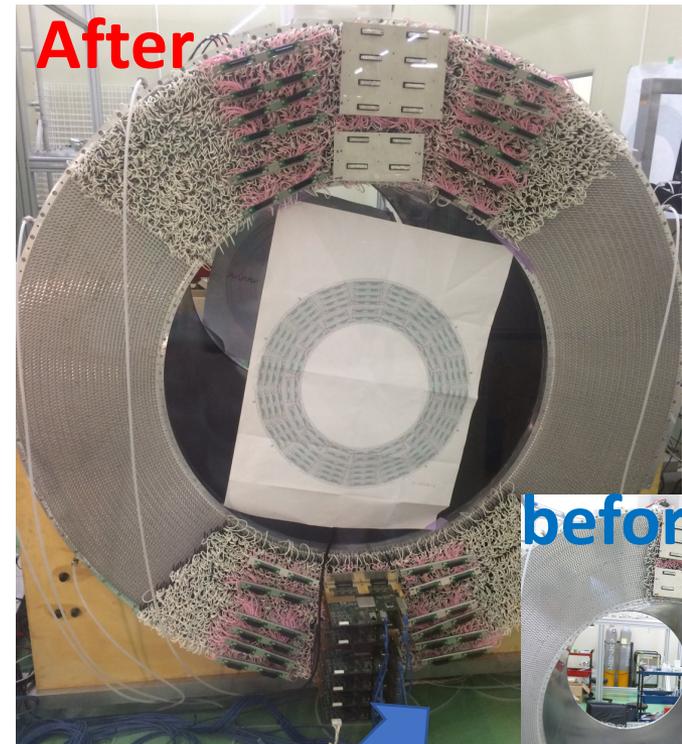


読み出し領域の拡大

印加電圧側

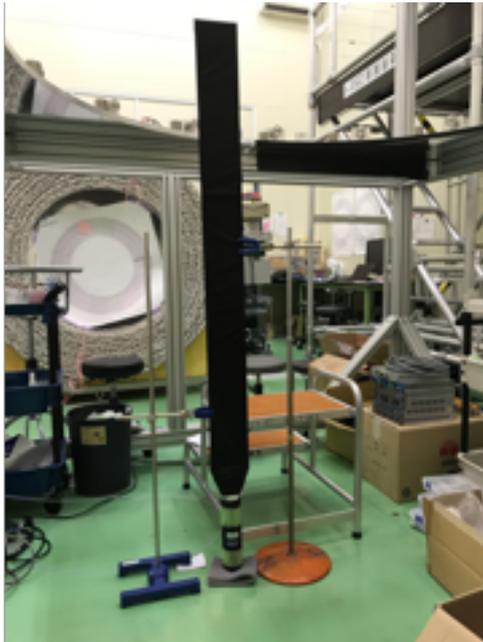
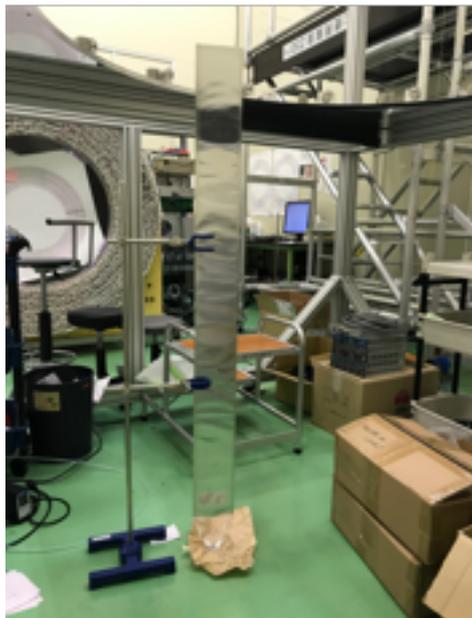


読み出し側



読み出し領域の拡大

- より長いトリガーカウンターを用意することで、CDCのZ軸方向もカバー
- CDCの長さ 1495.5mm
- 作成したシンチレーションカウンター 1303mm

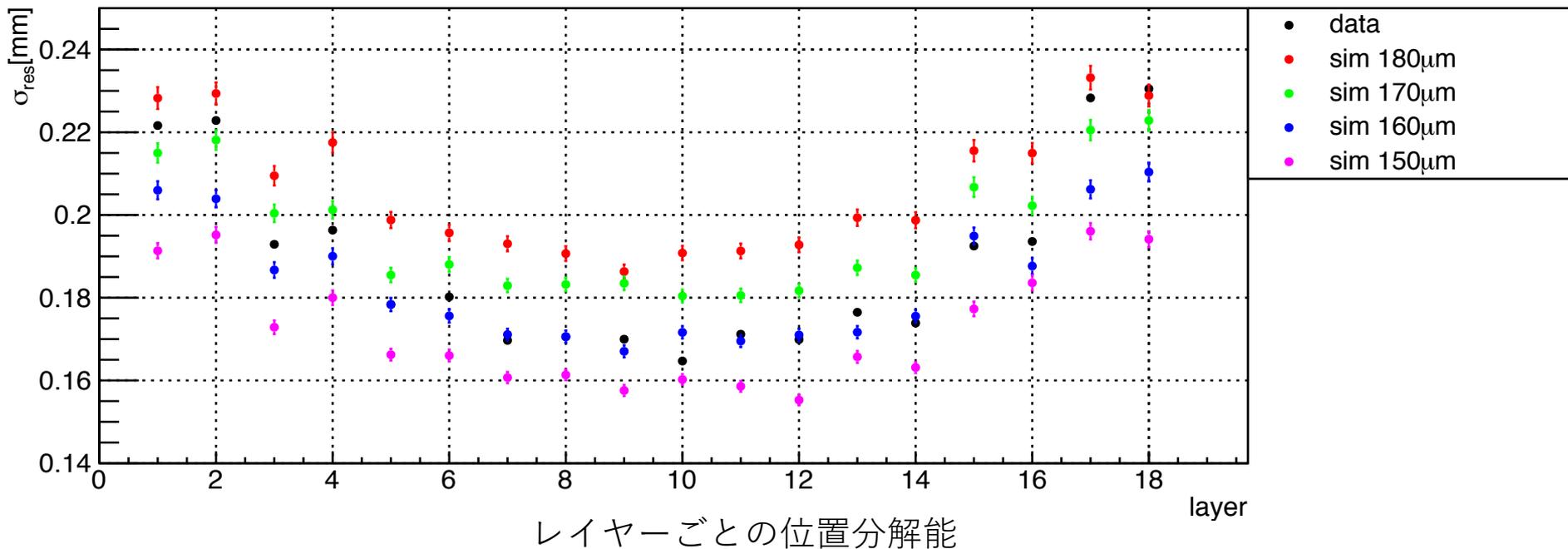


位置分解能のレイヤー依存性

端のレイヤーほど飛跡再構成誤差が大きいことを確認するため、固有位置分解能が全レイヤーで同じであった場合の位置分解能をシミュレーションで求めた。

→端のレイヤーほど飛跡再構成誤差が大きい

160～170 μm の固有位置分解能をもつことがわかった。



COMET CDC の性能評価試験

- これまでに試作機で評価試験をしてきた。

プロトタイプIIとIVの試験における位置分解能の結果

Test	Gas Mixture	B-field [T]	HV [V]	σ_{intr} [μm]
Tohoku	He-iC ₄ H ₁₀ (90/10)	0	1.85-1.95	152-156
SPring-8	He-iC ₄ H ₁₀ (90/10)	0	1.8-1.83	153-153
KEK	He-iC ₄ H ₁₀ (90/10)	0	1.85	185
KEK	He-iC ₄ H ₁₀ (90/10)	1	1.85	254
Tohoku	He-C ₂ H ₆ (50/50)	0	2.35-2/5	161-150
SPring-8	He-C ₂ H ₆ (50/50)	0	2.35-2.4	143-121
KEK	He-C ₂ H ₆ (50/50)	0	2.40	149
KEK	He-C ₂ H ₆ (50/50)	1	2.40	228
Tohoku	He-CH ₄ (73/27)	0	2.05-2.35	151-156

磁場なし 185 μm

磁場あり 254 μm

このときCOMET実験に問題なく
用いることができることを確認済。

1. 位置分解能の値から、**CDC実機**がCOMET実験に必要な性能を満たしているか確認。

読み出し領域の拡大により、これまでより大きなイベント数を確保

2. セルの特徴などを考慮しより詳細に位置分解能を求め、
さらに位置分解能が向上する余地がないか初めて調査した。