

# ガラス基板を用いた $\mu$ -PIC の開発



阿部光 (京都大学 宇宙線研究室)

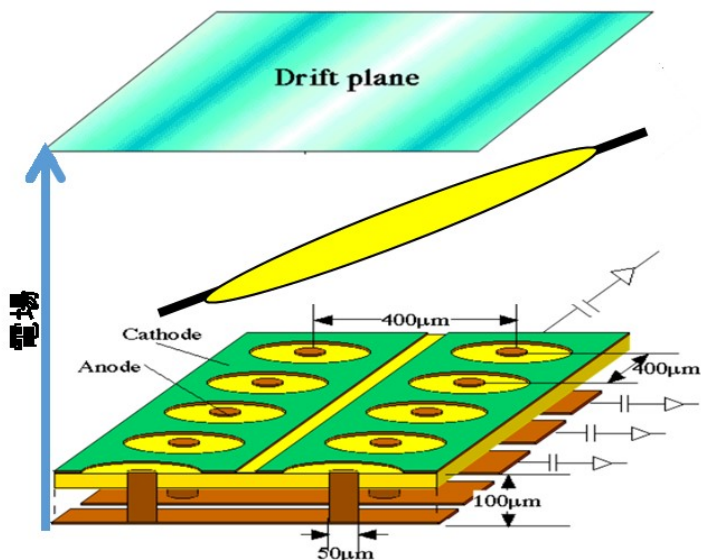
谷森達, 高田淳史, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 吉川慶, 中増勇真,  
中村優太, 谷口幹幸, 小野坂健, 齋藤要, 水本哲矢, 園田真也(京都大理),  
Parker Joseph(クロス東海), 身内賢太郎(神戸大学), 澤野達哉(金沢大数物),

# 目次

- $\mu$ -PICのイントロダクション
  
- TGV(Through Glass Via) $\mu$ -PICの動作試験
  - ◆ $^{55}\text{Fe}$ の信号とスペクトル
  - ◆ゲインカーブ
  
- 3軸 $\mu$ -PIC のGarfield++でのシミュレーション
  - ◆ジオメトリパラメータとガスゲイン
  - ◆各ストリップの信号分配
  
- まとめ

# μ-PICとその応用

## Micro Pixel Chamber (μ-PIC)



- ▶ 2次元ガスイメージング検出器
- ▶ プリント基板技術で製作
- ▶ ピクセル間隔：400 μm
- ▶ 個々のピクセルでガス増幅
- ▶ 大面積：10×10 cm<sup>2</sup> and 30×30 cm<sup>2</sup>
- ▶ 大きな増幅率：max ~15000
- ▶ 高い位置分解能：RMS ~120 μm
- ▶ 均一な応答：RMS ~5% (10×10 cm<sup>2</sup>)
- ▶ 1ヶ月を超える連続安定動作が可 (@ gain ~6000)

## μ-PIC応用

✓ MeVガンマ線望遠鏡

Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

μ-PIC + 位置検出型シンチレーターアレイ

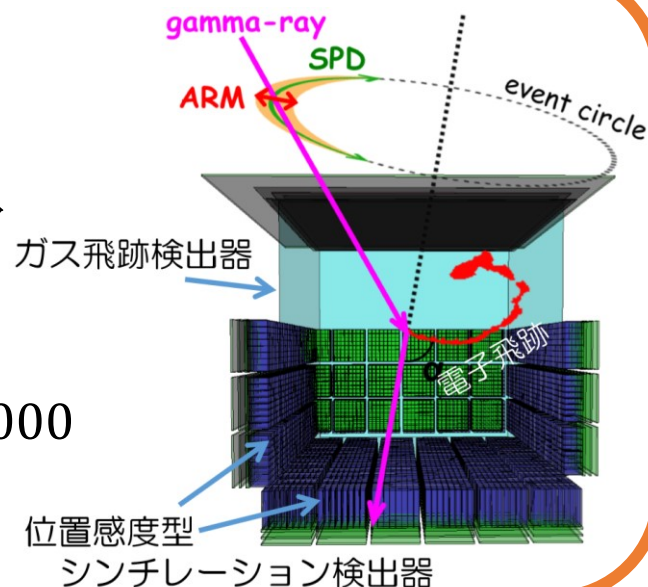
[要求①] 電子飛跡決定精度の向上

[要求②] μ-PIC単体でのMIP粒子検出

(GEMなし):ゲイン ~15,000

✓ 中性子イメージング検出器

[要求] 位置分解能 < 90 μm



# μ-PICへの要求

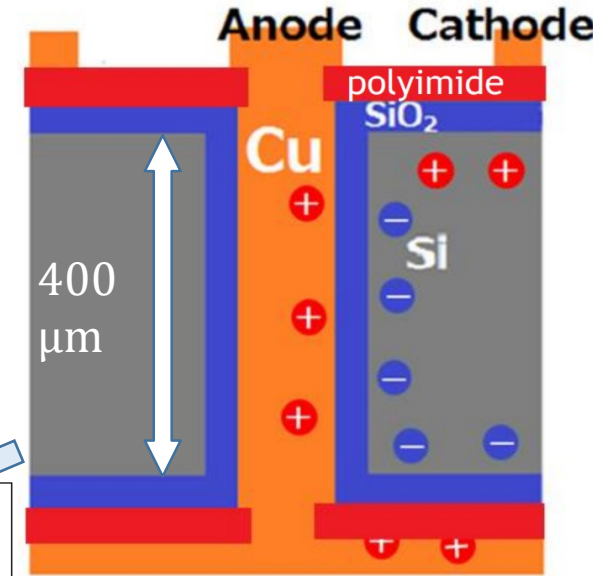
## ① 飛跡決定精度の向上

- 高空間分解能→ピクセル間隔を狭める
- 3軸での信号読み出し⇒講演の後半

## ② 低電圧で高ゲイン

- アスペクト比(Anode柱高さ/Anode直径)の増加

## TSV(Through Silicon Via)μ-PIC



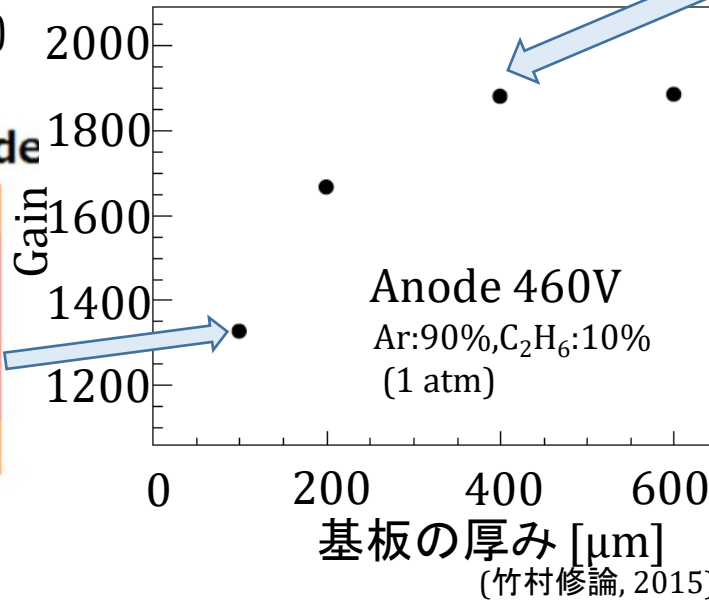
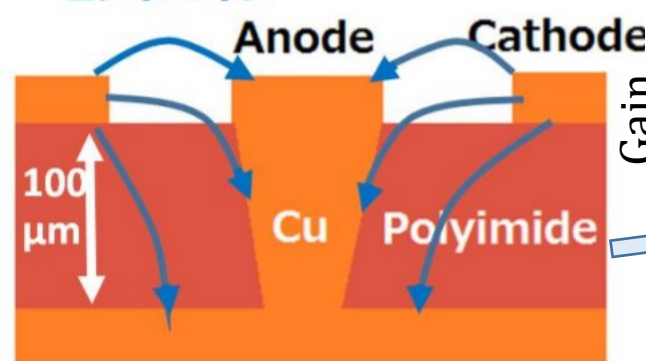
ゲイン向上に至った  
初めての根本的構造変更  
(T. Takemura et al, 2018)

### TSV μ-PICの不確定要素

- Anode柱側面に形成されたSiO<sub>2</sub>層の厚み
- 半導体内の電荷移動による電場の効果

従来のμ-PIC(プリント基板技術)

### 電気力線



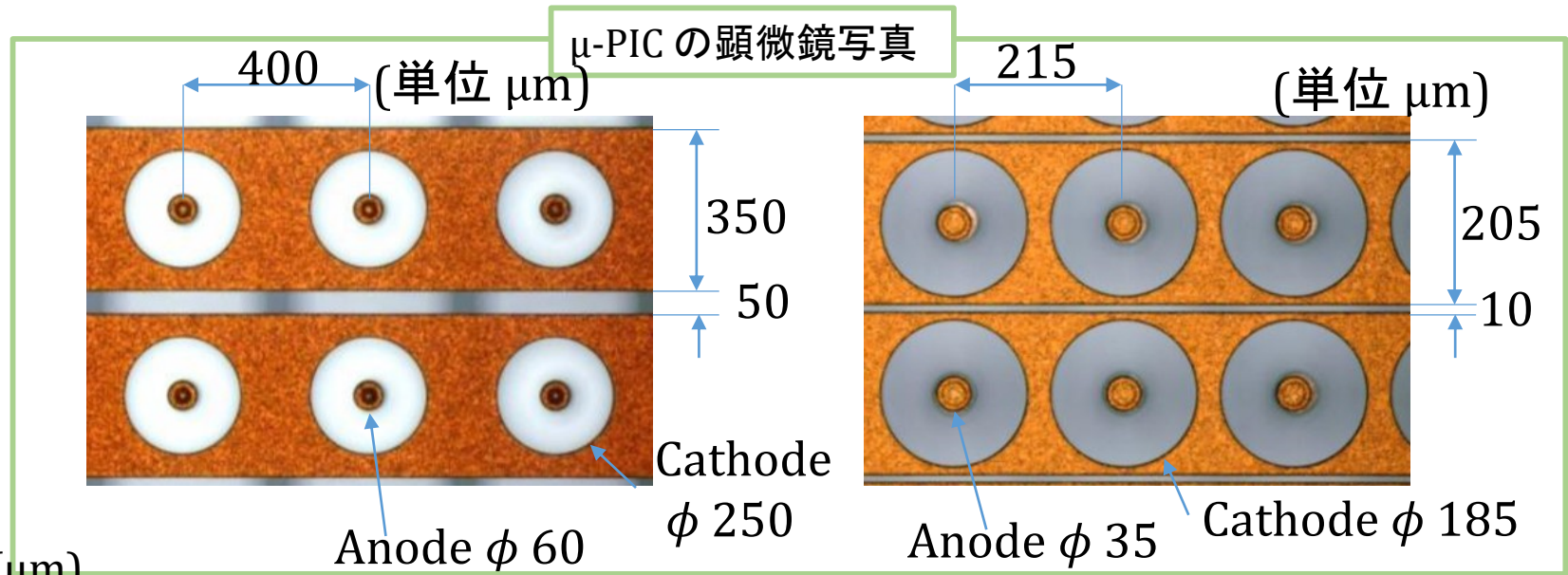
プリント基板技術の限界:

- 基板を厚くするとアノードが太くなる
- 作成精度は ~10 μm
- 実現可能なアノード直径は 50 μm  
-> 電極の間隔はアノード直径が律速

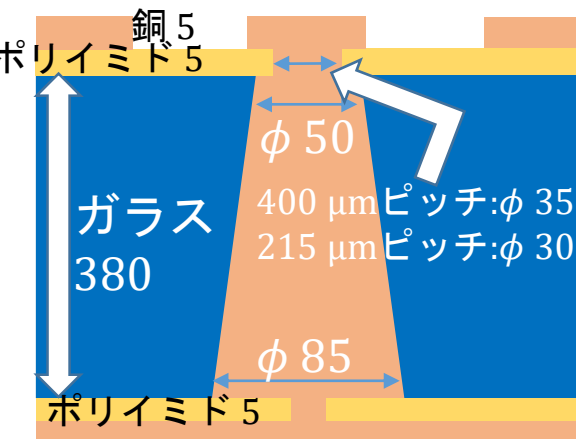
高アスペクト比のアノード形成可能な  
絶縁体の基板によるμ-PIC

# ガラス基板を使った $\mu$ -PIC(TGV $\mu$ -PIC)

- ・大日本印刷と共同で開発
- ・TGV(Through Glass Via)技術により高アスペクト比のAnode形成が可能
- ・ピッチ間隔 $400\ \mu\text{m}$ ( $5\ \text{cm}$ 角)、 $215\ \mu\text{m}$ ( $3\ \text{cm}$ 角)の2種類の素子を製作

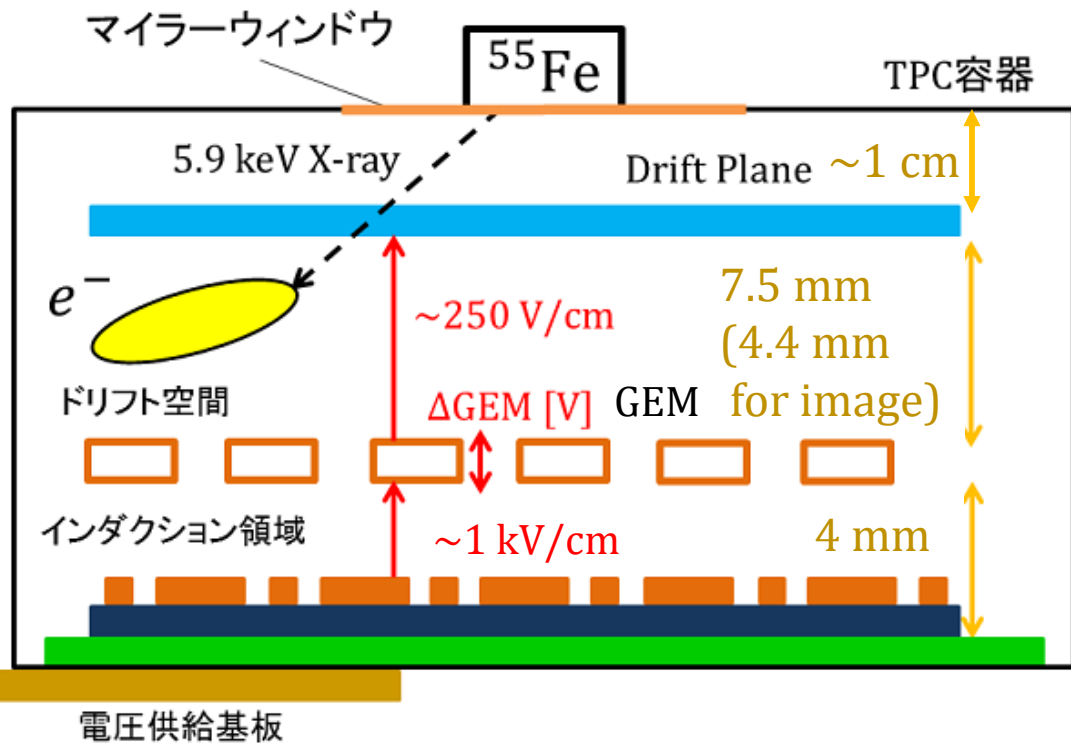
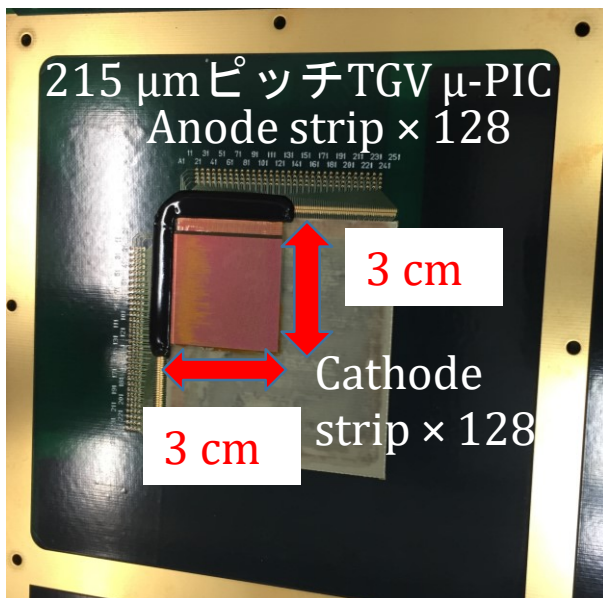
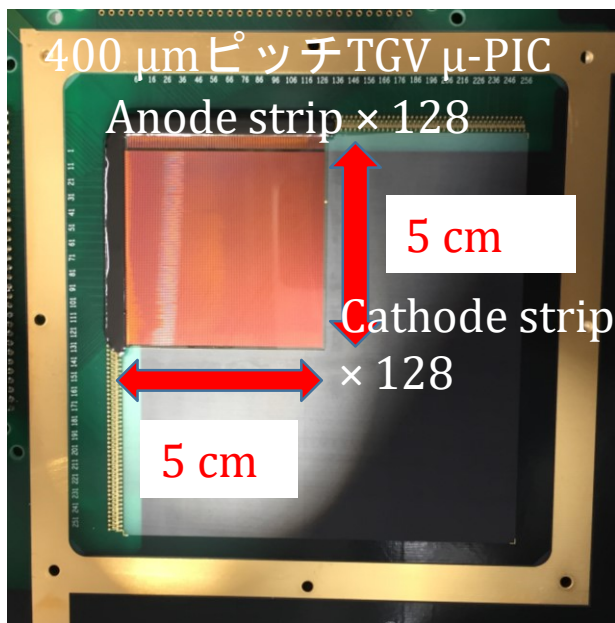


単位 ( $\mu\text{m}$ )



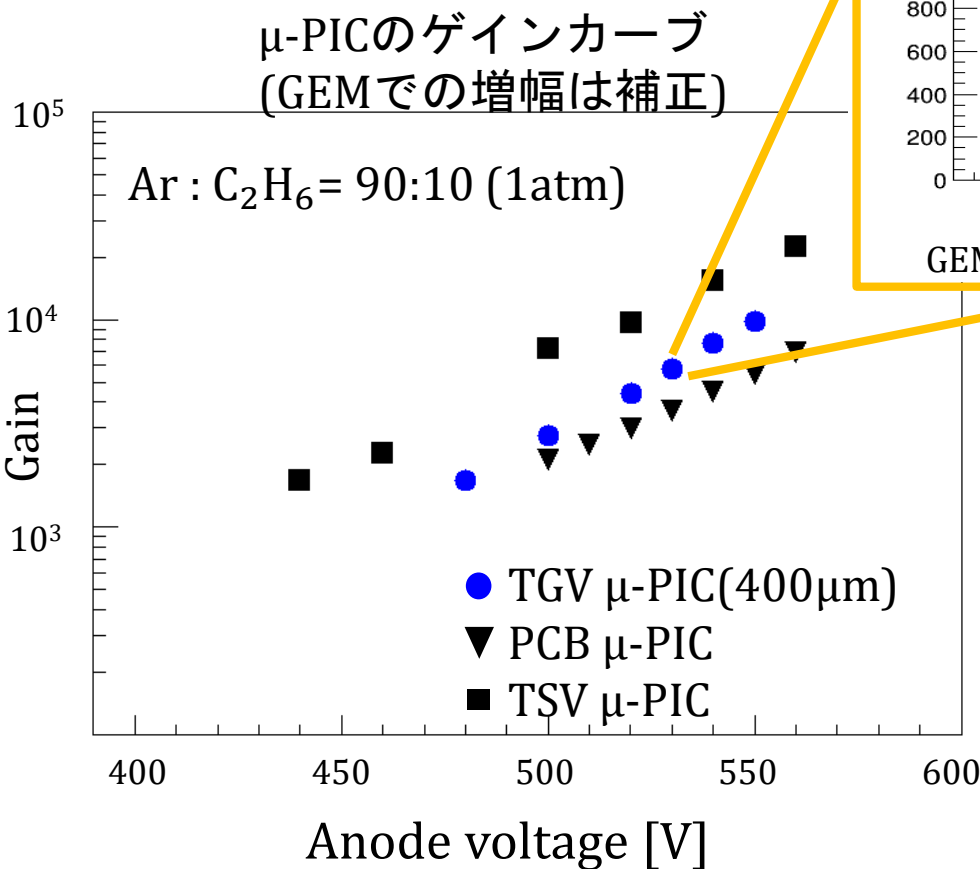
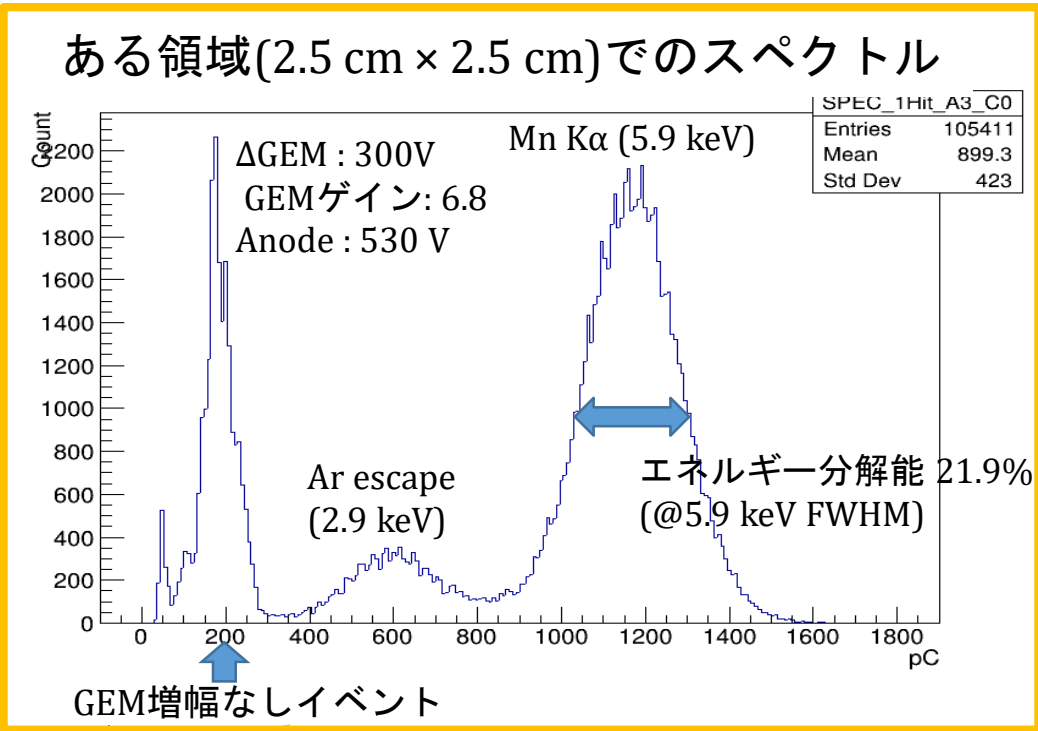
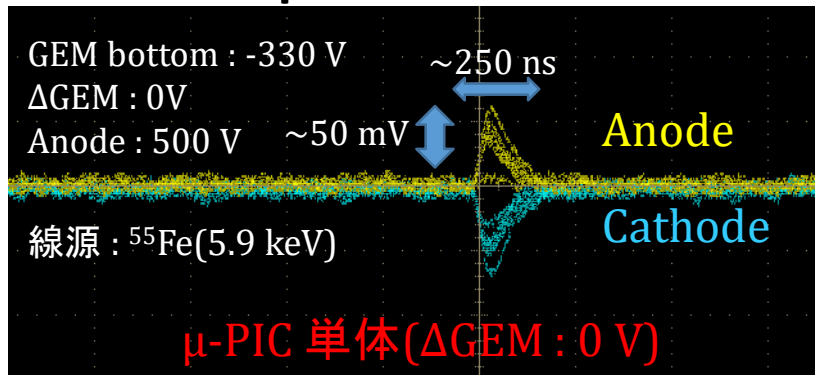
	PCB $\mu$ -PIC	TSV $\mu$ -PIC	TGV $\mu$ -PIC
基板材質 (誘電率)	ポリイミド (3.2)[1MHz]	シリコン(+SiO <sub>2</sub> 膜) (Si:11, SiO <sub>2</sub> :4.5)	無アルカリガラス (5.8)[1MHz]
アノードのアスペクト比	~ 2 (100 $\mu\text{m}/60\ \mu\text{m}$ )	~ 8 (400 $\mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$ )	~ 6.5 (390 $\mu\text{m}/60\ \mu\text{m}$ )
製作精度	~ 10 $\mu\text{m}$	~ 数 $\mu\text{m}$	~ 10 $\mu\text{m}$

# 測定用セットアップ



- ◆ TGV  $\mu\text{-PIC}$ をTPC容器へと導入
- ◆  $\mu\text{-PIC}$ からの信号は電圧供給基板を通して読み出し基板へ
- ◆ 封入ガス :  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 90:10$  (1atm)

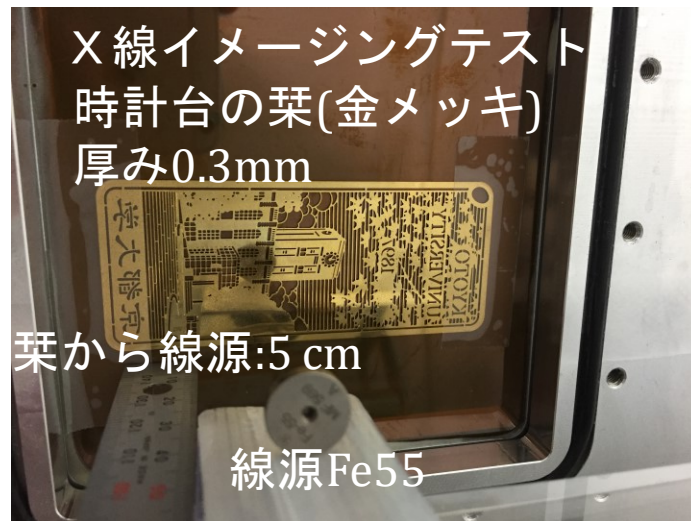
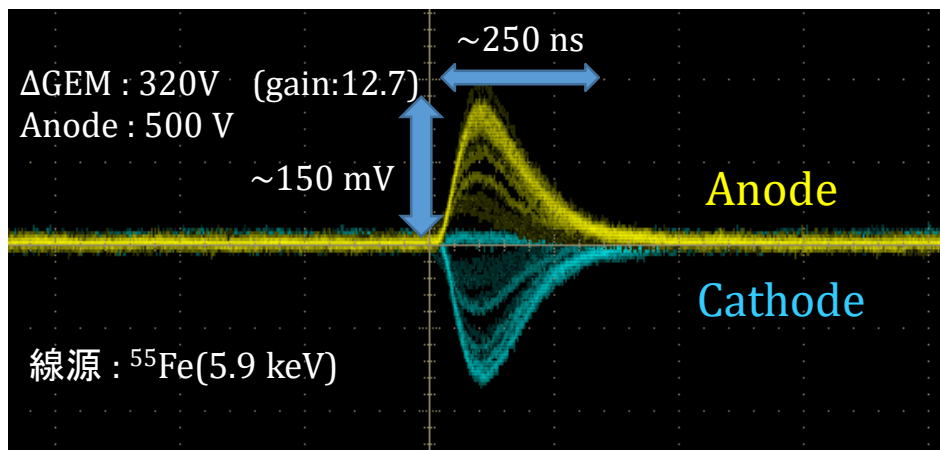
# 400 $\mu\text{m}$ ピッチ TGV $\mu\text{-PIC}$ 動作試験



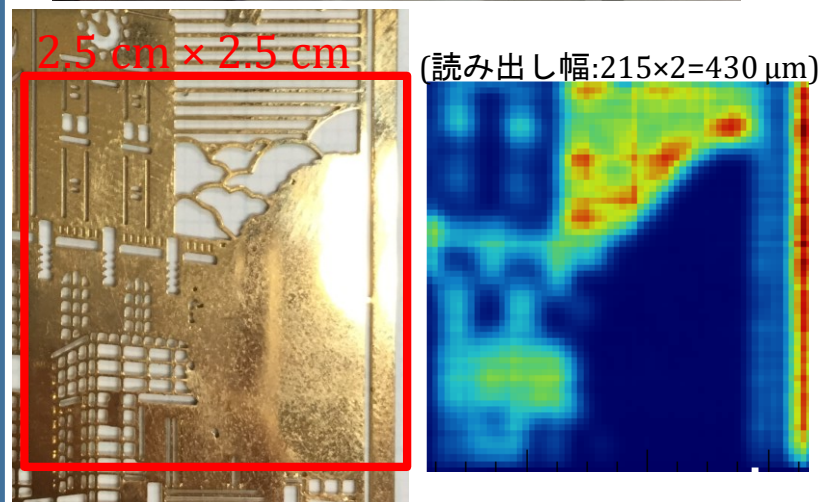
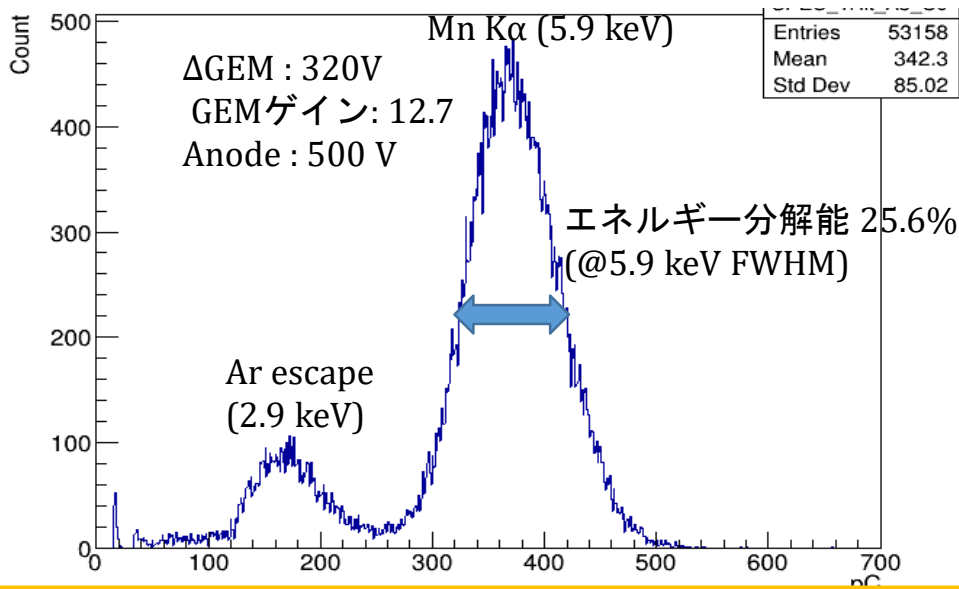
**TGV  $\mu\text{-PIC}$  単体で初めて  
 X線の検出に成功**

PCB  $\mu\text{-PIC}$  と同程度のゲイン

# 215 $\mu\text{m}$ ピッチ TGV $\mu\text{-PIC}$ 動作試験



ある領域(1.5 cm × 1.5 cm)でのスペクトル

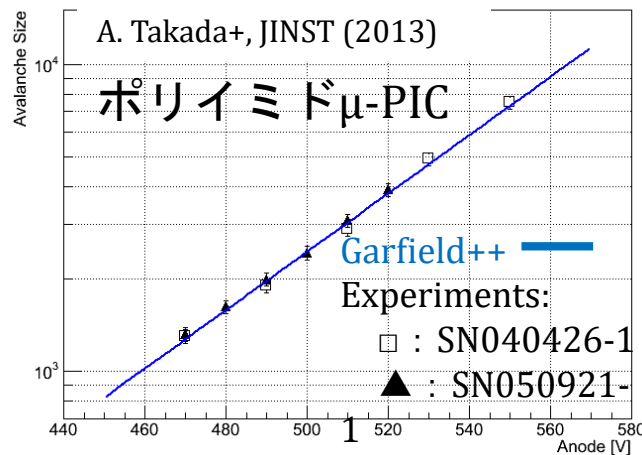
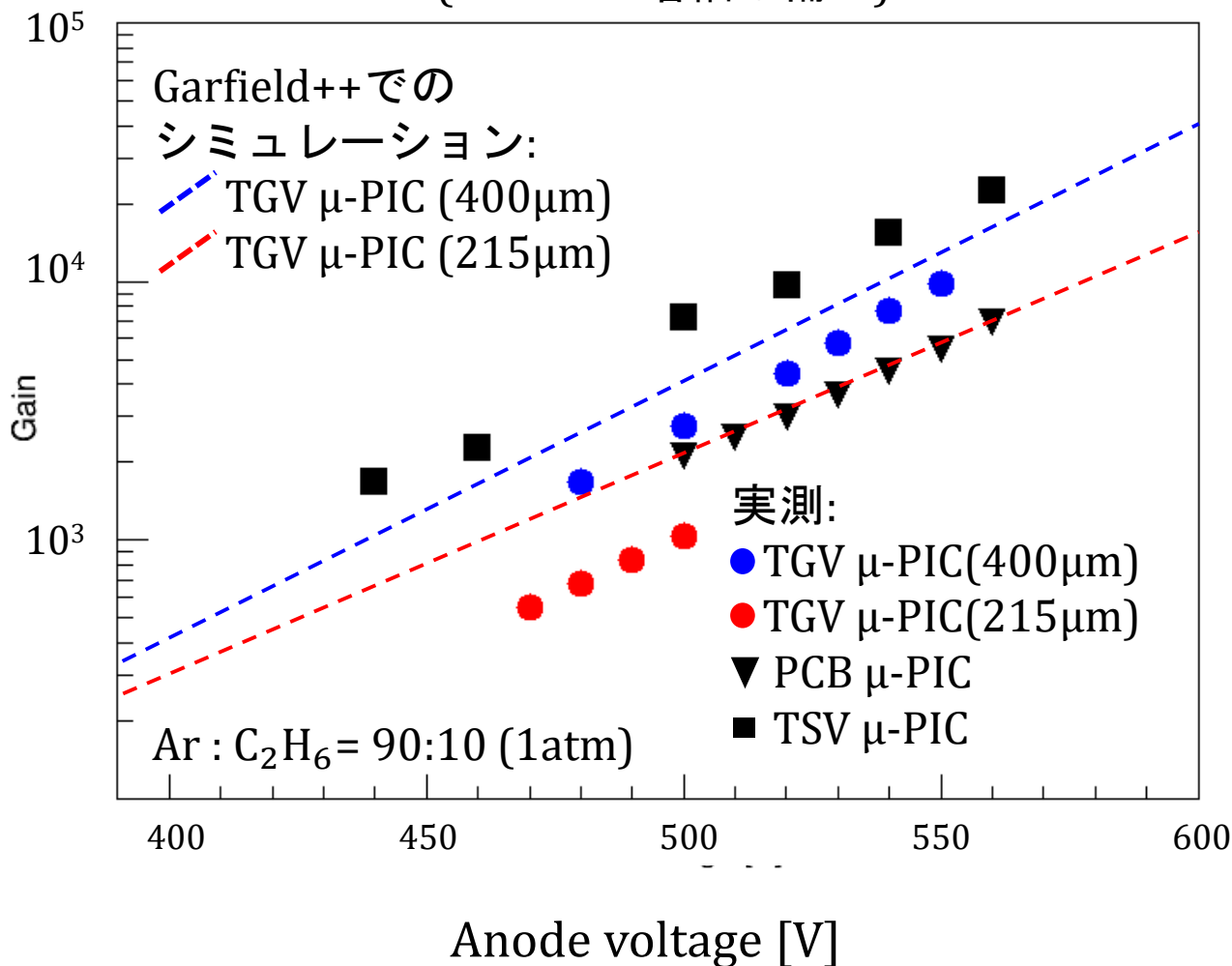


二次元×線イメージングに成功  
 二次元位置感度型検出器としての動作を確認



# ゲインカーブ

μ-PICのゲインカーブ  
(GEMでの増幅は補正)

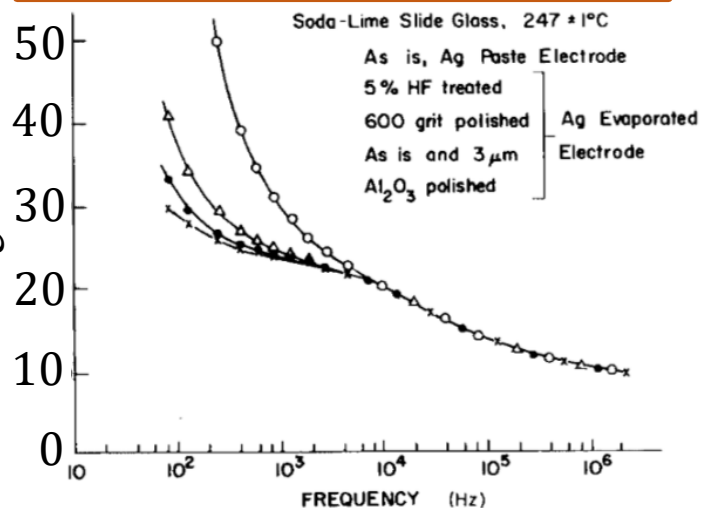


- 215μmピッチのゲインは400μmピッチの~40% (@anode 480V)
- 400μm, 215μmピッチともに、実測値が計算値を下回っている
- 目標: ゲイン  $1.5 \times 10^4$   
安定動作は達成されず

シミュレーション値と  
実測値の乖離については  
現在調査中

# ガラス誘電率とゲインの関係

## ガラスの誘電率特性(低周波)



ソーダ石灰ガラス(247°C)の電極分極効果  
(C. Kim & M. Tomozawa, 1975)

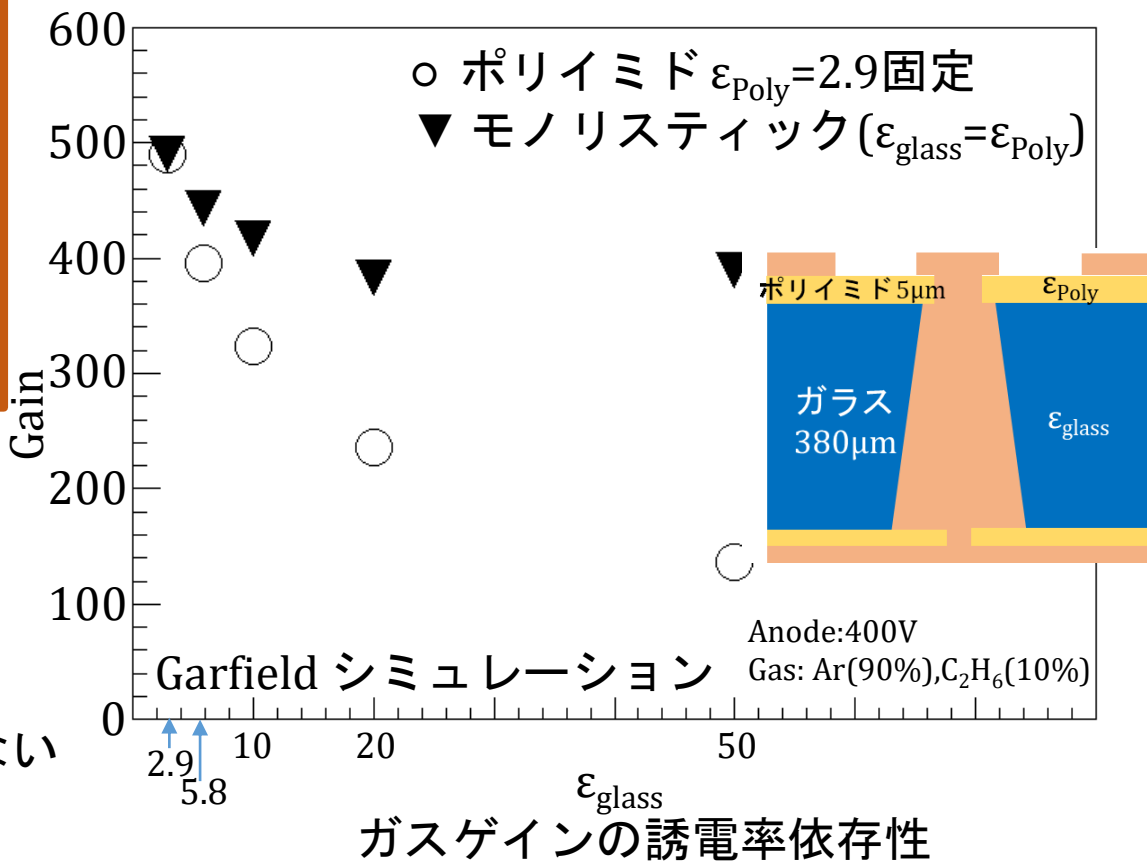
- $\epsilon_{\text{glass}}$  が大きいほどゲインが下がる
- アノード近傍の誘電率不連続面はゲインを下げる

➡ 現在ポリイミド膜のないガラス $\mu$ -PICを製作中

無アルカリガラス  $\epsilon = 5.8$  [1 MHz]

シミュレーションパラメータとして現実を反映していない可能性

仮説: 無アルカリガラス  $\epsilon_{\text{DC}} > \epsilon_{1\text{MHz}}$



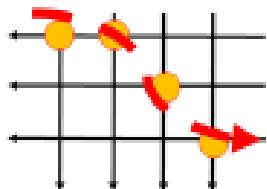
# 電子飛跡決定精度向上を目指した 3軸 $\mu$ -PIC

Garfield++シミュレーション

# 3軸読み出し可能なμ-PIC(3軸 μ-PIC)

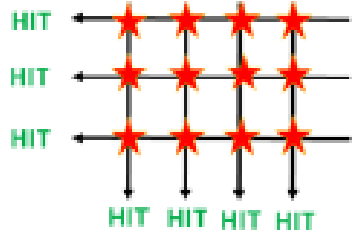
- Anode+Cathode + 3軸目
- 飛跡の不確定性を排除し、位置決定精度を上げることで高角度分解能化を目指す

真の電子飛跡

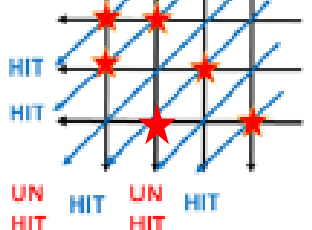


- 通常の10 cm角μ-PICに対して、
- pixel読み出し：256×256 ch
  - strip読み出し：256+256 ch

2軸読み出し



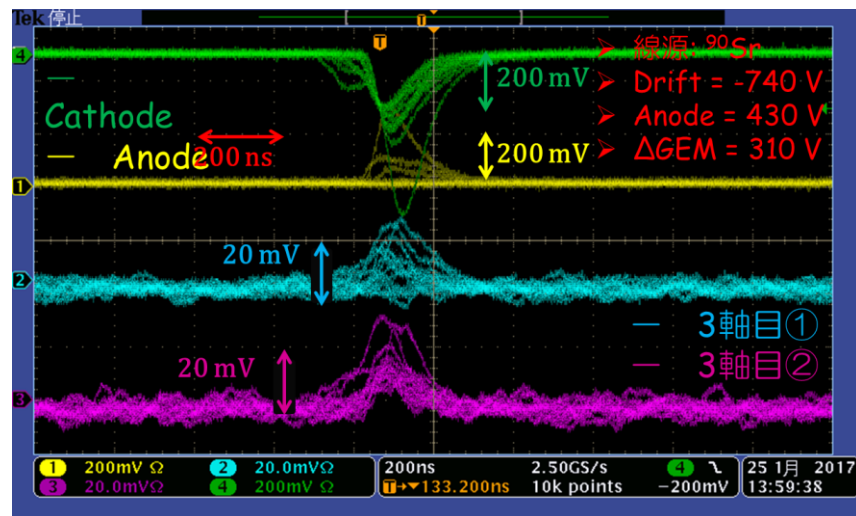
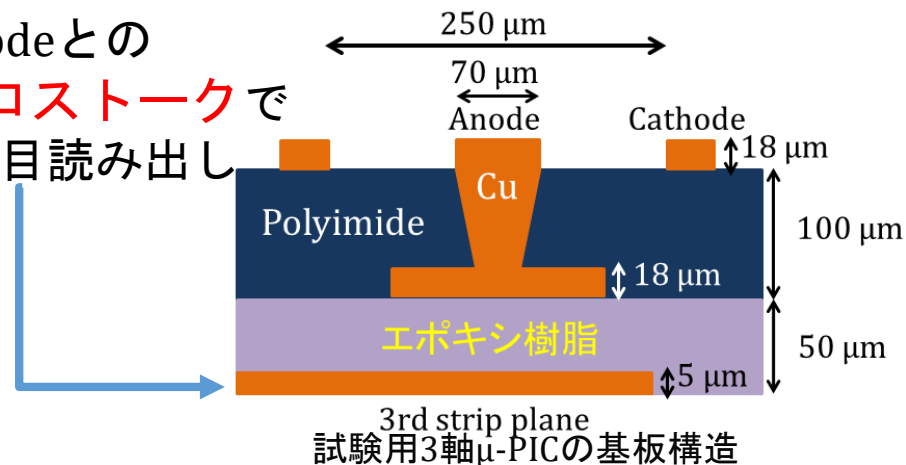
3軸読み出し



- 製造方法：プリント基板(PCB)
- μ-PICの検出領域：7.5×7.5 cm<sup>2</sup>
- ピクセルピッチ：400 μm

## 試験用3軸 μ-PICを作製(2017年)

Anodeとの  
クロストークで  
3軸目読み出し

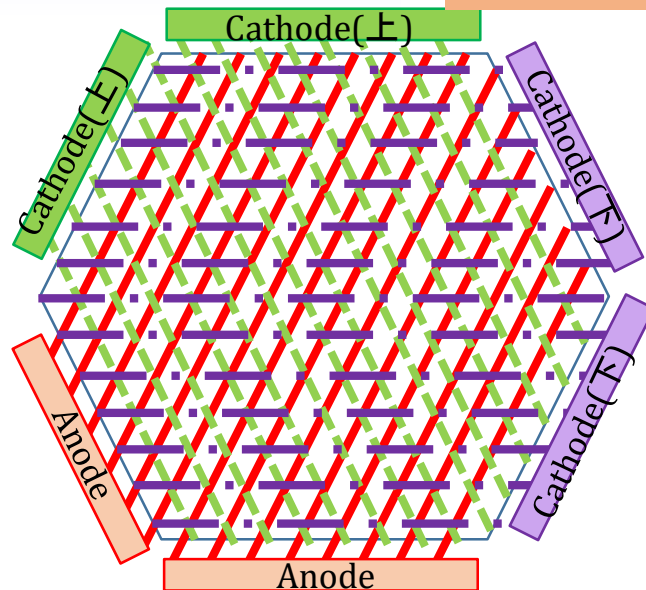
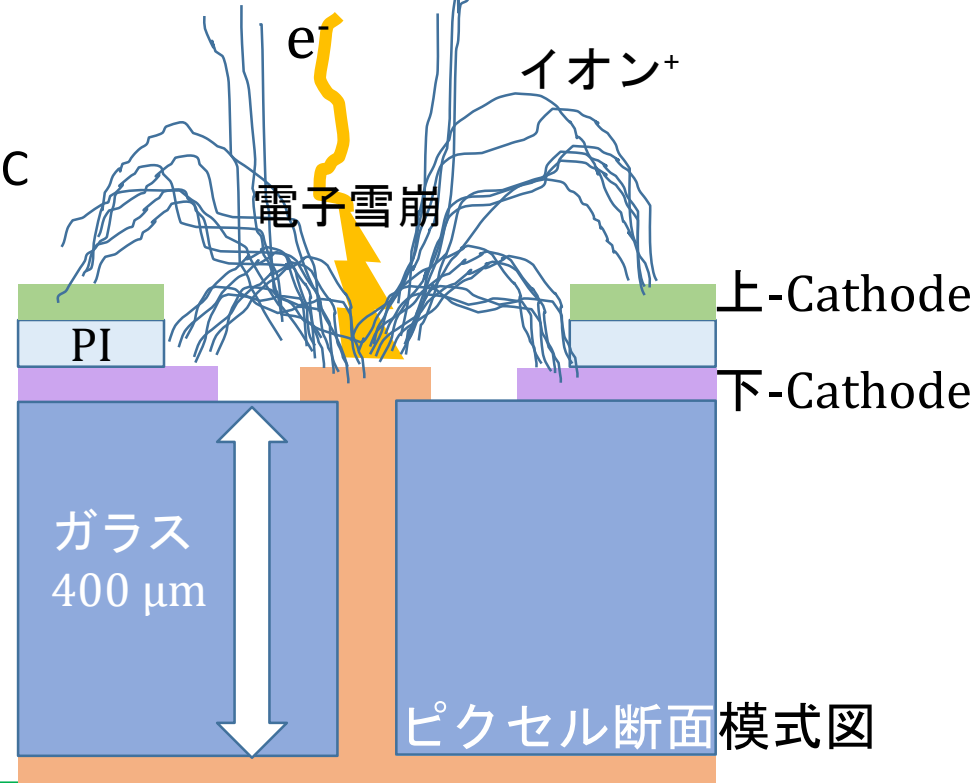
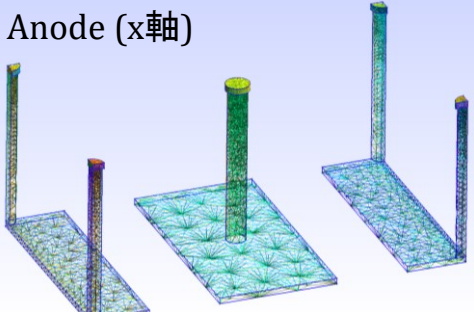
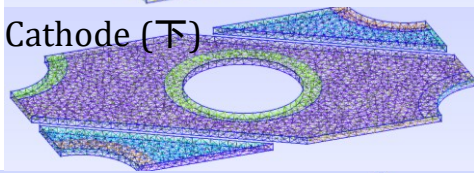
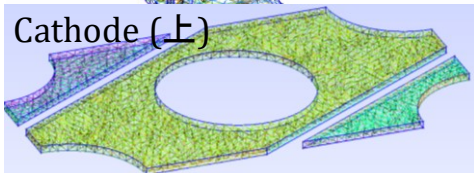
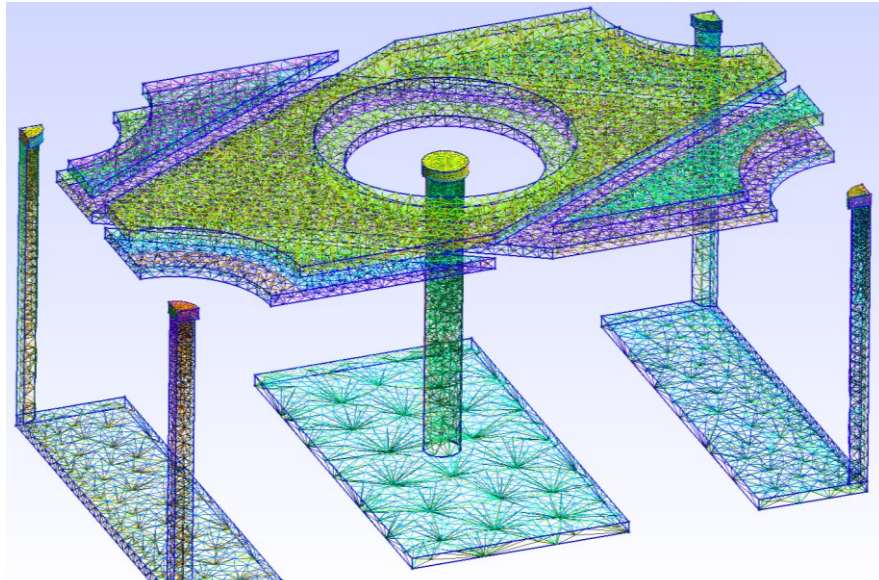


試験用3軸μ-PICのオシロ波形

3軸目の信号を確認。ただし、Anode,Cathodeの1/10読み出すには増幅率の大きな3軸用のアンプが必要 ➡ Cathodeを二つに分けた電極構造

# 新3軸 $\mu$ -PIC

Cathodeを分割・立体交差した3軸 $\mu$ -PIC



読み出しストリップの概観

- 各ストリップのなす角120度
- ピクセル配列は最密充填六角形 $\mu$ -PIC

- ✓ 電子雪崩は起こるのか?
- ✓ 狙い通りカソード信号は分割されるのか?

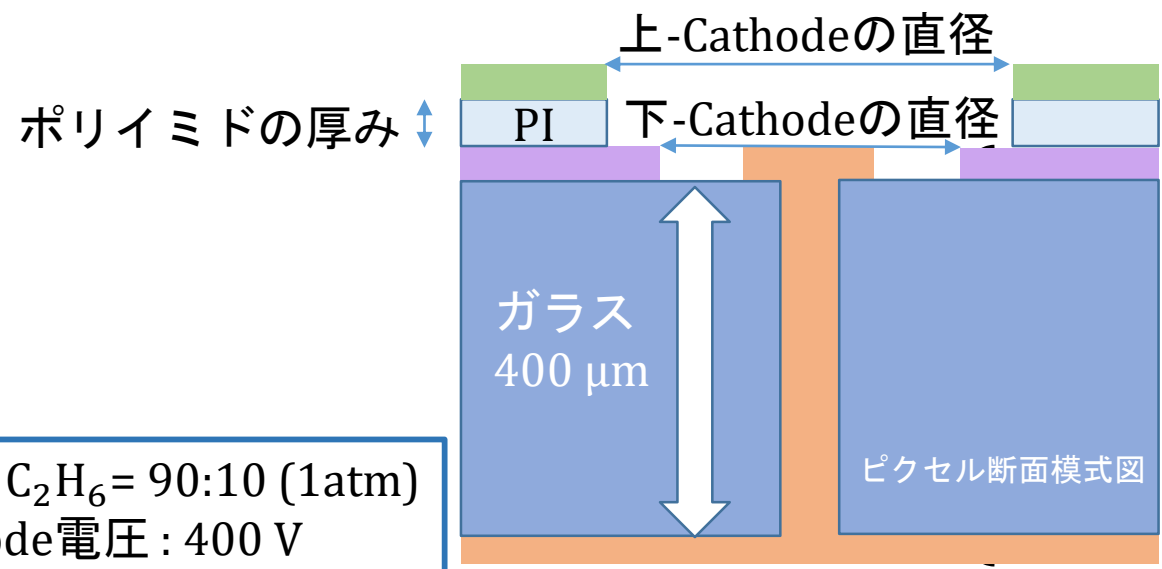
✓ 電子雪崩は起こるのか?

# ジオメトリパラメータとゲインの関係

変化させたパラメータ:  
上-Cathodeの直径  
上、下-Cath間のポリイミドの厚み

放電耐性を考えて  
Anode,下-Cathodeの直径は  
現行の $\mu$ -PICの値で固定

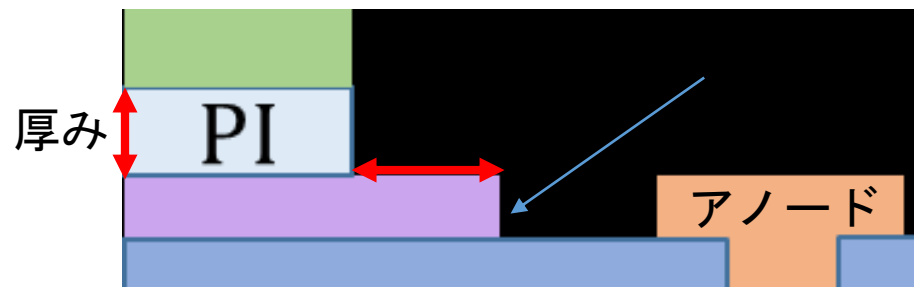
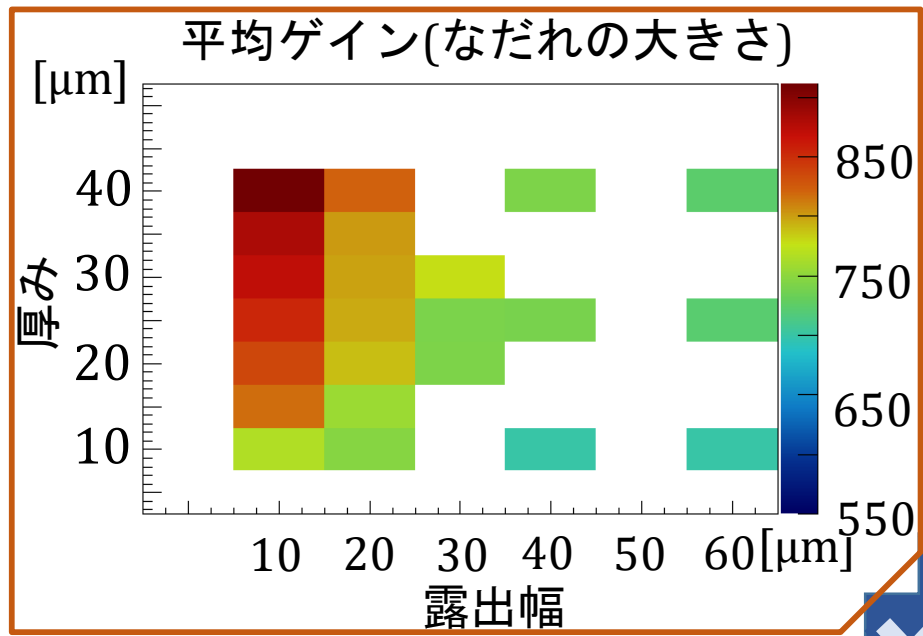
下-Cathodeの直径 = 260  $\mu$ m  
Anodeの直径 = 60  $\mu$ m



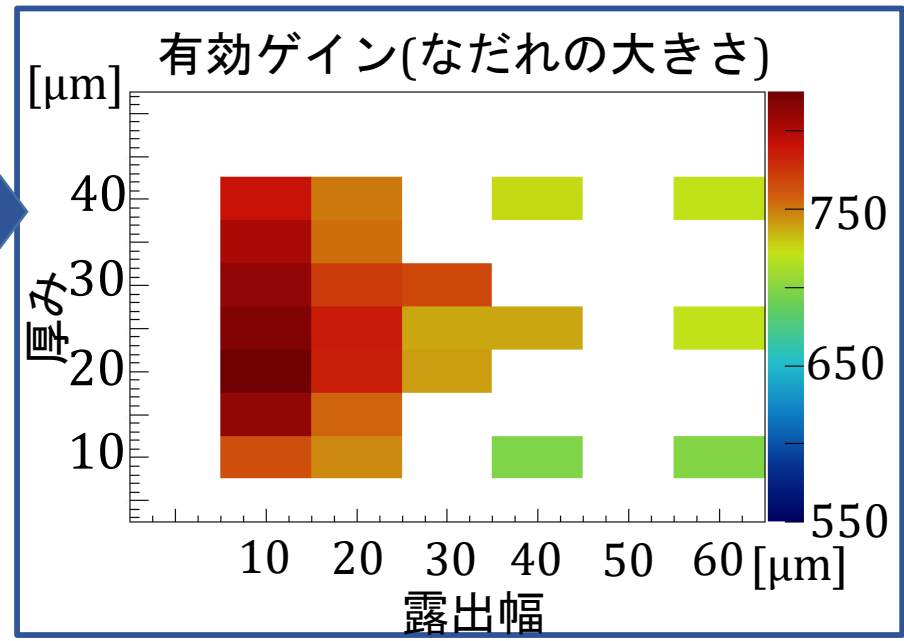
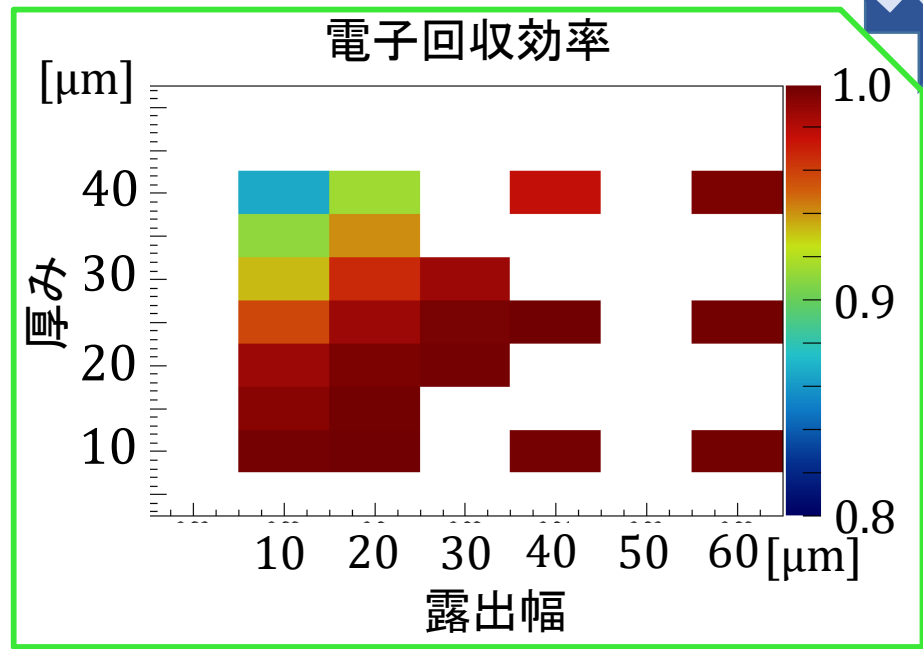
ガラス $\mu$ -PICと同構造

Ar : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 90:10 (1atm)  
Anode電圧 : 400 V  
Cathode間電位差なし

# ジオメトリパラメータとゲインの関係



参考: シミュレーション値 (Anode 400 V)  
400 μm ピッチ ガラス μ-PIC ゲイン ~ 550



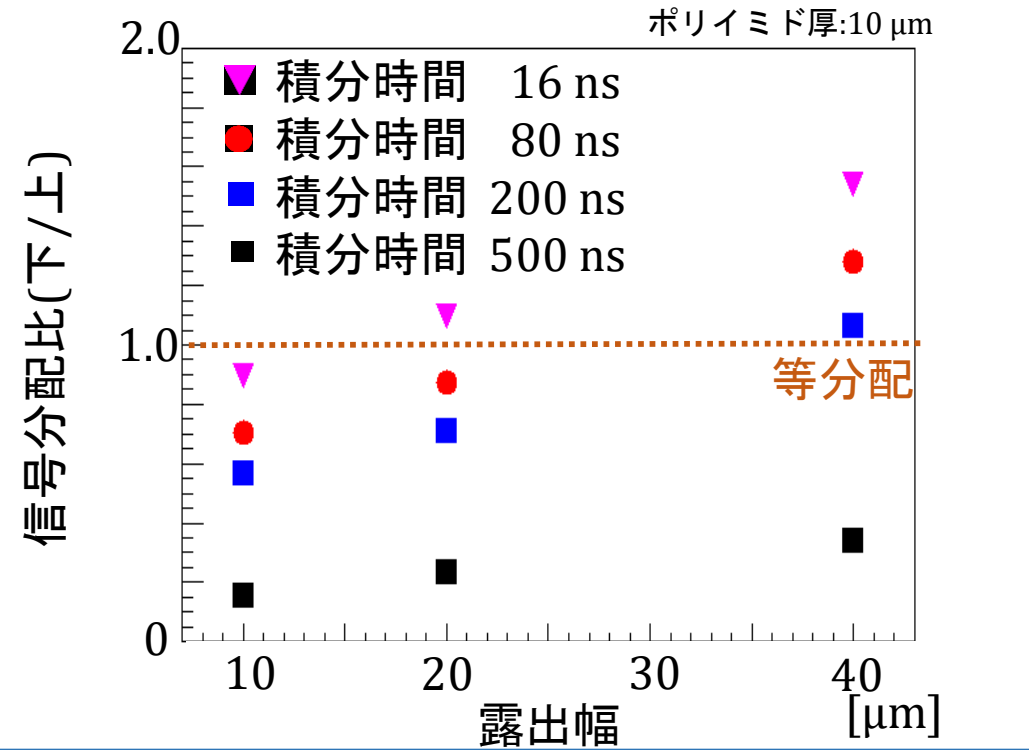
パラメータを変えても、電子雪崩は  
起こり電子は増幅された。  
有効ゲイン(=平均ゲイン×回収効率)は  
露出幅 **小** ゲイン **大**

✓ カソード信号は分割されるのか?

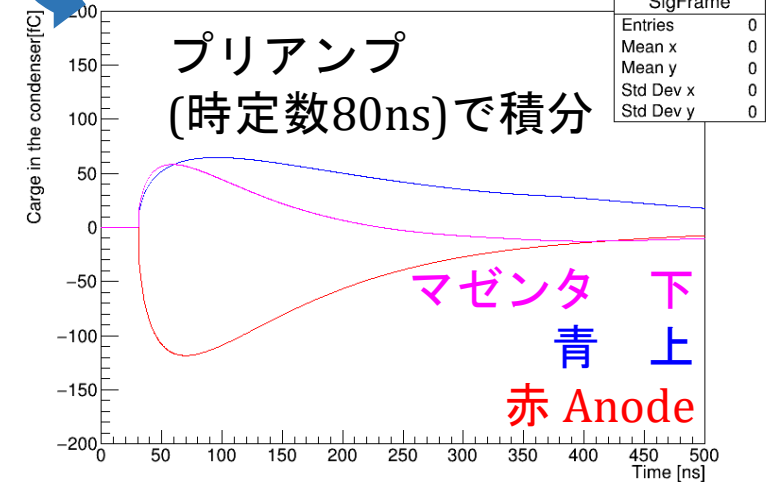
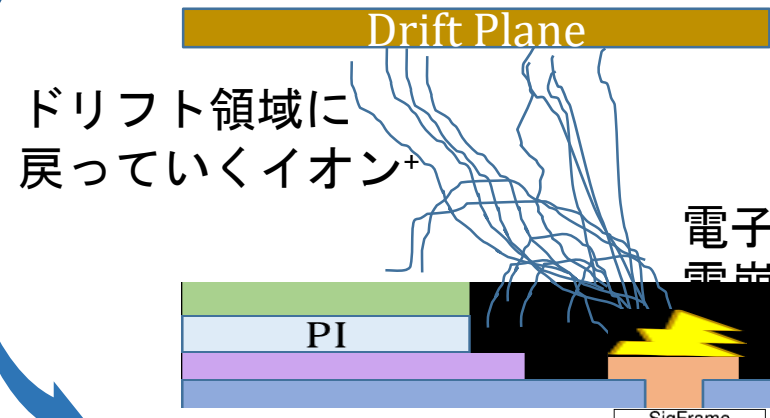
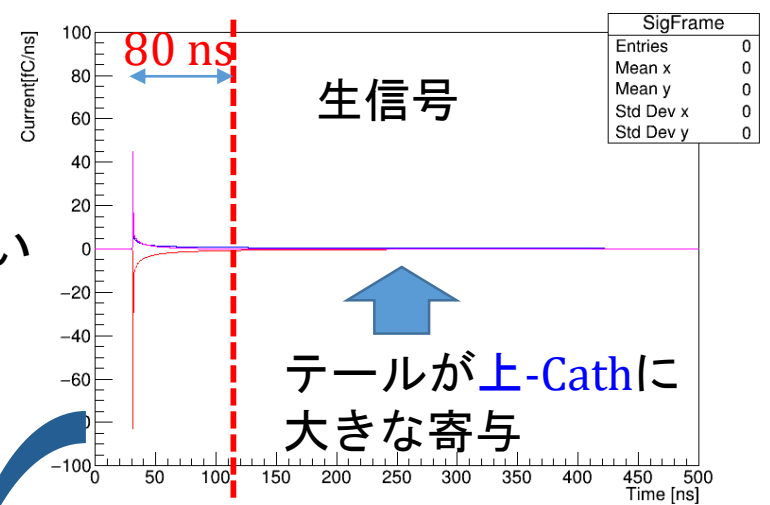
# 上,下-Cathodeの信号分配

上,下-Cathodeの信号の大きさが同じくらい  
 ⇒同じアンプで読み出せるので(経済的に)うれしい

信号の大きさの比の平均値vs下-Cathの露出幅



時定数~80 nsで信号を切れば、  
 おおむねどの露出幅でも  
 同じアンプで読み出せる





# まとめ

## ガラス $\mu$ -PIC

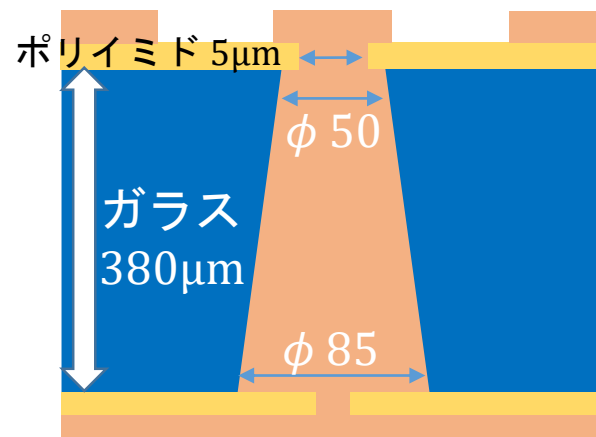
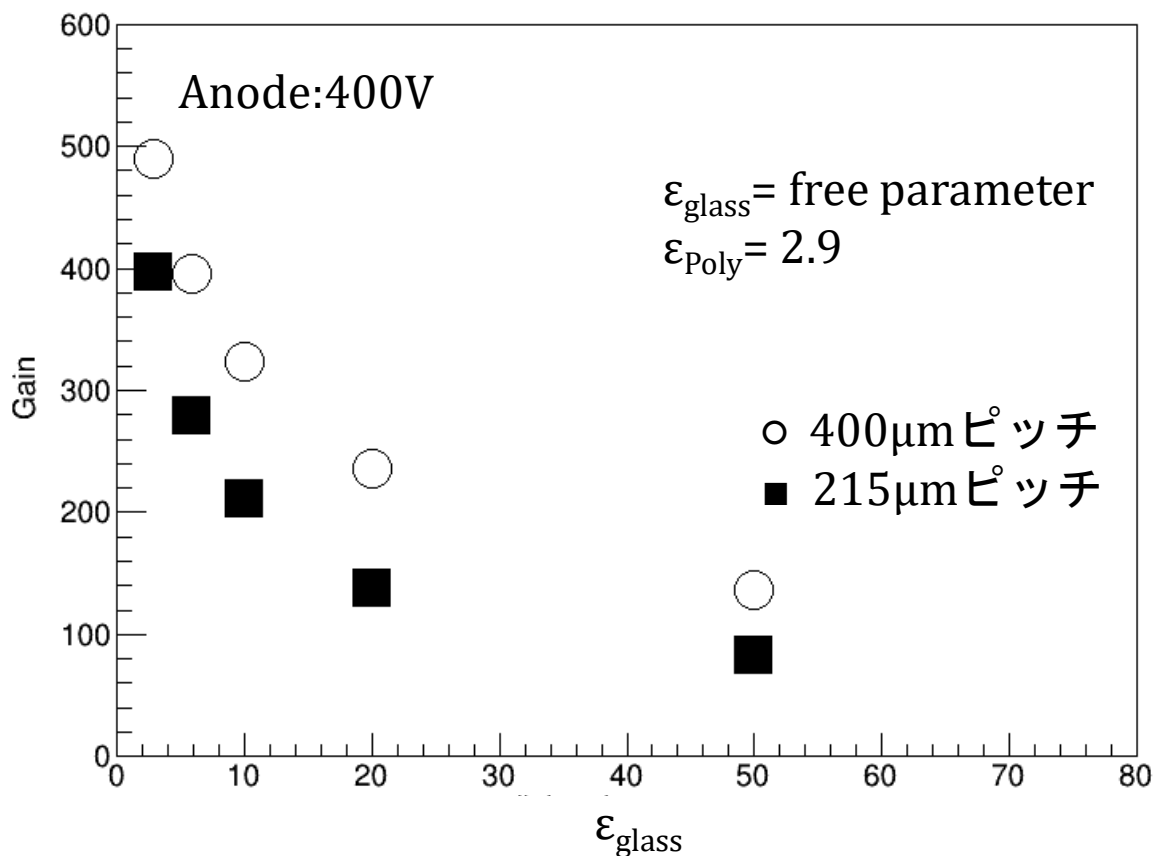
- TGV技術を使った、ガラス基板の $\mu$ -PIC(pitch 400  $\mu\text{m}$ , 215  $\mu\text{m}$ )を大日本印刷と共同開発。
- Fe55を使った動作試験を行い、両素子でX線信号を確認。
- 215  $\mu\text{m}$ ピッチTGV  $\mu$ -PIC でX線イメージング試験を行い、**2次元位置感度型検出器として動作**することを確認。
- シミュレーション値との乖離の原因としてガラスの誘電率に注目し、ポリイミド膜のないガラス $\mu$ -PICを製作し、試験中。

## 3軸 $\mu$ -PIC

- Cathodeを分割し、電子雪崩で生じるイオン・電子による**誘導電荷を直接**信号としてみる**3軸 $\mu$ -PICを考案**。
- 電子雪崩シミュレーションを行い、ジオメトリパラメータの変化に対する**電子雪崩生成の冗長性**を確認。
- 下-Cathodeの露出幅が小さいほど、ファクターレベルでゲインが上がる。
- 各ストリップへの信号分配を計算し、**積分時間 $\sim 80$  nsの回路を組み込めば、製作精度限界( $\sim 10$   $\mu\text{m}$ )まで露出幅を小さくしても、同じアンプで読み出せる程度に信号は分配される。**
- 試作機作成に向け、製作プロセスも含めて大日本印刷と協議中。

# ガラス基板の誘電率とゲインの関係

## ガラス誘電率とゲインの関係



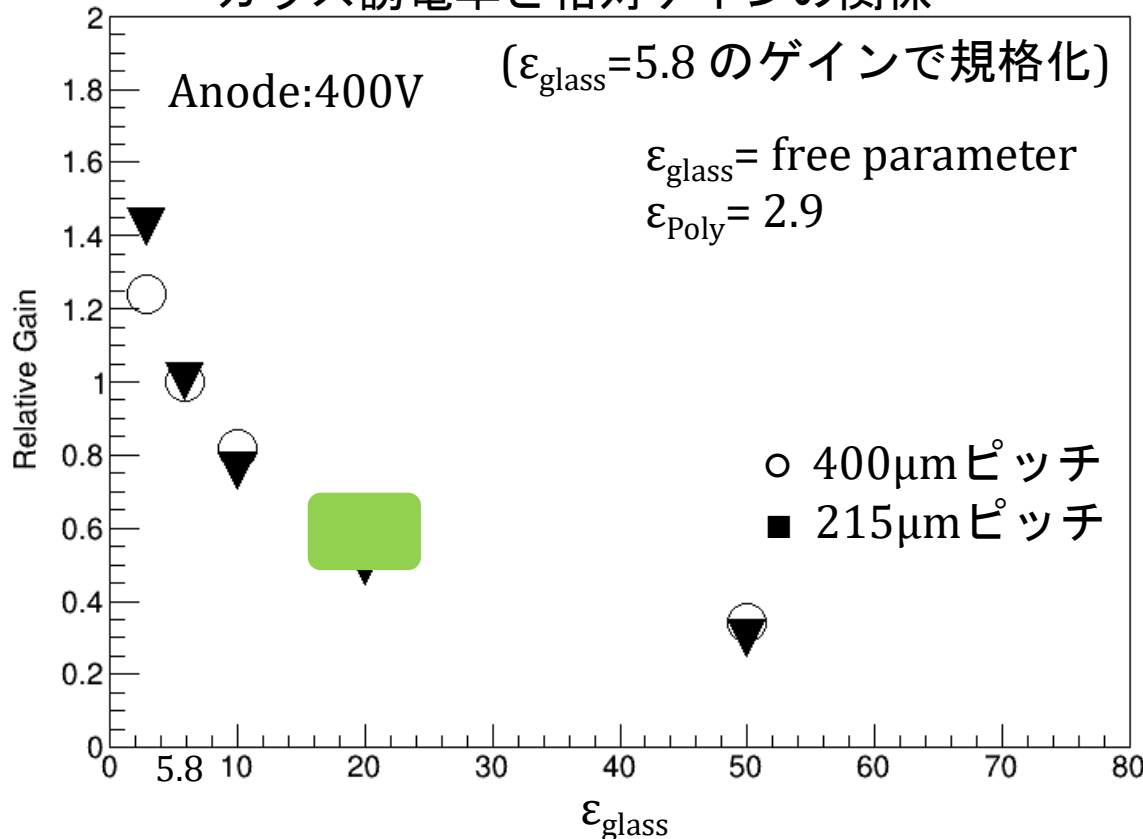
誘電率 ↗ でゲイン ↘ の傾向

ゲインの降下を説明するのか?

# ゲイン降下と実効的な誘電率

- 400 $\mu\text{m}$ ピッチ: 実測値 $\div$ シミュレーション値( $\epsilon_{\text{glass}}=5.8, \epsilon_{\text{Poly}}=2.9$ )  $\sim 0.7$
- 215 $\mu\text{m}$ ピッチ: 実測値 $\div$ シミュレーション値( $\epsilon_{\text{glass}}=5.8, \epsilon_{\text{Poly}}=2.9$ )  $\sim 0.5$

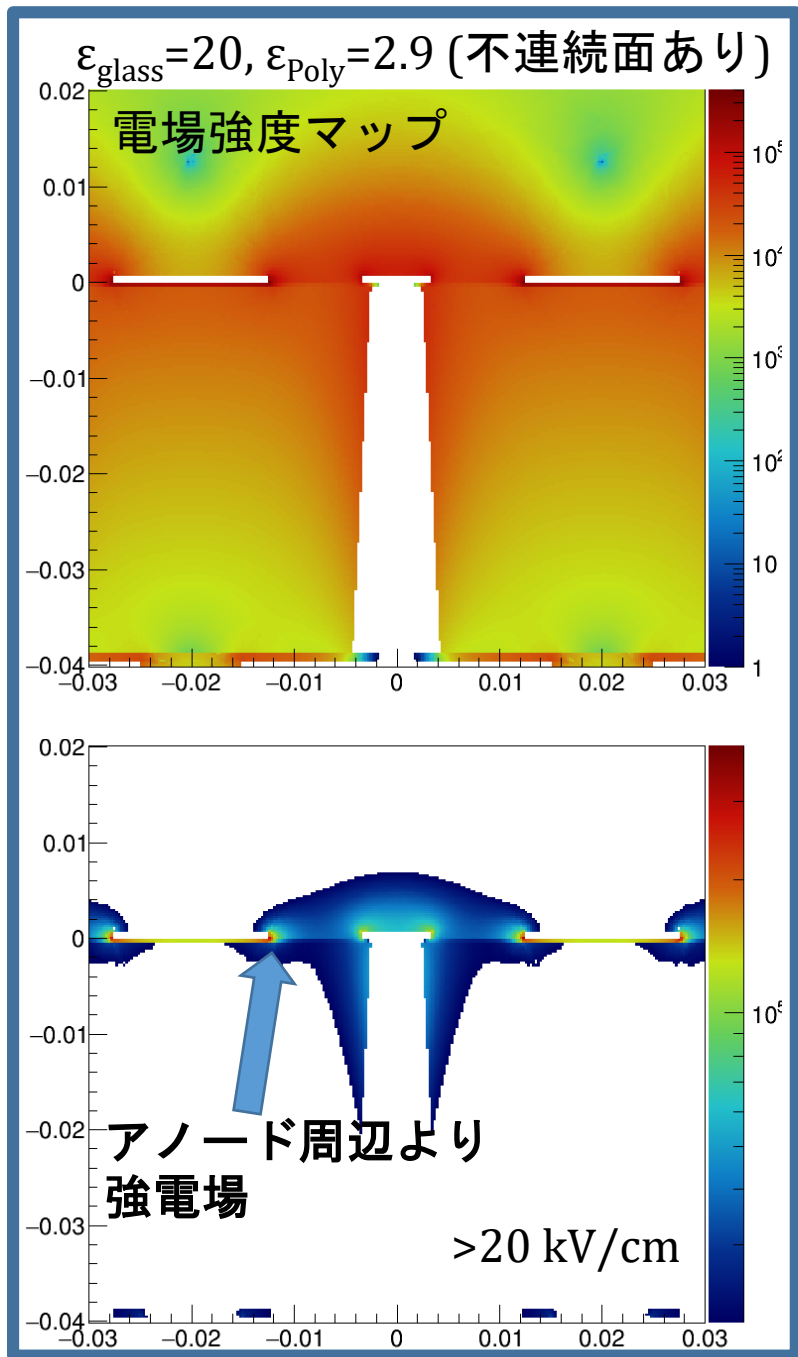
ガラス誘電率と相対ゲインの関係



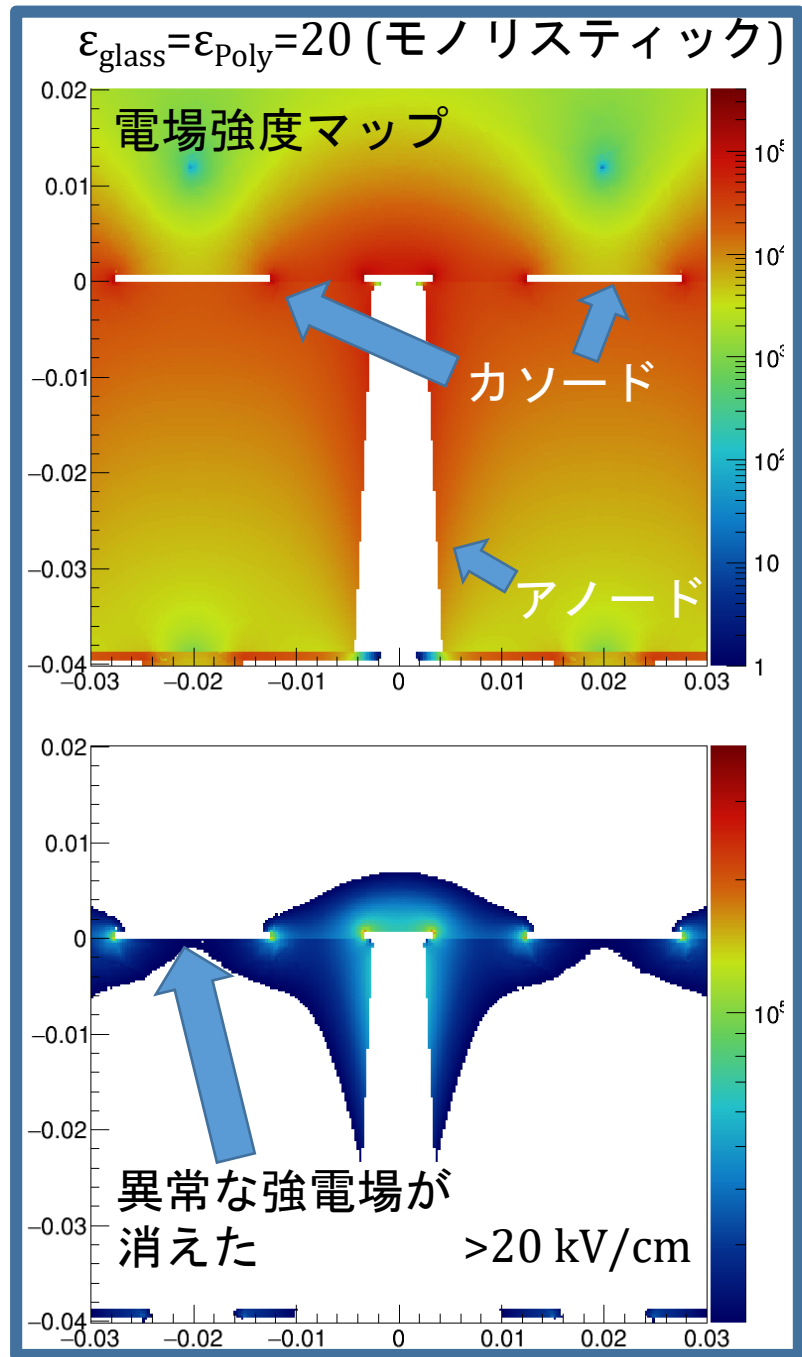
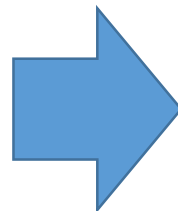
ゲイン降下を説明するのは

**領域**  $\Rightarrow \epsilon_{\text{glass}} \sim 20$  前後

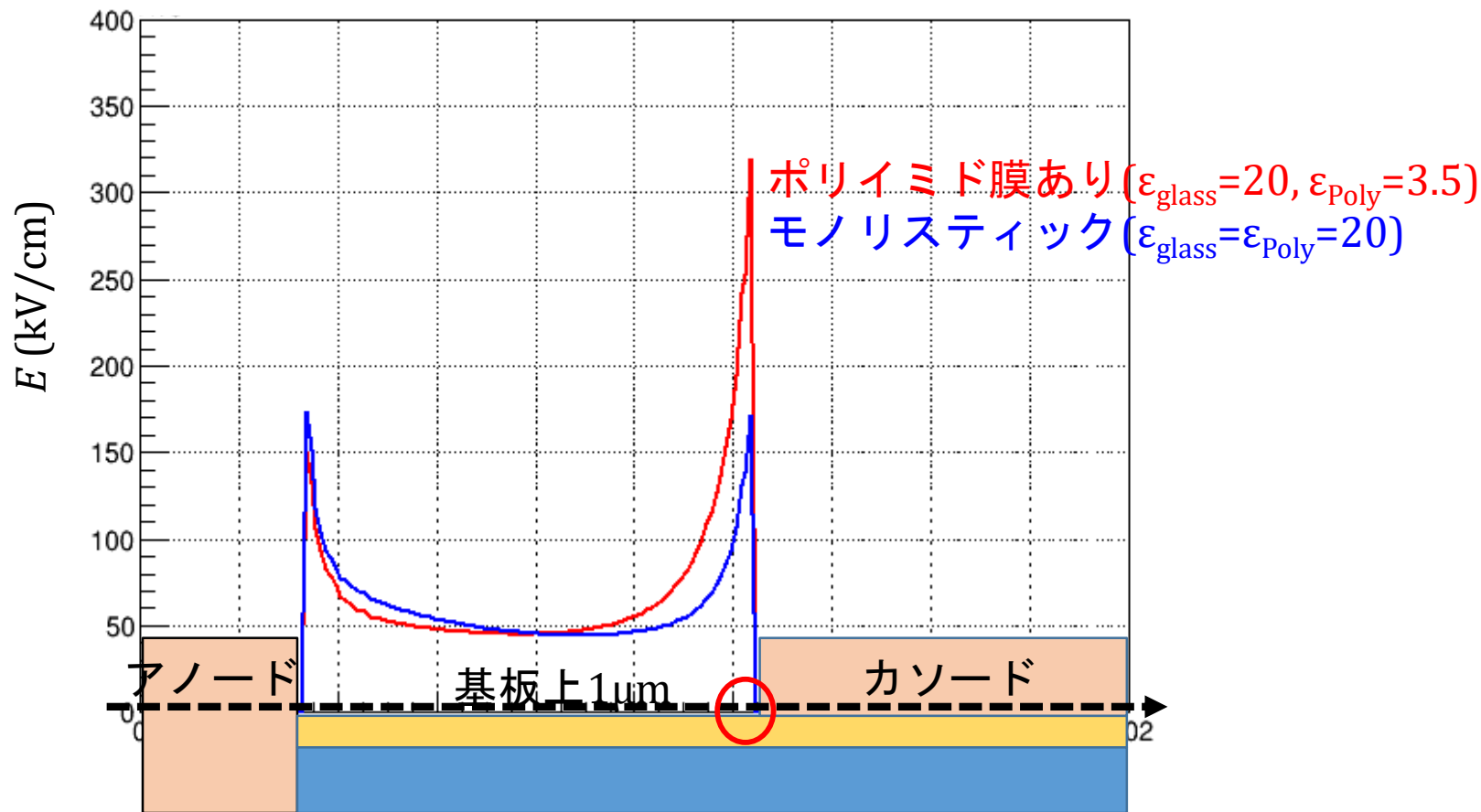
誘電率の大きな差が与える  
電場構造への影響は？



誘電率  
不連続面を  
とり除く



# 放電耐性への影響



3重点(カソード・ガス・基板)は強電場→放電に関係

