

# 修士学位論文

## DLC を用いた resistive $\mu$ -PIC の ガス増幅率向上のための研究

2022 年 2 月 4 日

専攻 物理学専攻  
学生番号 209s113s  
氏名 谷口 大悟

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程



## 概要

マイクロパターン構造を持つガス検出器 (MPGD : Micro Pattern Gas Detector) は高いレート耐性や高精度の時間分解能及び位置分解能を持ち、ATLAS 実験をはじめとする近年の加速器を用いた高エネルギー実験において開発が進められている。我々、神戸大学グループでは MPGD の一種である  $\mu$ -PIC (Micro Pixel Chamber) の開発研究を行っている。 $\mu$ -PIC、ひいては MPGD 全体の問題として、電極間の距離が短いために繰り返し起こる放電によって anode-cathode 間に同通路が形成され検出器として動作しなくなることがある。我々はその対策として陰極に高抵抗電極を用いた resistive  $\mu$ -PIC を開発したが、想定通りの性能は未だ確認できていない。本論文では  $\mu$ -PIC の基本性能の評価に加え、動作条件やその形状による増幅率の最適化のための方法を報告する。

# 目次

第 1 章	序論	5
第 2 章	ガス放射線検出器	6
2.1	粒子と物質の相互作用	6
2.2	検出原理	10
2.3	様々なガス検出器	15
第 3 章	$\mu$ -PIC と resistive $\mu$ -PIC	23
3.1	$\mu$ -PIC	23
3.2	resistive $\mu$ -PIC	25
3.3	DLC $\mu$ -PIC	28
第 4 章	実験のセットアップ及び DLC $\mu$ -PIC の基本性能評価	30
4.1	実験のセットアップ	30
4.2	DLC $\mu$ -PIC の基本性能	32
第 5 章	増幅率向上のための $\mu$ -PIC の動作状況の改善	37
5.1	anode ring	37
5.2	anode 径と増幅率の相関	41
5.3	議論と考察	44
第 6 章	増幅率向上のための $\mu$ -PIC の形状の改善案	46
6.1	異なるガス中での DLC $\mu$ -PIC の動作試験結果	46
6.2	印加電圧と Gain の相関	50
6.3	議論と考察	52
第 7 章	まとめ	54
第 8 章	謝辞	55



# 第1章 序論

近年の高エネルギー実験分野ではより高頻度の入射レートの実験が行われており、それに伴い検出器も高レートで正常に動作する性能が要求される。従来使用されてきた Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) は時間分解能、位置分解能ともに優れている [1]。しかし、 $10^4 \text{ cps/cm}^2$  以上の高レートでは耐えられないため、MWPC に代わる検出器として開発されたのがマイクロパターンガス検出器 (MPGD) である [2]。MPGD は PCB 上に微細構造の電極を取り付けたガス検出器であり、時間分解能、位置分解能、レート耐性が優れている。その一方で、ごく狭い電極間に高電圧を印加することによる電極間放電が起りやすく、検出器の破損や不感領域ができる原因となってしまう。

Micro Pixel Chamber( $\mu$ -PIC) は MPGD の一つであり、放電問題は重要な課題の一つである。放電による問題を解決する手段の一つとして神戸大学グループでは高抵抗素材を陰極に用いた resistive  $\mu$ -PIC を開発している。放電が起きた際に高抵抗による電圧降下が生じることによって放電を抑制することができ、実際に放電レートが下がっていることが先行研究で報告されている。また、高抵抗素材には Diamond Liked Carbon(DLC) を使用している。

本論文では、この DLC  $\mu$ -PIC の基本性能を評価するとともに、増幅率を最適化するための方法をガス構成及び検出器の形状の観点から実験及びシミュレーションのデータをもとに報告する。

## 第2章 ガス放射線検出器

ガス検出器はガス分子の電離によって粒子線や放射線の測定を行う。ガスで満たされた検出器内を粒子線が通過する際に起こる相互作用によって、励起された分子と電離された分子(イオン対)が生成される。このイオン対はこのままだと再結合してしまうが、検出器内に電場をかけることで陽イオンは電場方向に、電子は電場と逆方向にドリフトするため再結合を防ぐことができる。さらに強電場領域では生成された電子が加速され、ガスの種類に依存したエネルギー閾値(W値)を超えると周りのガス分子を電離する。この反応が連続的に起こることで電子は雪崩的に増幅する。このようにして生成される多くの電荷が移動することによって誘起された電気信号を測定することで粒子線の検出を行う。本章では放射線と物質の相互作用について述べ、様々なガス検出器を紹介する。

### 2.1 粒子と物質の相互作用

#### 2.1.1 荷電粒子と物質の相互作用

入射荷電粒子と物質の相互作用の一つとして、クーロン散乱が挙げられる。この相互作用によって、スピン 0, 電荷  $q$ , 質量  $M$ , 速度  $v$  の入射荷電粒子が単位長さ当たり失う平均エネルギーは式 2.1 に示す Bethe-Bloch の式に従う。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Dq^2n_e}{\beta^2} \left\{ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right\} \quad (2.1)$$

ここで  $m_e$  は電子の質量、 $n_e$  は電子密度、 $I$  は原子の平均イオン化ポテンシャルであり、係数  $D$  は式 2.2 で表される。

$$D = \frac{4\pi\alpha^2 h^2}{m_e} = 5.1 \times 10^{-25} [\text{MeVcm}^2] \quad (2.2)$$

また、典型的な荷電粒子の一つであるミューオンの運動量に対するエネルギー損失のグラフを図 2.1 に示す。横軸はミューオンの運動量、縦軸はエネルギー損失の平均値である阻止能である。

スピン  $\frac{1}{2}$  の粒子であるフェルミオンの場合は Bethe-Bloch の式 2.1 と少し形が異なるが、その差は無視できるほど小さいため同様の式に従うとして良い。式 2.1 によると、 $\beta\gamma$  の値

によってエネルギーの失い方が異なる。  $0.1 \leq \beta\gamma \leq 1.0$  の領域ではエネルギー損失は  $\beta$  の二乗にほぼ反比例し、  $10 \leq \beta\gamma \leq 1000$  の領域でエネルギー損失は非常に小さくなる。特に  $\beta\gamma=3\sim 4$  の領域でエネルギー損失は最小となり、式 2.3 で表される。

$$-\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{min} \approx 3.5 \frac{Z}{A} [MeVg/cm^2] \quad (2.3)$$

ここで  $\rho$  は粒子が通過する物質の密度、  $Z$  は物質の原子番号、  $A$  は物質の原子量である。この領域は最小イオン化領域と呼ばれ、この領域のエネルギーを持つ粒子を Minimum Ionizing Particle(MIP) と呼ぶ。様々な物質について式 2.1 を計算したものを図 2.2 に示す。

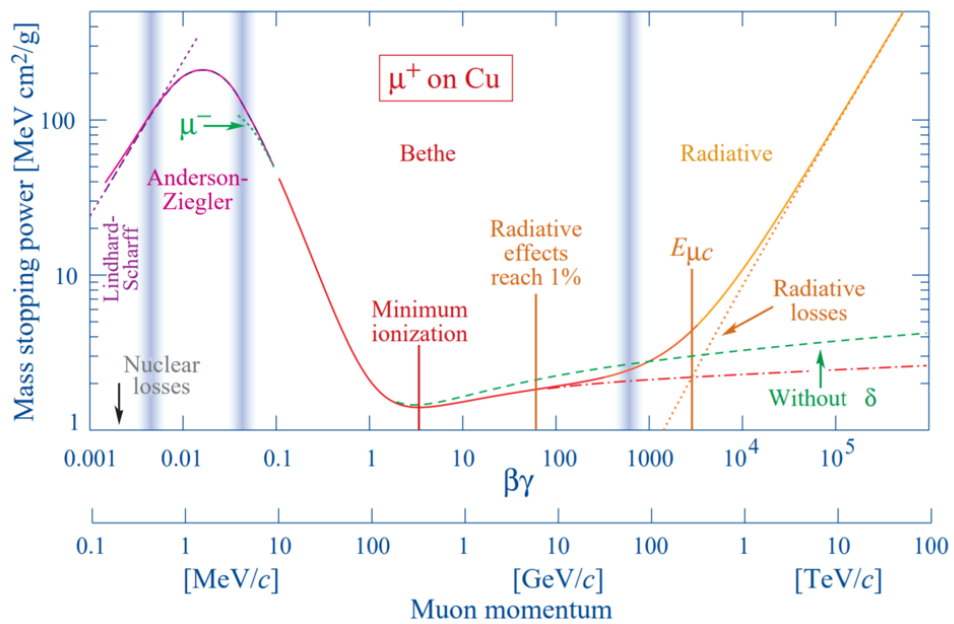


図 2.1 銅中におけるミューオンのエネルギー損失 [3]

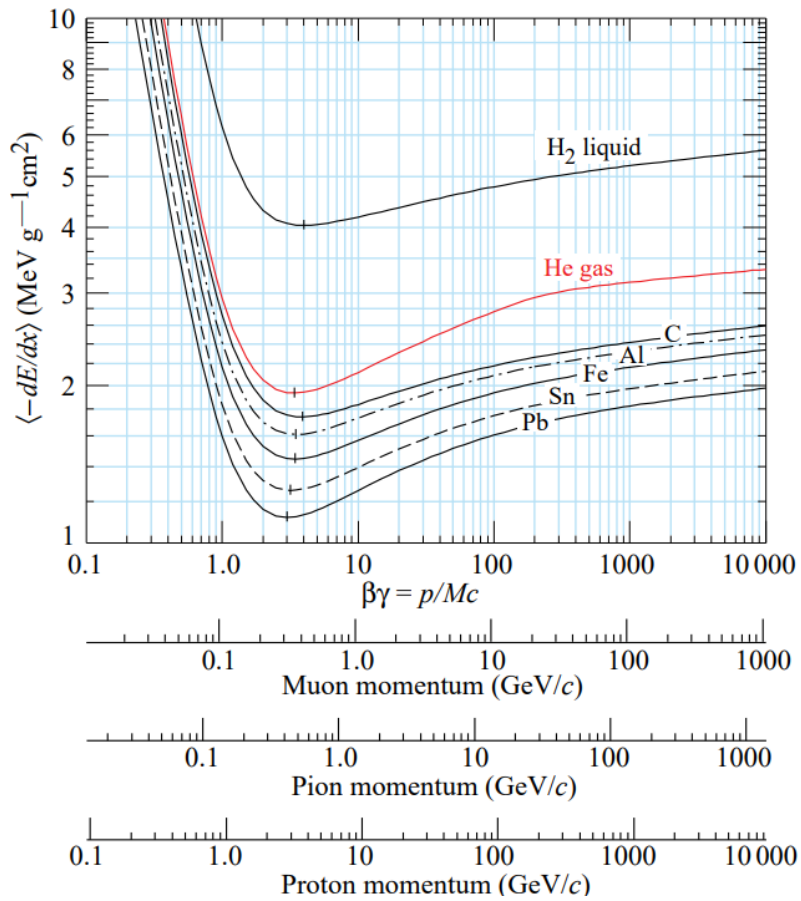


図 2.2 様々な物質に対する粒子のエネルギー損失 [3]

### 2.1.2 光子と物質の相互作用

X 線、 $\gamma$  線と物質の相互作用として、光電効果、コンプトン散乱、対生成の 3 つがあり、それぞれの散乱断面積は光子のエネルギー  $E$  と物質の原子番号  $Z$  に依存する。K 殻との散乱において、光電効果は  $1/E^{3.5}$  及び  $Z^5$  に比例し、コンプトン散乱は  $1/E$  及び  $Z$  に比例する。そして対生成は  $E > 10\text{MeV}$  を超えるとそのエネルギーに関わらず支配的になり  $Z^2$  に比例する。Ar : CO<sub>2</sub> = 93 : 7 の混合気体における光子のエネルギーと質量吸収係数の関係を図 2.3 に示す。

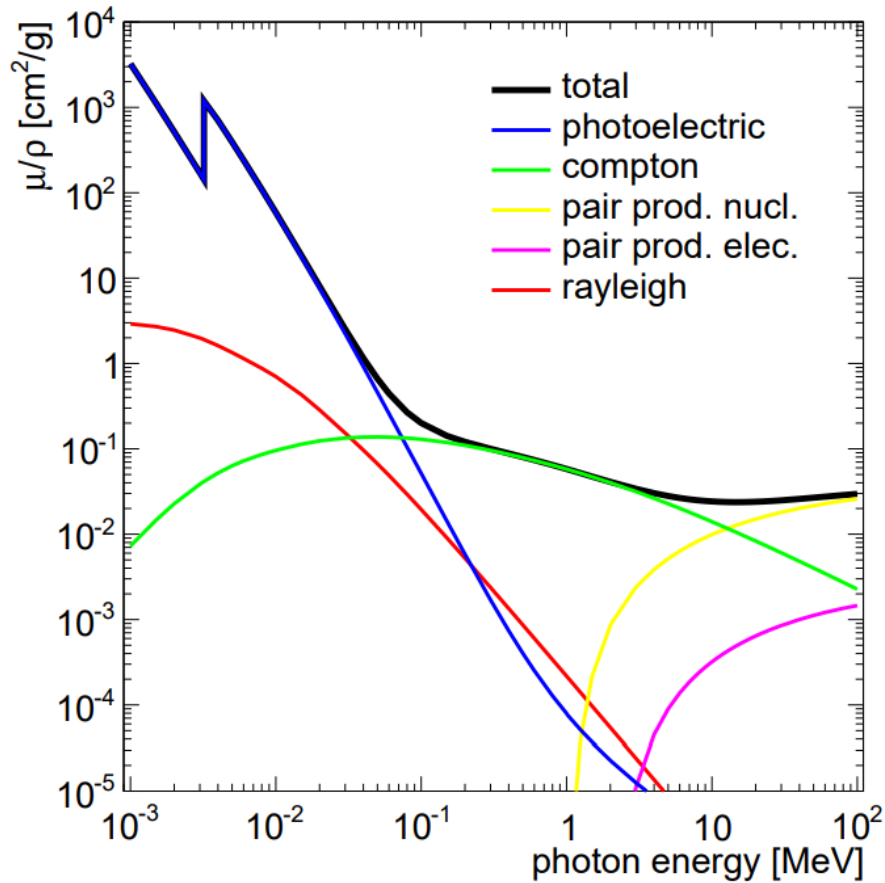


図 2.3 Ar : CO<sub>2</sub> = 93 : 7 の混合気体における光子のエネルギーと質量吸収係数の関係 [4]

光電効果とは、 $\gamma$  線が全エネルギーを軌道電子に与え、その電子が電離する反応であり、光子のエネルギーがオーダー  $10^2$  keV 以下のときに支配的な相互作用である。この過程で放出される電子を光電子と呼び、そのエネルギー  $E_e$  は  $\gamma$  線のエネルギー  $E_\gamma$  と軌道電子の束縛エネルギー  $E_b$  を用いて式 2.5 で表される。

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.5)$$

コンプトン散乱とは光子と軌道電子の衝突により電子が原子から弾き飛ばされ、光子はその分のエネルギーを失う現象である。散乱前後の光子のエネルギーをそれぞれ  $E_\gamma$ 、 $E'_\gamma$  とし式 2.6 のように表される。

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma/m_e c^2)(1 - \cos\theta)} \quad (2.6)$$

ここで、 $c$  は光速、 $\theta$  は光子の散乱角である。この相互作用は数百 keV から 10MeV の領域で支配的になっている。

対生成は光子が消滅し電子陽電子対になる現象であり、光子のエネルギーは全て電子対に与えられる。電子、陽電子のエネルギーをそれぞれ  $E_+$ 、 $E_-$  とするとエネルギー保存則は式 2.7 のように表される。

$$E_\gamma = E_+ + E_- + 2m_e c^2 \quad (2.7)$$

式 2.7 より、この相互作用は光子のエネルギーが電子の静止質量の 2 倍である 1.022MeV 以上でなければ起こらない。10MeV 以上の領域ではこの相互作用が支配的となっている。

## 2.2 ガス検出器の動作原理

### 2.2.1 ガス分子の電離

検出器内を満たすガス中に粒子が入射すると、その飛跡に沿ってガス分子が電離され電子が生成される。これらの電子のことを初期電子と呼び、その数  $N_T$  は粒子のエネルギー損失  $\Delta E$  に比例し、式 2.4 で表される。

$$N_T = \frac{\Delta E}{W_1} \quad (2.8)$$

ここで  $W_1$  は入射粒子がガス分子を電離するときに失う平均エネルギーであり、 $W$  値と呼ばれる。混合ガスを用いる場合には、励起原子がより低いイオン化電位を持つ第二の気体分子に衝突して電子イオン対を生成するペニング効果と呼ばれる過程が存在する。励起されたガス分子は炭化水素などの多原子分子からなるクエンチガスと反応して電子を生成するため、混合ガスの場合は  $W$  値が大きくなる。

図 2.4 に様々なガスに対する  $W$  値を示す。この値はガスの種類や放射線の種類及びエネルギーには大きく依存せず、ほとんど一定の値をとることが実験的に知られている。また、図 2.4 の  $E_x$  は第一励起エネルギー、 $E_I$  はイオン化エネルギー、 $N_P$  は電子とガス分子の一回の衝突によって生成されるイオン対の総数を示している。

## 2.2.2 イオン及び電子の移動

入射粒子によって生成されたイオン電子対は信号として検出される前に再結合する可能性がある。また、eV 程度の低いエネルギーを持つ電子は電気陰性度の高い気体に捕獲される可能性もある。それらの事象を防ぐためにガス中に電場をかけることで陽イオンは電場の方向へ、電子は電場と逆方向へ引き付けられる。これにより再結合を抑制することができるが、この時の陽イオンのと電子のドリフト速度は大きく異なる。

まずはイオンの移動速度について述べる。イオンは電場によって加速され、気体分子と衝突しては止まるということを繰り返しながら移動する。平均ドリフト速度  $v_D^+$  は  $\Delta E$  に比例し、式 2.9 で表される。

$$v_D^+ = \mu^+ E \frac{p_0}{p} \quad (2.9)$$

ここで  $\mu^+$  はイオンの移動度、 $p_0$  は標準圧力 ( $1 \times 10^5 Pa$ ) を表す。イオンの移動度は図 2.5 に示すようにガス分子と気体の組み合わせによって決まる。

Gas	Density, $\text{mg cm}^{-3}$	$E_x$ eV	$E_I$ eV	$W_I$ eV	$dE/dx _{\min}$ $\text{keV cm}^{-1}$	$N_P$ $\text{cm}^{-1}$	$N_T$ $\text{cm}^{-1}$
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH <sub>4</sub>	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO <sub>2</sub>	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF <sub>4</sub>	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

図 2.4 様々なガスにおける W 値 [5]

気 体	イオン	移動度 $\mu^+$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )
He	He <sup>+</sup>	10.2
Ar	Ar <sup>+</sup>	1.7
H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.7
Ar	(OCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.51
<i>iso</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	(OCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0.55
(OCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub>	(OCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0.26
Ar	<i>iso</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> <sup>+</sup>	1.56
<i>iso</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>iso</i> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> <sup>+</sup>	0.61
Ar	CH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.87
CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.26
Ar	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.72
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.09

図 2.5 様々なガスにおけるイオンの移動度 [6]

次に電子の移動速度について述べる。電子もイオンと同様に電場によって加速されるが、平均自由行程が長いために衝突間で得るエネルギーはイオンよりも多い。Ar と電子の衝突断面積と電子のエネルギーの関係を図 2.6、異なるガス中での電子のドリフト速度を図 2.7 に示す。

### 2.2.3 雪崩増幅

上記のようにイオンと電子はともにドリフトするが、イオンはその移動度の小ささから衝突間にほとんど電場からエネルギーを得ることができない。一方電子はその平均自由行程の長さから衝突間に電場によって加速され、大きな運動エネルギーを持つ。加速された電子がさらに別のガス分子を電離するのに十分なエネルギーを持っているとき、電離は連続的に起こる。このようにして電子が増幅する過程のことを雪崩増幅と呼び、一気圧のガス中においては電場の強さが  $10^6$  [V/m] 以上の領域で発生する。以下に雪崩増幅の過程について記述する。

電子の平均自由行程の逆数は第一タウンゼント係数  $\alpha$  と呼ばれ、単位ドリフト距離あたりに生成されるイオン対の総数を表す。位置  $x$  での電子数を  $n$  とすると、電子が  $dx$  ドリフト



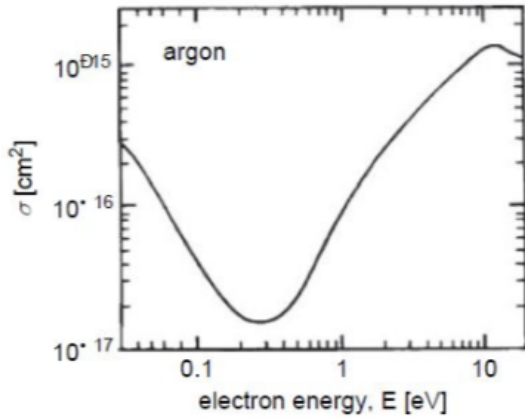


図 2.6 Ar と電子の衝突断面積と電子のエネルギーの関係 [7]

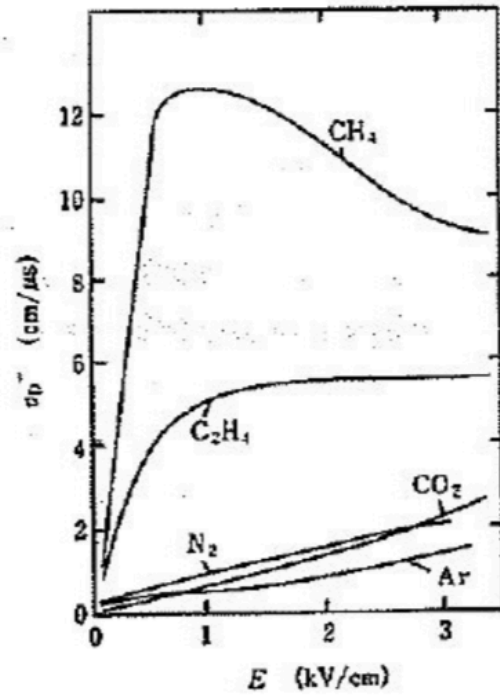


図 2.7 異なるガス中での電子のドリフト速度 [7]

したときの電子の増加分  $dx$  は  $\alpha$ 、 $n$ 、 $dx$  を用いて式 2.10 のように表される。

$$dn = \alpha n dx \quad (2.10)$$

電場が一定だと仮定すると、電子の  $\alpha$  が位置  $x$  に依らないため増幅率  $M$  は初期電子数  $n_0$  を用いて式 2.11 のように表される。

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (2.11)$$

電場が一定ではない場合、 $\alpha$  は  $x$  に依存する関数となるため、増幅率  $M$  は式 2.10 の両辺積分を用いて式 2.12 のように表される。

$$M = \exp\left[\int \alpha(x) dx\right] \quad (2.12)$$

増幅の様子を図 2.8 に示す。電子のドリフト速度はイオンのそれと比べてはるかに大き

く、増幅された電子が進行方向前方に密集しているのに対しイオンは後方に取り残される形になっている。一方で、雪崩増幅が収束することなく最終的に放電に至る場合がある。この時の総電子数の閾値は Raether limit と呼ばれ、式 2.13 で与えられる。

$$M = \frac{10^8}{n_0} \quad (2.13)$$

Raether limit の実効値は検出器の形状などにより変化する。マイクロパターンガス検出器 (MPGD) などのように増幅領域が狭い (数百  $\mu\text{m}$ ) 検出器の場合は  $\alpha$  の値が小さくなるため、 $Mn_0=10^6\sim 10^7$  ほどになる。すなわち MPGD では放電が起きやすいということであり、放電問題は MPGD にとって長年の課題となっている。

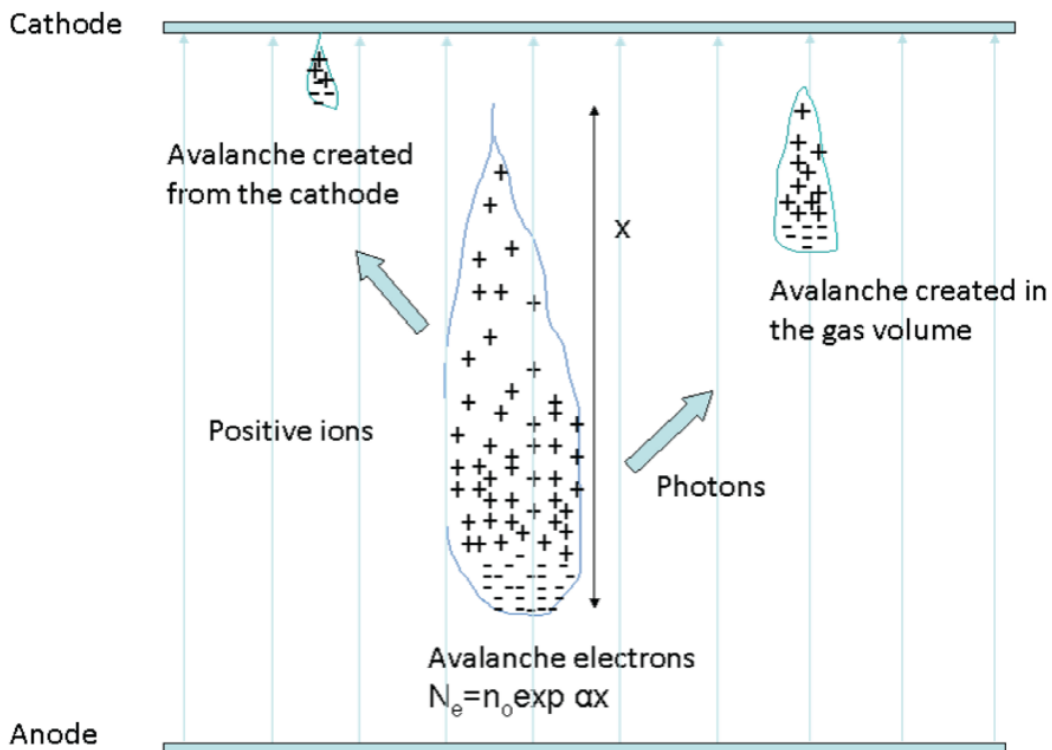


図 2.8 雪崩増幅過程における電子とイオンの分布図 [8]

## 2.3 様々なガス検出器

ガス検出器は基本的に上記の構造を有しているが、その形状は様々である。ここでは今までに開発されてきた代表的なガス検出器をいくつか紹介する。

### 2.3.1 比例計数管

比例計数管は最も基本的なガス検出器の一つである。形状は図 2.9 に示す通り、陽極の芯線の周りを円筒状の陰極が囲む構造をしている。中心から距離  $r$  の地点での電場  $E(r)$  は、陽極の半径  $a$ 、陰極の内径  $b$ 、印加電圧  $V$  を用いて式 2.14 及び図 2.10 のように表される。

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (2.14)$$

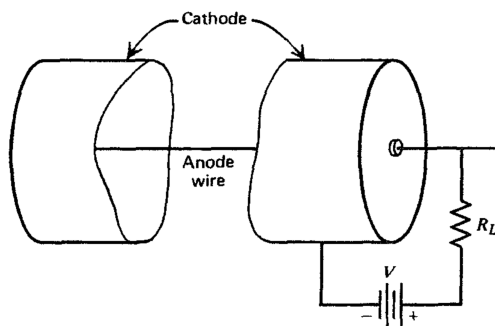


図 2.9 比例計数管の模式図 [9]

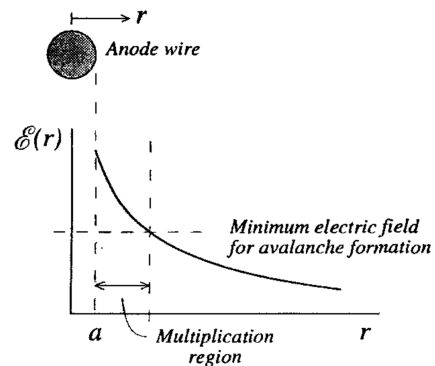


図 2.10 陽極芯線との距離と電場の関係 [9]

雪崩増幅によって生成された電子や陽イオンがそれぞれ陽極、陰極にドリフトすることで計数管内の静電エネルギーが変化し、陽極の電位も変化する。これを出力パルスとして観測する。増幅率は  $10^3 \sim 10^6$  程度を達成している。

### 2.3.2 Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)

MWPC は Ground 電位の二枚の平行基板の間に多数の陽極線を設置しており、比例計数管を並べたような構造をしている。1968 年に Georges Charpak 氏によって開発された [1]。陽極線に正の電圧を印加することで平行基盤が陰極としてはたらき、図 2.11 のような電場

を作り出す。陽極線にドリフトしてきた電子が陽極線近くで雪崩増幅を起こすことで負のパルスが生じ、隣の陽極線には正のパルスが生じる。このようにして誘起された電荷を信号として検出している。また、陰極として用いている平行基盤を多数のワイヤーに置き換えて陽極線と直行させることにより二次元の読み出しが可能となるデザインも同じく Charpak 氏により開発されている。

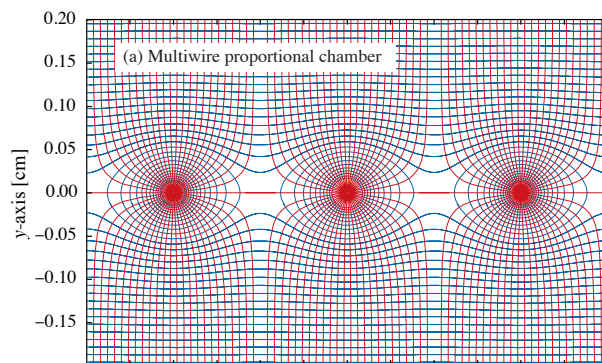


図 2.11 MWPC の電場構造 [10]

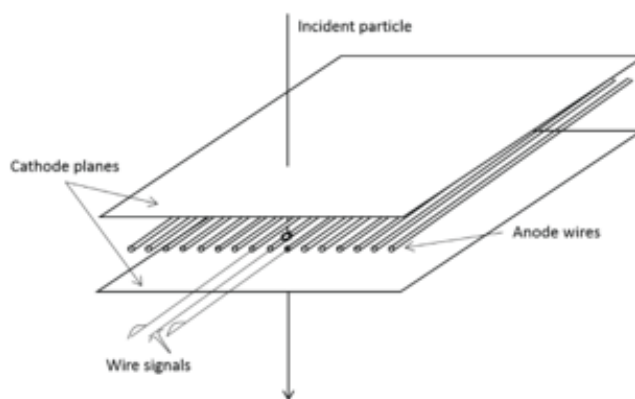


図 2.12 MWPC の模式図 [8]

### 2.3.3 Micro Strip Gas Chamber(MSGC)

前述した MWPC では陽極ワイヤーのピッチはおよそ 1mm 程度までしか小さくすることができなかった。これは陽極線間の距離が小さすぎると電气的な反発が起きてしまうためである。そのため陽極線に垂直な方向に対する位置分解能には限界 ( 0.3mm 程度) がある。この問題を解決するために A.Oed 氏によって開発された検出器が MSGC である [11]。Multi-Chip-Module 技術を用いることで、およそ  $10\mu\text{m}$  の直径を持つ陽極ストリップを絶縁体上に形成することが可能になった。これにより MWPC と同等の高電場を実現しながら位置分解能を大幅に改善することができた。MWPC の構造及び電場構造を図 2.13、図 2.14 に示す。またそれに加え anode-cathode 間の距離が小さくなったことで、増幅の際に生成される陽イオンが MWPC よりも早く陰極に吸い寄せられるためにスペースチャージ効果が抑えられ、MWPC よりも計数容量が 2 ケタ多くなった (図 2.15)

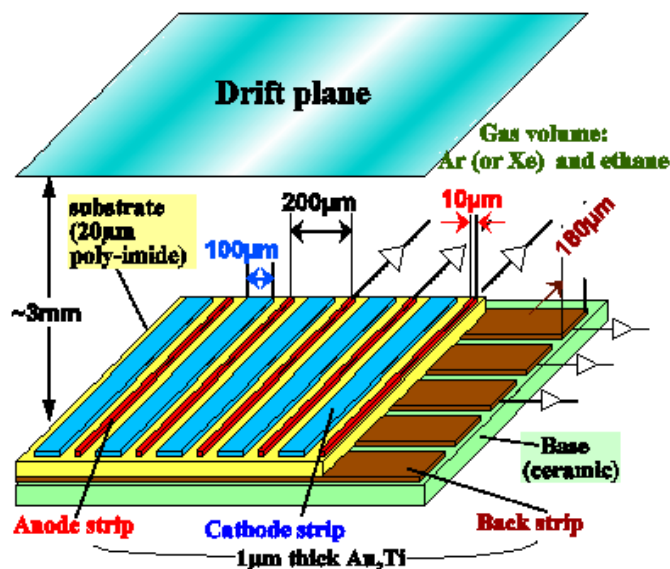


図 2.13 MSGC の構造模式図 [11]

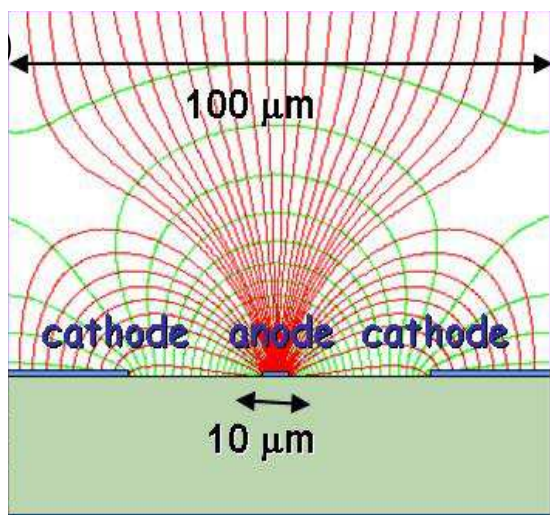


図 2.14 MSGC の電場構造 [10]

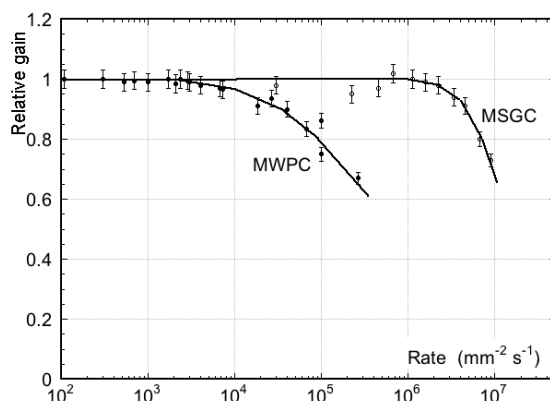


図 2.15 MWPC と MSGC の計数率 [10]

### 2.3.4 Gas Electron Multiplier(GEM)

GEM は 1997 年に F.Sauli らによって開発された [10]。絶縁体の両面に金属が被覆されており、格子状の高密度の穴が開いた構造をしている。図 2.16 は標準的な GEM の電子顕微鏡による拡大写真である。両面の電極に政府の電圧を印加することで穴の内部に高電場が形成され (図 2.17)、穴に入射した電子は雪崩増幅を起こす。読み出し部分は無く増幅部分のみを有しており、読み出し基板は別に設置されることが多い。また GEM を複数枚積み重ねて動作させることも可能であり、より高い増幅率を実現することができる。GEM を 3 枚積み重ねた triple-GEM の構造及び増幅の様子を図 2.18 に示す。また図 2.19 は積み重ねる GEM の個数を変化させたときの増幅率の変化を示しており、triple-GEM は増幅率  $10^5$  以上を達成していることがわかる。また GEM1 枚あたりに印加する電圧を抑えながら複数枚 GEM を積み重ねることで、放電を抑制しながら増幅率を向上させることも可能である。実際に CMS 実験のエンドギャップの一部に使用されている。

### 2.3.5 Micromegas(Micro-mesh-gaseous structure)

Micromegas は 1996 年に Y.Giomataris によって開発された一次元読み出しの並行平板型 MPGD である [13]。模式図及び増幅の様子を図 2.20 に示す。読み出しストリップの約  $100\mu\text{m}$  上に金属メッシュが、そのさらに約  $3\text{mm}$  上にドリフト電極がある構造になっており、電場構造は図 2.21 のようになっている。ドリフト陰極と陰極メッシュ間のドリフト領域で電子がメッシュ部分にドリフトされ、陰極メッシュと陽極ストリップ間の増幅領域で雪崩増幅が起こる。増幅領域を狭くすることで生成されたイオンが素早く陰極に吸収されるた

め、レート耐性が向上する。増幅率はおよそ  $10^5$  を達成している。(図 2.22)

またより高レートでの使用を想定して、陽極に抵抗電極を使用し陽極下の絶縁体内部に読み出し用の金属電極を設置した抵抗性 Micromegas が開発されている (図 2.23)。抵抗電極により放電の抑制は期待できるが、抵抗が大きすぎると流れる電流に比例した電圧降下の影響が大きくなることにより検出器の動作の安定性が失われてしまうという欠点もある。実際に ATLAS 実験における New Small Wheel の一部として使用されている。

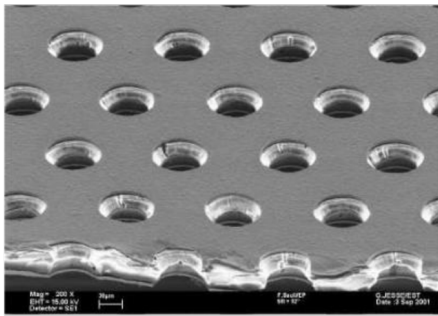


図 2.16 GEM の電極付近の拡大図 [10]

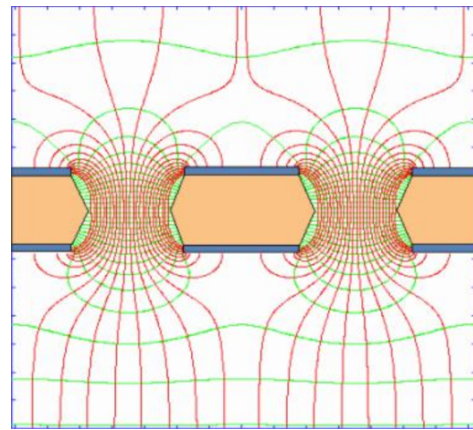


図 2.17 GEM の電極間の電場構造 [12]

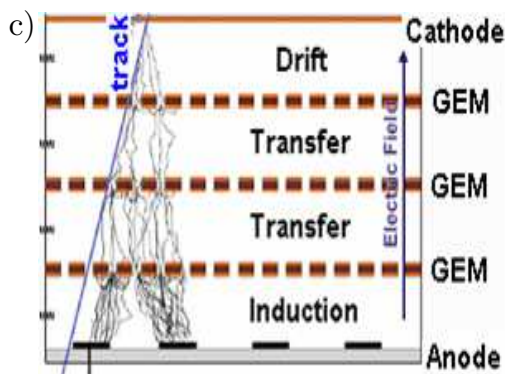


図 2.18 triple-GEM の構造 [10]  
生成された電子は積み重ねられた三段の GEM をそれぞれ通過して増幅される

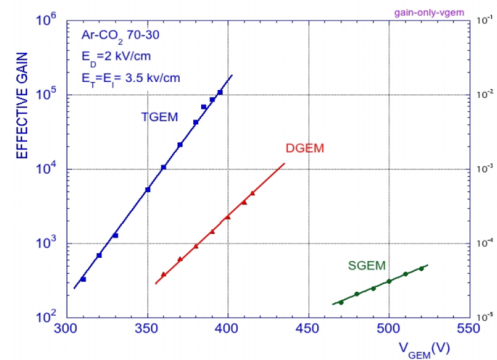


図 2.19 GEM の枚数ごとの増幅率と印加電圧の関係 [12]: 一段 (緑:SGEM)、二段 (赤:DGEM)、三段 (青:TGEM) の GEM を用いている



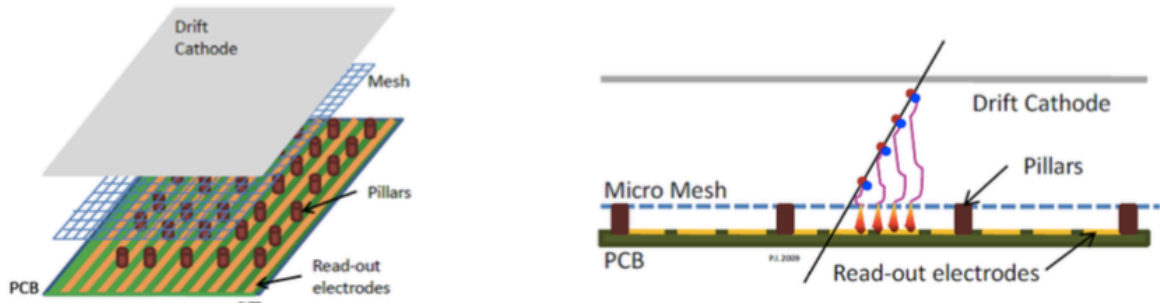


図 2.20 Micromegas の構造模式図 [13]

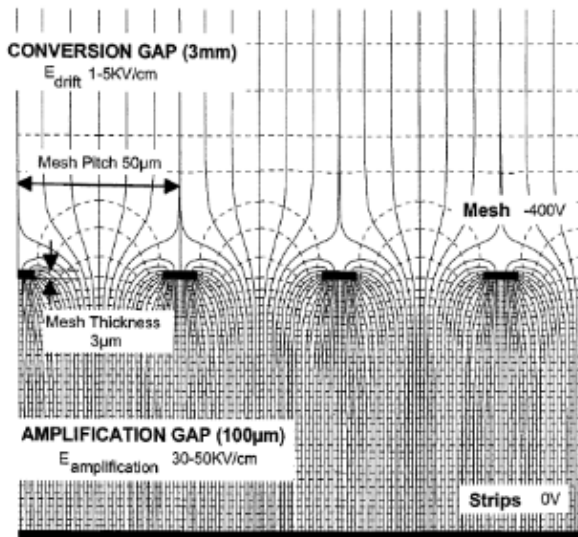


図 2.21 Micromegas の電場構造 [14] に

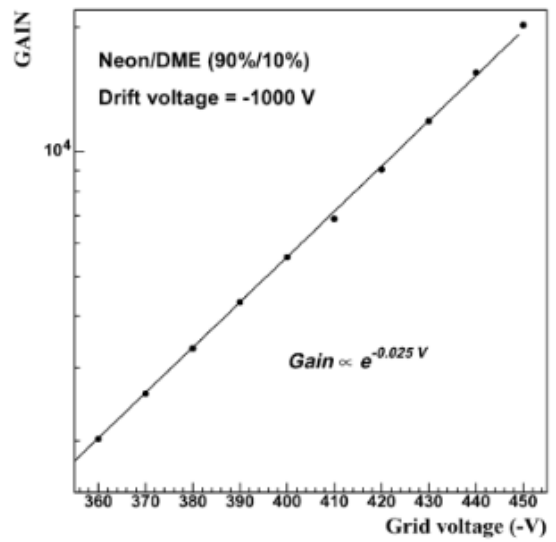


図 2.22 Micromegas の印加電圧  
に対する増幅率 [15]



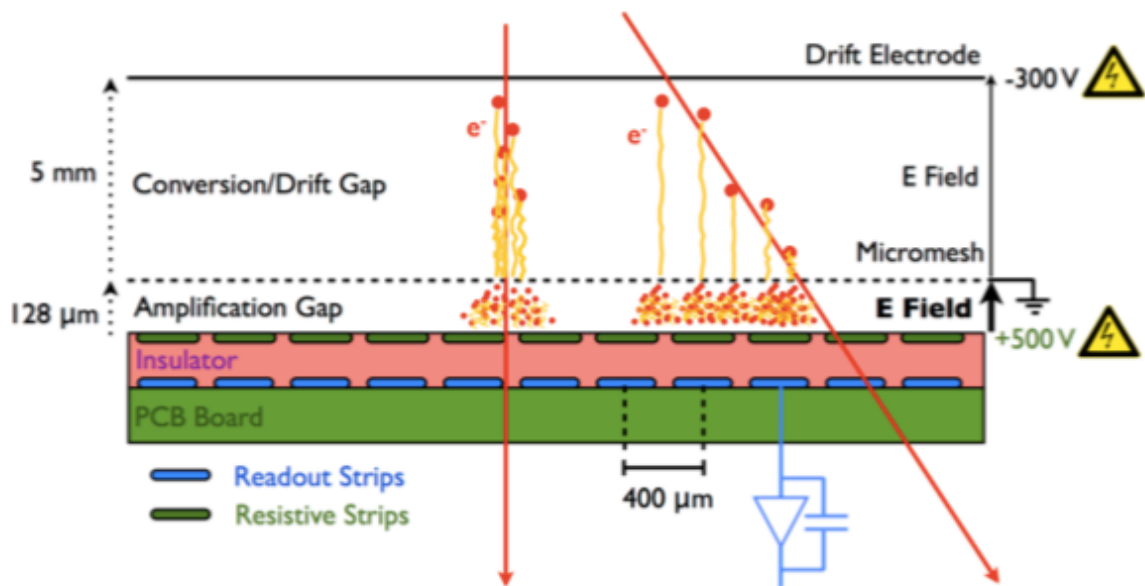


図 2.23 抵抗性 Micromegas の構造模式図 [13]

### 2.3.6 $\mu$ -RWELL(Micro resistive well)

$\mu$ -RWELL は 2016 年に G.Bencivenni らによって開発された MPGD である [16]。図 2.24 にその構造を示す。Drift Cathode と  $\mu$ -RWELL PCB の 2 つの要素からなっており、ドリフト領域で生成された電子が電場に沿って増幅領域までドリフトされる。 $\mu$ -RWELL PCB は well 型の構造をしており、上面に電極、下面に高抵抗素材が設置されている。この両面に電圧を印加することで高電場を形成し、well 内で雪崩増幅を起こす。大面積の製造に対応しているというメリットもあるが、先述した抵抗性 Micromegas と同様電圧降下により動作の安定性が失われてしまうという欠点もある。

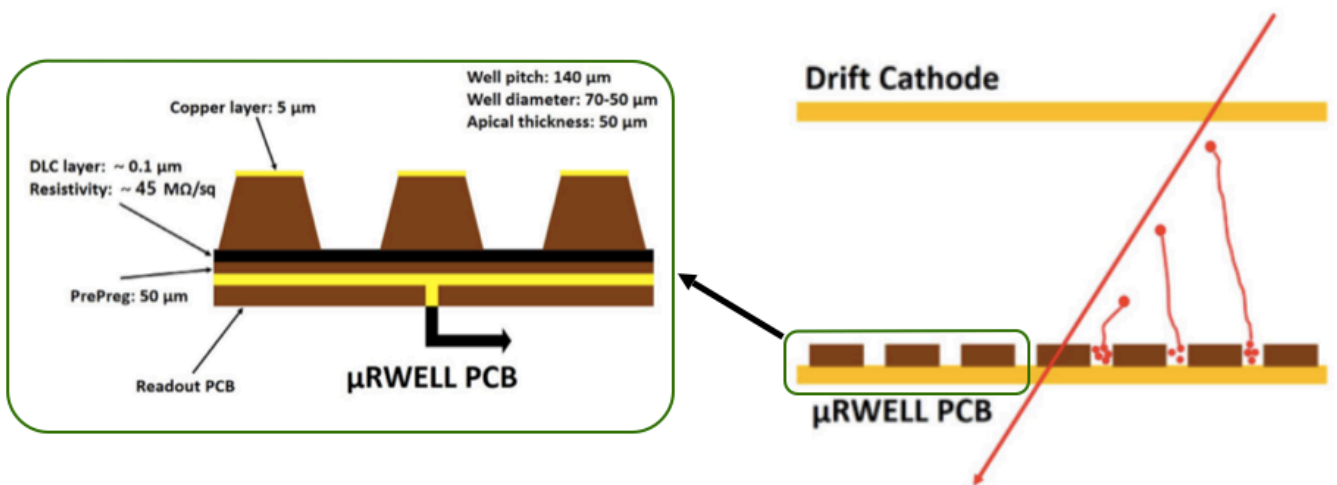


図 2.24  $\mu\text{-RWELL}$  の構造模式図 [16]

# 第3章 $\mu$ -PIC と resistive $\mu$ -PIC

MSGC を改良する形で 2001 年に越智敦彦及び谷森達によって考案されたのが  $\mu$ -PIC である [2]。本章では  $\mu$ -PIC の利点と問題点、そしてその解決策として本研究で開発を行っている resistive  $\mu$ -PIC について述べる。また本研究で resistive  $\mu$ -PIC に使用している素材である Diamond Like Carbon(DLC) についても紹介する。

## 3.1 $\mu$ -PIC

### 3.1.1 $\mu$ -PIC の構造

$\mu$ -PIC の基本的な構造は図 3.1 に示す。100 $\mu$ m の厚さを持つポリイミドを貫く形で 400 $\mu$ m 間隔で配置された anode の周りを cathode が囲んでいる構造をしている。anode の直径は 50 $\mu$ m、cathode の内径は 200 $\mu$ m であるが、anode 径に関しては製造過程において  $\pm 5\mu$ m ほどのばらつきがあることがわかっている。anode ピクセルと cathode はそれぞれ一列ずつストリップで繋がっており、それらが直交していることにより信号の二次元読み出しが可能となっている。

### 3.1.2 $\mu$ -PIC の動作

ガスで満たした密閉空間内に  $\mu$ -PIC を設置し、検出器表面から数 mm 上に  $\mu$ -PIC と平行にドリフト電極を設置する。ドリフト電極に数百 V の負電位、cathode にはドリフト電位 +300V 程度の負電位、anode は 0V に設定する。ガスで満たされた空間に粒子が入射すると、ガス分子が電離して一次電子が生成される。ドリフト電場により検出器近くまで移動した電子は anode 直上付近で雪崩増幅を起こす (図 3.2)。生成された陽イオンと電子がそれぞれ陰極、陽極に移動することで信号が誘起される。

$\mu$ -PIC 表面の電場構造を電場計算のための有限要素法におけるメッシュ作成ソフトウェア Gmsh と偏微分方程式を解くための有限要素法 (FEM) ソフトウェア Elmer を使用してシミュレーションしたものを図 3.3 に示す。増幅領域である anode 直上に比べて anode-cathode 間の電場が小さいことがわかる。これにより streamer が自己クエンチされて放電が抑制される。

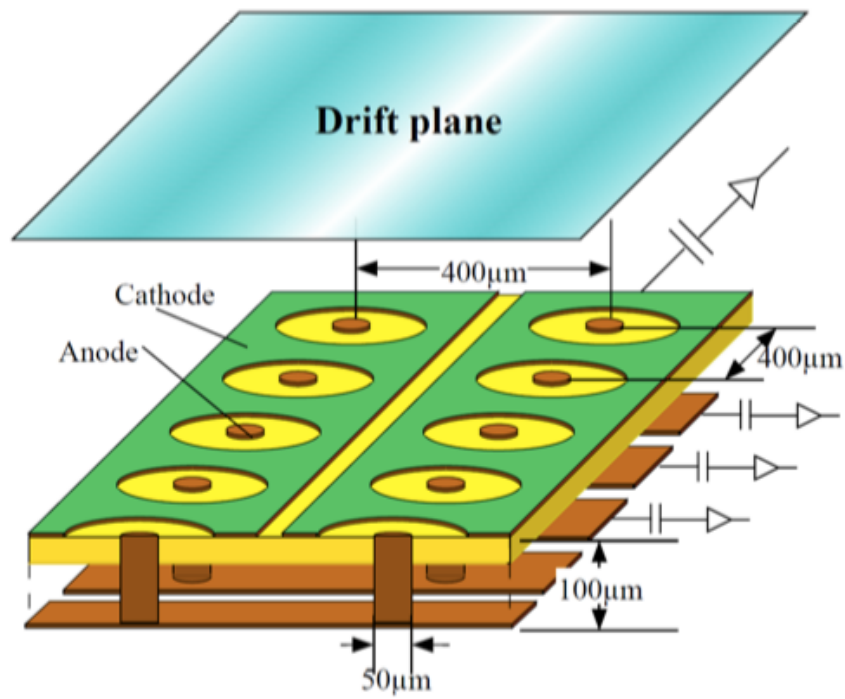


図 3.1  $\mu$ -PIC の構造模式図 [2]

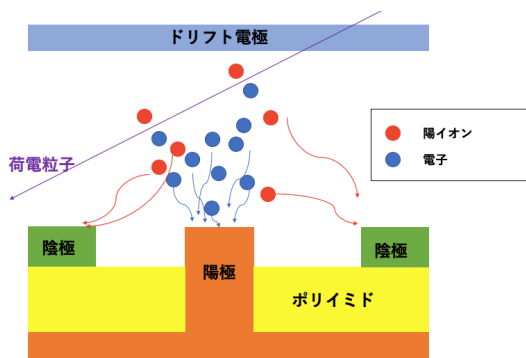


図 3.2  $\mu$ -PIC の増幅原理 [16]

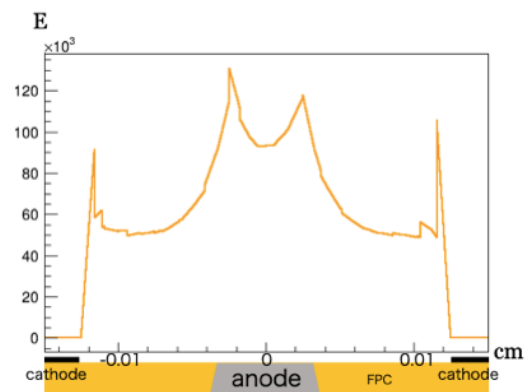


図 3.3  $\mu$ -PIC 表面の電場構造

### 3.1.3 $\mu$ -PIC の問題点

$\mu$ -PIC、ひいては MPGD 全体の問題として、第 2 章で述べたように電極間が狭いことによって頻発する放電がある。 $\mu$ -PIC においては陰極と陽極の間は絶縁体が存在するが、両極間で放電が起こることにより同通路が形成されて検出器として動作しなくなる恐れがある。図 3.4 は放電回数に伴う陰極陽極間の導通路の形成の様子を電子顕微鏡で撮影したものである。放電を繰り返すと導通性物質がポリイミド表面に堆積し、最終的には導通路が形成されていることがわかる。

$\mu$ -PIC で放電が起こるのは Raether limit を超えたときであるので、高い増幅率で  $\mu$ -PIC を動作させた時、もしくはガス中にエネルギー損失の大きい粒子が入射することによって初期電子が大量に生成された時である。陽子や  $\alpha$  線などはエネルギー損失が大きい、それゆえに検出器の蓋などで止まりやすく検出器内部に入射することは少ない。しかしハドロン衝突実験などの高速中性子が発生する環境では、中性子がガス分子の原子核と反応し MeV 程度のエネルギーを持つ反跳原子核が発生することがある。この反跳原子核が短時間で大きなエネルギーを落として電子を大量生成することで放電の原因となる。 $\mu$ -PIC をこのような環境で動作させるためにはこの放電問題を解決するのは必要不可欠である。

## 3.2 resistive $\mu$ -PIC

本研究では上記の放電問題を解決するため、陰極に高抵抗素材を用いた resistive  $\mu$ -PIC を開発した (図 3.5)[17]。この変更に伴いポリイミドとその下のドライレジスト層の間に内層電極を設置し、そこから誘起電荷を測定する形で信号読み出しを行う。陰極に高抵抗素材を使う最大の狙いは放電の事故抑制機能である。陰極陽極間で放電が起こると陰極に電流が流れる。その際高抵抗による電圧降下により電極近傍の電場が抑えられ、それ以上の放電の発達が抑えられる。

我々神戸大学グループでは resistive  $\mu$ -PIC の高抵抗素材に Diamond Like Carbon(以下 DLC) を使用している。DLC とはグラファイト構造に対応する  $sp^2$  型とダイヤモンド構造に対応する  $sp^3$  型が不規則に混在しているアモルファスカーボンである (図 3.6)。すなわちグラファイトとダイヤモンドの両方の特徴を有しており、またポリイミドに対する高い付着力や化学的安定性に優れているため、様々な MPGD に応用が可能である。厚膜調整や窒素ドーピングなどを行うことである程度任意の抵抗値を持たせることが可能である (数十～数  $G\Omega$ )。

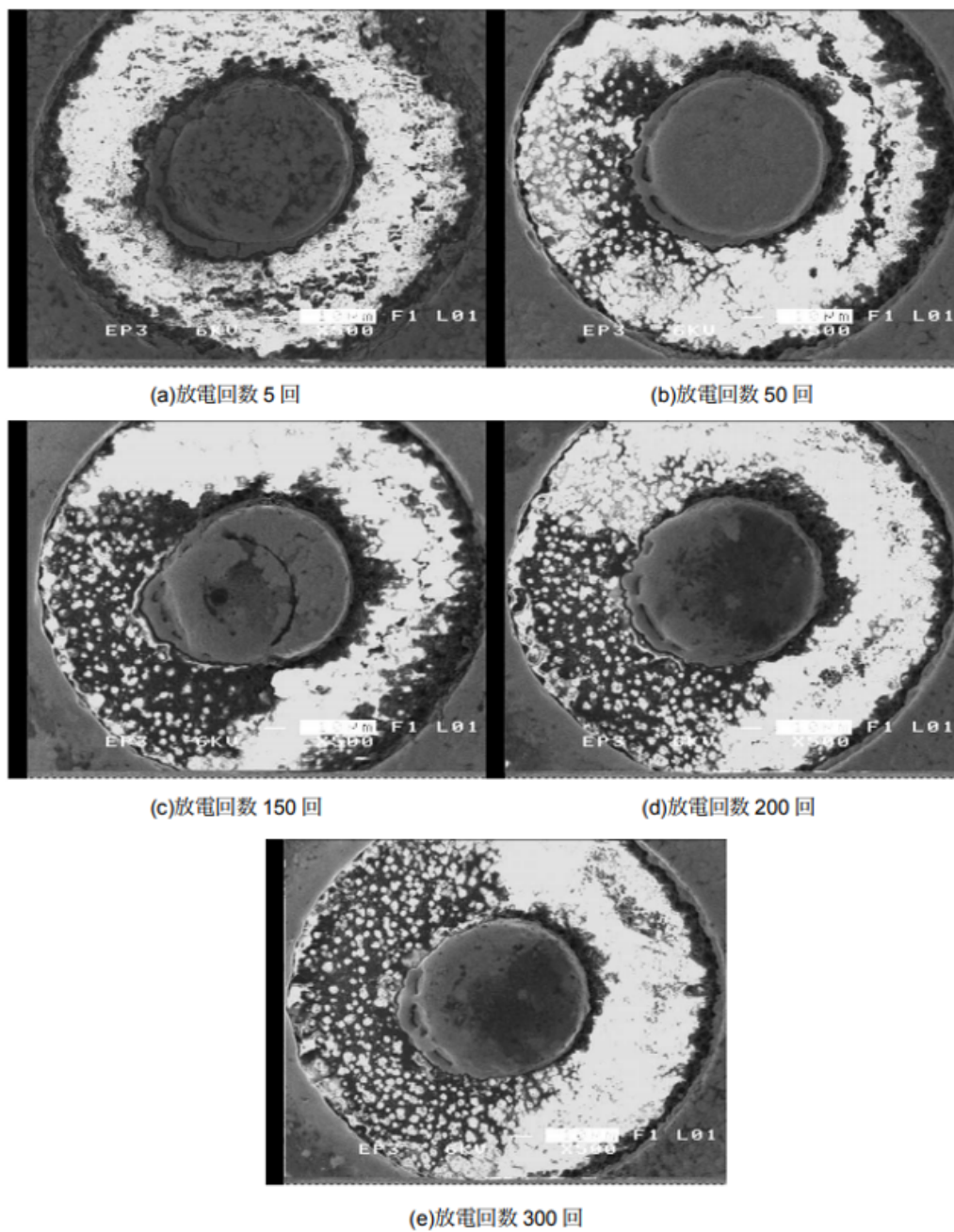


図 3.4 放電回数に伴う導通路の形成の様子 [17]

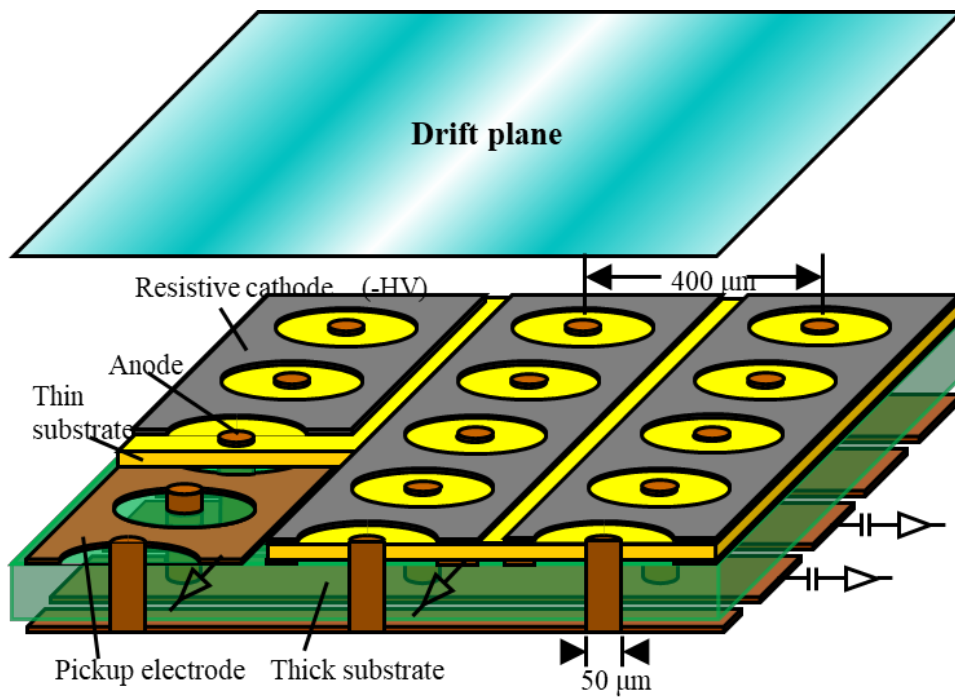


図 3.5 DLC  $\mu$ -PIC の構造 [17]：黒の部分が高抵抗素材を表している。

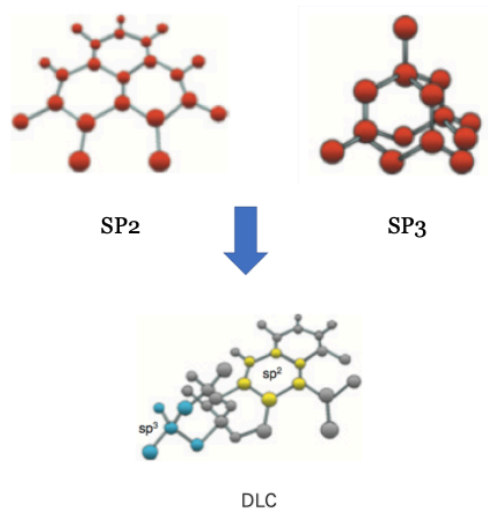


図 3.6 Diamond Like Carbon の構造 [2]

DLC をポリイミドに付着させる際にはスパッタリング技術を使う。ここではその中でも代表的な手法であるマグネトロンスパッタリングについて述べる。図 3.7 にその概略図を示す。Ar で満たした容器内にターゲットと付着対象のポリイミドを設置し、バイアス電圧をかけることで  $Ar^+$  を生成する。電場によって加速された  $Ar^+$  はターゲットの炭素電子に衝突し、弾き飛ばされた炭素原子がポリイミドに付着する。ここまでは通常のスパッタリングだが、この際ターゲット周辺に磁場をかけることで生成された電子が捕らえられ、その電子がまた Ar をイオン化する。このように Ar のイオン化を活性化させることで成膜速度が高速化するのがマグネトロンスパッタリングである。

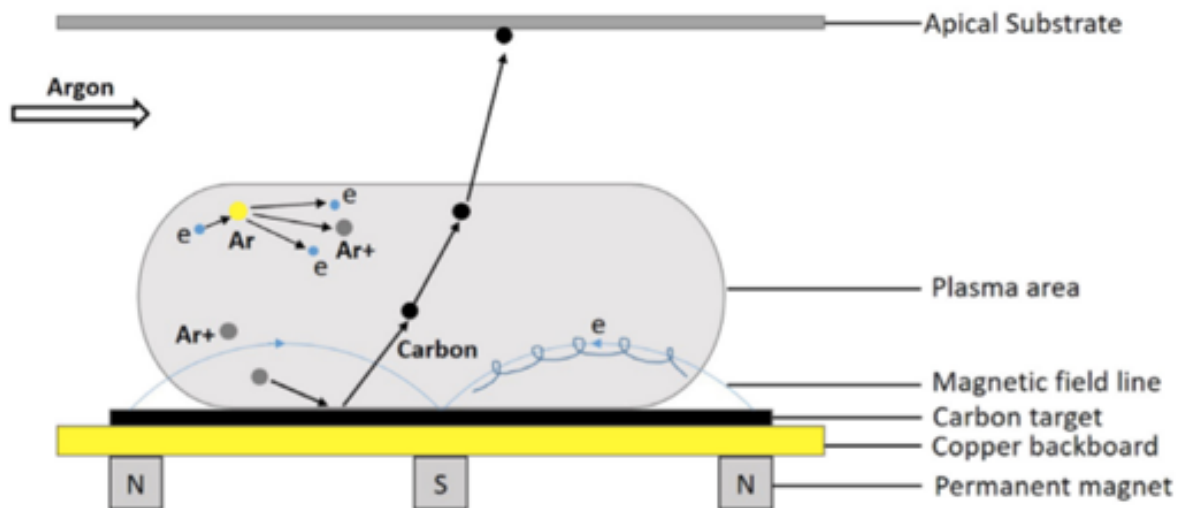


図 3.7 マグネトロンスパッタリングの概略 [16]

### 3.3 DLC $\mu$ -PIC

上記のように DLC を高抵抗素材に用いた resistive  $\mu$ -PIC を本論文では DLC  $\mu$ -PIC と呼ぶこととする。DLC  $\mu$ -PIC の cathode のストリップに垂直な方向の断面模式図を図 3.8 に示す。上層の Flexible Print Circuit (FPC) と下層のドライレジストフィルム (DF) による 2 層構造で、anode ストリップを形成した Rigid 基板に接着している。黒で表示されている部分は DLC、赤で表示されているのは電極である。両極ともに電圧を印加する電極とは別に読み出し電極を設置しており、それぞれ誘起電荷を読み出している。図 3.8 における



pick up Cathode 及び pick up Anode がそれにあたる。電圧を印加するのは anodee 及び cathode であり、これらの読み出し電極は常に接地している。また図 3.9 は  $\mu$ -PIC 本体を真上から撮影した写真である。陰極陽極各 256 ストリップずつ、計 512 ストリップ分の回路を 1 枚の PCB に収めている。

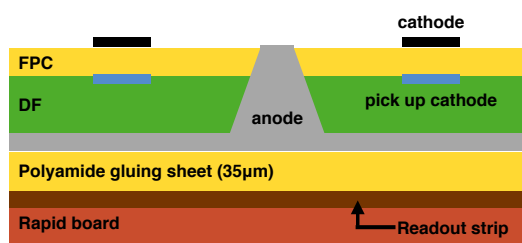


図 3.8  $\mu$ -PIC の断面模式図

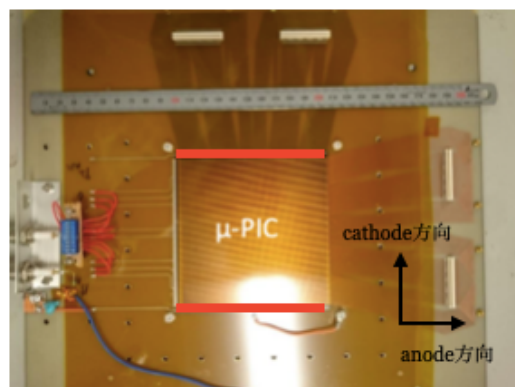


図 3.9  $\mu$ -PIC の本体写真

# 第4章 実験のセットアップ

## 4.1 実験セットアップ

本実験のセットアップを図 4.1 に示す。Ar と C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> からなる混合ガスを使用し、検出器内を循環させる。γ 線との相互作用を起こすのは Ar であるが、Ar のみを使用するとストリーマが発達して放電が多発するため、それを防ぐ目的で他の種類のガスを混入する必要がある。反応の主体となるガスを主ガス、放電抑制のためのガスをクエンチガスと呼び、本章の実験では主ガスに Ar、クエンチガスに C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> を使用している。ここに X 線源である <sup>55</sup>Fe を照射し、雪崩増幅により発生する電子による誘起電荷を読み出す。その信号をプリアンプ (ORTEC 142PC)、シェイパー (HOSHIN N012) に通したのち、MCA (Multi Channel Analyzer/Amptec 8000D) でデジタル変換しキャリブレーションすることで Gain を算出する。

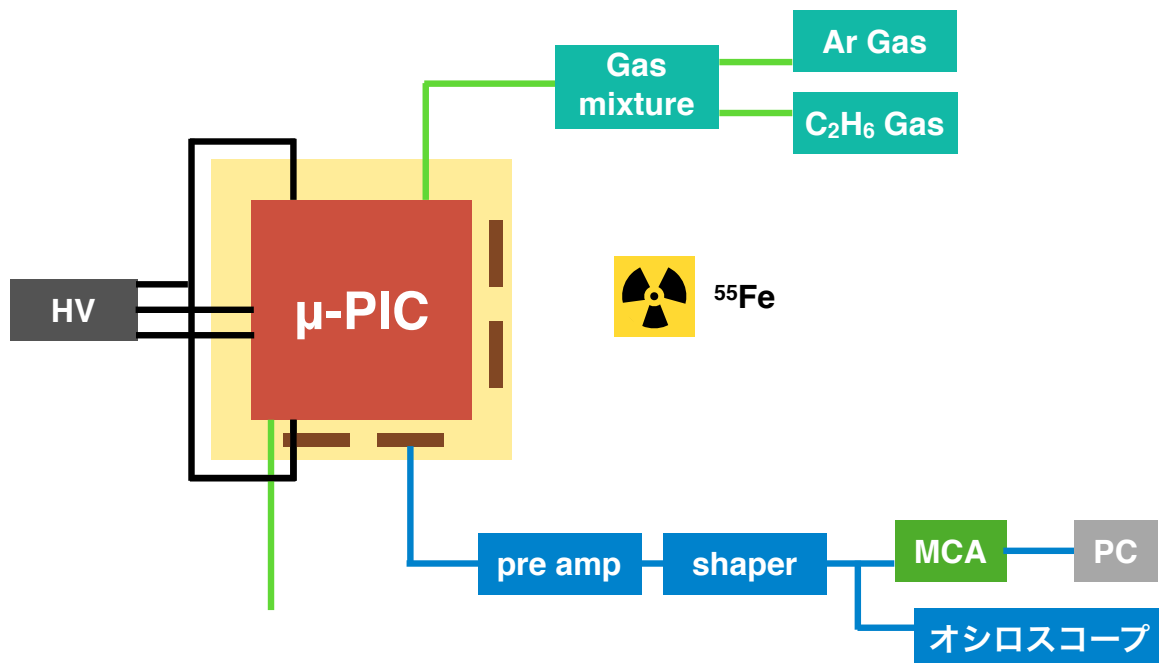


図 4.1 実験のセットアップ

ガス増幅率  $G$  は以下の式で与えられる。

$$G = \frac{\text{測定された電荷 [pC]}}{^{55}\text{Fe 由来の X 線によって電離された初期電子の総電荷量 [pC]}} \quad (4.1)$$

$^{55}\text{Fe}$  のエネルギースペクトルは既知であるため X 線源として使用した。 $^{55}\text{Fe}$  の X 線エネルギーのピーク値は  $5.9\text{keV}$  であり、この値と第 2 章で述べた Ar の W 値  $26\text{eV}$  を用いて初期電子の電荷量は以下のように求められる。

$$1.6 \times 10^{-7}[\text{pC}] \times \frac{5.9[\text{keV}]}{26[\text{eV}]} = 3.63 \times 10^{-5}[\text{pC}] \quad (4.2)$$

測定された電荷量を求めるためにパルスジェネレータを用いて決められた電荷量を持つ信号を MCA で取得し、電荷量と MCA で得られた ADC 値との相関を求める。そのキャリブレーションのグラフを図 4.2 に示す。その結果を用いて式 4.1 よりガス増幅率を求める。

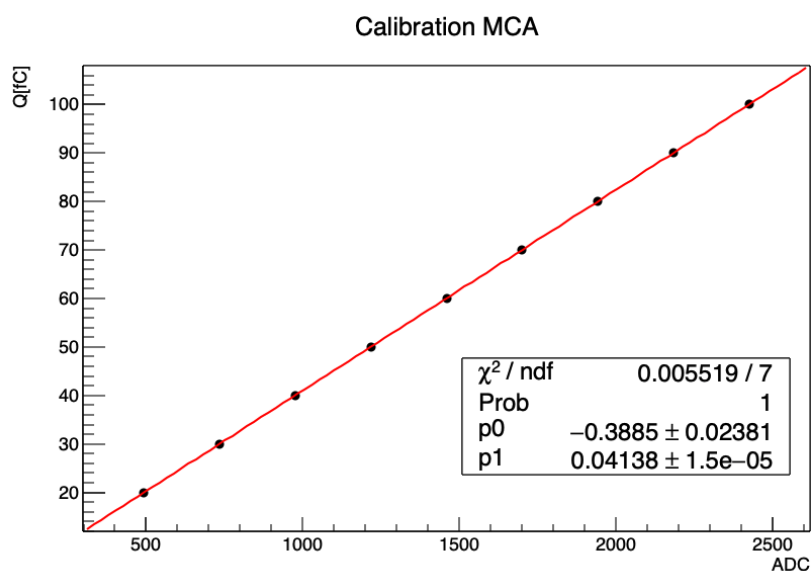


図 4.2 電荷量と ADC 値との相関

また、本実験では表面抵抗率の異なる複数種の DLC  $\mu$ -PIC を用いて実験を行った。高い表面抵抗率を持つ個体の方がより大きい電圧降下が生じるため、より良い放電抑制効果が期待できるが、それらが利得や安定性などの基本動作に影響するのかどうかを調べる必要がある。今回は表面抵抗率が  $1\text{M}\Omega/\square$ 、 $15\text{M}\Omega/\square$ 、 $50\text{M}\Omega/\square$ 、 $500\text{M}\Omega/\square$  の4つの個体を用いて基本性能を調べた。

## 4.2 DLC $\mu$ -PIC の基本性能

### 4.2.1 ガス増幅率

図 4.3 にオシロスコープで実際に得られた波形、図 4.4 に MCA で得られたエネルギースペクトルを示す。図 4.4 には  $^{55}\text{Fe}$  の main peak である  $5.9\text{keV}$  の peak、さらに  $2.7\text{keV}$  の escape peak が現れている。また、main peak をガウス分布でフィッティングし、式 4.1 によって算出した値を cathode 印加電圧ごとにプロットした Gain Curve を図 4.5 に示す。この時の anode、drift 電極に印加した電圧はそれぞれ  $+10\text{V}$ 、 $-900\text{V}$  で固定した。cathode の電圧を変化させる理由は、anode に高電圧を印加すると anode と pick up 電極の間に電流が流れてしまうためである。詳しくは第 6 章で述べる。

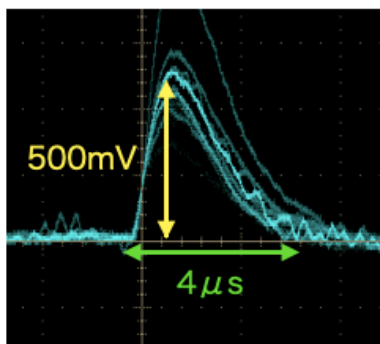


図 4.3 オシロスコープの波形

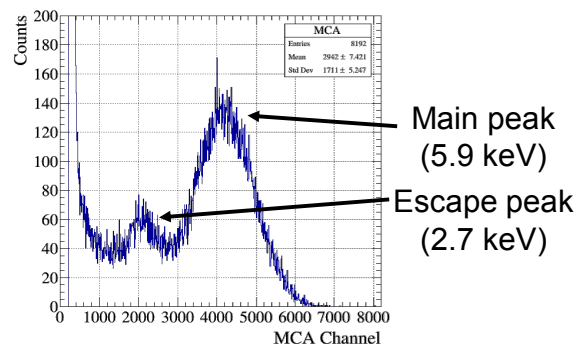


図 4.4  $^{55}\text{Fe}$  のエネルギースペクトル

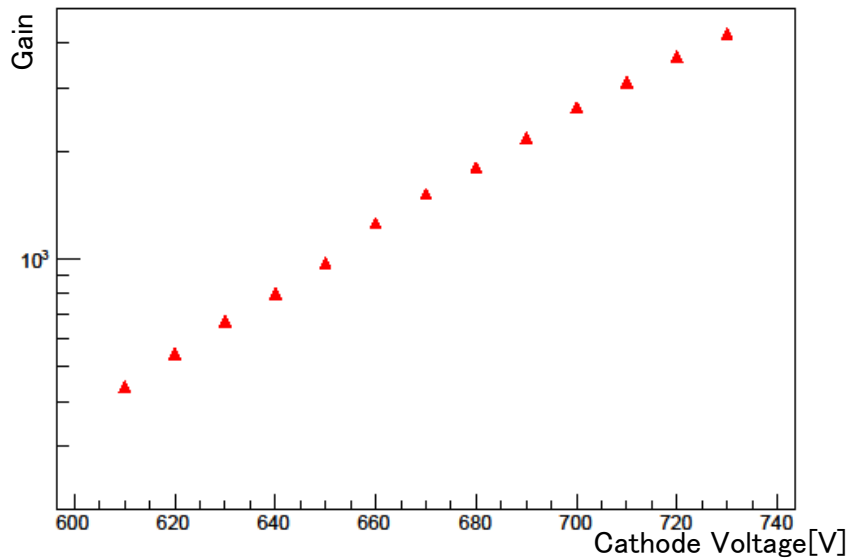


図 4.5 Gain Curve(500MΩ/□)

図 4.5 によるとガス増幅率はおよそ 4000 程度を達成しているが、これは予想よりも低い値である。そのため Gain を最大化させる条件をシミュレーション及び実験から探るのが本論文の目的である。シミュレーションについては第 5 章で、実験については第 6 章で述べる。

## 4.2.2 ガス増幅率の位置依存性

測定をする中で、線源を照射する位置によって Gain が大きく変わることがあった。そのため  $\mu$ -PIC 表面を縦横 8 分割ずつ、計 64 分割し、その真上に線源を照射して Gain に位置依存性があるかどうかを確かめた。1MΩ/□、15MΩ/□、50MΩ/□、500MΩ/□それぞれの個体での Gain の分布を示した Gain map を図 4.6 に示す。この時 anode、cathode、drift 電極に印加した電圧はそれぞれ +10V、-650V、-900V であった。ただしここで使用した値は Gain そのものではなく、中心部の Gain の平均値を基準とした各場所の増減 [%] である。なお線源は 3.5mm のコリメーターを通しており、該当箇所以外には照射されないようになっている。

図 4.6 を見ると、500MΩ/□では負電圧を印加している側が Gain が高く、中心に向かうほど Gain は小さくなっており、電圧供給源に平行な方向には Gain が一様になっている。それに比べて 1MΩ/□、50MΩ/□は放電により測定できない箇所はあるものの、全体的に Gain は一様になっている。これは放電抑制の原理と同様に電圧降下によるものだと考え

られる。電圧供給源が両端にあり、cathode はそれに対して垂直方向に設置されているため、各 cathode ストリップについて中心部が最も抵抗値が大きくなる。それに伴い電圧降下が大きくなることで中心部に近づくほど印加電圧が小さくなるため、500M $\Omega$ /□のような Gain map になる。1M $\Omega$ /□ではその抵抗率の小ささから電圧降下が小さいために Gain の分布が一様になったと考えられる。

### 4.2.3 ガス増幅率の時間変化

1M $\Omega$ /□の個体を使い、Gain を 10 分間連続で測定した。図 4.7 にその時間変化の様子を示す。Gain は気温及び気圧に依存することが知られており、その影響を排除しなければならない。そのためこの測定と同時に気温及び気圧を記録しており、それらを使って校正した Effective Gain を算出する必要がある。Effective Gain ( $G_{eff}$ ) は以下の式で導かれる。[19]

$$G_{eff} = \frac{G}{\exp\left(C - \frac{T}{P} - \frac{300K}{760Torr}\right)} \quad (4.3)$$

ここで、G は Gain、T は気温、P は気圧であり、C は定数 (43.5Torr/K) である。

電圧印加直後の様子を見てみると、Gain が徐々に大きくなっており、安定するまでに 400~500 分ほどを要していることがわかる。この振る舞いは安定するまでの所要時間に差はあるが全ての個体において共通して見られる。この理由として考えられるのは anode と cathode の間の絶縁層上の Charge up である。anode 直上で発生した電子はその多くが anode に吸収されるが、吸収されなかった電子は電場に引き寄せられてポリイミド上に堆積する。図 4.8 に Charge-up の模式図、図 4.9 に Garfield++ を用いた電子の停止位置のシミュレーションを示す。(シミュレーションの詳細については第 5 章で述べる。) 図 4.9 を見ると anode 直径を超えて電子が堆積していることがわかる。電子の堆積は anode-cathode 間の電場の擬似的な増加をもたらし、それによって Gain が増加する。電子が堆積するには時間がかかるため、ある時定数を持って時間変化する。

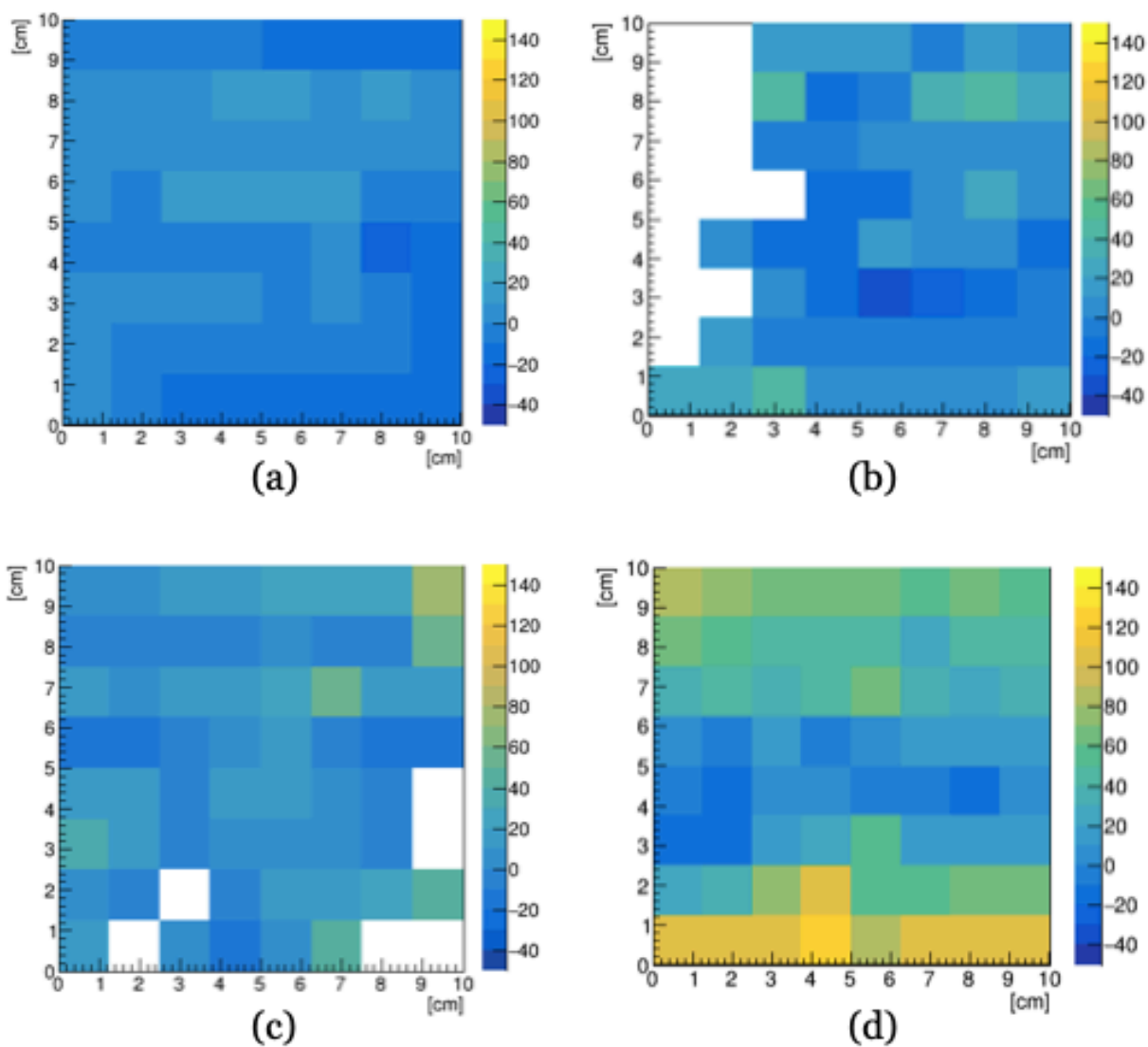


図 4.6 個体ごとの Gain map : (a)1MΩ/□、(b)15MΩ/□、(c)50MΩ/□、(d)500MΩ/□

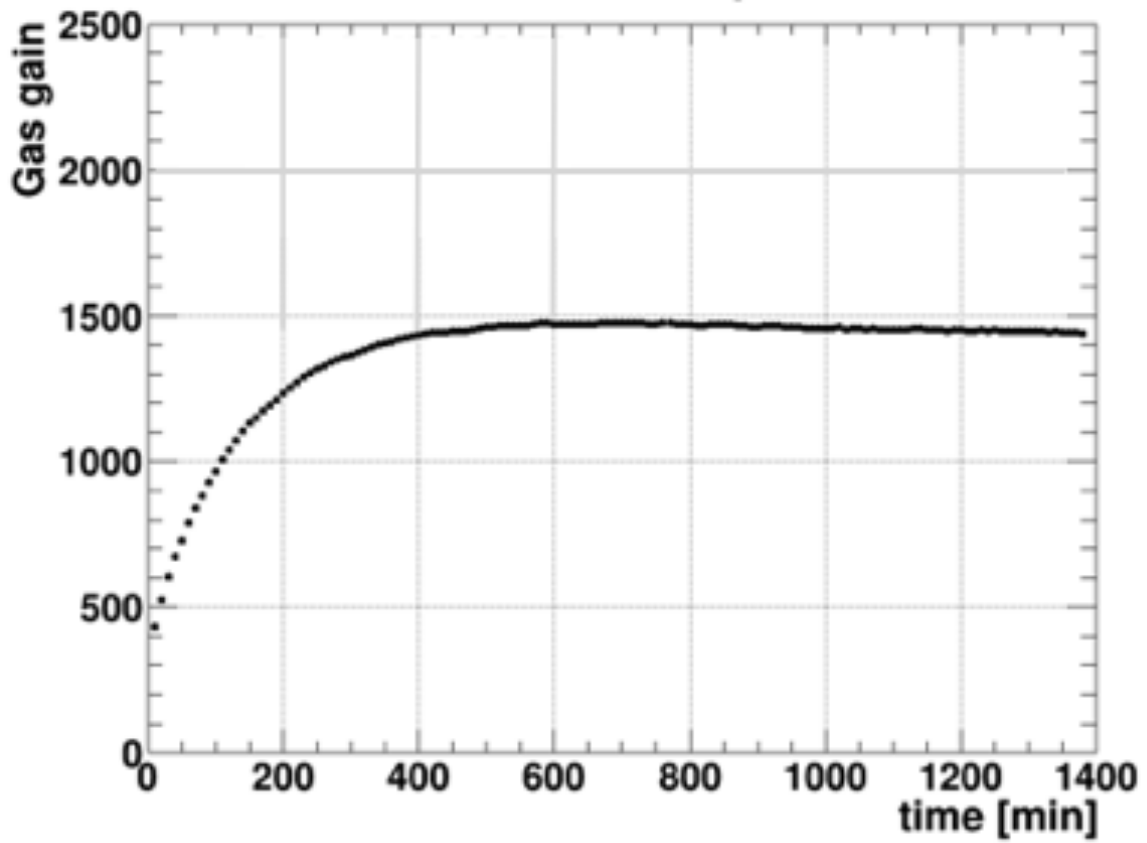


図 4.7 Gain の時間変化：1M $\Omega$ / $\square$

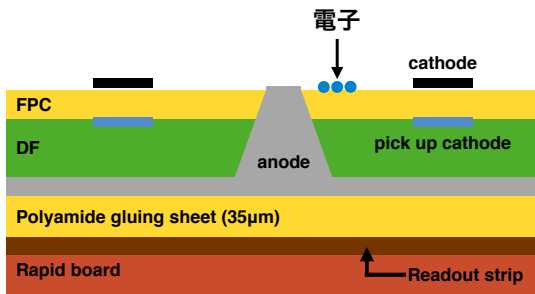


図 4.8  $\mu$ -PIC の Charge up の模式図

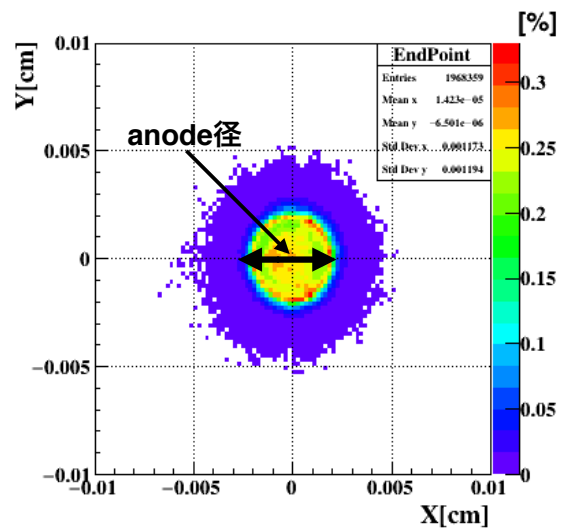


図 4.9 電子の停止位置:anode 径を超えて電子が堆積しているのがわかる。



# 第5章 ガス増幅率向上のための $\mu$ -PICの形状の改善案

先述の通り、ガス増幅率は期待通りの成果を得られていない。そのため実験における様々なパラメータを変更して、ガス増幅率が最大になる条件を実験及びシミュレーションから探った。本章では現状の DLC  $\mu$ -PIC の形状における課題をシミュレーションと合わせて述べる。なお、シミュレーションには第3章、第4章でも述べたように、メッシュ作成ソフトウェア Gmsh、電場計算ソフトウェア Elmer、さらに電子の移動、拡散、増幅過程の計算を行うシミュレーター Garfield++ を用いた。

## 5.1 Anode ring

図 5.1 は DLC  $\mu$ -PIC の断面図である。DLC  $\mu$ -PIC を製造するにあたり、図中で灰色で示されている anode の上側からメッキを施すという過程があるが、その際に過剰なメッキを施していることがわかった。 $\mu$ -PIC の拡大図からも確認することができる (図 5.2)。3次元モデルに表すと図 5.3 のようになる。このオーバーハングされたメッキは anode の周りに同心円状に広がっているため、本論文では anode ring と名付け、性能にどのような影響があるかを調べた。

Anode ring の直径は個体ごとに違うが、総じて  $110\mu\text{m}$  以上、大きいもので  $130\mu\text{m}$  近くにまでなるものもある。Anode ring を含めた  $\mu$ -PIC 表面での電場構造を図 5.4 に、anode ring の大きさと Gain の相関をシミュレーションしたものを図 5.5 に示す。なお図 6.5 では、anode ring がない時の anode 底面の直径は  $80\mu\text{m}$  であるため、その値を下限値としている。

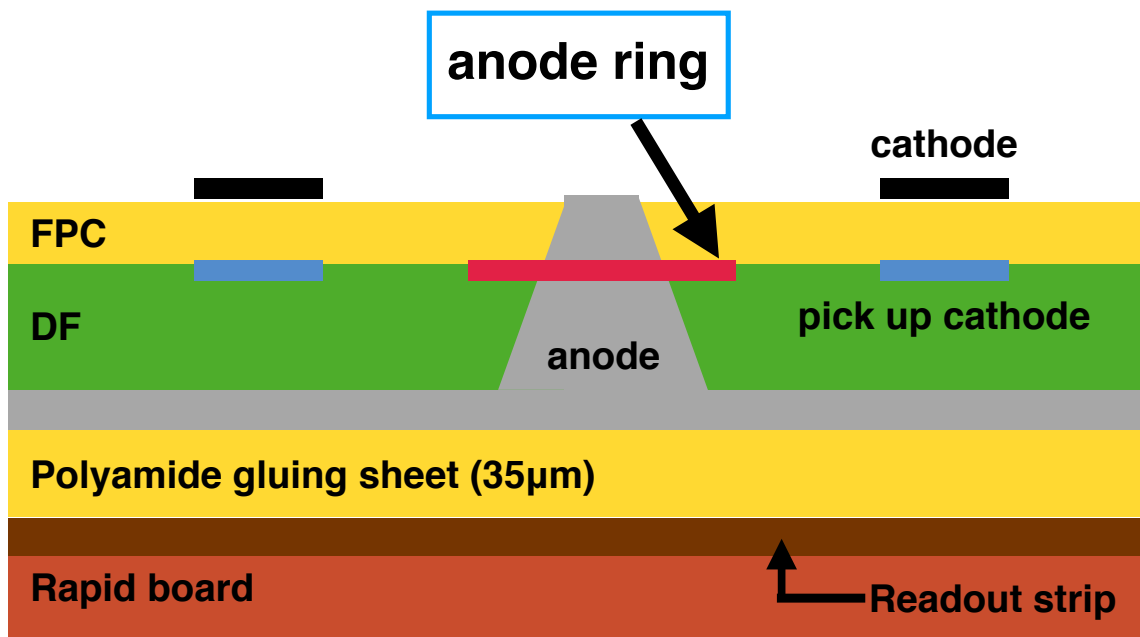


図 5.1  $\mu$ -PIC の断面図：anode ring

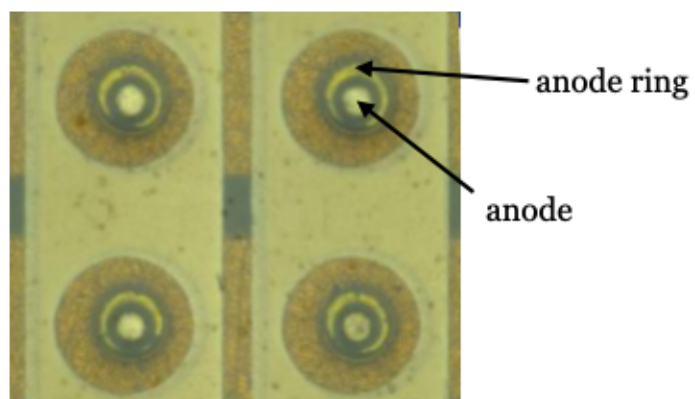


図 5.2  $\mu$ -PIC の拡大図：同心円状に広がっている 2 つの円のうち、小円が anode、大円が anode ring である。

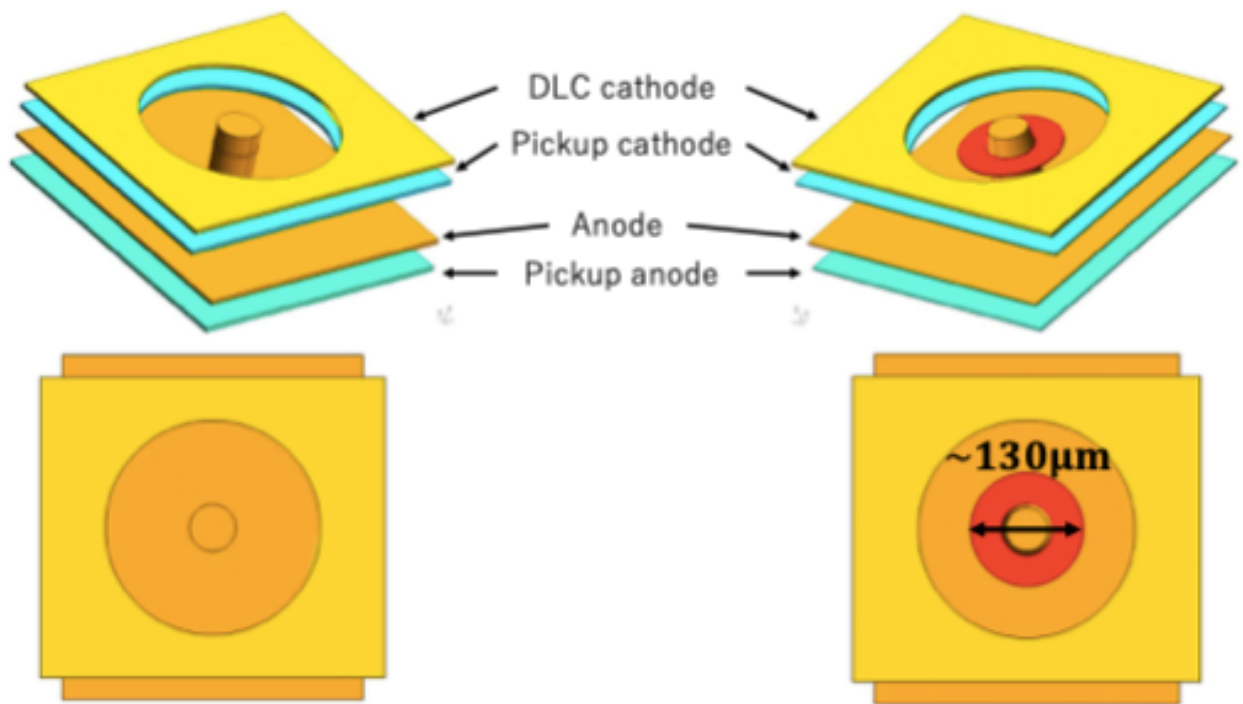


図 5.3 3次元モデルの anode ring

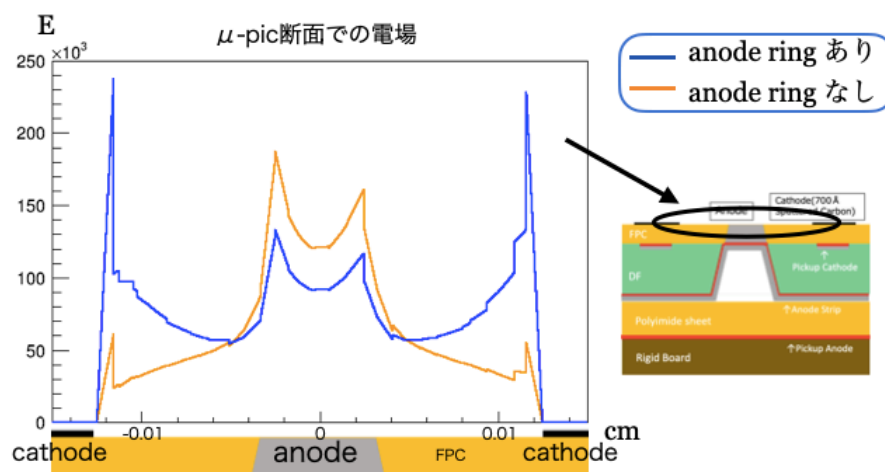


図 5.4 anode ring の影響を加味した  $\mu$ -PIC 表面の電場構造拡大図：anode ring がない方が anode 直上の電場は強く、cathode 付近の電場は弱い。

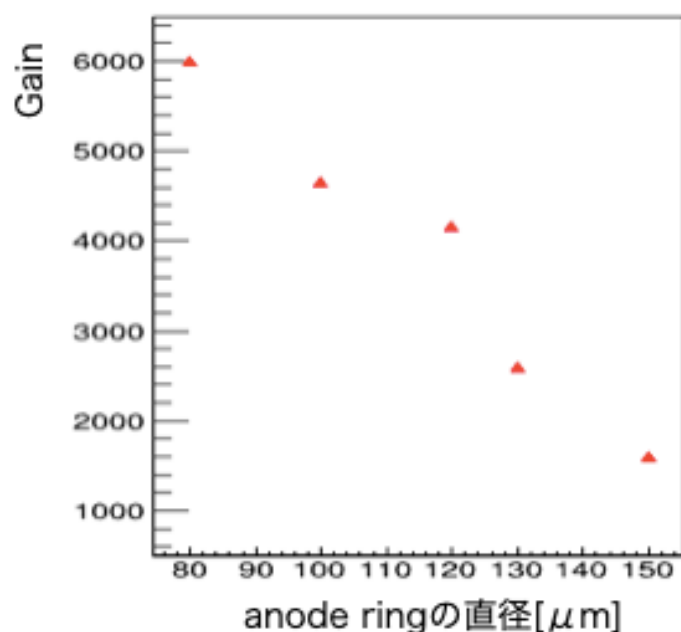


図 5.5 anode ring の直径とガス増幅率の相関：anode ring が大きくなるにつれてガス増幅率は減少している。

図 5.4 を見ると、anode ring がない時の方が anode 直上の電場が大きくなっていることがわかる。雪崩増幅が発生するのは anode 直上であるので、その部分の電場の増加はそのまま Gain の増加に繋がる。さらに図 5.5 からわかるように anode ring の直径が大きくなるほど Gain が減少しており、anode ring がない状態が最も高い Gain を達成できる。また、anode から cathode までの間の電場は anode ring がある方が電場が高くなっている。この部分の電場が大きいとストリーマが発達しやすく、放電リスクが高くなってしまう。また cathode 付近を見てみると anode ring がある方が電場が強く、電子が cathode から放出されやすいため放電リスクは上昇する。すなわち anode ring がある状態では Gain が低下し放電も起きやすいということになり、これを除去できれば  $\mu$ -PIC の性能は格段に上がることが予想される。

## 5.2 Anode 径と増幅率の相関

### 5.2.1 電場構造

続いて anode 径と Gain の相関について述べる。現状使用している DLC  $\mu$ -PIC の anode 径は  $50\mu\text{m}$  前後であり、この大きさはエッチングの時間のわずかな差によって変動する。Anode 径を変化させた時の電場構造のシミュレーションを図 5.6 に示す。先述したように、 $\mu$ -PIC の性能を向上させるには anode 直上の電場をより大きく、anode-cathode 間の電場をより小さくする必要がある。図 5.7 には anode 直上の最大電場と anode-cathode 間の電場の平均値の比を anode 径ごとにプロットしたものであり、この値  $E_{\text{anode}}/E_{a-c}$  が大きいほど性能が良いと言える。これによると anode 径が小さくなるほど  $E_{\text{anode}}/E_{a-c}$  は増加しており、電場構造という観点のみから考えると anode 径は小さければ小さいほどよいと結論付けられる。

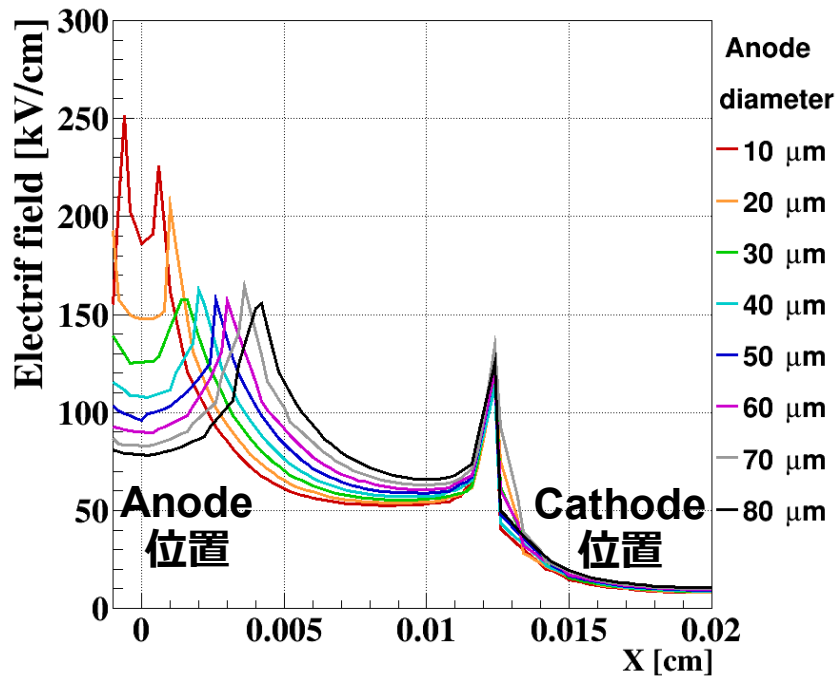


図 5.6 anode 径ごとの電場構造

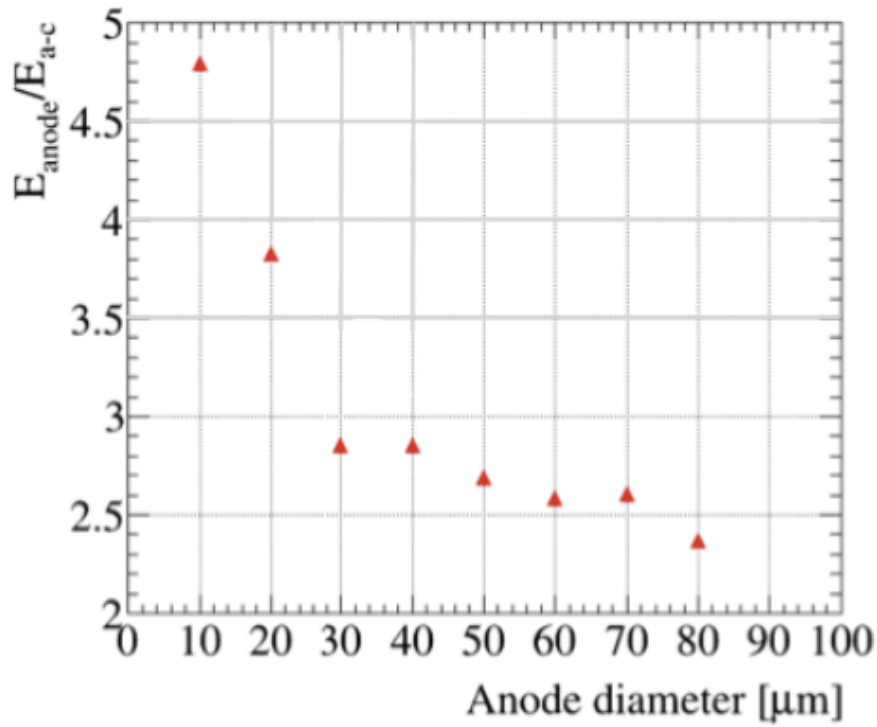


図 5.7 anode 径と  $E_{\text{anode}}/E_{a-c}$  の相関

## 5.2.2 Efficiency

Anode 径が小さくなるとガス増幅率が上昇することがわかったが、小さくなりすぎると別の問題が発生する。それは電子の収集効率の悪化である。ここで第 4 章でも触れたシミュレーションを用いる。増幅されて  $\mu$ -PIC 表面に到達した電子のうち、anode に到達した電子数の割合を Efficiency と定義する (図 5.8)。この値は anode 径やガス構成によって大きく変化するため、anode 径及びガス構成を変化させてシミュレーションを行った (図 5.9)。

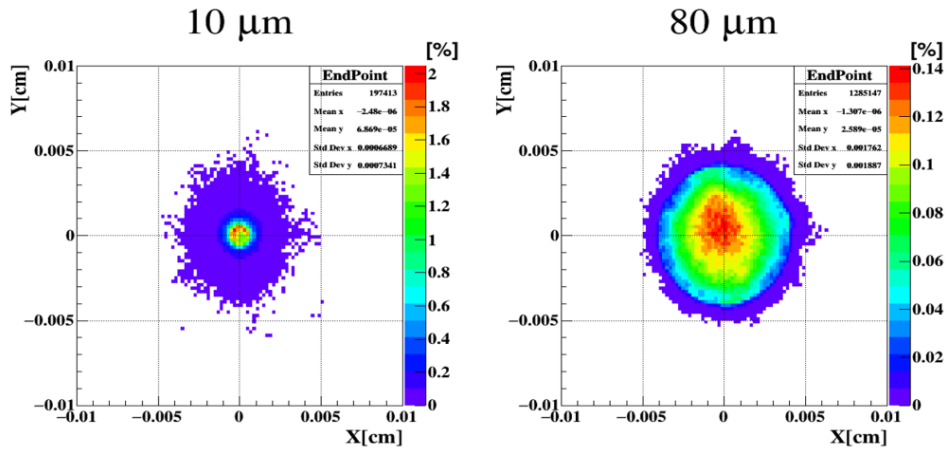


図 5.8 電子の収集効率シミュレーション:(a)anode 径が 10 $\mu$ m(b)anode 径が 80 $\mu$ m

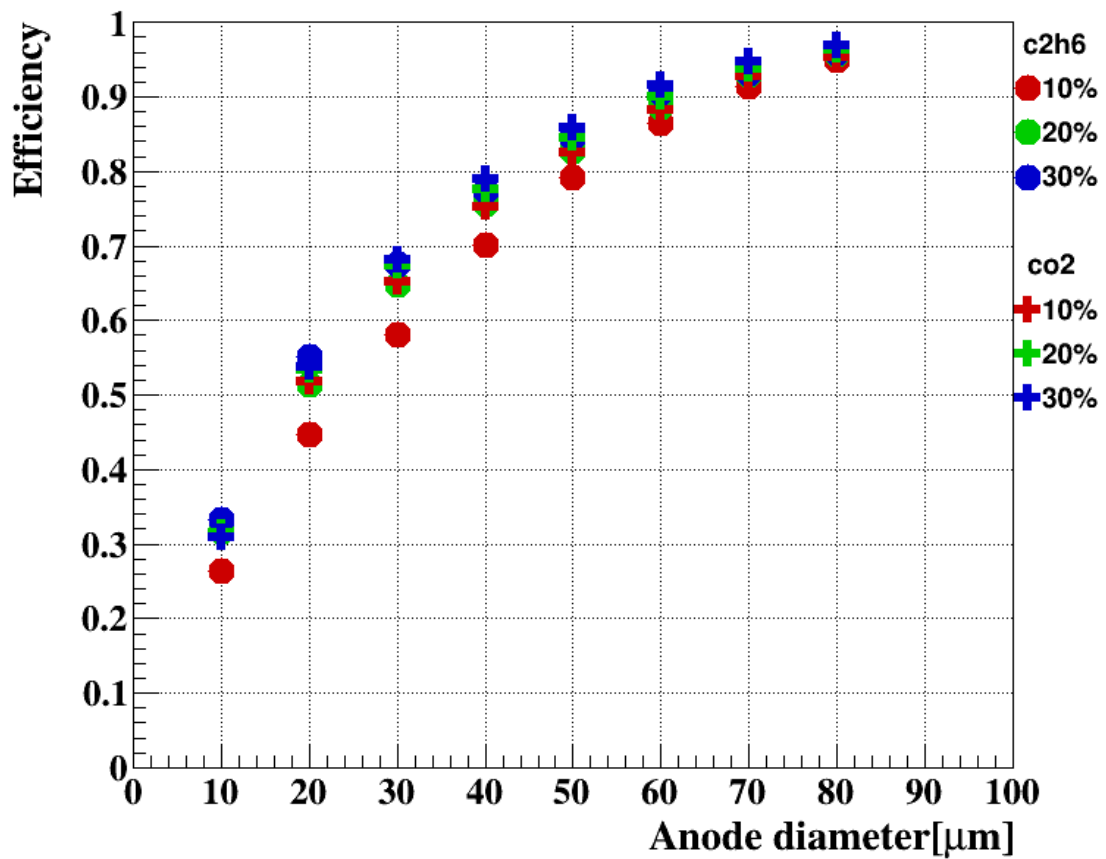


図 5.9 anode 径及びガス構成ごとの Efficiency

図 5.9 を見ると、anode 径が小さくなるほど Efficiency は小さくなっている。これは当然の結果である。すなわち電場構造の観点では anode 径は小さい方がよく、Efficiency の観点では anode 径は大きい方がよいということになる。これら二つの影響を加味した anode 径ごとのガス増幅率のシミュレーション (図 5.10) によると、ガス構成によらず anode 径は 4~50 $\mu\text{m}$  程度でガス増幅率が最大となっていることがわかった。

### 5.3 議論と考察

anode ring については本来の設計にはなかったが、製造上の都合で副次的に生成されたパーツである。anode ring は検出器の表面からわずか 25 $\mu\text{m}$  の位置に存在しており、その直径は anode 径 50 $\mu\text{m}$  よりもはるかに大きい 110 $\mu\text{m}$  以上に達する (図 5.11)。これは anode 径が大きくなっているのと同義であり、それは先述の通り anode 直上の電場の低下を招く。さらに、anode 径の増加は Efficiency の増加につながるが anode ring は検出器の表面に露出していないためその恩恵も受けられない。すなわち anode ring の存在が検出器のガス増幅率を著しく悪くしているということになる。現在、この anode ring をなくす製法で新しく DLC  $\mu$ -PIC を開発している途中であり、その性能を測定してシミュレーションとの整合性を確かめることも今後の課題である。

anode 径については小さすぎても大きすぎてもガス増幅率の低下を招くことがわかった。ガス構成やその混合比によらず anode 径が 40~50 $\mu\text{m}$  の時にガス増幅率が最大となっている。また Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>と Ar : CO<sub>2</sub>のどちらの場合においても主ガスである Ar が多い方がガス増幅率が高く、さらに Ar の割合が同じ場合には Ar : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>のガス構成の方が Ar : CO<sub>2</sub>よりもガス増幅率が高い。この結果については第 6 章で詳しく述べる。また、図 5.10 によると C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>が 10 %の時には anode 径が 60~70 $\mu\text{m}$  の時にも高い値を示しており、このガス構成で動作させる時には anode 径の設定値を大きくすることも検討の余地がある。

しかし、今回のシミュレーションでは放電及び Charge up の影響を一切考慮しておらず、期待通りのガス増幅率が得られるとは限らない。Charge up によって電場構造が変化しガス増幅率に影響する可能性もあるため、実際に動作させる時には注意が必要である。



### Gas gain at each Anode diameter

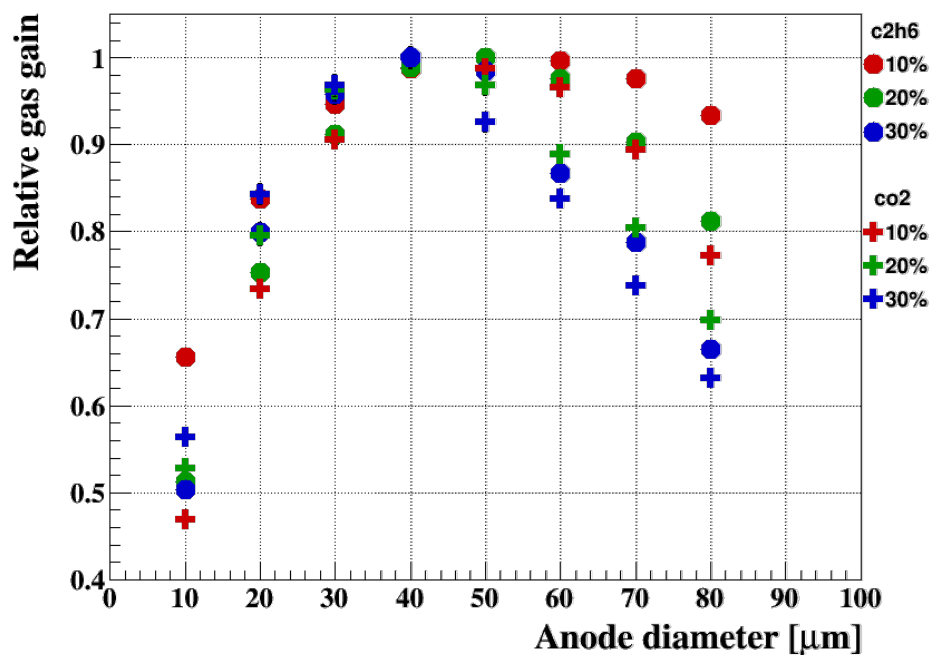


図 5.10 anode 径及びガス構成ごとのガス増幅率

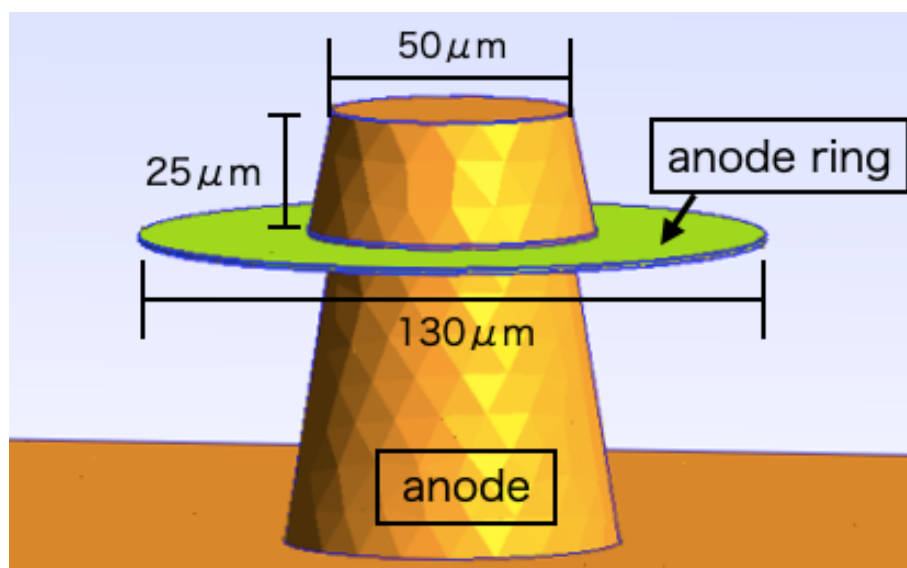


図 5.11 anode ring の模式図

# 第6章 ガス増幅率向上のための $\mu$ -PICの動作状況の改善

先述の通り、ガス増幅率は期待通りの成果を得られていない。そのため実験における様々なパラメータを変更して、ガス増幅率が最大になる条件を実験及びシミュレーションから探った。本章では実験からのアプローチとしてガス構成、印加電圧の2種類のパラメータを変化させた際のガス増幅率を測定した結果について述べる。

## 6.1 異なるガス中での DLC $\mu$ -PIC の動作試験結果

従来の測定では主ガスに Ar、クエンチガスに  $C_2H_6$  を使用し、Ar と  $C_2H_6$  の混合比を 7 : 3 に固定したまま測定を行っていた。本章ではその混合比を変化させたり、主ガス及びクエンチガスを変更するなど様々なガス中での動作を測定し、最適なガス構成を調べた。

### 6.1.1 Ar: $C_2H_6$

まず、最適な Ar: $C_2H_6$  の混合比を調べるために、少しずつ混合比を変化させながらガス増幅率を測定した。図 6.1 は  $1M\Omega/\square$  での、異なるガス混合比における Gain Curve である。前章と同じく、最大到達 Gain は放電によって抑制されている。なお前章の Charge up 及び位置依存性の議論を踏まえ、全て同位置かつ Gain がプラトーに達していることを確認した上で測定を行った。

図 6.1 を見ると、主ガスの割合が増えるほど動作電圧が一様に低くなっているのがわかる。しかしその反面放電は起こりやすくなっており、最大到達 Gain は  $C_2H_6$  の混合比の低下に伴い低くなっている。これらの理由としてはどちらもクエンチガスの割合が減ったことによってストリーマが発達しやすくなったことが考えられる。 $50M\Omega/\square$  でも同様の振る舞いを示した。

図 6.1 から最大到達 Gain のみを取り出し、その中でも最大の Gain を 1 として規格化した値をプロットしたものが図 6.2 である。これによると  $1M\Omega/\square$  では Ar: $C_2H_6 = 94 : 6$ 、 $50M\Omega/\square$  では Ar: $C_2H_6 = 92 : 8$  で Gain が最大になっており、従来使用してきた Ar :  $C_2H_6 = 70 : 30$  のガス中での最大到達 Gain と比べてそれぞれ 4.3 倍、3.3 倍の値を達成した。

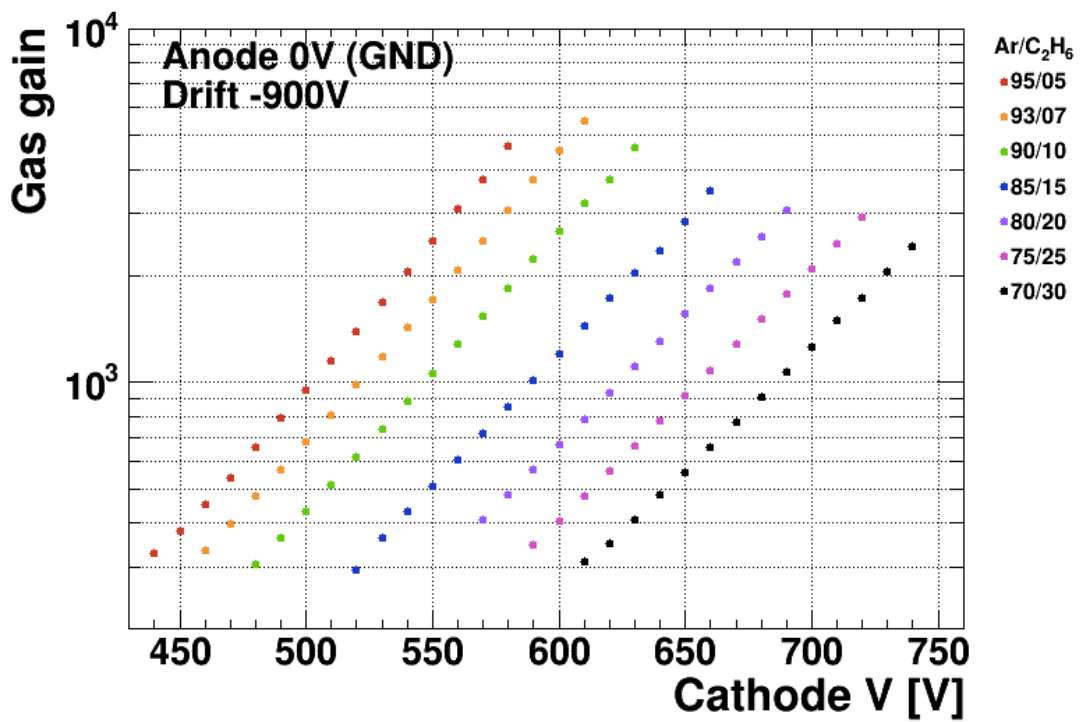


図 6.1 1M $\Omega$ /□の個体での Gain curve

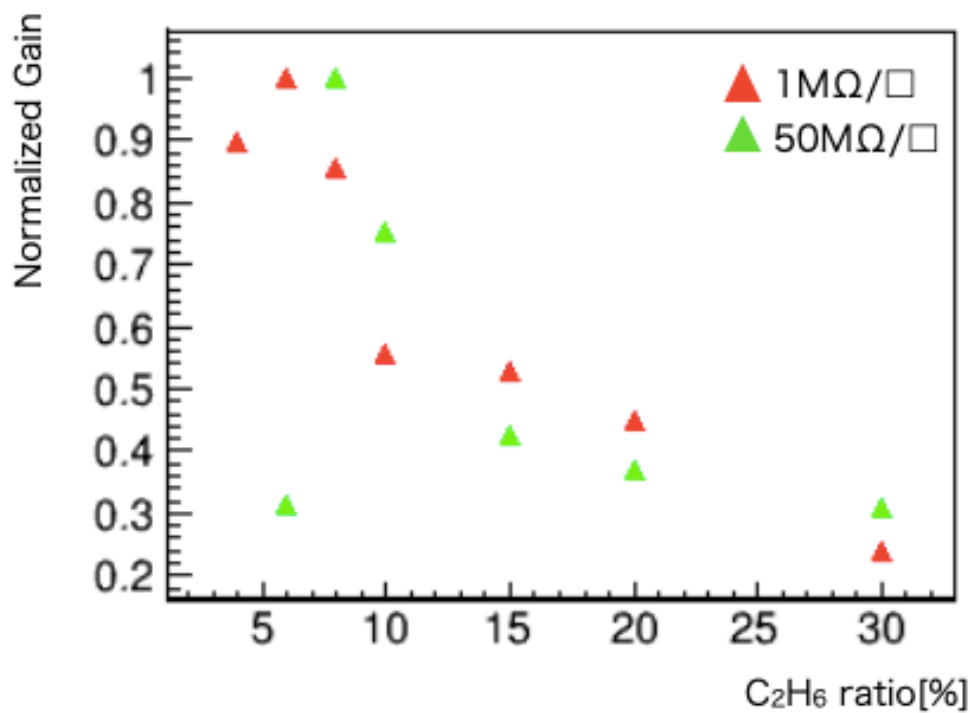


図 6.2 最大到達 Gain のガス混合比依存性

## 6.1.2 Ar:CO<sub>2</sub>

次に、クエンチガスに C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>ではなく CO<sub>2</sub>を用いて同様の測定を行った (図 6.3)。CO<sub>2</sub>は不燃性かつ環境に無害であり、ATLAS 実験でも実際に使用されているガスである。使用した個体は 1MΩ/□で、比較のために Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>での測定結果も同時にプロットしている。これによると、放電により抑制される動作電圧は 97 : 3 を除き C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>と CO<sub>2</sub>であまり差はない。しかし CO<sub>2</sub>を使用した測定では C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を使用したものと比べて Gain が著しく低くなっており、先述した最大 Gain を達成した 92 : 8 のガス混合比では 20 倍以上の差が生じた。放電が多発するなどの動作上の不安定さもあり、DLCμ-PIC を動作させる上では適切なクエンチガスではないと言える。

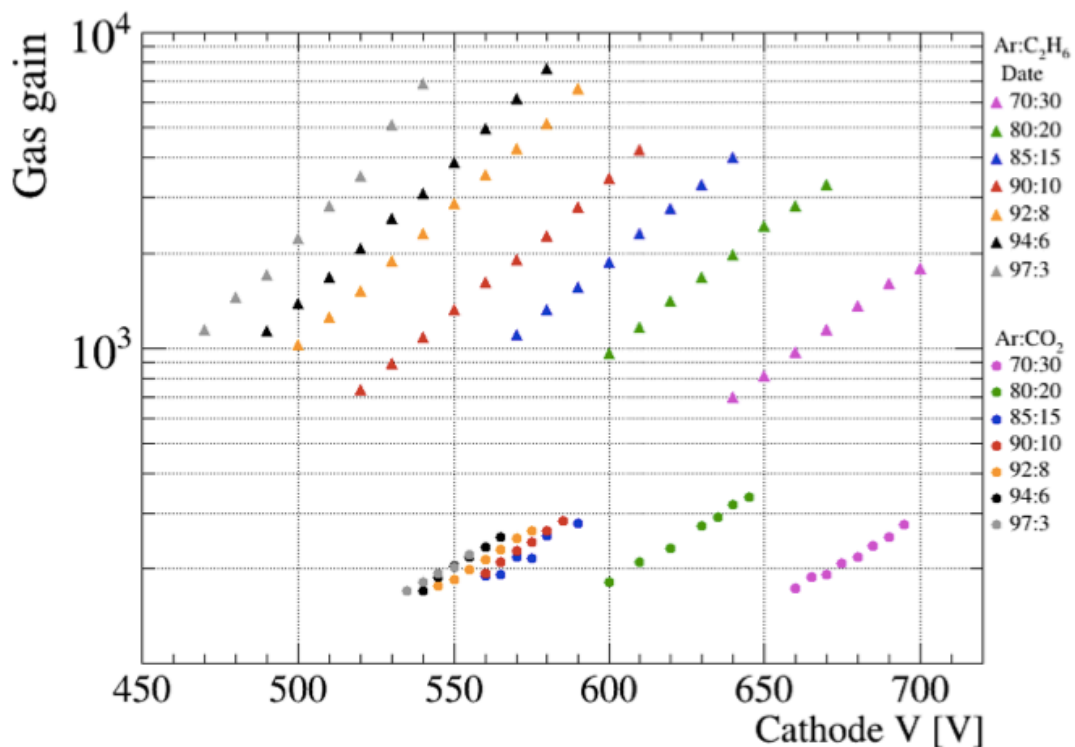


図 6.3 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>及び Ar : CO<sub>2</sub>中での増幅率曲線：1MΩ/□を使用

### 6.1.3 Ne:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

続いて、主ガスである Ar の代わりに Ne を用いて同様の測定を行った (図 6.4)。Ne を導入することでガス増幅率の増加や安定性の向上が見込めるという先行研究が GEM で行われており [20][21]、 $\mu$ -PIC でも同じような成果が得られるのではないかと考えた。こちらも同様に Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>での測定結果を同時にプロットしている。図 6.4 によると、ガス構成比によらず、主ガスが Ne の場合の方が Ar の時よりも動作電圧が低くなっていることがわかる。しかし放電する電圧 (最大動作電圧) も同時に低くなっており、最大到達 Gain についてはほとんど変わらない、もしくは Ne の方が低くなっている。特に Ne : C<sub>2</sub>=70 : 30 では Gain が 10<sup>3</sup> に達しておらず、使用は難しい。

ここまでの結果を考慮し、Gain を最大化するガス構成は Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>であり、その構成比は Ar が 90 %以上であると言える。

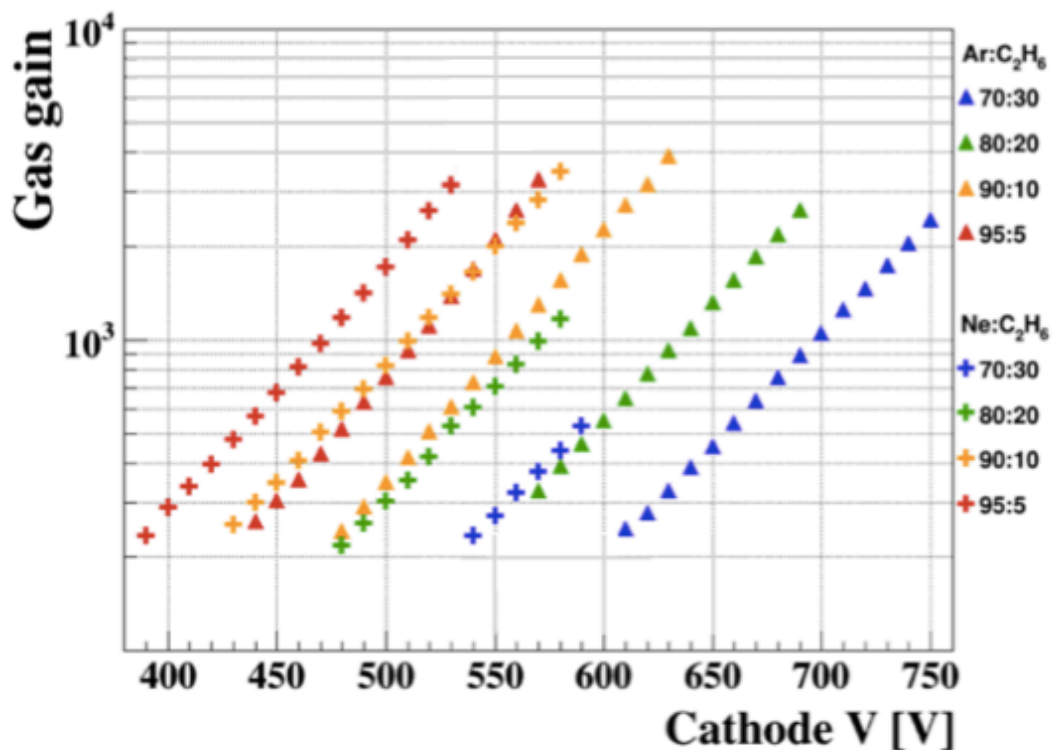


図 6.4 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>及び Ne : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>中での Gaincurve: 1M $\Omega$ /□を使用

## 6.2 印加電圧と Gain の相関

雪崩増幅を発生させるには、anode-cathode 間に高電場を形成する必要がある。ここまでの実験では anode 電圧を 10V に固定して cathode 印加電圧を変化させて測定を行ってきた。そこで、anode-cathode 間の電位差を固定したまま anode に印加する電圧を増加させてガス増幅率を測定した。anode 印加電圧とガス増幅率の相関を図 6.5 に示す。最大動作電圧は放電によって抑制されている。また、anode 印加電圧を変化させた時の検出器表面の電場構造シミュレーションを図 6.6 に、ガス増幅率シミュレーションを図 6.7 に示す。なお、pick up 電極はどの場合も接地している。

図 6.5 によると anode に印加する電圧が大きくなるほどガス増幅率は向上していることがわかる。図 6.6 では anode 印加電圧が大きくなるほど anode 直上の電場が小さくなっていくためこの結果は整合性があると言える。

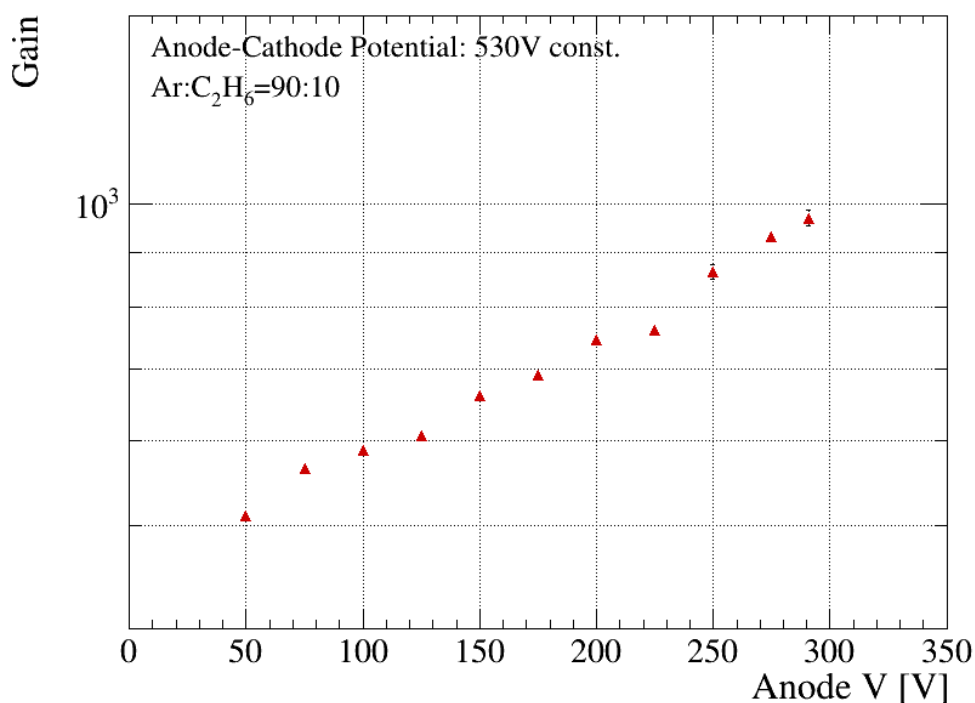


図 6.5 anode 印加電圧とガス増幅率の相関：anode と cathode 間の電位差は固定したまま anode 電圧を変化させて測定している。

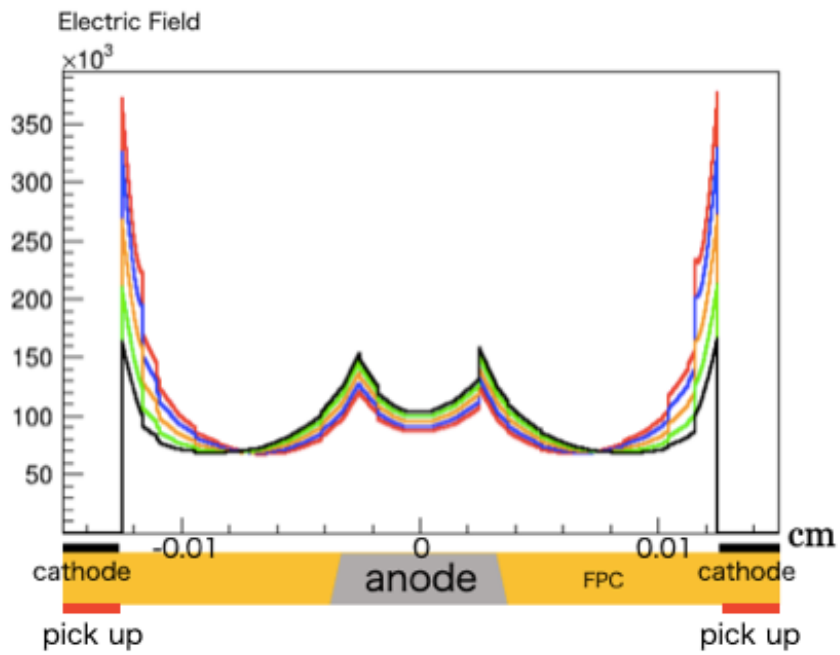


図 6.6 anode 印加電圧による電場構造シミュレーション

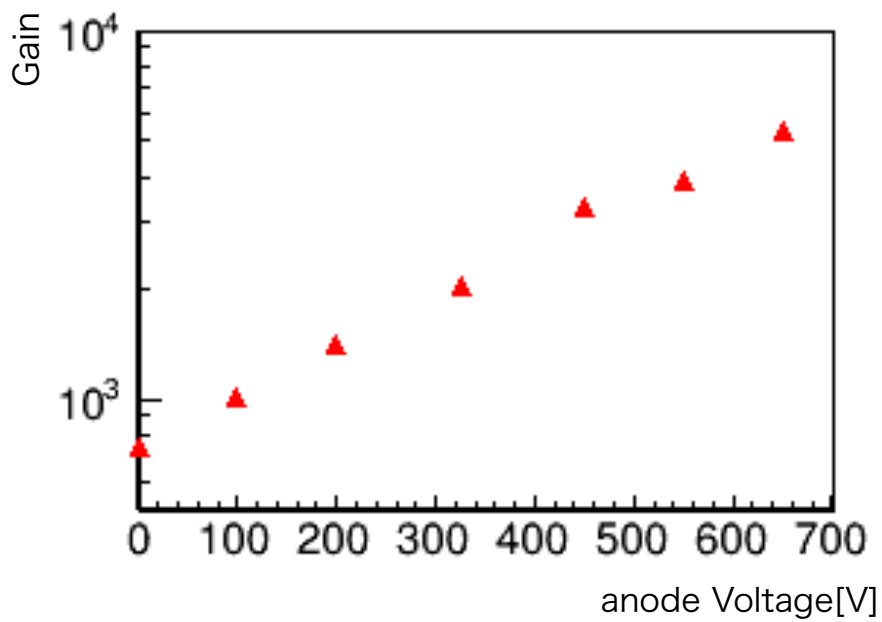


図 6.7 anode 印加電圧によるガス増幅率シミュレーション

## 6.3 議論と考察

本章ではまず測定時のガス構成に着目し、最も高いガス増幅率を示すガス構成及びガス混合比を調べた。ガス混合比については、主ガスが占める割合が大きくなるとガス増幅率が高くなり、この結果は第5章で述べたシミュレーションのデータ (図 5.10) と整合している。しかしその割合が大きくなりすぎるとストリーマが発達しやすくなるため放電が起きやすくなり、最大動作電圧が減少することにより結果的にガス増幅率は低くなってしまふ。ガス増幅率を最大化するにはこの中間のガス混合比を求める必要がある。測定の結果、DLC  $\mu$ -PIC におけるガス増幅率を最大化するガス混合比は Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> について Ar が 90~95 % 程度であるということがわかった。

ガス構成についてはクエンチガスとして CO<sub>2</sub> よりも C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> の方がガス増幅率が優れているという結果になった。ガス増幅率が CO<sub>2</sub> において減少する理由としては CO<sub>2</sub> に含まれる酸素原子の電気陰性度が高いことが考えられる。しかし CO<sub>2</sub> が大気中に存在することや C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> は可燃性ガスである点、さらに C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> に含まれる水素原子がエイジングの原因となりやすい点を踏まえると検出器の安定動作という観点からは CO<sub>2</sub> の方が優れているため、長期間の測定の際には検討の余地があると言える。

しかし今回の結果はあくまで DLC  $\mu$ -PIC での結果であり、他の MPGD であればこの値が変動する可能性は十分にある。また今回用いたガスは主ガスが Ar と Ne、クエンチガスが C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> と CO<sub>2</sub> のそれぞれ 2 種類のみであるため、その他のガスを使えばまだ別の結果が出る可能性がある。例えばクエンチガスとしてよく利用されている CH<sub>4</sub> などを使えばさらにガス増幅率が変化することも考えられる。実際に Micromegas では従来使用してきた Ar : CO<sub>2</sub> = 93 : 7 のガス構成から Ar : CO<sub>2</sub> : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 93 : 5 : 2 に変更したところ動作電圧や安定性が向上したという結果も報告されている [22]。そのため他の種類のガスや 3 成分混合ガスを使用することは検討すべきである。

また電圧のかけ方にも着目し、anode - cathode 間の電圧を固定したまま anode の印加電圧を増加させてガス増幅率の測定を行った。その結果 anode に印加する電圧が高いほどガス増幅率が大きい傾向にあることがわかったが、これは pickup 電極が常に 0V であることに起因する。anode - cathode 間の電圧は一定でも読み出し電極である pickup 電極と anode の間の電位差は大きくなるためガス増幅率が増加したものと考えられる。では anode のみに電圧を印加すればいいということになるが、その状況での動作は現時点で確認できていない。第 6 章で述べた通り、anode に 300V 以上の電圧を印加すると anode - pickup 間に電流が流れてしまうからである。この理由として考えられるのは先述の *anode ring* の存在である。anode と cathode 間の距離はおよそ 80 $\mu$ m 程度しかなく、ドライレジストと FPC の間に電解質の残渣物が残っていると電流が流れてしまう (図 6.8)。ここに追加されると



この距離は  $50\mu\text{m}$  程度まで縮まり、より電流が流れやすくなってしまふ anode ring のない  $\mu\text{-PIC}$  ならばその限界値は広がる可能性があるため、新しい個体で同様の測定を行う必要がある。

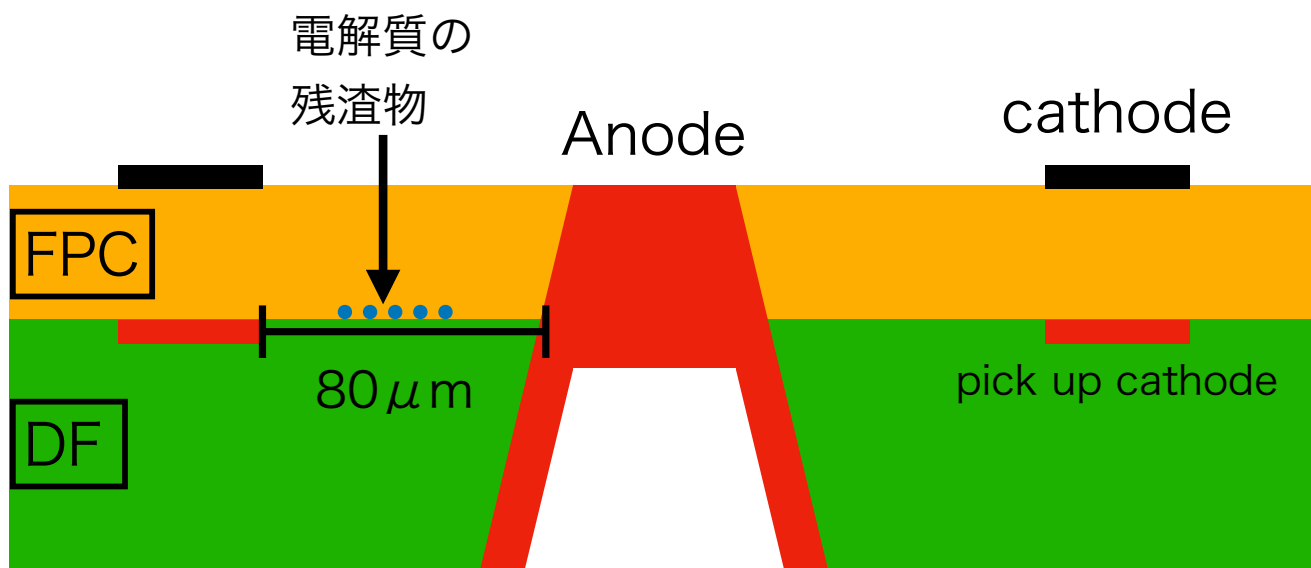


図 6.8  $\mu\text{-PIC}$  断面図：電解質の残渣物を介して電流が流れる。

## 第7章 まとめ

本論文では DLC  $\mu$ -PIC のガス増幅率を向上させるための方法をシミュレーションと実験の2つの観点から探った。

シミュレーションの観点からは DLC  $\mu$ -PIC 本体の形状について改良の余地がないかを調べるために anode の直径及び anode ring の2つのパラメータに着目し、それぞれのガス増幅率に対する影響を Garfield++、Elmer を用いて確かめた。anode 径については大きすぎると anode 直上の電場が小さくなるためガス増幅率が減少するが、小さすぎると Efficiency が低くなりこれもガス増幅率の減少につながる。シミュレーションの結果、anode 径の大きさについては現行の  $50\mu\text{m}$  設定で良いという結論に達した。また、anode ring が検出器の性能を著しく低下させていることがわかったため、anode ring をなくす製法で新しい検出器を開発中である。

実験ではガス構成及びその混合比、そして電圧の印加方法に着目した。使用したガスは主ガスが Ar と Ne、クエンチガスは  $\text{C}_2\text{H}_6$  と  $\text{CO}_2$  を用いた。その結果ガス構成では  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 90 : 10$  程度以上 Ar を混合した状態での動作が最も最適であった。また電圧は anode のみに印加することが理想であるが、現状はまだ動作が確認できていない。先述した新しい検出器を用いて同様の測定を行う必要がある。

## 第8章 謝辞

本研究を行うにあたりご指導、ご協力をいただいた全ての方々に感謝を申し上げます。

指導教員の越智敦彦先生には  $\mu$ -PIC についてほとんど何も知らなかった私に最初から丁寧に教えていただきました。どんな質問にも一緒に悩んで解決策を探ろうとしてくださり本当に助かりました。常に想像力を働かせて様々な意見を出してくる越智さんは本当にアグレッシブだなと思っていました。アグレッシブさが高じてビームテスト帰りの深夜の路地を二人で爆走してなんとか終電に間に合ったのはいい思い出です。 $\mu$ -PIC グループの学生は見習ってください。とにかく越智さんのもとで研究できてよかったです。ありがとうございました。

研究室のスタッフの方々にも大変お世話になりました。蔵重久弥先生にはコロキウムでわからないことが出た時によく質問させていただきました。蔵重先生の「この論文からは読み取れないね」という言葉に幾度となく救われました。最強の後ろ盾を得た気分で堂々と発表できたのは蔵重先生のおかげです。竹内康雄先生には主にゼミでお世話になりました。大変わかりやすく、粒子物理への理解が深まりました。山崎祐司先生には主に B4 実験でお世話になりました。スライドの見やすさや論文における日本語の使い回しなどの指導は現在の私にもとても役に立っています。身内賢太郎先生には MPGD 関連で質問を何度かさせていただきました。研究経過報告やコロキウムでは常に芯を食った質問を投げかけてくるので毎度毎度戦々恐々としていました。しかしそのような質問のおかげで自分の発表に足りないところが見つかったことも何度もあり、とても助かりました。鈴木州先生には B4 のゼミや、初めてのコロキウムでお世話になりました。覚えておられるかはわかりませんが、当時の私は全く予備知識がなかったため色々質問させていただきました。特に直前に質問して答えていただいた箇所をそっくりそのまま蔵重先生に聞かれた時は人生で初めて進研ゼミ状態を実感した瞬間だったので今でも鮮明に覚えています。前田順平先生には研究発表やコロキウムで修正箇所を指摘していただいた他、B4 での ROOT の使い方などについてご指導いただきました。秘書の吉田和美さんには出張関連の手続きなどをしていただきました。ガラスバッジ返却がいつもギリギリでごめんなさい。研究室のスタッフの方々、本当にありがとうございました。

研究室の同級生はもちろん、先輩方や後輩の皆さんにもお世話になりました。水越さんとは研究関連の話をした覚えがほとんどありません。2人で数時間飲んだ時に「『確かに』って相槌は無駄だね」と言われてから「確かに」と言えなくなりました。僕の「確かに」を返してください。石浦さんにはシミュレーション関係でご指導いただきました。何回も susy15 のメモリを食い潰してしまいとてもご迷惑をおかけしましたことをここで謝罪します。日比

さんとはよく研究室外で散歩中にお会いしました。4号館の近くで会って驚きましたが1日に2回会った時はもっとびっくりしました。酔い潰れたお姿を拝見できなかったことが何より心残りです。末田さんは同じ部活の先輩ということもあり卒団してからも会うのは不思議な感覚でした。部活ではあまり見せない、というかほとんど見ない、というか見たことがないような真面目な議論をしている姿にギャップを感じたことを覚えています。後輩では高橋くんにシミュレーション関連でとてもお世話になりました。彼のおかげででき流ようになったことは数知れず、本当に感謝しております。山下くんには実験の手助けをかなりしてもらいました。 $\mu$ -PIC グループに後輩が2人もいてくれて本当に助かりました。ありがとうございました。

同級生ではなんといっても同じ  $\mu$ -PIC グループの長崎くんにはとてもお世話になりました。常に画面と格闘している姿を見てただただすごいと思っていました。ほぼ毎日チャリで来るパワーさをどうか今後も持ち続けていてください。安倍くんは院からの付き合いですが、それにしてもよく喋ったなあと思っています。リモート授業中に画面と窓の外から同時に救急車のサイレンが聞こえてきて家の近さを実感しました。僕は来年からもあの家です。池森くんとは何度か飲みに行きました。普段からいい声でカラオケでもいい声を出すならどちらかを分けて欲しいです。尾崎くんとはよくどうでもいい話をしました。中でも呪術廻戦を布教されたので信者になってしまいました。窪田くんは同じ部活ということもあり一番長く付き合った同期です。セレブを地で行くこともできるはずなのにどこか庶民的なところがあるのがすごく不思議でした。彼の生い立ちは全部嘘という一世一代のドッキリをしているのではないかと疑っています。寺村くんとは席が隣ということもあり雑談が多めだったと思います。また麻雀を打ちましょう。前田くんとは大学院に入ってから喋るようになりましたが、飲んだ後に研究室に戻るということを平気でこなす逸材であることにとても驚きました。ユリーは日本語ペラペラなのはもちろん、物理の知識もしっかりしていて尊敬の感情しかないです。個性あふれる同期に囲まれてとても楽しい研究生活でした。

最後に、本研究に関わっていただいた全ての方々に重ね重ねお礼申し上げます。ありがとうございました。

谷口 大悟

# 参考文献

- [1]G. Charpak, R. Bouclier et al., NIM 62 (1968) 262-268, “ The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles”
- [2]A. Ochi, Y. Homma et al., Physics Procedia 37 (2012) 554-560, “Development of a Micro Pixel Chamber for the ATLAS upgrade”
- [3]Particle Data Group, Chin. Phys. C 40 No.10(2016) 10001, “The Review of Particle Physics”
- [4]Jonathan Bortfeldt, LMU Munich master’ s thesis (2014), “Development of Floating Strip Micromegas Detectors”
- [5]<http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-particle-detectors-accel.pdf>
- [6]Edward A. Mason, Earl W. McDaniel, Wiley(1973), ”The Mobility and Diffusion of Ions in Gases.”
- [7]S.C.Brown, MIT Press, Cambridge,MA(1959), ”Basic Data of Plasma Physics.”
- [8]Tom Francke and Vladimir Peskov, “Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors” .
- [9]Glenn F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement Third Edition”
- [10]Maxim Titov, arXiv:1008.3736, ”Gaseous Detectors: recent developments and applications”
- [11]T. Tanimori, Y. Nishi et al., NIM A 436 (1999) 188-195, “Imaging Gaseous Detector based on Micro Processing Technology”
- [12]CERN Gas Detectors Development, <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- [13]C. Bini, 2014 JINST 9 C02032, “Study of the performance of the Micromegas chambers for the ATLAS muon spectrometer upgrade” .
- [14]Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard et al., NIM A 376 (1996) 29-35, “MICROMEAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments”
- [15]F. Jeanneau , NIM A 450(2000)313-24,”First results of Micromegas detector with fastintegrated electronics”
- [16]Yi Zhou, NIM A 927(2019)31-36 , ”Fabrication and performance of a  $\mu$  RWELL detector with Diamond-Like Carbon resistive electrode and two-dimensional readout”
- [17]石飛 由介 150GeV/c ミューオンビームを用いた DLC  $\mu$ -PIC の性能評価
- [18]駒井英俊, 平成 25 年 神戸大学 修士論文, “ $\mu$ -PIC の放電抑制に関する研究” .

- [19]Y. Takeuchi, K. Komiya, T.Tamagawa and Y. Zhou, Micro-Pattern Gaseous Detectors Conference 2019 Journal of Physics: Conference Series 1498(2020)012011 "Development and properties of 100 mm-square size LTCC-GEM"
- [20]J. Zhou , NIM A 1024(2022) 166076 , "A sealed ceramic GEM neutron detector with the mixture gas Ne/CO<sub>2</sub>"
- [21]A.Bondar , NIM A 484(2002)200-203 , "High pressure operation of the triple-GEM detector in pure Ne, Ar and Xe"
- [22]Lorenzo Pezzotti, (ICHEP2020)766 , "Irradiation and gas studies of Micromegas production chambers for the ATLAS New Small Wheel"