

修士学位論文
メッシュ付き μ -PIC の安定動作に向けた研究

神戸大学大学院 理学研究科 博士前期課程 物理学専攻
071S114S
小林 正治

平成 24 年 2 月 10 日

概要

我々は、 μ -PIC(Micro Pixel Chamber) にマイクロメッシュを実装した M^3 -PIC(Micro Mesh Micro Pixel Chamber) を独自に研究している。 μ -PIC はマイクロパターンガス検出機の一つで、PCB 技術を用いて作製されているため、大面積化、量産が容易であり、かつ 10^7 counts/mm²/sec もの高輝度入射粒子に対応することができる。しかしながら、 μ -PIC 単独では MIP(Minimum Ionized Particle) を観測する際に必要な 10^4 以上のガス増幅率を安定に得ることは難しい。このため、実際の測定では GEM(Gas Electron Multiplier) 等を測定器に組み合わせることが多い。

M^3 -PIC の開発当初は、メッシュ～基板間のスペーサはプラスチック板を用いた原理検証用のもので、検出領域は 0.3cm×3cm と非常に限られたものであった。そこで今回は、 M^3 -PIC の大面積化を視野に入れ、検出領域 3cm×3cm において、厚さ 10 μ m 程のマイクロメッシュを実装できるよう、スペーサの実装を補助する治具を製作した。また、動作ガスも Ar : C₂H₆ = 90 : 10 から紫外線吸収の大きい Ar:C₂H₆=50:50 に変更した。その結果、昨年を上回るガス増幅率である 5×10^4 以上を得ることが出来た。

さらに、 M^3 -PIC の特徴の一つである 10^4 を越える高い増幅率で、安定に動作できることを確かめるべく、 M^3 -PIC の 1 ヶ月に渡る長期動作試験を行った。その際のアノード～カソード間の放電状況も観測した。

目次

第 1 章 Introduction	5
1.1 粒子線の検出	5
1.1.1 荷電粒子の検出	5
1.1.2 X 線、 γ 線の検出	6
1.2 ガス検出器	10
1.2.1 電離箱 (ion chamber)	10
1.2.2 比例計数管 (proportional chamber)	10
1.2.3 MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)	12
1.2.4 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)	12
1.2.5 MicroMegas,GEM	15
第 2 章 μ -PIC	17
2.1 構造と動作原理	17
2.2 特徴	18
第 3 章 メッシュ付き μ -PIC (Micro-Mesh Micro-Pixel Chamber :M ³ -PIC)	19
3.1 構造と動作原理および特徴	19
3.2 M ³ -PIC の本体	21
3.2.1 読み出し	22
3.2.2 マイクロメッシュ	23
第 4 章 セットアップ	25
4.1 マイクロメッシュ、スペーサ実装	25
4.2 動作ガス	28
4.3 測定機器	29
4.4 電荷～ADC 校正	31
4.5 増幅率計算	33
第 5 章 M ³ -PIC の性能評価	36
5.1 増幅率測定	36
5.2 増幅率一様性測定	39
5.3 長期安定試験	40
5.3.1 長期測定に向けたセットアップ	40
5.3.2 結果	42

5.4	discussion	46
5.4.1	長期測定試験	46
5.4.2	放電問題	47
第6章	まとめ	52

図目次

1	π^\pm の銅内でのエネルギー損失を示したグラフ。高エネルギー物理では、 $\beta\gamma \gtrsim 10$ をもった粒子を検出する。 [3]	6
2	光子と物質との相互作用	8
3	各種ガスの光電吸収断面積と入射光子の平均自由行程 [2]	9
4	鉛における光子の吸収断面積 [2]	9
5	平行板型電離箱の概念図 [1]	10
6	比例計数管の構造図	11
7	一次電子のアノードワイヤ近傍でのなだれ増幅の様子 [2]	11
8	MWPC(Multi Wire Gas Camber) の構造図 [7]	13
9	MSGC(Micro Strip Gas Camber) の構造図 [7]	14
10	Micromegas の概念図 [8]	15
11	GEM(Gas Electron Multiplier) の構造図 [10]	16
12	μ -PIC:Micro Pixel Chamber の構成 [11]	17
13	M^3 -PIC	20
14	ion back flow の概念図 [13]	20
15	メッシュの有無による電場構成の比較	21
16	M^3 -PIC の外観	22
17	μ -PIC 読み出し	23
18	各マイクロメッシュの拡大写真	24
19	プラスチックフィルム製スペーサと当初の実装方法を示す。 [15]	25
20	μ -PIC 基板とメッシュとのスペーサ:ナイロンワイヤ実装治具試作品	26
21	実装治具に張ったワイヤとメッシュを μ -PIC 基板に実装する過程	27
22	マイクロメッシュを μ -PIC に実装した写真	28
23	スペーサ実装により、 μ -PIC のアノード電極列が覆われた拡大写真	29
24	測定におけるガス系統図	29
25	出力電荷を分割するディバイダ	30
26	M^3 -PIC 測定に使用した機器およびブロック図	31
27	実際の測定写真	32
28	M^3 -PIC の測定回路図	32
29	校正回路とそのブロック図、およびその校正直線	33
30	放射線源を ^{55}Fe 、動作ガスを Ar に用いた際の電子の生成過程とヒストグラム	34
31	P10 ガスと Ar:C ₂ H ₆ =50:50 とのガス増幅率の比較	37
32	メッシュ電圧をパラメタとした Ar:C ₂ H ₆ =50:50 のガス増幅率	37
33	ガス増幅率 5×10^4 の時のヒストグラムとオシロスコープの波形	38

34	M ³ -PIC4 号機の増幅率曲線。ガス増幅率 5.7×10^4 を達成した。	38
35	測定領域 No.1~No.3	39
36	データロガーおよびボルテージレコーダ	41
37	M ³ -PIC3 号機の 24 時間測定結果	42
38	長期測定結果と測定期間中の気圧、気温、湿度 x 軸: 測定日数 y 軸: 上から ADC count ,hPa, °C,%	44
39	31 日間の長期測定の様子	45
40	31 日間のアノード~カソード間放電を示したプロット	48
41	1000hPa を基準として、フィッティングを用いた補正方法 $p < p_0 (= 1000[\text{hPa}])$	49
42	2 次元ヒストグラム	49
43	圧力補正を施した Ar : C ₂ H ₆ = 50 : 50 の長期測定でのガス増幅率	50
44	放電箇所を示すマップと放電箇所の拡大写真	51

表目次

1	MSGC と MWPC との性能比較 [7]	14
2	アノード電圧と Ar:C ₂ H ₆ =50:50 の増幅率との関係	39
3	各測定領域の増幅率の比較	40
4	流量に対する光電ピーク平均値の変動	42
5	測定中の増幅率変化	43
6	気圧の補正項を加えた増幅率 A_2	47

第 1 章 Introduction

放射線検出器は、入射粒子の運動量やエネルギーを解析する上で必要な要素である。高エネルギー粒子と物質との反応によって、光電効果や電子対生成などのような、入射粒子と物質との相互作用で電子などが生成され、それをもって信号を観測する。結果として放射線検出器は、人間の肉眼に取って代わるといえる。

本章では、ガス検出器の検出原理や、その発展過程を述べる。

1.1 粒子線の検出

この章では、放射線の検出原理について説明する。説明の際に使用した図やグラフなどは、[1], [2] を参考とした。

1.1.1 荷電粒子の検出

荷電粒子は物質中を通過することで、電磁相互作用を起こす。これを荷電粒子の検出に利用する。媒質中の電子は、入射粒子のクーロン場による連続的な相互作用により静電気力を受ける。これにより物質原子は電離を起こす一方で、入射荷電粒子はエネルギー損失を起こす。他にも入射粒子のエネルギーは、チェレンコフ放射、制動放射などによっても損失される。ガス検出器においては、これらの作用はクーロン相互作用による損失と比較して、無視できるほど小さいため、入射荷電粒子の物質中のクーロン相互作用による損失についてのみ述べる。

低密度な物質中での入射荷電粒子のクーロン相互作用によるエネルギー損失は、Bethe Bloch の式 (1) で与えられる。 π^\pm の銅中でのエネルギーを示したグラフを図 1 に示す。

$$\frac{dE}{dx} = -K \frac{Z}{A} \frac{\rho}{\beta^2} \ln \left(\frac{2mc^2 \beta^2 E_M}{I^2 (1 - \beta^2)} \right) \quad (1)$$

$$K = \frac{2\pi N z^2 e^4}{mc^2}$$
$$E_M = \frac{2mc^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \quad (2)$$

ここで、 N はアボガドロ定数である。 Z 、 A は媒質の原子番号と原子量を示す。 ρ 、 I は媒質の密度、実効電離ポテンシャルで、 z 、 β は入射荷電粒子の電荷、光速を基準とした速度であり、 m 、 e は電子の静止質量、素電荷である。 E_M :(2) は各々の相互作用や、2 体の相対論運動学で許される、エネルギーを受け渡す最大値である。

このような過程を経て、チェンバー内の物質から、電子イオン対を生成する。しかし、そのままではこれらは再結合し、元の中性原子に戻る。そこで、ガス中に電場をかけて、ガス分子の電子とイオン対の生成から得た電子群を検出することがガス検出器の原理である。

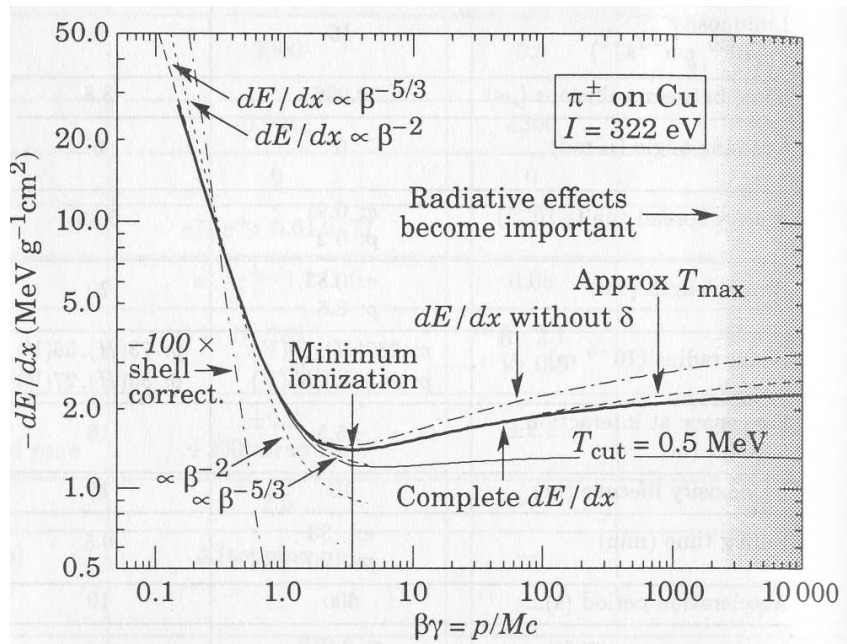


図1 π^\pm の銅内でのエネルギー損失を示したグラフ。高エネルギー物理では、 $\beta\gamma \geq 10$ をもった粒子を検出する。[3]

1.1.2 X線、 γ 線の検出

光子と物質との相互作用は、光電効果、コンプトン効果、電子対生成があり、何れも高エネルギーの電子を放出する。よって、これらの反応後は、電子と物質の相互作用に等しい。この作用は、入射光子のエネルギーに依存する。図4に鉛における入射光子の吸収断面積を示す。横軸を入射光子のエネルギーとし、縦軸を鉛中の反応断面積とする。

光電効果 入射光子のエネルギーが、100keV以下の領域の場合においては、この過程が支配的に寄与する。光子のもつ全エネルギーは、原子核に光電吸収され、エネルギー $E_e = h\nu - E_b$ をもった光電子が軌道外に放出される。さらに、その原子は励起状態にあり、空となったエネルギー準位より高い電子が基底状態に戻った際に、その準位間のエネルギーをもった特性X線、もしくはオージェ電子が放出される。図4に各種ガスの光電吸収による、入射光子の吸収断面積と平均自由行程を示す。横軸を入射光子のエネルギーとし、縦軸を鉛中の反応断面積とする。

コンプトン効果 これは、図2(b)に示すように、入射光子が電子と散乱によって、自身のエネルギーの一部をを失い、角度 θ で散乱される現象をいう。入射光子のエネルギーは自身の振動数に比例するので、散乱後の波長は大きくなる。また、この相互作用を受けた電子も、角度 ϕ で散乱される。入射光子のエネルギーが数 MeV となると、この相互作用が顕著となる。今、初期状態において、電子は静止しているとする。入射光子と散乱光子のエネルギーは

各々 E_γ, E'_γ として、反跳電子の運動エネルギーを T_e とすると、エネルギーと運動量の保存則から、散乱光子と反跳電子のエネルギーは、各々式 (3)(4) から与えられる。

$$E'_\gamma = E_\gamma \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) E_\gamma} \quad (3)$$

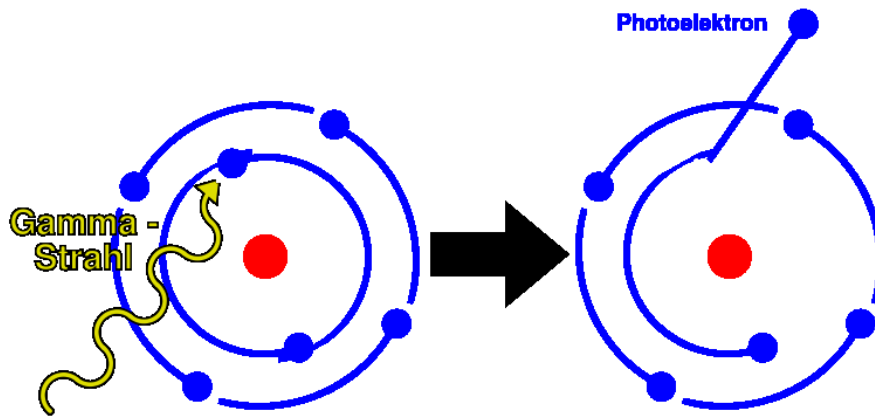
$$T_e = E_\gamma \frac{(1 - \cos \theta) E_\gamma}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) E_\gamma} \quad (4)$$

電子対生成 図 2(c) に示すように、入射光子が、原子核近傍の電場を通過すると、電子と陽電子が生成されることがある。入射光子のエネルギーが電子の静止質量 $m_e c^2$ より 2 倍以上を満たすとこの現象が起こる。電子対生成は 10MeV 以上の γ 線に対して重要な相互作用である。この仮定によって生成された電子、陽電子対は原子核に運動量を与え、過程全体を通してエネルギーと運動量が保存される。

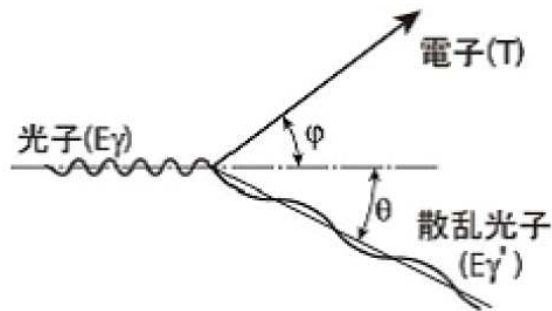
原子核の質量は、光子 (質量ゼロ) と比較して極めて大きいので、ほとんど動かないとする。この時の γ 線のエネルギー E_γ と、電子陽電子のエネルギー E_{e^+}, E_{e^-} との間には、

$$E_\gamma = E_{e^+} + E_{e^-} + m_e c^2 \quad (5)$$

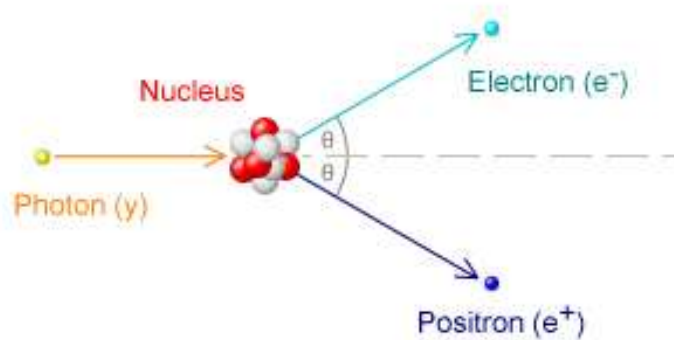
が成り立つ。



(a) 軌道電子への光電吸収を示す概念図 [4]



(b) 入射光子と電子とのコンプトン散乱を示す概念図 [5]



(c) 入射光子と原子核との相互作用による電子対生成を示す概念図 [6]

図2 光子と物質との相互作用

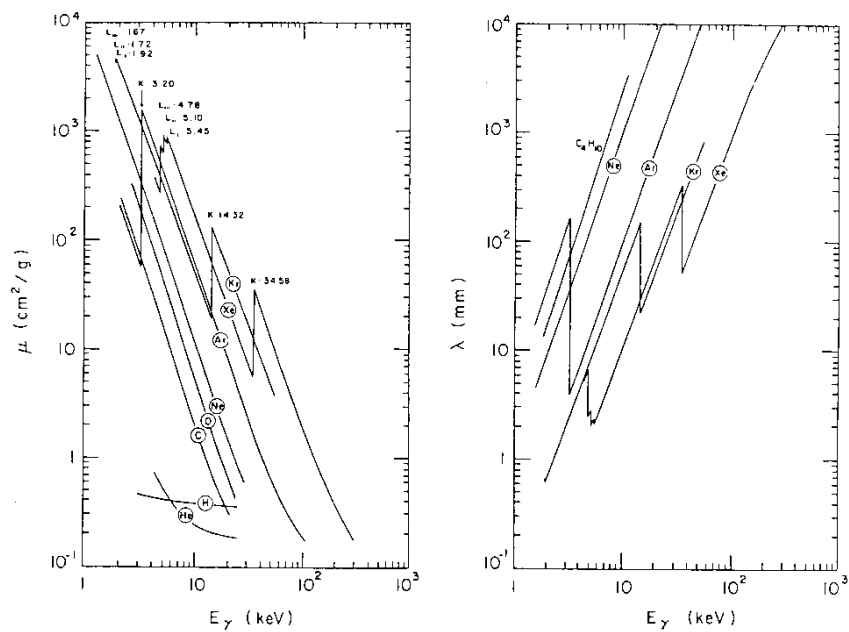


図3 各種ガスの光電吸収断面積と入射光子の平均自由行程。原子番号の大きい気体ほど断面積が大きく、自由行程が小さくなる。[2]

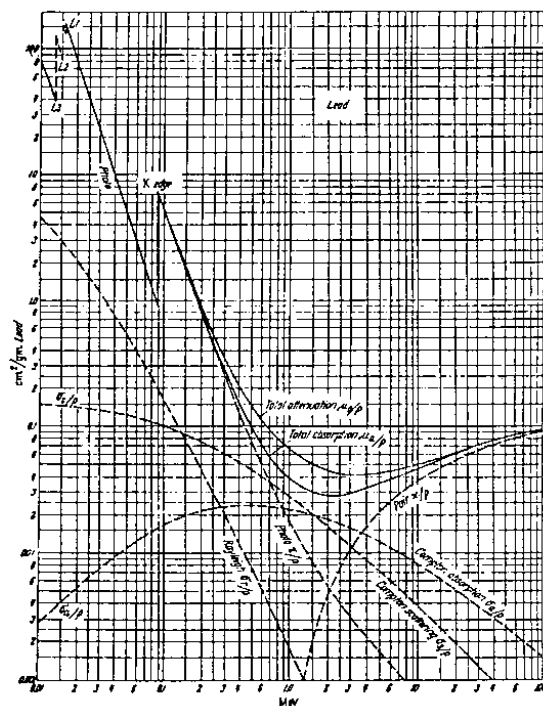


図4 鉛における光子の吸収断面積 x:入射光子のもつエネルギー y:鉛への吸収断面積 入射光子のエネルギーの大きさの順に、光電効果、コンプトン効果、電子対生成の反応断面積の影響が現れる。[2]

1.2 ガス検出器

ガス検出器は、荷電粒子や γ 線のような入射粒子を、ガス増幅を用いて検出する測定機器である。その検出過程は、動作ガスに満たされたチェンバー内に入射した荷電粒子や γ 線が、ガス物質との相互作用によって荷電粒子を生ずる。次いで陽陰の印加電圧によって生じた電場により、陽極にドリフトされる。高い電場をもつ領域で増幅させた電子群を測定、検出する。ここではガス検出器の動作原理や代表的な検出器の動作原理を述べる。

1.2.1 電離箱 (ion chamber)

チェンバー内は、 100V/cm 程度の大きさをもつ電場のかかった状態で、動作ガスに満たされている。荷電粒子がチェンバー内を通過するとその中のガスはイオン化され、これをもって入射粒子線の強度を測定するのが電離箱である。電離箱の最も簡単な構造は、図5に示すような2枚の平行な電極板間にアルゴンのような動作ガスを封入したものである。この検出器は、ある程度の粒子線の強度を測定することはできるが、個々の粒子線を測定することができない。

1.2.2 比例計数管 (proportional camber)

図6に示すような構造をもつ比例計数管は、個々の粒子線のエネルギー損失を測定できる検出器である。チェンバー内はArやNeなどの希ガスで満たされている。アノードに数 $10\mu\text{m}$ の細いワイヤを用いているため、電極近傍ではおよそ 10kV/cm もの電場の大きさがあり、二次電離を起こす閾値を満たす。二次電子によって得られた電子も、アノード近傍のつくる電場によって加速されるため、ガス分子との衝突はアノードに信号として吸収されるまで連鎖して続く。このような過程はタウンゼントなだれと呼ばれている。図7に、ガス分子が電離し、イオン対を生成した後、なだれ増幅を起こして、電子がアノードに吸収されるまでの電子とイオンの様子を示す。チェンバー内で、ガスと入射粒子との相互作用により電子イオン対が生成すると、アノードとカソードとの間の電位差によって電子はアノードへ、ガスイオンはカソードヘドリフトされる。

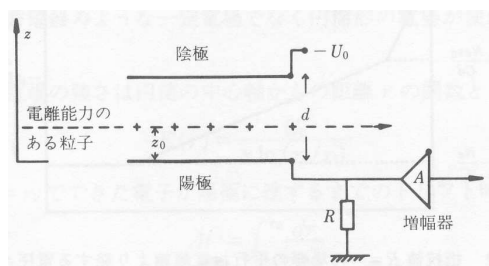


図5 平行板型電離箱の概念図 [1]

この時の円柱形状での陽極中心から、半径 r における電場の大きさは、

$$E(r) = \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (6)$$

となる。ここで、 a はアノードワイヤの半径、 b はカソードの内径、 V はアノードとカソードとの電位差である。これにより、電場はアノード近傍で非常に強くなる。これによって、ドリフトされた電子はアノード近傍でガスを電離させるに十分なエネルギーを得られる。結果として、アノードワイヤはなだれ増幅された電子による信号と、ガスイオンがアノードワイヤから遠ざかることによって励起される信号が観測される。

比例計数管の原理を応用とした検出器として、ドリフトチェンバー (DC) や、平行電極板の間に複数のアノードワイヤを配した MWPC がある。

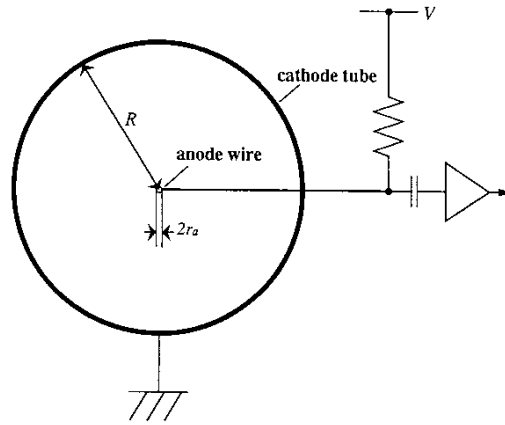


図 6 比例計数管の構造図 [7] アノードワイヤの直径は $10\mu\text{m}$ 程度である。

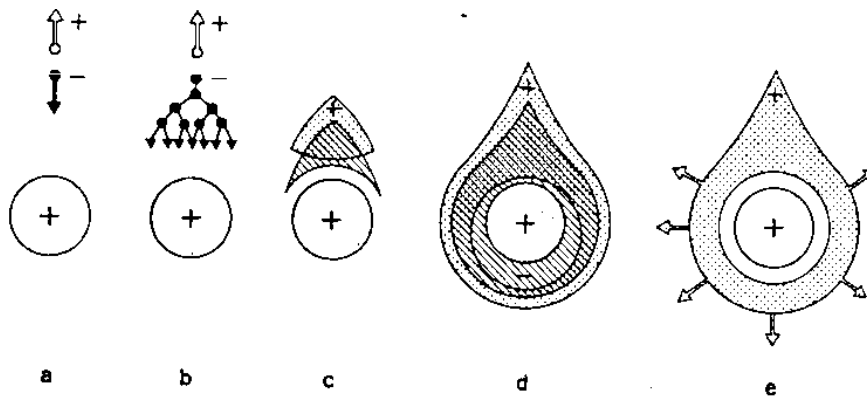


図 7 一次電子のアノードワイヤ近傍でのなだれ増幅の様子 [2]

1.2.3 MWPC(Multi Wire Propotional Chamber)

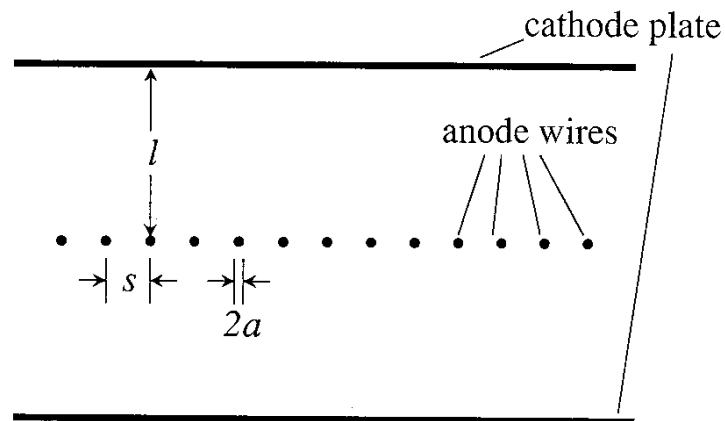
1960年代初頭は、spark camber が粒子線検出器の主流となっていた。IC(Integrated Circuit:集積回路)の登場などによる、電気電子回路の発達も手伝って、1968年、MWGC(Multi Wire Gas Chamber)が開発された。増幅率は 10^5 程度の高いガス増幅率を実現できるので、MIP(Minimum Ionized Particles)を測定できる領域を満たす検出器である。図8(a)からも分かるように、比例計数管をいくらか横に並べたような構造となっている。さらに、この検出器は位置分解能、時間分解能にも優れている。

しかし、高輝度な入射粒子の測定では、チェンバー内のガスイオンの影響により、増幅率が劣化し、対応できないことが知られた。入射電子許容量は、アノードワイヤのピッチを小さくすれば改善されるが、ワイヤ同士の静電反発が大きくなり、それらの配列がずれてしまう。ワイヤ直径は数十 μm 程度であり、平面をなす配列を保つために各々のワイヤに張力を働かせている。それらの素材はこの力に耐えうるよう、タングステンやピアノ線(鋼線)が用いられる。強い張力を得るために直径を大きくすると、ワイヤ近傍の電場は緩やかとなり、増幅率が低くなる。

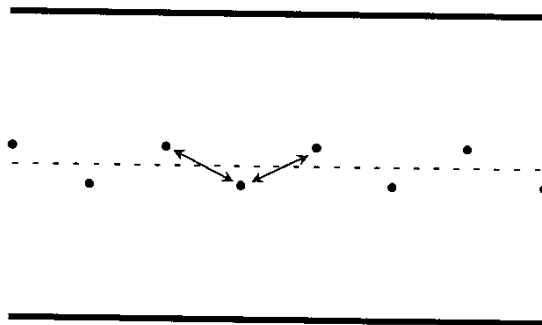
1.2.4 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)

1.2.3節で述べたように、 $10^4\text{counts}/\text{mm}^2/\text{sec}$ を越える入射粒子の場合は、増幅過程で生ずるイオンにより、増幅率が低下する。ワイヤ電極のピッチを小さくすれば、ガスイオンの移動度が上昇し、入射許容量が上がる。しかし、ワイヤの配列に歪みが生じてしまう。最小のワイヤのピッチは、0.5mm程度が限界である。そこで、新たに開発されたのが、1988年にE.Oedらによって開発されたMSGC(Micro Strip Gas Chamter)である。

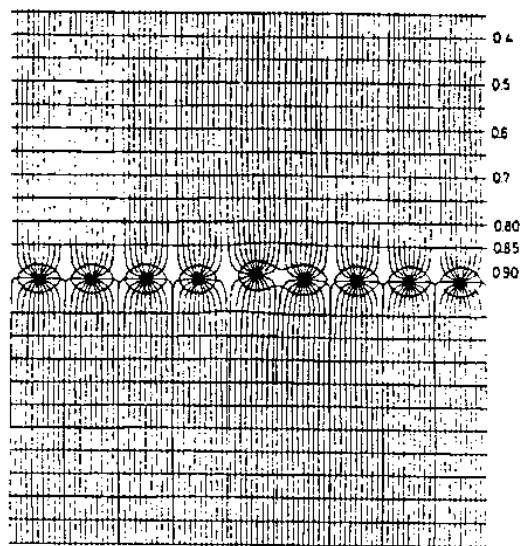
MSGCは、MWPCのアノードワイヤの代わりに、リソグラフィー技術によって絶縁体上に電極を印刷したされた検出器である。基板構造は、アノード電極とカソード電極を交互にプリントした読み出し基板からなる。図9(b)に示すように、基板の構造上、ガスイオンはワイヤチェンバーと比較して、カソード電極に吸収されるのが早い。しかしながら、電子やガスイオンによる絶縁体上でのチャージアップによる、基板近傍の電場変化による増幅率変化や、放電による絶縁破壊のために、アノード電極が列ごと破壊される問題があり、高い増幅率を持たせることが難しいため、中性子検出用の用途以外では、実用化に至らなかった。MWPCとの性能比較は表1にまとめた。



(a) MWPC の原理図

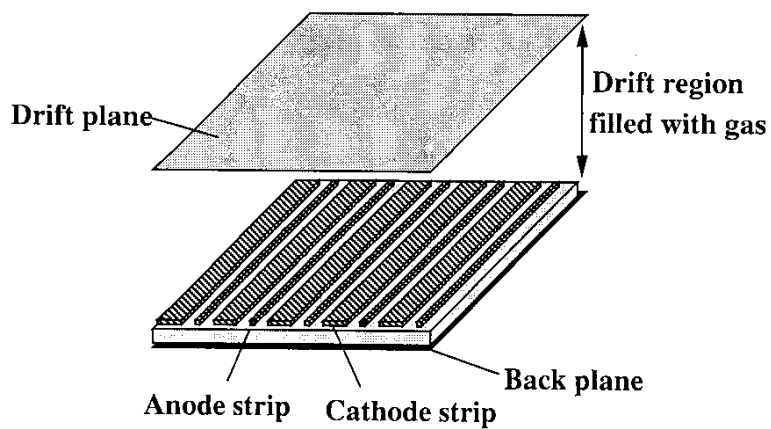


(b) MWPC のワイヤ同士の静電反発による、ワイヤの変動図

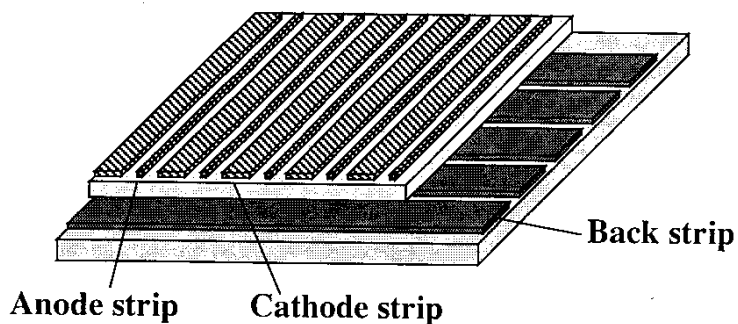


(c) MWPC の電場構造図。位置の変動による電場の変化も示す。

図 8 MWPC(Multi Wire Gas Camber) の構造図 [7]



(a) MSGC の原理図



(b) 2次元 MSGC の構造図

図9 MSGC(Micro Strip Gas Camber) の構造図 [7]

	MSGC	MWPC
信号間隔	~200[μm]	$\geq 1[\text{mm}]$
空間分解能	30[μm]	~200[μm]
時間分解能	10[nsec]	30[nsec]
イオン収集時間	200[nsec]	80[μsec]
入射粒子許容量	$10^7[\text{counts}/\text{mm}^2/\text{sec}]$	$10^4[\text{counts}/\text{mm}^2/\text{sec}]$
ガス増幅率	~ 200	~ 10^6

表1 MSGC と MWPC との性能比較。入射粒子許容量は MSGC の方が大きい、増幅率は MWPC の方が大きい。 [7]

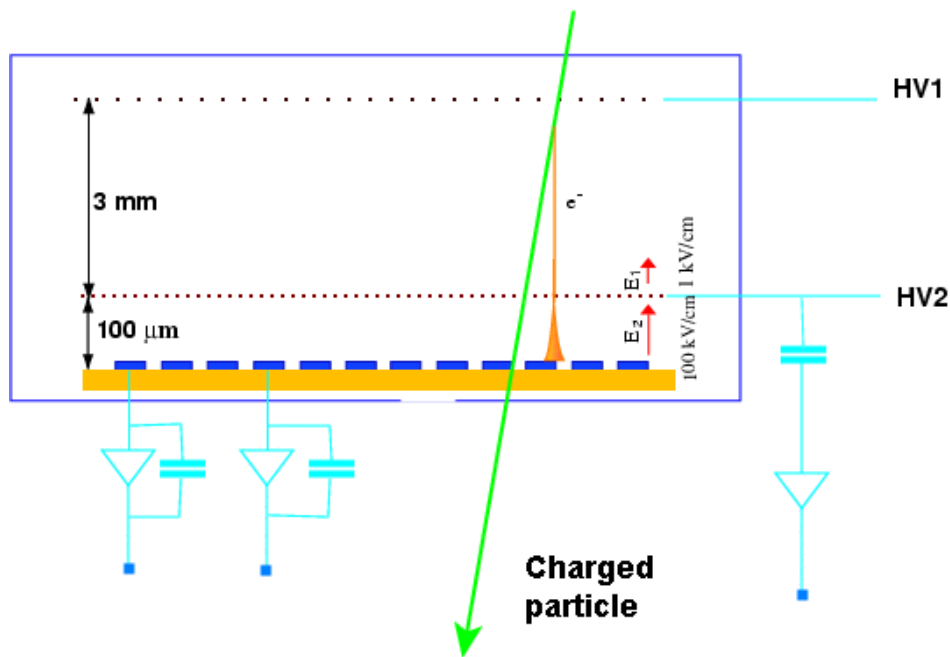


図 10 Micromegas の概念図。amplification gap で avalanche が起きている。 [8]

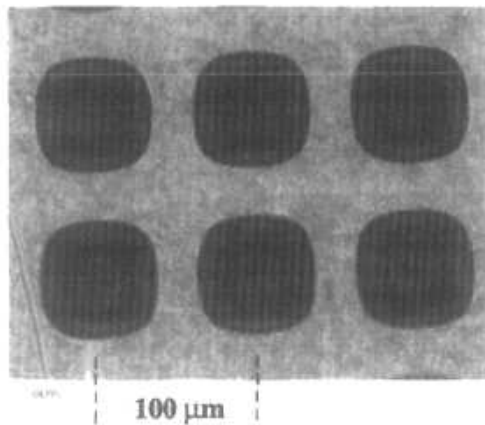
1.2.5 MicroMegas,GEM

この節では、MSGC の欠点である読み出しストリップの放電破壊を克服するために開発された種々のマイクロパターンガス検出器について述べる。

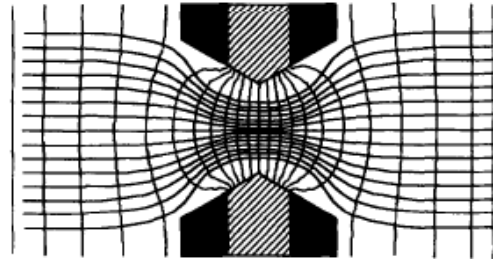
micromegas 1996 年、Y.Geomataris らによって開発された検出器である。この検出器の説明は [9] を参考とした。この検出器の概念図は、図 10 に示す。

この構造はドリフトプレーン (DP) とマイクロメッシュをカソードとし、プリント基板はすべてアノードストリップとした構造をもつ MPGC である。チェンバーは DP からマイクロメッシュまで 5mm 程の高さをもつ (conversion gap) ドリフト領域とマイクロメッシュからアノード基板まで 100 μ m の高さを持つ増幅領域とからなり、カソードメッシュ、アノード基板間領域 (amplification gap) でガス増幅する。増幅領域となるマイクロメッシュとアノード基板間はクォーツファイバーで支えられている。

入射粒子とガスとの相互作用で得られた一次電子は、ドリフト領域でかけられた 1kV/cm の大きさを持つ電場によってドリフトされマイクロメッシュを通過する。マイクロメッシュからアノード電極にかけては 100kV/cm 程度の電場により、なだれ増幅を多量に起こす。この検出器の特徴は、 10^9 /counts/mm²/sec の入射粒子に対応できることである。



(a) GEM の拡大写真



(b) GEM の断面図とその電場構造

図 11 GEM(Gas Electron Multiplier) の構造図 [10]

GEM(Gas Electron Multiplier) これは 1997 年に、F.Sauli によって開発された検出器である。この原理は参考文献 [10] から説明する。この構造は、2 枚の電極間に $25\mu\text{m}$ の絶縁体をはさまれており、 $70\mu\text{m}$ の穴が $100\mu\text{m}$ のピッチで開けられたものとなっている。2 つの極板間に電圧差を与えることで、数 10kV/cm の電場を得られる。図 11 にその断面の電場構造を示す。この図から分かるように、GEM の中央の直径は最も狭くなっており、そこでは電場が最も強くなっている。MWPC や MSGC のカソードとアノードの間に組み合わせることによって、基板のアノード以外からも増幅領域を増やすことができる。

第 2 章 μ -PIC

μ -PIC は 2000 年に、東工大の越智氏、谷森氏らによって開発された粒子線の二次元検出器である。この検出器は基板作製技術に PCB(Printing Circuit Board) 技術を用いているため、大面積化や大量生産に向いている特徴がある。この章では、[11] を参考とした。

2.1 構造と動作原理

μ -PIC の基板は、図 12(a) に示すように、厚さ 0.1mm の 2 面の PCB をもち、その一方はアノードストリップ電極として、他方はカソードストリップ電極として構成されている。カソードストリップは、直径 $250\mu\text{m}$ のホールをもち、そのピッチは $400\mu\text{m}$ である。アノードピクセルは直径 $50\mu\text{m}$ で、カソードストリップの中心に位置している。カソードストリップの下部にあるアノードストリップのエッジ幅は $100\mu\text{m}$ であり、これらは直交している。この様な基板構成から、入射粒子の位置情報を 2 次的に得ることができる。

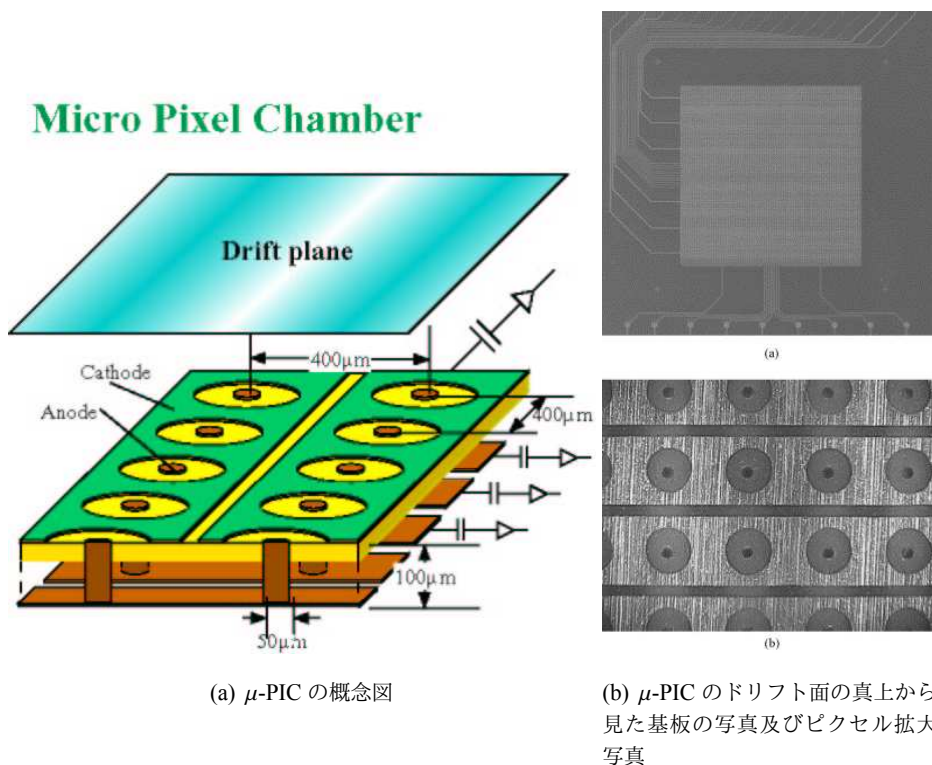


図 12 μ -PIC:Micro Pixel Chamber の構成 [11]

2.2 特徴

この検出器の特徴は、PCB 技術を用いる製造過程のため、安価であり、大面積化や大量生産が MWPC と比較して容易ところである。MSGC と同様に、アノード近傍にカソード電極が配置されているので、高輝度入射粒子に対応できる一方、点状のアノード近傍、円状のカソードと比較して高い電場を形成するので、放電を起こさずに、高いガス増幅率を得られやすい。MSGC は、電極に高い電圧を印加すると、アノード～カソードストリップ間の放電による絶縁破壊を起こす。このため、読み出し電極列の破壊が MSGC の欠点であった。しかし、 μ -PIC の場合は放電破壊が生じても、1 ピクセルのみに止まり、広範囲にわたる電極破壊は起こらない。この検出器は電圧を 6kV まで、基板に印加することができることが確認されている。さらに、図 12 で示すように、 μ -PIC の電極構造がアノードを中心とした円をなして、カソードで包囲されたものとなっている。MSGC の電極構造は図 9(b) に示したように、アノードストリップとカソードストリップとが平行に列をなしている。一方、 μ -PIC は、 $50\mu\text{m}$ 程の直径を持つアノードピクセルがカソードに包囲されている構造をなしている。結果として、 μ -PIC のアノード電極近傍の電場の強さは、MSGC のそれよりも大きく、なだれ増幅によりガス増幅率を上げることができる。

しかし、 μ -PIC 単独でアノードとピクセルとが放電する限界まで電圧を印加させても、得られるガス増幅率は最大で 10^4 程度までである。文献 [7] によると、1000 時間にわたる測定では 5×10^3 の増幅率で動作させていた。 μ -PIC を MIP 粒子の読み出しに使用する際は、増幅率を上げる手段として、GEM などを組み合わせることがある。

第3章 メッシュ付き μ -PIC

(Micro-Mesh Micro-Pixel Chamber :M³-PIC)

メッシュ付き μ -PIC(M³-PIC) は、高増幅率の状況下でも安定動作を持続できる目的で、 μ -PIC を改良したガス検出器であり、神戸大が独自に開発を行っている。この検出器の説明は、[12] を参考とした。

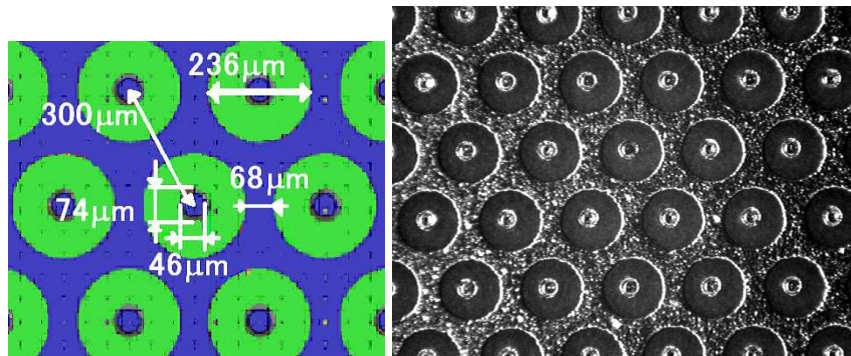
3.1 構造と動作原理および特徴

M³-PIC は、図 13 に示す μ -PIC の読み出し基板から数百 μm 近傍にマイクロメッシュを実装した検出器である。マイクロメッシュを用いて増幅領域を拡大させている点は、Micromegas と共通している。ドリフト領域で、ガス原子と相互作用を経て、生成された一次電子が、メッシュ～基板間領域にて得られた高電場によりガス増幅される。増幅可能な領域は、従来の μ -PIC より多く得られ、高いガス増幅率を得ることができる。

図 15(a) と図 15(b) にメッシュの有無における電場構造を示す。これらの 2 図から、メッシュ実装時の、Anode pixel 真上の等電位線に注目すると、非実装のそれと比較して密であることが分かる。これは、増幅領域が拡大していることを意味する。

さらに、マイクロメッシュが、ガス増幅過程で生成された陽イオンを吸収する特性を活かして、本機の TPC(Time Projection Chamber) 読み出しの応用が考えられる。TPC は、チェンバーの平面にある読み出し回路から入射粒子の 2 次元情報を得るとともに、物質との相互作用から得た一次電子のドリフト時間から、もう一次元の位置情報を得られる検出器である。このときのチェンバー内の電場は読み出し平面に垂直で、かつ一様とする。しかし、ガス増幅から生じた、ガス分子のイオンがチェンバーのドリフト領域内に侵入するため、ドリフト電場の構造が変化してしまう。このため一定に保つべき一次電子のドリフト速度や経路が変化してしまい、TPC の位置分解能が悪くなる。本研究では、このような現象を ion back flow と称する。その様子を図 14 に示す。この現象を低減するために、シミュレーションを用いてのアノードやカソード、及びメッシュ電圧などの条件の最適化や、測定を行っている。これらの詳細な研究については、[13] や [14] に詳しい。

文献 [5] によれば、ガス増幅率は、メッシュ電圧に比例することと、メッシュ電圧に対する増幅率の増加傾向は、基板～メッシュの高さによらないこと、基板～メッシュの高さが大きければ、メッシュ近傍の電場が低くなる。したがってメッシュ～アノード間の放電が抑えられる傾向にあることである。また、[15] のメッシュ実装方法によれば、使用したスペーサはプラスチックシートであった。実装の概念図を、図 19(a) として示す。この時のメッシュ実装領域は $0.3\text{cm} \times 3\text{cm}$ であった。しかしながら、この実装方法では、実装場所によって増幅率がバラつき、非一様となる。その上、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ μ -PIC の大面積に及ぶ実装に対応することができない。そのため、広範囲に亘ってスペーサを実装した後、その上にメッシュを実装して数々のチャンネルで測定した際、ガス増幅率のバラつきが起こらないような一様性を保つ方法を開発することが肝要である。本研究ではナイロンワ



(a) μ -PIC 読み出し基板の図面

(b) μ -PIC の光学顕微鏡による拡大写真

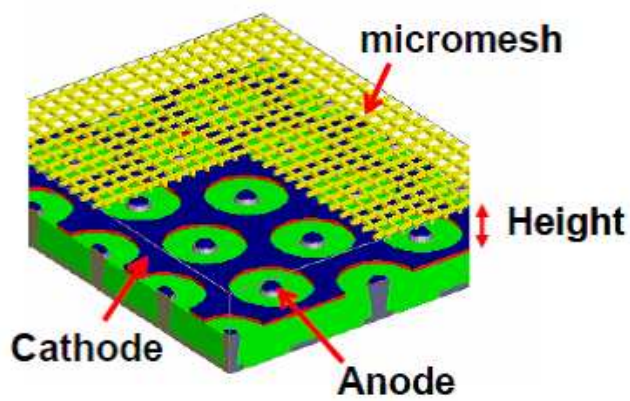


図 13 M³-PIC:ドリフトプレーン、メッシュはカソードとし、ピクセル電極をアノードとする。

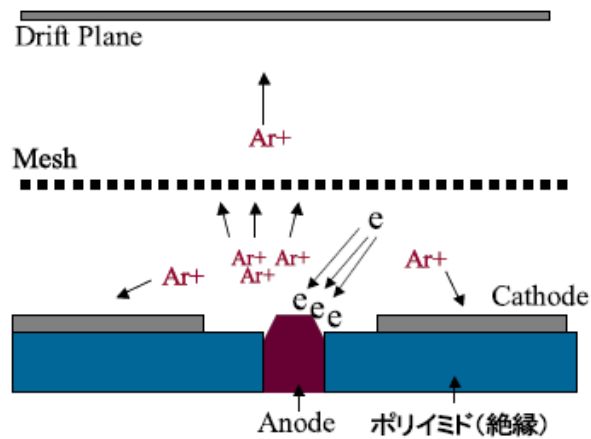


図 14 ion back flow (IBF) の概念図 [13]。なだれ増幅から生じた電子イオン対のうちのイオンはマイクロメッシュに吸収され、その一部はメッシュより上にあたるドリフト領域に侵入する。文献 [13][14] によれば、IBF の量は数 % 程度と確かめられている。

イヤをスペーサに利用し、なおかつそれらを張力を持たせた状態で μ -PIC 基板に実装できる治具を製作するに至った。

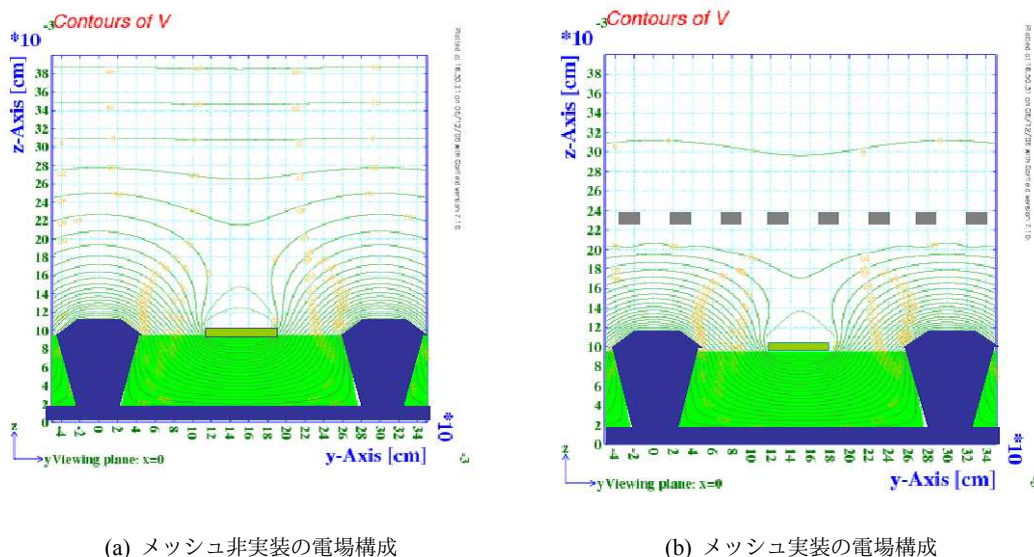


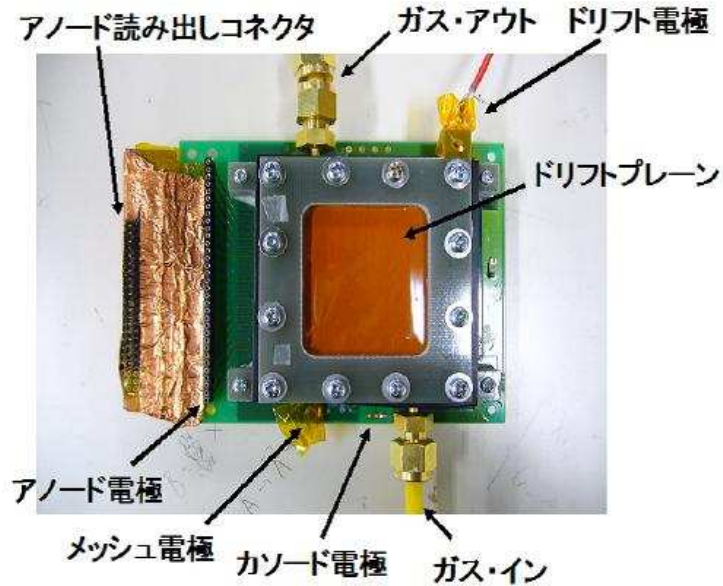
図 15 メッシュの有無による電場構成の比較。図 15(b) によれば、アノード真上の電場が図 15(a) と比較して強いことが分かる。

3.2 M³-PIC の本体

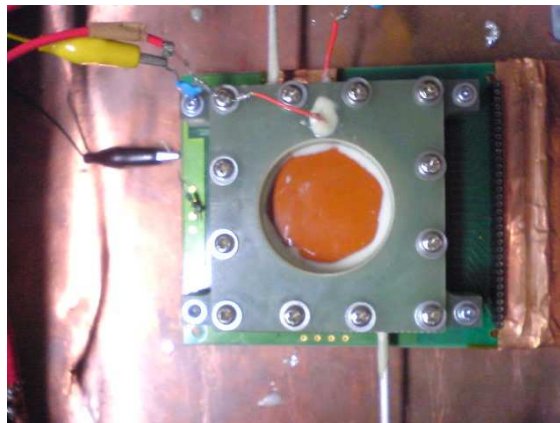
この節では、M³-PIC の内部構造、実装したマイクロメッシュ、読みだし回路、測定に使用したガスについて説明する。本研究では、M³-PIC3 号機と M³-PIC4 号機と称して研究報告をする。各々の相違点は、

- M³-PIC3 号機 (写真:図 16(a))... 2007 年度より使用されている測定器。厚さ $5\mu\text{m}$ のメッシュが実装されている。
- M³-PIC4 号機 (写真:図 16(b))... 読み出し基板に特に相違点はないが、本機に実装されているマイクロメッシュの厚さは $20\mu\text{m}$ と、それを覆うパッケージが異なる。
- ガスパッケージの主要材は G10 であるが、設計が異なる。3 号機の場合は、チェンバーの上部:蓋に相当する部分と側面とが独立しているため、密閉の際、ゴムシートを間にはさんでからネジで固定している。4 号機の場合は、蓋と側面とが一体となっていることと、接合部に O リングを用いるなどしてガス漏れとなりうる部分が少なくなった。
- ドリフトプレーンと G10 の間をコニシ製の弾力性エポキシ樹脂系接着剤 (商品名:MOS7) で、この隙間の密閉を施している。M³-PIC4 号機もこれを行う前は、流量を $3\text{ml}/\text{min}$ まで上昇させても、酸素濃度計が 800ppm 程度であった。しかし、接着剤による密閉により、流量 $0.2\text{ml}/\text{min}$ でもガス増幅率の動作に支障のない 500ppm 以下まで、酸素濃度を下げること

ができるようになった。



(a) M³-PIC3 号機 [5]



(b) M³-PIC4 号機

図 16 M³-PIC の外観

3.2.1 読み出し

M³-PIC3 号機と 4 号機の読み出し回路は同一のものを用いている。検出領域は何れも 3cm×3cm である。アノードの読み出しチャンネルは合計 16 チャンネルある。1 から 5ch までと 11 から 16ch は、図 17 に示すように 11 個のアノード列が一まとまりとなっており、これを 1 つのチャンネルとして読み出される。内側のチャンネル、すなわち 6 から 10ch まではアノードチャンネル 1 列のみを読み出す回路構成となっている。本研究では専ら前者のチャンネル群を用いて測定した。なおカソード読み出しはアノードの様にストリップが切れておらず、検出領域全域においてシングルチャンネルとなっ

ている。このため 2 次元読み出しはない。

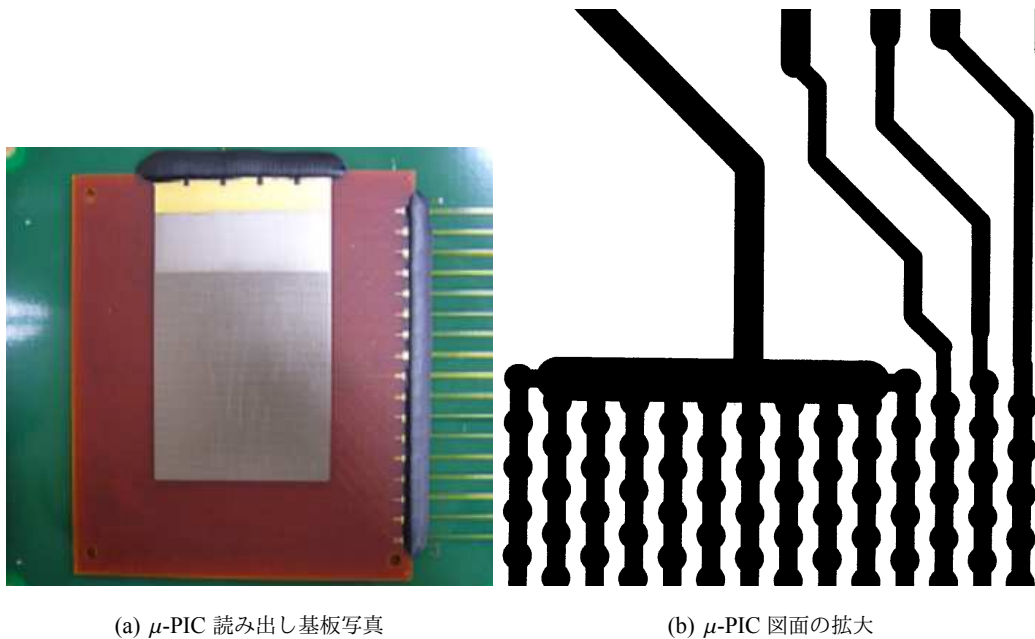
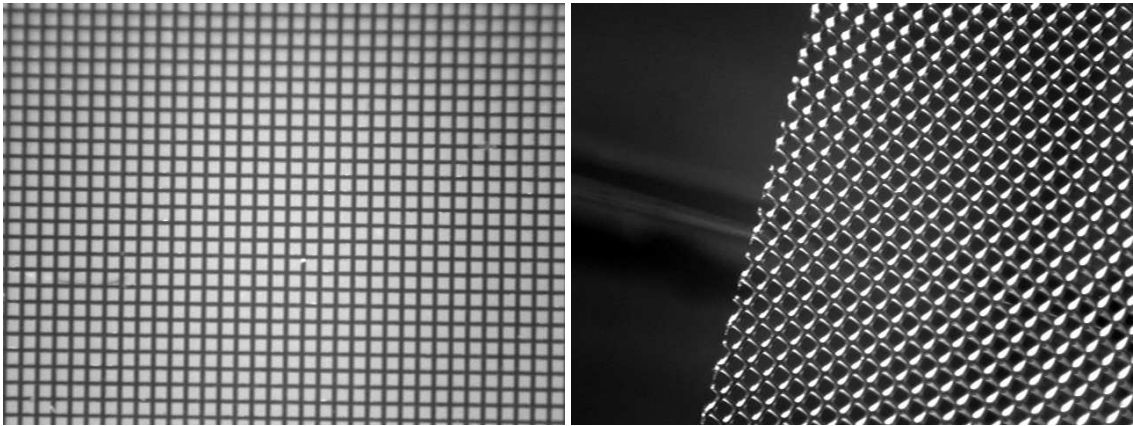


図 17 μ -PIC 読み出し

3.2.2 マイクロメッシュ

M^3 -PIC に実装したマイクロメッシュは厚さ $5\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ の 2 種類を使用した。前者は M^3 -PIC3 号機に実装し、後者は M^3 -PIC4 号機に実装した。光学顕微鏡の拡大写真を各々図 18(a),18(b) に示す。なお、 $20\mu\text{m}$ のメッシュの写真で、左側に映っている物体は、 $\phi 165\mu\text{m}$ のナイロンワイヤである。：ピッチは $50\mu\text{m}$ で、いずれもニッケル製である。開口率はそれぞれ 60%、34% である。マイクロメッシュの製法は、何れも electroforming である。 μ -PIC 基板とメッシュとの間のスペーサは、どちらのメッシュ実装にも $\phi 165\mu\text{m}$ のナイロンワイヤを用いた。



(a) 厚さ: $5\mu\text{m}$ ピッチ: $50\mu\text{m}$

(b) 厚さ: $20\mu\text{m}$ ピッチ: $50\mu\text{m}$

図 18 各マイクロメッシュの拡大写真

第4章 セットアップ

この章では、M³-PICのマイクロメッシュ実装や、測定機器などのセットアップについて述べる。

4.1 マイクロメッシュ、スペーサ実装

当初のマイクロメッシュ $\sim\mu$ -PIC基板間のスペーサはプラスチックフィルム製であった。図19(a)に概念図と実装方法について示す。この方法は、[15]によった。

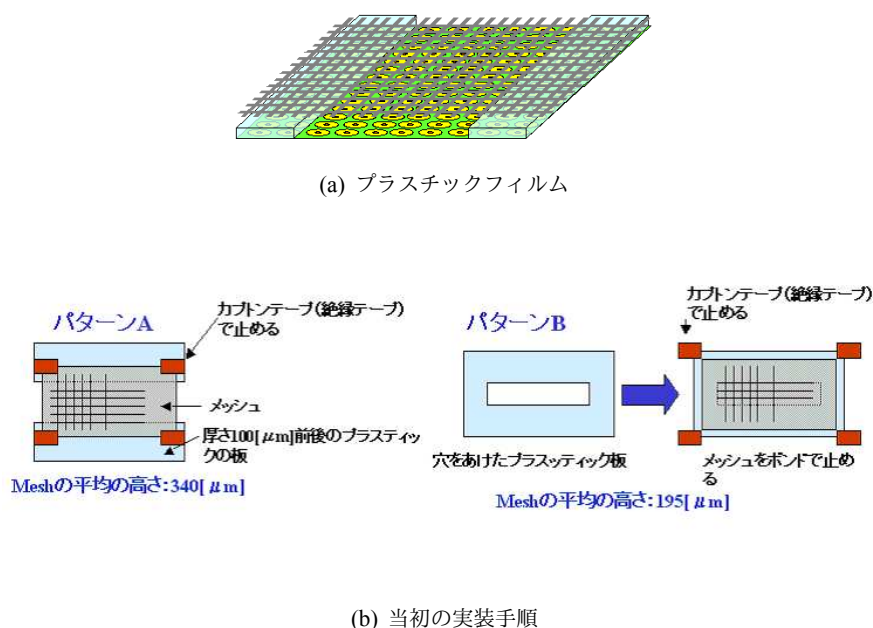


図19 プラスチックフィルム製スペーサと当初の実装方法を示す。[15]

図19(b)によれば、実装方法は、

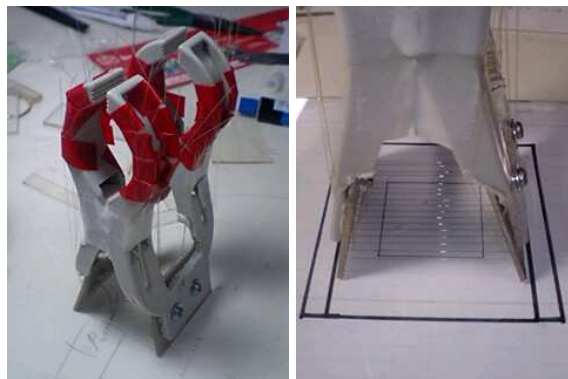
- パターン A のメッシュの張り方は、2枚の厚さ 100 μm 程度のプラスチック製のフィルムをスペーサとして、1チャンネル分の間隔を開け、カプトンテープで固定する。
- パターン B のメッシュの張り方は、まずプラスチックのフィルムを適当な大きさに切り抜く。次に切り取ったフィルムの内部を1チャンネル分ほどくりぬいて、そこにメッシュをボンドで接着した後、これをカプトンテープで固定した。この方法ではアノードからの距離が平均で 195 μm に固定された。

本研究では、まず比較的集めやすい素材から設計、製作を行い、実機に装着して、測定を行った。初期のスペーサ実装治具は、スペーサであるナイロンワイヤのたわみや、基板やメッシュの印加電圧に由来する静電気力でずれが生じないように、常にワイヤが張力を持った状態で設置できることを目的として、治具の材料を選択した。

洗濯バサミ ワイヤ実装治具の製作過程は以下のとおりで進めた。

- 洗濯バサミの把手の二ヶ所に穴あけ加工を施す。
- ユニバーサル基板の列が揃うようにしてから、洗濯バサミの両方の取手にネジで締め込む。
- pitch 穴にナイロンワイヤを、検出領域を確保できる領域をみたす本数分 (16 本) 通す。

図 20(a) は、実装部分は洗濯バサミの取っ手の箇所を加工し、製作したワイヤ実装治具をしめす。この治具を用いて、 μ -PIC モデルに実装し、ワイヤと接着面に接着した。



(a) 洗濯バサミを素材としたワイヤ実装治具 (b) 洗濯バサミ製の実装治具を μ -PIC 基板モデルに実装

図 20 μ -PIC 基板とメッシュとのスペーサ:ナイロンワイヤ実装治具試作品

ユニバーサル基板 この素材を用いる利点としては、

- あらかじめ 1/10 inch のピッチで穴が開けられていること。他の素材では、穴あけ加工を決められた間隔で行う作業を要するため、その時間を要する。
- 設計はユニバーサル基板の部材 4 つで、容易に製作できる。

ただし、難点としては、

- ナイロンワイヤを 1 本 1 本、手で張らなければならないため、張力のばらつきが生じる。
- このため、ナイロンワイヤに働く張力を計算できない。

である。 μ -PIC の真上にスペーサを設置すると、図 23 に示すように、 μ -PIC のピクセル列が覆われる。このため、これらのピクセルは放射線から生成、電離された電子群を検出することができない。スペーサに覆われたピクセル列を調べる上では、決められたピッチの方がよい。実際のスペーサのピッチは、 $5\mu\text{m}$ メッシュの実装時は 1/10 inch、 $20\mu\text{m}$ メッシュの実装は、2/10 inch とした。

スペーサの接着 スペーサと基板とを繋ぐ接着剤は、セメダイン製のエポキシ樹脂とシリコン変性ポリマーを配合した、2 液混合接着剤 (商品名:EP001) を使用した。ゼリー状や液状の瞬間

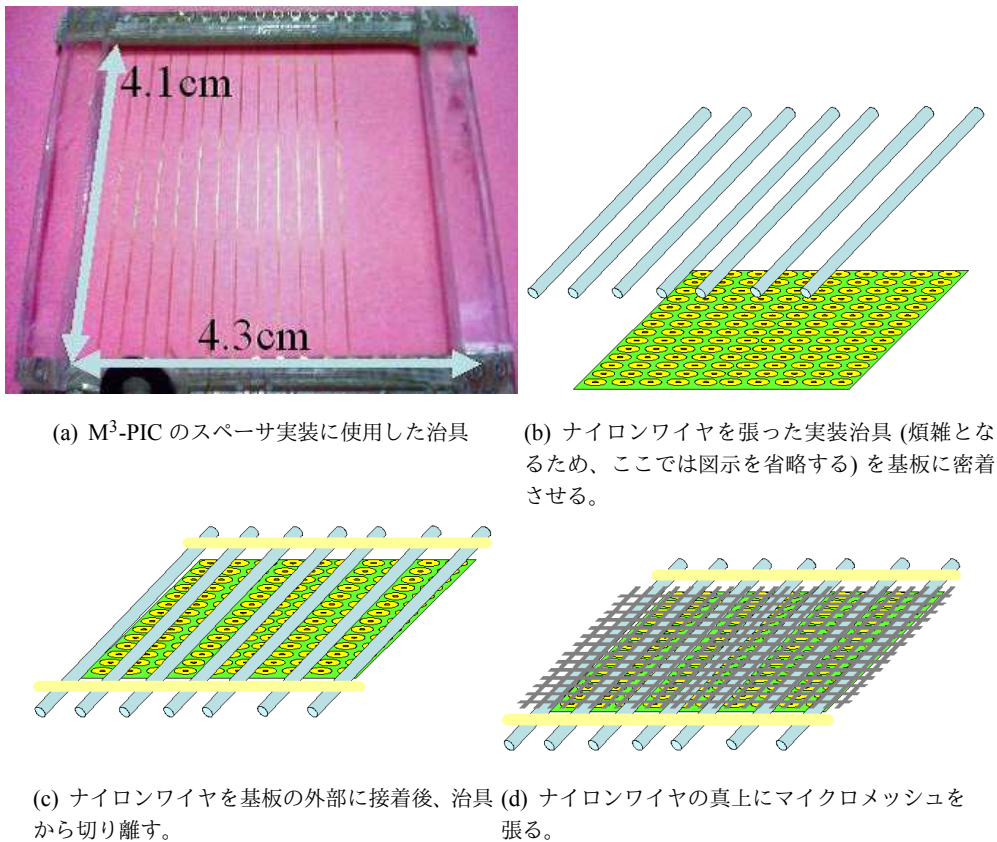


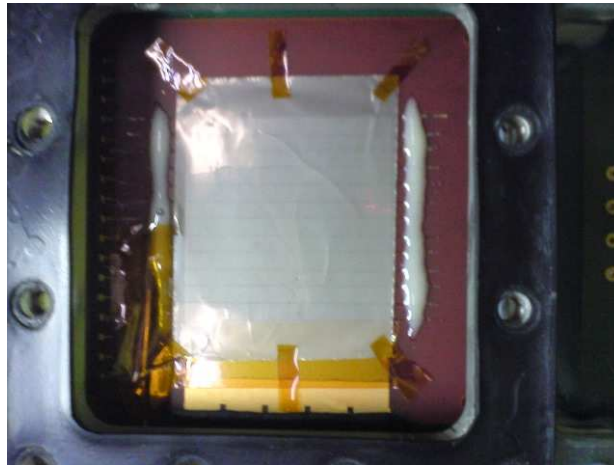
図 21 実装治具に張ったワイヤとメッシュを μ -PIC 基板に実装する過程

接着剤を用いる方法もあるが、スペーサの素材であるナイロンの接着には不向きである。また、液状の接着剤では、スペーサと基板とを接着した際の隙間から生じる毛細現象により、接着剤が基板に侵入するおそれがある。ゼリー状の瞬間接着剤塗布後にスプレー噴射式の固化剤を噴射して、固化する方法もあるが、スプレー噴射の際、基板のマスキングなど手間を要するため、行わなかった。エポキシ樹脂の 2 液混合接着剤の利点は、瞬間接着剤と比較して硬化時間は 1 時間程度と時間を要するが、この接着剤をナイロンワイヤの接着に使用した。なぜならば、

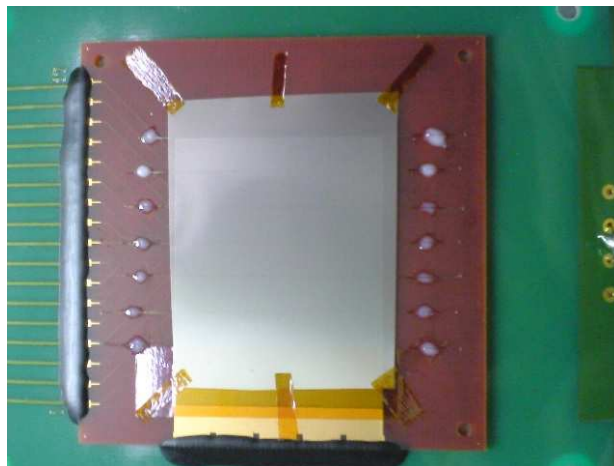
- 接着剤の粘性が、液状の瞬間接着剤と比較して大きく、毛細現象で浸透する接着剤は少ない。
- 接着剤が固化した後、ワイヤの張りなおしなどで除去する際、残りかすを残すことなくできる。

の利点があるからである。

マイクロメッシュ実装 このようにして製作したスペーサの実装治具を用いて実装した、スペーサの上に、厚さ $5\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ のマイクロメッシュを μ -PIC 基板に実装した。このとき、マイク



(a) 5 μm マイクロメッシュ シワが光の反射で目立っている。



(b) 20 μm マイクロメッシュ 5 μm のメッシュを実装したものよりシワは少ない。

図 22 マイクロメッシュを $\mu\text{-PIC}$ に実装した写真

ロメッシュにたわみが生じないように、均等に張力を持った状態となるようにカプトンテープを6箇所貼り付けた。その写真を、図 22 に示す。

4.2 動作ガス

$M^3\text{-PIC}$ は、チェンバー内に動作ガスを一定量流しつづける。測定の際に使用するガスは、 10^4 を越えるような高い増幅率を測定を目的とする場合は $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ を使用した。その理由は、このガスはエタンの割合が多いことである。つまり、なだれ増幅過程からの電離電子との衝突によって励起されたガス分子が、脱励起した後に紫外線を放出する。高分子ガスは、紫外線の吸収が大きい。このため、印加電圧を大きくしても放電が穏やかで、高増幅率を実現することができる。

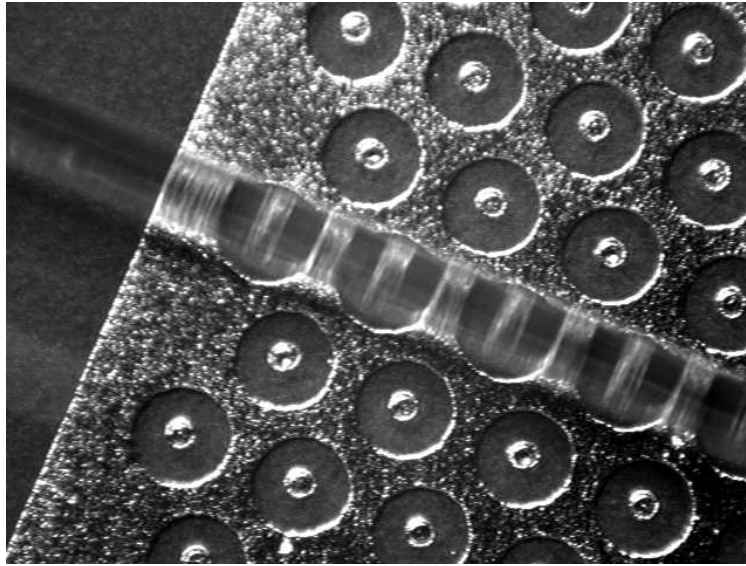


図 23 スペーサ実装により、 μ -PIC のアノード電極列が覆われた拡大写真

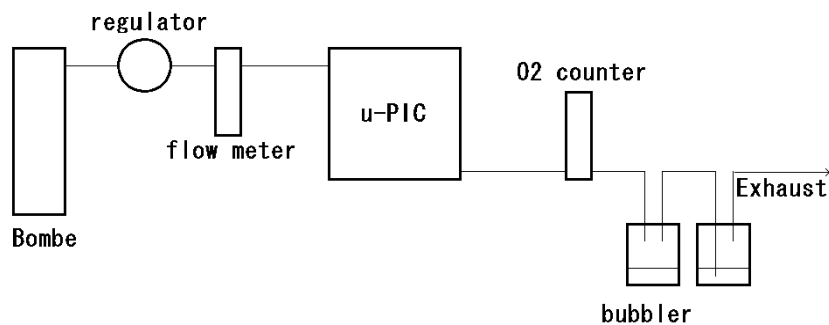


図 24 測定におけるガス系統図

ただ、このガスは高価であり、ボンベに封入されている容量も少ないので、高い増幅率の測定を目的とする場合以外は、 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 90 : 10(\text{P10})$ ガスを使用した。本論文では、このガスを「P10 ガス」と称する。

後で述べる長期測定の際は、 10^4 を越える増幅率で動作させるため、 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 50 : 50$ を使用した。チェンバーに流す動作ガスの気圧は、レギュレータの 2 次圧目盛から、 0.1MPa とした。

4.3 測定機器

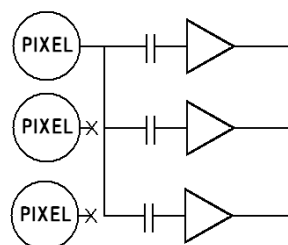
ここでは、前章の方法でマイクロメッシュを実装した μ -PIC を、測定する際に使用した測定機器を説明する。実際に測定を行った際の測定機器の接続については、図 26 に示した。

プリアンプは 1V/pC をもつ ASD を使用した。ただし、ガス増幅率が 10^4 を越えるような測定においては、ASD のサチレーションが起こるため、あらかじめ製作しておいた、図 25(a) に示すディバ

イダを用いて、 μ -PIC からの出力電荷が分割されるようにした。このディバイダのもたらす効果については、図 25(b) に示した。



(a) M^3 -PIC からの出力信号を分割させるディバイダ



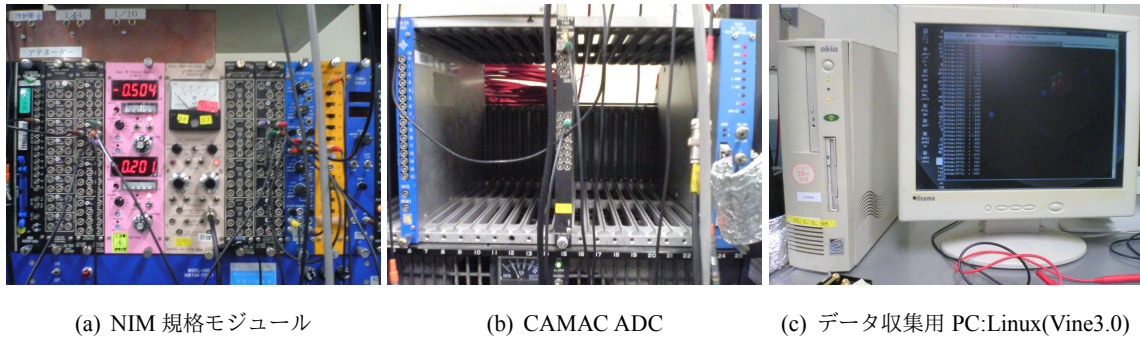
(b) ディバイダの効果

図 25 5 本足ディバイダの接続による μ -PIC 信号からの出力電荷の分割。この図は 3 つに分割しているが、実際は 5 つに分割する。

- NIM 規格モジュール (図 26(a) に示す。)
- Hi- voltage supply
- anode... dual voltage power supply positive 使用可能電圧:0~ 10kV
- cathode... dual HV power supply 使用可能電圧: -5~0V (ch1:drift plane ch2:mesh)
- attenuator

データ収集に使用した機器は以下のものを使用した。

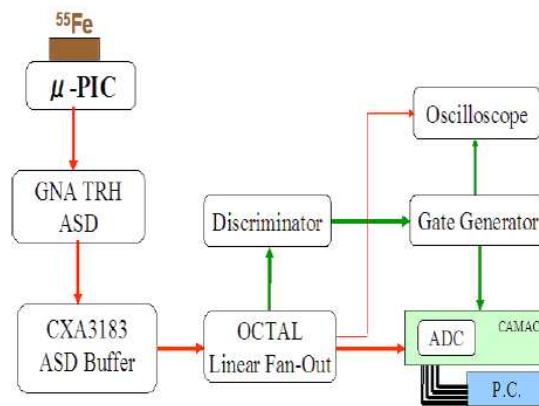
- preamp
- ASD buffer: CXA3184 ASD Buffer
- octal linear fan in out
- discriminator 波高弁別器、pulse 閾値を調整できる。threshold 領域は 112mV~
- gate generator discriminator で弁別された pulse を由来として gate signal を生成。
- 80 MHz scaler
- CAMAC crate controller... データ収集。QDC に、放射線検出の電気信号が入力されたかを知らせるパルスを送る形式、すなわちポーリングでなく、CAMLIB という C 言語の関数ライブラリを用いて、LAM(Look At Me) を動作させ、割り込み信号を使ってデータを出力する。
- QDC 電荷をデジタル値に変換する。電荷-adc count の校正を求める際に必要とする。
- terminal ... Linux (図 26(c) に示す。)
- 出力信号観測
- オシロスコープ ... tektronix 製 TDS3034B



(a) NIM 規格モジュール

(b) CAMAC ADC

(c) データ収集用 PC:Linux(Vine3.0)



(d) μ -PIC 測定でのブロック図

図 26 M^3 -PIC 測定に使用した機器およびブロック図

- pulser ... Hewlett Packard 製 Pulse/Function Generator 50MHz 8116A

本研究では、アノードピクセル、ドリフトプレーンおよびマイクロメッシュの印加電圧は

$$|V_D - V_M| = 300[V], V_M \leq 350[V], V_A \leq 750[V]$$

までとした。

4.4 電荷～ADC 校正

この際に自作した校正回路図は以下のとおりである。 μ -PIC の測定で使用したアンプは $1V/pC$ の ASD Buffer である。 μ -PIC 出力電荷を分割する 5 本足ディバイダを接続した $5V/pC$ の際の校正も行った。ここで自作した回路の静電容量は、キャパシタに限らず、基板そのものにも含まれる。このため、 $1pC$ のキャパシタをもう 1 つ並列に接続して $2pC$ とし、同様にして ADC 値を測定した。実際の回路図は以下に示す。

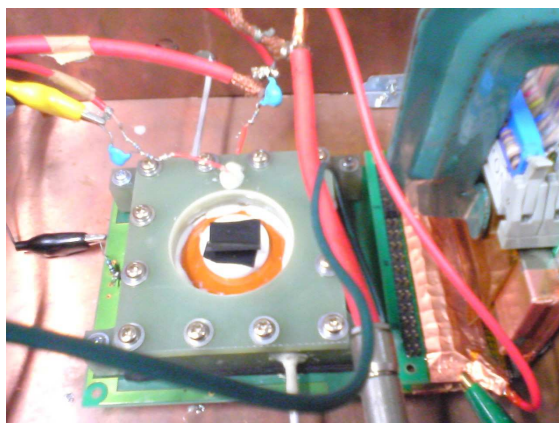


図 27 実際の測定写真、この写真は μ -PIC の読み出しと ASD buffer とを直接つないでいる。ASD がサチレーションを起こす場合は、図 25(a) で示した 5 本足ディバイダを 2 機の間接続する。

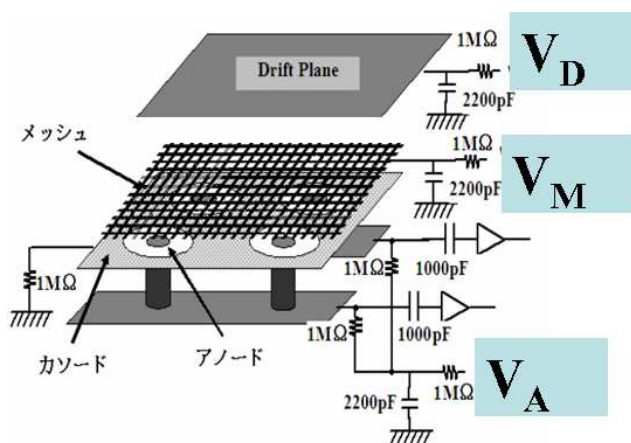


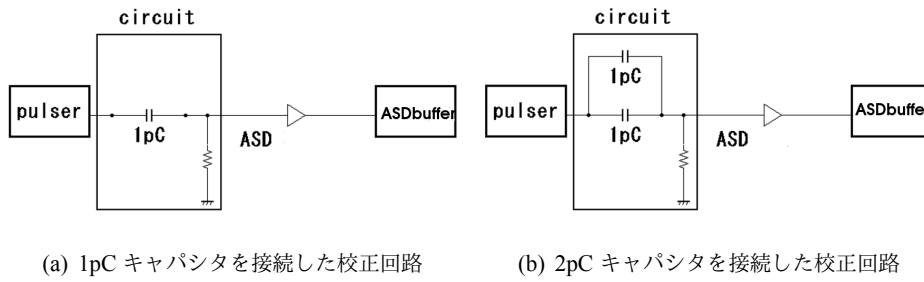
図 28 M³-PIC の測定回路図。ドリフトプレーン、マイクロメッシュ、アノードピクセルへの印加電圧をそれぞれ V_D , V_M , V_A とする。

パラメタとする pulser から矩形波を出力し、校正回路を介して、NIM モジュールに接続して ADC 値を得る。この様にして得られた校正直線も示す。以下の式から求めた。

$$\text{ADC}(Q) = \text{ADC}_{2\text{pC}}(Q) - \text{ADC}_{1\text{pC}}(Q) \quad (7)$$

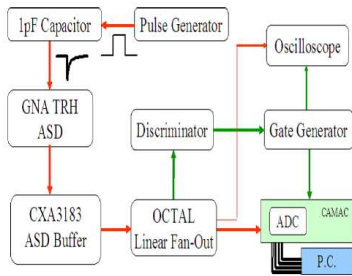
この様にして得られた 1pC と 2pC の ADC 値を、式 (7) により差し引く。これにより得られた校正直線は、式 (8) となった。これは、アッテネータ 12dB、5 本足ディバイダを接続した場合とする。

$$y[\text{ADC}] = 966x[\text{pC}] + 6 \quad (8)$$

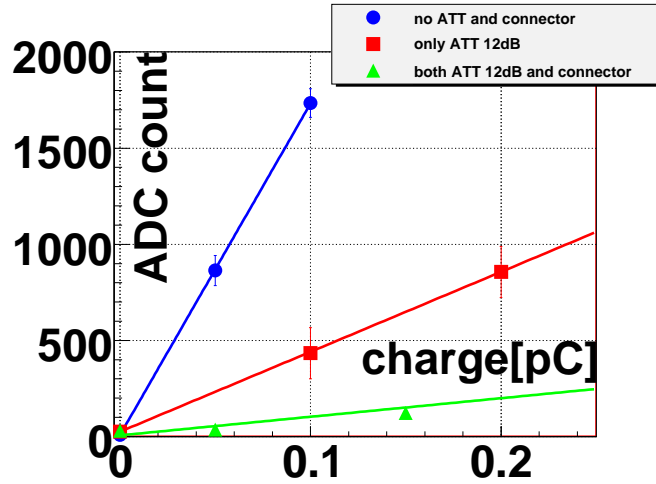


(a) 1pC キャパシタを接続した校正回路

(b) 2pC キャパシタを接続した校正回路



(c) 校正の際のブロック図



(d) ADC 出力

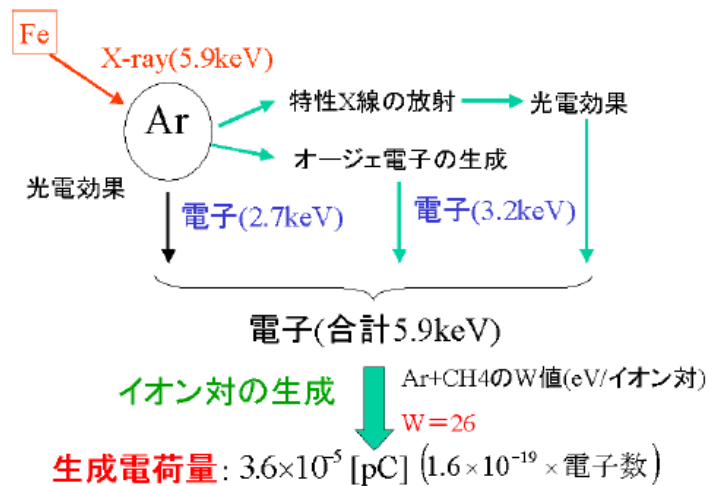
図 29 校正回路:2 回路から得られた ADC 値を差し引きする。ブロック図は、校正回路を ASD に接続してからは、M³-PIC の実測でのセットアップと共通している。図 29(d) は校正から得られた線形直線を示す。青はアッテネータなし、5 本足ディバイダ非接続、赤はアッテネータ 12dB、緑はアッテネータ 12dB、5 本足ディバイダ接続での校正を示す。

4.5 増幅率計算

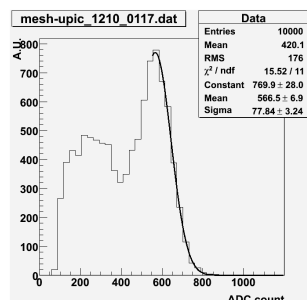
本実験では放射線源として ⁵⁵Fe を使用した。これは通常の ⁵⁶Fe よりも中性子が 1 つ少ない放射性同位体である。これは逆 β 崩壊により ⁵⁵Mn となる。反応式は、



で表される。(9) に示す反応が生じたとき、⁵⁵Mn の K 殻から電子が奪われるので、外側の原子の殻から電子が遷移するときに 5.9keV の X 線 (Mn-K 輝線) を放出する。このようにして、X 線は動作ガスに満たされたチェンバー内に入射し、そのガス原子に光電吸収される。Ar 原子の場合は、X 線が光電吸収されると、その原子から 2.7keV の光電子が放出される。これによって、Ar 原子の内側のエネルギー準位にある電子が空となり、より高いエネルギー準位に存在する電子が遷移する。よって、3.2keV の特性 X 線 (Ar-K 輝線) が放出される。また、内部転換によって同程度のエネルギーをもつ電子が放出されることもある。これをオージェ電子と呼んでいる。Ar-K 輝線において



(a) ^{55}Fe から得られる光電子の生成過程



(b) ^{55}Fe から得られるヒストグラム。5.9keV に相当する高い山と 3.2keV に相当する低い山とがある。

図 30 放射線源を ^{55}Fe 、動作ガスを Ar に用いた際の電子の生成過程とヒストグラム

は、その一部は Ar 原子に光電吸収されず、検出器の外に逃げ出すことがある。このため、Ar-K 輝線からの光電吸収で生成される一次電子は、Mn-K 輝線から生じるそれよりも少なくなる。この様な過程から得られる X 線スペクトルは入射エネルギーよりも低いところに作られる。これをエスケープピークという。放射線源を ^{55}Fe に、動作ガスを Ar に用いた際の光電子の生成過程と測定から得られるヒストグラムを図 30 に示す。本実験では、この過程から 5.9keV 分の電子が生成されたとする。今回用いたガスは、P10 ガスと Ar : C₂H₆ = 50 : 50 ガスの W 値 (イオン対を一对生成するのに必要なエネルギー) は、26eV [eV/pair] なので、生成電荷量は、e を素電荷、E_{PE}

は物質の光電吸収によって得られたエネルギー、 W_{Ion} は物質のイオン対を生成するためのエネルギー、 Q はこれらの作用によって求められる電荷量である。生成電荷量と測定により求められた電荷量との変化から、ガス増幅率を求める。

$$\frac{e \times E_{\text{PE}}}{W_{\text{Ion}}} = Q$$
$$\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 5.9 \times 10^3}{26} = 3.6 \times 10^{-5} [\text{pC}] \quad (10)$$

第 5 章 M³-PIC の性能評価

ここでは、治具を用いてマイクロメッシュ実装した M³-PIC4 号機で長期安定試験を行ったことを述べる。M³-PIC3 号機も、期間は 24 時間と短い、それに準ずる測定を行ったので、ここで述べる。

5.1 増幅率測定

マイクロメッシュを実装した μ -PIC で、増幅率測定を行った。動作ガスに P10 ガスを使用した際の増幅率測定も行い、メッシュ～アノード間や、アノード～カソード間放電が高電圧電源の電流計から針の触れが見られる電圧とその時の増幅率について、図 31 に Ar:C₂H₆=50:50 のそれと比較したプロットを示した。P10 ガスで測定した際は、V_A は 500[V] 以上を印加していない。このガスで測定した際、V_A を 450[V] 以上印加したとき、放電が確認されていたためである。次に、アノード電圧と、ドリフト電圧とメッシュ電圧との電位差を 300V に固定し、メッシュ電圧をパラメタとして測定した同ガスの増幅率のプロットも図 32 として示す。

目視で放電が確認された際の最大増幅率を測定した。その時の増幅率は、 5.7×10^4 であった。その時のヒストグラムと、オシロスコープの波形を図 31、図 33 に示す。

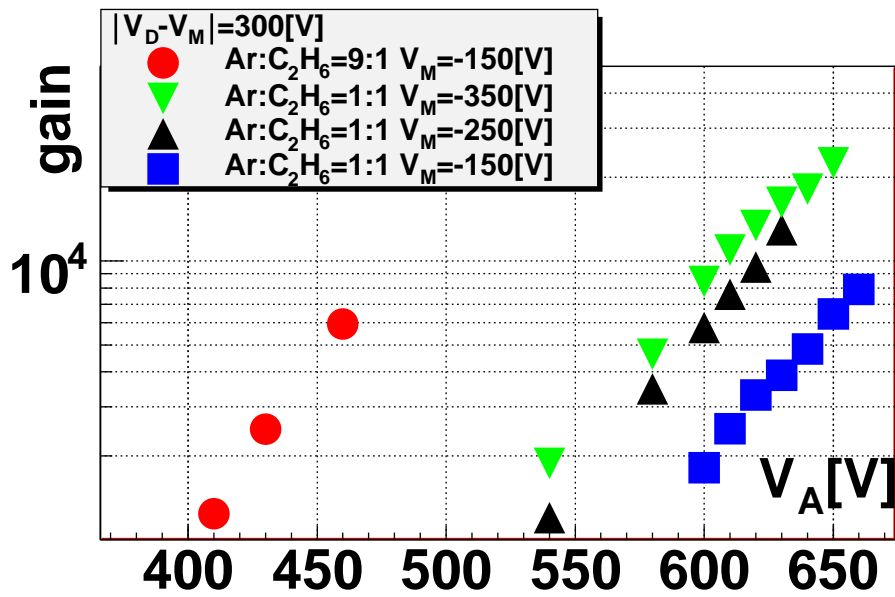


図 31 P10 ガスと Ar:C₂H₆=50:50 とのガス増幅率の比較

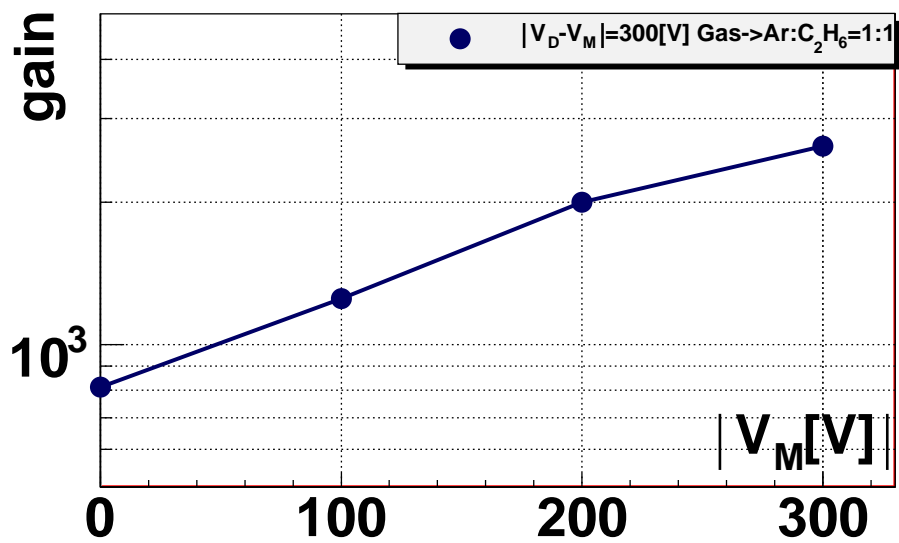
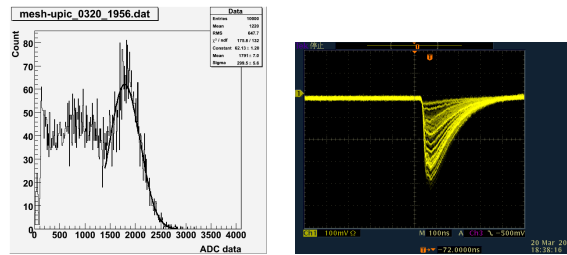


図 32 メッシュ電圧をパラメタとした Ar:C₂H₆=50:50 のガス増幅率



(a) ^{55}Fe のスペクトルを示すヒストグラム:アッテネータを電荷分割を使用した。

(b) オシロスコープの波形図。 $\mu\text{-PIC}$ 読み出しと ASD の間は電荷を 5 つに分割するディバイダで接続されている。

図 33 ガス増幅率 5×10^4 の時のヒストグラムとオシロスコープの波形

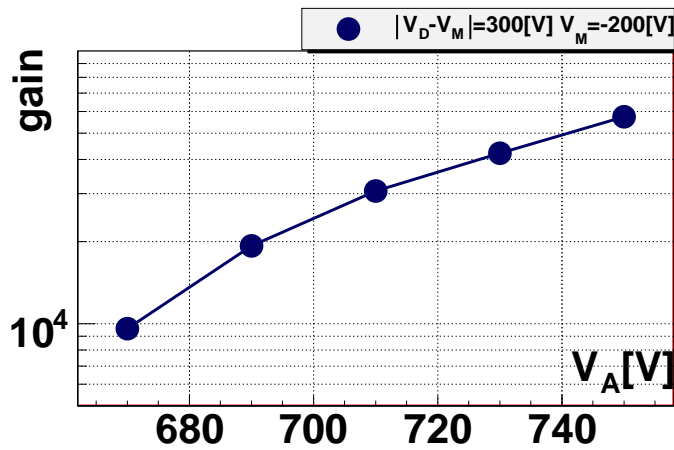


図 34 $M^3\text{-PIC4}$ 号機の増幅率曲線。 $V_A = 750[V]$ で、増幅率 5.7×10^4 を測定した。しかしながら、アノード～カソード間放電も 1 分間に数回確認された。

アノード電圧 [V_A [V]]	ガス増幅率 [$\times 10^4$]
670	0.95
690	1.92
710	3.06
730	4.22
750	5.74

表 2 アノード電圧と Ar:C₂H₆=50:50 の増幅率との関係

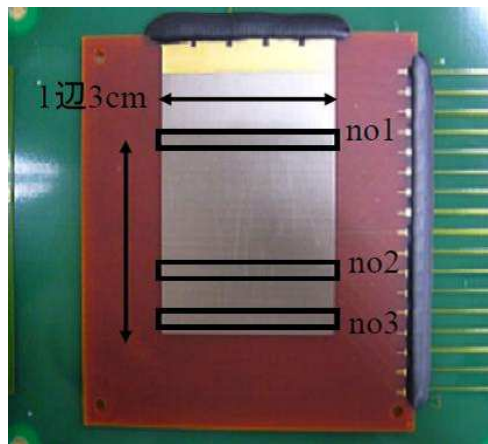


図 35 測定領域 No.1～No.3

5.2 増幅率一様性測定

M³-PIC3 号機 of ガス増幅率にどのくらいのバラツキがあるかを検証するため、図 35 に示すような測定領域を決めて測定した。この測定方法は、ドリフトおよびメッシュの印加電圧はそれぞれ $V_D = -500V$, $V_M = -200V$ とし、アノード電圧 V_A をパラメタとした。この時の動作ガスは、Ar:C₂H₆=50:50 を使用した。測定したチャンネルは、カウントレートを高くすることが出来るようにするため、マルチチャンネルとした。測定番号と増幅率の変動を示す結果は表 3 に示す。この結果から、増幅率の変動は最大 10% であることが確認できた。

場所別増幅率 [$\times 10^4$]			
V_A [V]	No1	No2	No3
580	0.25	0.23	0.25
600	0.38	0.38	0.38
620	0.63	0.63	0.59
640	0.94	0.94	0.88
660	1.63	1.63	1.50

表3 各測定領域の増幅率の比較

5.3 長期安定試験

5.3.1 長期測定に向けたセットアップ

M^3 -PIC4 号機の測定のセットアップは前節と概ね同じで、長期測定とその相違点は以下のとおりである。

- 長期測定用のシェルスクリプトを採用。30分おきにデータ収集できるように設定。
- 印加電圧は測定期間中は常に一定とする。実験室内の環境(室温、湿度、気圧)をデータロガーで記録する。
- アノード～カソード間の電流値を、ボルテージレコーダを用いて、Voltage supply の current monitor から測定する。
- 節で示したように、メッシュの厚み(20 μ m)や、開口率(34%)が3号機と異なる。
- M^3 -PIC を長期動作させる前日は、そのチェンバー内にガスを流すことやアノード、カソードおよびメッシュ電極に電圧を印加させない状態とする。

上にあげたボルテージレコーダは、T and D 製の Voltage Recorder RVR-52 を使用した。電圧の測定分解能は 1mV、測定精度は、気温 0~40 度環境下において 0.5% +5dgt、入力インピーダンス約 1M Ω である。これを NIM 規格の高圧電源モジュールの“current monitor”に接続した。これは、電流値 1mV が、電圧 10V に換算されて表示されるものである。したがって、測定できる最小単位は、ボルテージレコーダの測定分解能から、100nA である。実験室内の気圧、気温、湿度を測定するデータロガーは、ボルテージレコーダと同じく、T and D 製のものを使用した。実際に使用した測定機器を図 36 に示す。

長期測定に用いる動作ガスは、P10 ガスと比較して、高い増幅率でも放電が少ない Ar:C₂H₆=50:50 を使用した。しかし、ポンベの容量はレギュレータの一次圧から、39MPa で、P10 ガスの 150MPa より約 4 分の 1 と少ない。

そこで、長期測定の途中でガスが空にならないように、かつガス増幅率の減少が起こらないような流量を決定した。Ar:C₂H₆=50:50 の流量計算は、ガスポンベのレギュレータの一次圧を示す目



(a) データロガー

(b) ボルテージレコーダ

図 36 データロガーおよびボルテージレコーダ。いずれも T and D 製で、測定間隔はパソコンを介して設定できる。本研究では 10 分おきに測定できるように設定した。

盛や初期の一次圧 39MPa、初期の封入体積が 50l であることを用いて計算した。初期状態からレギュレータ目盛を確認するまでに経過した時間の間は、定温であるとする。ボンベ内の体積を求めることは、ボイルの法則が適用できる。

初期状態からある一定のガス流量で 82 時間流したところ、レギュレータの一次圧目盛 p' は、30MPa を示していた。この時のボンベ内の体積 V' は、 $V' = \frac{p'}{39} \times 50$ により、 $V' = 35[l]$ であった。したがって、ガスボンベはチェンバーに 15l 流したことになる。これにより、流量は約 3ml/min となる。このため、ボンベの初期容量である 39MPa で測定を開始しても、測定できる日数は 10 日程度に限られる。

測定方法は、図 24 に示す N_2 フローメータをパラメータとして、測定開始から 30 分後までの ADC データを収集し、変動の割合を調べた。その結果として、ガス流量が 10ml/min より小さい状態で測定を行うと、ADC 値が、測定開始直後から 30 分後のそれと比較して、開始直後の ADC 値の 1 割以上減少していた。一定の流量で 30 分間ガスを流した後の、光電ピークの平均値変動は表 4 に示す。このような結果から、流量は 10ml/min と決定した。これを測定終了後にボンベのレギュレータ一次圧から計算したところ、およそ

$$2 \times 10^{-1} \text{ml/min}$$

であった。

M^3 -PIC3 号機では、検出信号が観測できる酸素濃度、すなわち 500ppm 以下となるように、流量を約 3ml/min として測定していたが、 M^3 -PIC4 号機では、チェンバー内の密閉度改善により、 M^3 -PIC3 号機より少ない流量 ($2 \times 10^{-1} \text{ml/min}$) であっても、ガスを流し始めてから 30 分ほどで酸素濃度は 500ppm 以下となり、最小で約 170ppm の酸素濃度を実現した。これにより、少ないガス流量でも長期測定に都合のよい状態を得られ、測定途中でボンベを交換する必要はなくなった。

ドリフトプレーンとメッシュとの電位差が 300V となるように印加した。ドリフトプレーンからマイクロメッシュまでの高さは 10mm であるから、ドリフトからメッシュまでの電場 E_{DM} の大きさは 0.3kV/cm である。また、 V_M は -200V まで印加した。

ガス流量 [ml/min]	光電ピーク平均値	count late[Hz]
3.0(bubblar1.7Hz)	350	125
30 分後	352	125
0.2 以下 (bubblar0.4Hz)	347	132
30 分後	332	123
(bubblar0.2Hz)	321	127
30 分後	288	124

表 4 流量に対する光電ピーク平均値の変動。流量が 0.2ml/min 以下となるとピークの平均値が下がり始める。bubblar 概算で 0.2Hz 程度となると、ピーク平均値の 30 分後の変化は 20% 以上となる。

5.3.2 結果

M³-PIC3 号機の測定は、図 37 によれば、増幅率は 15000 程度で 24 時間、ほぼ安定した動作を確認することができた。放電の様子は目視確認で、1 分間に数回見られる程度であった。8 時間ほどデータが欠如しているのは、長期測定のソースプログラムを修正していなかったことによるものである。

一方、増幅率の変動は、表 5 から、測定開始直後から開始 12 時間までは増幅率の増加が見られた。終了直後の増幅率は、開始直後より約 20% 大きくなっていた。

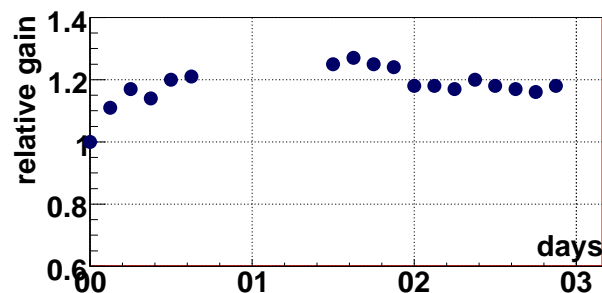


図 37 M³-PIC3 号機の 24 時間測定結果:データの欠如により、24 時間の動作とした。この時の増幅率は、約 1.5×10^4 であった。

M³-PIC4 号機の測定は、測定前日は M³-PIC 本体を全く動作させない状態とした。M³-PIC を動作させない状態とは、チェンバー内に動作ガスを流さないことや、アノードとカソード及びメッシュの電極に電圧を印加させない状態にすることである。この後に、2008 年の 12 月 10 日から翌年の 1 月 10 日の 1 か月にかけて、増幅率約 2×10^4 の条件下で行った。次に、M³-PIC4 号機の長期測定結果を述べる。増幅率の変動を 30 分おきにプロットしたグラフと実験室内の圧力、湿度、気温を図 38 に示す。縦軸は、全グラフ共通して測定日数とし、横軸はそれぞれ hPa、%、°C、増幅

測定時間 [hours]	増幅率 (開始直後との相対量: 1.5×10^4)
0	1.00
6	1.17
12	1.20
54	1.17
60	1.18
66	1.16

表 5 測定中の増幅率変化

率については ADC count とした。長期測定中のヒストグラムやオシロ波形図も、図 39 に示す。

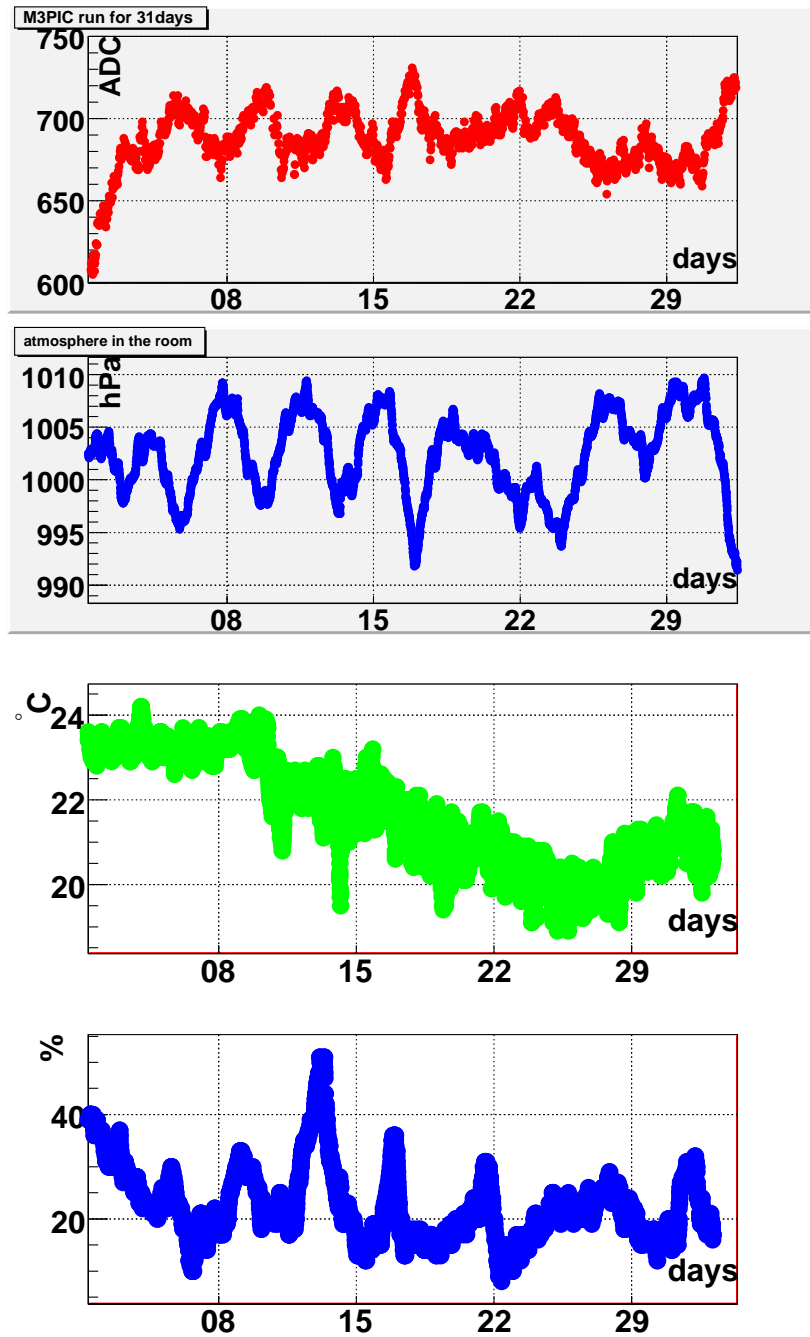
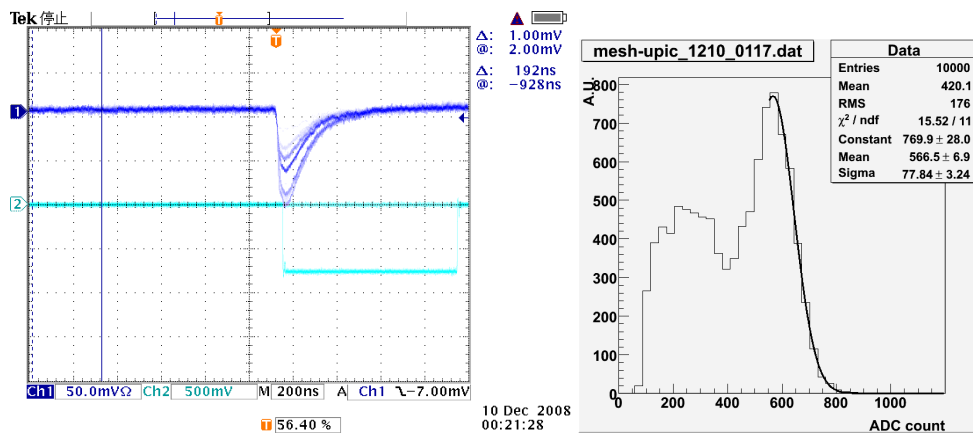
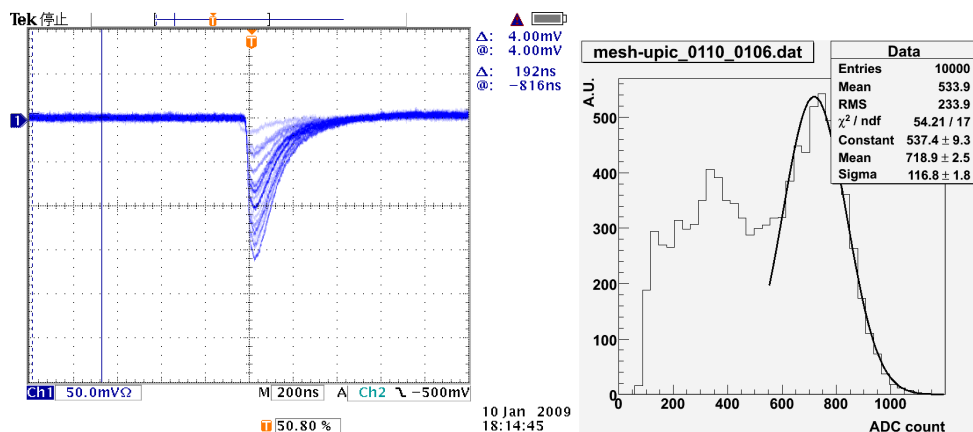


図 38 長期測定結果と測定期間中の気圧、気温、湿度 x 軸: 測定日数 y 軸: 上から ADC count, hPa, °C, %



(a) 長期測定開始直後のオシロ波形図。 μ -PIC 読み出し回路と ASD の間に 5 本足ディバイダを接続。
 (b) 長期測定開始直後のヒストグラム。12dB のアッテネータを使用。



(c) 長期測定終了直前のオシロ波形図。接続状態は実験開始直後と一貫して同じである。
 (d) 長期測定終了直前のヒストグラム。アッテネータは実験開始直前から一貫して同じである。

図 39 31 日間の長期測定の様子

5.4 discussion

5.4.1 長期測定試験

図 37 によれば、M³-PIC3 号機では、15000 を越えるガス増幅率で、24 時間の測定で、放電回数は数分間の目視による確認に限られるが、数回程度であった。また、この時の増幅率変動は、図 37 によれば 10% 程度であった。しかし、ガス増幅率はチェンバー内の圧力に依存していることが知られている。このため、1 か月以上に渡る長期動作においては、検出器の増幅率変動を考察する際、圧力を補正してからでなければならない。

M³-PIC4 号機では、データロガーで圧力や温度、湿度を測定したので、これを用いて実質のガス増幅率の変動を解析する。1 か月の測定期間における増幅率と気圧との相関関係を示した 2 次元プロットを図 42(a) に示す。長期測定では、アノード電圧を定数とし、圧力変化 Δp に対する増幅率の補正を考える。図 41 に示すような方法で、増幅率とチェンバー周辺の気圧との 2 次元プロットを自然対数の指数関数でフィッティングして得られた関数の傾きと気圧の変化分 Δp から、補正後の増幅率 A_2 を得る。

$$\Delta p = p - p_0$$

とする。ここで、 $p_0 = 1000[\text{hPa}]$ とする。補正前の増幅率 A_1 と補正後の増幅率 A_2 との関係は、

$$\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = -4.37 \times 10^{-3} \times (-\Delta p)$$
$$A_2 = A_1 \exp(4.37 \times 10^{-3} \times \Delta p) \quad (11)$$

となる。この結果は図 43 に示す。また、長期測定で得られた増幅率、気圧の測定値、基準圧力と測定値との差、補正後の増幅率は、表 6 にまとめた。その結果、M³-PIC を動作させた直後の増幅率は、動作後 4 日後それと比較して約 20% 小さく、時間が経過するにしたがって増幅率が上昇し、測定開始から 4 日ほど経過して、ようやく増幅率のバラツキが数 % 程度となった。このような増幅率の変化は、電子のポリイミドへのチャージアップや、ポリイミドの誘電分極により、電場勾配が大きくなったことによると考えられる。

図 43 に示した補正後の増幅率は、4 日以降にも 100 以上もの増幅率変動が見られた。つまり、測定開始から 8 日後の増幅率と 25 日後の数 % の増幅率変化である。図 42(b) によれば、気温との相関関係を示した 2 次元プロットは正の相関関係をもつように見える。しかし、この相関関係は補正前の増幅率と気圧との関係ほど強くはない。長期測定時に収集したデータの数は 10000 イベントで、中でも光電ピークのイベント N_{PE} は、数 1000 イベントに限られる。これをガウスフィットした場合に得られる統計誤差は $\sigma = (N_{PE})^{-\frac{1}{2}}$ である。したがって、光電ピークからの ADC 値の相対誤差は数 % で、これを増幅率に校正すると、数 100 程度となる。一方、気温と増幅率の 2 次元プロットから分かる変化の割合は数 100 程度である。この結果から、増幅率の誤差範囲に止まっていることが分かる。

T[days]	p[hPa]	Δp [hPa]	$A_1[\times 10^4]$	$A_2[\times 10^4]$
0	1002.3	2.3	1.66	1.67
1	1002.7	2.7	1.91	1.94
2	1000.0	0	2.05	2.05
3	1003.7	3.7	2.00	2.03
4	997.5	-2.5	2.07	2.05
12	998.2	-1.8	2.07	2.06
16	997.2	-2.8	2.05	2.02
20	999.1	-0.9	2.08	2.07
24	1004.2	4.2	1.97	2.01
28	1008.5	8.5	1.96	2.03

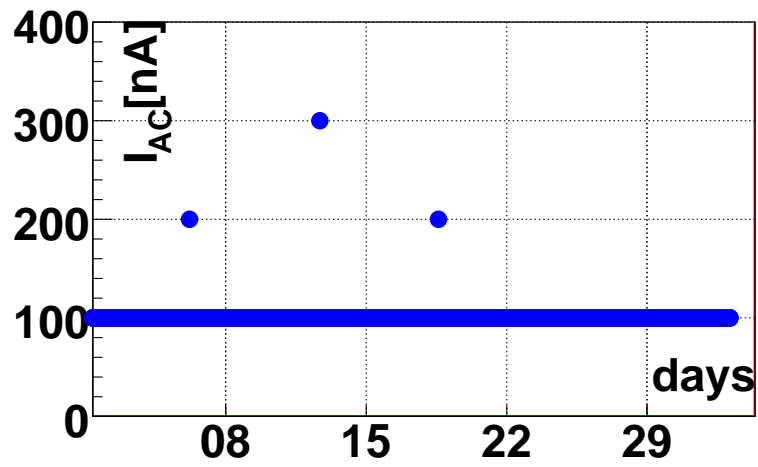
表 6 チェンバー周辺の気圧補正を施した増幅率 A_2 。p を実験室内での気圧の観測値、 A_1 を補正前の増幅率とする。

5.4.2 放電問題

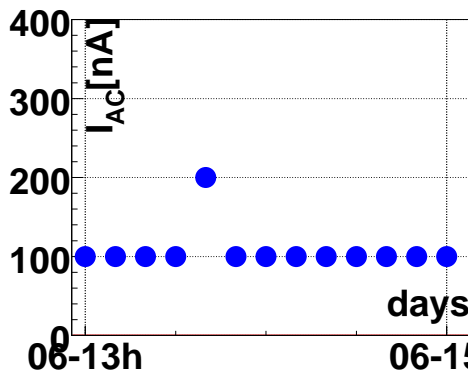
M^3 -PIC も、両極板間のピッチが $100\mu\text{m}$ のオーダーをもつことと、メッシュ～アノード間の距離も $200\mu\text{m}$ 程度であるため、高電圧の印加に伴う電極の放電は議論すべき課題である。

当初は、 $5\mu\text{m}$ を実装した M^3 -PIC3 号機を長期測定に用いる予定であったが、数ピクセルの放電破壊を起こしてしまった。これによりアノード印加電圧が 400V 以下の状態でも、アノード～カソード間が、高電圧電源の電流計の振れから導通を確認した。この状況は M^3 -PIC3 号機の全チャンネルで起こったため、アノードの電圧は 400V 以上を印加することができなかった。このため全チャンネルは使用不可能となった。放電状況確認すべく、光学顕微鏡を用いて μ -PIC 基板を観察したところ、5 個以上の放電したピクセルが確認された。中にはカソード電極が変色している部分も発見した。放電箇所を示すマップと、放電ピクセルを光学顕微鏡で観察した写真を図 44 に示す。ピクセル放電の原因としては、測定時期が 6 月で、湿度が 50% を越えることがしばしばであり、それに伴って、 M^3 -PIC3 号機内での水蒸気の影響で基板間放電が起こりやすい環境であったと考えられる。また、高電圧の印加による μ -PIC の耐圧が低下したとも考えられる。

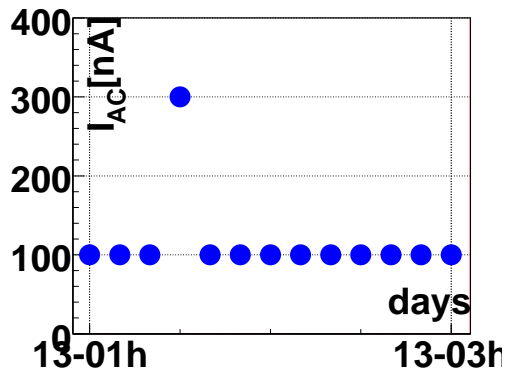
一方、 M^3 -PIC4 号機の長期測定では、アノード～カソード間、メッシュ～アノード間の放電を起因とする高圧電源系統からのトリップは発生しなかった。これはチェンバーの密閉度向上による外気の湿気の侵入が M^3 -PIC3 号機と比較して抑制されたのと、測定時期は冬季であるため、湿度は 30% 前後と、6 月のそれと比較して低かったためと考えられる。また、文献 [16][17] によれば、動作ガス中にあるエタンが、電極間の放電により炭化して、それらがポリイミドに堆積することにより、ピクセルの耐圧が下がると考えられる。これに関する実験手法や議論についてはこれらの 2 文献を参照されたい。



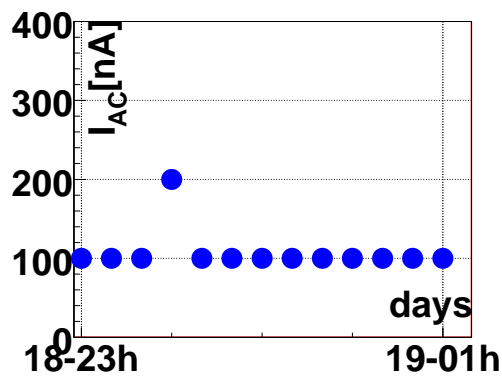
(a) ボルテージレコーダから測定したアノード～カソード間電流値



(b)



(c)



(d)

図 40 31 日間のアノード～カソード間放電を、ボルテージレコーダの表示値を電流に換算して表示したプロット。換算後の電流値は、最大 300nA を観測した。図 40(b)～40(d) は 200nA 以上を測定した時間に範囲を限って表示したものである。

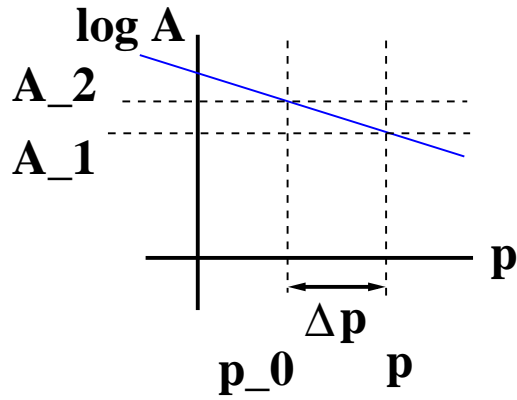
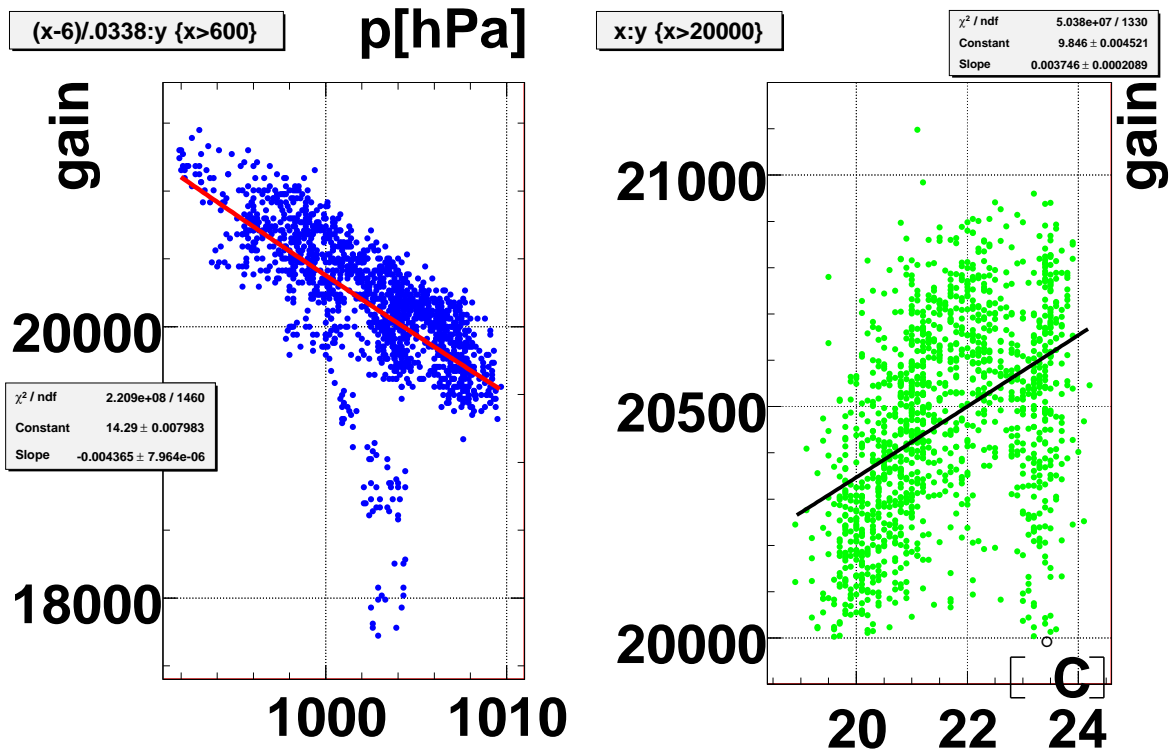


図 41 1000hPa を基準として、フィッティングを用いた補正方法 $p < p_0 (= 1000[\text{hPa}])$



(a) 補正前増幅率-気圧

(b) 補正後増幅率-気温

図 42 2次元ヒストグラム

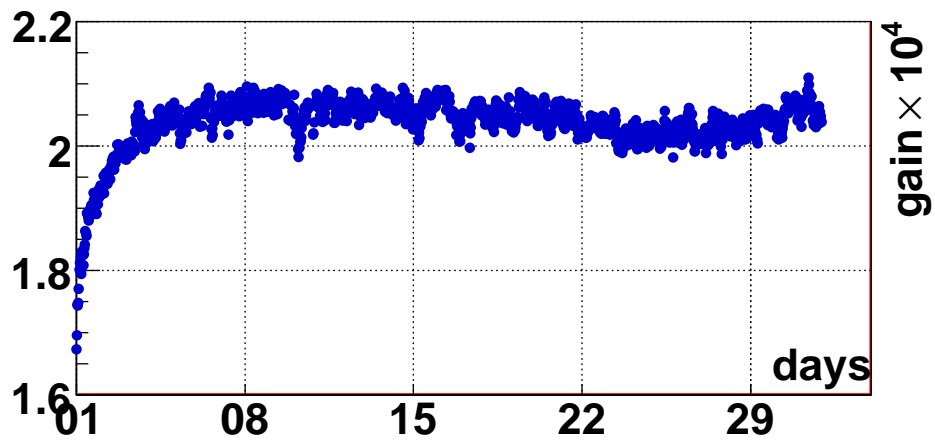


図 43 圧力補正を施した Ar : C₂H₆ = 50 : 50 の長期測定でのガス増幅率。補正の際に基準とした気圧は $p_0 = 1000\text{hPa}$ とした。

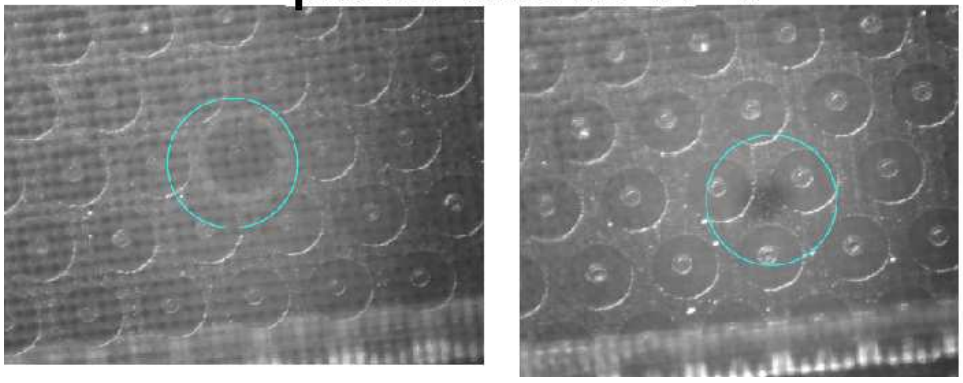
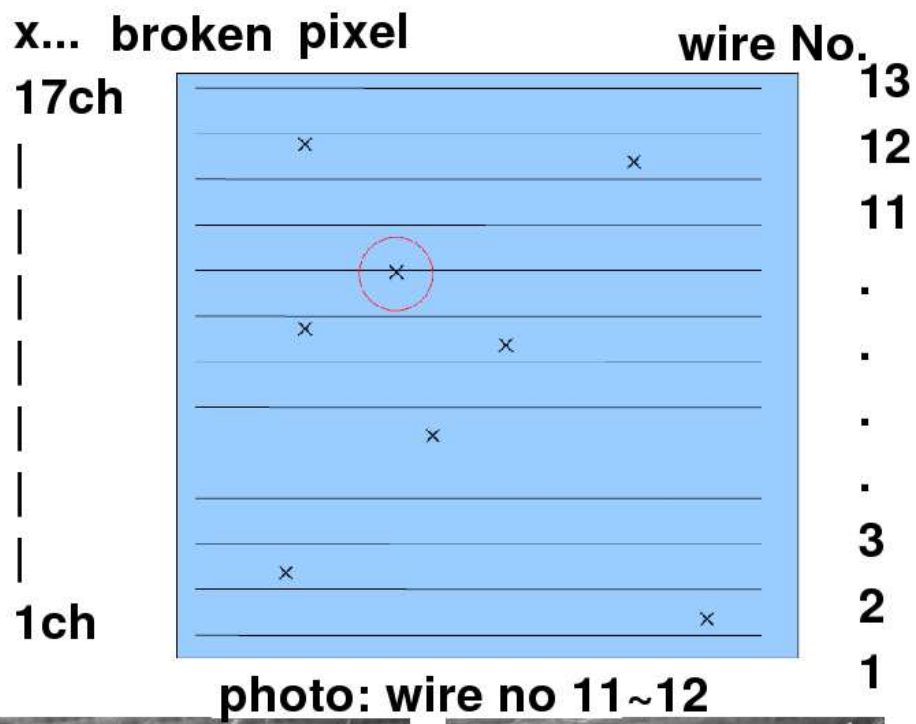


図 44 放電箇所を示すマップと放電ピクセル拡大写真。上のマップにある赤丸は、ワイヤと重なった放電ピクセルを示す。下の写真にある青丸は、放電して黒ずんだ箇所を示す。左下の光学顕微鏡写真にある放電ピクセルの真上にあたるメッシュも黒ずんでいた。右下の写真はカソード電極が黒ずんでいる。

第6章 まとめ

本研究では、 10^4 を越えるガス増幅率で安定な動作をすることができる M^3 -PIC の評価を行った。

当初は M^3 -PIC の原理検証を目的として、 $0.3\text{cm}\times 3\text{cm}$ の限られた領域で M^3 -PIC を動作させていた。今回は M^3 -PIC の大面積化に視野を入れて、マイクロメッシュと μ -PIC 基板との間にナイロンワイヤ製のスペーサを、 3cm 角の検出領域に渡って実装することができる治具を製作した。これを用いて μ -PIC 基板にスペーサを実装し、厚さ $5\mu\text{m}$ や、 $20\mu\text{m}$ のマイクロメッシュを実装した。

厚さ $5\mu\text{m}$ のメッシュを実装した M^3 -PIC は、目視による確認で、シワが確認された。そこで、測定領域の増幅率のバラツキを測定したところ、 10% 程度であることが確認された。 $5\mu\text{m}$ メッシュを実装した M^3 -PIC の最大ガス増幅率は、 5×10^4 を達成することができたが、この状態で1分間にアノードとカソードとの放電が数回確認された。3日間の動作においては、 15000 程度の増幅率で、 24 時間に渡って動作した。

厚さ $20\mu\text{m}$ のマイクロメッシュを実装した M^3 -PIC も、 5.7×10^4 のガス増幅率を得られた。1か月の長期測定では、まず動作ガスの流量を最適化することと、チェンバー周辺の圧力アノード～カソード間放電状況を記録する機器を用意すること、長期測定用のデータ収集プログラムを確立させた上で測定した。その結果、 $20\mu\text{m}$ メッシュ付き M^3 -PIC は、チェンバー周辺の圧力 1000hPa を基準として補正したガス増幅率 2.0×10^4 で、1か月間安定に動作した。

$20\mu\text{m}$ メッシュ付き M^3 -PIC の増幅率変動については、データロガーから得られたチェンバー内周辺の圧力で補正をしたところ、測定開始直前の増幅率 1.6×10^4 と終了直後の増幅率と比べて 20% 程度の差が見られた。また、増幅率は測定開始直後から4日間はおおよそ 2.0×10^4 まで上昇し続けた。それ以降の増幅率は、数%程度の変動があった。

$20\mu\text{m}$ メッシュ付き M^3 -PIC の長期測定中は、アノード～カソード間で放電した形跡が見られたが、その直後での大きな増幅率変動は見られなかったことと、高電圧電源からのトリップは起こらなかったため、長期動作に支障は見られなかったと考えられる。

謝辞

本研究を進行することと、本論文を作成に当たって、ご多忙の中、ご指導を賜った越智敦彦助教に心より感謝致します。研究を進める上で、越智先生の御教授は、自ら考えて研究する素養となりました。たとえば、増幅率の圧力依存やボイルの法則のチェンバー内への適用など、院生はおろか学部生として知るべき物理の基礎知識や、 M^3 -PIC のローパスフィルタや OP アンプの増幅原理などの電気電子回路の基礎、本論文の作成や学会の発表を御教授して下さったことです。

自分の研究があるにも関わらず、共に実験に協力していただいた田辺晃氏、阪大大学院に在学する加納英朗氏の心遣いは、大いに研究の助けとなりました。僭越ながら本研究や本論文の大成は、両氏の協力があつたからこそです。

同じく μ -PIC group に属し、共に研究に従事なさっている工学部の本間康浩准教授、松田慎司氏、今は就職なさった守谷健司氏、吉田圭一氏に深く感謝致します。特に本間先生の助言は、本研究を進めることに限らず、社会人として仕事を進めることにおいても緊張感をもって、明確な目的と豊富な知識で業務に取り組むことを改めて自覚させられました。また、 μ -PIC ミーティングにおいて松田氏らの研究の進捗状況を聞くことや、守谷、吉田両氏が、自然科学棟の実験室で実験なさる姿を拝見する度に良い刺激を受け、本研究を進める糧となりました。

末筆ながら、2年間に渡る大学院での研究生活において、御助言を賜った川越清以教授、蔵重久弥准教授、山崎祐司准教授、原俊雄准教授、ならびに勉強や進路など労苦を共にし、励ましあつた粒子物理研究室の先輩、後輩および同級生の皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. クラインクネヒト 著 高橋 嘉右・吉城 肇 共訳 「放射線検出器 -放射線計測の基礎と応用-」 培風館 1987
- [2] F.Sauli,“PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRED PROPORTIONAL AND DRIFT CHAMBERS”,CERN REPORT 77-09,1977
- [3] Physical Review D “Particles and Fields” P132 1996/7/1
- [4] URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_Effect_Schematic-de.svg
- [5] 桂華智裕 修士学位論文「Micro Pixel Chamber(μ -PIC) の安定性向上と高増幅率化に向けた研究」 神戸大学 2006
- [6] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pairproduction.png>
- [7] 越智敦彦 修士学位論文「二次元 MSGC による X 線の画像的検出」 東京工業大学 1995
- [8] URL: <http://ipnweb.in2p3.fr/rdd/projects/mpgd/images/micromegas2.gif>
- [9] Y.Giomataris, Ph.Rebourgeard, J.P.Robert, G.Charpak “Micromegas: high granularity position-sensitive gaseous detector for high particle flux environments”
Nucl.Inst.Meth.,A376,1996
- [10] F.Sauli “GEM:A new concept for electron amplification in gas detectors”
Nucl.Inst.Meth.,A386,1997
- [11] Atsuhiko Ochi,Tsutomu Nagayoshi,Satoshi Koishi,
Toru Tanimori,Tomofumi Nagae,Mirei Nakamura“A new design of the gaseous imaging detector:Micro Pixel Chamber”
Nucl.Inst.Meth.,A264,2001
- [12] Atsuhiko Ochi,Yasuhiro Homma,Takeshi Dohmae,Hideaki Kanoh,Tomohiro Keika,
Seiji Kobayashi,Yota Kojima,Shinji Matsuda,Kenji Moriya,Akira Tanabe,Keiichi Yoshida“A
New MPGD design: Micro-Mesh Micro-Pixel Chamber”
Nucl.Inst.Meth.,accepted for publication,2009
- [13] 加納英朗 卒業論文 「メッシュ付き μ -PIC による陽イオンフィールドバックの測定」 神戸大学 2007
- [14] 田辺 晃 卒業論文 「新型 μ -PIC のメッシュ構造の最適化のシミュレーション」 神戸大学 2007
- [15] 道前 武 卒業論文「メッシュ付き μ -PIC の動作検証」 神戸大学 2006
- [16] Y.Homma,A.Ochi,K.Moriya,S.Matsuda,K.Yoshida,S.Kobayashi
“Study of deposit associated with discharge in micro-pixel gas chamber”
Nucl.Inst.Meth.,A47,2009
- [17] 守谷健司 修士論文 「マイクロピクセル検出器の電極間放電に伴うピクセル上堆積物の研究」 神戸大学 2007