

2009年度 卒業論文
大面積メッシュ付き μ -pic の開発研究

神戸大学理学部物理学科 粒子物理学研究室
 μ -pic グループ
0293116s 駒井英俊

平成 25 年 2 月 17 日

概要

粒子線の検出とは、粒子の通過位置、時間を測定し、それらの情報から粒子の飛跡を再構成し、運動量やエネルギーを計算することである。そのため優れた位置分解能、検出効率を持つ検出器が必要となる。メッシュ付き μ -pic とは微細加工技術を利用した粒子線検出器の一つであり、従来から我々が研究を行っている粒子線検出器 μ -pic の改良型として開発され、 μ -pic の上に誘電体のスペーサー、金属メッシュと配置する事で高増幅率、安定動作性を実現している [1]。金属メッシュに負の高電圧を印加することで、ガス増幅に必要な強電場を三次元的に広い領域において作ることが出来き、放電による検出器の破壊も抑えられる。3cm \times 3cm の小型のメッシュ付き μ -pic に関しては以前からその特性が調べられ、最高増幅率は 5×10^4 を達成している。また長期動作では、 2.0×10^4 の増幅率において 30 日間の安定動作も確認できている [2]。本研究では実際の検出器として必要な 10cm \times 10cm の大面積のメッシュ付き μ -pic の作成を行った。その際に、配置するスペーサーの直下に生じると予想される測定器としてのデッドスペースを可能な限り減らす形でのスペーサー、メッシュの実装を目的とし、その為の治具を作成した。それらの実装後にスペーサーの配置具合を顕微鏡で確認した後、実測定においてスペーサーが検出器に与える影響を測定した。また、電磁場解析ソフトである Maxwell3D、Maxwell2D SV、Garfield を用い、検出器内部での静電場や、ガス増幅で生成される電子、陽イオンの飛跡をシミュレーションし測定結果と比較した。測定結果とシミュレーション結果から、スペーサーにより電子や陽イオンの収集が阻害されている可能性が高いことが分かった。

目次

第1章	粒子線の検出	4
1.1	光子の検出	4
1.1.1	光電効果	4
1.1.2	コンプトン効果	5
1.1.3	電子対生成	5
1.2	荷電粒子の検出	7
1.3	ガス検出器	8
1.3.1	ガス増幅を用いた粒子線検出器	8
1.3.2	Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)	8
1.3.3	MSGC	9
1.4	μ -picの構造	10
1.5	μ -picの特徴	10
第2章	セットアップ	11
2.1	メッシュ付き μ -picの構造と動作原理	11
2.2	メッシュ付き μ -picの作成	11
2.2.1	スペーサー配置用治具	13
2.2.2	スペーサーの配置、メッシュの実装	13
2.3	自動表面検査システム	14
2.4	メッシュ付き μ -pic周辺のセットアップ	16
2.4.1	ガスのセットアップ	16
2.4.2	データ収集フロー	16
2.5	増幅率測定	17
2.5.1	キャリブレーション	17
2.5.2	^{55}Fe のエネルギー分布	18
2.5.3	増幅率の算出	19
2.5.4	キャリブレーション、増幅率算出の自動化	20
第3章	測定結果	21
3.1	カソードch別増幅率の測定	21
3.2	アノード増幅率	24

第4章	シミュレーション、考察	25
4.1	Maxwell3D,2Dを用いた電場シミュレーション	25
4.2	Garfieldを用いた電子、陽イオンの飛跡シミュレーション	26
4.3	考察	27
第5章	まとめ	28
5.1	まとめ	28
5.2	今後の課題	28
第6章	謝辞	29
	謝辞	29
	参考文献	30

第1章 粒子線の検出

測定しようとする高エネルギー粒子に関する位置・エネルギー・運動量などの情報は検出器の内部の物質と起こる相互作用から得られる物理量を元にして計算される。ここでは、光子（X線や γ 線など）と荷電粒子がそれぞれ物質との間で行う相互作用について述べる。

1.1 光子の検出

光子と物質との相互作用はそのエネルギー依存性が大きく、数keV以上の高エネルギーの光子は物質中を非常によく透過する。光子が物質と相互作用するのは次の光電効果 (photoelectric effect)、コンプトン効果 (compton effect)、電子対生成 (pair creation) の三つが挙げられる。

1.1.1 光電効果

光子が全エネルギー $h\nu$ を軌道電子に与え、光電子に変換させる反応である (図 1.1 参照)。主として最内殻の電子が、ある運動エネルギー T を持って飛び出す。このエネルギー T は光子の全エネルギー $h\nu$ から (K 殻電子の) 電離エネルギー I を差し引いた値 $T = h\nu - I$ で与えられる。光電効果の起こる確率は原子番号 Z のほぼ5乗に比例するので Z の大きな物質は、光子のシールド効果が非常に大きい。ただし、光電効果がコンプトン効果、電子対生成に比べ優先するのは比較的エネルギーの低い領域で、たとえば Al では 50keV 以下、Pb では 500keV 以下についてである。

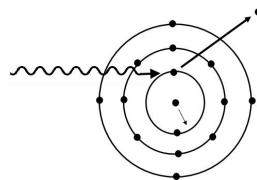


図 1.1: 光電効果

入射光子が最内殻電子に衝突し、
その電子は $T = h\nu - I$ のエネルギーを持って飛び出す。

1.1.2 コンプトン効果

光子が物質中の原子の外殻電子や自由電子と衝突して、電子をはじき飛ばすとともに、エネルギーの低い光子が出て行く現象で、それらのエネルギー運動方向は光子と自由な電子の衝突として、エネルギー保存則、運動量保存則から簡単に導くことが出来る(図1.2参照)。簡単な計算から θ 方向に出て行く光子のエネルギー $(h\nu)'$ は、入射光子のエネルギーを $h\nu$ とすると

$$(h\nu)' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu} \quad (1.1)$$

と表され、反跳電子のエネルギー T は

$$T = h\nu \frac{(1 - \cos \theta) h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu} \quad (1.2)$$

となる。 m_e は電子の質量、 c は光速である。コンプトン効果の起きる確率(断面積)は原子番号 Z に比例しており、その効果の優先する領域は、Alの場合 $0.05\text{MeV} < h\nu < 15\text{MeV}$ 、Pbでは $0.5\text{MeV} < h\nu < 5\text{MeV}$ である。

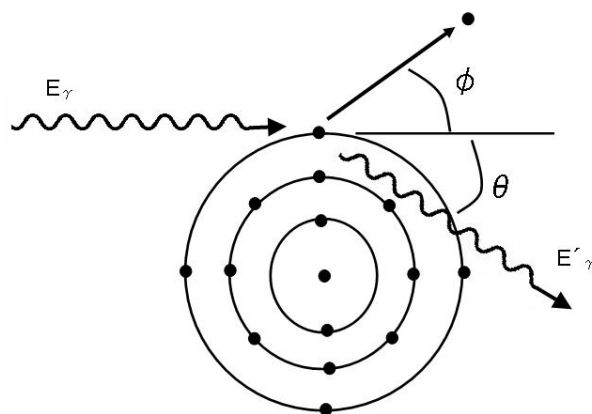


図 1.2: コンプトン効果

光子が外殻電子と衝突し、外殻電子をはじき飛ばすと共に、エネルギーの低い光子が出て行く。

1.1.3 電子対生成

光子のエネルギーが電子の静止エネルギー $m_e c^2$ の2倍以上になると、物質中の電磁場(主として原子核によるクーロン場)との相互作用により γ 線が突然消失して電子と陽電子が運動エネルギー $(h\nu - 2m_e c^2)$ を分かち合って飛び出してくることがある(図1.3参照)。電子または陽電子の運動エネルギーは0から $(h\nu - 2m_e c^2)$

にわたっており、エネルギー E を持つ確率はほぼ E に逆比例している。また電子対生成の起こる確率はだいたい原子番号 Z の 2 乗に比例している。陽電子は物質中でその運動エネルギーを失い、やがて ($10^{-10} \sim 10^{-9}$ 秒) 物質中の電子と対消滅し、 $(h\nu)' = m_e c^2 = 511 \text{keV}$ の 2 個の光子を出す (3 個の光子を出すこともある)。

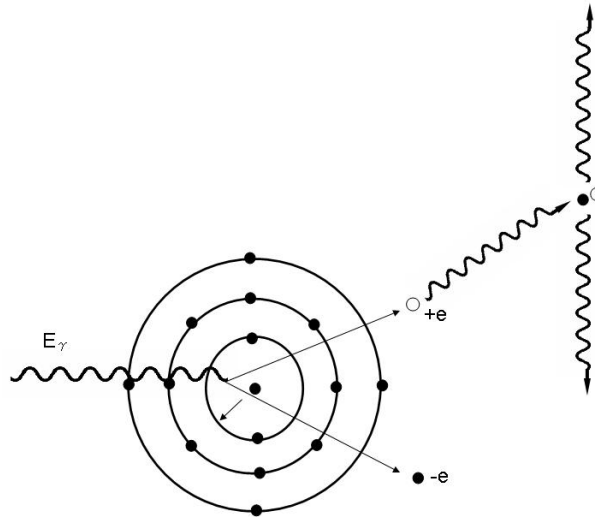


図 1.3: 電子対生成

γ 線の強度は物質中では $e^{-\tau x}$ で減少する。これは光電効果、コンプトン効果、対生成が物質中で起こると γ 線が吸収されるからである。 τ は、 $\tau = \tau_{\text{photon}} + \tau_{\text{comp}} + \tau_{\text{pair}}$ となり、Pb ではこれらの吸収係数 τ は図 1.4 のようになる。

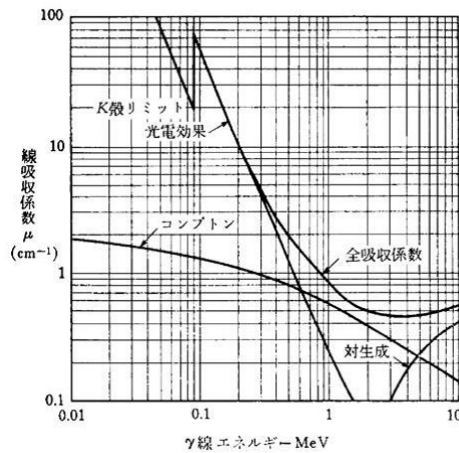


図 1.4: Pb に対する光子の吸収係数 [3]

1.2 荷電粒子の検出

荷電粒子の場合、電荷が運ばれているので媒質中を通過すると、媒質中の電子とクーロン力によって連続的に相互作用する。荷電粒子が吸収物質に入射すると、電子は荷電粒子のクーロン力によって衝撃を受ける。この衝撃力によって、吸収物質原子内の電子はより高いエネルギー準位に励起または電離する。荷電粒子は衝撃により電子に与えた分だけエネルギーを失う。そのため荷電粒子は速度を落とすことになる。この衝撃により、励起原子またはイオン対が作られる。イオン対は再結合により中性原子に戻ろうとするが、再結合を抑制しイオン対または電子を収集することが検出器の応答の基本である。吸収物質中で入射荷電粒子が単位長さなりに失うエネルギー (エネルギー損失) は

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} NB \quad (1.3)$$

と表され、ここで、

$$B \equiv Z \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1.4)$$

とし、また v 、 N 、 Z 、 m_e 、 e はそれぞれ、一次粒子の速度および電荷、単位体積あたりの物質の個数、物質原子の原子番号、電子の静止質量および電荷である。式

は「Bethe-Bloch の式」と呼ばれ、吸収物質を Cu として μ^+ を入射粒子とした場合のグラフが図 1.5 である。これを見れば、あるエネルギー帯の粒子は物質をよく透過するということである。言い換えれば、先にも見たように物質との相互作用を利用して粒子を検出するので、このエネルギー帯の粒子による出力は小さい。このような粒子を MIP (Minimum Ionization Particle) という。LHC (Large Hadron Collider) で検出した粒子は GeV オーダーであるこの MIP 粒子である。この粒子を検出する時は電離して出てくる電子が少なく信号が小さくなるので、この少ない電子を増幅させて大きな信号に変化する必要がある。MIP 粒子検出器として要求される増幅率は 10^4 と言われている。

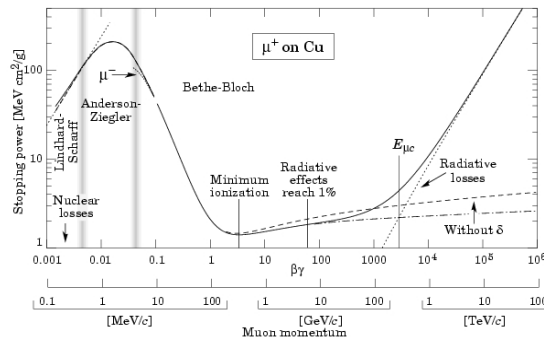


図 1.5: Bethe-Bloch の式によるエネルギー損失 [4]

1.3 ガス検出器

1.3.1 ガス増幅を用いた粒子線検出器

1.3.2 Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)

高エネルギー加速器実験において粒子検出器は必要不可欠である。現在、高エネルギー加速器実験に使われているガス検出器には Charpak らによって開発されたワイヤーを使った MWPC (Multi Wire Proportional Chamber)[5] などがあるが、近年の高エネルギー加速器実験は高輝度化しており、より時間分解能の良いものが求められる。また量産するにしても細いワイヤーを張る作業は非常に困難で、大量生産は難しい。

ここでガスを使った粒子検出器の動作原理をこの MWPC を例に上げて説明する(図 1.6 参照)。ガスパッケージの中にはガスが充満してそこにワイヤーが何本も平行に張っており、正の電圧がかかっている。ガスパッケージは負の電圧がかけられた電極ではさまれている。ここに荷電粒子が入ると中のガス分子を電離しその電子がさらにワイヤーの高い電場によりエネルギーを増し、さらに他の分子を電離させたたくさんの電子がワイヤーに入っていく。これを電子雪崩と呼ぶ。同時に発生した陽イオンがワイヤーから離れることによってワイヤー内の電荷が移動し信号が誘起される。これがガスを使った検出器の主な原理である。また最初に荷電粒子によって生まれた電子(1次電子)と最終的にワイヤーに到着した電子(2次電子)の比が増幅率となる。よって増幅率を上げるには内部の電場を強くして電子の持つエネルギーを高くしてやればよい。

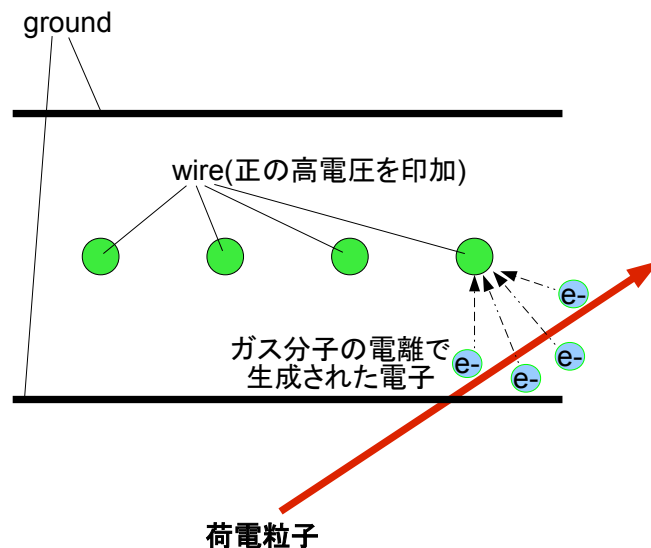


図 1.6: MWPC の動作原理

1.3.3 MSGC

MWPCでの位置分解能、量産性や高頻度入射粒子に対応できないという問題を克服するためにワイヤーを使わないMSGC (Micro Strip Gass Chamber) が1988年、A.Oedにより開発された [7]。構造を図1.7に示す。LSIの作成などで用いられるリソグラフィ技術を用いて絶縁体 (ポリイミド) の基板にストリップを形成した。それらを陽極 (アノードストリップ)・陰極 (カソードストリップ) と交互に接続し電場を与えることでストリップ上に高い電場を作りガス増幅をする。MSGCはアノードの間にカソードを配置しており、MWPCでは困難であった間隔以下にストリップを配置でき、高い位置分解能を可能としている。さらにガス増幅時にアノード付近に生じた陽イオンがすぐにカソードに吸収されるため時間分解能がMWPCと比べても3倍程度早くなっている。

しかしながらガス増幅によって生じたイオンの一部が絶縁層に付着してチャージアップを起こすことで表面の電場が弱められること、カソード近傍の電場が強くなり金属中の電子が放出し放電をおこすこと、放電に伴ってストリップが溶けて断線したりアノード、カソード間が導通を起こし電極破壊が起こるといった問題点もある [8]。

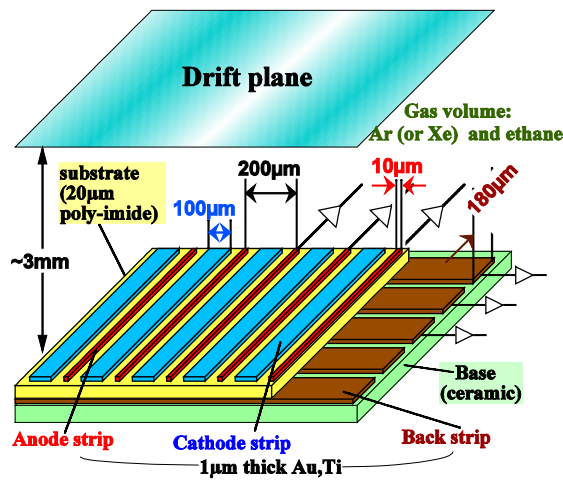


図 1.7: MSGC の構造 [6]

1.4 μ -pic の構造

μ -pic(Micro Pixel Chamber)[9] とは、プリント基盤技術を用いた Micro Pattern Gass Detector(MPGD) の一種である。その構造は、絶縁基板の片面にアノードストリップが、他方にはカソードストリップが印刷されている。カソードストリップには直径 $250\mu\text{m}$ のホールが 400μ 間隔であけられており、その中心に直径 50μ のアノードピクセルが配置され、それらは基盤裏側にあるアノードストリップにつながっている。アノードストリップは、カソードストリップと垂直に配置されており、アノード、カソード両方の信号を用いることで二次元読み出しが可能となっている。

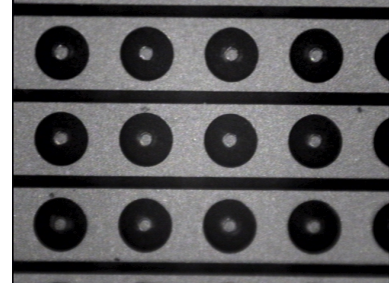


図 1.8: μ -pic 表面の拡大写真

1.5 μ -pic の特徴

- MSGC と違いアノードがピクセル状になっていることで、放電による検出器の損傷をピクセル単位に抑えることが出来る。
- ストリップ上のアノード、カソードを等間隔に並べる場合より、より低いカソード電圧でアノードピクセル周りにガス増幅に必要な強電場を作ることが可能であり、カソードの電位を低く抑えることでカソードエッジからの放電を抑制することが出来る。
- 製造については既存のプリント技術を使用していること、浮体構造物などの三次元構造をもたないシンプルな構造であることから検出器の大面积化が容易である。
- MSGC ではカソードから読み出される信号は誘起された信号であり、その大きさはアノード側の 20~30 % 程であるのに対して、 μ -pic のアノードとカソードで読み出される信号は、正負は反対であるが大きさがほぼ同じである。

第2章 セットアップ

2.1 メッシュ付き μ -pic の構造と動作原理

本研究の研究対象であるメッシュ付き μ -pic の構造について説明する (図 2.1 参照)。メッシュ付き μ -pic は、 μ -pic の上に誘電体のスペーサーを配置し、その上に金属製のメッシュを実装した構造になっている。測定する際はチェンバー内に設置し、ドリフトプレーンに $-300\text{V} \sim -600\text{V}$ 、メッシュに $-100\text{V} \sim -300\text{V}$ 、アノードに $600\text{V} \sim 800\text{V}$ の電圧を印加して測定を行う。

メッシュを実装することによる利点は次の3つが挙げられる [1]。

- 高増幅率の達成。金属メッシュに負の高電圧を印加することで、アノード、メッシュ間にガス増幅に必要な高電場を三次元的に広領域において作ることができる (図 2.3 参照)。このことにより、電子雪崩においてより多くの二次電子が生成されることとなる。
- 安定動作性。電場強度はアノードからの距離が離れるにしたがい急激に低下していくので、そのことによりカソードやメッシュからの電子放射が抑えられ、アノードからのストリーマーが自動的に和らげられる。
- イオンバックフロー率の低下。イオンバックフローとは、電子雪崩によって生成された陽イオンがカソードに到達せずに、ドリフト電場に従いドリフト領域に向かう現象のことである。これが起きるとドリフト領域の電場が乱れ、一次電子の正確なドリフトが阻害される。メッシュ付き μ -pic では、負の電圧を印加した金属メッシュで陽イオンを吸収しドリフト領域に向かうことを防いでいる。

2.2 メッシュ付き μ -pic の作成

メッシュを μ -pic 上に配置するにあたり、スペーサーの配置場所が問題となった。配置されたスペーサーの影響で、電子や陽イオンのアノードピクセル、カソードストリップへの到達が阻害されることが考えられた為である。その影響を最小限に抑えるため、直径 $165\mu\text{m}$ のスペーサーを、幅 $60.5\mu\text{m}$ の測定領域ではないカソードストリップに沿った形で実装することを考え (図 2.1 参照)、その為の治具を製作した。

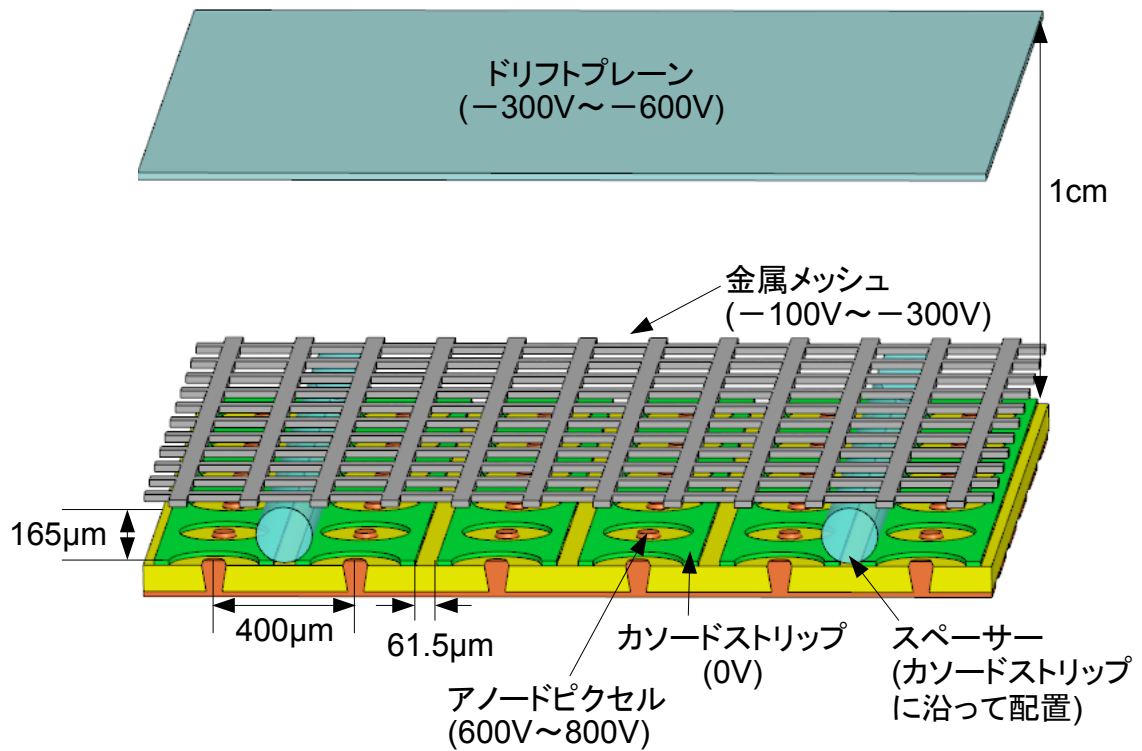


図 2.1: メッシュ付き $\mu\text{-pic}$ の構造

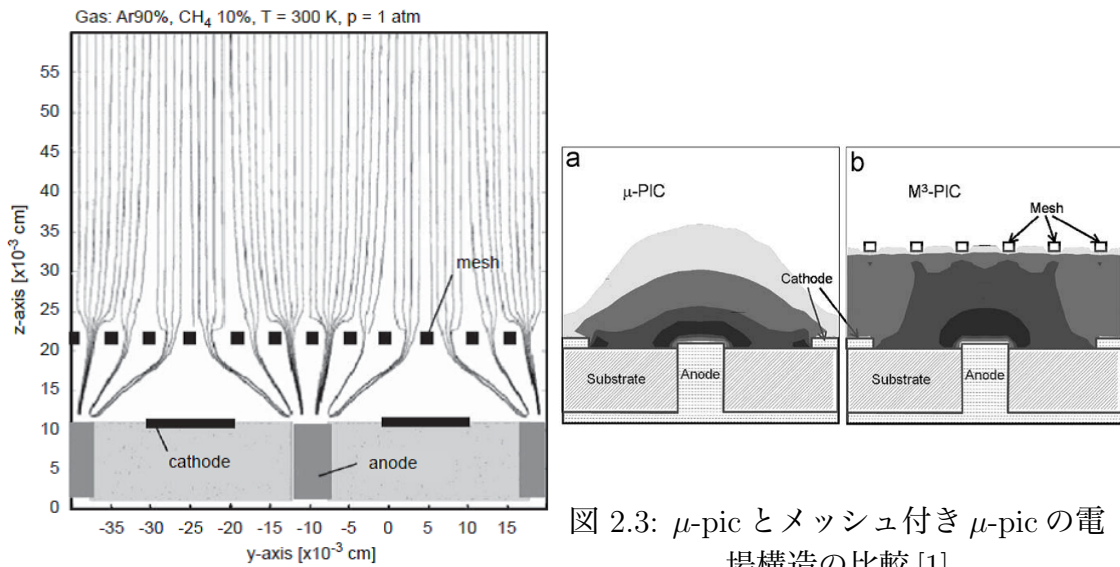


図 2.3: $\mu\text{-pic}$ とメッシュ付き $\mu\text{-pic}$ の電場構造の比較 [1]

図 2.2: メッシュ付き $\mu\text{-pic}$ における電子のドリフトライン [1]

2.2.1 スペーサー配置用治具

前述の理由から治具に必要なとされる機能は、複数のスペーサーを等間隔に且つ平行に固定し、それに対して μ -picを基盤面に平行な面上において、二軸方向の位置調節、角度調節が可能である、といったものである。実際に作成した治具の写真を図2.4に示す。

スペーサーを固定するために使用したのは、1.25cmピッチのM8ネジ二本で、それらを平行に15cm間隔で光学台に固定した。この二つのネジの谷に沿ってスペーサーを1cm間隔で平行に11本配置した。

μ -picの位置調節にはx-yステージを使用した。x-yステージとは2軸方向の位置調節を可能とする治具であり、今回使用した物は $2\mu\text{m}$ の最小単位で位置調節をすることが出来、またPCと通信することであらかじめ作成したプログラムを通して自動制御することも可能となっている。このx-yステージを光学台上に設置し、その上に回転台、 μ -picと固定することでスペーサーに対する μ -picの位置、角度調節を可能にした。

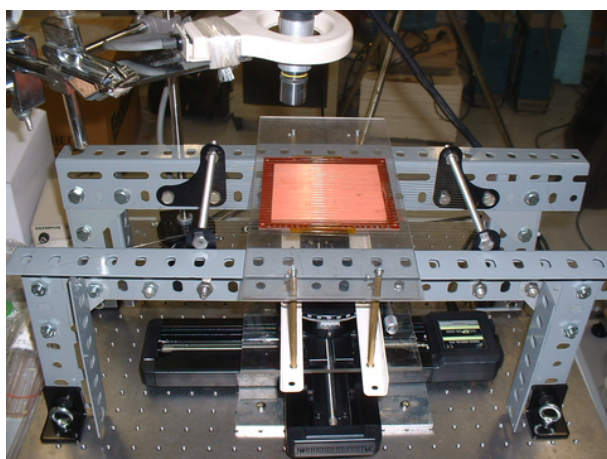


図 2.4: スペーサー配置用治具

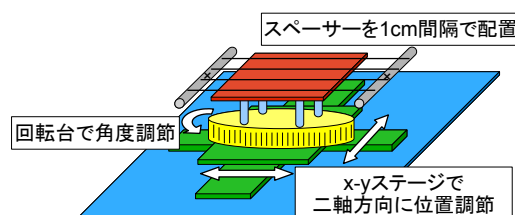


図 2.5: 治具の概略図

2.2.2 スペーサーの配置、メッシュの実装

先述の治具を用い、 μ -picの基板上にスペーサーの配置を行った。スペーサーの μ -picをスペーサーをカソードストリップに沿わせる形に位置、角度調節を行った(図2.6参照)。その後エポキシ系の接着剤アラルダイト2011を用い、基盤とスペーサーの両端を点状に接着した。(図2.7参照)。乾燥後、接着点の外側の余ったスペーサーを切り離れた後、メッシュを実装した。今回使用した金属メッシュはピッチが $50\mu\text{m}$ 、厚さが $20\mu\text{m}$ のものである。メーカーから購入した時点では、 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の大きさであったため、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 分を切り出し、スペーサーの上に μ -pic

の読み出し部分を完全に覆う形で配置した。両端をカプトンテープで引っ張りながら固定することで、均一にスペーサーに密着させることを目指した。メッシュの実装後、メッシュ付き μ -pic を測定用のチェンバー内に設置した (図 2.8 参照)。図 2.8 に見えている赤い配線は高電圧電源と接続する為のものであり、その一端はメッシュ、アノード、カソード、ドリフトプレーンに半田で固定し、他方はチェンバー外に出している。

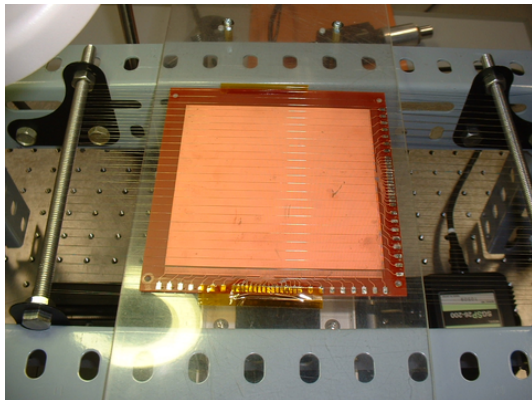


図 2.6: スペーサーの配置

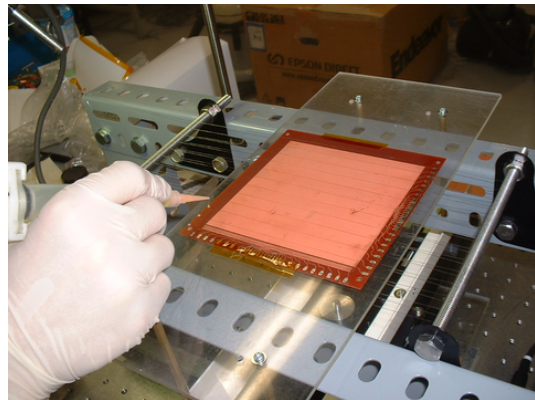


図 2.7: スペーサーの接着

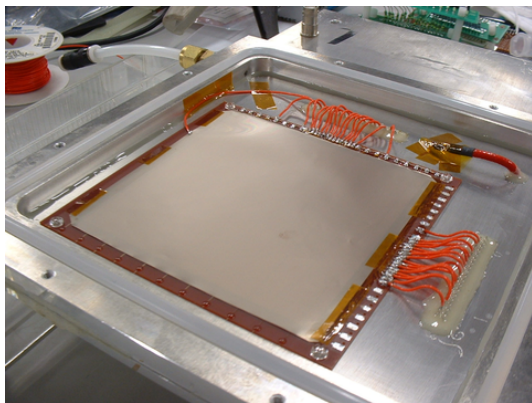


図 2.8: メッシュ実装後、チェンバー内に設置

2.3 自動表面検査システム

大面積 μ -pic、メッシュ付き μ -pic の表面の状態から放電現象の解明やスペーサーの配置状況の確認を行う目的で、表面検査を全面に渡って自動で行うシステムを

作成した。3cm × 3cm の μ -pic に対しては、手動の x-y ステージを用い、3mm × 3mm の範囲で顕微鏡で撮影し、その場所を移動させていく形で表面検査を行っていた。今回の実験で使用した 10cm × 10cm の μ -pic に対して同様の方法では時間、体力的にかなりの負担となるためその自動化を試みた。

その構造、および使い方について説明する (図 2.11 参照)。自動表面検査システムは顕微鏡、x-y ステージ、光学台、ビデオカード、PC から構成されている。x-y ステージは光学台の上に固定されており、撮影する際には x-y ステージのテーブル上に μ -pic を固定する。顕微鏡は μ -pic 表面を撮影する形で配置されており、そこで撮影された映像は、ケーブルを通して PC のビデオカードにインプットされ、デジタル処理をされた後 PC のディスプレイに出力される。映像処理には Microsoft 社の DirectShow を使用し、任意の瞬間に静止画として映像を保存することも可能にしている。

顕微鏡の撮影範囲は 1.6mm × 2.4mm としてあり、先述の x-y ステージを自動制御し、撮影箇所を変えていくことで μ -pic 全面 10cm × 10cm に渡る自動表面検査を可能とした。写真を図 2.9、図 2.10 に示す。また、このシステムを用いてスペーサーの配置具合を確認した (図 2.12 参照)。

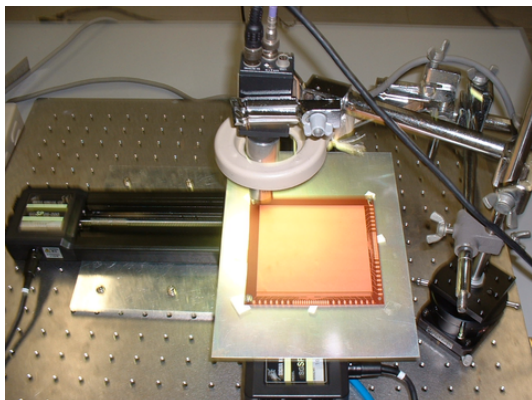


図 2.9: 自動表面検査システムの拡大図 図 2.10: 自動表面検査システムの全体図

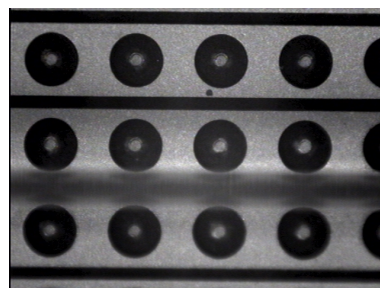
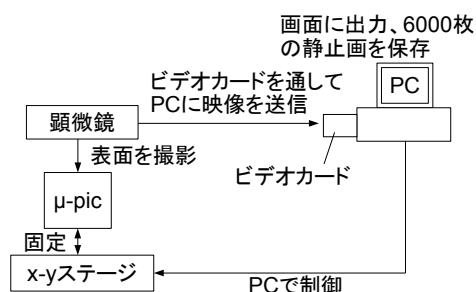


図 2.11: 自動表面検査システムの概略図

図 2.12: 撮影したスペーサー

2.4 メッシュ付き μ -pic 周辺のセットアップ

2.4.1 ガスのセットアップ

測定の際にチェンバー内を満たすガスのセットアップについて説明する。その写真を図 2.13 に示す。以下のセットアップで、チェンバーと今回使用した Ar:C₂H₆=1:1 の混合ガスが密封されたタンクとを接続した。測定中は内部の圧力を 50Pa に保った状態で、継続的にチェンバー内にガスを流入した。

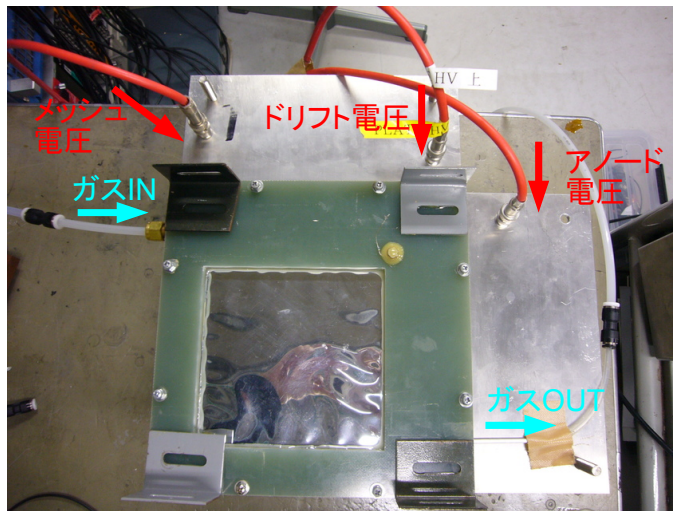


図 2.13: μ -pic のセットアップ



図 2.14: Ar:C₂H₆=1:1 の混合ガスが密封されたガスタンク

2.4.2 データ収集フロー

データ収集フローでは、ノイズを除いたメッシュ付き μ -pic の生の信号だけを観測し、且つ粒子の高い検出効率、高精度の位置分解能を得るために可能な限り低い信号強度のものから観測できる必要があった。そのために今回は μ -pic で検出されたアナログ信号を二つにわけ、一方はデジタル信号に変換し、それをトリガー信号としてもう一方でアナログ信号の強度測定を行った。トリガー信号を送るしきい値を、ノイズの乗らない範囲で可能な限り下げることによって上で述べた条件を満たすことができる。その概略図を図 2.15 に、使用したモジュールの写真を図 2.16 に示す。

メッシュ付き μ -pic のアノード、カソードからの電流をアンプ、ASD Buffer でアナログ電気信号に変換、増幅後、Linear Fun Out を通し 3 つのモジュールに信号をそれぞれ送る。一つは波形観測のためオシロスコープに、一つはアテネーターを通してアナログ信号をそのまま ADC に、もう一つはトリガー信号を作るため

Discriminator に送信する。Discriminator は一定以上の波高の信号の入力に対して、矩形波を Gate Generator に出力する。Gate Generator は、矩形波の幅、送信するタイミングを調節し、トリガー信号を ADC に出力する。ADC は、Gate Genetator からこのトリガー信号が送られてきた時のみ Gate を開き、Linear Fun Out からのアナログ信号を観測する。そうすることで、ノイズを減らし生の信号のみを観測することが出来る。ADC は送られてきたアナログ信号をデジタルへと変換し PC へ送信する。

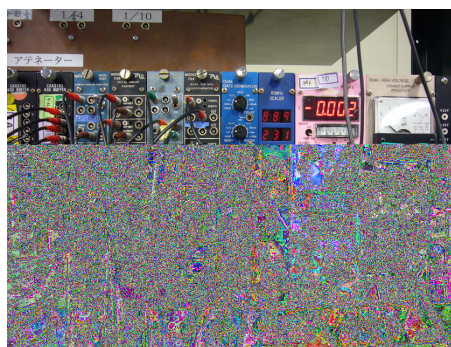
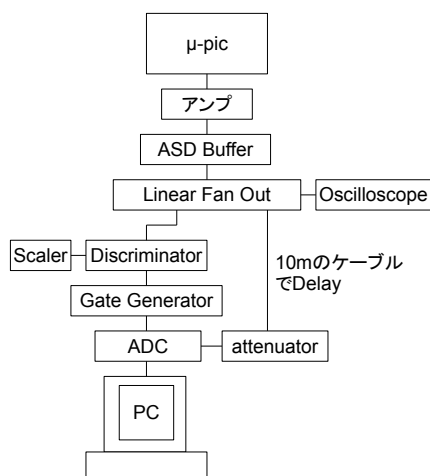


図 2.16: 測定に使用したモジュール

図 2.15: 回路の概略図

2.5 増幅率測定

2.5.1 キャリブレーション

ADC が出力した値からメッシュ付き μ -pic のアノード、カソードに入力した二次電子の電荷量を算出する、それをここではキャリブレーションと呼ぶ。

キャリブレーションに使う回路を図 2.17 に示す。アンプの先に μ -pic の代わりに $1\mu\text{F}$ のコンデンサ、パルスジェネレータと接続し、パルスジェネレータから $50\text{mV}, 100\text{mV}, 150\text{mV} \dots$ の双極波をコンデンサに出力する。コンデンサからアンプに流入する電荷量はその静電容量から、 $0.05\text{pC}, 0.1\text{pC}, 0.15\text{pC} \dots$ であるので、その時に観測された ADC 値を記録しグラフにプロットする (図 2.18 参照)。プロットされた各点を通る直線を求め、それをを用いることで ADC 値に対する二次電子の電荷量を算出することができる。

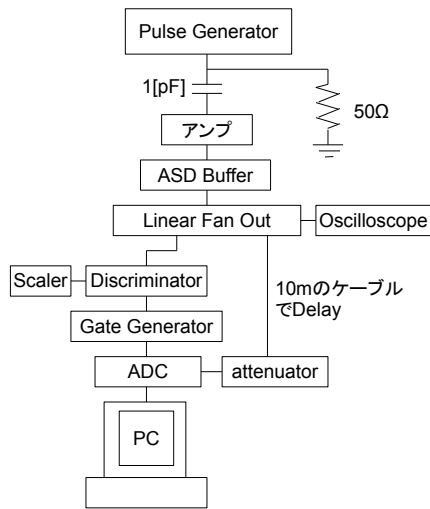


図 2.17: キャリブレーション用回路

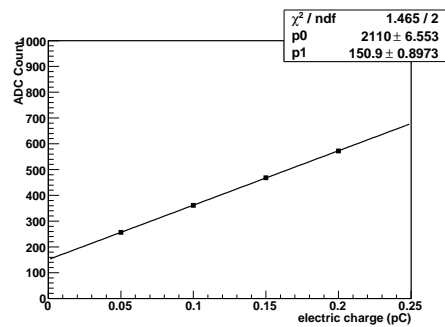


図 2.18: キャリブレーション直線
この直線を用いて ADC 値から二次電子の電荷量を算出する。

2.5.2 ^{55}Fe のエネルギー分布

本研究で線源として使用した放射性同位体 ^{55}Fe (5.9keV の X 線を放射) について説明する。

メッシュ付き $\mu\text{-pic}$ で測定した信号の ADC 値をヒストグラムに表したものを図 2.19 に示す。図 2.19 を見るとメインのピーク (光電ピーク) と小さなピーク (エスケープピーク) が見られる。

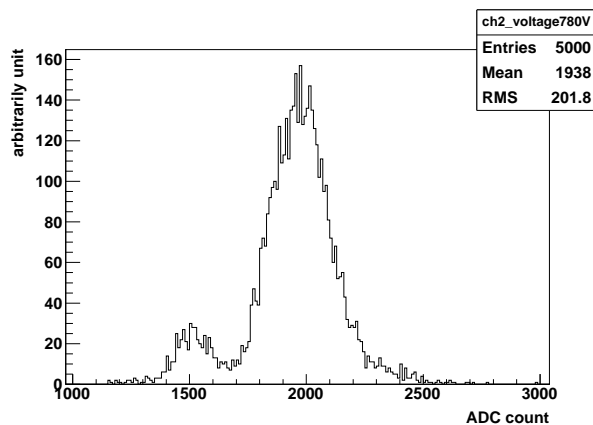


図 2.19: ^{55}Fe のエネルギー分布

^{55}Fe から放出される 5.9keV の X 線は Ar ガス分子と光電効果を起こし、原子核との相互作用で最内殻にある電子の一つが 2.7keV のエネルギーをもって飛び出す。

こうして生じた最内殻の空孔に、エネルギーの高い最外殻電子が落ち込み、そのエネルギー差を放出する。このエネルギーは 15 % の確率で蛍光 X 線として放出される (図 2.20 参照)。この X 線は Ar 原子の反跳のため Ar 原子のエネルギー順位差よりも小さくなっているために、Ar 原子には吸収されずに外に逃げる (エスケープ)。また、85 % の確率でオージェ効果が起こる (図 2.21 参照)。オージェ効果とは、最外殻電子が最内殻に落ち込む時に、同じ最外殻の電子にエネルギーを与え、オージェ電子として飛び出させるというものである。このオージェ電子は 3.2keV のエネルギーをもっている。

このようにして出てきた電子はそのエネルギーを持ってガス中を走り、軌道上のガス分子を電離、一次電子を生成しエネルギーを失う。つまり蛍光 X 線が放射されたときは 2.7keV のエネルギーを、オージェ効果が起きた時は合計 5.9keV のエネルギーを持つ電子が放出され、それらのエネルギーが全て一次電子の生成に使われる。これらが、図 2.19 のエスケープピークとメインピークの時にあたる。

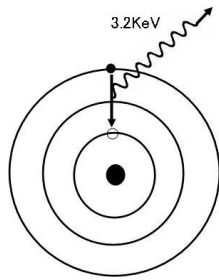


図 2.20: 蛍光 X 線の放射

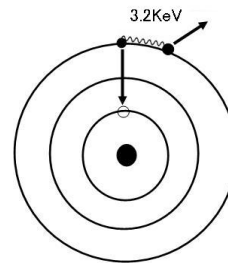


図 2.21: オージェ電子の放出

2.5.3 増幅率の算出

増幅率の算出方法について説明する。増幅率の算出にはメインピークの値を用いる。メインピークをガウス関数でフィットし、その中心値を読み取る (図 2.22 参照)。このキャリブレーションをとった値が、合計 5.9keV の電子によって生成された一次電子に対して、アノード、カソードに到達した二次電子の電荷量である。

次に一次電子の総電荷量を計算する。5.9keV のエネルギーが一次電子の生成に使われ、Ar の W 値 (イオン対一個を生成するのに必要なエネルギー) は 26eV であるので

$$5.9 \times 10^3 \div 26 \sim 2.3 \times 10^2 \text{個} \quad (2.1)$$

の電子が生成されることとなる。よって一次電子の総電荷量は、

$$1.60 \times 10^{-19} \times 23 = 3.6 \times 10^{-5} [\text{pC}] \quad (2.2)$$

となる。この値とメインピークの中心値で読み取れる二次電子の電荷量の比率を増幅率と定義しその算出を行った。

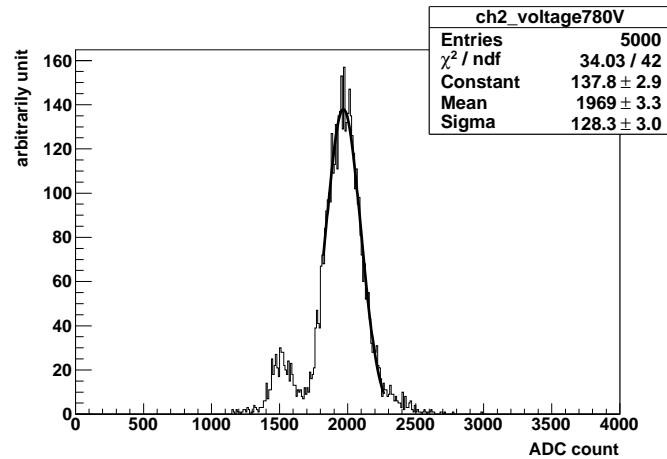


図 2.22: メインピークをガウス関数でフィッティング

2.5.4 キャリブレーション、増幅率算出の自動化

前述のキャリブレーション、増幅率の算出を行うプログラムを作成した。そのフローチャートを図 2.23 に示す。

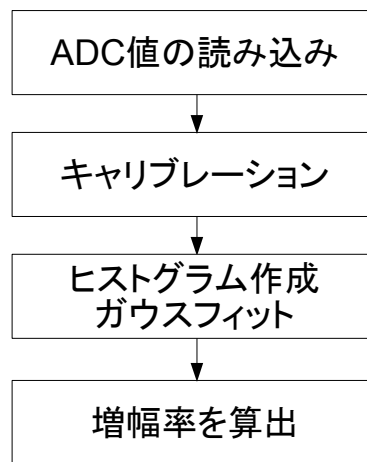


図 2.23: 増幅率算出プログラムのフローチャート

第3章 測定結果

本研究で使用した μ -pic は $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の領域において、 $400\mu\text{m}$ 間隔のアノード 256ch、カソード 256ch が存在する。そのうち中央のアノード 16ch、カソード 16ch の $6.4\text{mm} \times 6.4\text{mm}$ の領域においては 1ch ずつ独立した信号の読み出しが可能となっている。その他の ch については、16ch をまとめて読み出す形になっている。後述のカソード ch 別増幅率測定では 1ch ずつが独立しているカソード ch を、アノード増幅率測定では 16ch をまとめて読み出しているアノードまとめ ch の一つを使用した。

3.1 カソード ch 別増幅率の測定

スパーサーの増幅率に対する影響をみる為、カソード ch 別の増幅率をメッシュ実装の前後において測定した。測定 ch には、1ch ずつの増幅率分布を見るため中央の読み出しが独立した 16ch の内の 13ch を使用した。測定の際は、隣り合った 3ch の信号を同時に読み出し、3ch の内の 1ch ずつをずらしていく形で合計 13ch において測定を行った。トリガーは、3ch の中央 ch で一定以上の強度の信号が検出された時とした。

メッシュ実装前の測定条件は、ドリフト電圧 -2000V 、アノード電圧 $700\sim 780\text{V}$ である。その結果を図 3.1 に示す。メッシュ実装後の測定条件は、ドリフト電圧 450V 、メッシュ電圧 150V 、アノード 700V , 720V である。その結果を 3.2 に示す。スパーサーは、ch9、ch10 間にカソードストリップに添った形で配置した。グラフの横軸は測定した ch 番号、縦軸が増幅率となっている。ch 番号の表示には、まとめて読み出した 3ch 中で最も小さい ch 番号を用いた。例えば、横軸の値が 8 であれば、ch8,9,10 をまとめて読み出した時のことを示している。今後はこれを ch8 と呼ぶこととする。

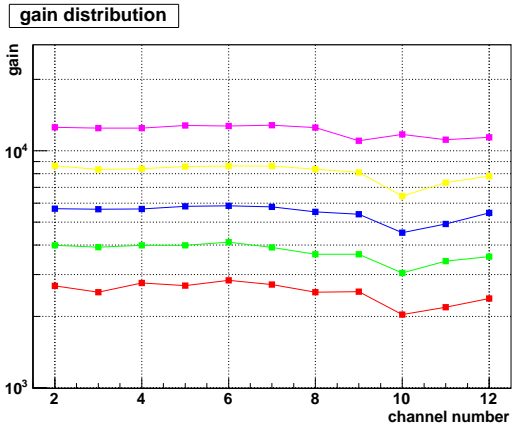


図 3.1: メッシュ実装前
カソード ch 別増幅率

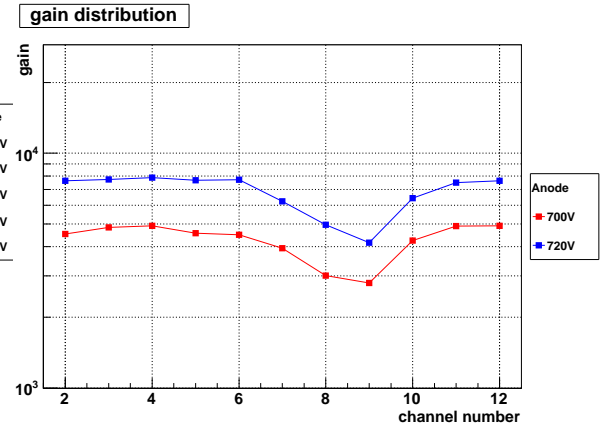


図 3.2: メッシュ実装後
カソード ch 別増幅率

メッシュ実装前の増幅率分布を見ると、ch10で少し低い増幅率が測定されているが、全体としてch毎の大きなバラつきはみられない。それに対してメッシュ実装後はch7~10で増幅率の落ち込みが見られ、特にch8,9ではそれが顕著である。増幅率の落ち込みが見られたch8で、同時に読み出した3chそれぞれにおいて測定された二次電子の電荷量のヒストグラムを図3.3に、参考として増幅率の落ち込みが見られないch11のものを図3.4に示す。

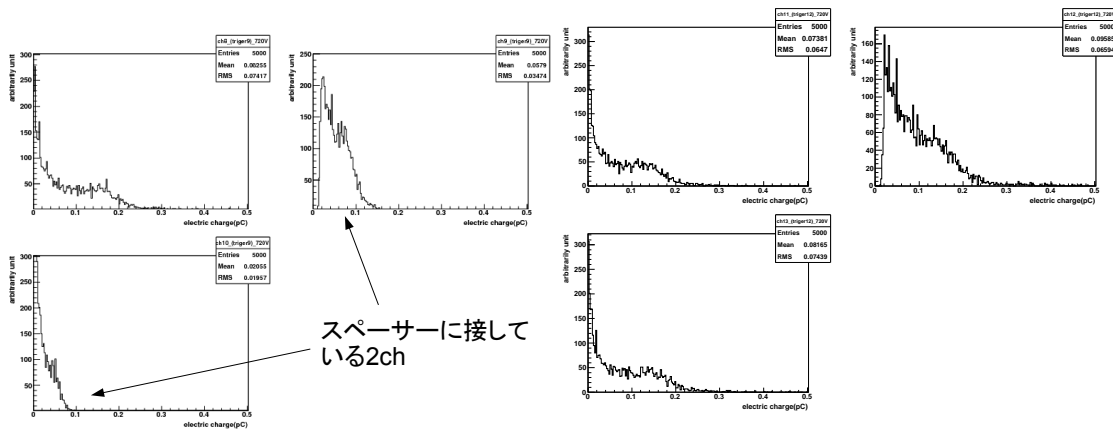


図 3.3: 増幅率の落ち込みが見られた ch8

図 3.4: 増幅率の落ち込みが見られない ch11

スペーサーに接しているカソード2chにおいてのみ、高強度の信号が検出される頻度が低い。この原因を究明する為、次章の電子、陽イオンの飛跡シミュレーションを行った。

今回は3chずつの測定を行ったが、可能なら1chずつの測定を行いその増幅率を算出したかった。それが不可能であったのは、 ^{55}Fe を線源とする1 photonのX線に対して、その信号が隣り合うアノード3chにおいて同時に検出された為である。この原因として考えられるものは大きく二つある。一つは一次電子が生成される際の、電子の飛程である。光電効果、オージェ効果によって生成される電子はそれぞれ3.2keV、2.7keVと、おおよそ3keVのエネルギーを持っており、そのエネルギーでArガス中を走り、軌道上の電子を電離、一次電子を生成していく。複数の一次電子の生成によってエネルギーを失った後は、ドリフト電場によってドリフトしていく形になる。3keVのエネルギーを持つ電子のArガス中での飛程はおおよそ100 μm であるので[10]、一次電子雲がそれだけの広がりを持った形で形成され、その結果一次電子、二次電子がアノード3chにまたがって到達していると考えられる。二つ目は、一次電子がドリフト中にガスによって拡散されることである。

これらの対処法の一つとして、信号増幅のガスとしてArベースでは無く、より重たいXeをベースとしたガスを使用することが挙げられる。重いXeを使用することで電子の飛程を短くし、一次電子雲の広がりを抑えることが出来る[6]。しかし、Xeは地球上に存在する量を考えても貴重であり、また非常に高価でもあるので、今回の実験では使用することは出来なかった。また、 ^{55}Fe の放射する5.9keVのX線よりエネルギーの低い蛍光X線を線源として用いることで、光電効果で放出される電子が持つエネルギーが小さくなり、先ほど述べたことと同様の効果を得られることも考えられる。しかし、これには蛍光X線の発生方法、等の問題があり実用にはいたらなかった。

またドリフトプレーンに印加した電圧が、メッシュ実装前後で大きく異なるのは、メッシュ付き $\mu\text{-pic}$ において高増幅率を実現するには、比較的低いドリフト電圧が必要とされるからである[1]。これは、3cm \times 3cmのメッシュ付き $\mu\text{-pic}$ において調べられた特性である。高い電圧をドリフトプレーンに印加すると、金属メッシュの電位が相対的に低くなり、ドリフトした一次電子が多量にメッシュへ吸収される。その結果、メッシュ-アノード間で電子雪崩により生成される二次電子の数が減り、検出される信号が弱くなる。また反対にドリフト電圧を極端に低くすると生成された一次電子と陽イオンとの再結合が起こってしまう。

これらの特性は10cm \times 10cmのメッシュ付き $\mu\text{-pic}$ においても観測された。メッシュ電圧を150Vに固定し、ドリフト電圧だけを変化させる形で ^{55}Fe を線源とするX線の信号を、 $\mu\text{-pic}$ の読み出しをオシロスコープにつなぐ形で観測した。結果、450Vからドリフト電圧をあげるに従い波高が次第に低くなり増幅率が低くなる、また450Vより低いところでは、電圧の低下に伴い波幅の広がり、波形の乱れが観測された。これらのことから、ドリフト-メッシュ間電圧の最適値は300V/cmであると判断し、測定を行った。

3.2 アノード増幅率

10cm × 10cm のメッシュ付き μ -pic の特性を調べるため、隣り合った 16ch をまとめて読み出しだしているアノード ch で、 ^{55}Fe (5.9keV の X 線) を線源として用いた増幅率測定を行った。ドリフト電圧 300V/cm、メッシュ電圧 150V,175V,200V の条件で測定した結果を図 3.5 に示す。

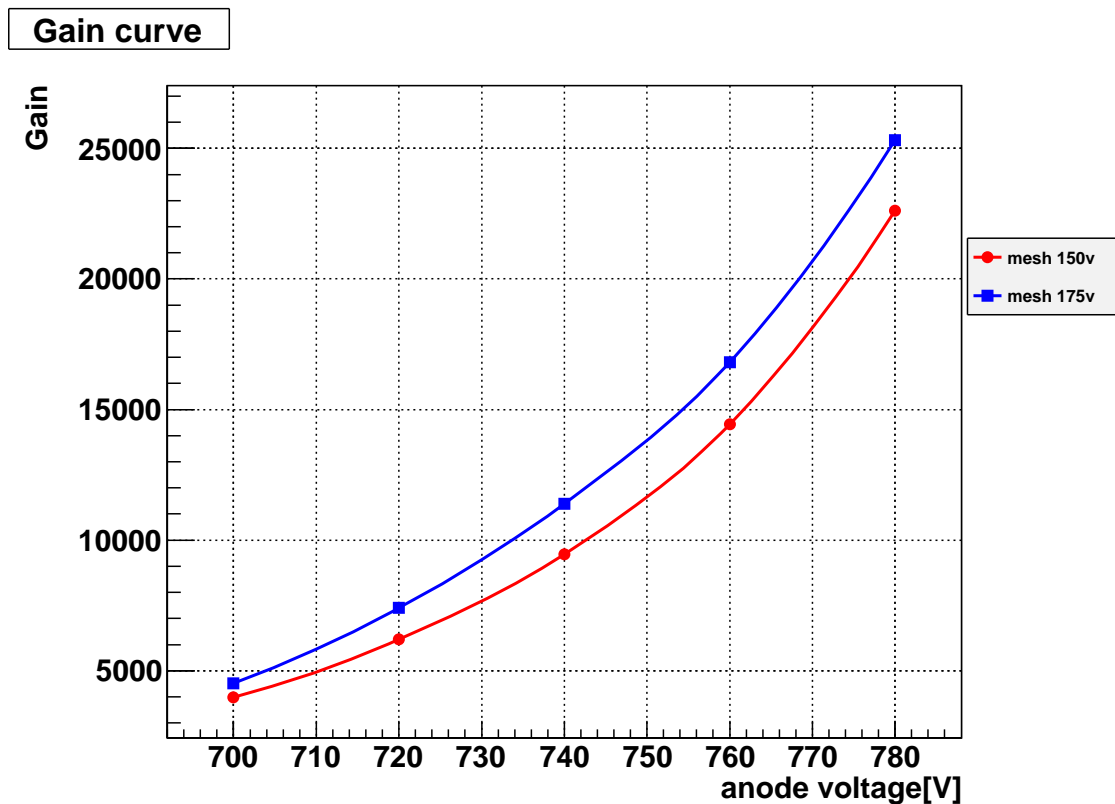


図 3.5: アノード 16ch をまとめて測定した増幅率曲線

第4章 シミュレーション、考察

4.1 Maxwell3D,2D を用いた電場シミュレーション

Maxwell3D,2D とは、Ansoft 社が販売している電磁場シミュレーションソフトウェアであり、解析対象のジオメトリを作成し、印加電圧等を設定することで、有限要素法を用いた電磁場の解析を行うことが出来る。今回は三次元のジオメトリを作成し、電場解析が可能な Maxwell 3D と、ジオメトリ作成が二次元においてのみ可能である Maxwell 2D の双方を使用し、電場シミュレーションを行った。その結果を用い、CERN の作成したガスチェンバー用シミュレーションソフト Garfield によって、測定器内部における電子、陽イオンの飛跡をシミュレーションし、スペーサー周辺 ch における増幅率落ち込みの原因究明を試みた。しかし、適応バージョンの関係で Maxwell2D の解析結果しか、飛跡シミュレーションに用いることが出来なかった。二次元のジオメトリでは、実際の検出器の構造を厳密に再現することは出来ないため、Maxwell3D において行った結果と、2D の結果を比較し、今回のシミュレーションにおいて必要な範囲の解析結果は大きな違いがないことを確認した後に、飛跡シミュレーションを行った。今節では、Maxwell3D,2D で行った電場シミュレーションの結果を示し、それらの比較を行うこととする。

Maxwell3D、2D において、スペーサーを含めたメッシュ付き μ -pic の最小単位のジオメトリを作成した (図 4.1、図 4.2)。各物質の構成素材には、アノード、カソードに銅、基盤にポリイミド、メッシュにニッケル、スペーサーにはポリアミドを指定した。

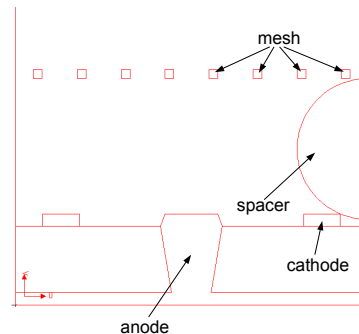
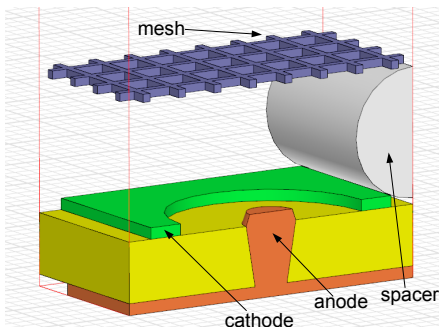


図 4.1: Maxwell3D で作成したメッシュ付き μ -pic のジオメトリ 図 4.2: Maxwell2D で作成したメッシュ付き μ -pic のジオメトリ

これらのジオメトリにおいて、印加電圧をドリフト -450V 、メッシュ -150V 、アノード 720V と設定し、電場解析を行った。各解析ポイントにおける電場ベクトルの解析結果を図 4.3, 図 4.4 に示す。

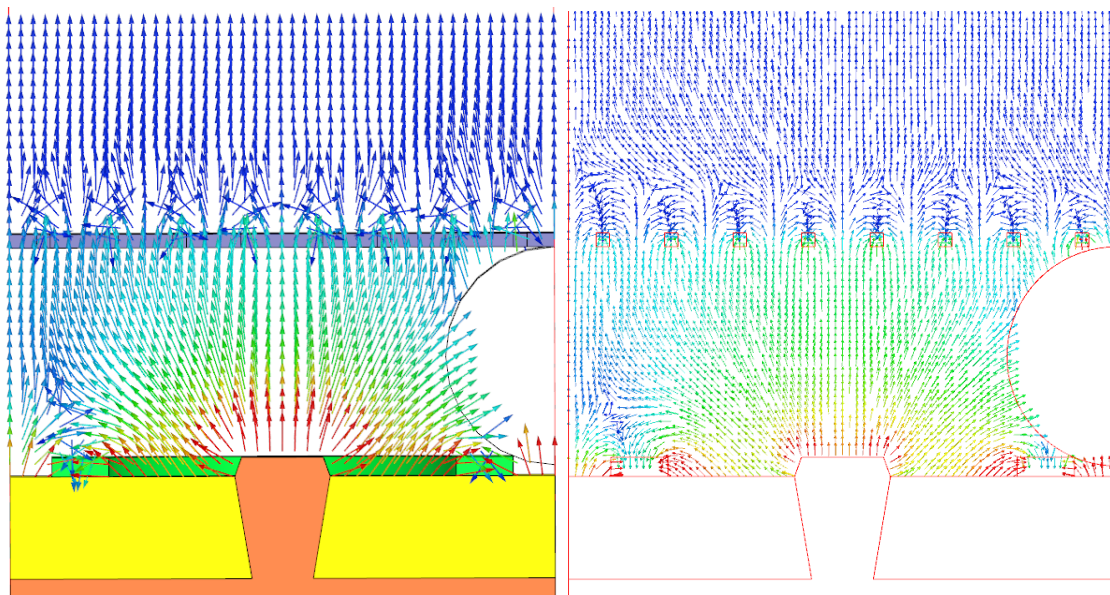


図 4.3: Maxwell3D で解析した
検出器内部の電場ベクトル

図 4.4: Maxwell2D で解析した
検出器内部の電場ベクトル

電場ベクトルの解析結果は 3D, 2D で大きな違いは見られない。2D での解析結果を用いて次節の飛跡シミュレーションを行った。

4.2 Garfield を用いた電子、陽イオンの飛跡シミュレーション

Maxwell2D で解析した電場データを Garfield にインプットし、ドリフト電子や電子雪崩で生成された陽イオンを電気力線に沿った形でドリフトさせその飛跡シミュレーションを、アノードピクセルの中心を通るカソードストリップに垂直な平面上で行った。

電子の飛跡シミュレーションは、 $600\mu\text{m}$ の高さに $10\mu\text{m}$ 間隔で電子を初期配置し行った。その結果を図 4.5 に示す。陽イオンについては、電子雪崩で生成されるものが大半であるため、初期配置場所はアノードの直上とした。アノードピクセルを中心に $160\mu\text{m}$ の範囲に $4\mu\text{m}$ 間隔で陽イオンを配置し、その飛跡をシミュレーションした。その結果を図 4.6 に示す。

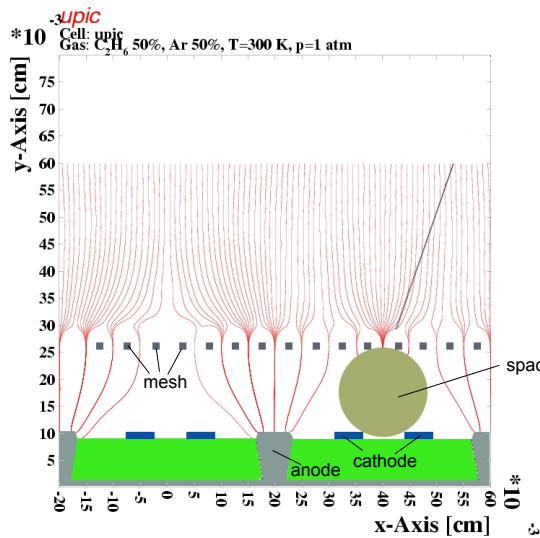


図 4.5: ドリフト電子の飛跡

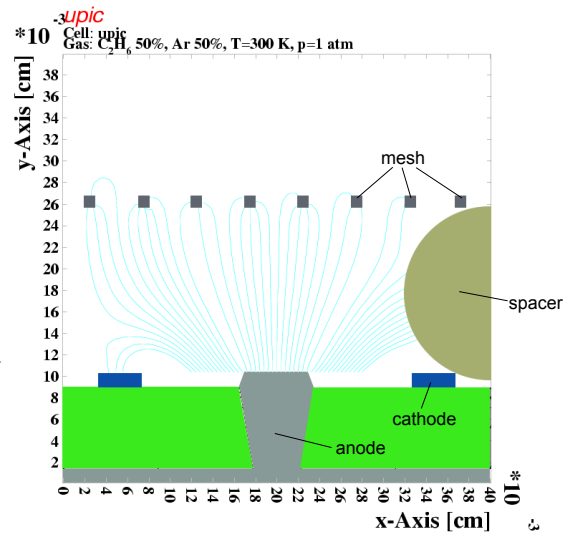


図 4.6: 陽イオンの飛跡

電子、陽イオンがスペーサーに吸収される形の電気力線が見て取れる。

4.3 考察

まず実験結果から、その考察を述べる。カソードch別の増幅率では、スペーサーに接しているchにおいてのみ増幅率の低下が見られる。表面検査の画像を確認しても、スペーサーはおおよそカソードストリップに添った形で配置できており、アノードにはかかっていない。このことから、スペーサーをカソードストリップに沿って配置しても、増幅率に影響を与えることが確認できた。

電子や陽イオンの飛跡シミュレーションにおいても、それと矛盾しない結果が得られた。ドリフト電子や電子雪崩で生成された陽イオンがスペーサーに吸収される電気力線が見られた。おそらくは、誘電体のスペーサーに対するチャージアップにより電場構造が変化し、電子や陽イオンのアノードピクセル、カソードストリップへの収集が妨げられているのであろう。

メッシュ付き $\mu\text{-pic}$ の研究目的の一つである、MIP 粒子の飛跡検出には 2×10^4 以上の高増幅率が必要とされている。今回の研究結果から、配置したスペーサーの周辺chでは高増幅率が得られず、MIP 粒子の検出効率が下がることが考えられる。それを防ぐ方法として今考えているのは、大きく2つ。一つは、ドリフト電圧、アノード電圧、メッシュ電圧の最適化を行い、スペーサーに入る電気力線の本数を減らすというものである。その為に今回と同様のシミュレーションを、各パラメータを変更して行き最適値を模索していくことを考えている。そしてもう一つは、新しい形のスペーサーを考えることである。

第5章 まとめ

5.1 まとめ

10cm × 10cm の大面積の μ -pic にスペーサー、及びメッシュを可能な限り測定器としてのデッドスペースを減らす形で実装し、その影響を測定した。結果として、配置したスペーサーの両側 2ch において増幅率の低下が確認された。シミュレーション結果と併せると、電子、陽イオンの収集をスペーサーが阻害している事がその原因であることが考えられる。

5.2 今後の課題

- 本研究で行ったシミュレーションでは、2D のジオメトリを用いたため検出器の構造を完全には再現できていない。今後は Maxwell3D を用いて、同様のシミュレーションを行いより詳細な解析をしていく必要がある。同時に、スペーサーへ入る電気力線の本数が最も少なくなるドリフト、アノード、メッシュ電圧の最適値をシミュレーションを通して模索していく。
- アノード増幅率は 1ch において、二種類の印加電圧においてのみ測定を行った。今後は 10cm × 10cm のメッシュ付き μ -pic 全面に渡り、各印加電圧を様々に変えその特性を調べていく必要がある。
- 今回測定したアノードの増幅率は、3cm × 3cm のメッシュ付き μ -pic で測定されたものと比較すると低い値となっており、また放電問題に関しても比較的低いメッシュ、アノード電圧で放電する問題があるので、実測定とシミュレーションにおいてそれらの原因を究明する。

第6章 謝辞

今回の研究を進めるにあたり、適切なお指導、助言をくださった指導教官の越智敦彦助教授に深く感謝いたします。休みの日にも研究の相談にのっていただきありがたく思っております。

ミーティングにおいて適切な助言をいただきました本間先生に深く感謝いたします。

μ -pic の扱い方、データの取り方を、教えていただきました宮崎さんに深く感謝いたします。Maxwell や garfield の使い方を教えていただきました田辺さんに深く感謝いたします。 μ -pic グループの同期である岡田君には、共に課題に取り組み、またお互いに研究を進める上で非常に刺激を受けました。

最後に未熟な私をサポートしていただいた粒子物理学研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Takeshi Dohmae, Hideaki Kanoh, Tmohiro Keika, Seiji Kobayashi, Yohta Kojima, Shinji Matsuda, Kenji Moriya, Akira Tanabe, Keiichi Yoshida: 「A new MPGD design: Micro-mesh micro-pixel chamber」 Nucl.Inst.Meth.,A604,2009
- [2] 小林正治: 「メッシュ付き μ -pic の安定動作に向けた研究」, 神戸大学,2009
- [3] 三浦功、他: 「放射線計測学」 裳華房,1960
- [4] PHYSICS LETTER B - REVIEW OF PARTICLE PHYSICS -
- [5] G.Charpak et al: 「The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles」 Nucl.Instr.And Meth. 62(1968)235
- [6] 越智敦彦: 「MSGC 開発史」,MPGD 研究会,2004
- [7] A.Oed. 「Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases」 Nucl.Inst.Meth. ,A263,1988
- [8] 小石悟史: 「微細加工技術を用いた放射線検出器 μ -pic の開発」. 東京工業大学.2002
- [9] Atsuhiko Ochi,Tsutomu Nagayoshi, Satoshi Koishi,Toru Tanimori,Tomofumi Nagae,Mirei Nakamura: 「A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber」 ,Nuclear.Inst.Meth,A471,2001
- [10] F.Sauli: 「PRINCIPLES OPERATION OF MULTIWIRED PROPORTIONAL AND DRIFT CHAMBERS」,Cern Report,1977
- [11] 桂華智裕: 「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,2007
- [12] 岡村淳一: 「SLHC に向けた高頻度粒子線検出器 MicroMEGAS の試作」, 神戸大学,2008
- [13] 田辺晃: 「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,2008,

- [14] 宮崎一樹: 「Mesh 付き μ -pic の動作ガスの研究」, 神戸大学, 2009
- [15] Garifled - simulation of gaseous detectors: <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>
- [16] Maxwell3D 付属マニュアル