

2014年度修士学位論文

ATLAS アップグレードに向けた
MicroMEGAS 抵抗電極の開発

平成27年2月6日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 131S109S
氏名 竹本 強志

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

欧州原子核研究機構 (CERN) はスイスのジュネーブ郊外に位置し、2008年に世界最大の陽子・陽子衝突型の円形加速器である LHC(Large Hadron Collider) を完成させ、2010年から本格的に実験を開始している。LHCは4つの衝突点を持ち、それぞれに検出器が設置されている。その1つである ATLAS 検出器は2018年にアップグレードされ、luminosity の増加に伴い、現在の検出器では対応できなくなる。新しい検出器の一つとして、現在我々が開発している Resistive MicroMEGAS(Micro Mesh Gaseous detector) が採用されている。

MicroMEGASとはMPGD(Micro Pattern Gaseous Detector)の一種であり、1996年にY.Giomataris氏により開発された。高い位置分解能、時間分解能を持ち、ガス増幅の際に発生する陽イオンが約100nsecという短い時間に回収されるのでパイルアップに強いということが特徴としてあげられる。しかし、狭い範囲に高電場を形成しているため放電が起りやすという問題を抱えている。放電抑制のために電極に高抵抗物質を用いたのが Resistive MicroMEGASである。

本研究ではその Resistive MicroMEGAS に用いる抵抗電極の開発をした。高抵抗物質には炭素を採用しており、スパッタリングとスクリーンプリントという2種類の方法を用いて抵抗薄膜を作成した。またスクリーンプリントにはそれぞれ2種類のインクを用いているので、大きく分けて全部で3種類の薄膜を開発し、その特性などを試験した。薄膜の製法、それぞれの抵抗薄膜開発の経緯、特性試験の結果などを本論文で述べる。

目次

第 1 章	LHC と ATLAS 実験	4
1.1	LHC	4
1.2	ATLAS 実験	4
1.2.1	ATLAS 実験の目指す物理	5
1.2.2	ATLAS 検出器	5
1.3	ATLAS アップグレード	7
1.3.1	LHC アップグレードによる ATLAS 検出器への影響	8
1.3.2	ATLAS New Small Wheel アップグレード	8
第 2 章	ガス検出器	10
2.1	粒子線と物質との相互作用	10
2.1.1	荷電粒子の検出	10
2.1.2	X 線と γ 線の検出	11
2.2	ガス検出器の種類	13
2.2.1	電離箱	14
2.2.2	比例計数管	15
2.2.3	Multi Wire Proportional Chambers	15
2.2.4	Micro-Pattern Gaseous Detector	18
第 3 章	MicroMEGAS	20
3.1	MicroMEGAS の構造	20
3.2	Bulk MicroMEGAS	21
3.3	放電問題と Resistive MicroMEGAS	22
3.4	神戸大学での MicroMEGAS 開発	23
第 4 章	MicroMEGAS 抵抗電極の開発	26
4.1	抵抗電極に用いる物質	26
4.2	スパッタリング法による抵抗電極作成	27
4.2.1	スパッタリング法の概要	27
4.2.2	スパッタリングによる抵抗薄膜	28
4.2.3	XPS による薄膜の元素分析	33
4.3	スクリーンプリントによる抵抗電極作成	35
4.3.1	スクリーンプリントの概要	35
4.3.2	スクリーンプリントによる抵抗ストリップ	36

第 5 章 抵抗電極の特性試験	40
5.1 クロスカット試験	41
5.2 化学的耐性	43
5.3 屈曲試験	44
5.4 ラビング試験	45
5.4.1 アルコールによる影響	47
5.5 抵抗値の温度依存性	48
5.6 中性子照射試験	49
5.6.1 神戸大学海事科学部タンデム加速器	49
5.6.2 中性子照射による抵抗値変化	50
5.7 試験結果のまとめ	52
第 6 章 結論	53
謝辞	55
参考文献	56

第1章 LHCとATLAS実験

1.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider)はCERNの地下100mに建設された世界最大の陽子・陽子衝突型の円形加速器であり、すでに運転を終了した大型電子・陽電子衝突型シンクロトロンLEP(Large Electron Positron Collider)で用いられていたトンネル内に設置されている。陽子の質量は電子の1800倍と大きいので、加速によって生じるシンクロトロン放射によるエネルギー損失が少ない。そのため、LHCでは14[TeV]という世界最高エネルギーでの衝突を実現可能である。しかし、その反面陽子同士の衝突は構成要素であるクォーク・グルーオン同士の散乱により反応が複雑になり、また50ns間隔という高頻度で衝突が起こるため膨大なバックグラウンドが生じる。よってLHCに用いる検出器は高頻度バックグラウンドに耐えうる性能が求められ、また膨大なバックグラウンドの中から必要なイベントを選別する必要がある。

LHCは2008年に完成し、同年9月10日に最初のビーム周回に成功したが、同年9月19日にヘリウムの漏出事故により、一時稼働停止となった。その後2009年に修理が完了し、現在まで正常に稼働している。これまでの積分ルミノシティの蓄積は図1.2のとおりであり、2013年の運転では 21fb^{-1} に相当する8TeVの陽子衝突データを収集することに成功している。

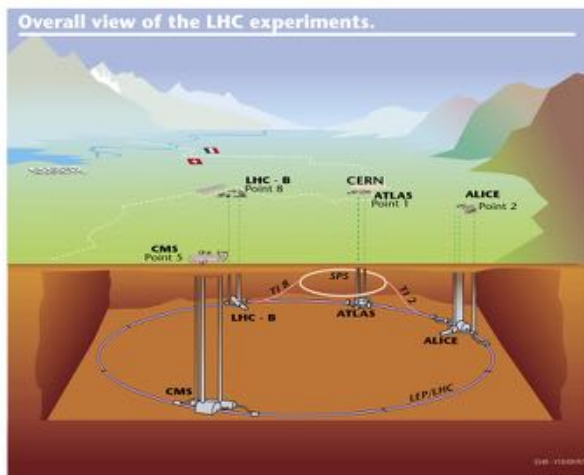


図 1.1: LHC 加速器概要 [5]

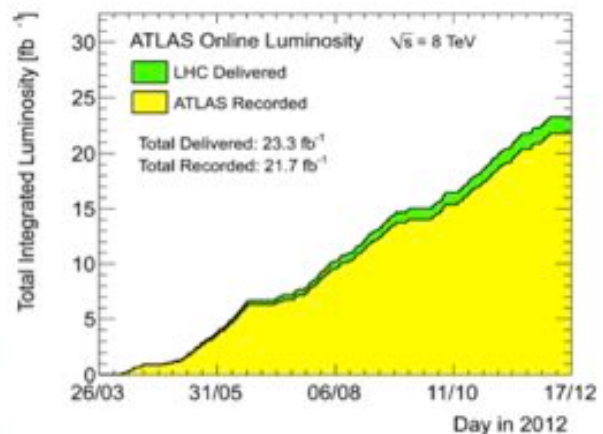


図 1.2: LHC 加速器の積分ルミノシティ [6]

1.2 ATLAS 実験

図1.1にあるように、LHCには大型汎用検出器ATLAS(A Toroidal LHC ApparaturS)、CMS(Compact Muon Solenoid)、B中間子の研究に特化したLHC-B、そして重イオン衝突研究用のALICE(A Large Collider Experiment)の4つの検出器がそれぞれ設置されている。この節では現在神戸大学が参

加している ATLAS 実験について、その目的とする物理と検出器について述べる。検出器については本研究テーマに深く関わりのあるミュオンスペクトロメーターについて詳細に説明することとする。

1.2.1 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験では主に標準模型 Higgs 粒子及び超対称性粒子の発見を目的としていたが、標準模型 Higgs 粒子に関しては 2012 年 7 月 4 日に約 5σ の精度をもって発見されたため、現在は発見された Higgs 粒子の詳細な性質が標準模型で予言されているものと合致しているかの検証を目的としている。標準模型ではゲージ対称性が成立するとされるが、このとき相互作用の媒体となるゲージ粒子の質量は厳密にゼロとなることが要求されている。この問題は Higgs 機構のスピンゼロのスカラー粒子 (Higgs 粒子) の存在を仮定することで解決される。また、Higgs 粒子自体も質量を持ち、この値は ATLAS 検出器によって $126.0\text{GeV}/c^2$ (統計誤差 ± 0.4 , 系統誤差 ± 0.4 , 標準偏差 5.9) と判明した。[7]

1.2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は直径 22m, 全長 4m, 総重量 7000t の汎用検出器である。図 1.3 に ATLAS 検出器の全体図を示す。ATLAS 検出器における座標系はビーム軸を Z 軸、これらに垂直な方向を r 方向、ビーム軸周りを周回する方向を ϕ とした円筒座標系で表される。また、衝突点から引いた線とビーム軸の成す角を θ とし、擬ラピディティ (pseud rapidity) $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ と定義する。

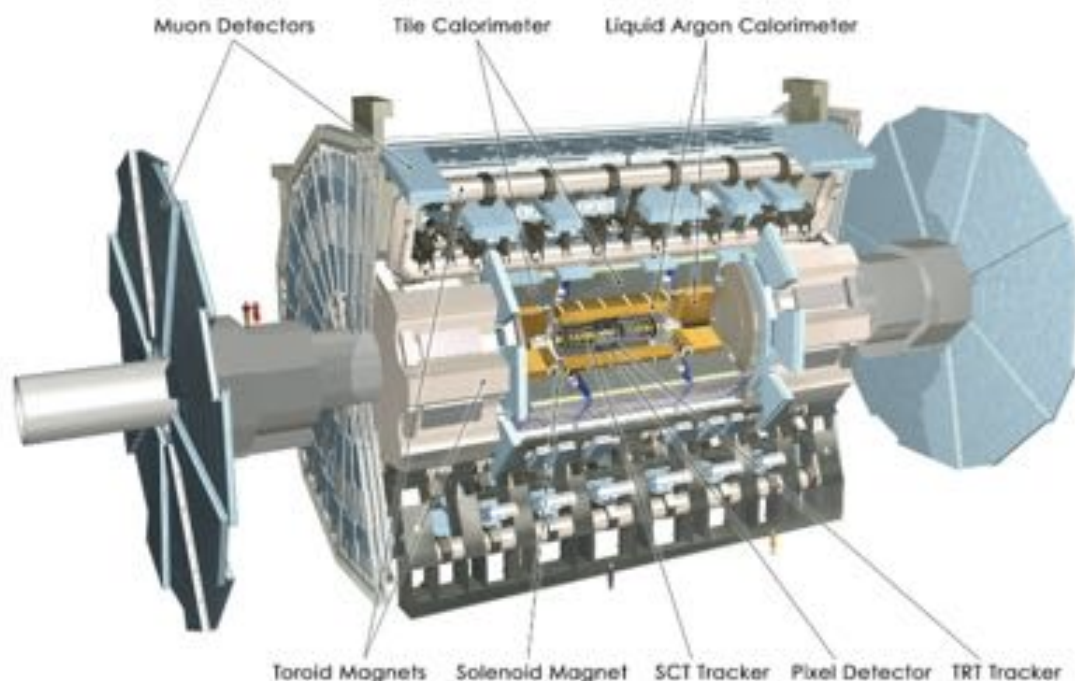


図 1.3: ATLAS 検出器全体図 [8]

ATLAS 検出器では $|\eta| < 1$ の円筒外側部分をバレル部 (シリンダー状の部分)、 $|\eta| < 1$ の円筒内側部分をエンドキャップ部 (ディスク状の部分) と呼んでいて、さらにその中でも $1 < |\eta| < 1.9$ の部分を Endcap、 $1.9 < |\eta|$ の部分を Forward と呼び分けている。また、エンドキャップの内、内側の Endcap Inner (EI) と Forward Inner (FI) をまとめて Small Wheel (SW)、外側の M1、M2 (middle)、M3 (pivot) をまとめて Big Wheel (BW) と呼ぶ。

検出器内にはマグネットが設置されており、中央のソレノイド磁石と、バレル部及びエンドキャップ部のそれぞれのトロイダル磁石で構成される。バレル部とエンドキャップ部には合計 8 個のコイルがあり、ビーム軸に対して 8 回対称になるように設置されている。積分磁場強度はバレル部で 2~6 Tm、エンドキャップ部で 4~8 Tm である。

また、ATLAS 検出器は主に 3 つの部分からなっており、内側から内部飛跡検出器 (鉛、液体アルゴン)、カロリメータ (鉄+シンチレータ、銅+液体アルゴン、タングステン+液体アルゴン)、ミュオンスペクトロメータが設置されている。以下より順に説明する。

内部飛跡検出器

検出器の最内部において飛跡の再構成をするのが内部飛跡検出器であり、反応点測定、荷電粒子の飛跡及び運動量の測定、b-tagging、光子・電子の同定を行う。図 1.4 はバレル部内部飛跡検出器の概略図である。

内部飛跡検出器は 3 種類の検出器で構成されていて、半導体検出器であるピクセル検出器および Semi-Conductor Tracker (SCT) により運動量、衝突パラメータ、vertex の位置測定を行い、遷移放射検出器である Transition Radiation Tracker (TRT) により光子・電子の同定と飛跡検出を行う。これらの検出器はビーム軸に最も近いことから放射線耐性が重大な問題となる。

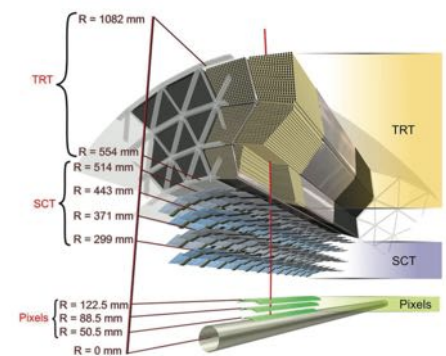


図 1.4: 内部飛跡検出器 [8]

カロリメータ

図 1.5 にカロリメータの概略図を示す。カロリメータは内部飛跡検出器の外側において粒子のエネルギーや放出角度を測定する検出器であり、用途に合わせて二種類設置されている。光子・電子のためには LAr を使用した電磁カロリメータが使用されており、バレル電磁カロリメータは $|\eta| < 1.48$ を、エンドキャップ電磁カロリメータは $1.38 < |\eta| < 3.2$ をそれぞれカバーする。ジェット検出のためにはハドロンカロリメータが持ちいられており、 $|\eta| < 1.7$ の範囲には鉄の吸収体とタイル状のシンチレータが交互に重なった構造を持ったタイルカロリメータが、 $1.5 < |\eta| < 3.2$ の範囲には銅の吸収体と液体アルゴンで構成された Hadronic Endcap Calorimeter (HEC) がそれぞれ使用されている。

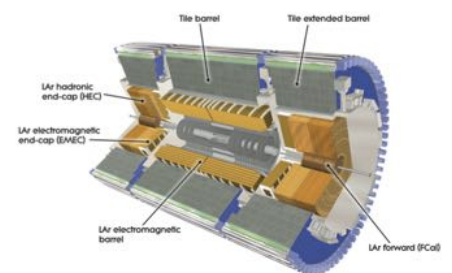


図 1.5: カロリメータ [8]

ミュオンスペクトロメータ

LHCで測定される重要な物理事象のほとんどが終状態に荷電レプトンを持つ。その中でもミュオンは $2.2\mu\text{sec}$ と寿命が比較的長く、透過力も高いことから高いS/N比で検出することが可能である。よって、ミュオンスペクトロメータの設計思想は内部飛跡検出器とは独立に、方位角の広い範囲にわたってトリガーやミュオンの運動量を精度よく行うことである。

ミュオンスペクトロメータはATLAS検出器の最も外側に設置されている。図1.6はミュオンスペクトロメータの概略図である。バレル部、エンドキャップ部における運動量測定はMonitored Drift Tube(MDT)により行われる。MDTは直径30mm、内圧3~4気圧のアルミニウム製ドリフトチューブで、高頻度で入射する粒子による空間電荷の効果を抑制するためにガス増幅率は低く設定されてある。相互作用点付近 ($|\eta| \geq 2.0$)より精度の良いCathode Strip Chamber(CSC)で運動量が測定される。また、ミュオントリガーとしてバレル部にResistive Plate Chamber(RPC)、エンドキャップ部にThin Gap Chamber(TGC)がそれぞれ設置される。RPCは1層あたりの構造が二重構造となっており、MDTを挟んで3層から成っていて、時間分解能は1nsec程度である。TGCはワイヤー検出器で、ワイヤーと垂直にストリップが張られている。このストリップにより2次元読み出しを行う。TGCは1層あたりの構造が2層構造であるものが2組と、3層構造であるもの1組からなりMDTを挟んで設置される。時間分解能は4nsec程度である。この第2座標を測定することにより、トリガー段階で物理事象とバックグラウンドを効率良く分けることが可能である。

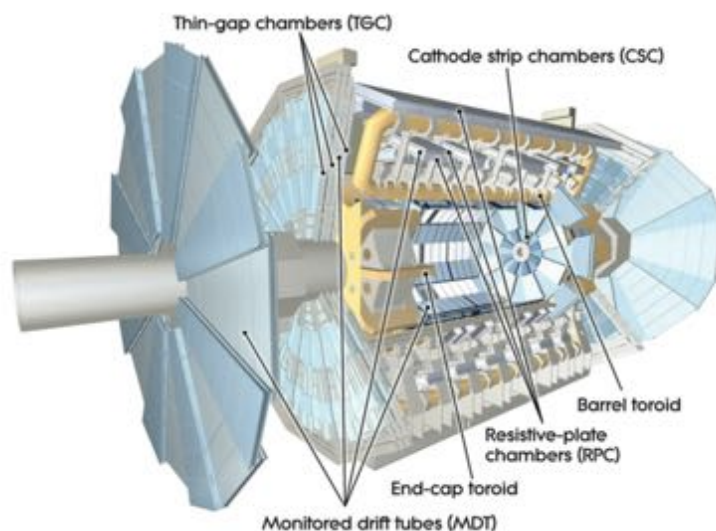


図 1.6: ミュオンスペクトロメータ [8]

1.3 ATLAS アップグレード

TeV スケールの物理事象の統計数を増やすため、デザインルミノシティを上げるためのLHCアップグレードが計画されており、それに伴うATLASのアップグレードも予定されている。本節ではLHCアップグレードによるATLAS検出器への影響、ATLAS New Small Wheel(NSW)のアップグレードについて述べる。

1.3.1 LHC アップグレードによる ATLAS 検出器への影響

現在の LHC はビームエネルギーが 4.0TeV、最高ルミノシティが $8.8 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるが、アップグレード後にはビームエネルギーが 7.0TeV、最高ルミノシティが $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ になる予定である。LHC アップグレードは Phase0, Phase1, Phase2 と段階的に行い、徐々に最高ルミノシティを高めていく。2022 年のアップグレードでは $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を実現し、2030 年までに 3000fb^{-1} をためることを目標としている。LHC のアップグレードによるルミノシティの増加によって、25nsec 毎に起こる 1 回のバンチ衝突あたりのイベントレートが増加する。図 1.7 シミュレーションによるもので、 $L = 2 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の時と、 $L = 2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の時の衝突の様子である。

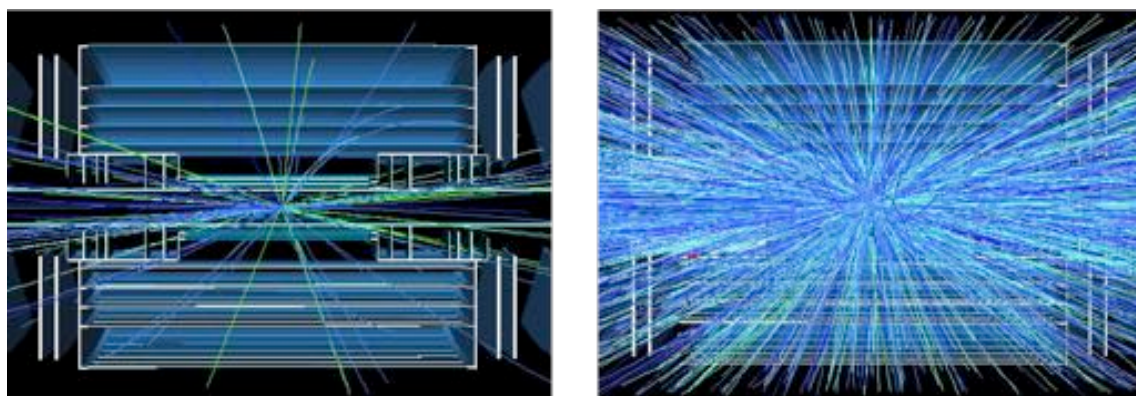


図 1.7: ATLAS での陽子陽子衝突によって生成された粒子の軌跡 (シミュレーション)、左: $L = 2 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、右: $L = 2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [10]

1 回のバンチ衝突あたりのイベントレートの増加に伴い、バックグラウンドも増加するため、現在使用されていない SW 部分をトリガーに用いることが検討されている。しかし、Phase2 での LHC アップグレード後の最高ルミノシティは約 $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、SW への生成粒子入射頻度は 1kHz/cm^2 と予想され、現状の SW では十分な検出効率を得られないという問題がある。そのため、SW ではあらたなミュオン検出器が必要であり、その内容を次小節で説明する。

1.3.2 ATLAS New Small Wheel アップグレード

ルミノシティの増加に伴い、ヒットレートが上昇し、SW に設置されている MDT, CSC の検出効率が低下する。このため、現在の SW にとって変わり、新たに New Small Wheel(NSW) を導入することが決定している。図 1.8 は NSW のカバーする領域を表していて、 $1.2 < |\eta| < 2.4$ をカバーし ϕ 方向に 16 分割して設置されることが決まっている。

NSW に用いられるあらたな検出器に求められる性能は以下の通りである。[11]

- 入射粒子のレート耐性が 20kHz/cm^2 より大きい
- 検出 Efficiency が 98%以上
- ビーム入射角 45° 以下での位置分解能が $100 \mu\text{m}$ 以下
- 時間分解能が約 5nsec(バンチの識別が可能である程度)

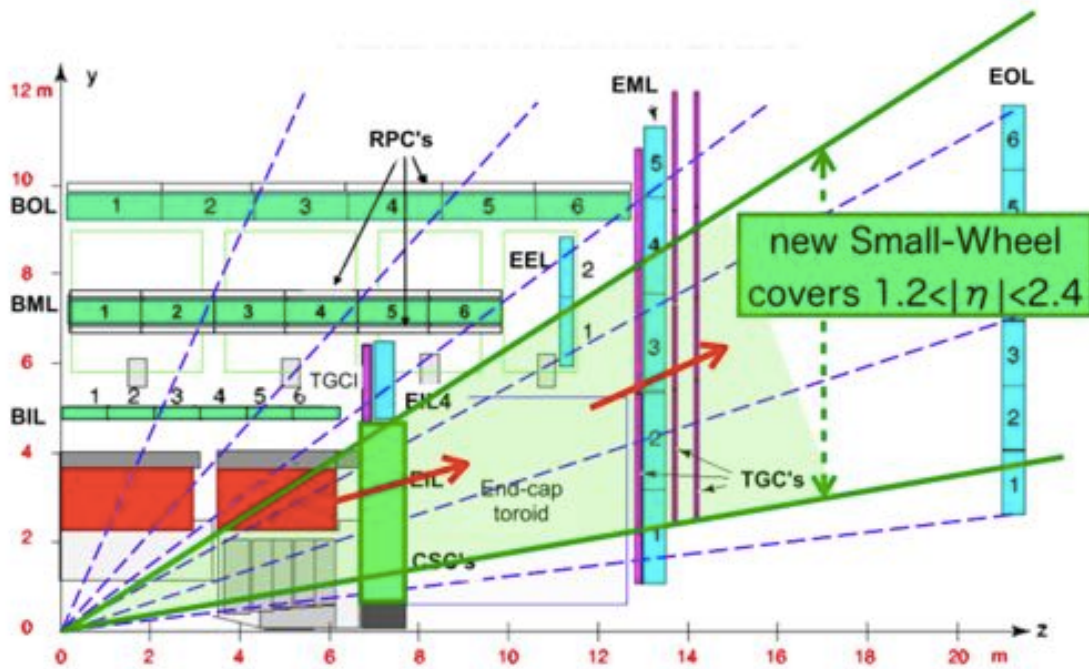


図 1.8: NSW のカバーする領域 [9]

これらの要求を満たせる検出器として、アップグレード後の NSW には MicroMEGAS と TGC が採用されている。また、ATLAS などのハドロン衝突型の実験においては、数 MeV のエネルギーを持つ高速中性子のバックグラウンドによる放電が原因となり、放電によって検出器の電極破壊、読み出しエレクトロニクスの損傷、デッドラインを生じるなどという問題が発生する。高速中性子は検出器内の物質と反応し、反跳原子核を叩き出す。このような反跳原子核はガス中で大きなエネルギーを失い、大量の電子を生成する。現在神戸大学で開発中の MicroMEGAS などのガス検出器は、電子を増幅するために高電圧を形成しており、電子数が $10^7 \sim 10^8$ (Reather Limit) に達すると電極間で放電が生じる。第 3 章で詳しく述べるが、それを抑制するための抵抗電極の開発が本研究のメインテーマである。

第2章 ガス検出器

2.1 粒子線と物質との相互作用

粒子線を観察しようとするとき、検出の物理過程は中性粒子と荷電粒子とは異なったものとなる。それぞれについて次小節からそれぞれ順に述べる。

2.1.1 荷電粒子の検出

荷電粒子の場合、入射粒子がガス中を通過するとガス原子と連続的にクーロン相互作用を起こし、飛跡に沿ってガス原子を電離していくことでエネルギーを失っていく。この過程で生成された電子イオン対はお互いのクーロン力により再結合しようとするが、電場をかけることで再結合を抑制し、電子を収集することが検出器の基本である。

入射荷電粒子が物質中で失うエネルギーは下記の Bethe-Bloch の式 2.1 で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z_e^2}{m_0 v^2} NB \quad (2.1)$$

ここで、

$$B \equiv Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.2)$$

c , m_0 , e はそれぞれ光速、電子の静止質量、電気素量、 E , z_e , v , x は入射粒子のエネルギー、電荷、速度、移動距離、 Z , N , I は物質の原子番号、単位体積あたりの原子個数、実行電離ポテンシャルを表す。吸収物質が銅の場合の μ^+ のエネルギー損失のグラフを図 2.1 に示す。 $\beta\gamma$ が ~ 1000 のあたりで単位長さあたりに失うエネルギーが非常に小さくなっていることがわかる。この辺りのエネルギーを持つ粒子を Minimum Ionization particle (MIP) といい、ATLAS 実験のミュオン検出器が観測すべき粒子は GeV オーダーのエネルギーを持つためこの MIP にあたる。このような粒子を検出する場合、電離による電子が少なく信号が小さくなるため、電子を増幅させて大きな信号に変換する必要がある。MIP 検出器として要求される増幅率は 10^4 以上と言われている。また、これはミュオンでの電離エネルギーを表したもので、電子の電離エネルギーはまた異なってくる。これは電子が分子中の電子とクーロン散乱を起こし、シンクロトロン放射を起こしやすいためミュオンよりも電離エネルギーは大きい。

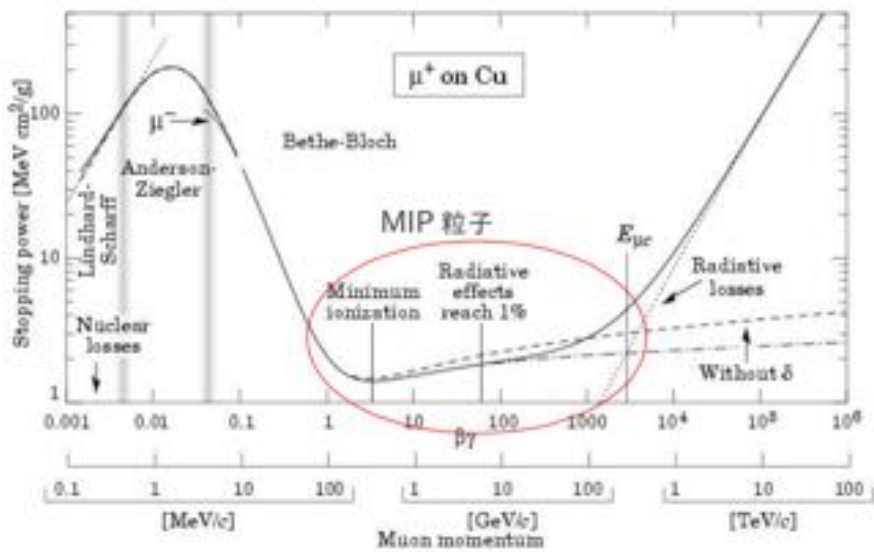


図 2.1: Bethe-Bloch の式によるエネルギー損失 [13]

2.1.2 X線と γ 線の検出

X線および γ 線の場合、電磁波であり物質との相互作用は弱く物質中をよく透過する。光子と物質の相互作用は光電効果、コンプトン散乱、対生成の3種である。これらの相互作用の断面積は粒子線のエネルギーと物質の原子番号 Z に依存する。図2.2は1気圧、 $Ar + C_2H_6(10\%)$ 中での各相互作用の断面積を表し、図2.3はどのエネルギーでどの相互作用が優位かを示している。

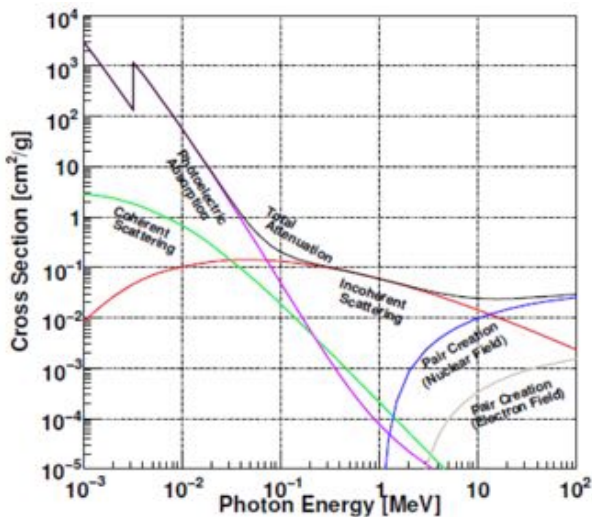


図 2.2: γ 線と物質との相互作用 [14]

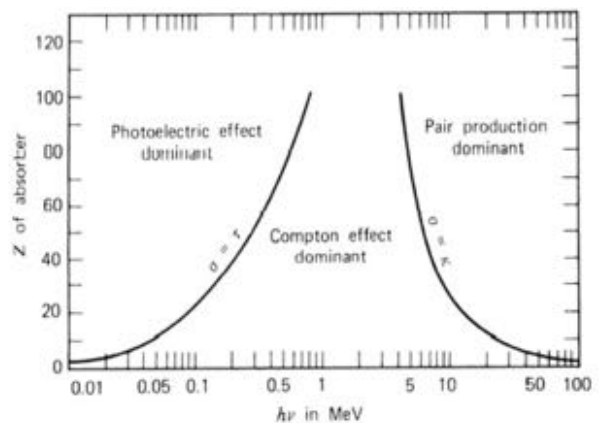


図 2.3: γ 線と物質の優位な相互作用 [17]

光電効果

図 2.4 のように光子が全エネルギー $h\nu$ を軌道電子に与え、光電子に変換される反応である。仮想光子を介して原子核と反応するため原子核に最も近い最内殻の電子と反応しやすい。原子核からはじき出される電子のエネルギーは T は γ 線のエネルギー $h\nu$ から電子の束縛エネルギー I を引いた値 $T = h\nu - I$ となる。また、電子が飛び出した後の電子は励起状態となり、高いエネルギー準位にある電子が空になった準位に落ちて基底状態になるとき、その順位間のエネルギー差のエネルギーを持つ特性 X 線が放出される。光電効果の起こる確率は原子核番号 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散乱や電子対生成に優先するのは図 2.2 の通り比較的低エネルギーの低い領域で、例えば Al なら 50keV 以下、Pb なら 500keV 以下の領域である。

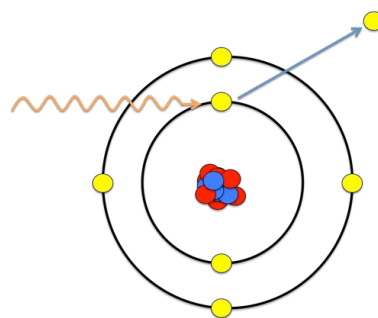


図 2.4: 光電効果

コンプトン散乱

光子が物質中の電子と弾性散乱をして γ 線のエネルギーの一部が電子に与えられる反応である。図 2.5 にコンプトン散乱の概略図を示す。電子が最初静止していたとした時、散乱前後の γ 線のエネルギーをそれぞれ $h\nu, (h\nu)'$ とすると、 γ 線の散乱角 θ と散乱後の γ 線のエネルギーの関係式は以下ようになる。

$$(h\nu)' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta)h\nu} \quad (2.3)$$

また、反跳電子のエネルギー T は

$$T = h\nu \frac{(1 - \cos\theta)h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta)h\nu} \quad (2.4)$$

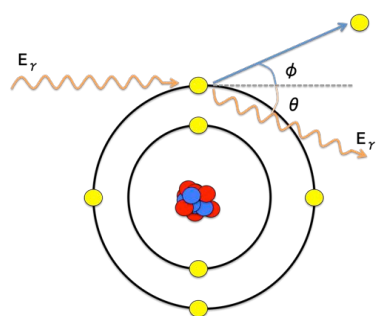


図 2.5: コンプトン散乱

となる。

コンプトン散乱の起こる確率は原子番号 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 の場合 $0.5\text{MeV} < h\nu < 5\text{MeV}$ である。

対生成

光子が物質中の電磁場 (主に原子核によるクーロン場) との相互作用により光子が消失し、そのエネルギーを分かち合った電子・陽電子対が生成される反応のこと。この反応は光子のエネルギーが電子の静止エネルギー $m_e c^2$ の二倍以上になった時にのみ起こりうる。対生成の概略図を図 2.6 に示す。

電子または陽電子が持つエネルギー E は γ 線のエネルギー $h\nu$ から電子・陽電子の静止質量 $2m_e c^2$ を差し引いた値 $E = h\nu - 2m_e c^2$ となり、エネルギー E を持つ確率はほぼ E に反比例して小さくな

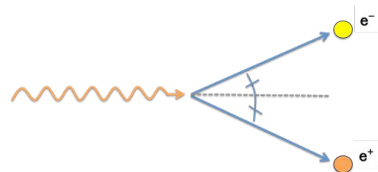


図 2.6: 電子対生成

る。また、対生成の起こる確率は原子番号 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、やがれ物質中の電子と対消滅し $(h\nu)' = m_e c^2 = 510keV$ の 2 個または 3 個の光子を放出する。

2.2 ガス検出器の種類

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。その基本的な検出過程は以下の通りである。

1. 動作ガスを満たしたチェンバー内に入射した粒子がガス物質との相互作用により種電子を生じる
2. 印加電圧によって生じた電場により電子が陽極へとドリフトされる
3. ドリフトしてきた自由電子は高い電場を持つ領域で増幅され、これを検出する

また、このときかける電場の強さによって電子の増幅率に違いがあり、大きく分けて以下の 4 つの領域に分けられる。

電離飽和領域 (Ion Saturation Region)

極めて低い電圧においては、最初のイオン対を収集する前に再結合してしまい、全てを収集することができない。電圧を上げていき、全てを収集できるようになった状態を指す。この領域で電離箱を動作させる。

比例計数領域 (Proportional Region)

($Gain < 10^6$) : 一次電離 (種電子) に比例した出力をする。この領域で比例計数管や Multi Wire Proportional Chambers(MWPC) などのほとんどの wire chamber を動かす。

限定比例領域 (Limited Proportional Region)

($10^6 < Gain < 10^8$) : 増幅過程で生じる紫外線によるイオンかが無視できなくなり、比例関係は崩れる。

ガイガーミュラー作動領域 (Geiger Mueller Region)

($10^8 < Gain < 10^{10}$) : 紫外線が検出器全体に広がり、一次電離に関係なく一定の出力をする。この領域で Geiger Muleler 計数管が使われる。

本節では簡単にこれまで高エネルギー物理学で用いられてきたガス検出器を紹介する。

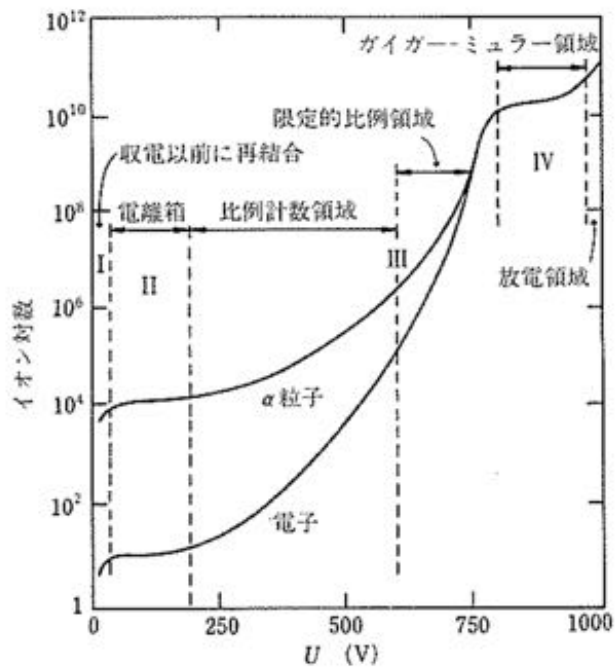


図 2.7: ガス増幅領域 [12]

2.2.1 電離箱

電離箱は通過する荷電粒子によって生じた電離の量を測定する。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、動作ガスで満たされている。図2.8に最も簡単な電離箱の構造を示す。2枚の平衡な電極板間にArなどの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が可能であるが個々の粒子線を測定することができない。

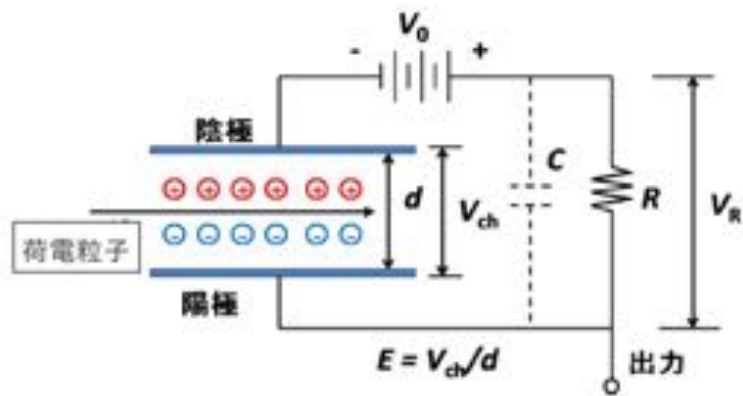


図 2.8: 電離箱 [16]

2.2.2 比例計数管

この小節では比例計数管とともにガス増幅を用いた検出器の説明をする。比例計数管は図 2.9 のような陽極のワイヤーを陰極の円筒が囲んだ構造をしていて、内部は Ar と C_2H_6 などの混合ガスで満たされている。

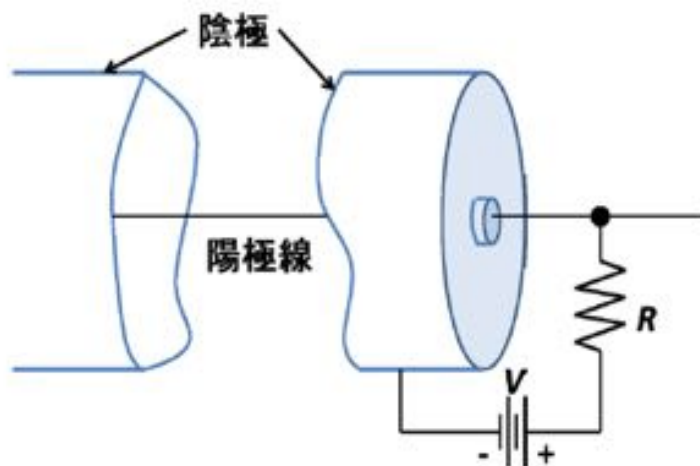


図 2.9: 比例計数管 [16]

比例計数管の内部電場は陽極ワイヤーの半径を a 、陰極の円筒の半径を b 、印加電圧を V とした時に式 2.5 のようになる。

$$E(r) = \frac{V}{r \times \ln(b/a)} \quad (2.5)$$

ここで r は半径方向の位置である。この式からワイヤー近傍の電場が非常に強くなっていることがわかる。この高電場によりガス増幅が起こりそれを信号として読み出す。

2.2.3 Multi Wire Proportional Chambers

Multi Wire Proportional Chambers(MWPC) は一つのチェンバー内に多数のワイヤーを張った構造をしていて、60 年代後半に Charpak らによって開発された [18]。図 2.10 に MWPC の電気力線の構造を示す。高いガスゲインや位置分解能を持つが、高頻度の粒子線が入射すると電子雪崩の時に生じるイオンが大量に発生し電場の歪みが生じる。この電場の歪みは図 2.11 に見られるようなゲインの減少や位置精度の悪化を招く。この入射許容量は陽極ワイヤーのピッチを小さくすれば改善できるが、ワイヤー同士の静電反発が起きるので限界がある。

現在、ATLAS SW には MWPC の一種である TGC と MDT がインストールされているのでそれぞれ順に紹介する。

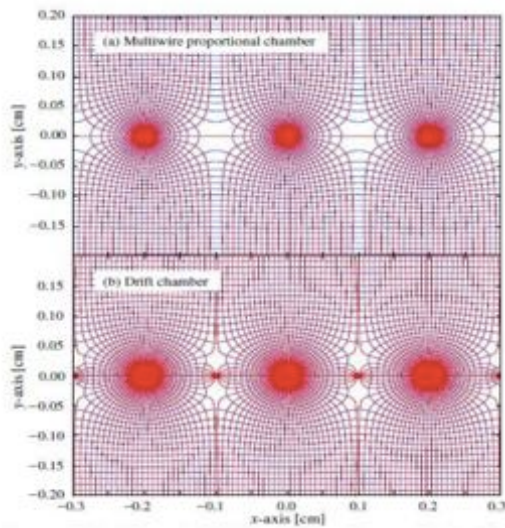


図 2.10: MWPC の電気力線 [18]

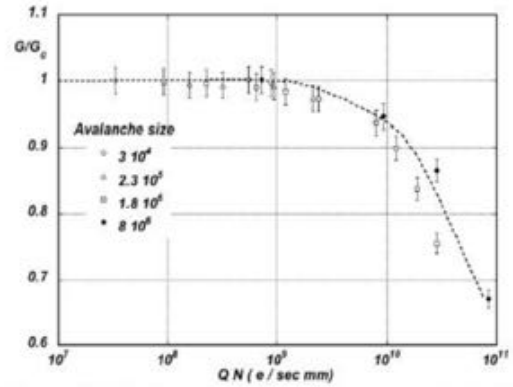


図 2.11: 高頻度の入射粒子によるゲインの減少 [18]

Thin Gap Chamber

MWPC の一種である Thin Gap Chamber(TGC) は現在 ATLAS 検出器のミュオンスペクトロメータのトリガー検出器に採用されている [19]。TGC の概略図を図 2.12 に示す。二枚の平行陰極板(カソードストリップ)に対し、等間隔に並んだ陽極ワイヤーが配置された構造になっている。ワイヤーとカソードストリップ間の間隔が 1.4mm、ワイヤー同士の間隔が 1.8mm と狭くとられているのは電子のドリフト時間を短くし、陽イオンのドリフト距離を短くするためであり、このようにすることによって高頻度の入射粒子に対しても検出効率を落とさないようにすることが可能である。

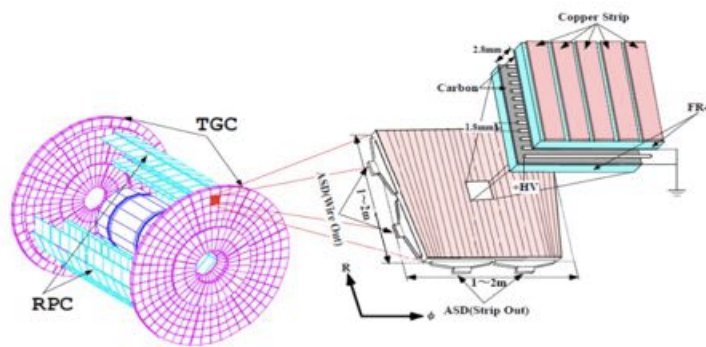


図 2.12: ATLAS TGC の概略図 [19]

Monitord Drift Tube

Monitord Drift Tube(MDT) は ATLAS 検出器のバレル部、エンドキャップ部の広い領域をカバーしており、R-Z 方向の成分を精密に測定できる [20]。MDT の概略図を図 2.13 に示す。チューブ径 30mm、ワイヤー径 $50\mu\text{m}$ のドリフトチューブを正確に積層した構造となっており、位置をドリフト時間と信号の大きさから求めている。

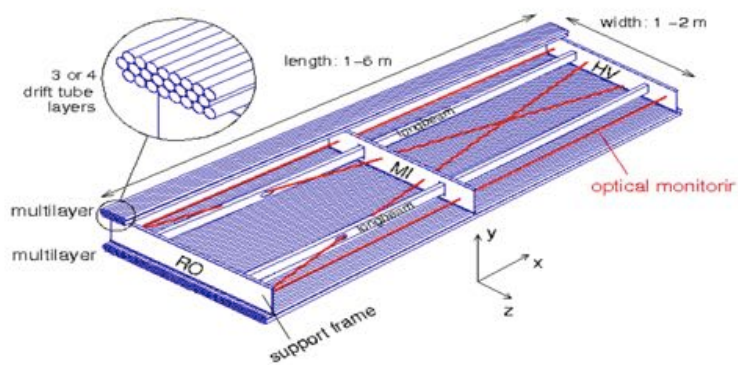


図 2.13: ATLAS MDT の概略図 [20]

2.2.4 Micro-Pattern Gaseous Detector

Micro-Pattern Gaseous Detector(MPGD)とはエッチングやメッキなどのプリント基板(PCB)技術を用いて制作された高い位置分解能をもつ検出器の総称である。MWPCなどのワイヤー型検出器は前述の通り位置分解能、計数率に限界があった。またワイヤーを張る作業が非常に困難であり、量産にも不向きであった。これらの改善策として近年様々なMPGDの開発がなされており、現在神戸大学で開発を行っているMicroMEGAS, μ -PIC、GEMもMPGDの一種である。この小節では代表的なMPGDを紹介するが、本研究のテーマであるMicroMEGASについては次章で詳しく説明する。

Gas Electron Multiplier

Gas Electron Multiplier(GEM)は1997年にF.Sauliらにより考案された[21]。50 μm 程度の厚みのポリイミドまたは液晶ポリマーのフィルムを銅でコーティングし、直径70 μm 程度の穴を無数に開けた構造であり、両面の銅薄膜を電極として用いる。電極間には300V程度の電圧を印加することで穴の中に高電場を形成し、ガス増幅を行う。複数のGEMを重ねて用いることで1枚のGEMに負担をかけることなく 10^4 以上のゲインが得られる。GEMの下方に読み出しパッドを置くことで、増幅した電子を信号として得ることができる。

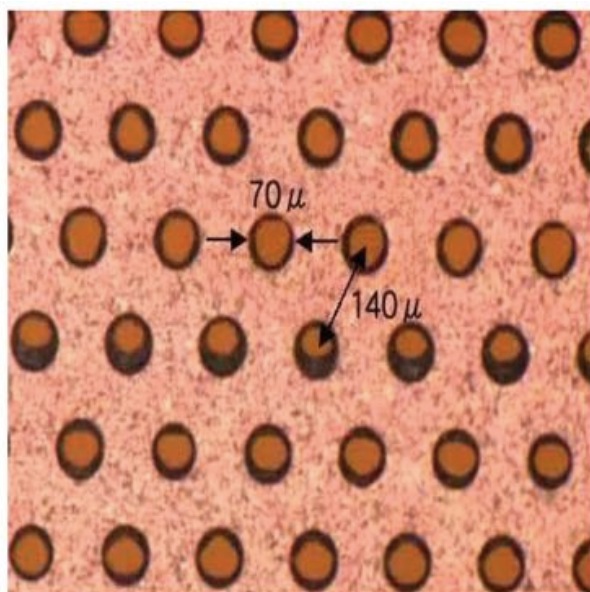


図 2.14: GEM の表面

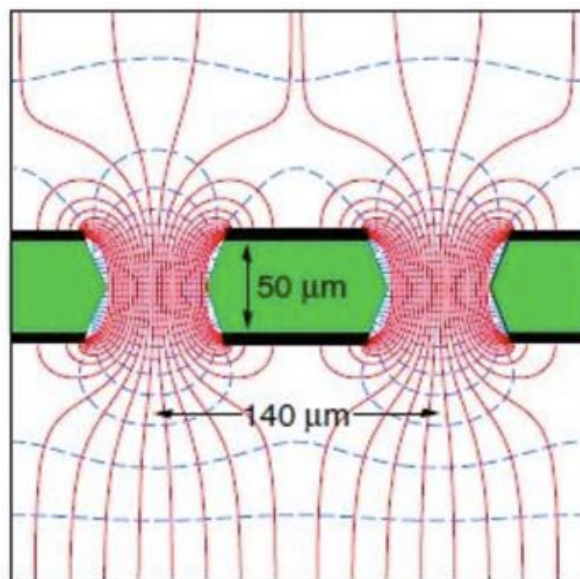


図 2.15: GEM の電気力線 [22]

Micro Pixel Chamber

Micro Pixel Chamber(μ -PIC)は2001年に越智氏、谷森氏により考案された検出器であり、図2.16のようにアノード電極が直径50 μm のピクセル状に配置され、その周りをカソードストリップが直径250 μm の穴で囲むような構造になっている[23]。両電極ともピッチ間隔は400 μm であり、アノードとカソードによる二次元読み出しが可能である。アノードは下部絶縁層部分を貫き、裏面のストリップでつながっている。両電極の3~10mm上方にはドリフト電極が設置されて

おり、動作時にはドリフトメッシュに負の電圧、アノードに正の電圧を印加し、カソードをグラウンドに接続する。入射粒子によって発生した種電子はドリフト電場によってアノード方向に移動し、アノード付近の高電場によって増幅され、誘起電荷による信号を読み出すことができる。

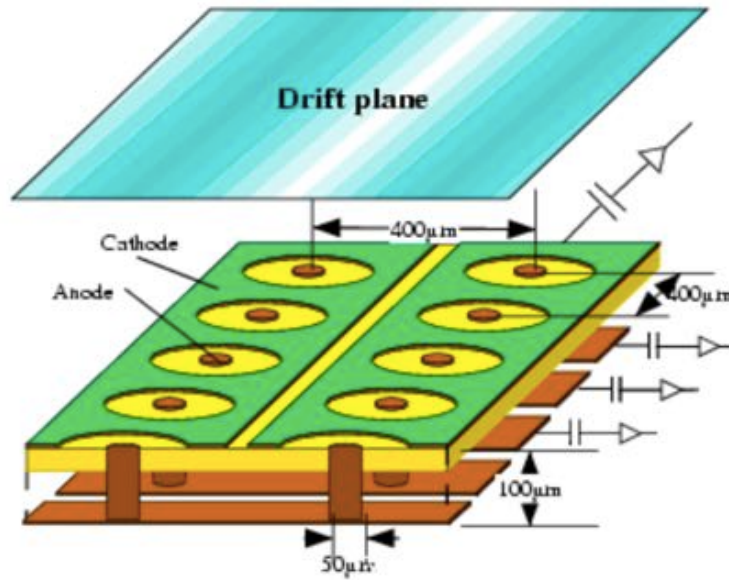


図 2.16: μ -PIC の構造図 [23]

第3章 MicroMEGAS

MicroMEGAS(MicroMEsh GAseous detector) はMPGDの一種であり、1996年にY.Giomataris氏により開発された [24]。高い位置分解能および時間分解能を持ち、ガス増幅の際に発生する陽イオンが約100nsecという短い時間に回収されるのでパイルアップに強いということが特徴としてあげられる。そのことから、MicroMEGASは上述のATLAS NSWのアップグレードに用いる新たな検出器として採用されており、CERN ATLASのMAMMA(Muon ATLAS MicroMEGAS Activity)グループを中心に開発を進めている。本章ではMicroMEGASの基本的な構造と、放電問題について述べる。

3.1 MicroMEGASの構造

まず、1996年当初に発案されたMicroMEGASの基本的な構造とその検出原理について説明する。図3.1および図3.2がMicroMEGASの基本的な構造の概要である。アノードストリップには金コートした $5\mu\text{m}$ 、幅 $150\mu\text{m}$ の銅ストリップが用いられ、暑さ 1mm のポリイミドの上に $200\mu\text{m}$ ピッチで並んでいる。この $128\mu\text{m}$ 上部に増幅のためのMicromesh($50\mu\text{m}$ ピッチ)が設置され、さらに 3mm 上部にドリフト電極が設置されている。

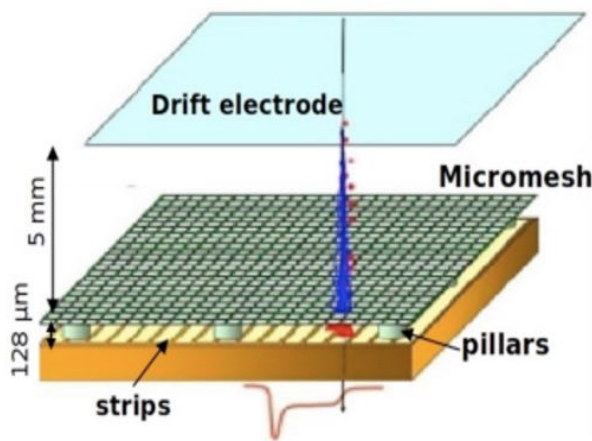


図 3.1: MicroMEGAS 概要図 [24]

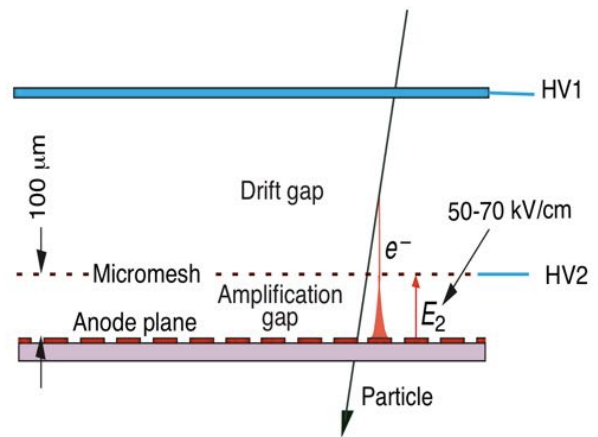


図 3.2: MicroMEGAS 断面図 [25]

マイクロメッシュに負の電圧、ドリフト電極に高電圧を印加することでドリフト電極-メッシュ間のドリフト領域に電場を形成し、入射粒子によって生成される種電子をアノードストリップの方向に移動させる。また、アノードストリップはプリアンプを介してグラウンドに接続されており、メッシュ～ストリップ電極間の増幅領域に高電場を形成する。この増幅領域で種電子が増幅され、プリアンプによって電圧信号として粒子を検出できる。図 3.3 はメッシュ付近の電場構造を計算したものである。種電子を十分に透過し、ドリフト領域へのイオンエスケープを抑えるには増幅領域の電場強度をドリフト領域のもの 5 倍以上にしなければならない。

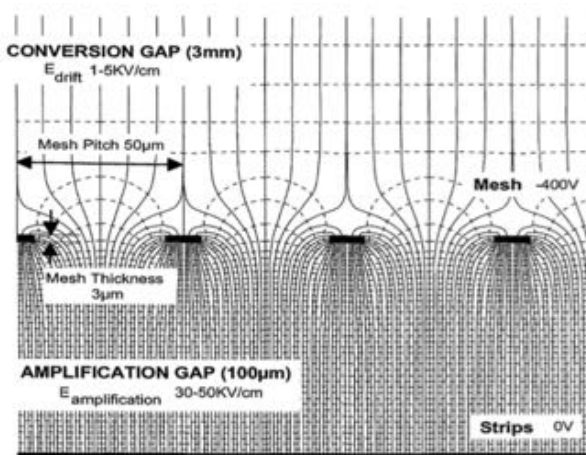


図 3.3: MicroMEGAS のメッシュ近傍の電場構造 [28]

3.2 Bulk MicroMEGAS

Bulk MicroMEGAS とは LHC などの大型加速器実験にむけ、大面積に適したメッシュ構造の製法であり、2006 年に提案された [26]。その製法は、Anode strip 上にフォトレジストフィルムを重ねてメッシュを固定し、高温で焼き固めフォトリソグラフィック法によるエッチングによってピラー構造を作成するものである。この製法によってストリップ～メッシュ間の間隔を一定に保つためのピラー構造を容易に作成することが可能になり、大面積の MicroMEGAS を開発する上での大きな進歩となった。図 3.4 に Bulk MicroMEGAS の外観図、図 3.5 に Bulk MicroMEGAS 製法によるピラー構造を示す。

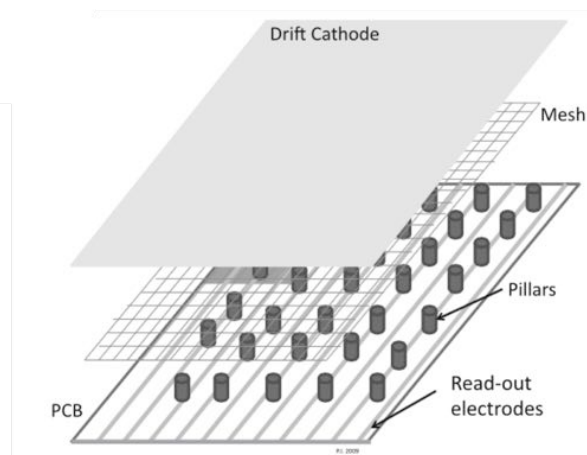


図 3.4: Bulk MicroMEGAS の外観図 [26]

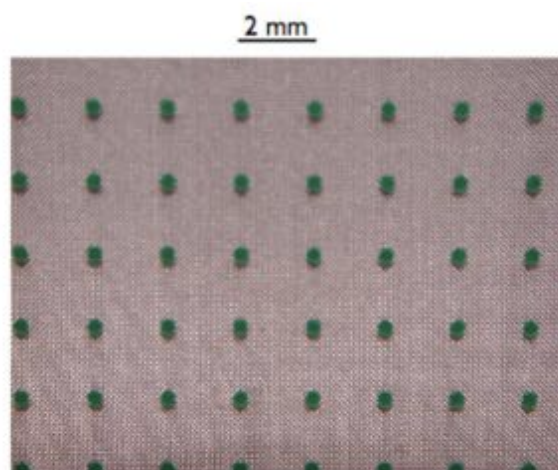


図 3.5: Bulk MicroMEGAS のピラー構造 [29]

3.3 放電問題と Resistive MicroMEGAS

ガス検出器における放電はガス中の局所的な電子数で決まる。電子雪崩を起こしたあとの総電子数が $10^7 \sim 10^8$ (Reather Limit) を越えると電極間の放電が起き始める。よって、放電が起きやすいのは、MicroMEGAS を高増幅率で動作させた時、そしてガス中に大きなエネルギーを落とす放射線が入射し、大量の電子が生成されたときである。中性子は物質と確率的な反応をするため、チェンバー内のガス原子核と弾き飛ばし、これによって生成された班長原子核はガス中において短距離で大きなエネルギーを失い、大量の電子を生成する。ATLAS などのハドロン衝突実験においては、数 MeV のエネルギーを持つ高速中性子のバックグラウンドによる放電が原因となり、放電によって検出器の電極破壊、読み出しエレクトロニクスの損傷、デッドラインを生じるなど、様々な問題が発生する。

上記の放電問題を解決するために開発されたのが Resistive MicroMEGAS である。読み出しストリップの上に $0.5 M\Omega/cm \sim 500 M\Omega/cm$ の抵抗値を持った高抵抗ストリップが陽極として配置された構造であり、MAMMA グループを中心に大きな進歩を遂げた技術である。入射粒子が種電子を作り電子が増幅される誘起電荷として信号を読み出すことが可能である。下の図 3.6 は Resistive MicroMEGAS の構造図である。高抵抗ストリップの役割は主に 2 つあり、1 つ目は放電の抑制、そして 2 つ目は複数の読み出しストリップへの電荷の広がりを抑制することである。また、印加電圧は高抵抗ストリップを Anode として正の高電圧、ドリフトに負の高電圧、メッシュをグラウンドとしたことも大きな改良点の一つである。

現在神戸大学で開発しているのはこの Resistive MicroMEGAS である。次節で現在神戸大学で開発中の MicroMEGAS について詳しく解説する。

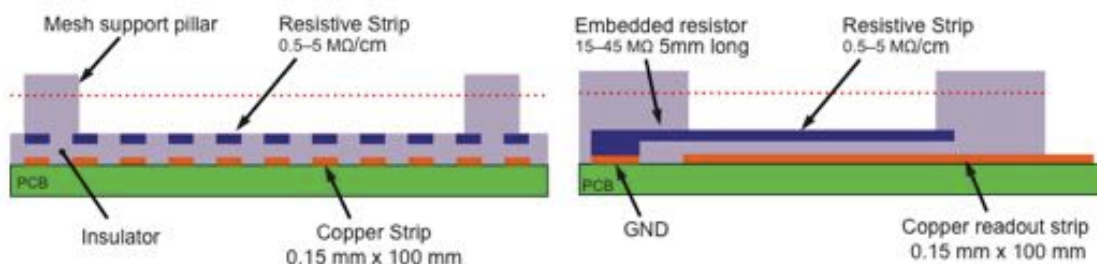


図 3.6: Resistive MicroMEGAS の構造図 [27]

3.4 神戸大学での MicroMEGAS 開発

神戸大学では上述の Resistive MicroMEGAS の試作機を開発していて、現在までに 10 台の試作機が作られている。この試作機は CERN での動作試験を意図して作成されており、CERN グループの読み出しシステムがそのまま使えるように基本的な検出器構造 (検出器サイズ、読み出し配線、コネクタ) は CERN 製のものと同様となっている。図 3.7 は試作機の一つである。

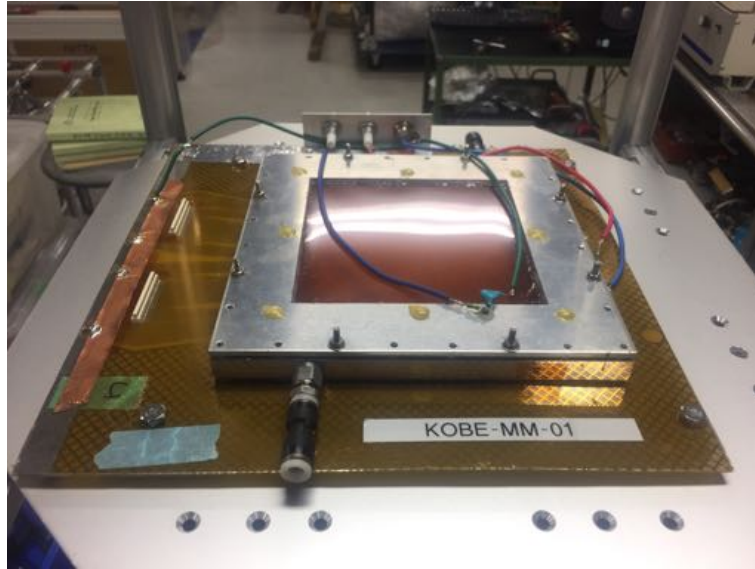


図 3.7: MicroMEGAS 試作機

図 3.8 に示すように検出部は下層から PCB 層、読み出し電極、絶縁層、抵抗電極、マイクロメッシュ、ドリフトメッシュからなり、有感領域は $10 \times 10\text{cm}$ である。50 μm 厚のポリイミド基盤の上に読み出し用の銅ストリップが 200 または 400 μm ピッチで 256ch 配置されていて、その上に 60 μm の絶縁層がある。銅ストリップはそれぞれ検出器表面に配線されてコネクタへとつながっており、1次元読み出しが可能である。これらの上に抵抗電極のストリップが各銅ストリップと重なるように配置されている。

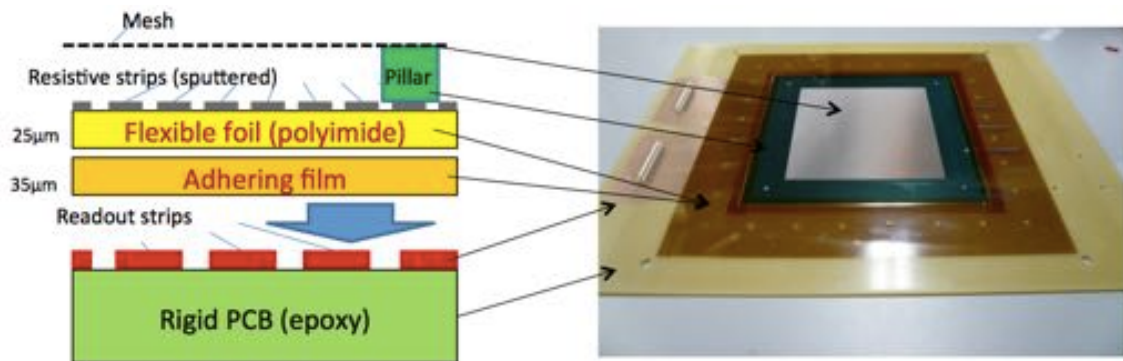


図 3.8: MicroMEGAS 構造図

後に詳しく解説するが、抵抗電極はスパッタリング法とリフトオフ手法を組み合わせで作成したものとスクリーンプリント法で作成したものがある。抵抗電極は high rate, high ionizing particle に対応するためにストリップ状になっていて、放電による欠損の影響を減らすために図 3.9 のようにハシゴのように繋がった形状をとっている。抵抗電極の $128\mu\text{m}$ 上方にはマイクロメッシュが貼られていて、ピラーにより支えられている。初期の試作機は Bulk MicroMEGAS 法により作られていて、メッシュが固定されている。5 台目以降の試作機はメッシュ内にゴミなどが入った場合、中を掃除しやすいようにメッシュが取り外し可能となっている。メッシュの 5mm 上方にはドリフト用のメッシュが配置されている。

また、酸素などの電気陰性度の高い分子が検出器内のガスと混ざるとドリフトしている電子と吸着してしまうため、ガス検出器においてガスの密閉は非常に重要となる。検出器の周りにはガスパッケージを固定するための穴を開けており、検出器の上部からシリコンゴムの O-ring を挟んで密閉する。パッケージの横側にはガス配管を作り、Ar:CO₂ を 93:7 のガス混合比で動作させる。印加電圧はアノードに正の高電圧、ドリフトメッシュに負の高電圧、メッシュをグランドとしている。HV 源から電圧を印加するために HV コネクタを検出器の端に取り付けている。

以下に試作機の特徴をまとめた表を示す。

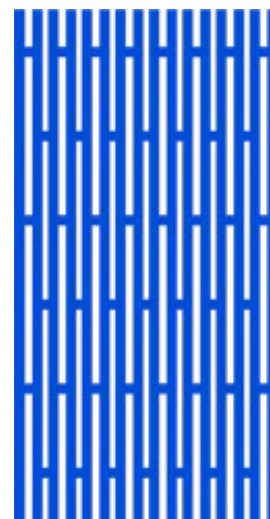


図 3.9: 抵抗ストリップの形状

表 3.1: MicroMEGAS 試作機一覧

試作機名	抵抗電極	メッシュ	増幅領域 [μm]	抵抗電極のピッチ間隔 [μm]
J1 & J2	スクリーンプリント 東レ	バルク	100	200
J3 & J4	スパッタリング C(300\AA)+W(50\AA)	バルク	128	200
J5 & J6	スパッタリング C(3600\AA)	フローティング	128	200
J7 & J8	スパッタリング N-doped C(700\AA)	フローティング	128	400
J9 & J10	スクリーンプリント 十条インク	フローティング	128	400

J1 および J2 に用いられたインクは東レの特注品である。J3 および J4 の抵抗電極は図 3.10 のように基盤と抵抗電極の間にタングステンの層を挟んでいるが、これは当初カーボンをスパッタリングしただけでは付着力に不安があると考えられたからである。次章で詳しく述べるが、スパッタリングは付着力が強いことが強みであり、カーボンのみでも十分強く付着していることが分かった。また、図 3.11 が示す通りタングステンを間に挟んだものは抵抗値が安定せず、これはタングステンが酸化したことが原因と考えられたため J5 および J6 以降はタングステンの層は挟まれていない。

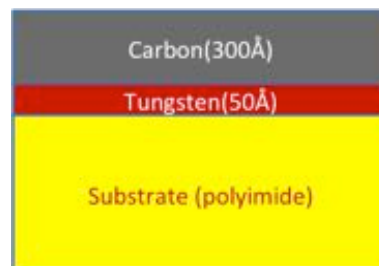


図 3.10: タングステンを挟んだスパッタ

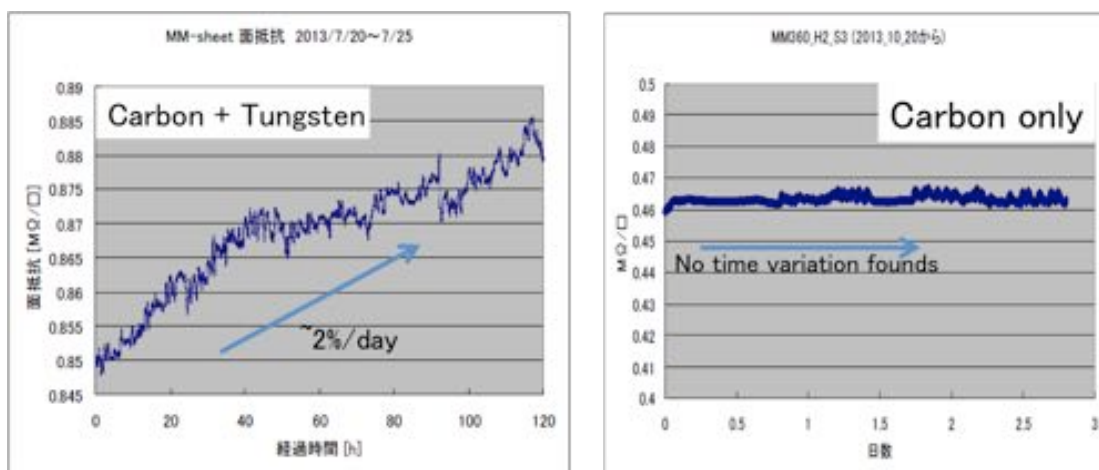


図 3.11: タングステンを挟んだカーボンスパッタの抵抗値の時間変化

次章からは、これらの試作機に用いた抵抗電極についてスパッタリングおよびスクリーンプリントなどの製法とそれらに用いた素材などについて詳細に述べる。

第4章 MicroMEGAS 抵抗電極の開発

前章で述べたようにこの章では Resistive MicroMEGAS の抵抗電極について詳しく述べる。まず、抵抗電極に用いる物質について説明する。そして今回は抵抗薄膜を作成するのに2種類の方法を用いたが、それぞれのプロセスとそれを用いて実際に作成した抵抗電極について順に述べる。

4.1 抵抗電極に用いる物質

我々が目指す Resistive MicroMEGAS の抵抗電極に用いる高抵抗物質の条件を以下に示す。

- 適切な抵抗値を持つこと (1MΩ/sq. 程度)
- 抵抗率の発現が μm のオーダーでほぼ一様であること
- μm のオーダーの微細加工が可能なこと
- 物理的、化学的に安定なこと
- 放射線耐性を持つこと

図 4.1 は様々な物質の体積抵抗率の一覧である。一般的に電極として用いられる薄膜は膜圧が 0.1μm ~ 10μm であり、面抵抗 1MΩ/sq. をこの範囲の膜圧で体積抵抗率に直すと 0.1Ωm ~ 10Ωm となるが、単体もしくは単純な安定化合物でこのような抵抗率を発現するものは少ない。

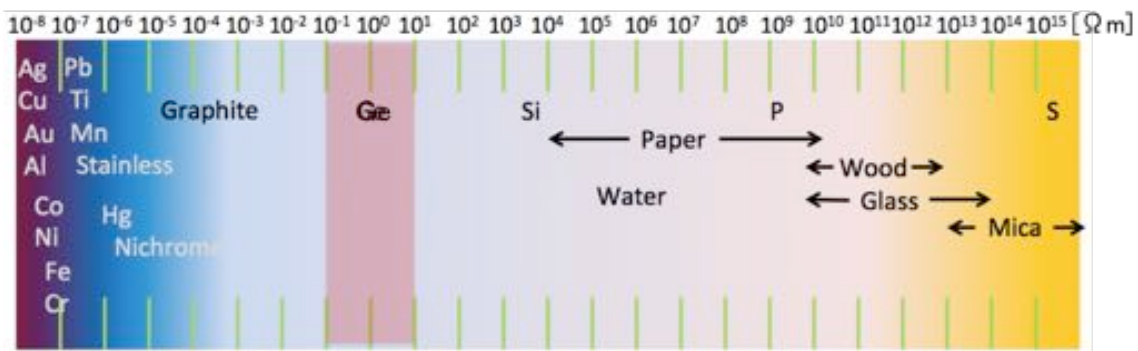


図 4.1: 物質の抵抗値一覧

抵抗電極に用いる物質については様々な候補があるが、カーボンは粒子の状態だと以下に述べるように抵抗値が変動し狙いの抵抗値に近づくことから一般にはカーボン粒子が多く用いられてきた。カーボン粒子は微粒子同士が隣接しながら点接触で電荷の流れるパスを作るため、カーボン粒子の大きさ、密度、粒子の表面

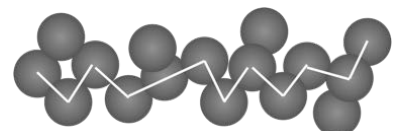


図 4.2: カーボン粒子

状態、膜厚などの様々なパラメーターにより抵抗値が決まり一般的には抵抗値のコントロールが困難だが、後に詳しく述べるようにカーボンを用いた薄膜である程度抵抗値のコントロールに成功しているため現在でもカーボンを主に使用した薄膜が採用されている。

4.2 スパッタリング法による抵抗電極作成

4.2.1 スパッタリング法の概要

スパッタリングとは真空中で不活性ガス（主に Ar）を導入し、ターゲット（プレート状の成膜材料）にマイナスの電圧を印加してグロー放電を発生させ不活性ガス原子をイオン化し、高速でターゲットの表面にガスイオンを衝突させて激しく叩き、ターゲットを構成する成膜材料の粒子を激しく弾き出し、勢いよく基材・基板の表面に付着・堆積させ薄膜を形成する技術である。スパッタリング法では高融点金属や合金など真空蒸着法では困難な材料でも成膜が可能で、様々な成膜材料に対応できる。また、スパッタリングに必要な不活性ガスに加えて反応性ガス (O_2 , N_2 など) を導入することで酸化物や窒化物の成膜を行う反応性スパッタリングも可能である。図 4.3 はスパッタリングの概要を示したものである。[30] 特徴として以下のことがあげられる。

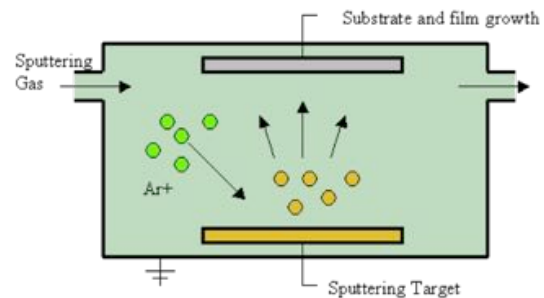


図 4.3: スパッタリング概要図 [31]

- 長所
 - 成膜粒子のエネルギーが大きく付着力が強い
 - 図 4.4 のようなリフトオフ手法と組み合わせることで緻密なパターンが形成可能
 - スパッタ時間を変えることで膜厚を制御でき、それによる抵抗値コントロールが可能
 - 高融点金属、合金、化合物の成膜が可能
 - 反応性ガスの導入で酸化物、窒化物の成膜が可能
 - 大面積に対応可能
 - ターゲットの寿命が長く、連続生産に適している
- 短所
 - 作成時間が長い
 - ハイコスト (ATLAS NSW Module-0 に用いる約 $320m^2$ 分をまかなうのに 6000 万程度)

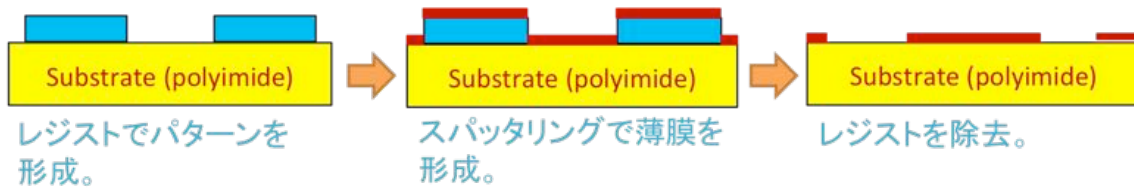


図 4.4: リフトオフ手法概要図

4.2.2 スパッタリングによる抵抗薄膜

スパッタリングでカーボン薄膜を作成した場合、ダイヤモンドの sp^3 結合とグラファイトの sp^2 結合を併せ持った非晶質のダイヤモンドライクカーボン (DLC) の薄膜が形成されるため前述のようなカーボン粒子で薄膜を作った時のような抵抗値のばらつきは起こらず、抵抗値の発現が分子レベルでほぼ一様である。そこで我々は前述の通りカーボンを用いて薄膜を作成することとした。
[39]

スパッタリングはピースパッタ社に、リフトオフ過程はレイテック社にそれぞれ依頼して行った。図 4.5 はスパッタを行う真空チェンバーであり、量端にスパッタターゲットが設置されている。中心のドラムに薄膜を付着・堆積させるフォイルを固定し、それが回転することで均一な薄膜を作成する仕組みである。フレキシブルなフォイルであれば $4.5\text{m} \times 1\text{m}$ までの大面積のものにも対応可能である。

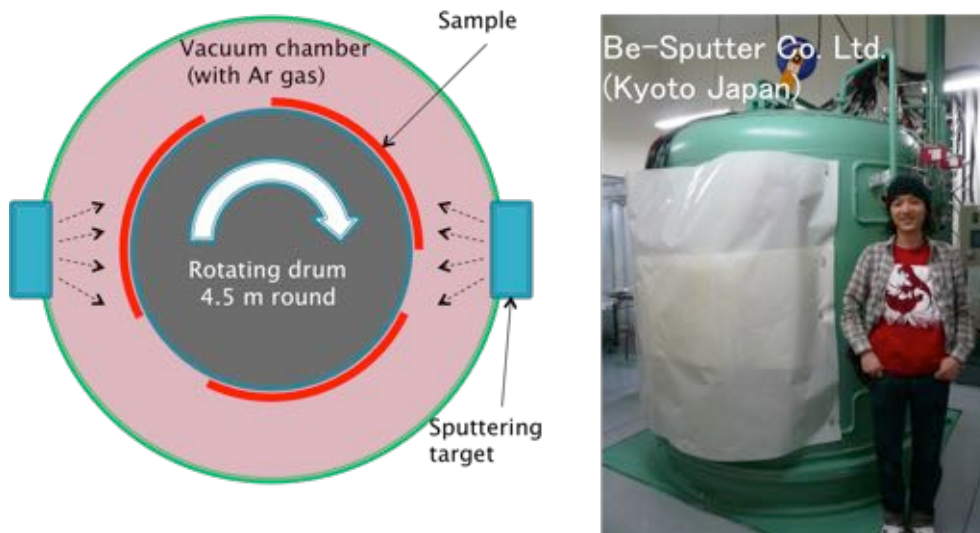


図 4.5: スパッタリングチェンバー

我々はまず、スパッタリングとリフトオフを組み合わせるとどの程度微細なパターンが作成可能かを見るために図4.6のように10.5cm×11.7cmの範囲にストリップ幅300 μ m, 400 μ mピッチで抵抗薄膜を作成した。図4.7はストリップの拡大写真である。前章で述べた通り、ストリップはハシゴ状になっている。狙い通りの形状のストリップができ、がたつきや欠陥部分なども見られず非常に高精度のパターンが作成できた。



図 4.6: 小型の抵抗薄膜

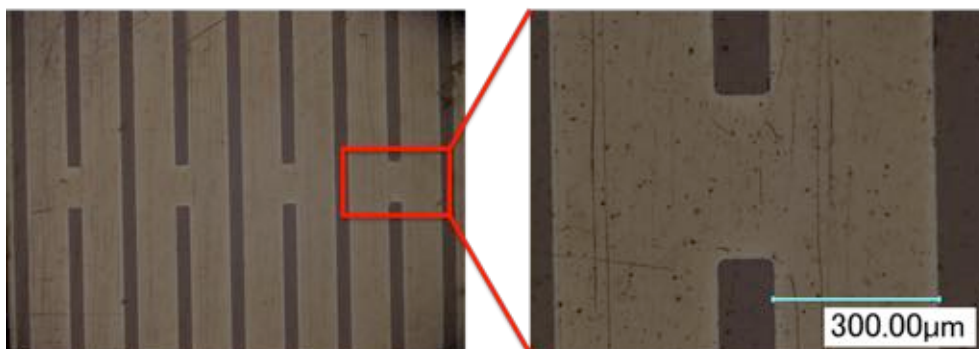


図 4.7: スパッタリングによるストリップパターン

次にカーボンスパッタリングの場合、どの程度の抵抗値が発現するのかをみるために幾つかのストリップパターンをもたないベタの抵抗薄膜を作成した。図 4.8 は横軸に膜厚、縦軸に面抵抗値をとったグラフで、膜厚による抵抗値の変化を表している。目標の抵抗値は面抵抗で約 $1\text{M}\Omega/\text{sq.}$ 程度であるがカーボンのみでのスパッタリングでは 3000\AA 程度の膜厚が必要なことがわかった。

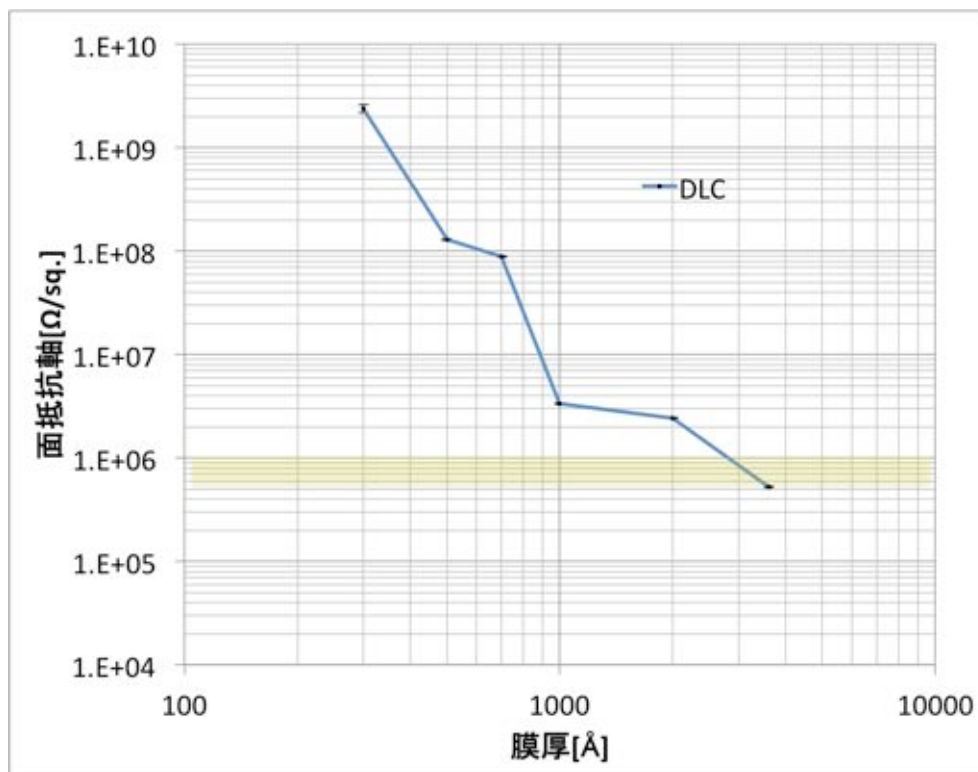


図 4.8: スパッタリングによる抵抗薄膜の抵抗値、黄色の帯が目的の面抵抗のおおよその値を表している

微細パターンが加工可能なこと、適度な抵抗値が発現することが確認できたので、実際にModule-0に用いるサイズの大型の抵抗薄膜を試作した。図4.9が作成した大型薄膜である。このとき作成したストリップはストリップ幅 $200\mu\text{m}$ 、 $425\mu\text{m}$ ピッチのもので、膜厚は 3000\AA である。大型の薄膜でも図4.10のようなハシゴ状のストリップが形成できている。



図 4.9: スパッタリングによる大型薄膜



図 4.10: ハシゴ状のストリップ

また、納入された大型薄膜について抵抗値が一様に発現しているかを確認した。テスターで抵抗薄膜の端から中央に向かって 5cm 、 10cm とプローブ間の距離を伸ばしながら薄膜全体の抵抗値を測定した。大型薄膜は中央でストリップが途切れているのでそこを境に2つの領域を見ている。

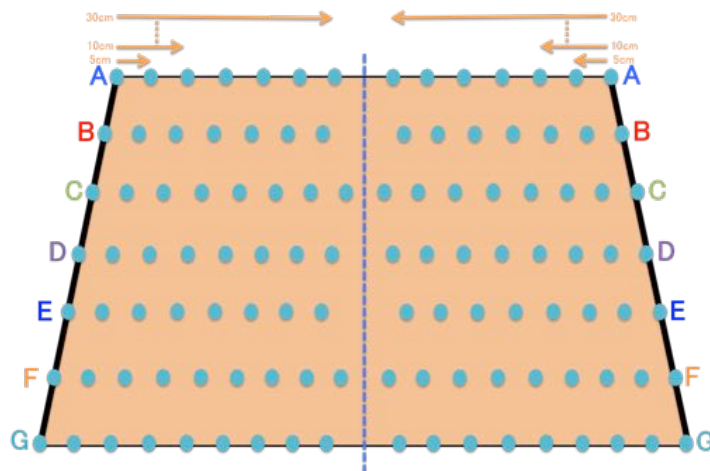


図 4.11: 大型薄膜の抵抗値測定、同じライン上で左右それぞれ一番端の丸と内側のいずれかの丸の間の抵抗値を測定している

2枚の大型薄膜の測定をした結果をそれぞれ図4.12、4.13に示す。foil1についてはおおよそ距離に比例して抵抗値が高くなっており、抵抗値が一様に発現しているが、foil2についてはところどころ抵抗値が高くなっている。これは薄膜が納入された時に $50\mu\text{m}$ のポリイミド膜の腰が弱いために扱いづらく、折れ曲がってしまった箇所があり、そのことが原因で局所的にダメージを受けてしまったためだと思われる。このような大型の薄膜を用いて測定をする場合、板か何かに固定して用いるのが望ましい。

foil1, foil2 ともに抵抗薄膜の端である A と G の測定箇所については抵抗値が他の測定ラインよりも高めである。これはパターンが単なるストリップではなくはしご状になっていることに起因しており、端に行くほどプローブ間の経路が少なくなるからである。真ん中のラインである D と比べると、経路が半分になるため抵抗値も 2 倍程度高くなっている。また、C の 35cm と F の 40cm の測定点の抵抗値が全体的に高くなっているが、これはこれらの測定点が薄膜が途切れている中央部に近いためである。薄膜の中央部の抵抗ストリップが途切れている箇所ではストリップをつなぐはしご構造がなくなり経路が減少すること、後ろから回りこむ経路がなくなることが原因で抵抗値が急激に高くなっている。

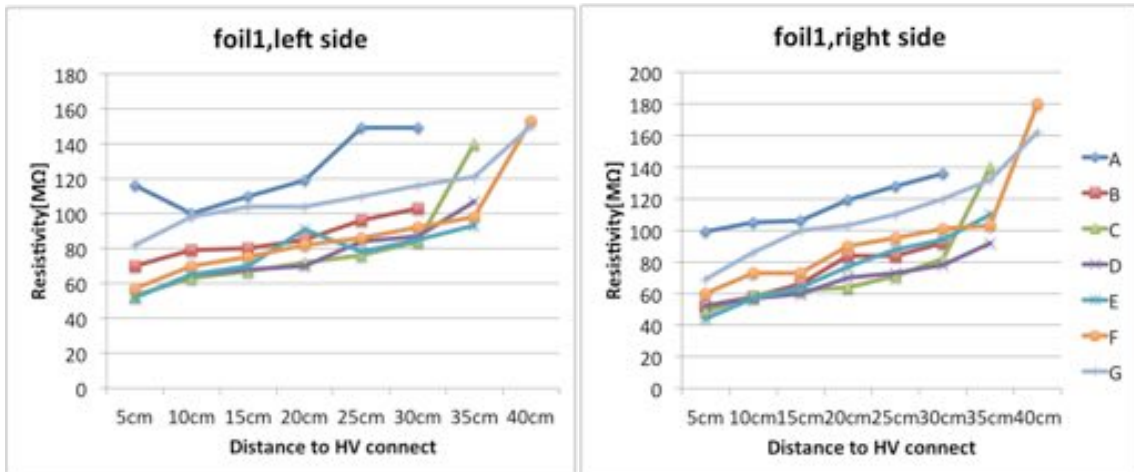


図 4.12: 大型薄膜 foil1 抵抗値、薄膜の端のライン A, G は抵抗値が高くなっている

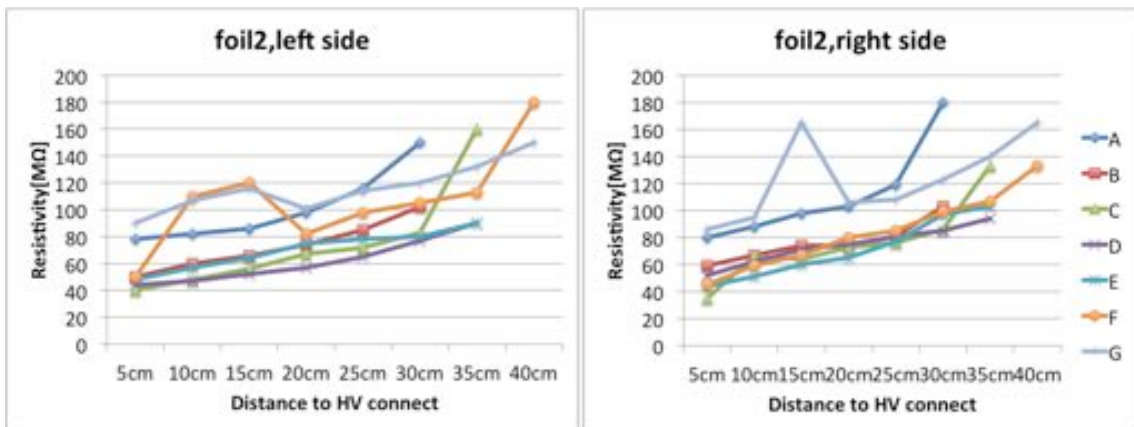


図 4.13: 大型薄膜 foil2 抵抗値、薄膜が受けたダメージのために抵抗値にばらつきがみられる、foil1 と同様ライン A, G は抵抗値が高い

これまでに作成した薄膜は全てカーボンのみスパッタリングであり、膜厚 3000Å 程度で適切な抵抗値を発現することがわかった。しかし、カーボンはスパッタ効率が悪く、現在のところ1時間あたり 500~600Å のスパッタしかできないため、この膜厚の薄膜を作るには5~6時間かかってしまい量産に不向きである。そこで、次章で詳しく述べるがスパッタリングで作成した薄膜は半導体のような温度依存性を示すため、n型半導体を参考にしてカーボンよりも一つ価数の多い窒素を付加することで抵抗値を下げることを試みた。n型半導体とはシリコンやゲルマニウムなどの4価の元素の結晶にリンなどの5価の原子を混ぜたものの事で、リンの価電子が一つ余るためそれがキャリアとして働き、真性半導体よりも電気伝導性が高くなる。窒素の付加自体は前述のようにスパッタリング時の Ar ガス中に N₂ ガスを導入することで容易に実行できた。図 4.14 は Ar ガス中の N₂ ガスの比率を変えた時の薄膜の抵抗値の変化を表している。膜厚は全て 1000Å で作成している。また、N₂50%の薄膜も作成しているが、こちらは抵抗値がなぜか 45[MΩ/sq.] と高くなりすぎたのでグラフには表示していない。

図 4.14 の結果より、窒素を 3.2%付加した薄膜を幾つか作成した。図 4.15 は N₂ が 3.2%付加されたものとカーボンのみのもを比べたグラフであり、青線がカーボンのみ、赤線が窒素を付加したものをそれぞれ表している。窒素を付加したものは 500Å, 700Å で目標の抵抗値を発現しており、作成時間の短縮に成功した。

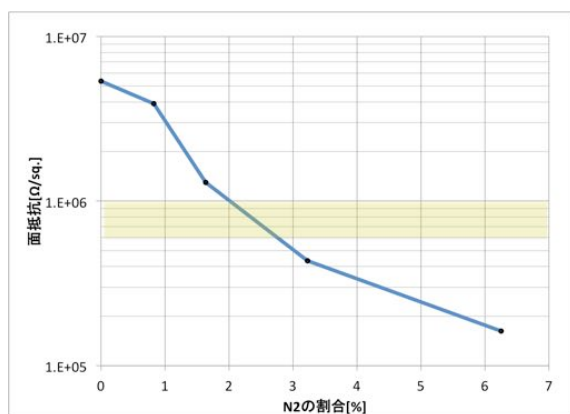


図 4.14: 窒素の比率と抵抗値の関係、黄色の帯が目標の抵抗値のおおよその値を示している

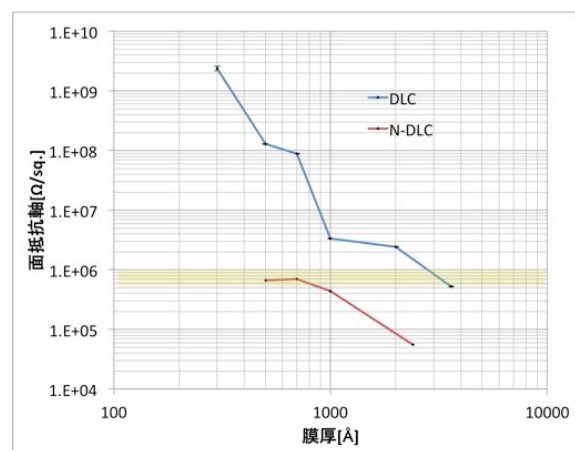


図 4.15: 窒素の付加による抵抗値の変化、黄色の帯が目標の抵抗値のおおよその値を示している

4.2.3 XPS による薄膜の元素分析

抵抗値のコントロールが実際に窒素が薄膜に付加された結果だということを確認するため、神戸大学工学部研究基盤センターの走査型光電子分光分析法 (Scanning Photo Electron Spectroscopy:SPES) を用いて抵抗薄膜についての成分調査を行った。SPES とは XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 測定による元素分析が可能な装置である。XPS とは光電子分光の一種で、サンプル表面に X 線を照射し、生じる光電子のエネルギーを測定することでサンプルの構成元素などを知ることができる。

超高真空中で試料表面に X 線を照射すると、光電効果により表面から光電子が真空中に放出される。その光電子の運動エネルギーを観測すると、その表面の元素組成や化学状態に関する情報を得ることができる。

$$E_b = h\nu - E_{kin} - \phi_{sp} \quad (4.1)$$

E_b は束縛電子の結合エネルギー、 $h\nu$ は軟 X 線のエネルギー、 E_{kin} は光電子の運動エネルギー、 ϕ_{sp} は分光器の仕事関数となる。ここで束縛電子の結合エネルギー E_b は元素固有のものとなる。よって光電子のエネルギースペクトルを解析すれば、物質表面に存在する元素の同定が可能となる。さらにピーク面積比を用いることにより元素を定量することができる。また化学状態の違いによって各元素のピーク位置はわずかにシフトするので、そのシフト (化学シフト) から価数や結合状態の情報を得ることができる。光電子が物質中を非弾性散乱することなく進む距離 (平均自由行程) は数 nm であるため、本分析手法における検出深さは数 nm となる。また AES (Auger Electron Spectroscopy) などと比較して、XPS は絶縁物の試料の測定も比較的容易に行うことができる。さらに Ar+イオンエッチングや C₆₀+イオンエッチングを併用することにより、深さ方向の分析も行うことができる。[33]

我々が使用したのは図 4.16 に示すアルバック・ファイ社の PHI X-tool である。図 4.17 はそれによって実際に得られたスペクトルであり、横軸は照射した X 線を基準とした時の光電子のエネルギー、縦軸は観測された光電子の個数である。また、このヒストグラムは Ar ガス中の N₂ の割合が 3.2% で作成した薄膜を測定した時のもので、確かに窒素が検出されている。



図 4.16: SPES[32]

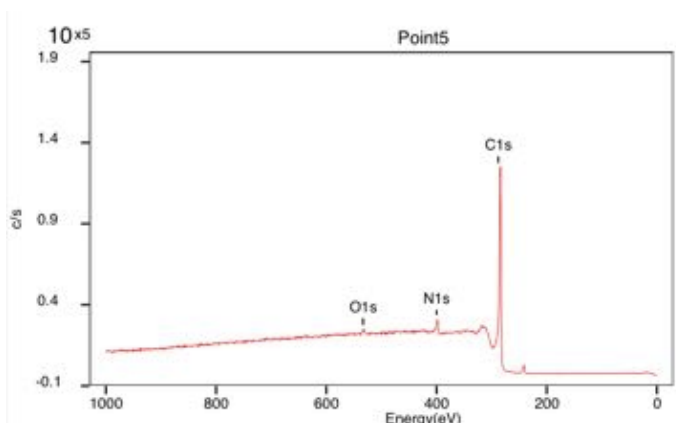


図 4.17: SPES により得られたスペクトル、窒素の検出が確認できる

表 4.1 に測定の結果を示す。これらの結果から、Ar ガス中に N₂ を流すことにより薄膜自体に窒素が付加されることがわかり、狙い通り窒素の付加により抵抗値が減少することが確認できた。Ar ガス中の割合が 0.83, 1.6% のものについては窒素の割合が 0% となっているが、図 4.14 によると抵抗値は確かに下がっているため、おそらく窒素は含まれてはいるが表面状態などの影響で検出に失敗したものと考えられる。

表 4.1: 薄膜中のカーボンに対する窒素の割合

Ar 中の N ₂ の割合 [%]	0	0.83	1.6	3.2	6.3
薄膜中の窒素の割合 [%]	0	0	0	4.9	8.9

4.3 スクリーンプリントによる抵抗電極作成

4.3.1 スクリーンプリントの概要

スクリーンプリントとはナイロン、テトロン、ステンレス等の織物（スクリーン）にレジストでパターンを形成し、インクをスクリーンの開口部から押し出し印刷する方式であり、この方式は被印刷物の形状にあまりとらわれず印刷出来るため、非常に利用範囲が広い印刷方式である。通常のインク以外にクリームハンダ、カーボン、接着剤、可食インク等機能性インクの印刷に使用可能。又、印刷サイズも非常に大きなものまで対応している。[34] 図 4.18 はスクリーンプリントの原理を表したものである。

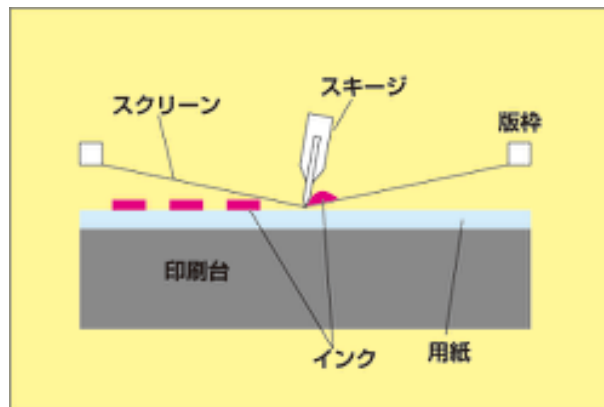


図 4.18: スクリーンプリント原理図 [35]

スクリーンプリントの特徴として以下のことがあげられる。

- 長所

- 様々な形状、サイズの素材に対応可能
- 様々な種類のインクを使用可能
- 作成時間が短い
- ローコスト（ATLAS NSW Module-0 に用いる約 $320m^2$ 分をまかなうのに 1500~2000 万程度）

- 短所

- 抵抗値が安定しない
- パターンが厚くなる（MicroMEGAS の場合 amplification gap が狭いので望ましくない）
- 高電圧に対する耐久力が低い

スクリーンプリントに用いる素材はスパッタリングと同じくカーボンを用いている。我々がまずインクとして選んだのは十条ケミカル社の JELCON CH-8[38] である。しかし、次章で詳しく述べるがこれには決定的な弱点があったので、CERN の MicroMEGAS 試作機でも用いられていて実績のあった ESL 社の Polymer Resisterseries RS121115 を用いてそれ以降の薄膜は作成している。これより文中では十条インクと ESL インクとそれぞれ略称する。表 4.2 はそれぞれのイン

クの特性をまとめたものである。面抵抗はそれぞれ推奨印刷膜でパターンなしのベタの薄膜の抵抗値を表している。また、東レインクは初期の MicroMEGAS 試作機である J1, J2 を作成した時に用いたインクで、特注品のため詳しい情報はわかっていない。

表 4.2: インクの特性一覧

	推奨印刷膜厚	面抵抗 [Ω/cm^2]	溶媒
JELCON CH-8	14 μ m	10	テトロン溶剤
RS121115	18 \pm 2 μ m	10 ⁵	エポキシ系
東レインク	???	???	ポリイミド系

今回スクリーンプリント自体はマツダスクリーン社に依頼した。以下の節よりそれぞれ順に説明する。

4.3.2 スクリーンプリントによる抵抗ストリップ

十条インク

まずは十条インクを用いて作成した抵抗薄膜について述べる。図 4.19 が実際に作成した抵抗薄膜である。ストリップ幅 250 μ m, 400 μ m ピッチのストリップを狙って作成したが、ストリップ幅がほんのわずかに太いものができた。スパッタリングのものに比べるとややがたついているが、おおよそ狙ったパターンが作成できている。

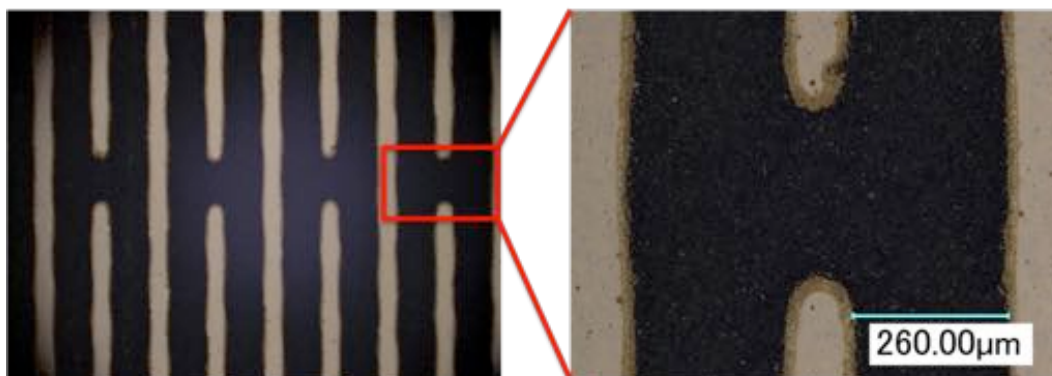


図 4.19: 十条ケミカルのインクで作成した抵抗ストリップ

スクリーンプリントで抵抗電極を作成する場合、スパッタリングのように膜厚を調整し抵抗値をコントロールするということができないので、他の方法をとる必要がある。十条インクを使ったスクリーンプリントの場合はカーボンインクにメジウム(希釈材)を混ぜることによって抵抗値のコントロールを試みている。まずカーボン：メジウム=1:0(carbon only), 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3 の5種類の抵抗薄膜を作成した。図 4.20 はそれぞれの抵抗値をまとめたものであり、横軸にメジウムの比率、縦軸に面抵抗を取っている。この結果から、カーボン：メジウム=1:2.3(全体の3%シリカを含む)の割合で抵抗薄膜を作成したが、面抵抗は 120~130k Ω /sq. と低めであった。

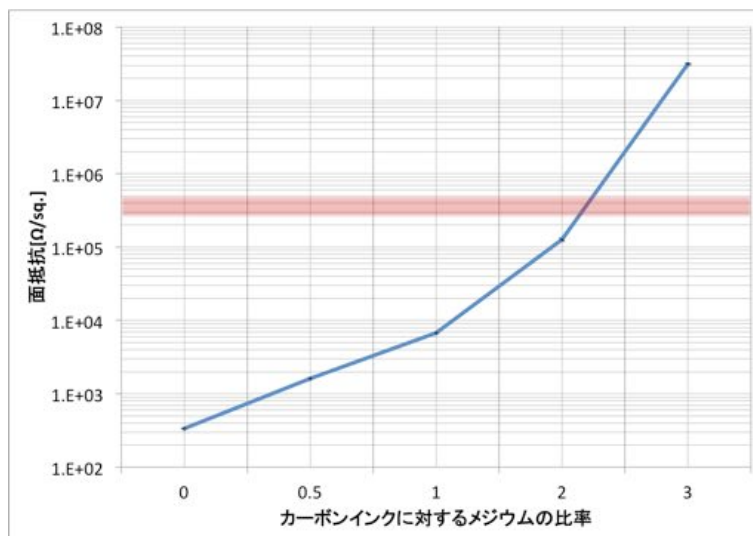


図 4.20: カーボン：メジウムの比率による抵抗値の変化、赤色の帯が目標の抵抗値のおおよその値を示している

ESL インク

次に ESL インクを用いて作成した抵抗電極について述べる。こちらは抵抗電極のストリップ幅を変えることで抵抗値コントロールを試みている。ストリップ幅の違う薄膜を全部で5種類作成したがいずれもピッチは $400\mu\text{m}$ である。

まず最初に作成されたのは図 4.21 の薄膜で、スクリーン版のストリップ幅の設定値は $250\mu\text{m}$ だったのだが実際にできたストリップは設定値よりもかなり太くなってしまい、写真のように隣接するストリップ同士が接触してしまっている。ESL インクは粘度が低めのように、これ以降に作成したいずれの薄膜も実際のストリップ幅が狙ったものよりも太くなった。



図 4.21: ストリップ幅の設定値 $250\mu\text{m}$ の薄膜、ストリップというよりはほとんどベタ膜のようになってしまった

次に作成した薄膜は前回のようにストリップが潰れてしまわないようにストリップ幅を $150\mu\text{m}$ に設定して作成した。図 4.22 が実際に作成された薄膜で、ストリップ幅は $200\mu\text{m}$ 程度となっている。設定値 $250\mu\text{m}$ の時のようにストリップが潰れてはいないものの、今度は全体的にストリップのガタつきがひどく、わずかだが途切れている箇所もある。

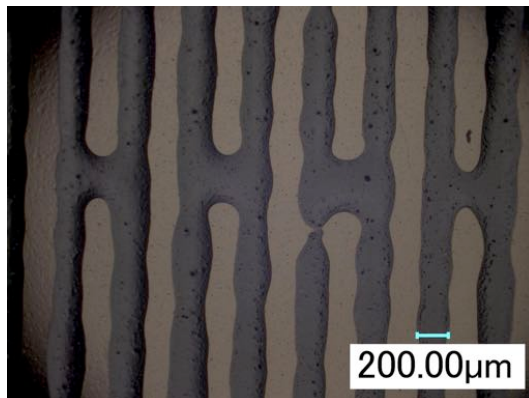


図 4.22: ストリップ幅の設定値 $150\mu\text{m}$ の薄膜

これらを踏まえて、ストリップ幅の設定値がそれぞれ $180, 200, 220\mu\text{m}$ の三種の薄膜を作成した。図 4.23 がそれぞれ左からストリップ幅の設定値 $180, 200, 220\mu\text{m}$ の薄膜である。実際できたストリップ幅はそれぞれ $310, 330, 345\mu\text{m}$ 程度であり、先に作成されたもの同様ストリップ幅が太めになっているが、3種ともストリップのガタつきや接触はなく狙ったパターンの薄膜が作成できた。

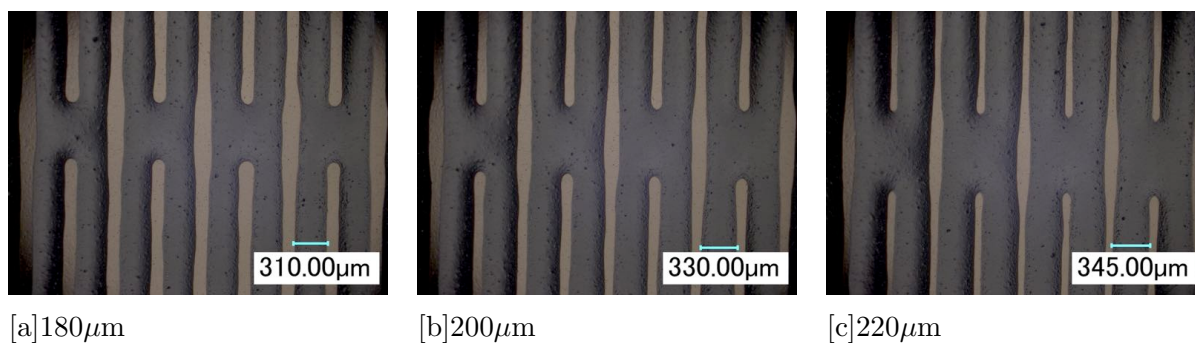


図 4.23: ストリップ幅の設定値 $180, 200, 220\mu\text{m}$ の薄膜

図 4.24 は作成したストリップについて抵抗値を測定したものである。横軸にストリップ幅、縦軸に面抵抗を取っている。前述の通り $1\text{M}\Omega/\text{sq.}$ が目標値であり、ストリップ幅 $180\mu\text{m}$ のものがおおよそ近い値を取っている。

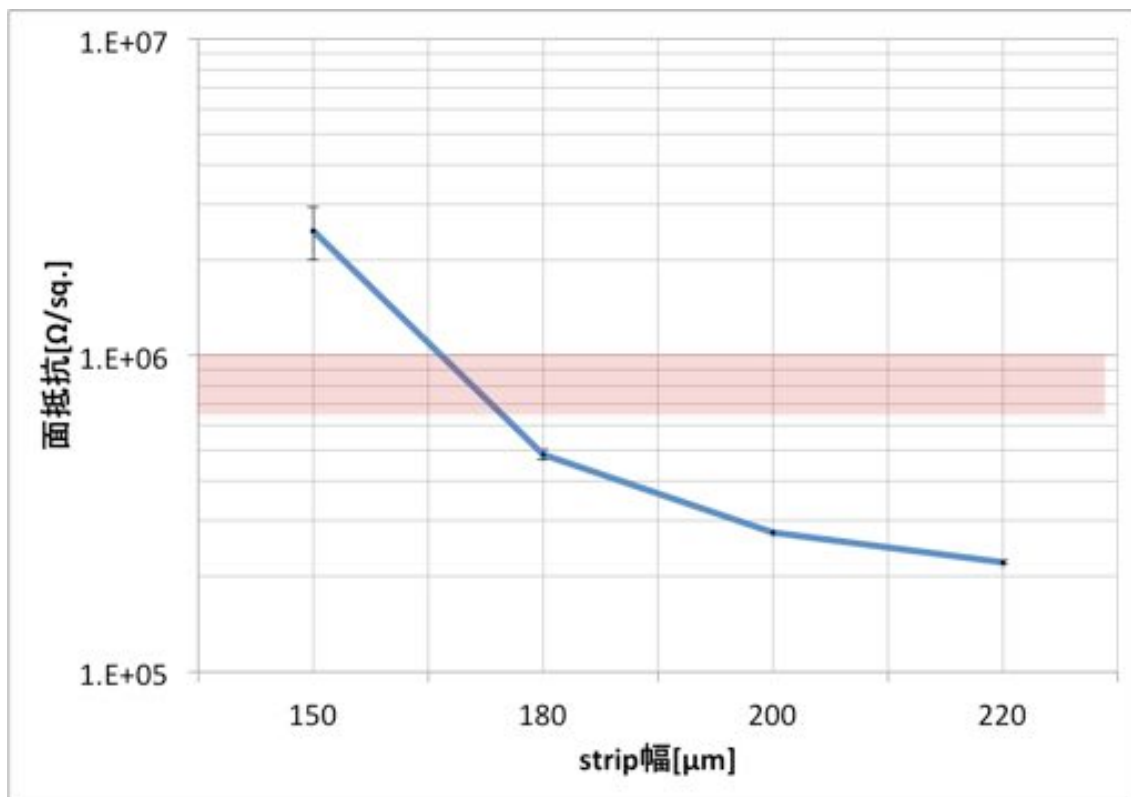


図 4.24: ストリップ幅による抵抗値変化、赤色の帯は目標の抵抗値のおおよその値を示している

第5章 抵抗電極の特性試験

本章ではこれまでに作成した抵抗薄膜について行った特性試験について述べる。特に記載がない場合はスパッタリングの薄膜は N_2 を付加したもの、十条インクの薄膜はカーボン：メジウム＝1：2.3のもの、ESLインクの薄膜はストリップ幅 $180\mu m$ のものを試験に使用している。

特性試験では前章の図5.1のような $10.5cm \times 11.7cm$ の範囲に形成された抵抗薄膜を図5.1のように小さく切って用いている。抵抗薄膜の白い線は銀ペーストで、これを用いて $1cm \times 1cm$ の範囲を作ることで面抵抗値を測定している。



図 5.1: 特性試験のためにカットした薄膜

5.1 クロスカット試験

クロスカット試験 (JIS K5600-5-6) とは塗膜や塗装の付着力を調べる試験であり、テスト方法が簡単で結果がすぐに得られるので最も広く用いられている塗膜および塗装の付着力試験である。手順を以下に示す。[40]

1. 薄膜に縦横6本ずつの切れ込み (今回試験する薄膜の場合は1mm 間隔) を入れる。
2. 試験箇所にてテープを貼り、薄膜に正しく接触させるために指先でテープをしっかりとこする。
3. テープを付着して5分以内にテープを引きはがす。このときできるだけ60°に近い角度でテープの端をつかみ、0.5秒~ 1.0秒で確実に引き離すようにする。
4. 剥離の程度を評価する。

なお、クロスカット試験は碁盤目試験 (JIS K5400-8.5, 現在は廃止されている) が簡略化されたものであり、本試験では信頼性を上げるために碁盤目試験に則り1mm 間隔の切り込みを縦横11本ずつ入れて試験を行っている。試験結果は以下ようになった。

スパッタリング

ほぼ全ての薄膜については図5.3のように剥離は全く見られなかったが、大型で納入された薄膜についてのみ場所によっては図5.4のような剥離が見られた。これは前章でも述べたが、大型薄膜の納入時に扱いを誤ってしまったことによるダメージが原因だと思われる。また、もう一つの原因としてスパッタリング前のポリイミドの表面が十分にクリーンではなかったということも考えられる。しかし、大型薄膜以外のフォイルでは剥離は全く見られなかったためスパッタリングを用いて作成したカーボン薄膜については十分な付着力・強度があると考えてよいだろう。

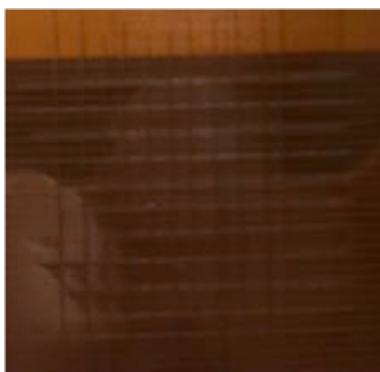


図 5.3: スパッタリング薄膜のクロスカット結果

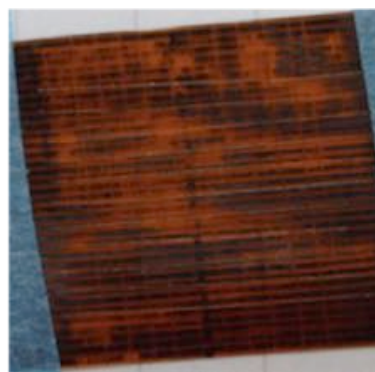


図 5.4: 大型薄膜の部分的剥離

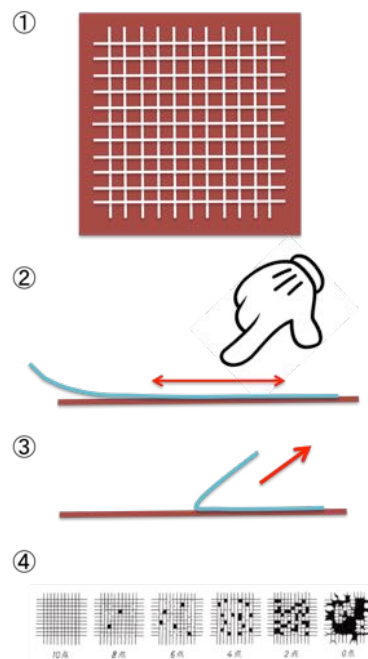


図 5.2: クロスカット試験の手順

スクリーンプリント (十条ケミカル)

十条インクで作成した抵抗薄膜については図 5.5 のようにテープによるマス目の剥離はないものの、カッターの切り込みにそって薄膜が剥離してしまっている。写真の白く見える箇所は下地のポリイミドであり、薄膜が根元から剥がれてしまっていることがわかる。カーボン：メジウム＝1：2.3 のもののみシリカの影響か切り込みにそった剥離も少なく、十条インクで作成した抵抗薄膜の中では丈夫なようだ。しかし、これらの抵抗薄膜については全体的に強度に不安が残る結果となってしまった。

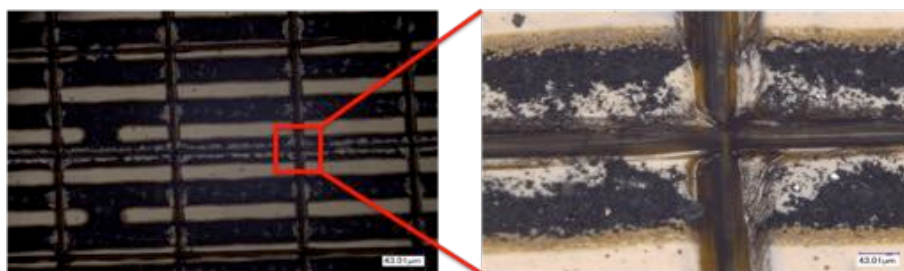


図 5.5: 十条インクの薄膜のクロスカット結果

スクリーンプリント (ESL)

ESL インクで作成した薄膜については剥離は全くなく、十条インクのものの場合のような切り込みにそった剥離も見られなかった。図 5.6 はストリップ幅の設定値が $150\mu\text{m}$ の薄膜のクロスカット試験後の抵抗ストリップの状態である。ESL インクの薄膜は十分な付着力および強度を持っている。

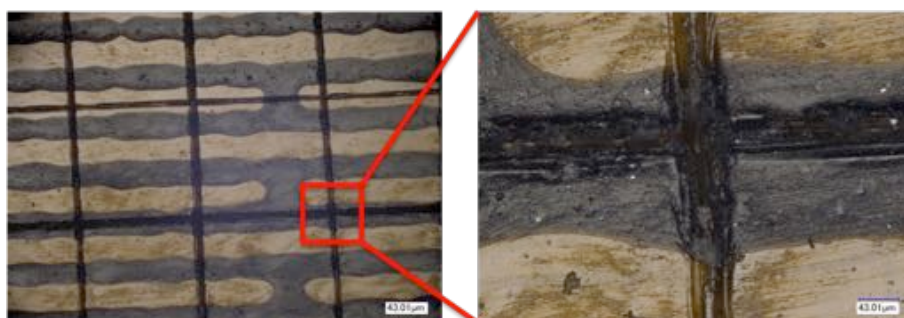


図 5.6: ESL インクの薄膜のクロスカット結果

5.2 化学的耐性

実際に検出器を作成するとき、プリント基板作成時やピラー作成時、リフトオフ時のレジストを剥がす際など様々な化学溶液が用いられる。そこで、スパッタリングの抵抗薄膜に対してそれらの溶液に対してどの程度の耐性があるかを見た。以下が試験に用いた化学溶液および検査時の溶液の温度や濃度などの一覧である。このうち薄膜に影響があったのは水酸化ナトリウムのみで、90分程度で薄膜が剥離してしまった。しかし、短時間では問題ないのでほぼ全ての基板作成プロセスを問題なく行えることがわかった。

表 5.1: 化学耐性試験に用いた溶液一覧

	濃度 [%]	温度 [°C]	用途
炭酸ナトリウム	1	34.1	ピラーのフォトレジストの除去
水酸化ナトリウム	5	44	リフトオフ時のレジストの完全除去
アセトン	100	室温	洗浄
塩酸	25	室温	
硫酸	90	室温	
塩化第二鉄		32	銅(読み出しストリップ)のエッチング



図 5.7: 化学的耐性試験の様子

5.3 屈曲試験

前章で述べた大型薄膜の取り扱いのことで、どの程度の屈曲に薄膜が耐えられるかを知る必要があると感じたのでそれぞれの薄膜について JIS K5600-5-1 を参考にして屈曲に対する耐性を調べた [41]。一様な太さの棒に沿わせて 1 秒間曲げた前後の抵抗値の変化率を測定した。また、カーボン面を外側にして曲げた場合と、内側にして曲げた場合の 2 通りで試験を行っておりそれぞれの違いを比較している。ここで屈曲させる時間が 1 秒と短いのは、よほどのことがない限り薄膜を長時間曲げた状態のまましておくことはおそくないので、調べるのは短時間の場合で良いと判断したからである。一様な太さの棒にはツイストドリルを 4~13mm まで 1mm 刻みで 10 種類用意した。直径の大きなものから小さなものへと試験していき、抵抗値の変化が現れるまでこれを繰り返した。

結果を表 5.2 に示す。結果には抵抗値の変化が現れた時のドリルの直径とその時の抵抗値変化率を示している。十条インクのものに関しては直径 13mm で試験をした時点で抵抗値が変化してしまったので実際はもっと屈曲に弱いようである。ESL インクの内曲げのものに関しては一番小さい直径 4mm でも抵抗値に変化が現れなかった。ESL インクの薄膜については屈曲によるダメージはほぼ問題にならない様子。スパッタリングのものについても直径 9mm で抵抗値に影響が出ているが、注意して扱ってればこれほど曲がることはまずないと思われる (大型薄膜納入時には曲げてしまったが)。十条インクの薄膜についてはかなり屈曲耐性が低く、取り扱いの際には細心の注意を払う必要がある。



図 5.8: 屈曲試験

表 5.2: 屈曲試験結果

	外曲げ		内曲げ	
	直径 [mm]	抵抗値変化率 [%]	直径 [mm]	抵抗値変化率 [%]
スパッタリング	9	0.51	8	0.92
十条インク	13	7.93	13	5.77
ESL インク	5	2	変化なし	

また、スパッタリングの薄膜については抵抗値に変化が出たあとも同様の試験を続けて抵抗値の変化を記録した。結果を図 5.9 に示す。それぞれ赤線が外曲げ、青線が内曲げを表している。薄膜がカーボン面を外にして曲がる場合、薄膜が引っ張られて負担となるためそこからダメージを受けて、内曲げの場合よりも抵抗値の変化が大きくなると予想していたが、その通りの結果となった。いずれの場合も直径 8mm を下回ったあたりから抵抗値が大きく変化しだすので注意が必要である。

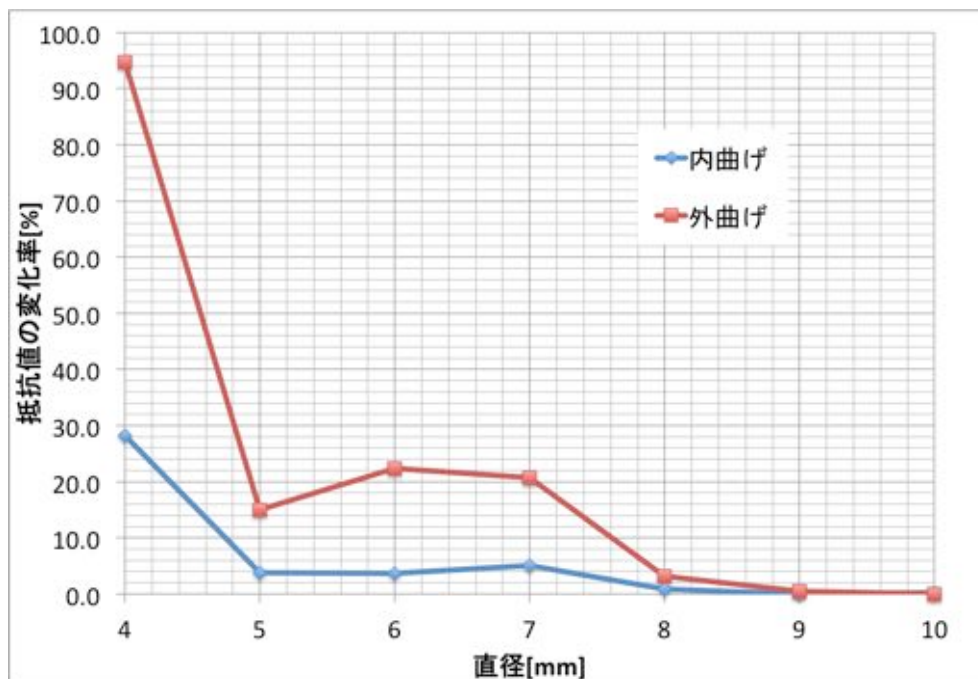


図 5.9: 屈曲試験結果

5.4 ラビング試験

薄膜の強度を見るためにそれぞれの薄膜について摩擦後の状態の変化を見た。キムワイプでそれぞれの薄膜をストリップに垂直に 50 回こすった前後の見た目や抵抗値の変化を記録した。以下にそれぞれの薄膜についての結果を示す。

スパッタリング

図 5.10 はスパッタリングの薄膜表面の摩擦の前後の状態の写真である。注視すれば摩擦後の薄膜に縦方向に極々薄く傷が付いているのがわかる。しかし、他に目立った変化はなく抵抗値も摩擦の前後で変わらなかった。

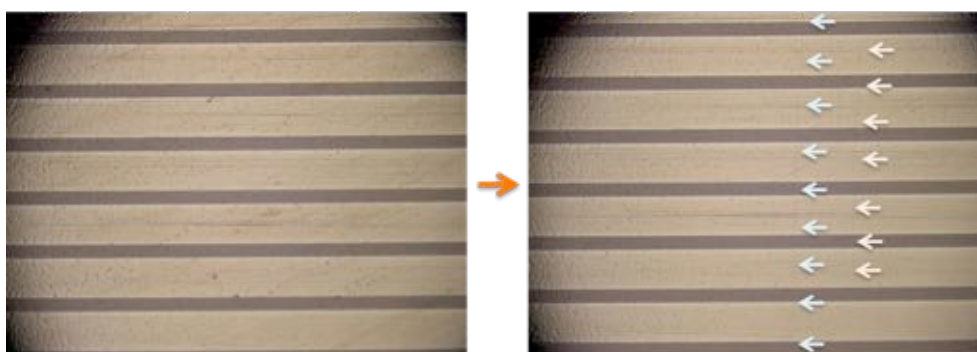


図 5.10: スパッタリング薄膜、摩擦前 (左)、摩擦後 (右); 小さい矢印に沿って縦に 2 本薄い傷が付いている

スクリーンプリント（十条ケミカル）

図 5.11 のように摩擦後の塗膜の表面が黒鉛のように光沢を持ち表面が削れているような印象を受けた。十条インクの薄膜はラビング試験に限らず、少し擦れただけでも痕がついてしまうほど表面は脆い。また、摩擦後は抵抗値が数十%増加した。

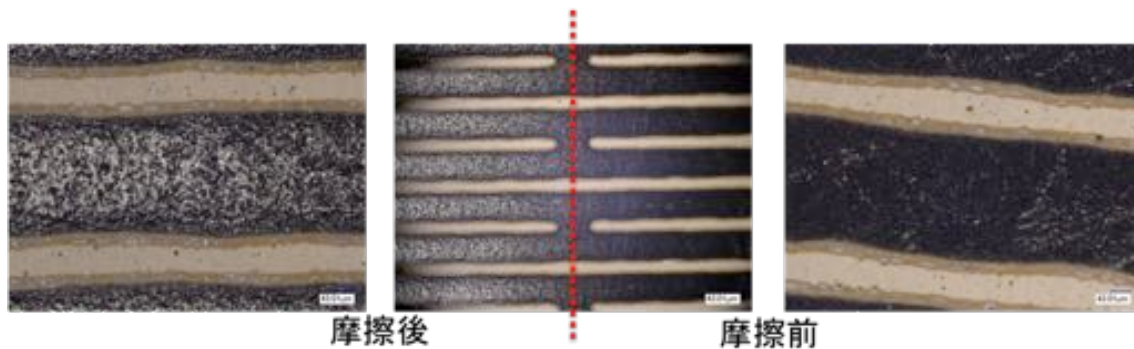


図 5.11: 十条インクの薄膜のラビング前後比較

スクリーンプリント（ESL）

図 5.12 に摩擦前後の ESL インクの薄膜表面の状態を示す。傷などは全くつかず、抵抗値の変化もなかった。摩擦耐性はかなり高く丈夫な様子が確認された。

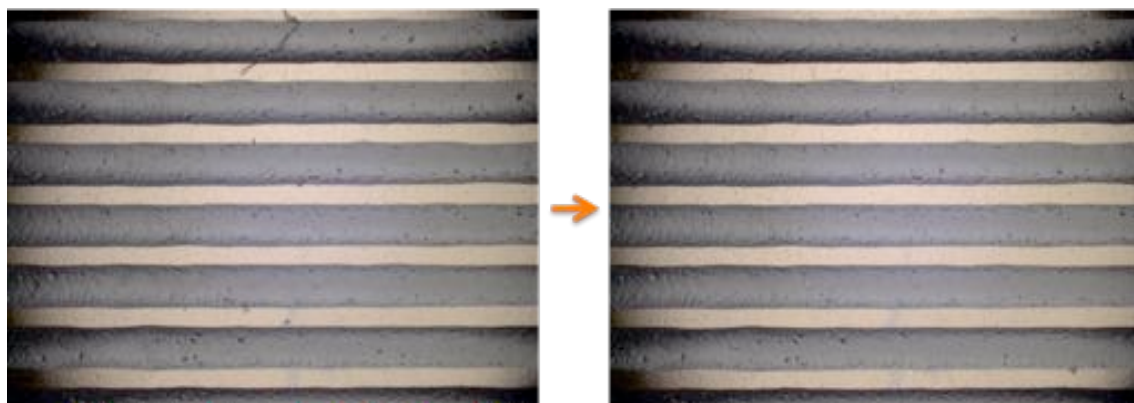


図 5.12: ESL インク薄膜、摩擦前 (左)、摩擦後 (右)

5.4.1 アルコールによる影響

次にキムワイプにアルコールをつけた状態で同様の操作を行ったところ、スパッタリングと ESL インクのものにはアルコール無しの時と同じく全く問題はなかったが、十条インクのものについては大きな問題が生じた。

カーボン：メジウム = 1:0, 1:0.5, 1:1 のものについてはアルコールなしの時の結果と同じく数十%の抵抗値増加に加えて表面に光沢が見られただけだったが、残りのものについては図 5.13 のように摩擦した箇所の塗膜が全て剥がれてしまった。これらはアルコールを垂らしただけでも抵抗値が 10 倍以上に増幅する。また、メジウムの比率が大きくなるにつれ、剥離しやすくなる傾向が見られた。

MicroMEGAS の組み立て過程では完成した抵抗電極をアルコールを用いて洗浄する案も出ていることから、この結果が直接的な要因となりスクリーンプリントに用いるインクの候補から十条インクは除外された。

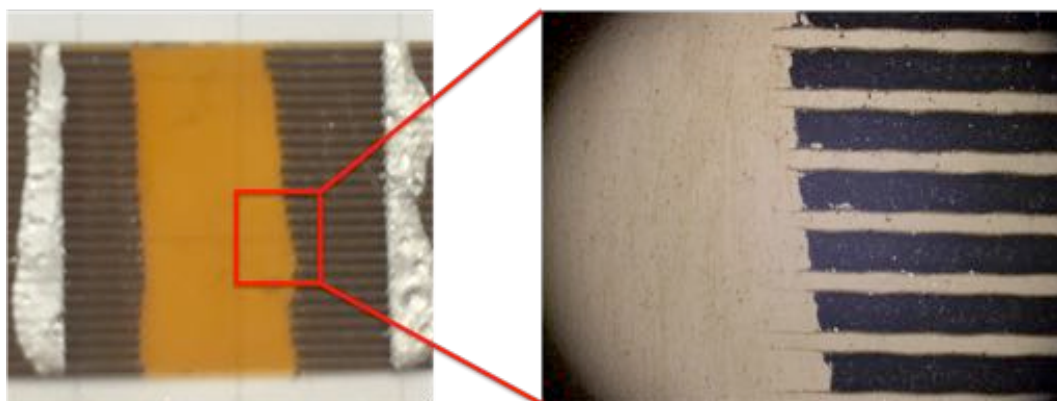


図 5.13: 十条インクの薄膜のアルコールによる剥離、根元からきれいに剥がれ落ちてしまっている

5.5 抵抗値の温度依存性

検出器が安定に動作するために、抵抗電極の抵抗値も安定している必要がある。そこでそれぞれの薄膜について抵抗値の温度変化を見た。図 5.14 はスパッタリングと十条インクの抵抗薄膜について、温度変化による抵抗値の変化を見たものである。青がスパッタリング、緑が十条インクの抵抗値変化率をそれぞれ表していて、ピンクが温度を表している。また、図 5.15 および図 5.16 は抵抗値の温度依存について横軸に抵抗値、縦軸に温度変化を取った散布図である。図 5.15 および図 5.16 をみると明らかなように、スパッタリングによる抵抗薄膜は温度が高くなると抵抗値が低くなり、温度が低くなると抵抗値が高くなるという半導体のような抵抗値の温度依存性を示した。十条インクによる抵抗薄膜については、不規則な抵抗値変化を見せており温度以外の要因があると考えられる。

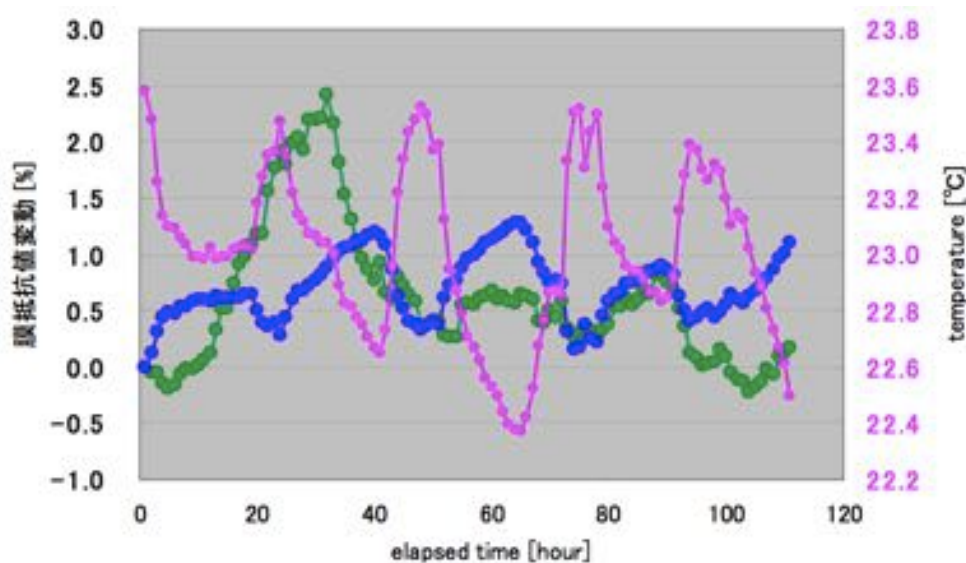


図 5.14: 抵抗値の温度依存 (スパッタリング、十条ケミカル)

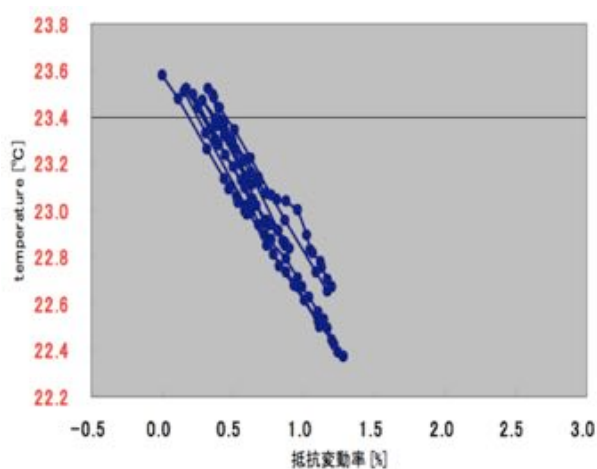


図 5.15: スパッタリングによる抵抗薄膜の温度依存

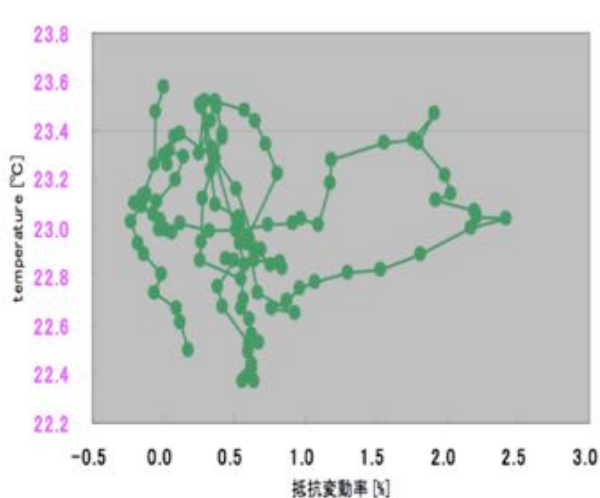


図 5.16: 十条インクによる薄膜の温度依存

次に、ESL インクによる抵抗薄膜の温度変化について述べる。図 5.17 は ESL インクの抵抗薄膜のうちストリップ幅の設定値が $180\mu\text{m}$ のものと $220\mu\text{m}$ のものについて抵抗値の温度依存を見たものである。青が $180\mu\text{m}$ 、緑が $220\mu\text{m}$ をそれぞれ表しており、赤が温度を表している。180、 $220\mu\text{m}$ のいずれもわずかにのみ温度依存しており、金属に似た温度依存性を持っている。

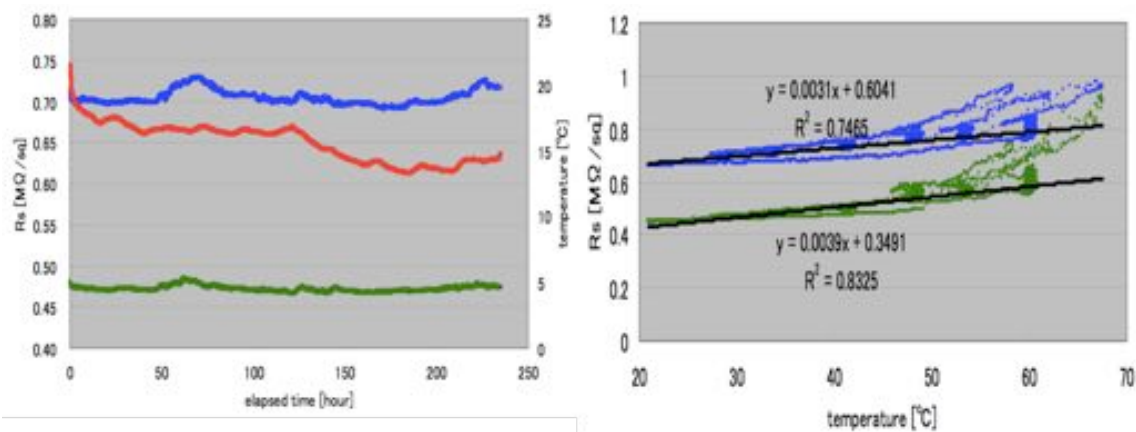


図 5.17: ESL インクの薄膜の抵抗値温度依存；(左) 経過時間 vs 面抵抗、(右) 温度 vs 面抵抗

5.6 中性子照射試験

第 3 章で述べたように、ATLAS 実験では検出器が大量の中性子バックグラウンドに晒されることになる。そこで、中性子の照射によって抵抗薄膜がどの程度影響を受けるのかを試験した。

5.6.1 神戸大学海事科学部タンデム加速器

中性子発生施設には神戸大学海事科学部のタンデム加速器を使用した。図 5.18 に加速器本体の写真を、図 5.19 に加速器の外観図をそれぞれ示す。この加速器は Van de Graaf 型のタンデム加速器で、一価のイオンであれば最大 3MeV まで加速することが可能な加速器である。

この加速器の加速原理について説明する。中央ターミナルに電荷 $q[\text{C}]$ を与えることで、ターミナルに電位 $V_t[\text{V}] = q/C$ を誘起し荷電粒子を加速させるための電荷勾配を作り出す。ここで $C[\text{F}]$ はターミナルを取り囲む加速器タンクとの間の静電容量である。ターミナルに電荷を運ぶために金属ペレットを絶縁体でつないだチェーンを使用している。

タンデム型加速器はターミナルの両端に加速管を持ち、二回の加速を行う効率の良い加速器である。加速器に入射された負イオンは、加速器の端から中央のターミナルに向かって電場勾配によって加速される。ターミナルに到達したイオンは、電子を剥ぎ取られ正イオンに変換され再び逆端まで加速される。本実験では加速させた重水素をベリリウムターゲットに照射し中性子を発生させた。この時の反応は式 5.1 で表される。





図 5.18: タンデム加速器全体図

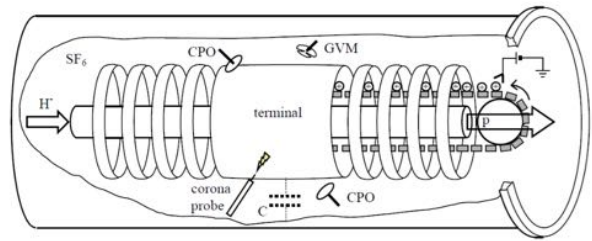


図 5.19: タンデム加速器本体概要図 [42]

5.6.2 中性子照射による抵抗値変化

それぞれの抵抗薄膜をビーム発生源から 2cm 離れた場所において中性子照射による抵抗値の変化を見た。図 5.20 はスパッタリングの抵抗薄膜と、十条インクの抵抗薄膜の抵抗値変化を見たものである。横軸に薄膜への中性子照射量をとって、縦軸はそれぞれ赤線スパッタリング、青線が十条インクの抵抗値変化率、そして緑線が温度変化を表している。

十条インクのものに関しては影響はなさそうである。スパッタリングのものに関しては、温度依存性が高いので分かりにくいだが、照射によってわずかに抵抗値が下がって見えているように見える。中性子照射の前後で同じ温度・気圧の時の抵抗値をくらべてみたところ、0.77%抵抗値が減少していた。

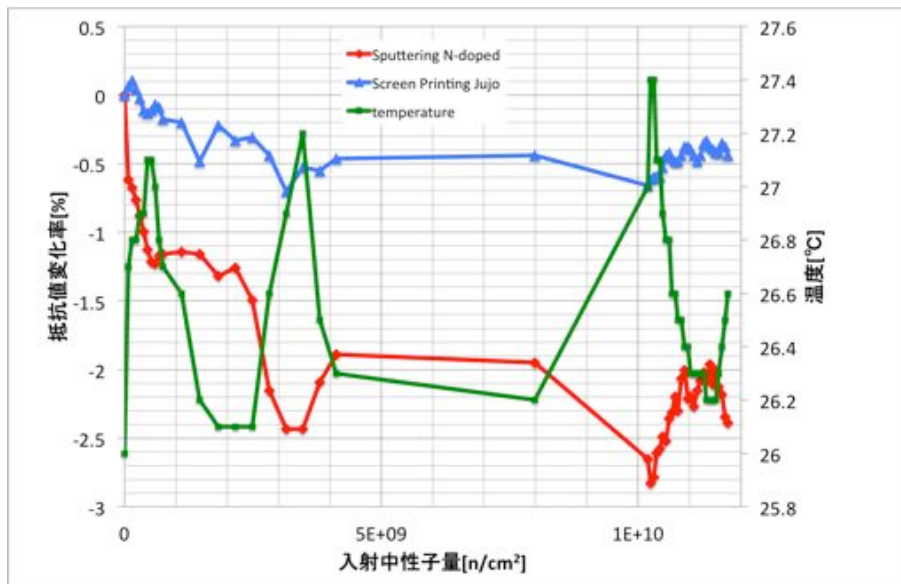


図 5.20: 中性子による抵抗値変化 (スパッタリング、十条インク)

上記の試験後、ESL インクで作った薄膜が作成されたのでそれについても同様の試験を行った。結果を図 5.21 に示す。今回は ESL インクの薄膜のみを用いており、赤線がビームを照射しているもの、青線がビームを照射していないものの抵抗値変化率をそれぞれ表しており、緑線が温度変化を表している。

こちらは前節で述べた通りほとんど温度依存をしていないので温度情報は載せていない。中性子を照射しているものとそうでないものを比べると、明らかに中性子を照射しているものの抵抗値が減少してきている。中性子を照射したものの抵抗値はビームを照射し始めてから 2 時間程度かけてゆっくりと減少し、その後はほとんど変化しなくなった。また、ビームを止めた後減少にかかったのと同程度の時間をかけてゆっくりともとの抵抗値まで戻っていった。

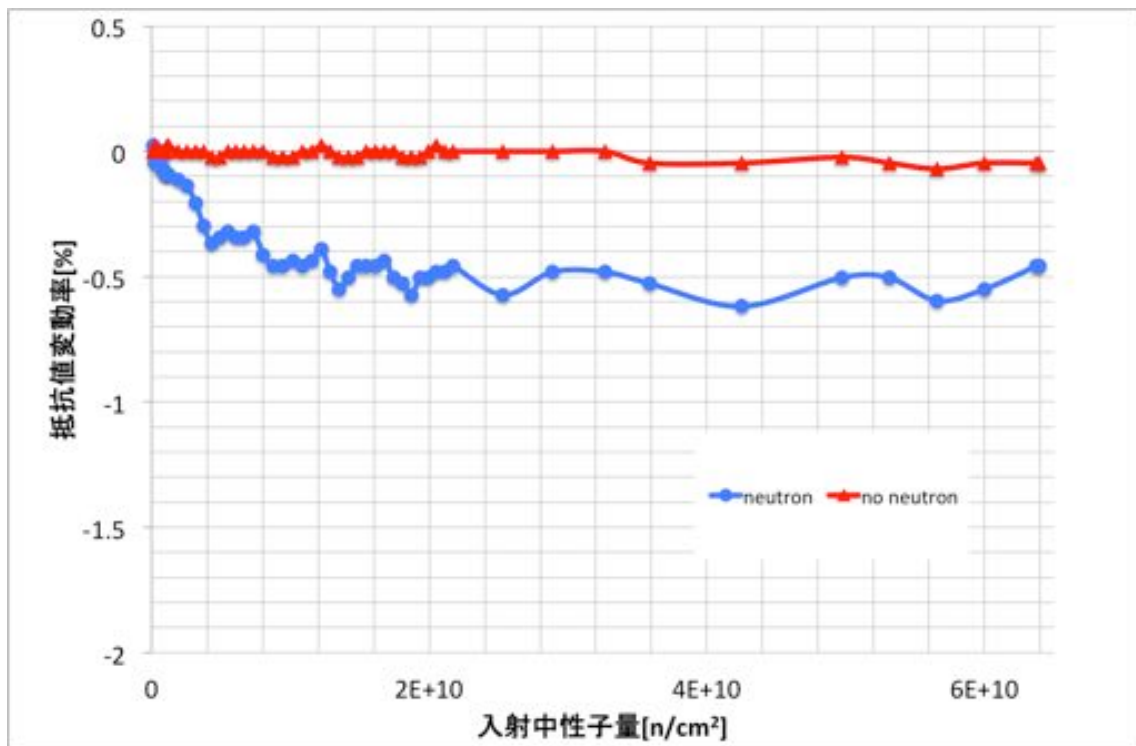


図 5.21: 中性子照射による抵抗値の減少 (ESL インク)

抵抗電極の抵抗値は検出器の放電率とどの程度のハイレートに対応できるかという部分に影響するが、スパッタリングと ESL インクの薄膜については、この実験では検出器の動作に影響があるほどの大きな抵抗地の変動は見られなかった。しかし、ATLAS NSW での 10 年分の中性子照射量は $3.0 \times 10^{13} [n/cm^2]$ なのでいずれの薄膜に対しても追加で試験が必要である。

5.7 試験結果のまとめ

本章で行った試験の結果を以下の表 5.3 にまとめる。スパッタリングおよび ESL インクの薄膜についてはそれぞれの試験から十分な強度や安定性を備えていることがわかった。しかし、十条インクの薄膜についてはほとんどの試験で思わしくない結果となり、さらにアルコールで薄膜が剥離してしまうことがわかった。MicroMEGAS の組み立ての過程で抵抗電極をアルコールを用いて洗浄する案も出ていることから、このことが直接的な原因となり、スクリーンプリントには使用されないこととなった。ATLAS NSW Module-0 にはスパッタリングと ESL インクの薄膜が半分ずつ用いられることとなっている。

表 5.3: 特性試験の結果一覧

	スパッタリング	十条インク	ESL インク
クロスカット	○	×	○
化学的耐性	○	—	—
屈曲試験	曲率半径 4.5mm まで影響なし	×	曲率半径 2.5mm まで影響なし
ラビング試験	○	△	○
アルコール耐性	○	×	○
温度依存	半導体ライク 抵抗値変動 -0.5%/°C 程度	???	金属ライク 抵抗値変動 0.01%/°C 以内
放射線	○	○	○

第6章 結論

LHCではルミノシティを現在の $8.8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ から $5.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に引き上げるアップグレードが計画されている。ルミノシティの増加に伴い ATLAS ミューオンスペクトロメーターの Small Wheel(SW) と呼ばれるビームの衝突点に近い部分では、アップグレード後の高いヒットレートでは粒子の検出効率を十分に得られないという問題が生じた。そのため現在の SW に取って代わり、新たに New Small Wheel(NSW) が導入されることが決まっています、その NSW に用いる新たな検出器の一つに MicroMEGAS が採用されることが決定している。

現在 CERN では ATLAS NSW での導入に向けて様々な MicroMEGAS の研究開発が行われている。MicroMEGAS は狭い範囲に高電場を形成しているため、放電が起りやすいという問題がある。そこで、放電抑制のために電極に高抵抗物質を用いた Resistive MicroMEGAS が開発された。神戸大学では現在その Resistive MicroMEGAS の開発を行っているが、それに用いる抵抗電極の開発および特性試験が本研究のメインテーマである。抵抗薄膜の作成にはスパッタリング法とスクリーンプリントの2種類の方法を用いていて、主な素材はすべてカーボンである。

スパッタリング法を用いた薄膜では、スパッタリングの時間を変えることで膜厚を調節し、抵抗値のコントロールを試みたが、カーボンのみのスパッタリングでは目標の抵抗値にするために 3000 \AA の膜厚が必要であった。これはスパッタ時間にすると5~6時間で、この膜厚では量産に不向きである。そこで N_2 を付加することで抵抗値のコントロールを試み、最終的に Ar 中に N_2 を 3.2% 付加して膜厚 700 \AA で作成したものがよい抵抗値となった。また、スパッタリングを用いて作成した抵抗薄膜は、十分な付着力をもち、物理的、化学的に安定であり、放射耐性も問題ないことがわかった。

スクリーンプリントでは2種類のインクを用いてそれぞれ薄膜を作成している。まず我々は十条ケミカル社の JELCON CH-8 というカーボンインクを用いて薄膜を作成した。希釈材を用いることで抵抗値のコントロールに成功していたが、メジウムの比率がカーボンインクの倍以上の比率の薄膜はアルコールにより剥離してしまうことがわかった。MicroMEGAS の組み立て過程で抵抗電極をアルコールを用いて洗浄する案もあることから十条インクはスクリーンプリントに用いないことになった。

次に用いられたのは ESL 社の RS121115 である。こちらはストリップ幅を調節することで抵抗値のコントロールを試みている。ESL インクを用いて作成したストリップはインクの粘性のためか設定値よりも太くなってしまう傾向が見られた。しかし、最終的にはストリップパターンの作成に成功し、ストリップ幅の設定値 $180 \mu\text{m}$ のものが狙いの抵抗値に近い値を取った。また、ESL インクで作成した抵抗薄膜は十分な付着力をもち、物理的に安定していて、放射線による影響も問題がなかった。

総合的な性能ではスパッタリングで作成した薄膜が一番ふさわしいのだが、スパッタリングのみで ATLAS NES Module-0 に用いる薄膜を作ってしまうのはコストがかかりすぎるため、スパッタリングと ESL インクを用いたスクリーンプリントを半分ずつ用いて Module-0 量産試作機の日本が担当する MicroMEGAS を作成することが決定した。

今後の量産についてはどちらかひとつの製法に絞って抵抗電極が作成される予定だが、現在の

段階では予算の関係から ESL インクを用いたスクリーンプリントが採用される可能性が高い。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々のご支援をいただきここに修士論文として成果をまとめることができました。指導教官である越智敦彦助教は、本研究を行う機会を与えていただきました。ハードはおろか物理学についてもほぼ知識を持ち合わせない私に一からご教授くださいました。また、研究についての鋭い見解を与えてくれ、研究の指針を示してくださいました。ここに深く感謝いたします。

μ -PIC グループである身内賢太郎准教授、本間康浩氏には本研究を進めるにあたって様々なアドバイスをいただきました。特に本間氏には本論文に関わる様々な測定を行っていただきました。抵抗値の温度依存に関するデータはすべて本間氏によるものです。

蔵重久弥教授には日頃の研究に対する姿勢に加え、CERN 出張の際には手続き等についてサポートしていただきました。また、山崎祐司教授、清水志真助教、前田順平特命助教、袁麗さんには初めての海外出張で戸惑う私に CERN のことや海外での生活のことなどを教えていただきました。連れて行っていただいたピザ屋さんはとてもおいしくて思い出に残る味でした。

私と同じ研究グループの山根史弥くん、山内悟くんとともに苦楽を分かち合った中であり、支え合って研究ができたと思っています。これから先それぞれが違う道に進みますが、常に上を目指して邁進していきましょう。

ICEPP の片岡洋介特任助教、増淵達也特任助教、齋藤智之さんのお三方はビームテストの際などにご一緒することが多く、解析についてのご指導などをいただきました。片岡氏には CERN 出張の際には CERN での手続きや施設内の案内および送り向かえまでしてもらって感謝の念に絶えません。同じく ICEPP の寺尾伸吾くん、山崎友寛くん、山谷昌大くんともビームテストで会うことが多かったのですが三人のおかげで毎回楽しいビームテストとなりました。みんなで晩ご飯を決めるのがビームテスト中の密かな楽しみでありました。また機会があれば是非ご飯に行きましょう。

研究室の秘書である横山有美さんには出張申請や事務手続きなどの、研究を続けていく上で不可欠なサポートをしていただきました。横山さんのおかげで余分な心配などをせず研究に集中することができました。心から感謝いたします。研究室の先輩方には研究についてだけではなく生活面についても多くを学ばせていただきました。研究室の同期の方々とはくだらない話から真面目な話まで多くを語りあったと思います。一緒にバカやったりする時間は学校生活の中でほんと安らぐひと時で、大きな心の支えでした。たいへん感謝しております。

最後に、ここまで無事成長し学生生活を送ることができたのは父母を始めとする家族の皆様のおかげです。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

参考文献

- [1] 江戸 勇樹, 神戸大学修士学位論文, ”ATLAS アップグレードに向けた MicroMEGAS の開発とその性能評価”, 2013
- [2] 駒井 英俊, 神戸大学修士学位論文, ” μ -PIC の放電抑制に関する研究”, 2013
- [3] 宮崎 一樹, 神戸大学修士学位, ”ATLAS アップグレードに向けた μ -PIC の開発研究”, 2011
- [4] 来見田 史恵, 神戸大学修士論文, ”ATLAS 実験 RUN2 に向けたレベル 1 ミューオントリガー回路の開発”, 2014
- [5] CERN Document Server, <https://cds.cern.ch>
- [6] ATLAS EXPERIMENT-Public Results, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [7] ATLAS Collaboration, ”Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29
- [8] T.Kawamoto, ”ATLAS: status, limitations and upgrade plans”, Physics procedia 37 (2012) 170-180
- [9] ATLAS Collaboration, ”Letter of Intent for the Phase-I Upgrade of the ATLAS Experiment”
- [10] 川本 辰夫, 2010 年日本物理学会秋季大会口頭発表, ”LHC 測定器のアップグレード計画”
- [11] The MAMMA Collaboration, ”Performances of anode-resistive Micromegas for HL- LHC”, arXiv:1202.1074
- [12] K.Kleinknecht, ”粒子線検出器—放射線計測の基礎と応用—”, 培風館, 1987
- [13] 三浦 功 他, ”放射線計測学”, 裳華房,1960
- [14] XCOM : Photon Cross Sections Database
- [15] G.F.Knoll, ” Radiation Detection and Measurement THIRD EDITION” , WILEY, 2001
- [16] 高橋 慶在, 京都大学修士学位論文, ”電子飛跡検出型 MeV γ 線コンプトンカメラ に用いるガスの組成最適化と高圧化”, 2009
- [17] IV. Energy Deposition in the Detector and Spectrum Formation
- [18] Fabio Sauli and Maxim Titov, Particle Data Book”28.Particle Detectors : 28.7.2.Multi-Wire Proportional Chambers”
- [19] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22, 1999.

- [20] Monitored Drift Tube Chamber Assembly
- [21] F.Sauli, "GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 386 (1997) 531-534
- [22] M.Titov, ParticleData Book "28.Particle Detectors : 28.7.3.Micro-pattern Gas Detectors"
- [23] A.Ochi et al., "A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber", Nucl. Instrum. Meth. A 471 (2001) 264 – 267
- [24] Y.Giomatarisa et al., "MicroMEGAS:a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments", Nucl. Instrum. Meth. A 376 (1996) 29-35
- [25] rpp2011-rev-particle-detectors-accel, http://pdg.web.cern.ch/___pdg/2011/reviews/rpp2011-rev-particle-detectors-accel.pdf
- [26] T.Alexopoulos et al., "Development of large size Micromegas detector for the upgrade of the ATLAS Muon system", Nucl. Instrum. Meth. A 617 (2010) 161 – 165
- [27] T.Alexopoulos et al., "A spark-resistant bulk-micromegas chamber for high-rate applications", Nucl. Instrum. Meth. A 640 (2011) 110 – 118
- [28] I.Giomataris, "MicroMEGAS: results and prospects", ICFA Instrum. Bull. 19 (1999) 1
- [29] I.Giomataris et al., "MicroMEGAS in a bulk", Nucl. Instrum. Meth. A 560 (2006) 405 – 408
- [30] <http://www.oike-kogyo.co.jp/dry-coating/making/sputtering.html>
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Sputter_deposition
- [32] <http://www.csrea.kobe-u.ac.jp/kikig/ESCA/esca.html>
- [33] http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/hyoumen/hyo_002.html
- [34] http://www.jujo-chemical.co.jp/j/screen_printing/
- [35] <http://www.ondemandinsatsu.com/wp/contents1/?p=82>
- [36] <http://www.kcc.zaq.ne.jp/dfnby705/>
- [37] <http://hr-inoue.net/zscience/topics/nanotech/nanotech.html>
- [38] http://www.jujo-chemical.co.jp/j/tec_info/jelcon/JEL_CH8.html
- [39] <http://www.jndf.org/index.php/nakama/dlc.html>
- [40] <http://www.cotec.co.jp/coating-equipment/cotec/e/ce03.html>
- [41] <http://www.cotec.co.jp/coating-equipment/cotec/g/cg02.html>
- [42] 神戸大学海事科学部 谷池晃 "21 荷電粒子ビーム実験"