# 修士論文

# ILC 飛跡測定器における GEM 型ゲート装置の特性評価

平成28年度3月

岩手大学大学院工学研究科 電気電子・情報システム工学専攻

博士前期課程 2年

庄司 愛子

# 目次

第1章 序論	4
第2章 国際リニアコライダー(ILC: International Linear Collider)	5
2.1 ILC 実験	5
2.2 ILD 測定器	6
バーテックス検出器(Vertex detector)	7
中央飛跡検出器(TPC)	7
カロリメータ	7
ミュー粒子検出器	7
第3章 ILC 実験における TPC(Time Projection Chamber)	8
3.1 TPC の全体像	8
3.2 動作原理	8
3.3 TPC への要求	9
3.4 読み出しモジュール	10
MWPC と MPGD	10
GEM (Gas Electron Multiplier)	11
3.5 陽イオンフィードバック	12
3.6 GEM 型ゲート装置	12
第4章 X線,レーザーを用いたゲート装置の電子透過率の測定	14
4.1 測定装置	14
小型チェンバー	15
GEM モジュール	16
GEM 型ゲート装置	16
增幅用 GEM	17
読み出しパッド(PC ボード)	18
高圧電源と抵抗ボックス	18
T2Kガス	19
電圧・電場設定	20
前置増幅器と波形整形器	21
CAMAC ADC	22
4.2 <sup>55</sup> Fe を用いた電子透過率の測定	23
光と物質の相互作用	24
光電効果(光電吸収)	24
コンプトン散乱	25
電子対生成	25

電子透過率の導出	26
実験結果	27
信号電荷分布	27
<sup>55</sup> Fe を用いた測定で得られた電子透過率	28
4.3 レーザーを用いた電子透過率の測定	29
紫外レーザー	29
多光子吸収	30
電子透過率の導出	30
信号が微弱な場合の解析	31
実験結果	32
信号電荷分布	32
電子透過率の電位差依存性	33
第5章 電子ビーム照射試験	34
5.1 測定装置	34
TPC 大型プロトタイプ	35
GEM モジュール	36
高圧電源と抵抗ボックス,チェーン抵抗	37
電圧・電場設定	38
PCMAG	39
電子ビーム	40
荷電粒子と物質の相互作用	41
読み出しエレクトロニクス	42
5.2 電子透過率の評価	44
電子透過率の導出	45
実験結果	46
信号電荷分布	46
電荷量のドリフト距離依存性	48
電子透過率のドリフト距離依存性	49
電荷量のパッド列依存性	50
電子透過率のパッド列依存性	51
第6章 結論および今後の展望	52
参考文献	53

# 第1章 序論

国際リニアコライダー(ILC: International Linear Collider)実験は、線形加速器で加速させた電子と陽電子を衝突させる実験で、質量の起源とされるヒッグス粒子やトップクォークの精密測定、素粒子物理学の標準理論を超える新たな物理の探求を目的としている。 ILC 実験で用いられる測定器は、電子と陽電子の衝突で生じる様々な粒子の情報を得るために複数の検出器から構成される。ILC 実験の測定器の一つである ILD (International Large Detector)測定器では、中央飛跡検出器として TPC (Time Projection Chamber)の使用が予定されている。

TPC では磁場で曲げられた荷電粒子の飛跡を検出する。ガスで満たされた TPC 内を荷電 粒子が通過するとガス分子が電離され,飛跡に沿って電離電子が発生する。電離電子は, TPC 内部の電場によって陽極(読み出し面)へ移動(ドリフト)する。この電離電子によ る信号を十分な信号雑音比で得るために,陽極手前でガス増幅機構を利用した信号の増幅 をおこなう。そのための装置としてガス電子増幅器(GEM: Gas Electron Multiplier)の使 用が検討されている。GEM は基板両面の電極に電位差を与え電子が孔を通過すると雪崩式 に増幅させることができるが,電子とともに大量の陽イオンも発生する。

正確な飛跡の位置情報を得るためには TPC 内部の電場の一様性が要求されるが,ガス増 幅で発生する陽イオンが電離電子のドリフト領域に逆流すると電場を乱し,TPC の性能を 損なう可能性がある。これを防ぐための方策として陽イオンの吸着をおこなうゲート装置 が考えられる。従来,ゲート装置としてワイヤーをガス増幅器の上部に設置するものが一般 的であったが,ワイヤーゲート装置は高い電位差と張力を必要とし,多線のワイヤーの設置 は容易ではない。通常はガス増幅器として扱われる GEM をゲートとして応用した GEM 型 ゲート装置の開発がおこなわれてきた。GEM 型ゲート装置は必要とする電位差が小さく, 設置が比較的容易なことが特徴である。

本研究では TPC の性能の向上を目的とし GEM 型ゲート装置の特性評価をおこなった。 特性評価として、ゲート装置の電子透過率の測定を X 線、レーザー、電子ビームを用いて おこなった。第2章では ILC 実験の概要と ILD 測定器の構成について述べる。第3章では TPC とその目標性能、陽イオンフィードバックおよびゲート装置について述べる。第4章 では X 線、レーザーを用いたゲート装置の電子透過率の測定について述べる。第5章では 電子ビームの照射試験における電子透過率の評価について述べる。第6章では本論文の結 論を述べる。

4

# 第2章 国際リニアコライダー(ILC: International Linear Collider)

#### 2.1 ILC 実験

ILC 実験では全長約 31 km の線形加速器によって高エネルギーの状態(数百 GeV~ 1 TeV) にさせた電子と陽電子を衝突させる。電子と陽電子の衝突によって生じる様々 な粒子の情報を多角的に捉えることで、ヒッグス粒子の性質解明や素粒子物理学の標 準理論を超える新粒子の探索を行うことができる。ILC の有力な建設候補地が北上山 地(岩手県,宮城県)となっている。

図1に2013年に公開された技術設計報告書(Technical Design Report)における ILC の構成を示す。ILC は線形の加速器であるが、全体を見ると単純な直線というわ けではない。電子と陽電子はそれぞれ電子源と陽電子源で作られ、数 GeV のエネルギ ーまで加速される。そして中央部のダンピングリングへ送り込まれる。ダンピングリン グで高品質の粒子ビームが作られ、バンチ・コンプレッサーで密度の高い粒子の塊(バ ンチ)となる。粒子ビームはそれぞれの主線形加速器に送り込まれる。主線形加速器の 本体は超伝導加速空洞であり、クライオモジュールと呼ばれる液体へリウムを用いた 冷却容器の中に設置される。加速空洞の中に高周波の電磁波(マイクロ波)を入れて加 速電場を作り、電場の正負の極性を周期的に反転させて加速させる。十分なエネルギー まで加速させた後、ビームはナノメートルレベルのサイズまで絞り込まれて、測定器の ある中央部分で正面衝突する。衝突点は1箇所のみとなっている[1],[2]。

ILCの測定器は、日本と欧州を中心とする ILD(International Large Detector)と 米国中心の SiD(Silicon Detector)という二つの実験グループがそれぞれ設計および 研究開発をしている[1],[2]。設置される測定器には、想定されるあらゆる物理現象に対 して十分対応可能で高性能かつ汎用なものが求められる。



図1 ILC の構成

# 2.2 ILD 測定器

ILCの測定器はPFA (Particle Flow Algorithm) という考え方に基づいて設計され ている[1], [3]。PFA は、荷電粒子は飛跡検出器で、光子や中性粒子はカロリメータで、 重複なく粒子を測定することを目指すものである。図2にILD 測定器のレイアウトを 示す。ILD 測定器では荷電粒子の飛跡を検出する方法としてガスを用いた検出器を使 用する。測定器の中心の電子、陽電子の衝突点を覆うようにいくつかの検出器が配置さ れる。中心からバーテックス検出器 (Vertex detector)、中央飛跡検出器 (TPC)、電磁 カロリメータ (ECAL)、ハドロンカロリメータ (HCAL)、ミュー粒子検出器 (MUON/York)が配置される。HCAL と MUON の間にソレノイド電磁石が設置され 3.5T の磁場をかける。





図 2 ILD 測定器(上:全体像,下:内部)

# バーテックス検出器 (Vertex detector)

衝突点の極めて近い場所に配置される。崩壊点を測定し, b クォークや c クォーク を識別する。ピクセルサイズが非常に小さな CCD (FPCCD: Fine Pixel Charge Coupled Device) をセンサーとして使用する。

#### 中央飛跡検出器(TPC)

寿命の長い荷電粒子(荷電π中間子,荷電 K 中間子,電子,ミュー粒子,陽子) の飛跡を検出する。磁場によって曲げられた荷電粒子の飛跡の曲率半径からその粒 子の運動量を知ることができる。詳細は第3章で述べる。

#### カロリメータ

電磁カロリメータ(ECAL: Electromagnetic Calorimeter)とハドロンカロリメー タ(HCAL: Hadron Calorimeter)がある。電磁カロリメータでは主に電子や光子の エネルギーを測定する。ハドロンカロリメータではハドロンのエネルギーを測定す る。

# ミュー粒子検出器

全ての検出器を通り抜けるミュー粒子を検出する。ミュー粒子は他の粒子と相互 作用しにくくエネルギーをほとんど落とさないまま測定器の最外部まで通り抜ける。

# 第3章 ILC 実験における TPC (Time Projection Chamber)

#### 3.1 TPC の全体像

ILD 測定器では中央飛跡検出器として TPC (Time Projection Chamber [4])を使用 する予定である。図3に TPC のデザインを示す。直径が3.6 m, 全長が4.7 m の円筒 状の形をしている。中央にカソード電極の円板,両端に読み出し装置が設置される。読 み出し装置には扇形のモジュールが円板状に沿って配置される。読み出しモジュール については3.4 節で詳細を述べる。この円筒状の容器にはガスが封入される。TPC は バーテックス検出器とカロリメータの間に位置する。



#### 3 ILC-TPC

#### 3.2 動作原理

TPC は磁場によって曲げられた荷電粒子の飛跡を検出し,飛跡の曲率半径からその 粒子の運動量を測定するという役割を持つ。

図 4 に飛跡検出の原理図を示す。荷電粒子の電離作用を利用して飛跡を検出する。 まず、TPC 内が電離性のあるガスで満たされており、読み出し装置からカソード電極 への向きに電場がかけられている。中心の衝突点から荷電粒子が TPC 内部を通過する と、荷電粒子はガス分子と相互作用し電離しながらエネルギーを失う。この現象が繰り 返されていくと、荷電粒子が通過した軌道に沿って電離電子が生成される。電離電子は 拡散を伴いながら一定の速度で電場に沿って読み出し装置へ移動(ドリフト)していく。 読み出し装置中のガス増幅器で増幅され、陽極面(読み出し面)に到達した電離電子は 電気信号として検出される。これより rφ方向の位置がわかる。z 方向は陽極(アノー ド)に到達した時間とドリフト速度から求めることができる。

運動量は一般的に(3.1)式で求められる。

$$P_T[GeV/c] = 0.3 \cdot B[T] \cdot R[m] \tag{3.1}$$

 $P_T$ は運動量, B は磁場, R は曲率半径を指す。磁場は 3.5T で一定であるため, 曲率半径が得られると運動量を求めることができる。



図4 TPCの動作原理

#### 3.3 TPC への要求

ILC 実験における TPC には、反跳質量法によるヒッグス粒子の質量の高精度測定 のための高い運動量の決定精度(運動量分解能)や PFA を実現させるための高い飛 跡検出効率が要求される。運動量分解能は(3.2)式で表される。[5]

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \simeq \sqrt{\left(\frac{\alpha'\sigma_{r\varphi}}{BL^2}\right)^2 \left(\frac{720}{n+4}\right) P_T^2 + \left(\frac{\alpha'C}{BL}\right)^2 \left(\frac{10}{7} \left(\frac{X}{X_0}\right)\right)}$$
(3.2)

 $P_T$ : 横方向運動量, $\sigma_{r\varphi}$ : 位置分解能(位置決定精度),  $\alpha'$ , C: 定数 B: 磁場の強さ[T], L: 飛跡検出長 [m], N: 測定点の数, $\frac{X}{X_0}$ : ガスの輻射長

(3.2) 式より運動量分解能は荷電粒子の飛跡の位置決定精度(位置分解能)や磁場等に依存していることがわかる。TPC において要求される運動量分解能は

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \simeq 1 \times 10^{-4} P_T \, \text{GeV/c}$$

であり、この運動量分解能を実現するには 3.5T の均一磁場中で、最大ドリフト距離約 2.2 m で位置分解能が 100 µm以下であること、測定点が 200 点以上あることが求められる。高い飛跡検出効率を実現するには、信号を読み出す際の不感領域を最小にすることや 2 飛跡分解能(2本の近接した飛跡を分離できる精度)を 2 mm 以下にすること、隣接するバーテックス検出器やカロリメータへ影響を与えないように低物質量化することが求められる。

#### 3.4 読み出しモジュール

荷電粒子から生じた電離電子による信号を十分な信号雑音比で得るために, 陽極手 前でガス増幅機構を利用した信号の増幅をおこなって読み出す。その装置としてこれ まで MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) と呼ばれるワイヤーを用いた装置 が使われてきたが, 近年は微細加工技術を用いた MPGD (Micro Pattern Gas Detectors) が進展してきた。MPGD はワイヤーを用いずガス増幅し,二次元読み出しが可能であ る。TPC のガス増幅器として MPGD の使用が検討されている。その候補の一つとし て,ガス電子増幅器 (GEM: Gas Electron Multiplier [6]) が挙げられている。

# MWPC と MPGD

MWPCは複数のワイヤーを張り高電圧を印加することでワイヤー近傍に電場を形成 し電子を増幅させるものである。安価で大型化が容易でありこれまでの高エネルギー 物理学の実験で多く用いられてきた。しかしながら ILC-TPC においては MPGD を用 いることが検討されている。ILC 実験は強磁場環境下でおこなわれる。MWPC の場合 ではワイヤー近傍で磁場の影響を受けやすい。ワイヤーは広い間隔で張られる。磁場に よってドリフト電子にローレンツ力が働き,これによって位置分解能が悪化する (E× B 効果,図 5 参照)。微細加工技術が施された MPGD の場合では,磁場の影響はあま り受けない。例えば GEM では微細な細孔でその間隔は非常に小さいためローレンツ 力は小さくなり, E×B 効果の影響をあまりない。ただしガス増幅器周辺の電場が歪む と E×B 効果の影響を受けやすいため注意が必要である。



**図5** E×B 効果

# **GEM** (Gas Electron Multiplier)

MPGD の一種であり、1997 年に CERN の Fabio Sauli によって開発された[6]。 GEM は飛跡検出器の他に X 線検出器や中性子検出器など広範囲に渡って用いられて いる。図 6 の左側に GEM の表面図を示す[7]。GEM には直径数十~百  $\mu$ m の細孔が 多数存在し、厚さ数十~百  $\mu$ m の絶縁体(ポリイミドや液晶ポリマー等)の両面に銅 電極がある板状の構造をしている。両電極間に数百 V の電位差を与えると細孔中に図 6 の右側のような高電場が形成される[7]。電子が電気力線に沿って細孔中を通過する と電子は気体分子との衝突を繰り返し多くの電離電子が生じる(電子雪崩)。このよう な過程で電子を雪崩式に増幅させることができる。増幅率は与える電位差に依存し、 電位差が大きいほど増幅率は大きくなる。しかし、高電場になるほど放電確率が高く なり GEM の損傷を引き起こす。これを防ぐため、ある程度低い電位差で GEM を複 数枚重ねて使用(積層)することが一般的である。積層化させて使用することで増幅 率を数千~十万倍にすることができる(図 7 [7])。



#### 図 6 GEM の表面



図 7 GEM を積層化させたときの増幅率

#### 3.5 陽イオンフィードバック

ガス増幅では雪崩式に電子を増やすことができるが、それとともに大量の陽イオン もビーム衝突(5 Hz)のたびに発生する。正確な飛跡の位置情報を得るためには電場の 一様性が要求されるが、ガス増幅で発生する陽イオンがドリフト領域に逆流する(陽イ オンフィードバック)と電場が乱れる。図8に陽イオンフィードバックの図を示す。陽 イオンは TPC の底面のディスク状の形を保ちながらカソードへ移動していく。イオン のドリフト速度は電子より約1000倍遅く、陽イオンがカソードに到達するまでに TPC 中にイオン密度が局所的に高い領域が存在することになる。ディスク状の陽イオンは ドリフト領域に常に3つ存在すると想定されている。電離電子がガス増幅器へ移動す るまでの間にディスク状の陽イオンを通過すると、電離電子は本来の発生位置とずれ て検出され、位置分解能が低下してしまう。ガス増幅器として使用が検討されている GEM などをはじめとする MPGD は MWPC と比べて元々陽イオンフィードバックは 少ない。MPGD は銅電極で陽イオンを吸着することができるがすべての陽イオンを吸 着できるわけではない。改善策として陽イオンを吸着できるようなゲートの設置があ げられる。



図8 陽イオンフィードバック

# 3.6 GEM 型ゲート装置

従来, ゲート装置として MWPC といったワイヤーをガス増幅器の上部に設置するものが一般的であった。しかし, ワイヤーゲート装置は高い電位差と張力を必要とし, 多線のワイヤーの設置は容易ではない。2006年, Fabio Sauli は GEM をゲートとして用いることを提案した[8]。通常はガス増幅器として扱われる GEM をゲートとして応用した GEM 型ゲート装置の開発がおこなわれてきた。図 9 にフジクラ社製の GEM 型ゲート装置の写真を示す。GEM 型ゲート装置は必要とする電位差が小さく, 設置が比

較的に容易である。

表1にGEM型ゲート装置と増幅用GEMの仕様を示す[9]。ゲート装置は厚さ12.5 μm のポリイミドの両面に銅電極があり、両電極間に電位差を与えることで図10のような 電場が形成される[10]。GEM型ゲート装置はガス増幅器の上部に設置する。荷電粒子 からの電離電子をガス増幅器へ導く際は、図10の左側のように電気力線に沿って電離 電子を透過させる(開状態)。陽イオンフィードバックを防ぐ際は、図10の右側のよ うに電気力線に沿って陽イオンを銅電極に吸着させる(閉状態)。以上のように銅電極 の電位差を変化させることで開閉状態を制御する。ゲート装置には閉状態での高い陽 イオン阻止率とともに、開状態での高い電子透過率(>80%)が要求される。高い電子 透過率を得るためにゲート装置の孔形はハニカム構造となっておりガス増幅用GEM に比べて光学的開口度が大きく、また、厚さが極薄となっている。なお、今回試験した GEM型ゲート装置は実機モジュールへの搭載を視野に入れた大型のものである。



**図 9** GEM 型ゲート装置

	Gate GEM	Amplifier GEM
Optical aperture ratio	82 %	22.7 %
Hole size	$308\mu m$ (Front side)	70
	$304\mu m$ (Bottom side)	70 µm
Hole pitch	335 µm	$140 \ \mu m$
Rim width	27 $\mu m$ (Front side)	$70 \ \mu m$
(Hole pitch – Hole size)	$31\mu m$ (Bottom side)	$70 \ \mu m$
Insulator thickness	$12.5 \ \mu m$	$100 \ \mu m$

表1 GEM 型ゲート装置と増幅用 GEM の仕様



図 10 GEM 型ゲート装置の孔周辺の電場のシミュレーション図 (左:開状態,右:閉状態)

#### **第4章 X**線,レーザーを用いたゲート装置の電子透過率の測定

磁場0Tにおいて、ゲート装置の電位差が1~20Vの開状態、-15~0Vの閉状態に変化 させた時の電子のゲート透過率を<sup>55</sup>Fe および紫外レーザーを用いて検証した。この測定で は陽イオンの阻止能を電子の場合で推定し、また、電子を阻止する必要のあるTPCへの応 用可能性を検討することを目的とする。実験ではガス増幅用GEMは100 µm厚のものを2 枚使用した。

#### 4.1 測定装置

図 11 に実験装置の概略図を示す。アルミニウム製の小型チェンバー内にゲート装置 およびガス増幅用 GEM を設置する。チェンバー内にガスを入れる。ガスは T2K ガス を用いた。ガスを流量計でモニタし、小型チェンバー内に充満させる。このとき、安全 上の配慮から排気側にバブラを設置し、ガスの排気をモニタできるようにしてある。チ ェンバー内の陰極およびゲート装置、ガス増幅用 GEM にそれぞれ電圧を印加し電場 を形成する。<sup>55</sup>Fe 線源や紫外レーザーを用いてチェンバー内に電離電子を発生させる。 この電離電子を陽極まで到達させ、信号として読み出し、増幅器および CAMAC ADC 等から成る信号データ読み出し回路を介して、PC で信号データを収集する。信号デー タの計測時間は 10 分間としている。



図 11 実験装置の概略図

#### 小型チェンバー

図 12 に本実験で使用したチェンバーボックスを示す。チェンバーは GEM モジュー ルを収納するアルミニウム製の容器であり、板厚 10 mm のアルミニウム製で、容器の 内寸は縦 240 mm×横 300 mm×高さ 60 mm となっている。

容器の側面にはガスの流入, 排気用に穴が設けられ, ガス管に接続されている。容器 の上面は GEM モジュールの扇形にくり抜かれ読み出し用パッド面および GEM モジ ュールが取り付けられる。容器の内側の面に GEM 等, 外側の面に GEM モジュールの 電圧印加端子や読み出し電極が配置される。くり抜かれた扇形の縁周りにはアース端 子を設置できる穴が複数箇所設けてある。GEM モジュールを取り外す際は, 主に容器 の上面側のふたを開閉する。ふたにはガス漏れ防止のためにゴムがふたの縁に沿って 接着されている。ふたの固定にはネジを使用する。

容器の下面は縦 180 mm×横 240 mm の長方形にくり抜かれマイラーシート (テレ フタル酸ポリエステル,絶縁体) が張られている。線源 55Fe を使用する際,このマイ ラーシートの窓の下にある台に 55Fe を配置する。55Fe から発生する X線はマイラー窓 から入射させる。マイラー窓の内側にはメッシュカソードが取り付けてある。容器の 2 つの長側面には直径 40 mm の円の合成石英の窓がある。レーザーを使用する際,石英 窓からレーザーを入射させる。チェンバーボックスに対してレーザーが垂直または斜 めに入射できるように石英窓は各面に 3 つある。容器の下の台はレーザーの入射角に 応じて回転できる。







図 12 チェンバーボックス(左図) マイラー窓(右上図) 石英窓(右下図)

# GEM モジュール

図 13 に本実験で使用した GEM モジュールを示す。GEM モジュールは読み出しボ ード (PC ボード)の上に増幅用 GEM やゲート装置を配置した構造となっておりチェ ンバー内に設置される。GEM モジュールは TPC の底面の円形に沿うように配置でき るよう扇形になっている。PC ボードにポストと電圧供給用のポストが設置され,増幅 用 GEM およびゲート装置のフレームに開けられた穴をポストに通して固定する。電 圧印加用ネジを留めて電圧供給ができる。

For Aller A	Gate-GEM
	增幅用GEM1
-	
	增幅用GEM2
• •	
	PCボード

図 13 GEM モジュール (右:横からみた GEM モジュール)

# GEM 型ゲート装置

本実験では 3.6 節で述べた GEM 型ゲート装置を使用した。詳細は 3.6 節参照。

#### 増幅用 GEM

図 14 に本実験で使用した増幅用 GEM を示す。本実験ではサイエナジー社製のもの を 2 枚使用した。大きさは GEM 型ゲート装置と等しく扇形となっている。GEM に使 用されている絶縁体は液晶ポリマー(LCP: Liquid Crystal Polymer)であり厚さは 100 µmとなっている。細孔は直径 70 µmで細孔間隔は 140 µmである。表面は絶縁体 で 4 分割されている。その境界部分のギャップ(電極ギャップ)は 1 mm となってい る[16]。GEM が放電した場合,そのエネルギーは GEM の面積に依存するため分割す ることで面積を小さくしている。しかしながらその電極ギャップで電場が歪んでしま うという問題もあり,裏面では分割されていない。増幅用 GEM を 2 枚は分割された 面を互いに向かい合わせるように重ねて使用した。GEM の表面の内側(下側)と外側 (上側),裏面の内側と外側の 4 箇所から電圧を印加する。基本的に同じ面の内側と外 側には同じ電圧が印加される。増幅用 GEM の上下にフレームが取り付けられている。 厚さ 2 mm のフレーム 2 つの間に GEM を挟んだ構造をしている。



図 14 増幅用 GEM (左:表面,右:裏面)

# 読み出しパッド (PC ボード)

PC ボードの表面には金メッキされた長方形のパッド(縦 5.26 mm×横幅 1.15~1.25 mm)が 5152 個配置されている。縦(r)方向に 28 列,横( $\varphi$ )方向に内側は 176 枚,外側 は 192 枚配置されている。裏側には信号読み出し回路へ接続するコネクタが 161 個設 置されカプトンケーブルで接続をおこなう。縁側には電圧印加端子や GEM 等を固定 するポストが設置されている。



図 15 PC ボード(左:表面,右:裏側)

# 高圧電源と抵抗ボックス

高圧電源は CAEN 製の負電源(SY 2527LC Universal Multichannel Power Supply System)を用いた。電源と増幅 GEM との間には、放電対策のために図 16 に示すような保護回路が入っている。この回路は図 17 のようなボックス内に設置してある。高圧電源と GEM 型ゲート装置の間にも同様に図 18 のような回路を入っている。







図 17 抵抗ボックス

図 18 抵抗ボックス内の保護回路 (GEM 型ゲート装置)

# T2K ガス

チェンバーに流すガスは Ar: CF<sub>4</sub>: Iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=95:3:2 の混合ガス (T2K ガス) を用いた。表 2 に各気体の電離エネルギーを示す[11]。アルゴン (Ar) は希ガスで電離 性のある気体であり, 比較的低電圧で増幅率を高くすることができる。しかし希ガスの み用いると放電を起こしやすい。アルゴン原子が電離によって励起した状態 (励起原子) になると安定な状態へ戻ろうとする。その際に紫外線を放射する。紫外光が電極等の金 属や周囲の原子へ放射されると, 光電効果によって光電子を放出する。光電子によって 過剰な電子雪崩が生じ, 放電の原因となってしまう。放出される紫外光を吸収する (ク エンチング作用) ために希ガスのほかにクエンチングガスの添加をおこなう。クエンチ ングガスとして CF<sub>4</sub> を用いる。CF<sub>4</sub> はクエンチング作用を持つだけではなく, 磁場中 で電子の横方向拡散を抑制することができる。しかし CF<sub>4</sub> は電子親和力の大きい気体 であり増幅率を小さくしてしまう傾向にある。イソブタン (Iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) を添加すると, 準安定 (励起) 状態となったアルゴン原子がアルゴンの  $E_x$ よりも  $E_I$ が低いイソブタン に衝突することで電離が生じ (ペニング効果), 増幅率を高くすることができる。

# 表2 各気体のパラメータ

 $(E_{r}: 励起に必要なエネルギー, E_{r}: 電離に必要なエネルギー(最小値),$ 

1			
Gas	$E_{x}[eV]$	$E_{I}^{}[eV]$	W <sub>I</sub> [eV]
Ar	11.6	15.7	26
CF <sub>4</sub>	10.0	16.0	54
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6.5	10.6	26

W:電離に必要なエネルギー(平均値))

#### 電圧・電場設定

図 19 に本実験で使用した各領域の電場およびガス増幅用 GEM の電圧を示す。この 装置構成ではドリフト領域、トランスファー領域、インダクション領域の 3 つの領域 がある。ドリフト領域はカソードから 1 枚目のガス増幅用 GEM の上までの領域を指 す。ドリフト領域では、<sup>55</sup>Fe からの X 線あるいは紫外レーザーの入射によりアルゴン 原子との相互作用で電離電子が生成される。生成された電子は電場の作用によって GEM の孔へとドリフトしていく。トランスファー領域は 1 枚目の GEM から 2 枚目の GEM までの領域を指す。トランスファー領域では、GEM の孔中で増幅された電子を 次の GEM まで転送する。インダクション領域は 2 枚目の GEM の下からアノードま での領域を指す。インダクション領域では、GEM によって増幅された電子をアノード

(PC ボード) へ導く。ドリフト領域では電場を 230 V/cm, トランスファー領域では 900 V/cm, インダクション領域では 2700 V/cm とした。増幅用 GEM の1枚目(カソ ード側)の電位差を 345 V, 2 枚目(アノード側)の電位差を 315 V とした。図 20 に 例としてゲート装置の電位差が+2 V と-2 V のときの各電極の印加電圧値を示す。アノ ードを接地し各電極に電圧を印加した。



図 19 各領域の電場と電圧



図 20 ゲート装置の電位差が+2 V と-2V のときの各端子の印加電圧値

# 前置増幅器と波形整形器

図 21 に本実験で使用した前置増幅器(Pre-Amplifier)と波形整形器(Shaper-Amplifier)を示す。前置増幅器は ORTEC の 142PC,波形整形器は ORTEC の 672 (スペクトロスコピアンプ)を使用した。前置増幅器では読み出しパッドに誘起された 電荷の信号を積分して出力する。波形整形器では前置増幅器からの信号を更に増幅し, また信号の整形をおこなう。<sup>55</sup>Fe を用いた測定では前置増幅器からの同期信号 (TIMING:図 21 の右図の中央の端子)をトリガーとして使用した。



図 21 前置増幅器(左)と波形整形器(右)

# CAMAC ADC

データ収集システムとして CAMAC (Computer Automated Measurement and Control) を用いた。本実験で使用した ADC (Analog to Digital Converter) は豊伸製 の ADC (C008) であり NIM (Nuclear Instrument Module) 規格である。ピーク検 出型で 12 bit の ADC である。入力された電気信号 (アナログ信号) のパルス波高 (ピーク値) の大きさに対応したディジタル値 (ADC channel) を出力する逐次比較型とな っている。出力されたディジタル値をデータ処理し PC へ転送する CAMAC クレート コントローラーはネットワーク型クレートコントローラー (TOYO CC/NET) を用い た (クレート電源: TOYO MODEL PS-6000)。



🗷 22 CAMAC ADC

#### 4.2 <sup>55</sup>Fe を用いた電子透過率の測定

信号源として 55Fe からの X 線(E = 5.9 keV)を用いて電子透過率の測定を行った。 読み出しコネクタは D79 番に接続して使用した。D79 は読み出しボードの中央より少 し内側に位置する(図 23)。ゲート装置の電位差を変化させながら計測をおこなってい く。順電場と逆電場の 2 つの場合で測定した(図 24)。ゲート装置の上側を領域 1,下 側を領域 2 と呼ぶとする。順電場の測定では領域 1 と領域 2 で発生する電子からの信 号を検出する。逆電場の測定の際,領域 1 の電場を逆向きにすることで,領域 1 で発 生する電子を陰極側へ移動させゲート装置を通過させないようにする。これより逆電 場の測定では,領域 2 で発生した電子からの信号を検出する。



図 23 読み出しボードのコネクタの位置番号

	順 電 場			逆電場	
	<sup>55</sup> Fe			<sup>55</sup> Fe	
Cathode	<		Cathode	$\leq$	
領域1	• • <b>• •</b> • • •		領域1	e e s e e	<b>E</b> <sub>1</sub>
Gate-GE	Gate-GEM Sate-GEM				
領域2	e e è e e	E <sub>2</sub>	領域2	ee ee ee	E <sub>2</sub>
Amp-GE	M1		Amp-GE	M1	
Amp-GE	M2		Amp-GE	M2	
Anode			Anode		

図 24 順電場と逆電場の場合で測定

# 光と物質の相互作用

<sup>55</sup>Fe からの X 線(光子)とアルゴン原子との相互作用によって電離電子が生じる。 光と物質との相互作用には主に以下の光電効果,コンプトン散乱,電子対生成がある。

#### 光電効果 (光電吸収)

光電効果とは入射光子と原子内部に束縛されている電子が相互作用し、すべて のエネルギーを物質に与えて、電子を放出する現象である。入射光子のエネルギー が数 keV のときに起こる。主に K 殻の電子が放出され、この放出された電子を光 電子と呼ぶ。K 殻に電子の空孔ができると、物質は不安定な状態となり、安定な状 態にするため高い準位から K 殻へと電子が遷移する。このとき原子内部の再配列 によって生じるオージェ電子、または特性 X 線が放出される。

<sup>55</sup>Fe からの X 線 (E=5.9 keV) の場合, 主に光電効果による電離電子が生じる。 このとき観測される信号電荷分布 (エネルギースペクトル) では放出される光電子 とオージェ電子によるピーク (メインピーク, あるいはフォトピークと呼ばれる) が見られる。特性 X 線が放出される際は再び相互作用する確率は低くなるため光 電子のみからなる, エネルギーの低いピーク (エスケープピーク) が見られる。



**図 25** 光電効果

# コンプトン散乱

コンプトン散乱とは入射光子が物質中の電子と衝突し,エネルギーの一部を失って進行方向を変えて散乱する現象である。失われた分のエネルギーを電子が受け取ることで,電子は放出される。この電子を反跳電子(コンプトン電子)と呼ぶ。 入射光子のエネルギーが大きい(約1 MeV 前後)場合に起こる。



図 26 コンプトン散乱

#### 電子対生成

入射光子のエネルギーが 1.02 MeV を超えるとき, 原子核のクーロン力によりエネルギーの一部が失われ, 一対の電子と陽電子が生成される。この現象を電子対生成と呼ぶ。



図 27 電子対生成

# 電子透過率の導出

図 28 にゲート装置の電位差が+2.5 V の時の信号電荷分布を示す。(1) が順電場での 測定結果,(2) が逆電場での測定結果を示している。(1) - (2) は逆電場の測定結果 から順電場の測定結果を差し引いたものであり,領域 1 で発生した電子の分を表す。 各分布をそれぞれガウス関数でフィッティングする。それぞれのガウス関数の平均値 である Peak1 と Peak2 を (4.1) 式に代入し,透過率を求めた。また実験で得られた 透過率とシミュレーション計算との比較も行った。

(電子透過率) = 
$$\frac{Peak1-pedestal}{Peak2-pedestal} \times 100$$
 [%] (4.1)



図 28 ゲート装置の電位差が+2.5 Vの時の信号電荷分布

# 実験結果

#### 信号電荷分布

図 29 に測定で得られた信号電荷分布(エネルギースペクトル)を示す。-4.5 V 以下 の電位差では信号が微弱なため観測できなかった。黒線が順電場での測定結果,赤線が 逆電場での測定結果を示している。青線は逆電場の測定結果から順電場の測定結果を 差し引いたものであり,領域1 で発生した電子の分を表す。青線と赤線の分布をそれ ぞれガウス関数でフィッティングする。青線のフォトピークと赤線のフォトピークを (4.1)式に代入し,電子透過率を求めた。



図 29 信号電荷分布

#### <sup>55</sup>Feを用いた測定で得られた電子透過率

図 30 に 55Fe を用いた測定で得られた電子透過率を示す。黒線は実測値,青線はシ ミュレーション値を表している[12]。電位差が正の場合の透過率のシミュレーションと 比較するとほぼ一致している。ゲート装置の電位差が+3.5 V の時,電子透過率は最大 で約 86%となる。これ以上の電位差では電子透過率は漸減する。陽極側電極に吸収さ れる電子の割合が増加するためと考えられる。電位差を逆転すると閉状態になり,透過 率は急減する。



図 30 55Fe を用いた測定で得られた電子透過率

# 4.3 レーザーを用いた電子透過率の測定

紫外レーザー(Nd:YAG, 波長 266 nm)を用いて,ゲート装置の負の電位差の時の 透過率を測定した。図 31 にレーザーを照射した箇所を示す。レーザーはチェンバーの 構造上,ゲート装置の上側の領域のみに照射した。<sup>55</sup>Fe を用いた際の測定と同様に読 み出しコネクタは D79 番を使用した。



図 31 レーザーでの照射位置

# 紫外レーザー

図 32 に本実験で使用した紫外レーザーを示す。NEW WAVE RESEARCH 社の POLARIS を使用した。波長は 266 nm,最大出力は 5 mJ,パルス幅は 3~4 nsec とな っている。本実験では繰り返し周波数 (Rep.) を 20 Hz,輝度 (PFN) を 95%として 使用した。レーザーからの同期信号をトリガーとして使用した。同期信号は TTL (Transistor Transistor Logic) 規格であるため NIM 規格へ変換するコンバータ (ORTEC MODEL LI380/NL) を介している。



図 32 レーザー

#### 多光子吸収

アルゴンの電離に必要とされるエネルギー(最小値)は15.7 eV,イソブタンの場合 は10.6 eV であるが(4.2 節 T2K ガス参照),波長 266 nm のレーザーによる光子のエ ネルギーは4.67 eV であり一光子では電離できない。複数の光子が同時に物質に吸収さ れる現象(多光子吸収)によって電離が可能となる。レーザーではポンピング作用によ り多くの光子が生じる。3 光子以上あればガス原子の電離が可能となるが3光子以上の 同時吸収の確率は低いとされる。2 光子吸収によってチェンバー内に存在する不純物か ら初期(種)電子が生じていると考えられている。

#### 電子透過率の導出

図の左側は電位差が-4.5 V の時,右側が-0.5 V の時の信号電荷分布を示している。レ ーザーを領域1だけに照射するため,透過電子の信号の大きさのみの測定となる。透過 率の基準点として <sup>55</sup>Fe で測定した-0.5 V の透過率 0.6 を用いる。レーザー出力は変動 するためゲート電位差を変えたデータと -0.5 V のデータは常に交互に取得した。電位 差が-4.5 V の時の信号電荷分布のピーク (Peak1) 及び-0.5 V の時の信号電荷分布のピ ーク (Peak2) を (4.2) 式に代入して電子透過率を求めた。





図 33 電位差が-4.5V(左)と-0.5V(右)の時の信号電荷分布

# 信号が微弱な場合の解析

図 34 にゲート装置の電位差が-14.5 V と-15.5 V のときの信号電荷分布を示す。赤 線が電離電子からの信号で黒線はノイズ(ペデスタル、レーザーのシャッターを閉じ て取得)を表している。電位差が負の方向へ大きくなると信号が微弱となり、左側の 図のように信号とノイズの分離が不明瞭となる(-15.5 V のときの計測では信号が非 常に微弱なことから計測時間を 50 分としている)。図 34 の右側にデータ処理後の信 号電荷分布を示す。数 100 イベントをまとめて平均値をとってプロットするという処 理をおこなったことにより信号とノイズの分離が明瞭となった。データ処理後の信号 電荷分布でガウスフィッティングをおこない得られたピーク値を用いて電子透過率を 求めた。



図 34 データ処理前後の信号電荷分布

# 実験結果

#### 信号電荷分布

図 33 に測定で得られた信号電荷分布(エネルギースペクトル)を示す(電位差が -14.5 V と-15.5 V のときの信号電荷分布は図 32 参照)。ガウス関数でフィッティング をおこない,(4.2)式を用いて電子透過率を求めた。



図 35 信号電荷分布

#### 電子透過率の電位差依存性

図 36 に実験結果を示す。負の電位差でのシミュレーションの値と比較すると実測値 とずれが生じている。ゲート装置の電位差を負の方向へ大きくすると、電子透過率は減 少する。すなわち電子透過阻止率は増加する。図 37 に縦軸を対数表示した実験結果を 示す。-14.5 V 時に透過率は約 0.09 % , -15.5 V 時に約 0.03 % となる。-15.5 V 時に 阻止率は 99.97 %以上となることが分かった。



#### 第5章 電子ビーム照射試験

ドイツの DESY (ドイツ電子シンクロトロン)で、LC-TPC 国際共同研究グループのもと で GEM 型ゲート装置を用いた電子ビームの照射試験をおこなった。ILC 実験では磁場で 曲げられた荷電粒子の飛跡を検出する。この試験では実際に磁場がかけられた状態で荷電 粒子の電子のビームを用いてゲート装置の十分な電子透過率および位置分解能を確認する ことを目的としている。

#### 5.1 測定装置

図に電子ビーム照射試験で用いた測定装置の概略図を示す。TPC 大型プロトタイプ の読み出しモジュールにゲート装置,フィールドシェーパー(電場整形器)および増幅 用 GEM 2 枚を設置する。プロトタイプ内に T2K ガスを満たしておく。プロトタイプ は PCMAG (super conducting solenoid magnet: 超伝導ソレノイド磁石)の中に挿入 し1Tの磁場をかける。カソードおよびゲート装置,増幅用 GEM にそれぞれ電圧を印 加し電場を形成する。5 GeV の電子ビームを測定器へ照射し,生じた電離電子をアノ ードまで到達させ,信号として読み出し、PASA (pre-amplifier shaper-amplifier: 前 置増幅波形整形器)等からなる読み出しエレクトロニクス (ALTRO DAQ システム) を介して、PC で信号データを収集する。



図 38 測定装置の概略図

# TPC 大型プロトタイプ

図 38 に TPC 大型プロトタイプ(LP1: Large Prototype 1)の外観を示す。円筒状の フィールドケージと円板状のエンドプレートから構成される。フィールドケージはガ ス容器と電場整形の役割をもち,大きさは直径 769 mm×長さ 600 mm となっている。 フィールドケージ内にはフィールドストリップが 2.8 mm 間隔で配置され,カソード からアノードまでチェーン抵抗によって電位を滑らかに変化させていくことで TPC 内 の均一な電場を形成する。フィールドケージ内に設置されたカソードからエンドプレ ートまでの距離は 568 mm となっている。エンドプレートには読み出しモジュールを 7 台組み込むことができる。読み出しモジュールが組み込まれない箇所には表面が銅に なっているダミーモジュール(図 39)を組み込むことで均一な電場を保つ。



図 **39** TPC 大型プロトタイプ(LP1) (左:エンドプレート,右:側面から見た LP1,茶色部分がフィールドケージ)





図 40 ダミーモジュール

# GEM モジュール

図 40 に本試験で使用した GEM モジュールを示す。GEM モジュールは GEM 型ゲ ート装置を搭載したものとフィールドシェーパー (電場整形器)を搭載したものの 2つ を使用した。ゲート装置の搭載の有無で比較をおこなうが,増幅用 GEM の上に何も搭 載しないと電場および等電位面が歪んでしまう。フィールドシェーパーのフレームの 側面にはフィールドストリップがありチェーン抵抗によって電位を滑らかに変化させ ることができる[18]。フィールドシェーパーを搭載したモジュールを,ゲート装置の搭 載が無しのものとして扱う。ゲート装置はフィールドシェーパーと同様に扇形のフレ ームが設けられているものを使用した。扇形のフレームという点以外でのゲート装置 の仕様は 3.6 節で述べたもの同様となっている。増幅用 GEM と PC ボードは 4.1 節で 述べたものと同様のものを使用した。





図 41 GEM モジュール(左:GEM 型ゲート装置搭載,右:フィールドシェーパー搭載)





図 42 フィールドシェーパー (右図はフィールドシェーパーの断面図)

# 高圧電源と抵抗ボックス、チェーン抵抗

高圧電源は CAEN 製の負電源を用いた。電源と増幅 GEM との間には 4.1 節で述べたものと同様の保護回路(図 16)が入っている。電源とフィールドシェーパーとの間には図 43のような保護回路が入っている。また,GEM 型ゲート装置には図 44のようなチェーン抵抗を設置し分圧して電位差を与えている。例として左図にゲート装置の電位差が 0 V,右図が+3.55 V のときの抵抗の配置およびゲート装置の電極に印加される電圧値を示す。ゲート装置に電位差を与える際は抵抗を追加していく。



図 43 保護回路 (フィールドシェーパー用)



図 44 チェーン抵抗

#### 電圧・電場設定

図 45 に本実験で使用した各領域の電場およびガス増幅用 GEM の電圧,各電極の印 加電圧値を示す。増幅用 GEM の 1 枚目(カソード側)の電位差を 355 V,2 枚目(ア ノード側)の電位差を 315 V とした。ドリフト領域では電場を 230 V/cm,インダクシ ョン領域では 2700 V/cm とした。トランスファー領域は 900 V/cm に設定する予定だ った。当初は増幅用 GEM の 1 枚目(カソード側)の電位差を 350 V,2 枚目(アノー ド側)の電位差を 315 V としていたが,ゲインが小さかったため 1 枚目(カソード側) の電位差を 355 V に変更した。しかし全体的に電圧が上がってしまうため図のような 印加電圧となったことで実際のトランスファー領域の電場は 887.5 V/cm と若干小さく なっている。アノードを 0 V として基準とし各電極に電圧を印加した。ダミーモジュ ールと 7th ストリップ(シールド)には-1781 V 印加した。



図 45 電圧·電場設定

# PCMAG

図に本試験で使用した PCMAG (super conducting solenoid magnet: 超伝導ソレノ イド磁石)を示す。PCMAG の中に TPC 大型プロトタイプを挿入する。480 A の電流 を流すことで 1 T の磁場を発生させることができる[15]。PCMAG の内側に液体ヘリウ ムのタンクがあり冷却することでソレノイドコイルの温度を保持する。PCMAG の下 にステージがあり, z 方向に動かすことや、 $\theta$ 方向、 $\phi$ 方向に回転させることができ電子 ビームの入射位置の調整をする。PCMAG のステージの動作はコントロール室から遠 隔操作できる。



図 46 PCMAG (TPC 大型プロトタイプが挿入されている)

# 電子ビーム

本試験では 5 GeV の電子ビームを用いた。DESYII 加速器からの電子ビームを使用 する[13]。電子ビームが照射される手前にシンチレーションカウンターが設置される。 シンチレーションカウンターはシンチレータと PMT (Photo Mutiplier Tube:光電子 増倍管)から構成され,図 48 に示すように 4 台配置される。シンチレーションカウン ターをトリガーとして使用している。



図 47 DESYII加速器とテストビームエリアの概略図



図 48 シンチレーションカウンター (右図は正面から見たシンチレーションカウンター)

# 荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子が TPC 内のガス中を通過するとき,ガス分子の電子と電磁相互作用(クー ロン相互作用)を起こし電離電子を放出する。次々と電離していきエネルギー損失が起 こる。荷電粒子のエネルギー損失は(5.1)式のようなベーテ・ブロッホの式で表され る。

$$-\frac{dE}{dx} = K \frac{Z\rho}{A\beta^2} \left( \ln \frac{2mc^2\beta^2 E_M}{I^2(1-\beta^2)} - 2\beta^2 \right) \ , \ K = \frac{2\pi N z^2 e^4}{mc^2}$$
(5.1)

Z:物質の原子量,ρ:媒質の物質密度,A:物質の原子番号 β:荷電粒子の相対論的速度,m:電子の質量,c:光速,I:有効電離ポテンシャル N:アボガドロ数,z:荷電粒子の電荷,e:電荷素量

 $E_M$ は相互作用し合う 2 つの粒子が相対論的に受け渡すことのできる最大エネルギーであり(5.2)式のように表される。

$$E_M = \frac{2mc^2\beta^2}{1-\beta^2} \tag{5.2}$$

荷電粒子が気体等の薄い物質中を通過すると、エネルギー損失の分布(信号電荷分布) はエネルギー損失の大きいほうにテールを引くような非対称な分布(ランダウ分布)とな る。この分布のピーク値は MPV (Most Probable Value)と呼ばれ平均値より小さい値を とる。

#### 読み出しエレクトロニクス

読み出しエレクトロニクスとして ALTRO DAQ システムを用いた。PC ボード裏面 の読み出しコネクタからカプトンケーブルで FEC (Front End Card) ボードへ接続す る。FEC ボード1枚につきコネクタは4つ接続できる。本試験では放電対策として PC ボードと FEC の間にプロテクションカードを介して接続をおこなった。FEC には PASA (pre-amplifier shaper-amplifier: 前置増幅波形整形器) や ALTRO チップが 8 枚搭載されている。ALTRO チップには ADC や RAM (Random Access Memory) が 使用されている。ADC は 10 bit のものでサンプリング周波数が 20 MHz でありペデス タル補正やゼロサプレッションが可能となっている[15]。A/D 変換された信号はディジ タル回路や RAM を介して RCU (Readout Control Unit) で PC ヘデータ転送される。 エレクトロニクスの動作は発熱が伴うためコンプレッサーで送風することで冷却する。



図 49 読み出し回路の概略図



図 50 読み出しエレクトロニクスが搭載された TPC (LP1)





図 51 プロテクションカード 図 52 FEC とプロテクションカード



図 53 FEC に搭載された 2 つの RCU (この手前にエレクトロニクスの電源ケーブル等が配置される)

#### 5.2 電子透過率の評価

磁場1Tにおいて、ゲート装置の電位差が3.55Vの時の電子透過率を、電子ビーム を用いて検証した。また、ドリフト距離を変化させて検証した。PCMAGのステージを 動かしてドリフト距離を12.5~550 mm に変化させながら測定する。このとき電子ビ ームの入射角は0°としている。GEM モジュールは図54の3番にゲート装置搭載モ ジュール、0番にフィールドシェーパー搭載モジュールを挿入した。しかしこの2つの モジュールではゲインが異なったためゲインが等しい状態で比較するために、初回の 計測を終えた後にゲート装置を外しフィールドシェーパーに乗せ変えて(増幅用GEM のペアは同じものを使用)また3番に挿入し計測をおこなった。読み出しコネクタは 図55の線で囲まれた箇所に接続した。読み出しパッド列の番号は、モジュール0の下 の列から縦(r)方向にモジュール3に向かって0,1,2,~,55のように番号が振られるもの とする。



図 54 モジュールの挿入箇所



図 55 読み出しコネクタの接続箇所(カソード側から見た箇所) (左:モジュール番号3,右:モジュール番号0)

# 電子透過率の導出

同じ増幅 GEM のペアでゲート装置を搭載モジュールとフィールドシェーパー搭載 モジュールで比較することで電子透過率を算出する。図 56 にドリフト距離が 25 mm のときの信号電荷分布を示す。左側がゲート装置,右側がフィールドシェーパーを搭載 した時の信号分布を示す(両者ともにモジュール番号 3,パッド列 44 番目 (PC ボード 単体ではパッド列 17 番目))。ランダウ関数でフィッティングをおこない,ゲート装置 搭載時の信号電荷分布のピーク (peak1) とフィールドシェーパー搭載時の信号電荷分 布のピーク (peak2) を (5.3) 式に代入して電子透過率を求めた。

(電子透過率) = 
$$\frac{peak_1}{peak_2} \times 100 \, [\%]$$
 (5.3)



図 56 信号電荷分布(ドリフト距離が 25 mm) (左:ゲート装置搭載,右:フィールドシェーパー搭載)

# 実験結果

# 信号電荷分布

図 57 にゲート装置を搭載した時,図 58 にフィールドシェーパーを搭載した時の 測定で得られた信号電荷分布を示す。電荷分布は大きいエネルギー損失のほうヘテ ールを引くランダウ分布となっている。



図 57 ゲート装置搭載時に得られた信号電荷分布 (モジュール 3, パッド列 44 番)



図 58 ゲート装置搭載時に得られた信号電荷分布 (モジュール 3, パッド列 44番)

#### 電荷量のドリフト距離依存性

図 59 にゲート装置を搭載した時,図 60 にフィールドシェーパーを搭載した時の 信号電荷量のドリフト距離依存性を示す。ゲート装置有りの場合のほうがゲート装 置無しの場合(フィールドシェーパー搭載)に比べて電荷量が小さくなっている。



図 59 ゲート装置搭載時の電荷量のドリフト距離依存性 (r---の数字はデータ番号を示す,測定の順番が分かる(以下同様))



図 60 ゲート搭載時の電荷量のドリフト距離依存性

#### 電子透過率のドリフト距離依存性

図 61 に電子透過率のドリフト距離依存性を示す(モジュール 3, パッド列 44 番 目)。磁場の影響により,磁場 0 T で測定した時よりも電子透過率は低くなる。ドリフト距離が小さいと電子透過率は高くなっている。透過率は全体的に 80%程度となっているが,ドリフト距離ごとにばらつきがある。TPC 内部の圧力や温度が電荷に影響を与えている可能性があるため補正をする必要がある。



図 61 電子透過率のドリフト距離依存性

#### 電荷量のパッド列依存性

図 62 にゲート装置を搭載した時,図 63 にフィールドシェーパーを搭載した時の 信号電荷量のパッド列依存性を示す(ドリフト距離 2.5 cm,モジュール 3)。このよ うな形状の分布になるのは GEM の電極ギャップ部分の電場の歪みの影響であると 考えられる。端の列で電荷が特に減少しているのは GEM フレーム部分の電場の歪 みの影響だと考えられる。ゲート装置が有りの場合でも無しの場合でも電荷分布は 同様な形状になる。



図 62 ゲート装置搭載時の電荷量のパッド列依存性



図 63 フィールドシェーパー搭載時の電荷量のパッド列依存性

# 電子透過率のパッド列依存性

図 64 にドリフト距離が 2.5 cm の時の電子透過率のパッド列依存性を示す。透過 率は全体的に 80%程度となっている。電荷分布で見られた形状が若干見られる。図 65 に他のドリフト距離の電子透過率のパッド列依存性を示す。端部分での電子透過 率が他の列と大きく異なるのは電場の歪みの影響と考えられる。



Drifft Length [mm]

12.5

 $\bigcirc$ 

Ο

Ο

<u>0</u> 

O



# 第6章 結論および今後の展望

本研究では,ILC 実験用 TPC のために開発された GEM 型ゲート装置の特性評価をおこ なった。特性評価として、<sup>55</sup>Fe 線源、レーザーを用いたゲート装置の電子透過率の測定と 電子ビームを用いた照射試験をおこなった。

磁場0Tにおいて、ゲート装置が開状態の場合では電子透過率は最大で約86%となる。 閉状態では電子透過阻止率は増加していく。ゲート装置の電位差が-15.5Vの時電子透過阻 止率は99.97%以上であった。陽イオンは電子より強磁場下での拡散が小さいため、陽イ オンに対する透過阻止率は電子の場合より大きいことが期待できる。また、電子を止める必 要がある TPC でもゲート装置として使用できる可能性がある。

電子ビームを用いた照射試験の結果,磁場の影響により,磁場0Tで測定した時よりも電 子透過率は低くなる。ゲート装置の電子透過率は80%程度となっているが,ドリフト距離 ごとにばらつきがあり,TPC内部の圧力や温度が電荷量に影響を与えている可能性がある。 それら影響を考慮して,正確な透過率を得ることが課題である。また,パッド列ごとに電荷 のばらつきが見られ,GEMの電極ギャップ部分やGEMフレーム部分の電場の歪みの影響 と考えられる。電子透過率においても同様にパッド列ごとにばらつきが見られた。

今度の展望として,陽イオン阻止率のゲート装置の電位差依存性や高磁場(3.5 T)にお ける電子透過率の調査をしていきたい。

# 参考文献

 [1] Ties Behnke, James E. Brau, Brian Foster, Juan Fuster, Mike Harrison, James McEwan Paterson, Michael Peskin, Marcel Stanitzki, Nicholas Walker, Hitoshi Yamamoto (2013)
[THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER. Technical Design Report ],

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg (Germany)

[2] 村山斉, ロルフ・ホイヤー, ファビオラ・ジャノッティ, リン・エヴァンス, 鈴木厚人, 山崎直子, 山下了, 山本明, 早野仁司, 照沼信浩, 田内利明, 山本均, 吉岡正和 (2014) 『宇宙を創る実験』株式会社集英社

[3] M. A. Thomson, (2009) 「Particle Flow Calorimetry and the PandoraPFA Algorithm」 NIM A611, 25

[4] D. Nygren, (1975) [The time-projection chamber], PEP-198

[5] R.L. Gluckstern, (1963) [Uncertainties in track momentum and direction, due to multiple scattering and measurement errors] NIM A 24, 381

[6] F. Sauli, (1997) 「GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors」 NIM A386, 531

[7] F. Sauli, 「GAS ELECTRON MULTIPLIER」 <u>http://fabio.home.cern.ch/fabio/</u>

[8] F. Sauli, L.Ropelewski, P.Everaerts (2006)「Ion feedback suppression in time projection chambers」 NIM A 560, 269

[9] D.Arai, K.Ikematsu, A.Sugiyama, M.Iwamura, A.Koto, K.Katsuki, K.Fujii, T.Matsuda(2016) [Development of Gating Foils To Inhibit Ion Feedback Using FPC Production Techniques] EDP Sciences

[10] 池松克昌(2016)「ILC 実験のための高電子透過 GEM 型陽イオンゲート装置を備えた TPC 端部モジュールの開発」(物理学会春季大会発表資料)

[11] Review of Particle Physics (2016) C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin.Phys. C

[12] Katsumasa Ikematsu (2014) [Development of large-aperture GEMs as a gating device of the ILC-TPC for blocking positive ion feedback]
DOI: 10.1109/NSSMIC.2014.7431237

[13] DESY, 「Beam Generation」 https://particle-physics.desy.de/e252106/e252106/e252211

[14] 青座篤史(2008) 修士論文「GEM を用いたゲート装置の開発」 佐賀大学

[15] 山口博史 (2010) 修士論文「ILC 実験用 TPC 大型プロトタイプの性能評価」 佐賀大学

[16] 八川怜 (2013) 修士論文「紫外線レーザーシステムによる LC-TPC 用 GEM モジュー ルの性能評価」東京農工大学

[17] 小澤美紀 (2014) 卒業論文「ガス電子増幅器 (GEM) を用いた飛跡検出器 (TPC) の 開発」広島大学

[18] 川口知彦 (2015) 修士論文「時間投影型飛跡検出器 (TPC)」のための紫外レーザーを 用いた試験モジュールの性能評価」広島大学

[19] Glenn F.Knoll, 神野郁夫,木村逸郎,阪井英次共訳 (2013) 『放射線ハンドブック (第4版)』オーム社

[20] Fabio Sauli (2014) [Gaseous Radiation Detectors –Fundamentals and Applications] Cambridge University