修士論文

LEPS2におけるハドロン光生成反応実験のためのDrift Chamberの開発

京都大学大学院理学研究科

物理学宇宙物理学専攻 物理学第二教室

原子核ハドロン物理学研究室

橋本敏和

2013年1月28日

概 要

現在 SPring-8 において建設が進められている LEPS2 はハドロン光生成反応実験のための新たな γ 線 ビームラインである。LEPS2 では γ 線の生成に逆コンプトン散乱を利用しており、最大3 GeV の γ 線 を 10⁶/s の強度で得られる。これは既存の LEPS と比べておよそ 10 倍のビーム強度である。また検出 器の立体角範囲は、LEPS で覆っていた超前方領域から後方まで拡張されている。これにより LEPS よ りも高統計、広範囲での研究が可能になり、ハドロン物理の大きな問題であるクォークの閉じ込めや質 量獲得機構の解明などを行う。

LEPS2の検出器は反応によって生じた終状態の粒子をすべて検出するためにほぼ 4π を覆っている。 この中で、Drift Chamber は超前方領域で高運動量の粒子を検出する重要な検出器であり、前方 5 度から 30 度までの範囲を覆っている。側方、後方領域は Time Projection Chamber(TPC) で検出する。Drift Chamber は合計 4 台作られる予定である。

本研究では前方粒子の飛跡検出器として Drift Chamber の開発を行った。検出器の性能として、1 T の磁場中で $\Delta p/p = 1\%$ の運動量分解能が必要とされる。そのために必要な位置分解能は 150 μ m であ る。位置分解能の悪化を抑えるためにチェンバーの張力と自重によるワイヤーのたるみをできる限り小 さくする必要がある。今回はワイヤーのたるみ 100 μ m 以下を目標とした。また外層の飛行時間検出器 の位置の要請からチェンバーの最大外径は 1600 mm 以下である必要がある。この 2 つの条件を満たし た上で有感領域が最大となるように設計を行い、最終的に六角形のメインフレームと補強用のフレーム を合わせた形を採用した。この設計で得られた有感領域は直径 1280 mm である。1 つのチェンバーにつ き 6 層の面があり、2 面ごとに異なる方向にワイヤーが張られている。ワイヤーの方向はそれぞれ X(0 度)、U(60 度)、V(-60 度)となっている。チェンバーのドリフト領域の構造は1 辺 16 mm の正方形型セ ル構造となっており、センスワイヤーとポテンシャルワイヤーが 8 mm おきに交互に張られている。本 研究では実機のうちの1 つを製作し、LEPS の γ 線ビームを鉛に入射して生成した約 1 GeV の陽電子 を用いて、位置分解能の評価試験を行った。検出効率がプラトー領域になるよう印加電圧の最適化を行 い、チェンバーに対して垂直に陽電子を入射した。入射した陽電子の直線トラッキングを行い、130 μ m という位置分解能を得た。これはLEPS2 の要求性能を満たしている。またチェンバーを回転させて陽 電子の入射角度を変え、位置分解能の入射角依存性を調べた。

本論文では、実機の設計と性能評価の詳細な報告を行う。

目 次

第1章	LEPS2 プロジェクトの概要	1
1.1	SPring-8	1
1.2	逆コンプトン散乱....................................	1
1.3	LEPS2 ビームライン	2
1.4	LEPS2 検出器	2
1.5	LEPS2 で行われる物理	4
	1.5.1 ペンタクォーク	4
	1.5.2 Θ^+ の歴史的背景	4
	1.5.3 LEPS2 におけるペンタクォーク探索実験	4
第2章	Drift Chamber の設計	6
2.1	Drift Chamber の動作原理	6
2.2	ガス	6
2.3	クーロン多重散乱....................................	7
2.4	Drift Chamber の設計	8
	2.4.1 Drift Chamber の要求性能	8
	2.4.2 ワイヤーの構造	8
	2.4.3 フレームの構造	9
	2.4.4 全体の構造	10
2.5	チェンバーの変位....................................	10
2.6	信号の読み出し....................................	14
2.7	Garfield を用いたシミュレーション	16
第3章	プロトタイプの位置分解能測定	19
3.1	評価試験の目的	19
3.2	実験のセットアップ	19
3.3	検出効率	21
3.4	直線トラッキングによる飛跡の再構成................................	22
3.5	xt-curve	23
3.6	位置分解能	27
第4章	実機の位置分解能測定	29
4.1	評価試験のセットアップ	29
4.2	検出効率	32
4.3	xt-curve	33
4.4	位置分解能	36
第5章	考察	41
5.1	シミュレーションとの比較	41
5.2	複数のセルをヒットしたトラックによる影響	42

	5.3	xt-curve の妥当性	43
第	6章	まとめ	46
謝	谢辞。		47
付	録 A A.1 A.2	Drift Chamber における tracking 2 次元での tracking	48 48 49
付	録 B	位置分解能の導出方法	51
付	録 C	位置分解能の信号の大きさによる影響	52

図目次

1.1	SPring-8 の全体図	1
1.2	LEPS2 ビームライン	2
1.3	LEPS2 検出器	3
1.4	LEPS2 のソレノイド磁石	3
1.5	LEPS における n K^+ の invariant mass 分布	5
1.6	CLAS における p K^- の missing mass 分布	5
1.7	LEPS と CLAS の覆う角度領域	5
2.1	Ar+isoC ₄ H ₁₀ (70:30) ガスの電子のドリフト速度と電場の関係	7
2.2	クーロン多重散乱による粒子の軌道変化の様子 [7]	8
2.3	チェンバーの1面の断面図..................................	9
2.4	メインフレームの写真	9
2.5	サポートフレームの写真	9
2.6	メインフレームとサポートフレームを合わせたもの	9
2.7	持ち運び用治具の写真・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
2.8	2層が重なった様子1	0
2.9	各方向にワイヤーが張られた様子 1	0
2.10	6層の断面図	1
2.11	同方向のフレームを重ねあわせた時の図。 1	1
2.12	最外面のガスフレーム 1	1
2.13	ワイヤー位置の変位	2
2.14	圧力解析時の力の方向	2
2.16	重力解析時の力の方向	2
2.15	1 層での張力による歪みの図 1	3
2.17	読み出し基板の写真	4
2.18	プリアンプ	4
2.19	チェンバーに読み出し基板が設置された様子	5
2.20	センスワイヤー付近での等電位面	<u> </u>
2.21	センスワイヤー付近での陽電子のドリフトライン	7
2.22	ドリフト距離 x と到達時間 t の関係	8
		Č
3.1	プロトタイプチェンバーの写真 1	9
3.2	実験のセットアップの様子2	0
3.3	チェンバーの座標と実験室系の座標の対応図 2	0
3.4	今回の試験での検出効率 2	1
3.5	ワイヤーのみのフィッティング2	2
3.6	左右を決めるフィッティング 2	2
3.7	最終的なフィッティング 24	3
3.8	入射角5度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図2	4
3.9	入射角 48 度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図2	5

3.10	入射角5度での5面フィットでの残差分布 26
3.11	入射角5度でのY面における残差分布の図 27
3.12	位置分解能角度依存性の図
4.1	制作された実機の写真 29
4.2	実験のセットアップの様子30
4.3	チェンバーの座標と実験室系の座標の対応図 30
4.4	実験のトリガー領域と電子陽電子の通過領域予想図 31
4.5	各印加電圧での検出効率
4.6	入射角1度におけるドリフト距離とドリフト時間の相関図
4.7	入射角 29 度におけるドリフト距離とドリフト時間の相関図 34
4.8	入射角1度における5面フィットでの残差分布 35
4.9	センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 200 V 時の X 面における残差分布の図 . 36
4.10	センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 0 V 時の各面における位置分解能角度依
	存性の図
4.11	センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 100 V 時の各面における位置分解能角度
	依存性の図
4.12	センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 200 V 時の各面における位置分解能角度
	依存性の図
4.13	センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 300 V 時の各面における位置分解能角度
	依存性の図
5.1	シミュレーションで求めた位置分解能角度依存性の図
5.2	1つのセルのみが鳴った時のX面での残差分布42
5.3	2つのセルが鳴った時のX面での残差分布 43
5.4	入射角1度におけるドリフト距離の分布 44
5.5	入射角 29 度におけるドリフト距離の分布 45
C.1	Time Over Thresold の様子 52
C.2	入射角1度における TOT 分布
C.3	入射角 29 度における TOT 分布 53
C.4	TOT の違いによる残差分布の変化 54

表目次

2.1	Drift Chamber の仕様	10
2.2	圧力変位の解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
2.3	重力変位の解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
2.4	プリアンプの仕様....................................	14
5.1	1 セルのみ通過したイベントの入射角ごとの割合	42

第1章 LEPS2プロジェクトの概要

LEPS2(new Laser Electron Photon experiments at SPring-8) とは現在、大型放射光施設 SPring-8に おいて建設が進められているハドロン光生成反応実験用の新たな高輝度 γ 線ビームラインである。LEPS2 は既存の LEPS とくらべて 10 倍のビーム強度を持ち、LEPS よりも大立体角の検出器を擁している。 LEPS2 では光生成反応を用いてハドロン物理の大きな問題であるクォークの閉じ込めや質量生成機構に ついて研究が行われる予定である。今回、スペクトロメーターの内、前方用の飛跡検出器として Drift Chamber の開発を行った。本論文では Drift Chamber の設計・開発について説明し、評価試験で達成 された性能の評価を行う。

1.1 SPring-8

SPring-8(Super Photon ring-8 GeV) は兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の大型放射光施設である (図 1.1)。蓄積リング中を約8 GeV/c の電子が蓄積され、その電子が磁場中を通る際に生じる放射光を用いて物質科学・地球科学・生命科学・環境科学・産業利用など様々な分野で研究が進められている。



図 1.1: SPring-8 の全体図

1.2 逆コンプトン散乱

LEPS2 では蓄積リング中の電子にレーザー光を入射し、逆コンプトン散乱させる事でγ線ビームを得 ている。蓄積リング中の電子のエネルギーを *E*_e、速度を β、入射レーザー光のエネルギーを *E*_γ、電子 の進行方向との角度を θ_1 、得られた γ 線ビームと電子との角度を θ_2 とすると γ 線ビームのエネルギー E'_{γ} は、

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}(1 - \beta \cos\theta_1)}{(1 - \beta \cos\theta_2) + \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}(1 - \cos(\theta_1 - \theta_2))}$$

となる。LEPS2 では 16 W の 266 nm のレーザーを用いることで最大 3 GeV のエネルギーを持つ γ 線 を 10⁶/s のビーム強度で、128 W の 351 nm のレーザーを用いることで最大 2.4 GeV のエネルギーを持 つ γ 線を 10⁷/s のビーム強度で得られる。

1.3 LEPS2 ビームライン

LEPS2 ビームラインの全体図を図 1.2 に示す。LEPS2 では蓄積リングに4本ある 30 m の長直線ビー ムラインを用いる。長直線部では電子の角度発散が 14 μrad と非常に小さい為、γ線ビームの発散も抑 えられ蓄積リングから 150 m 離れた屋外に検出器を設置しても ±6 mm といった実験可能なビームサイ ズを得られる。蓄積リング棟外に検出器を置くことによって検出器の大型化が可能となる。



図 1.2: LEPS2 ビームライン

1.4 LEPS2 検出器

LEPS2の検出器を図 1.3 に示す。 ソレノイド磁石はアメリカのブルックへブン国立研究所で K 中間子 稀崩壊実験 E787/E949 実験で用いられていたものを使用する (図 1.4)。このソレノイド磁石は幅 2.2m、 内径 2.96m で中心磁場は 1T である。荷電粒子の飛跡検出を Drift Chamber と TPC Time Projection Chamber) で行う。TPC は前方 30 度から 120 度までの側方領域を、Drift Chamber は前方 30 度までを それぞれ覆っている。Drift Chamber に関する詳細は第2章で述べる。粒子識別には 30 度より後方領域 を RPC (Resistive Plate Chamber) が、30 度より前方領域を TOP (Time Of Propagation) カウンター がそれぞれ行う。 γ 線の検出とエネルギーの測定は側方の Barrel γ カウンターが行う。



図 1.3: LEPS2 検出器の様子。



図 1.4: LEPS2 で用いるソレノイド磁石

1.5 LEPS2 で行われる物理

LEPS2ではバリオンおよびメソンの構造とそれらの間に働く力をクォークのレベルで理解することに より、クォークの閉じ込め機構やカイラル対称性の自発的破れに伴う質量生成機構の研究などを行う予 定である。より具体的にはクォークモデルからでは説明できない可能性のある A(1405)の構造をベクト ル中間子 K*を伴う生成反応によって調べる実験、1 個の反ストレンジネスクォークと4 個のクォーク からなるペンタクォーク Θ⁺の探索実験、原子核中で η/を生成し、カイラル対称性の部分的回復による 原子核中での質量変化を研究する実験等がある。その中の1 つであるペンタクォーク探索実験について 述べる。

1.5.1 ペンタクォーク

強い相互作用を記述する QCD 理論においてクォークやグルーオンはカラーと呼ばれる量子数を持って おり、全てのハドロンはカラー1 重項状態であることを要請される。QCD 理論の有効模型であるクォー ク模型ではハドロンは3 つのクォークからなるバリオンとクォーク反クォーク対からなるメソンに分類 され、実際の粒子に対して非常によく成り立っている。しかし、QCD 理論では、4 個以上のクォーク、 反クォークからなる粒子の存在は否定されておらず、テトラクォーク、ペンタクォーク、ダイバリオンと いったエキゾチックな粒子の存在が予言されている。これらの粒子はクォークの閉じ込め問題の研究に 対して重要な役割を持っている。

1.5.2 Θ⁺の歴史的背景

 Θ^+ はストレンジネス数 S=1を持つバリオンなので最低でも4つのクォークと1つの反sクォークが 構成に必要である。このようなペンタクォークは一般的にバリオンとメソンに崩壊し幅の広い共鳴状態を 持つことになると予想され探索が行われてきた。しかし 1997 年に Diakonov,Petrov,Polyakov らによっ て幅の狭い状態として予言された [1]。このとき予言された質量は 1530 MeV/ c^2 、崩壊幅は 15 MeV/ c^2 以下である。

その後、2003 年に LEPS グループによって Θ^+ の存在が報告された [2]。これを機に、様々な実験で Θ^+ の存在が確認され、 Θ^+ の狭いピーク構造が得られた。LEPS グループも 2009 年に統計量を 3 倍に 増やした結果が報告され Θ^+ の構造を確認している (図 1.5)[3]。

一方で Θ^+ の存在が確認されないという実験結果も報告されており、 Θ^+ の存否について未だに結論 を得られていない。特に興味深いのが2006年に発表された CLAS 実験の結果である (図 1.6)[4]。この実 験は LEPS と同様に光生成反応を用いたものであり、 γ 線のエネルギーも同程度であるが、実験結果が LEPS と異なり Θ^+ が確認されなかった。

1.5.3 LEPS2 におけるペンタクォーク探索実験

上記で述べたように LEPS と CLAS で異なる結果が得られている。この 2 つの実験の違いとして検出 器が覆う立体角の範囲が異なる点が挙げられる。LEPS では前方部分のみを、CLAS では後方部分のみ を覆っている (図 1.7)。よって $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ 反応で生じた K^- の散乱角度によって生成断面積に違いが 生じていると考えれば LEPS と CLAS の結果を無矛盾に説明できる。LEPS2 ではスペクトロメーター が全立体角を覆っているので CLAS の後方領域まで含めた実験を行うことができ、生成断面積の強い角 度依存性が確認されれば LEPS と CLAS の結果を統一的に理解することができる。

LEPS2 では最大 3.0GeV の γ 線を液体重水素標的に入射し、 $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ 反応によって Θ^+ を生成 する。生成された Θ^+ が $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ の反応で崩壊して生じる π^+, π^-, p を同時に測定し、そ の不変質量から Θ^+ を探索する。この反応を用いる主な理由は ϕ 中間子からのバックグラウンドを落と





図 1.6: CLAS における p K^- の missing mass 分布。 図 1.5: LEPS における n K^+ の invariant mass 分布 黒点が過去の実験でのデータで、ヒストグラムが 2006年のデータ。



図 1.7: 左が LEPS の覆う角度領域、右が CLAS の覆う角度領域.

すことにある。LEPS や CLAS で今まで研究されてきた $\gamma d \rightarrow pK^+K^-n$ 反応の終状態は ϕ 中間子の生 成反応 $\gamma d \rightarrow pn\phi \rightarrow pK^+K^-n$ における終状態でもある。

第2章 Drift Chamber の設計

本章では Drift Chamber の動作原理について述べ、製作した実機の設計を記す。

2.1 Drift Chamber の動作原理

Drift Chamber はガス中での電子のドリフトを利用した位置検出器で一般的にガスを充填する容器と それに張られたワイヤーからなる。ワイヤーには電極として使用されるアノードワイヤー (センスワイ ヤーともいう)やカソードワイヤー (ポテンシャルワイヤーともいう)がある。ワイヤーに電圧を印加さ せることで検出器内に電場が発生する。荷電粒子が検出器を通過する際に媒質のガス分子と衝突、電離 させ、電子イオン対を生成する。電離した電子は電場によってセンスワイヤーへと導かれ、ワイヤー近 傍の強い電場によって加速されてガス分子を電離させる。新たに電離した電子も高電場によって加速さ れ、再びガス分子を電離させる。これを繰り返すことで電子が増幅され (電子なだれ)、信号が生成され る。

荷電粒子の入射時刻を t₀、センスワイヤーで信号が検出される時刻を t₁、電子のドリフト速度を u と すると電子のドリフト距離 x は次のように表すことができる。

$$x = \int_{t_0}^{t_1} u dt$$

電子のドリフト速度はガス分子との衝突や電磁力に影響される。特に磁場がない場合、電子はガス分子 よりも軽いので、衝突による等方的な散乱を繰り返しながら巨視的には電場にそってドリフトする。電 子が電場によって得たエネルギーと衝突によるエネルギー損失が等しくなることでドリフト速度はほぼ 一定となる。典型的なドリフト速度の値は5 cm/µs である。実際にはチェンバー内での電場は一定では ないのでドリフト速度も一定にはならないが、求めるドリフト領域内で速度が一定になるよう適切なガ スや印加電圧を選択する [5]。

2.2 ガス

前述のようにドリフトチェンバー内にはガスを充填させるがそのガスは大きく2種類にわけられる。1 つは荷電粒子によって電子を放出し、増幅を行う媒質ガス(base gas)である。base gas には主に衝突の エネルギーを電離エネルギーに効率よく変換できる単原子分子が用いられる。その中でもコストが低く、 イオン化の効率が良い Ar がよく用いられる。しかし、純粋な希ガスだけでは検出器として十分な増幅 率を得る前に放電現象を起こしてしまう。この理由は電離によって励起されたイオンが脱励起した時に 放出する紫外光によってガス増幅領域以外のガスが電離され、増幅されてしまうからである。

この問題を解決するために紫外光を吸収し、余計なガス増幅を抑える役目を持ったクエンチャー (quench gas) を加える。quech gas は光子吸収断面積の大きい多原子分子ガスである CH₄ や C₂H₆ といったもの が用いられる。これらのガスは光子を吸収し、回転や振動といった光子を放出しない励起状態に変換す ることができる。一般には多原子であるほどこういった励起状態を持つので様々なエネルギーの光子を 吸収できるが、その分物質量が増えるので多重散乱による分解能の低下を考慮しなければならない。ま た quench gas の比率が大きくなるとその分 base gas が少なくなるのでガス増幅効果が減少してしまう という欠点もある。実験での要請に合わせてガスの種類や比率、印加電圧などの最適化を行い、必要な

性能を得る。

LEPS ではドリフトチェンバーのガスとしてアルゴン (Ar) とイソブタン (isoC₄H₁₀) の 70:30 混合ガ スを用いて安定動作してきた経験から今回製作した実機でも同様の Ar+isoC₄H₁₀(70:30) ガスを用いる。 図 2.1 は Ar+isoC₄H₁₀(70:30) ガスの電場とドリフト速度の関係図である。



図 2.1: Ar+isoC₄H₁₀(70:30) ガスの電子のドリフト速度と電場の関係。広い電場領域で典型的なドリフト速度 5 cm/µs を保っている。

2.3 クーロン多重散乱

荷電粒子が物質内を通過するとき、媒質分子とのクーロン散乱が繰り返し生じる。ここの散乱はラザ フォードの公式に従い、1度の散乱による角度が小さくても何度も散乱されることによって荷電粒子の 進行方向は入射した時の方向からずれる。

クーロン多重散乱による角度分布はそれが十分小さい場合にはガウス分布に近い振る舞いをする。図 2.2 は粒子がクーロン散乱された時の様子である。 θ_{plane} が物質への粒子の入射角度と物質通過後の粒子 の進行方向とがなす角度、 ϕ_{plane} が粒子が物質を通過した際に通った入口と出口を結んだ線分と入射方 向がなす角度である。これらの関係式は以下のように表される。

$$\phi_{plane} = \frac{\theta_{plane}}{\sqrt{3}}$$

散乱の数が十分多ければ多重クーロン散乱として統計的な取り扱いができる。その際の多重散乱による 角度変更分布 θ_{plane} は

$$\theta_{plane} = \frac{13.6 \text{MeV}}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0.038 \log(\frac{x}{X_0}))$$



図 2.2: クーロン多重散乱による粒子の軌道変化の様子 [7]

と表せる。ただし βc 、p、zはそれぞれ入射粒子の速度、運動量、電荷をあらわし、x、 X_0 は通過した物質の厚さと放射長をあらわす。通過する物質層が複合物であった場合には X_0 は次のように表される。

$$\frac{1}{X_0} = \Sigma \frac{\omega_j}{X_j}$$

 ω_j 、 X_j はそれぞれ j 番目の構成物質の質量比と放射長である。クーロン散乱を抑えるためには放射長の 大きい物質を用いる必要がある。今回使用するガスである Ar と isoC₄H₁₀の放射長は 19.55 g/cm²、45.2 g/cm² である [6]。

2.4 Drift Chamber の設計

2.4.1 Drift Chamber の要求性能

LEPS2検出器の前方を覆う飛跡検出器として要求される性能は1Tの磁場中で運動量分解能が $\Delta p/p = 1\%$ である。これは4台のDrift Chamber で測定した時には位置分解能で150 μ mに対応する。位置分解能の低下を抑えるためにワイヤーの張力やチェンバーの自重によるワイヤーのたるみを可能な限り小さくする必要がある。今回はワイヤーのたるみの目標を100 μ m以下とした。また外層の飛行時間検出器の位置の要請からチェンバーの最大外径は1600mm以下にする必要がある。これら2点を満たした上で有感領域が最大になるようにチェンバーの構造を決定する。

2.4.2 ワイヤーの構造

チェンバーの構造には図 2.3 のような正方形型のセル構造を採用した。セルの一辺は 16 mm で、8 mm おきに信号検出用のセンスワイヤーと電場整形用のポテンシャルワイヤーが交互に配置されている。セ ンスワイヤーの材質は金メッキタングステン線 (Au-W) で直径は 30 μm、ポテンシャルワイヤーの材質 は金メッキベリリウム銅合金 (Au-BeCu) で直径は 80 μm である。ワイヤーの本数を減らしチェンバー に掛かる力を少なくするためにカソードには厚さ 25 μm のアルミ蒸着のマイラーを使用した。



図 2.3: チェンバーの1面の断面図。センスワイヤーとポテンシャルワイヤーが交互に配置され、正方形型のセルを作っている。

2.4.3 フレームの構造

当初、フレームの構造としは正六角形の単純なものを想定していたが最大外径とフレーム強度の要請 から有感領域が 1000 mm しか得られなかった。そこでフレーム強度を補うためのサポートフレームを 付けることで有感領域を広げることにした。また円形や十二角形といったフレームの形も想定し、最終 的に最も有感領域を得られる形として図 2.4 のようなワイヤーを張る六角形のメインフレームと図 2.5 の ような補強用のサポートフレームをあわせる構造を採用した。メインフレームは1辺が 740 mm の正六 角形型で厚さは 16 mm、サポートフレームは直径 1600 mm の円から前述の正六角形を繰り抜いた形で 厚さは 5 mm、磁場中で用いるために材質はともにアルミを使用している。両方のフレームを組み合わ せた時の様子を図 2.6 に示す。



図 2.4: メインフレームの写真



図 2.5: サポートフレームの写真



図 2.6: メインフレームとサポートフレームを 合わせたもの。図中の矢印で示されているのは 持ち運び用の治具 (図 2.7) である。



図 2.7: 持ち運び用治具の写真

2.4.4 全体の構造

1つのチェンバーにつき6層の面があり、2面ごとに異なる方向にワイヤーが張られている。同方向 を向いた2面はセンスワイヤーとポテンシャルワイヤーの位置が半セル分ずれた構造になっており(図 2.8)、ワイヤーの方向はそれぞれXX'(0度)、UU'(60度)、VV'(-60度)となっている(図 2.9)。図 2.10 は6層の断面図である。同じ方向を向いた2つのフレームを合わせて1セット(図 2.11)とし、同じ物を XX'、UU'、VV'の順に3つ重ねる。1セットは図(2.11)のような形で組み合わせる。最外面にはガス ラインとHVのコネクター設置のための厚さ5 mmのフレーム(図 2.12)を取り付け、厚さ15 μ mのエ バールフィルム((C₂H₄)_m(C₂H₃OH)_n)が貼られている。組み立てる際に持ち運び用の補強治具(図 2.7) を付けて作業を行った。理由は次の節で記す。



図 2.9: 各方向にワイヤーが張られた様子。組み 立て時には XX'UU'VV'の順に重ね合わせる。

チェンバーの仕様を表 2.1 にまとめる。

外径	ϕ 1600 mm
有感領域	ϕ 1280 mm
レイヤー数	6 (XX' UU' VV')
方向	
XX'	0度
UU'	60度
VV'	-60度
セルサイズ	$16 \mathrm{mm}$
アノードワイヤー の材質と直径	Au-W ϕ 30 $\mu {\rm m}$
ポテンシャルワイヤー の材質と直径	Au-BeCu ϕ 80 $\mu{\rm m}$
カソード膜の材質	Alminized Maylar 25 $\mu {\rm m}$
アノードワイヤーの張力	$80 \mathrm{gw}$
ポテンシャルワイヤーの張力	200 gw
読み出しチャンネル数	80 ch/layer

表 2.1: Drift Chamber の仕様

2.5 チェンバーの変位

チェンバーの圧力変位と重力変位について述べる。ここでいう変位とは図 2.13 で表される値である。 図中の点線が理想的なワイヤーの位置、実線が実際のワイヤーの位置を表している。圧力変位はワイヤー



図 2.10:6層の断面図





図 2.12: 最外面のガスフレーム

を張ることによってフレームが張力を受けて歪んだ際の変位である。図2.15は一層のみの場合での張力 による歪みの様子である。まず最初に持ち運び用補強治具を取り付けなかった状態で圧力解析を行い、 変位を確認する。1層のみの場合と2つ重ねて2層にした場合の両方で解析を行った。次に持ち運び用 補強治具を取り付けた状態で圧力解析を行い、変位がどれだけ抑えられるかを確認する。補強用治具の 付いた1層のみの場合と補強用治具付きのものと治具なしのものを重ねて2層にした場合の解析を行っ た。圧力変位の解析結果を表2.2にまとめる。補強用治具を付けることで変位を約10分の1近く抑える ことができるので組み立て時には治具を付けて作業を行う。



図 2.13: 点線が理想的なワイヤーの位置、実線が実際のワイヤーの位置を表していて、ワイヤーの中心 でのずれを変位とする。



図 2.14: 圧力解析時の力の方向

表 2.2: 上力変位の解析結

圧力変位	
1層	$0.35 \mathrm{~mm}$
2 層	$0.34 \mathrm{~mm}$
1層-補強治具付き	$0.035 \mathrm{~mm}$
2層-1層のみ補強治具付き	$0.054 \mathrm{~mm}$



図 2.16: 重力解析時の力の方向

1層治具付き 圧力変位図



図 2.15: 1 層での張力による歪みの図。矢印が張力を表す。色はフレームの歪み具合を表していて赤に 近いほど歪みが大きく、青に近いほど小さい。

重力変位はチェンバーを持ち上げた際に自重によってフレームがたわむことで生じる変位である。1層のみの場合と2つ重ねて2層にした場合の解析を行った。重力変位の解析結果を表 2.3 にまとめる。目標としていた歪み 100µm 以下を達成している。

表 2.3: 重力変位の解析結果

重力変位	
1層	0.102 mm
2 層	0.088 mm

2.6 信号の読み出し

次に読み出し部分について述べる。読み出し回路は図 2.17 の読み出し基板に図 2.18 のプリアンプを取 り付けたものを用いる。すべてのセンスワイヤーに与える電圧を1つの電源でまかなっているので電源 とワイヤーの間に抵抗を挟んでいる。抵抗がないと一本のワイヤーが鳴った時、全てのワイヤーに信号 が伝わって検出器として意味を成さなくなる。センスワイヤーにかかった電圧がアンプにかからないよ うにするためにコンデンサーを挟んでいる。プリアンプの仕様を表 2.4 に示す。読み出し基板は図 2.19 ようにチェンバーの片側面に設置され、その総数は 30 個である。



図 2.17: 読み出し基板の写真。センスワイヤー からのケーブルは抵抗とコンデンサーの間のと ころにつながっている。抵抗はセンスワイヤー 同士を分ける役割を持ち、コンデンサーはセン スワイヤーの高電圧をアンプにかからないよう にする役割を持つ。



図 2.18: プリアンプ

表 2.4: プリアンプの仕様

入力チャンネル数	16
増幅率	$300 \mathrm{~mV/pC}$
時定数	80 ns
突起物を含む全体の寸法	$63 \text{ mm} \times 77 \text{ mm}$



図 2.19: チェンバーに読み出し基板が設置された様子。円周にそって 30 個設置されている。

2.7 Garfield を用いたシミュレーション

実機のセル構造で適切な電場が得られているか Garfield[8] を用いて電場計算を行った。ドリフト長8 mmの正方形型セル構造でガスは Ar+isoC₄H₁₀(70:30) 使用した。チェンバー自体は6 層であるが1 層の構造は同じなので1 層のみについて電場計算を行った。

ワイヤーが並んでいる方向をx方向、カソード面が並んでいる方向をy方向とし、カソード面(y= 0[cm],y=-1.6[cm])は0Vとし、センスワイヤー(x=0[cm] y=-0.8[cm])の印加電圧を2400Vで 固定し、ポテンシャルワイヤー(x=-0.8[cm] y=-0.8[cm],x=0.8[cm] y=-0.8[cm])の印加電圧を変 えて電場計算を行った。図 2.20は等電位面を表した図である。等電位線は100V毎に引かれている。セ ンスワイヤー付近では等方的な電位分布が見られるがドリフト距離が5mm以上の領域ではポテンシャ ルワイヤーの印加電圧によって大きな違いが見られる。ポテンシャルが小さい場合、ポテンシャルワイ ヤー付近で電位が小さいために電場が逆向きになっている。そのためセルの端を通った粒子が正しく検 出できない可能性がある。よってポテンシャルワイヤーの値は高いほうが良いと予想される。



図 2.20: センスワイヤー付近での等電位面。ポテンシャルは左上が 0 V、右上が 100 V、左下が 200 V、 右下 300 V となっている。



図 2.21: センスワイヤー付近での陽電子のドリフトライン。ポテンシャルは左上が 0 V、右上が 100 V、 左下が 200 V、右下 300 V となっている。

図 2.22 はドリフト距離 x と到達時間 t の関係である。概ね一定の速度を保っているがポテンシャル 300 V ではセルの端で極端にドリフト速度が低下している。これはセンスワイヤーとポテンシャルワイヤー の電位差が小さいことにより電場が小さくなったためである。センスワイヤーの印加電圧を上げればこ の問題は解決できる。



図 2.22: ドリフト距離 x と到達時間 t の関係。ポテンシャルは左上が 0 V、右上が 100 V、左下が 200 V、右下 300 V となっている。

第3章 プロトタイプの位置分解能測定

LEPS2 ではドリフトチェンバーの覆う角度領域が5度から30度なので様々な入射角の粒子が入ってくる。よって粒子がチェンバーに斜めに入射した時、入射角によって位置分解能がどう変化するかを調べる必要がある。実機を制作する前にプロトタイプを用いて位置分解能の角度依存性の評価試験を行った。

3.1 評価試験の目的

プロトタイプは元々LEPS で用いられていたドリフトチェンバー (図 3.1) で、正方形型セル構造を持 ち、Y(90)、U(-30)、V(30) の 3 方向に各 2 層ずつ計 6 層から成るという LEPS2 の実機と非常によく似 た構造をしている。実機との違いはセルサイズと有感領域でありセルサイズ 14 mm、有感領域 672 mm である。このプロトタイプはほぼ垂直入射の時には 150 μm の位置分解能が得られることがわかってい たが入射角が大きい場合の測定は成されていなかった。そこで今回、粒子の入射角を5度、20度、34度、 48 度と変えて測定し、角度ごとに位置分解能を求めた。



図 3.1: プロトタイプチェンバーの写真

3.2 実験のセットアップ

評価試験は SPring-8 の LEPS ビームラインで行った。セットアップを図 3.2 に示す。tagger は逆コン プトン散乱の発生を検出する。逆コンプトン散乱された蓄積リング中の電子はエネルギーを失い、回転 半径が小さくなって蓄積リングの内側に曲げられる。この電子をシンチレーターで検出することで逆コ ンプトン散乱の発生を確認する。逆コンプトン散乱で得た1.5~2.4 GeV のγ線を鉛の板に当てて電子陽 電子対を生成し、常磁石によって磁場を与え電子と陽電子を分離する。ドリフトチェンバーの前後にあ るシンチレーターは電子がドリフトチェンバーに通過することの確認に用いた。その大きさは10 cm×10 cm である。トリガーには tagger とドリフトチェンバーの前後にあるシンチレーターのコインシデンス を用いた。図 3.3 はドリフトチェンバーのY、U、V 方向と実験室系との対応である。V 方向が実験室系 の x に対応する。また各層の並びは上流側から V'VU'UY'Y となっている。解析時には電子のみを用い るようにワイヤーの位置でカットをかけた。



図 3.2: 実験のセットアップの様子



図 3.3: チェンバーの座標と実験室系の座標の対応図

3.3 検出効率

検出効率を以下のように定義する。

検出効率 [%] =
$$\frac{その面がヒットしたイベント数}{6 面中5 面以上ヒットしたイベント数}$$

今回の試験では、印加電圧をセンスワイヤー 2200 V、ポテンシャルワイヤー 200 V で固定して実験を 行った。求めた検出効率は図 3.4 のようになっており、各面、各入射角度全てにおいて 99 % 以上を達成 している。



図 3.4: 今回の試験での検出効率。黒丸が入射角0度。赤丸が15度。緑四角が30度。青三角が45度。

3.4 直線トラッキングによる飛跡の再構成

この節では直線トラッキングの手法を述べる。この手法はは大きく3つの工程に分けられる。まずは じめに時間情報を用いずワイヤーの位置情報だけでトラッキングを行い、粒子の入射角度のおおよその 値を求める(図3.5)。図3.5では同方向の2面しか描かれていないが実際には6面全てを用いてトラッキ ングを行う。トラッキングには最小二乗法を用いた。詳しい計算方法はAppendix Aに記す。粒子が斜 め入射して隣あう2つのセルを通過した場合には、ドリフト時間の短い方、すなわちドリフト距離の短 い方のワイヤーを用いてトラッキングを行う。



図 3.5: ワイヤーのみのフィッティング

次に時間情報からドリフト距離を算出する。最初に求めた入射角の値を用いて、ワイヤーを中心とし たドリフト距離が半径となる同心円との接点を求める。この段階では粒子がワイヤーの左右どちらを通っ たかは不定性があるので各面につき2つずつフィッティング点の候補がある。全ての点の組み合わせで 直線フィットを行い、考えうるすべての直線の内、χ²の最も小さい組み合わせを採用してワイヤーの左 右どちらを通ったかを決定する(図 3.6)。



図 3.6: 左右を決めるフィッティング

最後に左右の情報を固定して直線のパラメーターが収束するまでフィッティングを繰り返す(図3.7)。



図 3.7: 最終的なフィッティング。収束するまでフィッティングを行う。

時間情報から求めたドリフト距離を L_{drift} 、フィット直線とワイヤーとの距離を L_{fit} として次のように 定義する値 L_{res} を得る。

$$L_{\rm res} = L_{\rm drift} - L_{\rm fit}$$

この値は残差と呼ばれ、位置分解能と関係する値である。

3.5 xt-curve

チェンバーから得られるのは時間情報のみなので位置情報に直す必要がある。ドリフト距離 x を到達時間 t の関数として得られる曲線を xt-curve と言う。xt-curve のパラメーターを調べるために 6 面の内、 自分自身を抜いた 5 面での直線フィッティングを各面ごとに行なう。そうして得たドリフト距離 x を到 達時間 t の 3 次関数でフィットし xt-curve のパラメーターを得る。得たパラメーターを用いて再びフィッ ティングを行う。以下十分にパラメーターが収束するまで繰り返す。パラメーターの初期値は Garfield を用いて計算した xt-plot の値を用いた。xt-curve のパラメータの最適化は入射角毎に行った。図 3.8 は 入射角 5 度の時の xt-curve の様子、図 3.9 は入射角 48 度の時の xt-curve の様子である。入射角が大き いほうが分布の幅が細くなっている。図 3.10 は入射角 5 度の時のパラメーターを最適化した後の各面の 残差分布である。残差分布は中心がほぼ 0 のガウス分布となっており、xt-curve のパラメーターが正し いと思われる。



図 3.8: 入射角5度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図

入射角5度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図。赤線はドリフト時間の3次関数でドリフト距離 をフィットした曲線。左上がY面、右上がY面、左中央がU面、右中央がU面、左下がV面、右下が V面。



図 3.9: 入射角 48 度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図

入射角48度でのドリフト距離とドリフト時間の相関図。赤線はドリフト時間の3次関数でドリフト距離をフィットした曲線。左上がY面、右上がY面、左中央がU面、右中央がU、面、左下がV面、右下がV面。



図 3.10: 入射角5度での5面フィットでの残差分布。左上がY面、右上がY'面、左中央がU面、右中央がU'面、左下がV面、右下がV'面。

3.6 位置分解能

フィッティングにより求まる値は残差分布である。これを固有の分解能に直してやる必要がある。今 回次のような手法を用いて位置分解能を求めた。

$$\sigma_{\text{intrinsic}} = \sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

 σ_1 は6面フィットでの残差分布、 σ_2 は5面フィットでの残差分布であり、相乗平均をとることで固有の 分解能 $\sigma_{\text{intrinsic}}$ を得る。この式の導出は Appendix B に記す。

図 3.11 は入射角5度における Y 面での6面フィット及び5面フィットでの残差分布である。それぞれ



図 3.11:入射角5度でのY面における残差分布の図。左が6面フィット時、右が5面フィット時のもの。 赤線はガウシアンでフィットした線。

の残差分布の値は 86.0 µm、253.2 µm であり、上記の式を用いることで 148 µm という位置分解能の値 が得られる。他の面も同様にして位置分解能を求めた。

図 3.12 は各面における入射角ごとの位置分解能を表したものである。ここでいう粒子の入射角度は実験室系での角度ではなく、各面上での座標系における角度である。x-y 平面を θ 分傾けた平面をx'-y'とすると粒子の入射角 $\frac{dx'_i}{dx}$ は以下の式で表される。

$$\frac{dx'}{dz} = \cos\theta \frac{dx}{dz} + \sin\theta \frac{dy}{dz}$$

入射角が大きくなると分解能が良くなるという傾向が得られた。また各方向毎に異なる依存性が見ら れた。



図 3.12: 位置分解能角度依存性の図。上から順に Y 方向、U 方向、V 方向.

第4章 実機の位置分解能測定

製作された実機 (図 4.1) が目標値 150 µm を達成しているか確認するために位置分解能の測定を行った。また位置分解能の角度依存性についても調べた。



図 4.1: 制作された実機の写真

4.1 評価試験のセットアップ

評価試験は SPring-8の LEPS ビームラインで行った。セットアップを図 4.2 に示す。1.5~2.4 GeV の γ 線を鉛の板に当てて電子陽電子対を生成し、中心磁場 0.7 T の電磁石によって磁場を与え電子と陽電 子を分離する。tagger は逆コンプトン散乱の発生を検出する。start はターゲットの下流側に置かれたシンチレーターで γ 線が鉛と反応して電子陽電子対が発生したことを検出する。大きさは縦 172 cm、横 780 cm、厚さ 10 cm である。TOF はドリフトチェンバーの下流に置かれたシンチレーターで大きさは 縦 200 cm、横 12 cm、厚さ 4 cm である。今回は荷電粒子の検出のみに用いた。トリガーには tagger、start、TOF のコインシデンスを用いた。生成された電子陽電子対はローレンツブーストによって超前方 にしか放出されないので磁場によるローレンツ力がかからない縦方向にはほとんど広がらない。よって TOF 検出器の縦方向の長さは 200 cm とドリフトチェンバーの垂直方向の長さよりも大きいが縦方向への制限をかけなかった。図 4.3 はドリフトチェンバーの X、U、V 方向と実験室系との対応である。U方 向が実験室系のxに対応する。また各層の並びは上流側から XX'UU'VV' となっている。ドリフトチェンバーの本来の有感領域は 1280 mm であるが今回はプリアンプを 18 個しか使用していないので今回の 実験における有感領域は 768 mm である。図 4.4 は実験のトリガー領域と電子陽電子の通過予想位置を表している。トリガー領域には陽電子しか通過しないが電子と陽電子は同じタイミングでチェンバーに

入射するので両方の分布が見えると予想される。解析時には陽電子のみを用いるようにワイヤーの位置 でカットをかけた。今回、粒子の入射角を1度、5度、11度、18度、29度と変えて測定し、位置分解能 の評価を行った。



図 4.2: 実験のセットアップの様子



図 4.3: チェンバーの座標と実験室系の座標の対応図



図 4.4: 実験のトリガー領域と電子陽電子の通過領域予想図

4.2 検出効率

プロトタイプでの実験と同様の方法で検出効率を求めた。ポテンシャルワイヤーの電圧を固定し、センスワイヤーの各印加電圧ごとに検出効率を求めた (図 4.5)。センスワイヤーが低電圧の領域ではポテンシャルの印加電圧が大きいほうが検出効率が小さくなっているがこれは電場が相対的に小さくなっているためにガス増幅率が十分な値に達していないためである。2300 V あたりからプラトー領域に入り始める。2400 V(矢印で示した部分) でどのポテンシャルワイヤーの値でもすべての面が 99 % 以上の検出効率を示している。プロトタイプでは 2200 V で十分プラトー領域に入っていたが今回はセルサイズが大きくなったのでそれに合わせて必要な印加電圧も上がっている。実験はすべての面での検出効率が 99 % を超える印加電圧の組み合わせでで行った。



図 4.5: 各印加電圧での検出効率。ポテンシャルは左上が0V、右上が100V、左下が200V、右下が300 Vとなっている。

4.3 xt-curve

プロトタイプでの実験と同様の方法で直線トラッキングを行い、xt-curveのパラメーターを最適化した。図4.6 は入射角1度の時の最適化された xt-curve、図4.7 は入射角29度の時の最適化された xt-curve である。入射角が大きいほうが分布の幅が細くなっている。図4.8 は入射角1度における最適化されたパラメータを使用した後の各面の自分自身を除いた残差分布である。残差分布は中心がほぼ0のガウス分布となっているが、xt-curveのプロットを見ると入射角1度における xt-curve はドリフト距離によっては分布の中心を通っていないように見える。よって xt-curve のパラメータは収束しているが最適化されていない可能性がある。入射角29度の時のプロットは入射角1度の時に比べれば比較的中心を通っているように見える。xt-curve の妥当性については5章で確認する。



図 4.6:入射角1度におけるドリフト距離とドリフト時間の相関図。赤線はドリフト時間の3次関数でド リフト距離をフィットした曲線。左上がX面、右上がX'面、左中央がU面、右中央がU'面、左下がV 面、右下がV'面。



図 4.7:入射角 29度におけるドリフト距離とドリフト時間の相関図。赤線はドリフト時間の3次関数で ドリフト距離をフィットした曲線。左上がX面、右上がX'面、左中央がU面、右中央がU'面、左下が V面、右下がV'面。



図 4.8: 入射角1度における5面フィットでの残差分布。左上がX面、右上がX'面、左中央がU面、右中央がU'面、左下がV面、右下がV'面。

4.4 位置分解能

プロトタイプでの実験と同様の方法で位置分解能を求めた。図 4.9 はセンスワイヤー 2400 V、ポテン シャルワイヤー 200 V、入射角 1 度における X 面での 6 面フィット及び 5 面フィットの残差分布である。 それぞれの残差分布の値は 72.3 µm、233.8 µm である。上記の式を用いることで 130 µm という値が得 られる。他の面も同様にして位置分解能を求めた。図 4.10、図 4.11、図 4.12、図 4.13 は各面における位 置分解能の角度依存性をポテンシャルワイヤーの印加電圧ごとに表したものである。ここでいう粒子の 入射角度はプロトタイプの実験時と同様に各面上での座標系における角度である。



図 4.9: センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 200 V 時の X 面における残差分布の図。左が 6 面フィット時、右が 5 面フィット時のもの。赤線はガウシアンでフィットした線。

おおよそすべての面で目標となる位置分解能の値 150 µm を達成した。入射角が大きいほうが分解能が 良くなる傾向が見られ、面毎に異なる依存性を示した。印加電圧の組み合わせではセンスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 200 V の組み合わせの時最も良い位置分解能が得られている。



図 4.10: センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 0 V 時の各面における位置分解能角度依存性の 図。上から順に X 方向、U 方向、V 方向.



図 4.11: センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 100 V 時の各面における位置分解能角度依存性の図。上から順に X 方向、U 方向、V 方向.



図 4.12: センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 200 V 時の各面における位置分解能角度依存性の図。上から順に X 方向、U 方向、V 方向.



図 4.13: センスワイヤー 2400 V、ポテンシャルワイヤー 300 V 時の各面における位置分解能角度依存性の図。上から順に X 方向、U 方向、V 方向.

第5章 考察

プロトタイプと実機の分解能の角度依存性を調べた結果、どちらも入射角が大きいほうが分解能が良 くなる傾向が見られた。また面ごとに異なる傾向が見えるなど直観に反する結果となっている。この依 存性を調べるためにモンテカルロシミュレーションとの比較や複数のセルをヒットしたトラックによる 影響などを調べた。

5.1 シミュレーションとの比較

すべての面の分解能を 140 μ m としてモンテカルロシミュレーションを行った。その結果を図 5.1 に示す。



図 5.1: シミュレーションで求めた位置分解能角度依存性の図。上から順に X 方向、U 方向、V 方向。

XX' 面および VV' 面は調べた範囲で元の位置分解能をほぼ再現している。UU' 面では角度が大きくなると若干位置分解能が元の値よりもよく出る傾向が見られた。しかし、実験で得た分解能の変化よりも小さい。

5.2 複数のセルをヒットしたトラックによる影響

粒子がチェンバーに対して斜めに入射すると隣り合うセルを鳴らすことがあり、入射角が大きくなる ほどその頻度は大きくなる。表 5.1 はトラックが引けたイベントの内、鳴ったセルが1つだけのイベン

表 5.1:1 セルのみ通過したイベントの入射角ごとの割合

入射角1度	83.8~%
入射角5度	79.5~%
入射角 11 度	73.9~%
入射角 18 度	63.8~%
入射角 29 度	49.8~%

トのU面での割合である。入射角が大きくなるほど1セルのみ通過したイベントは減る。セルが1ヒットした時のイベントで残差分布が角度によってどう違うかを調べた。図5.2は1つのセルのみが鳴った時のX面での残差分布で、図5.3は2つのセルが鳴った時のX面での残差分布である。



図 5.2:1つのセルのみが鳴った時のX面での残差分布。左上が入射角1度、6面フィットの時。右上が入射角1度、5面フィットの時。左下が入射角29度、6面フィットの時。右下が入射角29度、5面フィットの時



図 5.3:2つのセルのみが鳴った時のX面での残差分布。左上が入射角1度、6面フィットの時。右上が入射角1度、5面フィットの時。左下が入射角29度、6面フィットの時。右下が入射角29度、5面フィットの時

2つのセルが鳴った際も、1つのセルが鳴った場合も入射角が大きいほうが残差分布の幅が小さくなっている。よって複数のセルを通過した事による影響だけでは説明しきれない。図 5.2の入射角 29 度での 残差分布を見ると中心が 0 からずれている。よって xt-curve のパラメーターが正しくない可能性がある。

5.3 xt-curveの妥当性

図 5.4 は入射角1度におけるドリフト距離の分布、図 5.5 は入射角 29 度におけるドリフト距離の分布 である。xt-curveのパラメーターが正しく与えられていればドリフト距離の分布は一様になるはずであ るが図 5.4 ではワイヤー近傍のイベントがほとんど無く、ドリフト距離が4 mm 付近で分布が不連続に なっている。図 5.5 ではワイヤー近傍で不連続があるが図 5.4 に見られるような大きな不連続は見られな い。入射角1度では xt-curveのパラメーターを正しく求められていないと思われる。入射角1度の方が xt-curve が入射角 29 度の時と比べてうまく合ってない理由としては、セルの端を通過してドリフト時 間が非常に長くなるイベントが多く残りやすい点が考えられる。今回の解析ではセルフトラッキングに よって xt-curve を決めたが、より多くの測定点を用いてトラックを再構成する事で信頼性の高いトラッ ク情報を得ることができる。性能評価実験の際には LEPS で用いられている更に2つのドリフトチェン バーの情報も取得しているので、今後これらのドリフトチェンバーでトラックを再構成し、信頼性の高 い情報で xt-curve のパラメータの作成や位置分解能の評価を行なっていく。



図 5.4: 入射角1度におけるドリフト距離の分布。左上がX面、右上がX、面、左中央がU面、右中央がU、面、左下がV面、右下がV、面。



図 5.5:入射角 29 度におけるドリフト距離の分布。左上が X 面、右上が X' 面、左中央が U 面、右中央 が U' 面、左下が V 面、右下が V' 面。

第6章 まとめ

SPring-8 において建設が進められている LEPS2 実験で用いるためのドリフトチェンバーの開発を行った。検出器の性能として、1 T の磁場中で $\Delta p/p = 1\%$ の運動量分解能が必要とされる。そのために必要な位置分解能は 150 µm である。今回作成したドリフトチェンバーの有感領域は内径 1280 mm の六角形で、XX'(0 度)UU'(+60 度)VV'(-60 度) の 6 面で構成される。チェンバーのドリフト領域の構造は 1 辺 16 mm の正方形型セル構造となっており、センスワイヤーとポテンシャルワイヤーが 8 mm おきに交互に張られている。位置分解能の悪化を抑えるためにチェンバーの張力と自重によるワイヤーのたるみをできる限り小さくする必要がある。今回はワイヤーのたるみ 100 µm 以下を目標とした。ドリフトチェンバー製作の際にワイヤー面に掛かる張力を支えるため補助用の治具を用いることでたわみを抑えた。

本研究ではドリフトチェンバーのプロトタイプと実機のうちの1つを用いて検出効率と位置分解能の 角度依存性を詳しく調べた。LEPSの γ 線ビームを鉛に入射して生成した約1 GeV の陽電子を用いて性 能評価を行った。有感領域にはAr + isoC₄H₁₀(70:30)の混合ガスを用いた。センスワイヤー 2400 V で 検出効率がプラトー領域に入ることを確認した。入射粒子のワイヤー面に対する角度を変化させて位置 分解能を測定した。全角度において目標の150 μ m より良い結果を得た。角度依存性として入射角度が 大きいほど位置分解能が良くなるという傾向が見られた。この理由については今後詳しく調べていく予 定である。

謝辞

本研究を行う際に大変多くの方々にお世話になりました。この場を借りて皆様にお礼申し上げます。 指導教員である同研究室の新山雅之助教には研究に関して直接指導頂きました。また論文の執筆にあた り、忙しい中大変親身になって何度も添削して頂きました。とても感謝しています。大阪大学の與曽井 優准教授には本研究を進めていく上でチェンバーに関する様々な基本的知識を教えて頂き、的確なアド バイスをいただきました。大阪大学のJia-Ye Chen 特任助教には実機の評価試験の際に必要となる架台 を一から製作して頂きました。同研究室の永江知文教授には研究の進展具合を気にかけて頂き、様々な アドバイスを貰いました。同研究室の先輩である野沢勇樹さん、冨田夏希さんには検出器開発における 心構えを教わり、またデータ解析にあたり、様々なアドバイスをして頂きました。また同研究室の水谷 圭吾さん、大阪大学の濱野博友さんには評価試験を手伝って頂きました。上記の方々やここには書きき れなかった同研究室の方々、LEPS2 グループの方々に深くお礼を申し上げます。

付 録 A Drift Chamber における tracking

A.1 2次元での tracking

粒子軌道を以下の直線で表す。

$$y = ax + b \tag{A.1}$$

最小二乗法を用いて a,b を求める。

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{y_i - (ax_i + b)}{\Delta y_i} \right)^2 \tag{A.2}$$

とおいてこれの偏微分が0となることから

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{y_i - (ax_i + b)}{\Delta y_i} \cdot \frac{2x_i}{\Delta y_i} = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{y_i - (ax_i + b)}{\Delta y_i} \cdot \frac{2}{\Delta y_i} = 0$$
(A.3)

行列の形式で表すと

$$\begin{pmatrix} \sum \frac{y_i x_i}{\Delta y_i^2} \\ \sum \frac{y_i}{\Delta y_i^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \frac{x_i^2}{\Delta y_i^2} & \sum \frac{x_i}{\Delta y_i^2} \\ \sum \frac{x_i}{\Delta y_i^2} & \sum \frac{1}{\Delta y_i^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$
(A.4)

ここで、簡単のために各面の位置分解能を一定とする。 $(\Delta x_i = \Delta x)$ と Δx の係数が全て消えて

$$\begin{pmatrix} \sum y_i x_i \\ \sum y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$
(A.5)

となる。

$$S_1 = \sum_{i} 1, S_x = \sum_{i} x_i, S_{xx} = \sum_{i} x_i^2, D = S_1 S_{xx} - S_x^2$$

のように定義して a,bを求めると

$$a = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} (S_1 x_i - S_x) y_i$$
 (A.6)

$$b = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} (S_{xx} - S_x x_i) y_i$$
 (A.7)

となります。残差は

$$r_{k} = y_{k} - (ax_{k} - b)$$

$$= y_{k} - \frac{1}{D} \left(\sum_{i} (S_{1}x_{i} - S_{x})y_{i}x_{k} + \sum_{i} (S_{xx} - S_{x}x_{i})y_{i} \right)$$

$$= \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} \left[\delta_{ik}D - (S_{xx} - x_{i}S_{x}) - (S_{1}x_{i} - S_{x})x_{k} \right] y_{i}$$
(A.8)

よって残差の分散 Δr_k^2 は面あたりの分解能 Δx によって

$$\Delta r_k^2 = \frac{1}{D^2} \sum_{i=1}^n \left[\delta_{ik} D - (S_{xx} - x_i S_x) - (S_1 x_i - S_x) x_k \right]^2 \Delta x^2$$

= $\frac{1}{D^2} \left[D(D - S_{xx}) + 2DS_x x_k - DS_1 x_k^2 \right] \Delta x^2$ (A.9)

$$\Delta r_k = \sqrt{1 - \frac{S_{xx} - 2S_x x_k + S_1 x_k^2}{D}} \Delta x \tag{A.10}$$

となる。

A.2 3次元での tracking

空間内での直線の方程式は以下で表される。

$$f(z) = \cos \theta(az+b) + \sin \theta(cz+d)$$

ここで f(z) は x-y 平面を θ 分傾けた x'-y' 平面内における x' 座標を表している。最小二乗法を用いて a、 b、c、d を求める。

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i' - f(z_i)}{\Delta x_i'} \right)^2$$

これの偏微分が0になることから

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x'_i - (az_i + b)}{\Delta x'_i} z_i \cos \theta_i = 0$$
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x'_i - (az_i + b)}{\Delta x'_i} \cos \theta_i = 0$$
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x'_i - (az_i + b)}{\Delta x'_i} z_i \sin \theta_i = 0$$
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x'_i - (az_i + b)}{\Delta x'_i} \sin \theta_i = 0$$

行列の形式で表すと

$$\begin{split} M\begin{pmatrix}a\\b\\c\\d\end{pmatrix} &= \begin{pmatrix}\sum\frac{x_i'z_i\cos\theta_i}{\Delta x_i'^2}\\\sum\frac{x_i'z_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}\\\sum\frac{x_i'z_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}\end{pmatrix}\\ M &= \begin{pmatrix}\sum\frac{z^2\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}\\\sum\frac{z_i\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\cos\theta_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}\\\sum\frac{z_i\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{\cos^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\cos\theta_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}\\\sum\frac{z_i\cos\theta_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\cos\theta_i\sin\theta_i}{\Delta x_i'^2}&\sum\frac{z_i\sin^2\theta_i}{\Delta x_i'^2}\end{pmatrix} \end{split}$$

$$M = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix}$$

D は M の行列式

a、b、c、d はそれぞれ

$$a = \frac{1}{D} \sum \frac{b_{11}x'_{i}z_{i}\cos\theta_{i} + b_{12}x'_{i}\cos\theta_{j} + b_{13}x'_{i}z_{i}\sin_{i} + b_{14}x'_{i}\sin\theta_{i}}{\Delta x'^{2}_{i}} = \frac{1}{D} \sum A_{i}x'_{i}$$

$$b = \frac{1}{D} \sum \frac{b_{21}x'_{i}z_{i}\cos\theta_{i} + b_{12}x'_{i}\cos\theta_{j} + b_{13}x'_{i}z_{i}\sin_{i} + b_{14}x'_{i}\sin\theta_{i}}{\Delta x'^{2}_{i}} = \frac{1}{D} \sum B_{i}x'_{i}$$

$$c = \frac{1}{D} \sum \frac{b_{31}x'_{i}z_{i}\cos\theta_{i} + b_{12}x'_{i}\cos\theta_{j} + b_{13}x'_{i}z_{i}\sin_{i} + b_{14}x'_{i}\sin\theta_{i}}{\Delta x'^{2}_{i}} = \frac{1}{D} \sum C_{i}x'_{i}$$

$$d = \frac{1}{D} \sum \frac{b_{41}x'_{i}z_{i}\cos\theta_{i} + b_{12}x'_{i}\cos\theta_{j} + b_{13}x'_{i}z_{i}\sin_{i} + b_{14}x'_{i}\sin\theta_{i}}{\Delta x'^{2}_{i}} = \frac{1}{D} \sum D_{i}x'_{i}$$

 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i を使って残差は

$$r_{k} = x'_{k} - (\cos \theta_{k}(az_{k} + b) + \sin \theta_{k}(cz_{k} + d))$$

$$= x'_{k} - \frac{1}{D} \left[\cos \theta_{k} \left(\sum_{i} A_{i}x'_{i}z_{k} + \sum_{i} B_{i}x'_{i} \right) + \sin \theta_{k} \left(\sum_{i} C_{i}x'_{i}z_{k} + \sum_{i} D_{i}x'_{i} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} \left(\delta_{ik}D - (\cos \theta_{k}B_{i} + \sin \theta_{k}D_{i}) - (\cos \theta_{k}A_{i} + \sin \theta_{k}C_{i}) z_{k} \right) x'_{i}$$

よって残差の分散 σ_{rk}^2 は面あたりの分解能 $\sigma_{x'i}$ によって

$$\sigma_{rk}^{2} = \frac{1}{D^{2}} \sum_{i=1}^{n} \left(\delta_{ik} D - (\cos \theta_{k} B_{i} + \sin \theta_{k} D_{i}) - (\cos \theta_{k} A_{i} + \sin \theta_{k} C_{i}) z_{k} \right)^{2} \sigma_{x'i}^{2}$$

簡単のために各面の位置分解能を一定として、今回の実機の構造で計算を行うと以下の結果を得られた。

$$\sigma_{rk} = f_k \sigma_{x'_k} \begin{cases} f_k = 0.543 & (k = 1, 6) \\ f_k = 0.724 & (k = 2, 5) \\ f_k = 0.425 & (k = 3, 4) \end{cases}$$

付録 B 位置分解能の導出方法

その面から求まる位置と誤差を $x_1 \ge \sigma_1(\sigma_{\text{intrinsic}})$ 、その面を除いて求めた位置と誤差を $x_2 \ge \sigma_2$ 、その面を含めて求めた位置と誤差を $x_3 \ge \sigma_3 \ge \sigma_3 \ge \sigma_3 \ge \sigma_3 \ge \sigma_3$ 、その面ので次のように表される。

$$x_3 = \frac{\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2}{\omega_1 + \omega_2}$$

 ω_1, ω_2 はそれぞれ分散の逆数で $\omega_1 = \frac{1}{\sigma_1^2}, \omega_2 = \frac{1}{\sigma_2^2}$ である。誤差の伝播により σ_3 は

$$\sigma_3^2 = \frac{\omega_1^2 \sigma_1^2 + \omega_2^2 \sigma_2^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2}$$
$$= \frac{\frac{1}{\sigma_1^4} \sigma_1^2 + \frac{1}{\sigma_2^4} \sigma_2^2}{(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2})^2} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}}$$

となる。実際に求まる値は残差なので

$$\begin{aligned} x_{2\text{res}} &= x_2 - x_1 \\ x_{3\text{res}} &= x_3 - x_1 \\ &= \frac{\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2}{\omega_1 + \omega_2} - x_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} (x_2 - x_1) \\ &= \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} x_{2\text{res}} \end{aligned}$$

それぞれの誤差 σ_{2res} 、 σ_{3res} と分解能 $\sigma_{intrinsic}$ に関して誤差の伝播より以下の関係が成り立つ。

$$\begin{split} \sigma_{2\rm res}^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \\ \sigma_{3\rm res}^2 &= \left(\frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}\right)^2 \sigma_{2\rm res}^2 \\ &= \left(\frac{\frac{1}{\sigma_2^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} \sigma_{2\rm res}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sigma_{2\rm res}\right)^2 \\ &= \left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{2\rm res}}\right)^2 \\ &\Rightarrow \sigma_{\rm intrinsic} &\equiv \sigma_1 = \sqrt{\sigma_{2\rm res} \cdot \sigma_{3\rm res}} \end{split}$$

付録C 位置分解能の信号の大きさによる影響

信号の大きさを Time Over Thresold(TOT) を 用いて表す。TOT とは図 C.1 にあるように信 号がある値 (threshold) を超えてから下回るま での時間で、信号の電荷量に相当する値である。 実験室系での入射角 1 度、29 度における TOT の分布を図 C.2、図 C.3 に記す。



図 C.1: Time Over Thresold の様子



図 C.2: 入射角1度における TOT 分布。 左上が X 面、右上が X' 面、 左中央が U 面、 右中央が U' 面、 左下が V 面、 右下が V' 面。



図 C.3:入射角 29 度における TOT 分布。左上が X 面、右上が X' 面、左中央が U 面、右中央が U' 面、 左下が V 面、右下が V' 面。

UU' 面では入射角が変わっても TOT の値は変わらないが XX' 面、VV' 面では入射角が大きくなると TOT が大きくなっている。これは粒子がワイヤーに沿って入射し、より多くのガスを電離させたからで ある。TOT の小さい成分は粒子が2セルにまたがって入射したために電離した電子の一部しか1本のセ ンスワイヤーに到達しないためである。図 C.4 は X 面における残差分布を TOT の大きさ別に見たもの である。TOT が大きいもののほうが残差分布が細くなっている。しかし、UU' 面では入射角が代わって も TOT の大きさはほとんど変化しないが位置分解能は良くなっているため、信号の大きさによる影響 では位置分解能の角度依存性を説明しきれない。



図 C.4: TOT の違いによる残差分布の変化。左上が TOT200ns 以上、6 面フィットの時。右上が TOT200ns 以上、5 面フィットの時。左下が TOT200ns 以下、6 面フィットの時。右下が TOT200ns 以下、5 面フィットの時。

参考文献

- [1] D.Diakonov, V.Petrov, and M.Polykov, Z.Phys. A.359, 305(1997)
- [2] T.Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91, 012002 (2003)
- [3] T.Nakano et al., Phys. Rev. C. 91, 025210 (2009)
- [4] B.McKinnon, et. al., Phys.Rev.Lett, 96 (2006) 212001
- [5] F.Sauli, "Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers", CERN Report 77-09(1977)
- [6] W.Blum, L.Rolandi "Particle Detection with Drift Chambers" (1994)
- [7] J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012).
- [8] Garfield は CERN で開発されたガス検出器用のシミュレーションプログラムである。 (http://garfield.web.cern.ch/garfield)