# BELLE 中央飛跡検出器における位置分解能に関する研究

名古屋大学大学院
理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻
博士前期課程
居波 賢二

1999 年 2 月

# 目 次


**第 1 章　序** **1**

**第 2 章　B ファクトリー実験** **2**
2.1 標準理論と CP 非保存 . . . 2
2.1.1 小林・益川理論 . . . 2
2.1.2 B 中間子における CP 非保存 . . . 2
2.2 B ファクトリー実験 . . . 4
2.2.1 KEKB 加速器 . . . 4
2.2.2 BELLE 検出器 . . . 6

**第 3 章　中央飛跡検出器 (CDC)** **10**
3.1 概要 . . . 10
3.1.1 CDC の役割 . . . 10
3.1.2 構造 . . . 11
3.1.3 Cathode part . . . 15
3.2 製作 . . . 18
3.2.1 Cathode part . . . 18
3.2.2 Cathode part 組み込み . . . 24
3.2.3 ガス圧に対する変形 . . . 28

**第 4 章　Xt シミュレーション** **34**
4.1 セル構造 . . . 34
4.2 入射角$\alpha$による依存性 . . . 37
4.3 入射位置 z による依存性 . . . 42

**第 5 章　宇宙線による位置分解能の評価と補正** **44**
5.1 セットアップ . . . 44
5.2 位置分解能の評価 . . . 45
5.2.1 パラメータ . . . 45
5.2.2 解析 . . . 47
5.3 補正 . . . 49
5.3.1 T0 補正 . . . 49
5.3.2 アライメント . . . 49
5.3.3 Xt 関数の補正 . . . 57
5.3.4 補正後の位置分解能 . . . 57

**第 6 章　結論** **59**

**付 録 A xdriftx(ver.2.1)** **60**
A.1 基本計算 . . . . . 60
A.1.1 電場 . . . . . 60
A.1.2 ドリフト速度 . . . . . 61
A.2 アルゴリズム . . . . . 62

# 第1章　序

我々の宇宙には「物質」ばかりが存在し「反物質」はほとんど存在しない。ビッグバン宇宙論によれば、宇宙はエネルギーの固まりから始まった。このような宇宙では「物質」と「反物質」は等量存在するはずである。しかし、現在の宇宙は「物質」が優勢の世界である。この「物質」優勢の世界はどのように作られるのであろうか?これは現代物理学の大きな問題の 1 つである。この問題を解く鍵の一つとして「CP 非保存」がある。CP 非保存とは、物質と反物質の対称性が破れていることを示す。現在の素粒子物理学では、CP 非保存は小林・益川理論によって説明される。K 中間子において発見された CP 非保存を説明するために導入されたこの理論は、B 中間子においても CP 非保存が起こることを予言する。現在、B 中間子を用いて CP 非保存を探索する研究が注目されている。つくば市にある高エネルギー加速器研究機構では、B 中間子を大量に作り出し CP 非保存を測定しようとする B ファクトリー実験が 1999 年 4 月に開始されようとしている。

B ファクトリー実験において、生成される B 中間子の崩壊過程を精密に測定するための BELLE 検出器が設置される。BELLE 検出器は B 中間子の崩壊によって発生するさまざまな粒子を測定するために異なった機能を持った測定器で構成される。なかでも中央飛跡検出器は、荷電粒子の飛跡を検出し運動量を精密測定する基本的で重要な測定器である。

本論文では、中央飛跡検出器の最内部に位置する Cathode part の製作や組み込み、及び、組み込み後のガス圧による CDC の変形についてまとめる。次に、飛跡位置を精密に測定するために必要である Xt 関数を決めるシミュレーションの結果について述べる。最後に、完成した中央飛跡検出器の位置分解能を、宇宙線によって評価した結果を述べる。

# 第2章　Bファクトリー実験

本章では、KEK においてまもなく実験開始される B ファクトリー実験について概要を述べる。

## 2.1　標準理論と CP 非保存

### 2.1.1　小林・益川理論

現在の素粒子物理学では、標準模型と呼ばれる理論が大きな成功を収めており、現在までこれに反するような実験結果は得られていない。しかしながら、この標準理論の枠組みの中で、未だ実験的に証明されていない現象の 1 つに CP 対称性の破れがある。

標準理論において CP 対称性の破れは、小林・益川理論 [1] で説明される。小林・益川理論は、1964 年に Fitch らによって発見された中性 K 中間子の崩壊過程における CP 対称性の破れを説明するために提唱され、それまでは 2 世代 4 種類と考えられていたクォークが少なくとも 3 世代 6 種類であれば CP 非保存を起こす可能性があることを示した。のちに小林・益川理論の予言の通りに b クォークや t クォークが発見され、現在では CP 対称性の破れを説明する理論として考えられている。

#### KM 行列

小林・益川理論では Cabibbo のクォーク混合の理論を拡張し 3 世代のクォークによる混合を考える。標準理論における左巻き 2 重項の下成分について質量の固有状態を $d, s, b$、弱い相互作用の固有状態を $d', s', b'$とすると、それらの関係は式 (2.1) の様に表される。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = V_{KM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

$V_{KM}$は小林・益川行列 (KM 行列) と呼ばれるユニタリー行列である。KM 行列は、そのユニタリー性とゲージ対称性から、3 つの回転角と 1 つの位相の自由度を持つ。この位相の自由度のため、理論は CP 対称性を破ることができる。

### 2.1.2　B 中間子における CP 非保存

現在のところ、CP 非保存の現象が確認されているのは中性 K 中間子の崩壊においてのみである。B ファクトリー実験では B 中間子の崩壊を測定することによって、小林・益川理論を実験的に証明しようとしている。B 中間子を用いた検証について以下に述べる。

ユニタリー三角形

KM 行列のユニタリー性から、

$$V_{KM}^{\dagger} V_{KM} = 1$$

この関係式から、b クォークに関する 1 成分を取り出すと、

$$V_{ud}V_{ub}^{*} + V_{cd}V_{cb}^{*} + V_{td}V_{tb}^{*} = 0 \tag{2.2}$$

また、実験結果に基づく近似として Wolfenstain による表示 [2] を用いると、

$$V_{KM} \simeq \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

$\lambda$は$\lambda = \sin\theta_c$($\theta_c$は Cabibbo angle) で定義されたパラメータで、s クォークを含む粒子の崩壊の実験などから比較的良く測定されており$\lambda = 0.221 \pm 0.002$ である。また、A は B 中間子のセミレプトニック崩壊の実験などから、$A = 0.839 \pm 0.041 \pm 0.082$ という値が得られている。 [4]

これらの関係式 (2.2),(2.3) から、$V_{ud}V_{ub}^{*}$,$V_{cd}V_{cb}^{*}$,$V_{td}V_{tb}^{*}$は$\rho, \eta$で作られる複素平面上のベクトルで表され、図 2.1 で示されるユニタリー三角形と呼ばれる閉じた三角形のそれぞれの辺に対応する。図中の頂点の角度は、

$$\phi_1 \equiv arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^{*}}{V_{td}V_{tb}^{*}}\right), \quad \phi_2 \equiv arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^{*}}{V_{td}V_{tb}^{*}}\right), \quad \phi_3 \equiv arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^{*}}{V_{ud}V_{ub}^{*}}\right)$$

で定義される。CP 対称性の破れが存在するとき、理論によると KM 行列の成分は複素数でなくてはならない。つまり、式 (2.3 において$\eta \neq 0$ である。このことから、測定によって 3 つの角度のいずれかが値を持つことが分かれば CP 対称性の破れが存在することが分かるが、さらに、3 つの角度および 3 つの辺の長さをそれぞれ測定しそれらがユニタリー三角形の様な閉じた三角形を作ることを示すことで、小林・益川理論の証明ができる。K 中間子系では、この三角形がつぶれた形になっており閉じているかの判別が困難であったが、B 中間子系では、CP 対称性の破れが大きく、かつ理論的不定性が小さいため、その判別が容易になると期待されている。

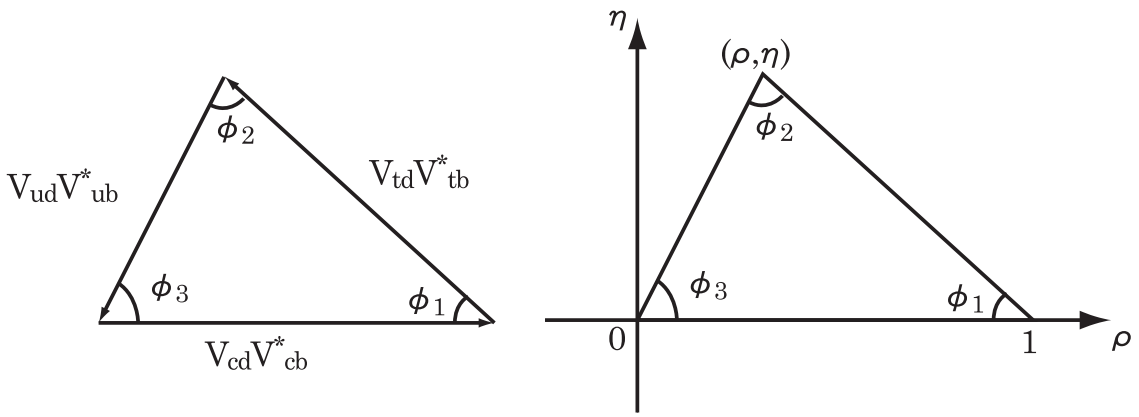



図 2.1: ユニタリー三角形

**B 中間子による測定**

3 辺の大きさを測定するには、比較的良く測定されている$\lambda$以外のパラメータ $A, \rho, \eta$を含む KM 行列の成分、$V_{cb}, V_{ub}, V_{td}$の高精度の測定が必要である。B 中間子を伴った実験では、$|V_{cb}|, |V_{ub}|$ の測定は B 中間子のセミレプトニック崩壊から、$|V_{td}|$ は $B^0\bar{B^0}$混合のパラメータ $x_d$等の仮想的な t クォークを伴う崩壊過程から測定できる。

3 つの角度は、B 中間子の崩壊の時間依存性を測定することで得る。$\Upsilon(4S)$ から崩壊した中性 B 中間子の CP 固有状態 $f$ への崩壊率 $R(B^0 \to f;t), R(\bar{B^0} \to f;t)$ を用いると、CP 非保存の大きさ $A_f(t)$ は次のように与えられる。

$$A_f(t) = \frac{R(B^0 \to f;t) - R(\bar{B^0} \to f;t)}{R(B^0 \to f;t) + R(\bar{B^0} \to f;t)} = \sin 2\phi_{CP} \sin(\Delta m \cdot t)$$

ここで、$\Delta m$ は $B^0$中間子の質量固有状態の質量差、$t$ は 2 つの B 中間子が崩壊したときの時間差、$\phi_{CP}$は三角形の角に依存した量で、$B$-$\bar{B}$mixing と $B^0 \to f$ の崩壊の位相の違いを示す。この関係式から分かるように、全ての時間 $t$ で積分すると $A_f(t)$ は 0 になってしまうため、この量は時間に依存した量として測定する必要がある。$A_f(t)$ を測定するには、CP 固有状態に崩壊したのは元々$B^0$なのか$\bar{B^0}$なのかを判別する必要がある。それには、$\Upsilon(4S)$ から崩壊した $B\bar{B}$対は片方が $B$ として崩壊した瞬間は反対側は$\bar{B}$であるという事実を使う。CP 固有状態に崩壊しなかった B 中間子の崩壊先の粒子、例えば K 中間子の電荷やレプトンの電荷を調べ、B 中間子の種類の判別をする。

## 2.2 B ファクトリー実験

### 2.2.1 KEKB 加速器

これまで述べてきたように、B 中間子における CP 対称性の破れを検証するには、次のことが要求される。

1. $\Upsilon(4S)$ からの $B\bar{B}$対の崩壊時間の差を測定する必要があるが、B 中間子の寿命が 1ps 程度であるため時間差を測定するのは技術的に非常に困難である。そこで、時間差を測定しやすくするために、生成する$\Upsilon(4S)$ を走らせ B 中間子をブーストさせ、崩壊点の位置の差を測定する。
2. B 中間子はさまざまな状態に崩壊し、その崩壊比は $10^{-4}$程度である。このため、十分な統計精度で崩壊過程を測定するために、年間 $10^8$個程度の $B\bar{B}$対を生成する必要がある。

このような要求を満たすために、B ファクトリー実験で使われる KEKB 加速器は次のような性能を持つ。

1. 運動量を持つ$\Upsilon(4S)$ を生成させるために、8GeV の電子ビームと 3.5GeV の陽電子ビームを衝突させる。これにより、生成された $B\bar{B}$対は光速の 40 %でほぼ電子ビーム軸方向に走り、生成から崩壊までに $200\mu m$ 程度飛ばすことができ、現在の検出器で測定が可能になっている。
2. 年間 $10^8$個程度の$\Upsilon(4S)$ を生成するために、ビームのルミノシティーを世界最高の $10^{34}$ $\mathrm{cm}^{-2}$ $\mathrm{s}^{-1}$とする。KEKB のような横方向に平たく扁平したビームの衝突型加速器では、ルミノシティーは近似的に次のように表される。 [3]

$$\mathcal{L} \simeq \frac{\gamma I \xi_y}{2er_e\beta_y^*}$$

ここで、$\gamma = E/m_e c^2$、$I$ はビーム電流、$\xi_y$はチューンシフトと呼ばれる衝突時のビーム間力を表す量、$\beta_y$はベータ関数と呼ばれる衝突時にどれだけビームを絞るかを表すパラメータである。KEKB では$\xi_y = 0.05$ という値を仮定し、$\beta_y$を 1cm まで小さく (トリスタンでは 4cm) するが、目標とするルミノシティーに到達するために、電子リング (HER) で約 1.1A、陽電子リング (LER) で約 2.6A の大電流を貯蔵する。

KEKB は、高エネルギー加速器研究機構内の TRISTAN 実験で使用した周長 3km のトンネル内に建設され、電子リングと陽電子リングの 2 本のリングが BELLE 検出器 (筑波実験室に設置) 内で衝突するように設置されている。その概念図を図 2.2 に示す。また、主なパラメータを表 2.1 に示す。

| | | LER | HER | |
|---|---|---|---|---|
| エネルギー | $E$ | 3.5 | 8.0 | GeV |
| 円周 | $C$ | 3016.26 | | m |
| ルミノシティー | $\mathcal{L}$ | $1 \times 10^{34}$ | | $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ |
| 衝突角 | $\theta_x$ | $\pm 11$ | | mrad |
| チューンシフト | $\xi_x/\xi_y$ | 0.039/0.052 | | |
| ベータ関数 | $\beta_x^*/\beta_y^*$ | 0.33/0.01 | | m |
| ビーム電流 | $I$ | 2.6 | 1.1 | A |

表 2.1: KEKB 加速器の主なパラメータ [3]

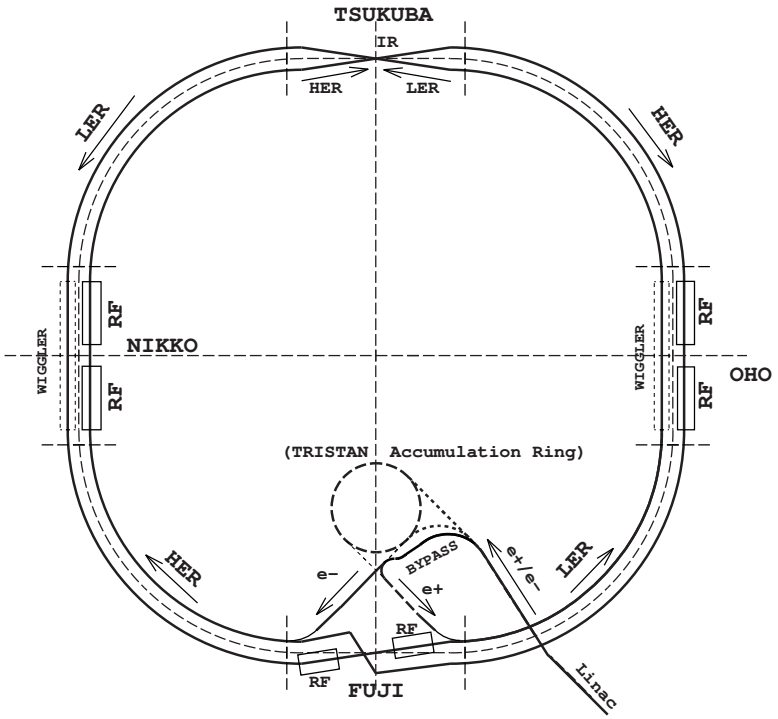



図 2.2: KEKB [3]

### 2.2.2 BELLE 検出器

検出器に対しては次のような要求が挙げられる。

- 走っている 2 つの B 中間子の崩壊点を $100\mu m$ 以下の精度での測定。
- B 中間子から崩壊によって出てくる粒子の運動量は比較的低いため、低運動量粒子の運動量やエネルギーを高精度で測定。
- CP 固有状態の決定や tagging のための低運動量粒子の高い粒子識別能力。
- $\Upsilon(4S)$ が電子ビーム軸方向にブーストされる非対称コライダーに対応した広い検出領域。
- 高ルミノシティーに対応できる高速なトリガー、データ収集システム。

これらの要求を満たすように BELLE 検出器は設計された。概観を図 2.3、2.4 に示す。この検出器の特徴は、

- 非対称コライダーに対応し、衝突点に対して非対称な形である。
- 低運動量粒子の測定を確実にするために各測定器は低物質量化されており、さらにほとんどの測定器が超電導ソレノイド磁石の内側に設置されている。

以下に BELLE 検出器を構成する測定器について概要を簡単に述べる。また、表 2.2 に各測定器のパラメータを示す。

#### Silicon Vertex Detector(SVD)

生成二次荷電粒子の飛跡位置から B 中間子の崩壊点を高精度で測定する。両面シリコンストリップ読み出しの検出器を 3 層並べ、$r \sim 30.0, 45.5, 60.5$mm の位置に$\phi$方向にそれぞれ 8,10,14 枚並べる。それぞれの層では、$8\mu m$ 幅のストリップが、r-$\phi$方向を測定する p-side では $25\mu m$ ピッチで、z 方向を測定する n-side では $42\mu m$ ピッチで並べられている。崩壊点のビーム軸方向の位置を $100\mu m$ 以下の分解能で測定する。

#### Central Drift Chamber(CDC)

荷電粒子の飛跡を検出し運動量を測定する。また、荷電粒子のエネルギー損失 $(dE/dx)$ を測定し、低運動量粒子の識別も行う。次章で述べる。

#### Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

荷電粒子が物質中を通過したときにチェレンコフ光を発する条件 $(1/n\beta < 1)$ が荷電粒子の質量と運動量によって異なることを利用して粒子識別を行う。BELLE では屈折率が適当な ($\theta$によって 1.01,1.015,1.02 と使い分ける) エアロジェルを用い、運動量が 1.2GeV/c ~ 3.5GeV/c の$\pi$中間子と K 中間子の識別を行う。光の検出には磁場中でも十分な動作が可能なファインメッシュタイプの光電子増倍管を使用する。

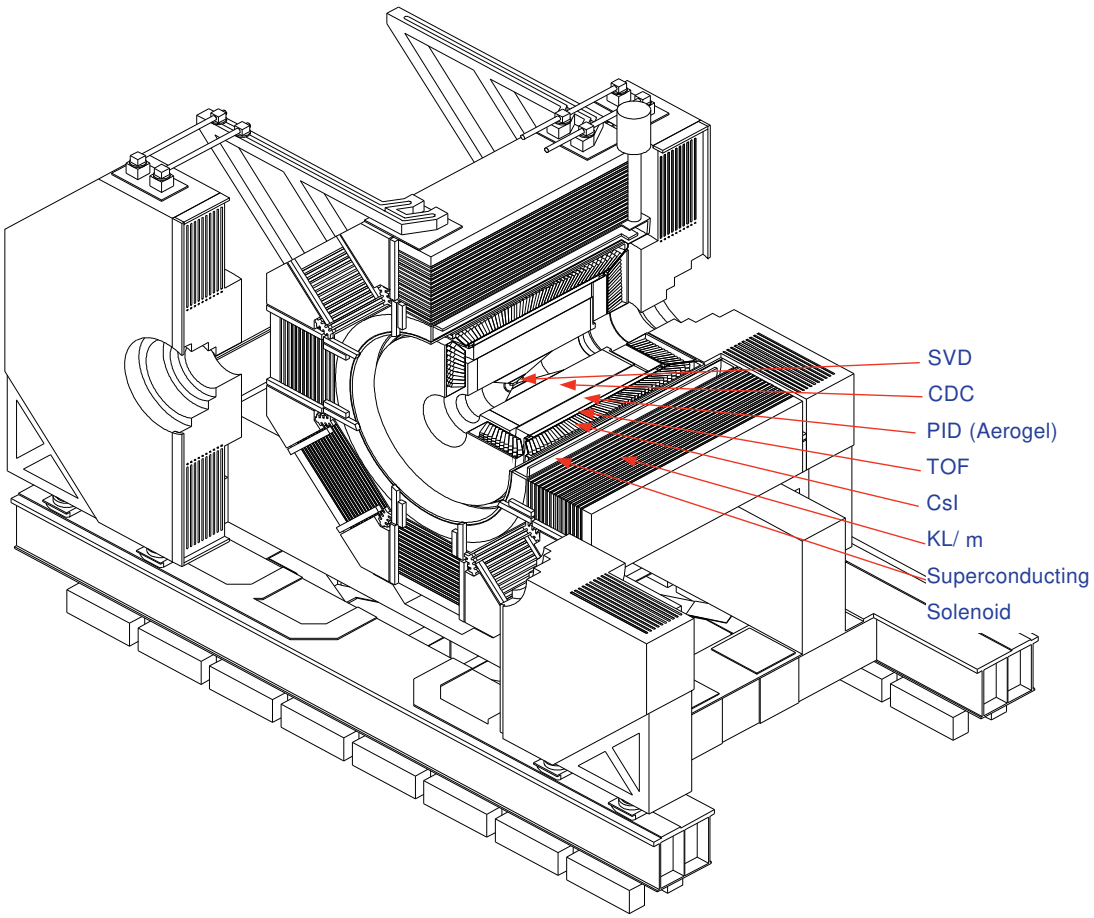



図 2.3: BELLE 検出器 [4]

### Time Of Flight counter(TOF)

シンチレーションカウンターによって荷電粒子が通過した時刻を高精度に ($\sigma_t \simeq 100$ ps) 測定し、1.2GeV/c 以下の運動量の$\pi$中間子と K 中間子の識別を行う。

### Cesium Iodide calorimetor(CsI)

CsI(Tl) 結晶中を通過した$\gamma$線や電子が電磁シャワーを起こすことを利用し、電磁シャワーによって生じたシンチレーション光をフォトダイオードによって検出することで、$\gamma$線や電子のエネルギー ($\sigma_E/E$ =0.67%/$\sqrt{E[\mathrm{GeV}]}\oplus$1.8%) と入射位置 ($\sigma$ =0.5cm/$\sqrt{E[\mathrm{GeV}]}$) を測定する。

### Superconducting Magnet

ソレノイド型の超電導電磁石によって、ビーム軸方向に 1.5T の一様な磁場を内部に形成する。物質量を押さえるためにほとんどの測定器の外側に設置された。

### $K_L/\mu$ detector(KLM)

4.7cm の鉄の吸収体と Resistive Plate Chamber(RPC) を 14 層並べた積層構造を持ち、RPC によって荷電粒子の通過位置の測定をする。鉄の吸収体などで生じる $K^0_L$ 中間子のハドロニックシャワーを RPC で検出し、$K_L$の測定を行う。また、$\mu$粒子の高い透過性を利用し、KLM 測定器を通過する荷電粒子を$\mu$粒子として判別する。$K_L$に対して$\theta, \phi$で 30mrad の分解能、$\mu$に対してハドロンの混入が 1%以下に抑えられることが要求される。

| Detector | Type | Configuration | Readout | Performance |
|---|---|---|---|---|
| Beam pipe | Berylium | Cylindrical $r_{in}$=2.3cm<br>0.5mm Be/2mm He/0.5mm Be | | Helium gas cooled |
| SVD | Double<br>Sided<br>Si Strip | 300 $\mu$m-thick, 3 layers<br>$r$ = 3.0 - 7.5 cm<br>$23^\circ < \theta < 140^\circ$ | | $\sigma_{r\phi} \leq$10$\mu$m<br>$\sigma_z$=7-40$\mu$m<br>$\sigma_{\Delta_z} \sim 100$ $\mu$m |
| CDC | Small Cell<br>Drift<br>Chamber | Anode: 50 layers<br>Cathode: 3 layers<br>$r$ = 8.3 - 88 cm<br>-77$\leq z \leq$ 160 cm | <br><br>A: 8400<br>C: 1792 | $\sigma_{r\phi}$ = 130 $\mu$m<br>$\sigma_z$ = 200 $\sim$ 1400$\mu$m<br>$\sigma_{p_t}/p_t$ =0.3%$\sqrt{p_t^2+1}$<br>$\sigma_{dE/dx}$ = 6% |
| ACC | $n \simeq 1.01$<br>Silica<br>Aerogel | $\sim$12x12x12 cm$^3$ blocks<br>900 barrel/224 endcap<br>FM-PMT readout | <br>B:1800<br>E:224 | <br>$N_{p.e.} \geq 6$<br>K/$\pi$ 1.2<p<3.5GeV/c |
| TOF | Scintillator | 128 $\phi$ segmentation<br>$r$ = 120cm,3m-long,4cm-thick | 128$\times$2 | $\sigma_t$ = 100 ps<br>K/$\pi$ up to 1.2GeV/c |
| ECL | CsI | Towered structure<br>$\sim$ 5.5x5.5x30 cm$^3$ crystals<br>Barrel: $r$ = 125 - 162 cm<br>Endcap: $z$ =<br>-102 and +196 cm | <br><br>6624$\times$2<br>1216$\times$2(f)<br>1040$\times$2(b) | $\sigma_E/E$=<br>0.67%/$\sqrt{E}\oplus$1.8%<br>$\sigma_{pos}$=0.5 cm/$\sqrt{E}$<br>$E$ in GeV |
| MAGNET | super<br>conducting | inn.rad. = 170 cm | | B = 1.5 T |
| KLM | Resistive<br>Plate c. | 14layers(4.7cm Fe+4cm gap)<br>two RPCs in each gap<br>$\theta$ and $\phi$ strips | <br>B:21856<br>E:16128 | $\Delta\phi$=$\Delta\theta$=30$mr$ for $K_L$<br>$\sigma_t$=1ns<br>1% hadron fakes |

表 2.2: BELLE 検出器のパラメータ (TDR [4] より改訂)

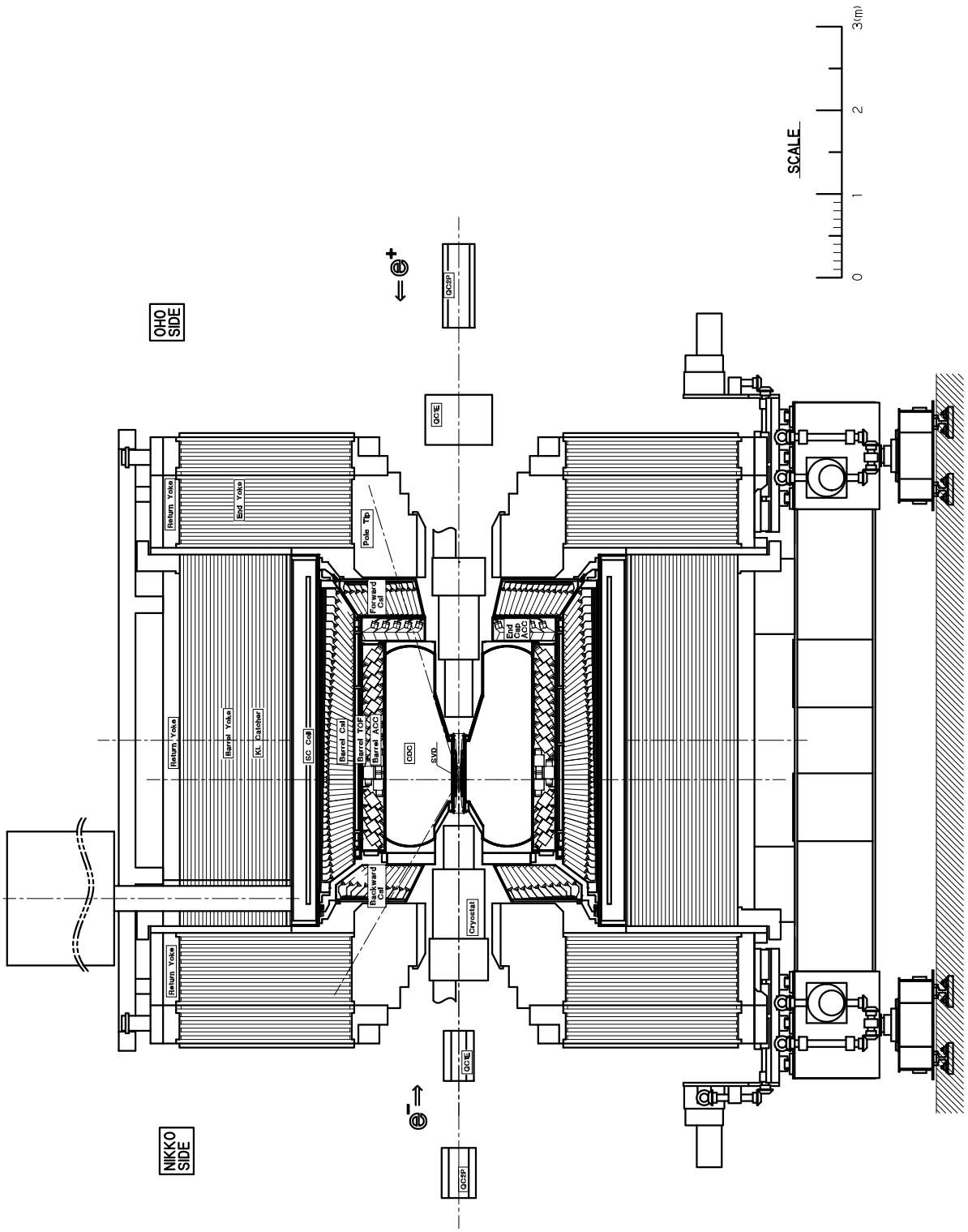



図 2.4: BELLE 検出器 断面図 [5]

# 第3章　中央飛跡検出器(CDC)

## 3.1　概要

### 3.1.1　CDC の役割

CDC は BELLE 検出器の中央部分に位置し、ソレノイド電磁石によってビーム軸方向にかけられた 1.5T の磁場中での荷電粒子の飛跡を 3 次元で検出し運動量を測定する。また、各ドリフトセルにおけるシグナルの大きさから荷電粒子のエネルギー損失 $(dE/dx)$ を測定し、低運動量粒子の識別も行う。また、高ルミノシティーによるバックグラウンドを減らすために、飛跡の情報を用いた高速なトリガー信号も出力する。

#### 運動量分解能

CDC に要求される運動量分解能は、有感領域 (polar angle で $17^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$) を通過する運動量 100MeV/c 以上の荷電粒子に対して、

$$\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} \leq 0.3\% \sqrt{1 + P_t^2} \tag{3.1}$$

である。ここで、$P_t$(GeV/c) は運動量のビーム軸に垂直な方向の成分である。

運動量分解能は、荷電粒子の位置測定精度と、測定器内の物質との多重クーロン散乱による飛跡の撹乱によって決まる。$L$(m) の長さにわたって $N$ 個の測定点で飛跡位置を分解能$\sigma_{r\phi}$(m) で測定したとき、$P_t$分解能は次のように表される。 [7]

$$\left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)^2_{res} + \left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)^2_{ms} \tag{3.2}$$

$$\left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)_{res} = \frac{P_t \sigma_{r\phi}}{0.3 L^2 B} \sqrt{\frac{720}{N+5}} \tag{3.3}$$

$$\left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)_{ms} = \frac{0.05}{LB} \sqrt{\frac{1.43L}{X_0}} \tag{3.4}$$

ここで、$X_0$は飛跡が通過する物質の放射長 (m)、$B$ は磁場の強さ (T) である。

$\left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)_{res}$ は位置測定精度と測定点に依存した項である。位置分解能が良くなると比例して $P_t$分解能が良くなる。一方、測定点が増えると分解能が良くなるが、その度合いは $1/\sqrt{N}$で大きくは効かない。$P_t$分解能が運動量に依存しているが、これは運動量が大きくなると飛跡の曲率が大きくなり曲率の測定精度が相対的に悪化するためである。

$\left(\frac{\sigma_{P_t}}{P_t}\right)_{ms}$ は多重散乱に依る項である。$L$、$B$ は他の測定器や物理的要請のかねあいから決まっているため、分解能を向上するには $X_0$を大きくする、つまり測定器自体の物質量を抑える必要がある。

位置分解能

BELLE-CDC では、上記の運動量分解能を得るために、次節で示す構造によって物質量を減らすとともに、飛跡の各測定点での位置分解能を、

$$\sigma_{r\phi} = 130\mu m$$

とするように要求される。

エネルギー損失分解能

CDC を通過した荷電粒子の信号の大きさを測定することで、エネルギー損失量 ($dE/dx$) を測定することができる。$dE/dx$ は粒子の速度$\beta$の関数として扱うことができるので、$dE/dx$ より得られる$\beta$と運動量 $P_t$を組み合わせることで粒子識別が可能となる。CDC では有効な粒子識別能力を得るために、1GeV/c 以下の運動量の荷電粒子に対して、

$$\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} \leq 6\%$$

の分解能が要求されている。

### 3.1.2 構造

構造

CDC のビーム軸 (z 軸) に沿った 1/2 断面図を図 3.1 に示す。全長約 2m の円筒形をしており、ビーム軸から半径 83mm ~ 880mm を占める。非対称コライダーのため前方 (z 軸方向) に多く生成される粒子を測定するために、ビーム衝突点に対して非対称な形となっている。CDC は 3 つのパートに分割して呼ばれ、外側から Main part,Inner part,Cathode part と呼ぶ。Main part は CDC の半径 295mm ~ 880mm と大部分を占める。加速器の集束用電磁石が衝突点近くに配置されるため、CDC の中央部はくぼんだ構造になっており、有感領域 $17° \leq \theta \leq 150°$を確保するために円錐状にした端板 (エンドプレート) の Inner part が存在する。さらにその内側には、z 方向の飛跡通過位置を正確に測定するためのカソード読み出しの機能を備えた Cathode part(3.1.3 参照) が設置される。

構造体

図 3.1 に示したように、各パートのエンドプレートは互いにつながり、両側のエンドプレートは円筒で支えられる。円筒は物質量を抑えるために厚さ 5mm の CFRP(炭素繊維強化プラスティック) を使用した。内面は GND の役目を果たすためにアルミが蒸着されている。

エンドプレートは 10mm 程度のアルミ製で、ワイヤ層ごとの階段状になっている。KEK 工作室にてワイヤを固定する穴があけられた。穴の位置は 3 次元位置測定器によって測定され、デザイン位置から $30\mu m$ 以下の精度であけられており、アノードの位置分解能約 $130\mu m$ に比べ十分小さいことを確認した。

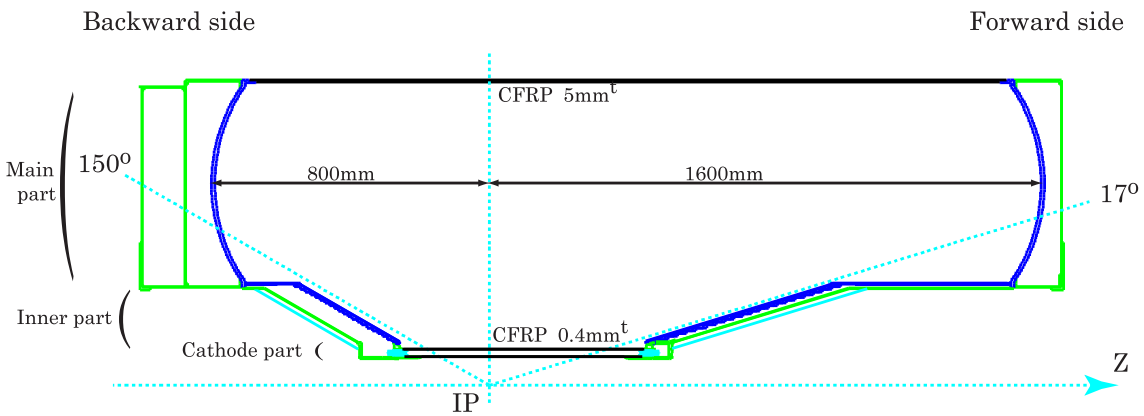



図 3.1: CDC の構造

ワイヤ

CDC は 50 層の読み出し層 (センスレイヤ)、8400 本の読み出しチャンネルとそれを挟むように GND ワイヤ (フィールドワイヤ) が張られている。センスワイヤの配置を表 3.1、図 3.2 に示す。表 3.1 に示したように、CDC では 3 次元で飛跡を測定するため、ビーム軸に平行に張られたアクシャルワイヤの他にビーム軸に数 10mrad の角度で張られたステレオワイヤが張られている。また、高ルミノシティーに対応するためスモールセルタイプを採用し、ドリフト長が 5 ~ 10mm 程度の小さい長方形のセルとなっている。

センスワイヤにはドリフト電場を最大にするように直径 30$\mu m$ の金メッキタングステンを、フィールドワイヤには物質量を減らすために直径 126$\mu m$ のアルミワイヤを使用している。

ワイヤはフィードスルー (図 3.3) で固定される。フィードスルーはワイヤを固定するアルミのパイプと、絶縁とワイヤの位置決めをするデルリン部分からなる。ワイヤの位置はデルリン部のピンホール (センスワイヤ用は径 80$\mu m$、フィールドワイヤ用は径 200$\mu m$) によってばらつきを抑える。

| Layer type | no. of layers | channels per layer | radius (mm) | stereo angle |
|---|---|---|---|---|
| axial(cathode) | 3 | 64 | 88.0 - 108.5 | 0 |
| axial 2 | 3 | 64 | 128.0 - 159.5 | 0 |
| stereo 3 | 3 | 80 | 178.5 - 209.5 | $\sim$ 74 mrad |
| axial 4 | 6 | 96 | 224.5 - 304.0 | 0 |
| stereo 5 | 3 | 128 | 322.5 - 353.5 | $\sim -44$ mrad |
| axial 6 | 5 | 144 | 368.5 - 431.5 | 0 |
| stereo 7 | 4 | 160 | 450.5 - 497.5 | $\sim$ 47 mrad |
| axial 8 | 5 | 192 | 512.5 - 575.5 | 0 |
| stereo 9 | 4 | 208 | 594.5 - 641.5 | $\sim -55$ mrad |
| axial 10 | 5 | 240 | 656.5 - 719.5 | 0 |
| stereo 11 | 4 | 256 | 738.5 - 785.5 | $\sim$ 65 mrad |
| axial 12 | 5 | 288 | 800.5 - 863.0 | 0 |

表 3.1: センスワイヤの配置

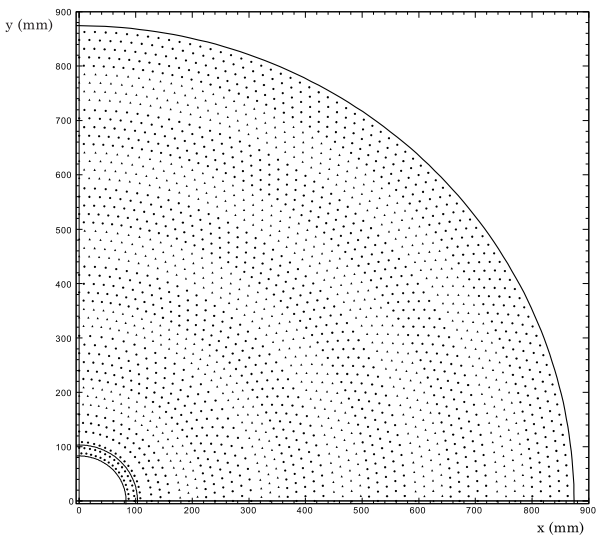



図 3.2: センスワイヤの配置図 (1/4)

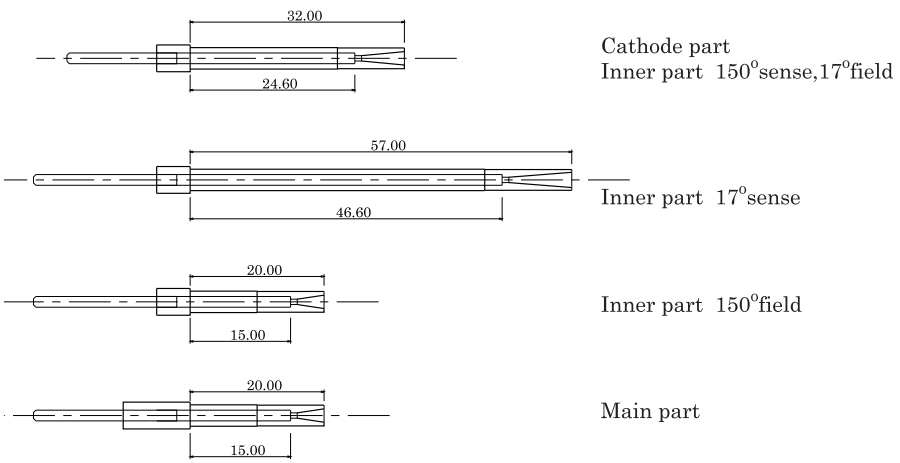



図 3.3: フィードスルー

ガス

前節で示したように運動量分解能は物質量に依存する。そのため、できるだけ物質量を押さえて多重散乱を起こさないようにする必要がある。また、CDC の後方に位置する測定器に対しても CDC での多重散乱やエネルギー損失を減らすことは重要である。

物質量を減らすため CDC の充填ガスには、ヘリウムとエタンを 1:1 で混合した物を用いる。ガス増幅はクエンチャーであるエタンに担わせ、物質量を減らすためにヘリウムを混合することで、従来のアルゴンベースの充填ガスより低物質量化を実現した。このガスは図 3.4(左) に示すように十分なガス増幅率を持つ。

また、ドリフト速度が低い電場からほぼ一定 (図 3.4(右)) であるために、電場の変化に対して安定した動作を保証でき、4.1 で述べるようにドリフト距離とドリフト時間の関係がほぼ一様で補正が容易である、低物質量のわりにはエネルギー損失分解能が良いこと等の利点が挙げられる。

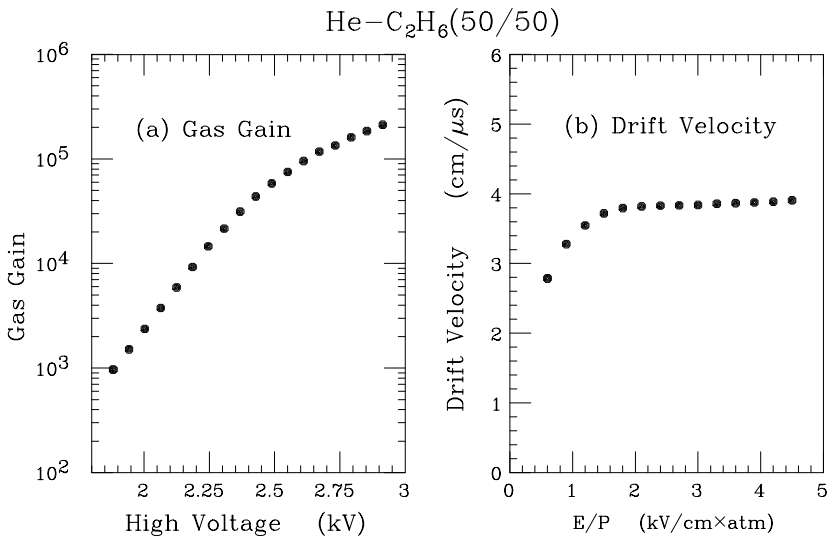



図 3.4: ガス増幅率とドリフト速度 [4]

### 3.1.3 Cathode part

Cathode part は CDC 本体 (Main part,Inner part) とは独立に名古屋大学で製作した。製作後に性能テストを行った後、ワイヤの張り終えた CDC 本体に組み込んだ。以下に Cathode part の概要を述べる。

#### 役割

Cathode part の役割は主に次の 3 つが挙げられる。

1. z 方向の位置測定
   ワイヤに垂直に配置されたカソードストリップに誘起される電荷分布の測定によって、荷電粒子の通過した z 方向の位置を測定する。CDC 本体では、アクシャルワイヤとステレオワイヤによって z 方向の飛跡位置を測定するが、その分解能は$\sigma_z \sim 2mm$ 程度であり、CDC の内側に取り付けられる SVD に飛跡を外挿するには不十分である。そこで、SVD と CDC の飛跡の接続効率を上げるために、Cathode part で測定する z 方向の位置情報を飛跡再構成に用いる。接続効率を 90%以上にするため、Cathode part は z 方向の位置分解能を$\sigma_z \sim 400\mu m$ と要求される。
2. z トリガー
   カソード読み出しによる早いシグナル出力が得られるため、ビームバックグラウンドを減らすための z トリガーに利用される。
3. r-$\phi$方向の位置測定
   ドリフトチェンバーとして r-$\phi$方向の位置も測定する。そのときの分解能は CDC 本体と同じく$\sigma_{r\phi} = 130\mu m$ である。低運動量粒子を精度良く測定するには、CDC の最も内側に位置する Cathode part の測定精度が重要となる。

#### 検出原理

ドリフトチェンバーは、通過した荷電粒子によって充填ガスから電離した電子を電場加速し、アノードワイヤ近傍で電子雪崩を起こさせ、それを電気信号として読み出す。カソード読み出しを用いるドリフトチェンバーでは、アノードワイヤ近傍で起こる電子雪崩の鏡像電荷をカソード面によって読み出し、その電荷の重心位置を求めることで荷電粒子の通過位置を測定する。図 3.5 にカソード読み出しの模式図を示す。Cathode part では、アノードワイヤに垂直に分割されたアルミ電極を CFRP 上に z 方向に並べ、z 方向の飛跡位置をカソード読み出しにて測定する。

#### 構造

Cathode part は 2 本の同心円状に配置した CFRP 円筒をドーナツ状の 2 枚のエンドプレートで挟んだ構造になっている。図 3.6 に構造を示す。エンドプレート間には CDC 本体と同じワイヤが張られ、センスレイヤー 3 層とフィールドレイヤー 2 層を持つ。

セルとカソードストリップの配置を図 3.7 に示す。ドリフトセルは円周で 64 あり、CDC 本体と同様に、飛跡を再構成するときの左右の不確定さを無くすために隣り合う層は半セルずれている。カソードストリップはアノードと同様に 3 層あり、対応した円筒上につけられる。$\Upsilon(4S)$ が崩壊して出てくる荷電粒子の数が 10 個程度であるので、誘起される電荷が 1 つのストリップに重なるの

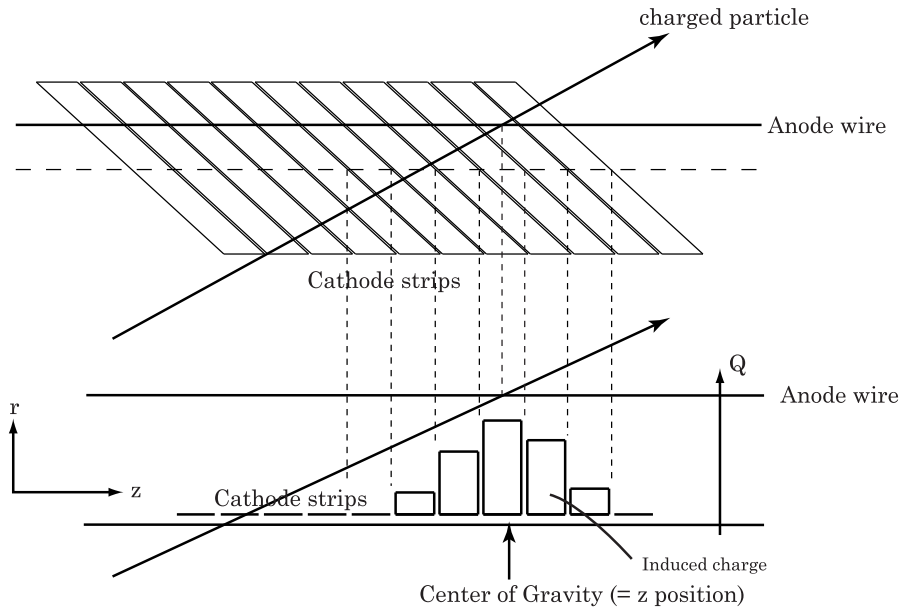



図 3.5: カソード読み出しによる検出

をさけるため、カソードストリップは円周方向に 8 分割され、さらに、1 層ごとに 11.25 度ずらしている。

円筒 (図 3.10) は強度を保ちつつ物質量を抑えるため、内筒を 0.5mm 厚、中筒を 0.4mm 厚の CFRP を使用し、形を保つために両端にアルミ製のサポートリングを接着してある。

カソードストリップは $38\mu m$ のポリエチレンシート上に $9\mu m$ 厚でアルミをエッチングしたものを CFRP 上に張り付けて電極としている。電極の z 方向の長さは約 7.4mm で、8.2mm ピッチで作られている。カソードの読み出しは後方のエンドプレートのスリットからフレキシブルケーブル状にして取り出す。

エンドプレートは外縁がテーパー構造を持つアルミ製のフランジで、ワイヤを固定するフィードスルー用の穴や、カソードの読み出し線を通すためのスリット、ネジ穴などがあけられている。フィードスルー用の穴は精度を出すため NC フライスによってリーマー加工された。フィードスルー用の穴の位置は 3 次元位置測定器によって測定され、デザイン位置から $20\mu m$ 程度の誤差でできており、アノードの位置分解能約 $130\mu m$ に比べ十分小さいことが確認された。また、エンドプレート表面は錆から保護するためにアロジン処理されている。

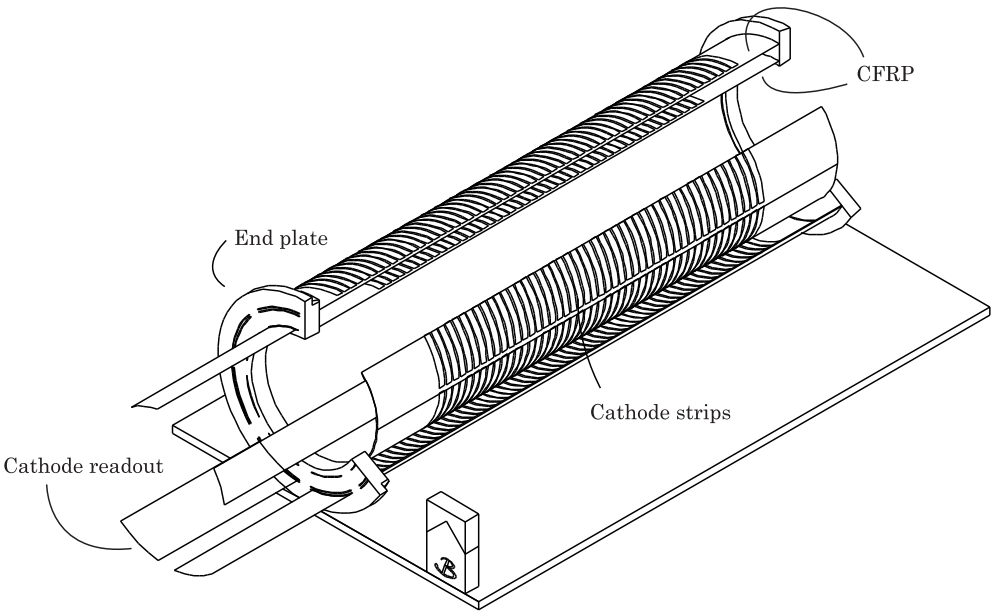



図 3.6: Cathode part (cut view)　ワイヤは省略してある

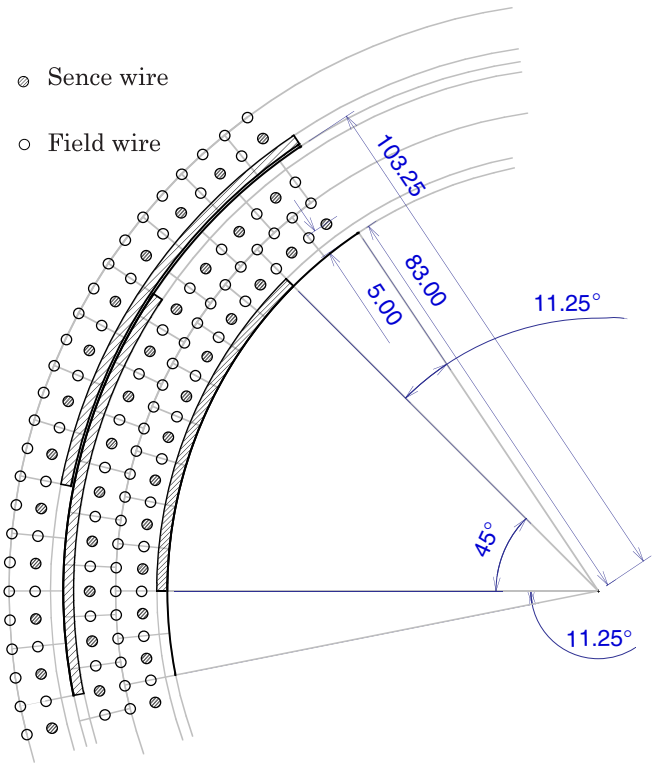



図 3.7: セル及びカソードストリップの配置

## 3.2 製作

1999 年 4 月実験開始を目標に BELLE 測定器を建設してきた。我々名古屋大学では特に CDC の Cathode part の製作を担当した。この節では、Cathode part の製作及び Cathode part 組み込み等の製作過程について述べる。

### 3.2.1 Cathode part

Cathode part の製作方法は、これまでの開発研究における試作機の製作によってほぼ確立されていた。我々は残った問題を解決し、実験で使える測定器を製作した。製作の簡単な手順を述べる。

- CFRP 円筒の選択・仮組
- カソードシートの製作・CFRP とカソードシートの張り合わせ
- CFRP とエンドプレートの組立
- ワイヤ張り・張力測定
- ガスシール・リークチェック
- 読み出し線・GND・HV 線処理

#### CFRP 円筒

CDC 本体にワイヤ張力をエンドプレート間に加えたとき、Cathode part が収まるべき部分のエンドプレート間の距離が、本来のデザイン位置より 4mm 程度縮むことが判明した。それに合わせ、Cathode part の CFRP 円筒の長さもデザインを変更し 4mm 縮めることとした。

また、試作テストから、内筒がガス圧に対して弱く、かなり変形することが判明したため、内筒を強化することとした。デザインを変更した円筒を数種製作し、ガス圧に対する変形量の測定 (3.2.3 参照)、ガス漏れの測定ののち、円筒を 2 組選定した。

その後、定盤の上でエンドプレートとの仮組、水準器、セオドライト等での円筒とエンドプレートの垂直性や平行度を測定、確認作業を行い、最も精度のいい組み合わせ方を決めた。

#### カソードシート

カソードシートは、ストリップと読み出し線を 1 枚のポリエチレンシートにエッチングした物を、ストリップが表面に出るように 8 枚張り合わせて作られる。張り合わせには常温硬化型でアウトガスが少なく作業しやすいなどの理由から接着剤転写シート (3M 社製) を用いた。このシートは厚さ $50\mu m$ と薄く物質量も抑えられる。

張り合わせには、ローラーとスライドテーブルからなる治具 (図 3.8) を用い、印刷機のようにローラーとスライドテーブルの間にカソードシートを挟んで接着した。スライドテーブル上には粘着性のあるウレタンゴムシートを敷き、ローラーには吸引用の穴を設けて張り合わせるシートの固定をした。シートの位置はスライドテーブルの位置を測定するロータリーエンコーダ (精度 0.1mm) とローラーに描かれたケガキ線で決められるが、接着時にローラーをステージに下ろす時はロー

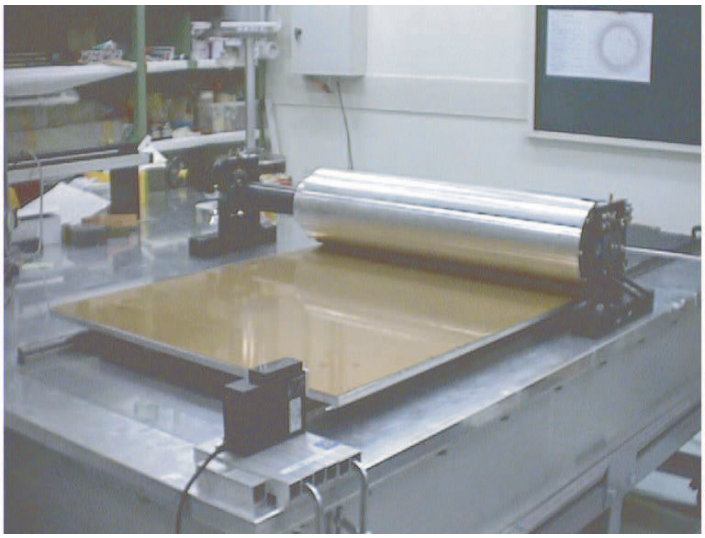


図 3.8: カソードシート張り合わせ治具

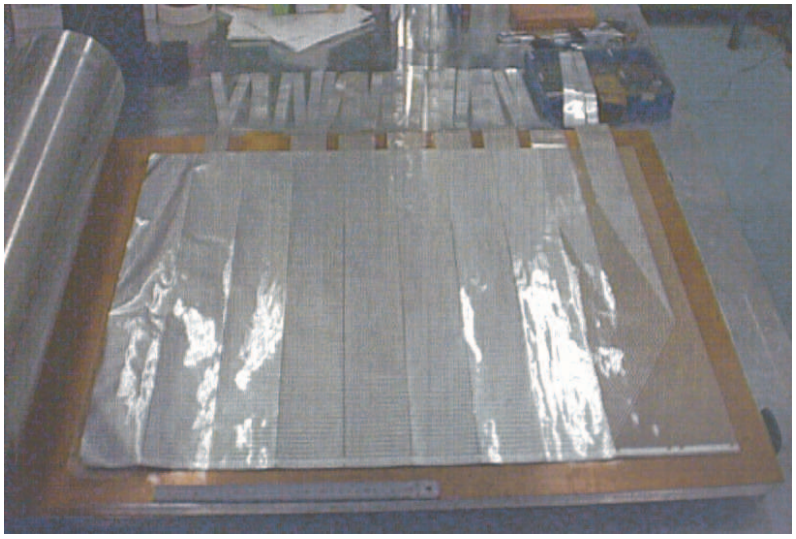


図 3.9: カソードシート (8 枚つづり)

ラーを手で固定して行ったため熟練を要したが、シート間は $0.5mm$ 以下の精度で張り合わせが行えた。

8 枚つづりのシートを製作後、円筒に接着剤転写シートで張り付けた。(図 3.10) その後、CFRP 円筒上のカソードストリップの位置を測定器 [6] によって $20\mu m$ 以下の精度で測定した。この測定結果は解析時の補正に使われる。

組立

組立は、定盤の上に置かれた治具の上で行った。治具は製作時の簡便さやワイヤ張りのことを考慮して作り、回転台の中心に軸を立てその中間に水平にエンドプレートを置くための調節できる台

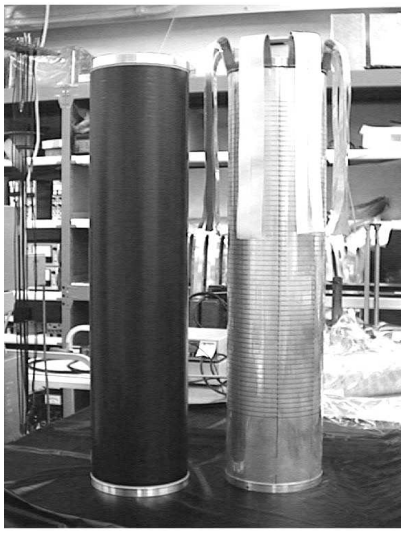


図 3.10: CFRP 円筒 (カソードシート張り付け前後)

を設置した。水準器とセオドライトで確認をしながら、仮組によって決めた組み合わせに従って組み立てた。円筒とエンドプレート間は、強度を出すためとガスシールを兼ねてアラルダイトによって接着し、ネジで固定した。接着剤が乾かないうちに、水準器やセオドライトでエンドプレートの平行度や垂直度を測定し、ワイヤを垂らしてエンドプレート間の穴の位置ずれを調べ、ネジを締め直す等して修正をした。平行度・垂直度ともに $100\mu m/\mathrm{m}$ 以下に抑えることができた。

ワイヤ張り

ワイヤ張りは、組立をした治具の上で行った。内側 3 層は CFRP に挟まれており外側からさわれないので、治具の上にワイヤを垂らすための装置を設置し、ワイヤをおもりで垂らして上下のエンドプレートの穴に通した。ワイヤは、フィードスルーを通し上側 (150 度側) をクリンプして固定し、下側におもり (センスワイヤは 80g、フィールドワイヤは 160g) をつけて張力をかけて下側をクリンプして固定した。フィードスルーにはシリコン接着剤 (ThreeBond 1211) を塗りエンドプレートとのガスシールをした。

張力測定はワイヤを 1 層張る毎に行った。ワイヤは、磁場をかけた状態で低周波の交流電流を流すと、

$$f_n = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

の共振周波数で共振を起こす。($\rho, l$ はワイヤの線密度と長さ、$T$ は張力、$n = 1, 2, ..$) 共振を起こしたときワイヤの両端にかかる電圧が変化するため、電圧の変化を検出して共振周波数を測定する。CDC 本体に組み込んだ Cathode part の張力測定の結果を図 3.11 に示す。

フィールドワイヤの部分には 2 つのピークが見られるが、これは共振している時のワイヤの節が、クリンプした部分とピンホールの部分の 2 つの場合があるためにワイヤの見かけの長さが変わるためにおこると考えられる。2 つのピークの間は、ピンホール間の距離 $l = 694.15mm(f = 143.5Hz)$ と片側ピンホールで片側クリンプ位置の距離 $l \sim 718.65mm(f = 138.6Hz)$ にほぼ対応している。ピーク周波数の$\pm 5\%$以上離れた共振周波数のワイヤは張り直しを行った。

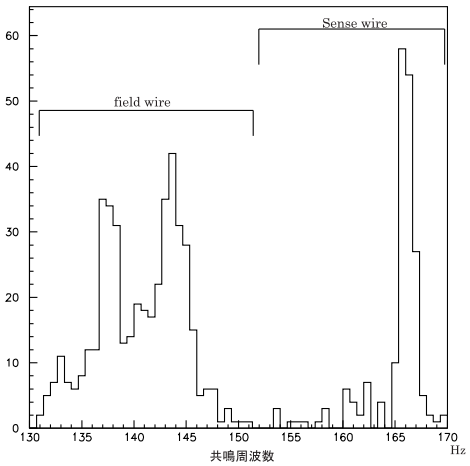



図 3.11: ワイヤ張力 (共振周波数)

ワイヤ張りの終わった Cathode part を図 3.12 に示す。Cathode part は製作時の治具に乗せられている。上部に見えるのはワイヤ張り用の装置である。

図 3.12: Cathode part(ワイヤ張り終了)

ガスシール

ドリフトチェンバーの正常な動作のためにはガスリーク量をできるだけ抑えることが重要である。ガスリーク箇所があると、その箇所から大気中の成分がチェンバー内に入り込み、ドリフト速度やガス増幅率などの変化をもたらすためである。そのために、CDC では全体で 10cc/min に抑えることを目標にした。Cathode part は構造が複雑であるが、表面積が小さいので、この目標値よりかなり押さえなくてはならず条件が厳しい。

Cathode part はワイヤ張り終了後、CDC 本体側の連結部とおなじ構造を持ったガス容器に入れ、ガスシールを行った。ガス容器との間は後で剥がすことを考えてマイラーテープでシールした。フィードスルーピンはクリンプしてあるが、ガスリークするため嫌気性接着剤 (ロックタイト) を穴に塗りシールした。カソードの読み出し線が通っているエンドプレートのスリットはシリコン接着剤 (ThreeBond 1220B) にて隙間を埋めることでガスシールした。

ガスリークのチェックは容器内をヘリウムガスで充填・密閉し、ガスディテクターによってヘリウムガスを検知し、ガスリーク箇所を特定してガスシールした。全体のガスリーク量は内圧の時間変化を測定すること (封じ込め法[1] ) によって測定した。

CDC 本体に組み込んだ Cathode part のガスリーク量の最終結果を図 3.13 に示す。関数フィットの

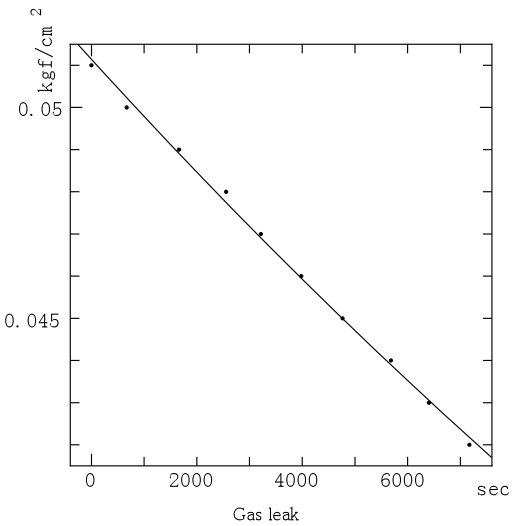



図 3.13: 封じ込め法でのガスリーク測定　曲線は $P - P_0 = ae^{bt}$の関数でフィットした結果。$b(=\frac{P_0}{V_0}\beta)$=$2.69 \times 10^{-5}$ [1/sec]

結果、大気圧 $P_0 = 0.998\,[\mathrm{kgf/cm^2}]$、容器の体積 $V_0 = 22927\,[\mathrm{cc}]$ とすると、$\beta = 0.62[\mathrm{cc/sec/(kgf/cm^2)}]$ であった。

カソード読み出し線の取り出しスリットが構造上ガスシールが困難であったが、最終的にはガス

[1] ガスが理想的な状態と仮定し、大気圧を $P_0$、容器の体積を $V_0$、内圧を $P$、容器中のガスの大気圧中での体積を $V$ とすると $PV_0 = P_0V$。単位時間あたりのリーク量は内外の圧力差に比例するので、外気圧を $P_0$とすると、

$$\frac{dV}{dt} = -\beta(P - P_0)$$

計算して

$$P - P_0 = A\frac{P_0}{V_0}e^{\frac{P_0}{V_0}\beta t}$$

となる。よって差圧の時間変化を測定することで、ガスリーク量を測定できる。

リーク量は差圧が $0.01[\mathrm{kgf/cm^2}]$(大気圧の約 $1\%$) の時、$0.37$ [cc/min] とかなり少ない値が達成できた。

### 完成

最後に、信号読み出し線、GND、HV ケーブルを取り付け、HV をかけてアノード、カソードとも全てのチャンネルの信号を読み出してチェックした。

以上の様な一連の行程を 2 台分並列して行い、2 台完成までに約 7ヶ月を要した。2 台のうち、上記で示してきた CFRP 内筒の厚い方 (約 0.5mm 厚) を実機として採用し、次節に示す方法で CDC 本体に組み込みを行った。また、もう 1 台の同型機を用いて 1998 年 3 月に KEK においてビームテストを行い、Cathode part としての性能を満たしていることを確認した。

### 3.2.2 Cathode part 組み込み

CDC は初め Main part の部分とその内側の部分が独立した 2 つの測定器として計画されていたが、その後一体で製作することが技術的に可能になり、物質量を抑える観点から現在のように 1 つの測定器として製作された。しかし、Cathode part はその構造の複雑さから、独立に製作し後に組み込むことになっていた。

#### 連結部

Cathode part と Inner part の連結部の構造は、図 3.14 のようになっている。Cathode part は CDC 本体に後方側から挿入しネジ止めすることし、そのため Cathode part のエンドプレートは前方側のものが後方側のものより径が小さい。連結部分はテーパー構造になっており、エンドプレートの間にはテーパーのついたテフロンリングを挟む。テフロンリングはわずかしか歪まないため、エンドプレートのずれは半径方向には問題ない程度であるが、テーパー構造のおかげで z 方向には 0.5mm 程度の許容があり、製作・測定精度のために生ずるエンドプレートの z 方向のずれを吸収することができる。また、テフロンリングは連結部のガスシールも兼ねる。

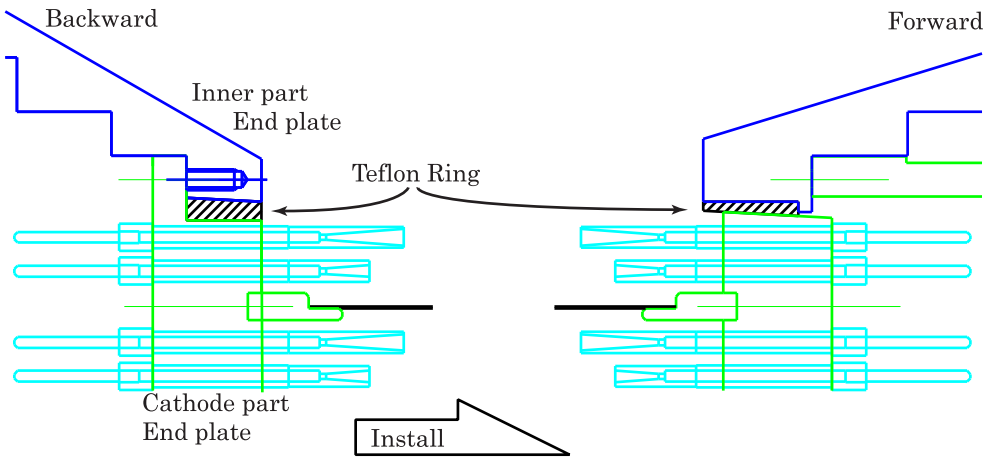



図 3.14: Cathode - Inner 連結部

#### Install

CDC 本体のワイヤ張りおよび張力測定終了後 (1998 年 1 月) に Cathode part の Install を行った。以下に Install の手順と結果を述べる。

a. z 方向の長さ測定

CDC 本体はワイヤの張力のためエンドプレートが歪んでおり、Cathode part が入るべき部分の長さが設計値より 4mm 程度短く (定規を当てて測定) なっていた。実物で合うようにするため Inner part の z 方向の長さ測定を行い、適当な厚みの 17 度側のテフロンリングを選択した。

z 方向の長さを測定するために測定器を製作した。測定方法を図 3.15 に示す。測定器には、CDC の中心に渡した軸に沿って上下に移動するステージ上に、水平方向を望む CCD カメラを設置する。ステージと支持台にはロータリーエンコーダを取り付け、それによってステージの位置を測定し、

CCD で Inner part のエンドプレートのエッジ位置そ測定して z 方向の長さの測定とする。ロータリーエンコーダの測定精度は 0.1mm であり CCD も画像が鮮明であるので同程度の測定精度があると考えるが、測定器を支えている軸のぶれのためこの測定器全体の測定精度は 0.3mm 程度であると考える。しかし、この誤差はテフロンリングが変形することで吸収できると考えられる。以下に測定手順を述べる。

1. 軸に測定器を固定し、クレーンで軸をつり上げ CDC の中心に通す。
2. CDC 本体を固定する架台に軸を固定し CDC 本体に対して芯出しをする。
3. 測定器全体を CDC 内部に軸に沿って下ろし、軸に固定する。
4. CCD の焦点を合わせ、片方のエッジの位置を測定する。
5. 全ネジ棒を回転させ、ステージをもう片方のエッジの位置まで移動させ測定。

このようにして、両端のエッジ位置から長さを 4 点測定した。結果を表 3.2 に示す。この測定結果を元に、厚みを計測しておいたテフロンリング 4 種 19 本から合う物を選択し Inner part の前方側に取り付けた。

| $\phi$ | 0° | 90° | 180° | 270° | Cathode |
|---|---|---|---|---|---|
| 長さ (mm) | 734.8 | 735.0 | 735.0 | 734.7 | 738.3(=743.3-5) |

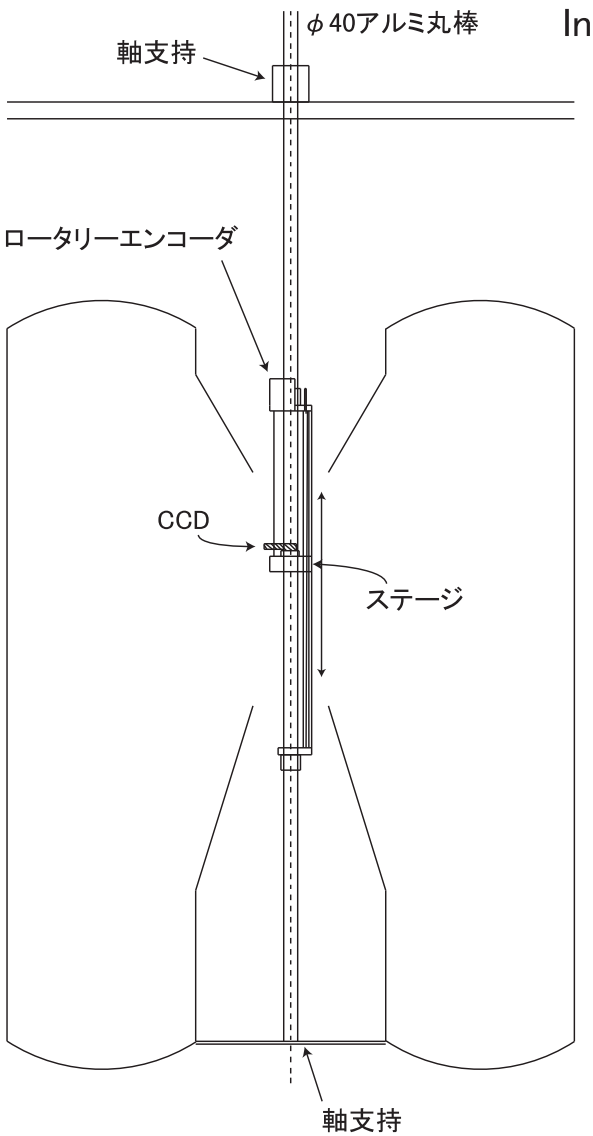
表 3.2: z 方向の長さ測定の結果

b. Cathode Install

次に Cathode part の挿入を行った。挿入方法を図 3.16 に示す。挿入方法や手順は z 方向の長さ測定の時とほぼ同じである。

挿入時に Cathode part の両端のエンドプレート間にかなりの力が加わると思われたため、エンドプレート間を固定するための治具 (直径 12cm のアルミパイプと金具) を製作し取り付けた。その治具を軸とのガイドに用いて軸に滑らせるようにして挿入した。挿入後、後方側のエンドプレートをネジで締めて固定した。ネジを締める際には Cathode part が変形していないことを確かめるために、CFRP 円筒の内側にストレインゲージで CFRP のゆがみ具合を測定し、Inner part のエンドプレート間が大きく拡がっていないことを確かめるために、Inner part のワイヤの張力を測定しながら行った。

Cathode part の CDC 本体に対する位置はテーパー部分、特にテフロンリングの精度によって決まる。そのため、r-$\phi$方向にはネジの遊びの大きさ約 0.4mm のために誤差が生じる可能性がある。z 方向はネジを完全に締めることでエンドプレートの隙間が無くなるためそれほど大きな誤差は生じないと考えられる。




Inner part Z measurement

・CDCの中心に軸を通し
芯出しする
・軸をガイドに上下する
ステージを設置
・ステージの位置を
支持板に取り付けられた
ロータリーエンコーダ
にて測定(精度0.1mm)
・ステージ上に設置された
CCDカメラにてメ、Inner
メ partのエッジを測定
メ・軸に平行につけら祀
全ネジ棒を回転するこ
とで、ステージを移動

図 3.15: z 方向の長さ測定

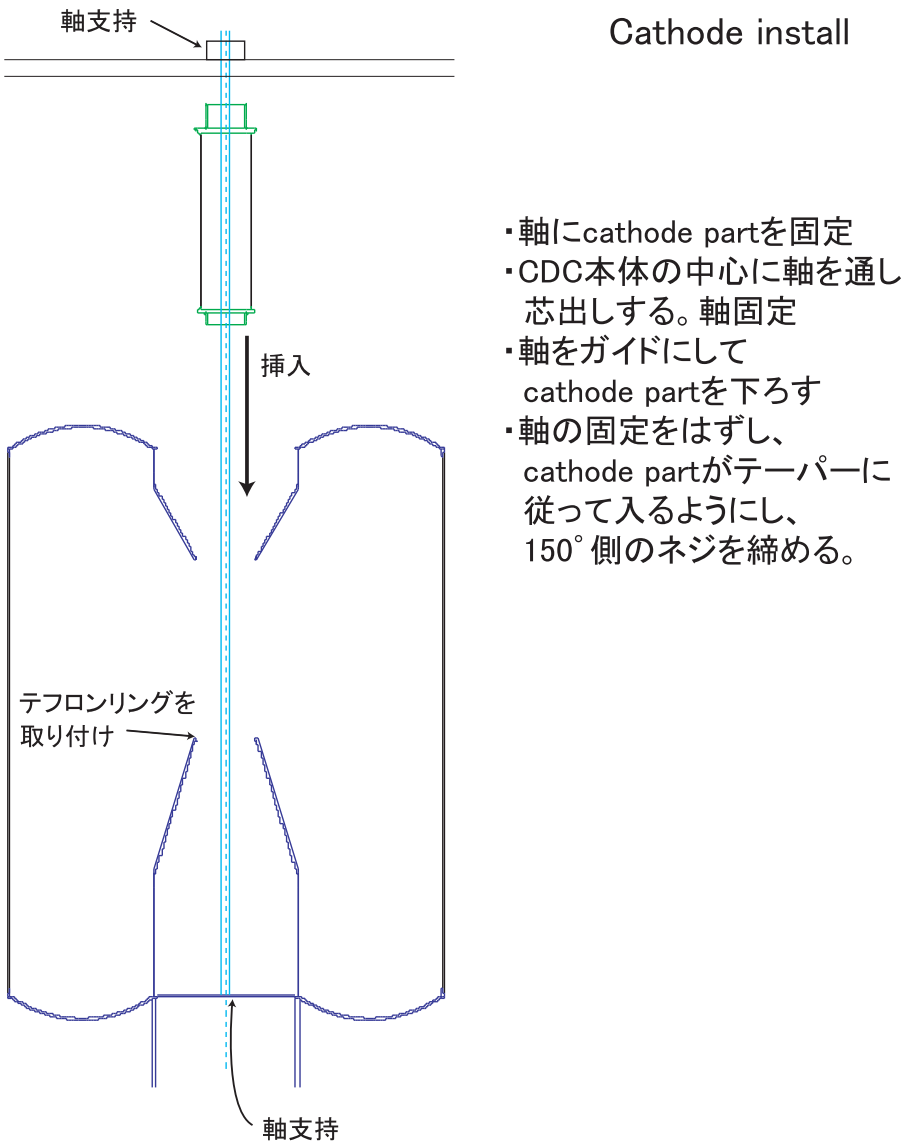



図 3.16: Cathode Install

**Cathode part 周辺部**

Cathode part 周辺部、及び Inner part 周辺の各種部品、カバーの設計・製作をした。Cathode part 及び Inner part は、加速器の電磁石の配置のために読みだしケーブル等を配置する空間が狭くなっている。この限られた空間にアノードの読み出し線や HV ケーブルだけでなくカソードの信号変換の役割を持つ基盤 (Terminator) 等を配置し、さらに、外来ノイズを遮断するための電磁シールドカバーとそれらを支える支柱を取り付けなければならない。3D CAD などを駆使しそれらの部品の設計・製作を行い、与えられた領域に配置することができた。図 3.17 に断面図を示す。

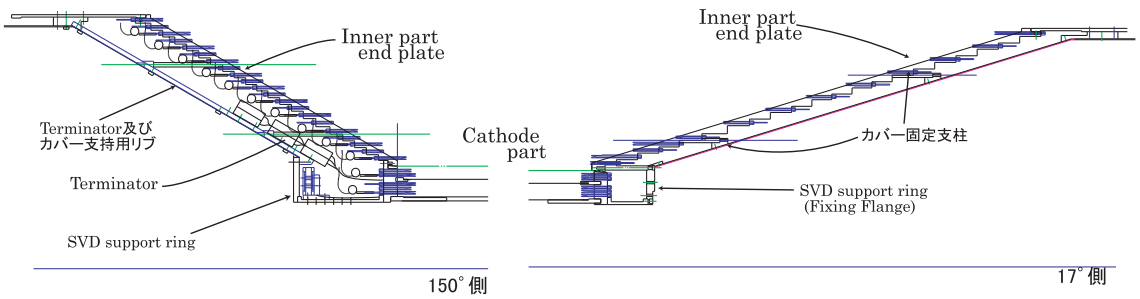



図 3.17: Cathode part 周辺部

### 3.2.3 ガス圧に対する変形

CDC はガス増幅率を一定にするためにガスの圧力を絶対圧でコントロールするため大気圧より少し高い圧力をかける。大気圧が大きく低下したとき (例えば台風が通過するとき) は、差圧が大きく変動し、CDC が膨張し全体が変形する。そのため、Cathode part に様々な力が加わる。そこで、Cathode part に影響するガス圧に対する変形について以下にまとめて述べる。

**Cathode part 内筒の歪み**

以前に製作した Cathode part 試作機において、ガス圧のために内筒が変形することが確認された。円筒は CFRP シート 3 枚を 3 層張り合わせて円筒状にしたもので、1 周巻いたときのシートの継ぎ目が弱く、そこが最も変形していた。弱い部分を改善するために、CFRP シート 1 枚を 4 周 (または 3 周と樹脂シートを) 巻いて円筒状にする事で継ぎ目と全体の強化を図ることにした。

組立前に CFRP の強度を評価した。内筒とエンドプレートを仮組みしガス容器に入れて容器内にガス圧をかける。そのときに、一番変形すると考えられるシートの継ぎ目の中央部の r 方向の変位をデジタルマイクロメータ (精度 $10\mu m$) で測定した。数種類の円筒から強度のあるものを選び製作に使用した。図 3.18 に Install したもの (4 周巻) と製作したもう 1 台の結果を示す。この結果から、ガス増幅率などを考慮し変位量の上限値を 0.1mm とし、ガス圧の限界を $0.08\mathrm{kgf/cm^2}$(1 気圧の約 8%) と制限することにした。

引っ張り試験

ワイヤ張力をかけたときと同様に、CDC 本体のエンドプレートは CFRP 外筒との接続部を支点にして変形する。ガス圧を CDC 内部にかけた場合もその圧力によって CDC エンドプレートが膨

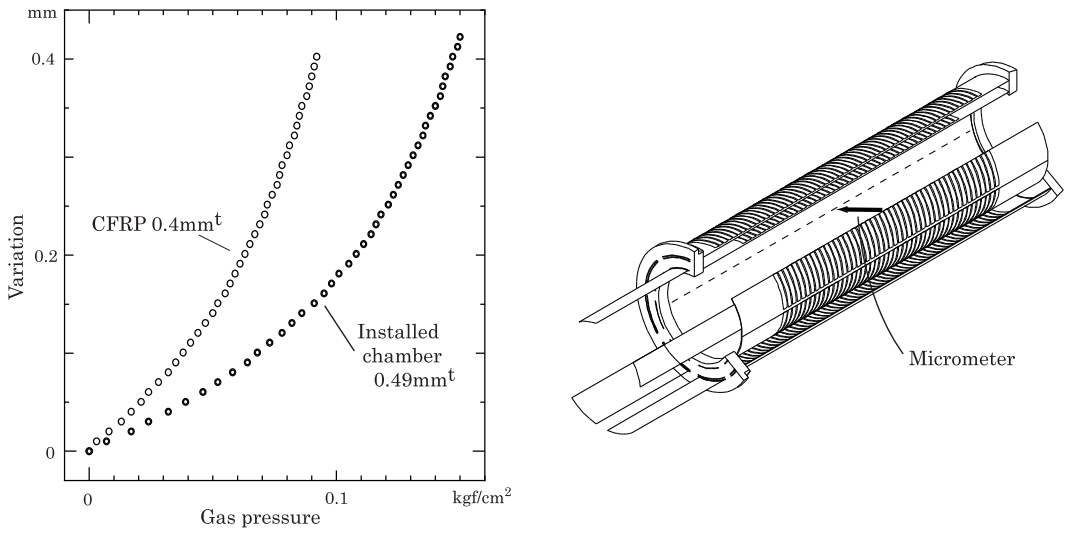



図 3.18: ガス圧による Cathode 内壁の歪みの測定

張することが考えられる。そのとき、構造上 CDC 本体のエンドプレートは Cathode part の両端を引っ張る形になる。CDC が 1 気圧の 5%の差圧で動作した場合、最も単純に考えるとエンドプレートに加わる圧力の半分が Cathode part を引っ張る力となり、その大きさは約 600kgf となる。

これほど大きな力を Cathode part に加えても耐えうるか、またそのときの歪みの程度はどれくらいかを、Cathode part と同じエンドプレートと円筒を用いて組み立てたテスト機を用いて、引っ張り試験機 (名古屋大学工学部のものを使用) でテストした。引っ張り荷重と伸びの関係の結果を図 3.19 に示す。測定の都合上、同じテスト機を 2 回試験機にかけた。1 回目は 1500kgf まで荷重を加え一旦 50kgf まで戻した。この時のヒステリシスは $50\mu m$ 程度で Cathode part は良い弾性体であることを示している。2 回目は破壊するまで荷重を加えた。この時、2000kgf 程度で割れる音が鳴りだし 3000kgf 程度で円筒が局所的に歪みだし、その後、完全に破壊した。破壊された部分は、中筒を固定している M2 のネジと、CFRP とサポートリングを接着している部分であった。

この結果から、Cathode part は 600kgf 程度であれば大丈夫であると言える。荷重の上限は 1t が妥当であると思われ、この時の伸びは $700\mu m$ 程度である。Cathode part が良い弾性体であるので、組み込み後には Cathode part の伸びの変位量を測定すれば引っ張られている力を見ることができる。

### ガス圧に対する CDC の変形

CDC に加える差圧は、大気圧の変動によって限界値 (1 気圧の約 8%) 程度までは変動する可能性がある。この差圧の変動によって CDC 本体は変形する。そこで、Cathode part を組み込み後、CDC に実際にガス圧を加えて変位量を測定した。Cathode part は後方側ではエンドプレートがネジ止めされており、前方側では固定するためのリングとフランジが取り付けられている。図 3.20 に測定箇所を示す。図に示した □ ~ □ の点に、製作した治具によって固定したマイクロメータを差し、ガス圧に対する変位量を測定した。室温変化による熱膨張や表面精度等により測定誤差は $20\mu m$ 程度である。 □ ~ □ の測定点は次に示す箇所である。

□ CDC 外側に対する Cathode part 後方側の SVD サポートリング表面の変位

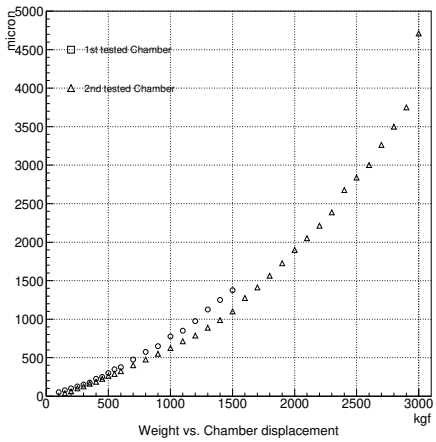



図 3.19: 引っ張り荷重と伸びの関係

Cathode part の座標の基準はここで決めている

- Cathode part 全体の伸び
  この測定値から Cathode part にかけられる荷重の限界値を判断する
- CDC 外側に対する Inner part 前方側の継ぎ目の変位
- フランジの外縁に対する内縁の歪み

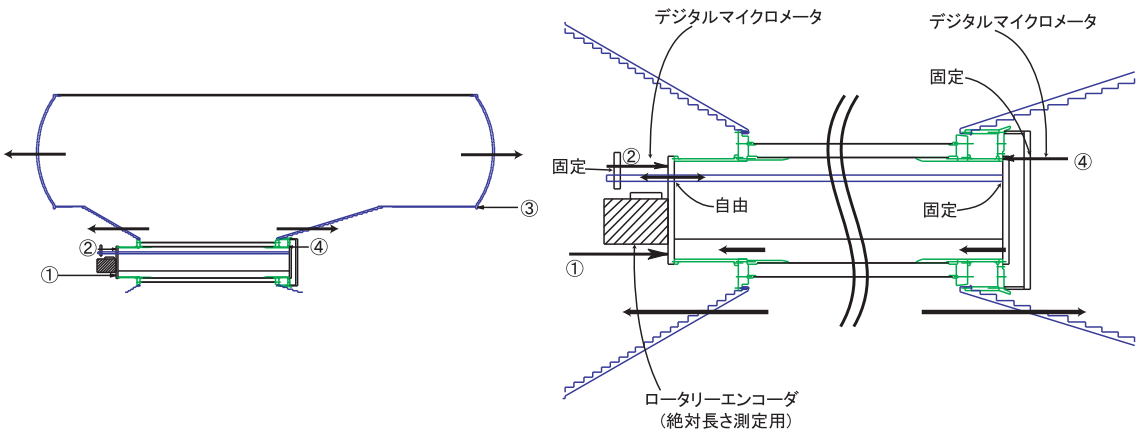



図 3.20: ガス圧による CDC の変形の測定

測定結果を図 3.21 に示す。Cathode part の伸びに対応する  は $400mmH_2O$ においても $50\mu m$ 程度に止まっており、$800mmH_2O$(1 気圧の 8%) の内圧に対しても引っ張りに対する耐久性の限界よりかなり小さいと予想され問題ない。しかし、Cathode part の位置の基準である  を見ると $400mmH_2O$ の気圧の変化で $120\mu m$ の変位がある。この位置は内側に取り付けられる SVD の基準面でもあるため、SVD の位置分解能に対して $120\mu m$ の変位は大きい。また、Cathode part の z 方向の位置分解能 $400\mu m$ と比べても差圧が大きくなった場合無視できない。

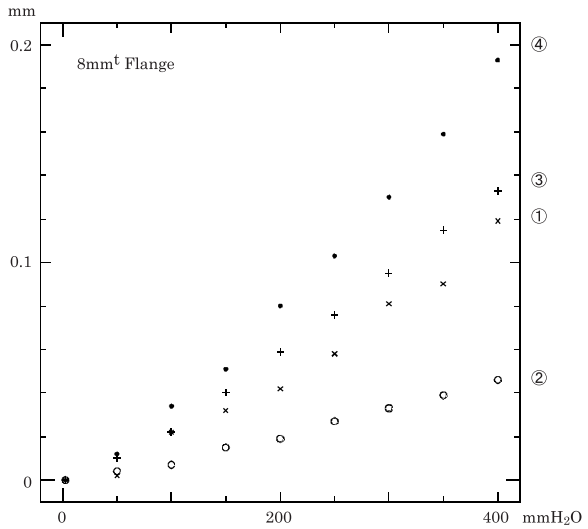



図 3.21: ガス圧に対する各変位 (フランジ厚 8mm)

前述の測定において、Cathode part と Inner part をつなぐフランジ部分の変形が最も大きいことが分かり、これを小さく抑えることで全体の変形を抑え込むこととした。フランジの外縁を支え内縁に力を加えたときの、外縁に対する内縁のたわみの量 $W$ はフランジの厚み $h$ に対して $W \propto 1/h^3$ の関係を持つ。このことから、フランジを厚くすることでかなり強化させることができると期待できる。厚みを変えることで CDC の変位が有意に変わるかを確認するため、フランジを 20mm 厚のものにして測定した。結果を図 3.22 に示す。

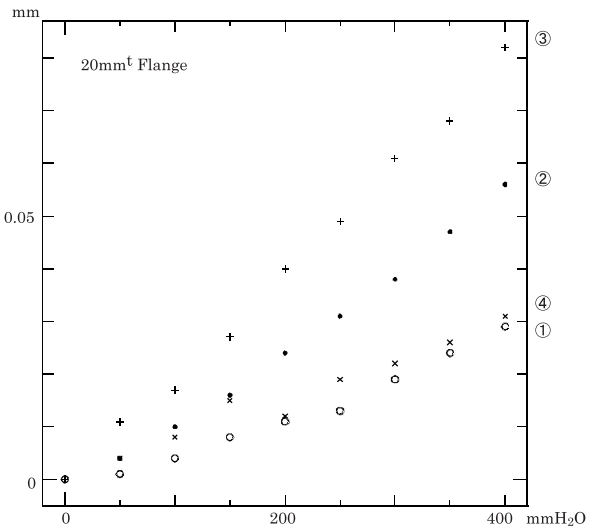



図 3.22: ガス圧に対する各変位 (フランジ厚 20mm)

結果から、フランジのたわみは $30\mu m$ 程度、基準面である □ の変位も $30\mu m$ 程度に収まっており、かなりの改善が見られる。ここで使用したフランジは仮止め用である。実際に使用するフランジは図 3.24 のような形に設計した。厚みを増して強化しつつ、物質量もある程度抑える必要があったため、張りのような部分を残して彫り込むようにした。厚い部分で 25mm、薄くした部分

で 10mm になっている。また、Inner part の電磁シールドカバーの支えを兼ねるため、すり鉢状になっている。このようなフランジを製作し、取り付けて同様に測定をした。結果を図 3.23 に示す。点・丸はデータ点、線・関数式は 1 次関数フィットの結果を示す。

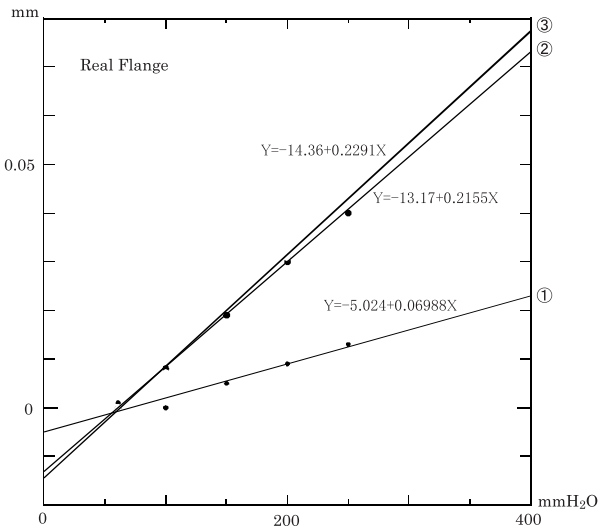



図 3.23: ガス圧に対する各変位 (フランジ最終版)

結果から、基準面である  の変位は図 3.23 中の式のような振る舞いをし、$400mmH_2O$(1 気圧の 4%) の変動においても $30\mu m$ 程度に押さえ込めることが分かり、このような構造のフランジでも問題ないことを確認した。

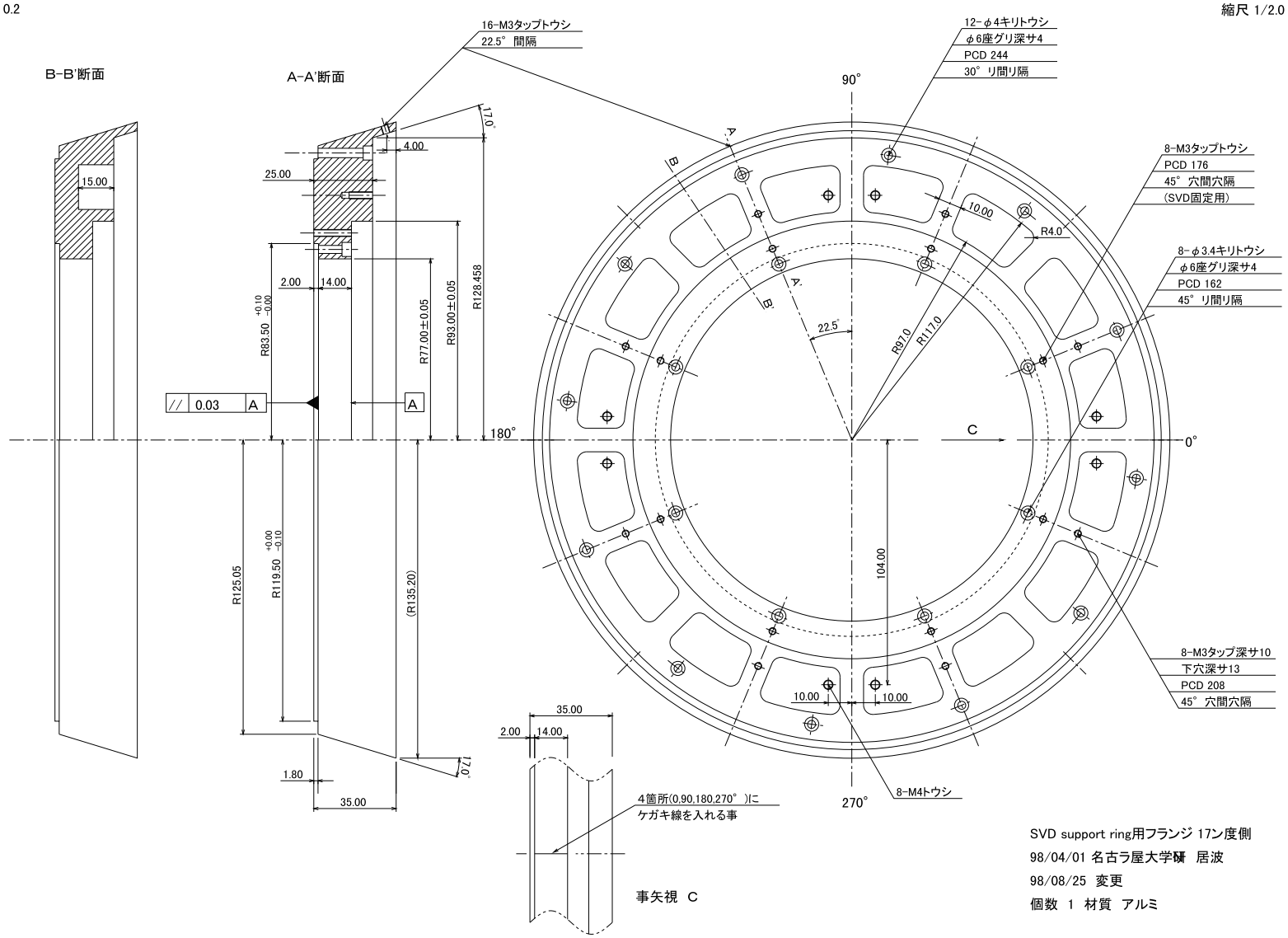



図 3.24: 最終版フランジ図面

# 第4章　Xtシミュレーション

我々が製作したCDCのようなドリフトチェンバーでは、荷電粒子がドリフトセル内を通過した時刻から、粒子がチェンバー内のガスを電離させて放出された電子がアノードワイヤに到達するまでの時間を直接測定するが、飛跡を再構成するためには各セルにおいてドリフト時間をドリフト距離に変換し飛跡の通過位置を決める必要があり、この部分が位置分解能に大きく寄与する。

この章では、ドリフト距離とドリフト時間(Xt)の関係を示すXt関数を決めるために行ったシミュレーション結果について述べる。

## 4.1　セル構造

BELLE-CDCでは、1本のセンスワイヤを8本のフィールドワイヤで囲み、ドリフト長が10mm程度の長方形のセルになっている。センスワイヤにはおよそ2.3kVの高電圧がかけられる。

CDCのセンスレイヤー11層目(Layer10)の1.5Tの磁場中での等ドリフト時間線を図4.1に示す。

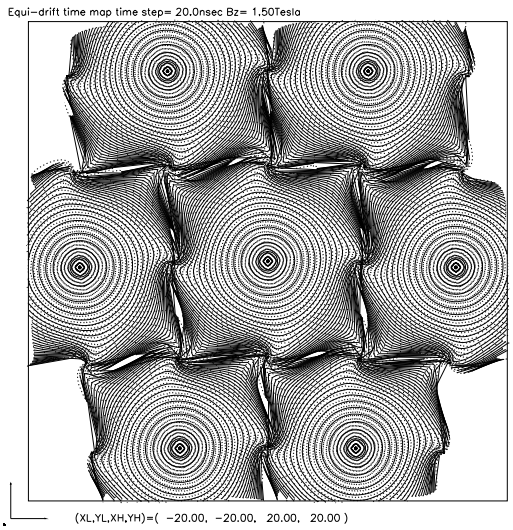



図 4.1: 等ドリフト時間線 (Layer10,B=1.5T)

図3.4に示したようにドリフト速度が低い電場強度からほぼ一定であるおかげで、セル内の大部分で一定のドリフト速度が得られることが分かる。

しかし、r-$\phi$面上での荷電粒子のセルに対する入射角$\alpha$が変わるとドリフトする電子の方向の軸も傾くため、明らかにドリフト距離の上限(セルの大きさに対応)が変わってくる。また、セルの境界付近では等ドリフト時間線が等間隔では無くなっており複雑な形をしている。そのため、ドリフト時間とドリフト距離の関係は荷電粒子の入射角に大きく依存することが予想される。(図4.2)

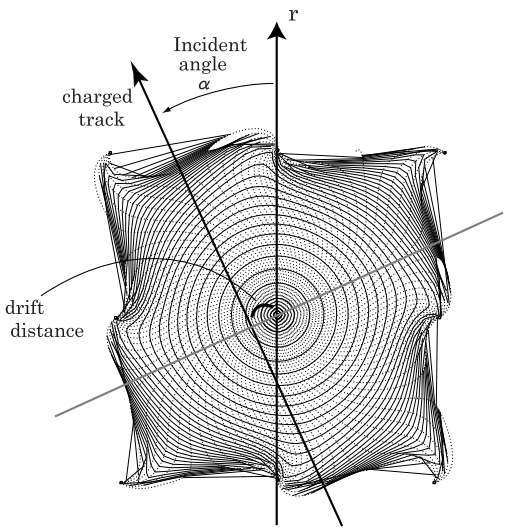



図 4.2: 入射角の定義

また、CDC は 3 次元で飛跡を測定するために z 軸に対して角度をつけて張られたステレオワイヤを持つが、このステレオワイヤによって作られるセルの形は位置 z によってわずかに変化する。そのため、荷電粒子の z 方向の入射位置に対しても、ドリフト時間とドリフト距離の関係は依存性を持つ。

これらの予想から、Xt 関数には荷電粒子の入射角$\alpha$と入射位置 $z$ の依存性を持たせる必要がある。どのような関数を用いれば良いのかを調べるために、シミュレーションによって Xt のデータを作り各依存性について考察する。

シミュレーションには xdriftx(ver.2.1) [8] というプログラムを用いた。プログラム中のパラメータに CDC のパラメータ (表 4.1、図 3.4 のドリフト速度) を与えてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果と宇宙線テストで実際に測定したデータの例を図 4.3 に示す。セルの境界付近では多少の違いが見られるが、全体的には良く合っていると言える。また、分布の幅が違うが、これはシミュレーションには電気的なノイズやトラッキングの誤差などの効果が入っていないためで、入射角や入射位置 z の依存性を探る面においては問題ではない。

| | |
|---|---|
| 全電離量 | 5.3 ions/mm |
| (1 次電子数) | (2.4 ions/mm) |
| 拡散係数 | $160\mu m/\sqrt{cm}$ |
| ローレンツ角定数[1] $k$ | 1 |

表 4.1: シミュレーションでの主なパラメータ [9]

過去のテスト実験の経験から、図 4.3 に示した Xt 分布を関数化するためにドリフト領域 (図では$-8$mm ~ 8mm 程度までの領域) は 5 次関数で関数化すると、良い位置分解能が得られることが

[1] 以下の式で定義された $k$ を指す。

$$\tan\alpha = \frac{BV_0}{kE}$$

ここで、$\alpha$はローレンツ角、$E, B$ は電場と磁場、$V_0$は磁場がないときのドリフト速度である。$\alpha$と $V_0$はガスに依るパラメータで、我々の場合 ($He\text{-}C_2H_6$=1:1) は $k = 1$ となる結果が得られている。[9]

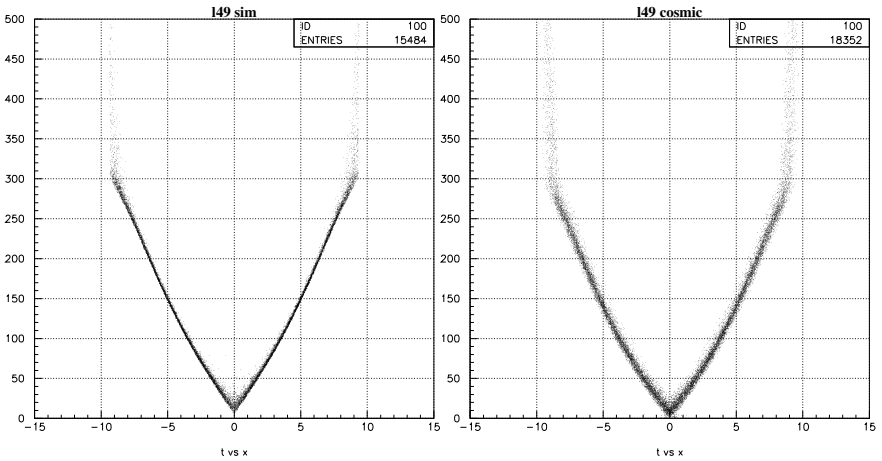



図 4.3: シミュレーション (左) と宇宙線テスト (右) の結果の例 (Layer49,B=0T, 垂直入射)

分かっている。本実験の解析においても、ドリフト領域は 5 次関数で関数化し、またドリフト領域外の境界領域でも、飛跡の再構成時により多くの測定点を用いるために、1 次関数で表現することにした。このようにして図 4.3 のシミュレーションデータを関数化したものを図 4.4 に示す。

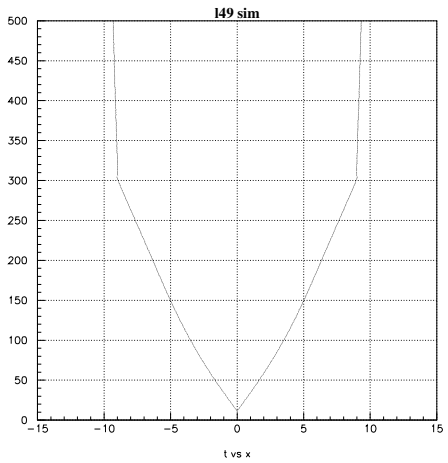



図 4.4: Xt 関数の例 (Layer49,B=0T, 垂直入射)

## 4.2　入射角$\alpha$による依存性

まず、明らかに依存性を持つと分かる、入射角によるドリフト距離とドリフト時間の関係の依存性を調べる。この節でのシミュレーションは、磁場 1.5T、入射角 (polar angle)$\theta = 90°$、入射位置 $z = 0$ の条件で行った。

### Xt 分布

入射角を$-80°$から $90°$まで $10°$ごとに変えてシミュレーションした結果を図 4.5 に示す。この分布において、入射角が 0 度、40 度、90 度の面でスライスした結果を図 4.6 に示す。0 度や 90 度の入射角では、セルの大きさである約 8mm のドリフト距離で Xt 分布が急激に変わり、通常のドリフト領域と境界部分に分かれる。しかし、40 度の入射角などでは、セルの対角に荷電粒子が通過するためドリフト距離もセルの対角の長さまで広がり、Xt 分布もドリフト領域が広がっている。

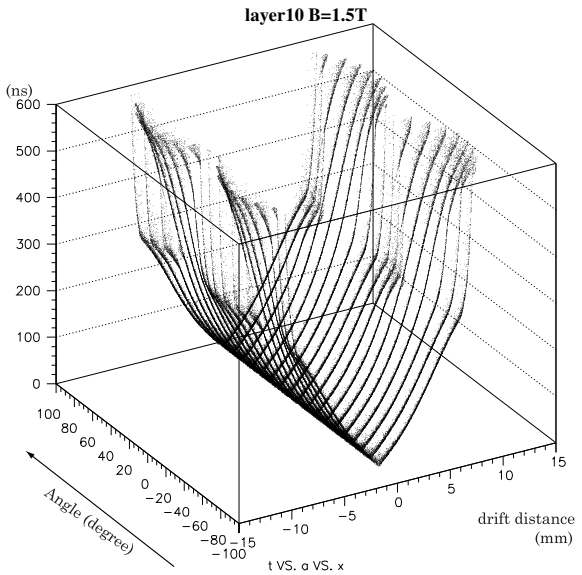



図 4.5: Xt の入射角依存性 (Layer10,B=1.5T)

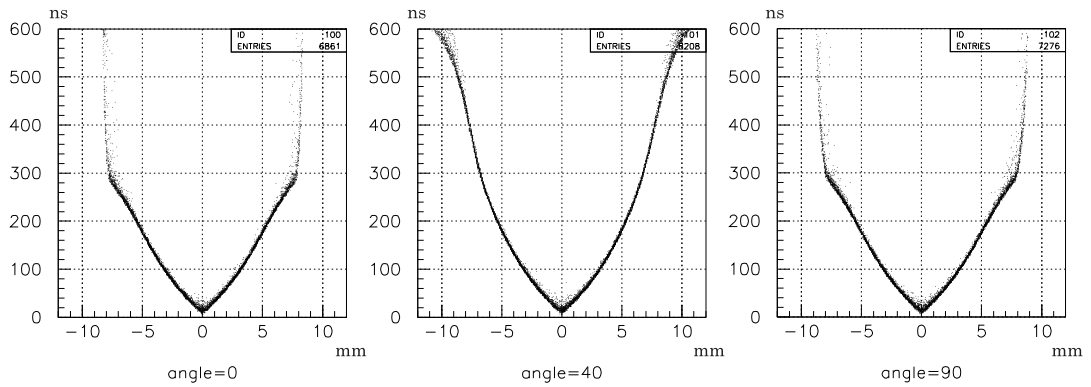



図 4.6: Xt 分布 (Layer10,B=1.5T)

次に、入射角を 1°ごとに変えてシミュレーションした結果を図 4.7 に示す。分布から分かるように、入射角方向には比較的なめらかに分布している。また、ドリフト時間が 100ns、200ns、300ns の面でスライスした結果を図 4.8 に示す。ドリフト時間が 100ns 程度のアノードワイヤに近い領域では、ドリフト速度がほぼ一定であるためにドリフト距離の入射角依存性は見られない。しかし、セル境界付近 (200ns) やそれ以降 (300ns) の領域では、入射角依存性が大きく見られる。

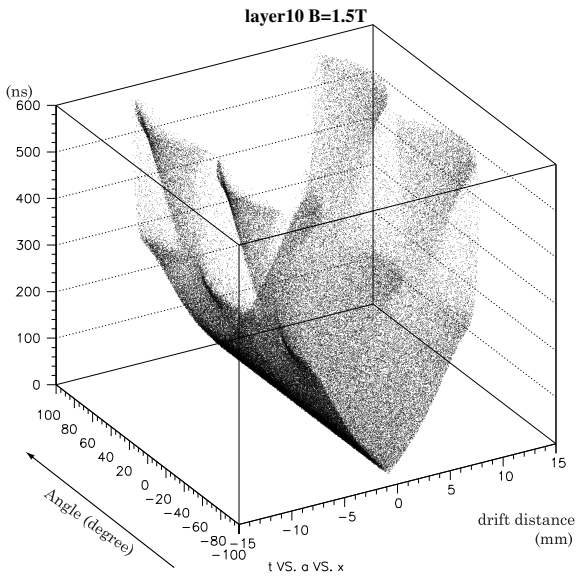



図 4.7: Xt の入射角依存性 (Layer10,B=1.5T)

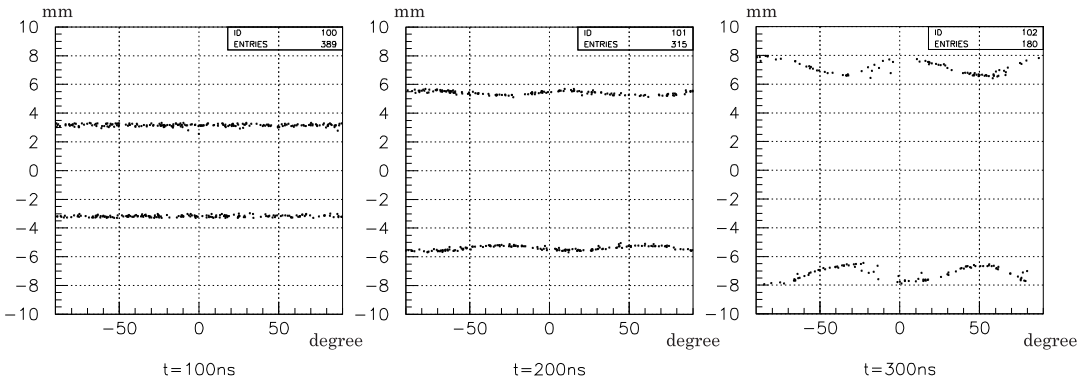



図 4.8: X-angle 分布 (Layer10,B=1.5T)

関数化

ドリフト時間の面でスライスしたときのドリフト距離の入射角度に対する依存性は比較的なめらかで周期的な振る舞いを示している。この入射角依存性を表現するために、次のように、ドリフト距離を計算することにした。(1) 入射角$-80°$ ~ $90°$まで 10 度ごとに Xt 関数 (5 次+1 次) を用意する。(2) 入射角の間の部分は、用意された Xt 関数によって計算されたドリフト距離から直線補間をして、その入射角のドリフト距離とする。図 4.9 に、ドリフト時間が 50ns、150ns、250ns のときの直線補間の例を示す。図中に描かれた曲線は、上記のようにして計算された Xt 関数からのドリフト距離の値を示す。比較的変化の大きい境界付近である 250ns においても入射角依存性が表現できているように見える。

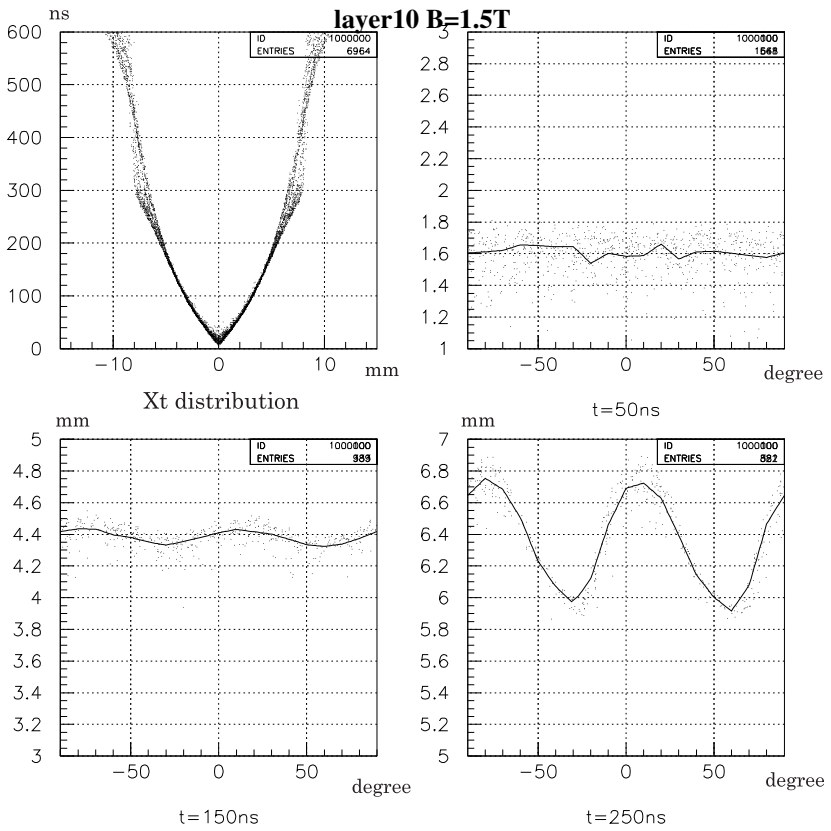



図 4.9: 直線補間の例 (Layer10,B=1.5T) (左上は Xt 分布。そのほかはドリフト時間が 50ns,150ns,250ns のときの入射角によるドリフト距離の分布。曲線は直線補間した Xt 関数)

このような、10 度ごとに用意された Xt 関数からの直線補間の妥当性を調べる。直線補間がデータ点を良く再現していないとき、データ点と直線補間された Xt 関数とのドリフト距離の差の分布を取ると、分布の幅が拡がるか平均がずれる。そこで、ドリフト時間が 10ns ごとに、この残差の分布を作りガウス関数でフィットして mean と sigma の分布を見ることにする。

まず初めに、図 4.5 に示した分布によって 10 度ごとに Xt 関数を用意する。この Xt 関数と関数を作ったこの分布のドリフト距離の残差の mean と sigma の分布を図 4.10 に示す。横軸はドリフ

ト時間、縦軸はそのときのそれぞれの値を示す。この分布の mean のずれや sigma の大きさは用意した Xt 関数の正しさを表しているが、より正確にするには Xt 関数の関数形を変える必要があるがここではその議論はしない。また、sigma の分布は位置分解能に対応するが、このシミュレーションではノイズの効果などが入っていないため、実際の位置分解能よりかなり良い値になってしまっている。

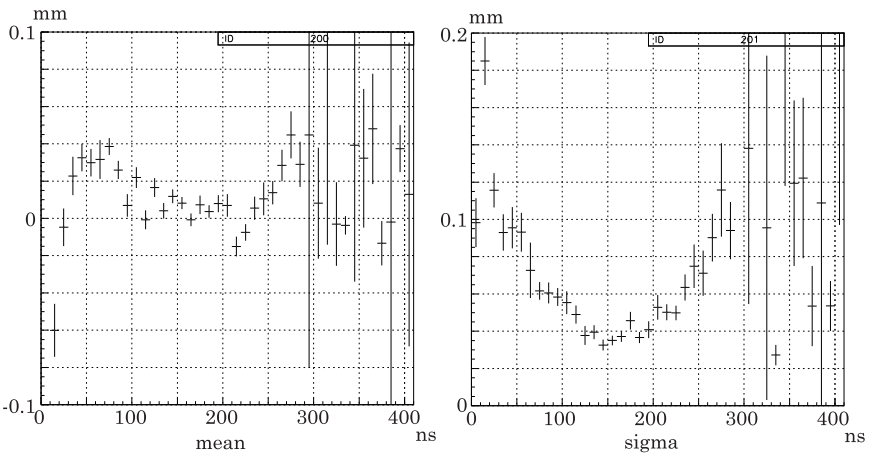



図 4.10: 残差の mean と sigma(Data step:10degree)

次に、データ点を図 4.7 に示した 1 度ごとにシミュレーションしたものにして、同様に直線補間された Xt 関数との残差を取ったときの分布を図 4.11 に示す。図 4.10 と比較しても、ほとんど変わりない。このことは、この場合の直線補間でも良いことを示している。

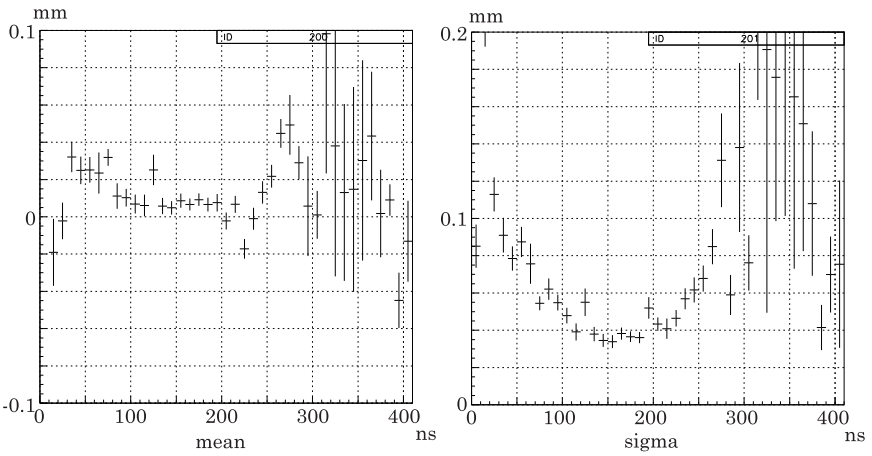



図 4.11: 残差の mean と sigma(Data step:1degree)

比較として、パラメータ量を減らすために 20 度ごとに用意した Xt 関数からの直線補間の結果を示す。ドリフト時間が 250ns のときの直線補間の様子を図 4.12 に、その残差の分布を図 4.13 に示す。このようにセル境界付近のドリフト時間では、明らかに直線補間ではうまく補間できておらず、sigma の分布においてもドリフト時間が 200ns ~ 300ns 程度の領域では位置分解能が悪化することが分かる。

このことから、入射角の依存性に対しては、Xt 関数を 10 度ごとに作り直線補間することにした。

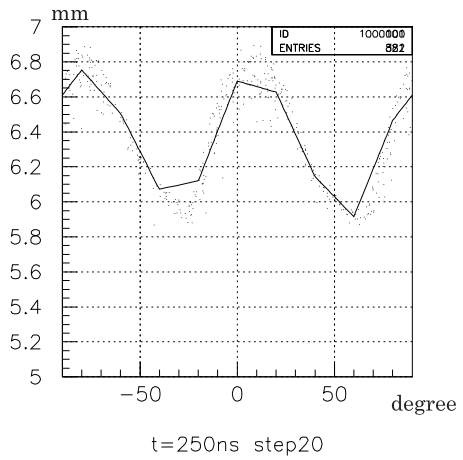



図 4.12: 20 度ごとの Xt 関数からの直線補間の例 (Layer10,B=1.5T)

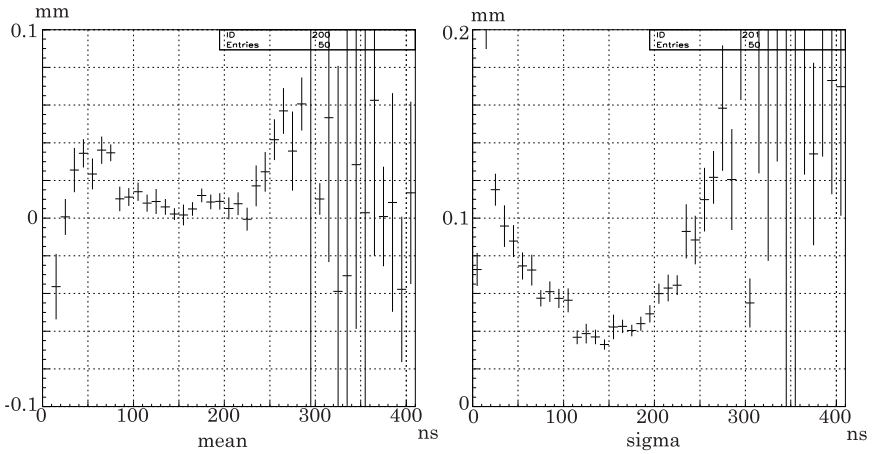



図 4.13: 残差の mean と sigma(Data step:1degree)

## 4.3　入射位置 z による依存性

ステレオレイヤーは、ワイヤーが張られるエンドプレートの穴の位置を前方と後方で回転方向にずらして張ってある。そのため、セルの形を構成するフィールドワイヤが平行でなく多少ねじれて張られることになり、セルの形が z 方向の位置に従って変形している。この変形による Xt 分布への影響をシミュレーションで調べる。

入射位置を後方のエンドプレート付近 ($z = -362.8$mm) から前方の付近 ($z = 658.8$mm) まで等間隔に 20 カ所としたときのシミュレーション結果を図 4.14 に示す。シミュレーションではステレオ角度が最も大きい Layer7 を選択した。また、ドリフト時間が 50、150、200ns の面でスライスした分布を図 4.15 に示す。この図の中の直線は $z = 0$mm での Xt 関数のドリフト距離である。

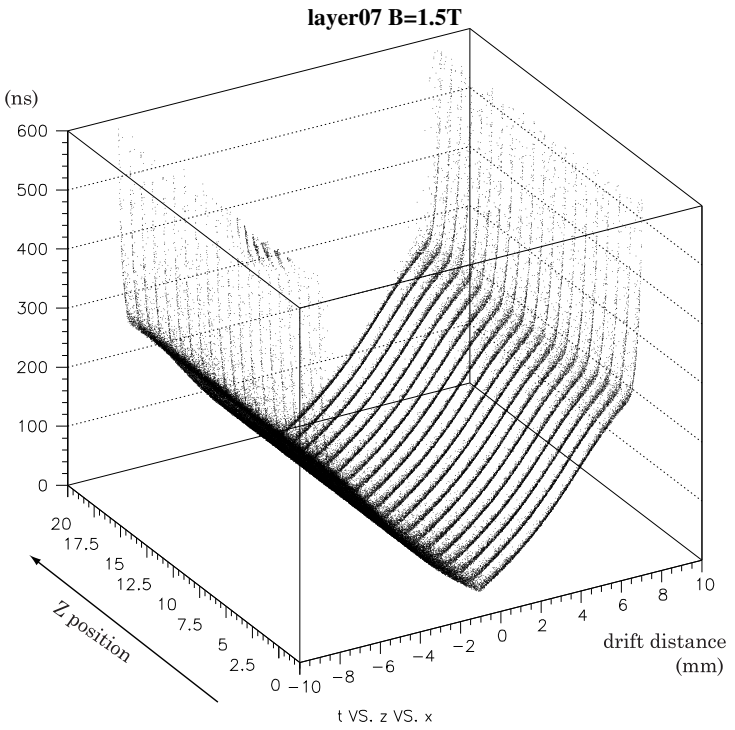



図 4.14: Xt の入射位置 z 依存性 (Layer7,B=1.5T,angle $\alpha$=0) z 軸のラベル 0 は $z = -362.8$mm、ラベル 19 は $z = 658.8$mm を示す

この結果から、セルの境界付近ではセルの大きさが変化するために、わずかに z 方向に依存性を持っているが、その変化は $100\mu m$ 程度である。しかもセルの境界付近では位置分解能が悪い ($200\mu m$ 以上) ことが分かっているので、この依存性はあまり影響しない。また、入射位置による依存性を Xt 関数に加えるとさらに多くの Xt 関数のためのパラメータが必要になり、解析に手間がかかる。

このような理由から、実験初期の段階では、入射位置の依存性は省略し、Xt 関数の入射角方向の依存性に対しては、Xt 関数 (5 次+1 次) を 10 度ごとにつくり直線補間することでドリフト距離を計算することにした。

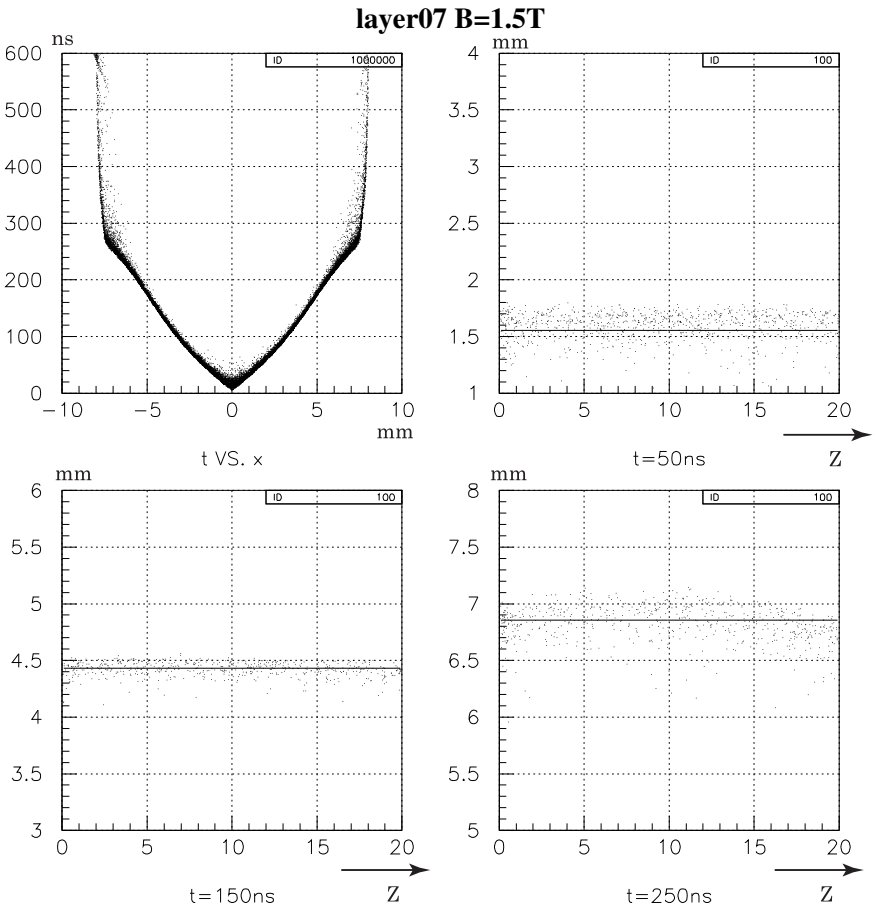



図 4.15: X-angle 分布 (Layer7,B=1.5T, 垂直入射)

# 第5章　宇宙線による位置分解能の評価と補正

CDC の完成後、BELLE 検出器に組み込む前に、宇宙線によって磁場のない状態での動作・特性テストを行った。この章ではその解析結果について述べる。

## 5.1　セットアップ

CDC は KEK 筑波実験室の地下 4 階の側室に設置し、そこから 30m のケーブルを経て同フロアのエレキハット内の読み出し回路系につないだ。測定時のトリガー信号は Cathode part 内部に設置した、1 対のシンチレーションカウンター (3cm×6cm×60cm) で構成した。それらの信号は coincidence、deray、FAN OUT などのロジック回路を経たのち、TDC の common stop 信号として用いた。

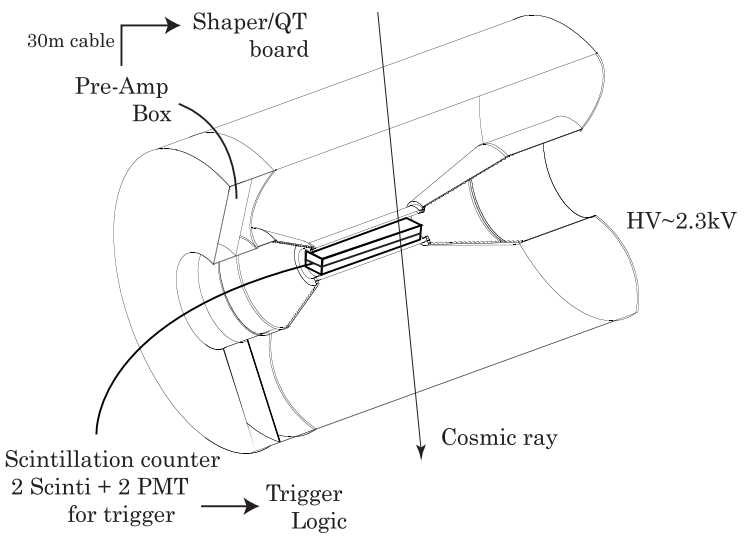



図 5.1: セットアップ

CDC の信号読み出し系の概要を図 5.2 に示す。信号は CDC 本体に取り付けられたプレアンプによって増幅され、後方の円周上に並べられたコネクタを経て 30m のケーブルでエレキハット内の Shaper/QT ボードに送られる。Shaper/QT ボードは、さらに信号を増幅し、パルスの整形、ディスクリミネート、QT 変換を行う。QT 変換とは、パルス電荷量をパルス幅に変換することである。このことによって、Shaper/QT ボードの出力パルスを multi hit TDC によって測定することで、パルスの立ち上がり時間からパルスの到達時間 (ドリフト時間) が分かり、立ち上がりと立ち下がり時間の差 (パルス幅) から電荷量が分かる。この QT 変換によって電荷量を測定するために必要であった ADC モジュールを省略でき、読み出しチャンネル数を半分に減らすことができる。Shaper/QT ボードは、また、CDC によるトリガー (r-$\phi$トリガー及び $z$ トリガー) のための信号も

出力する役割を果たす。Shaper/QT の出力信号は FASTBUS の multi hit TDC(LRS1877) で測定されコンピュータにデータが取り込まれる。

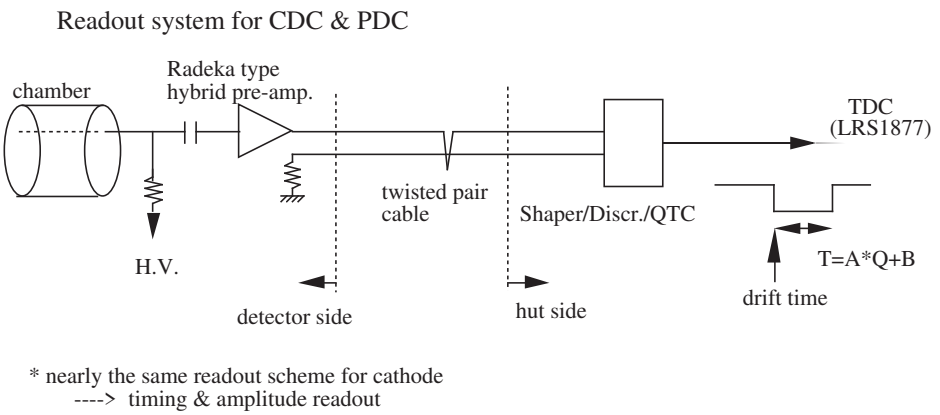



図 5.2: 読み出し系の概要 [4]

## 5.2 位置分解能の評価

前節のセットアップで収集した宇宙線データを用いて、CDC の位置分解能の評価を行った。

解析プログラムは、B ファクトリー実験の実際の解析に用いられる BELLE software を用いた。このソフトウェアは、BASF(Belle AnalysiS Framework) と呼ばれるフレームワーク上で、PANTHER と呼ばれるデータ形式を、モジュールと呼ばれる様々な機能を持ったプログラム群で扱い解析する。取り込まれたデータはすでに PANTHER 形式になっており、これを CDC 用の解析モジュール群 (飛跡の再構成など) を利用して BASF 上で解析を行った。このプログラムは現在開発中であり、解析はデバッグやパラメータ (以下に述べる T0 やアライメントなど) の補正なども兼ねている。解析には 11 月 16 日に作られたバージョンのものを使用した。

### 5.2.1 パラメータ

解析に使用したパラメータは以下のようにして決めた。

#### ワイヤ位置

ワイヤの配置は 3.1.2 で述べたようなデザインからワイヤの両端の位置を計算して与えている。しかし、すでに述べたように CDC 本体のエンドプレートはワイヤの張力のために縮む方向に歪んでいることが分かっていたので、CDC の製作途中でこの歪みの量を測定しておいた。測定方法は、CDC の外縁に取り付けたリングの高さを基準にして、そこに渡した角棒からエンドプレート表面の位置を 1 級定規で数点測定した。その測定値とリングの高さを考慮して計算されたエンドプレート表面の位置を図 5.3(左) に示す。横軸は半径方向の位置、縦軸は z 方向の位置である。曲線は測

定点を 6 次式でフィットしたもので、この 6 次関数からエンドプレート表面の位置を計算してワイヤ位置の基準としている。右側の図はデザイン値からの z 方向のずれの大きさを示す。

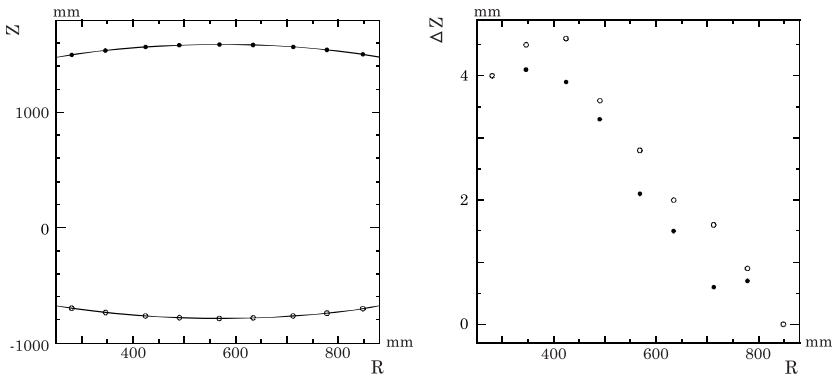



図 5.3: main part のエンドプレートの歪み (左:測定値から計算したエンドプレートの位置と補間する 6 次関数、右:デザイン値からのずれ)

6 次関数によるエンドプレート位置の補正は Main part のみで、Inner part はその形状から変形量は小さいと考えられるので、全体の z 方向の位置を Main part の内縁の位置から計算してある。

**T0**

ドリフト時間を求めるための時間の基準 T0 は、最もドリフト時間の短い時間とする。その T0 は TDC 分布から求められた。TDC 分布の例を図 5.4 に示す。信号のタイミングは信号経路の長さによって変わるが、プレアンプやケーブルが 16 チャンネルごとに共通のものを使用しているので、ここではこの 16 チャンネルごとに TDC 分布を作り T0 を決めている。

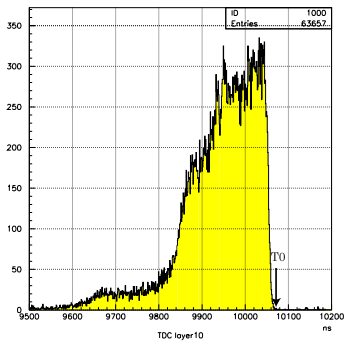



図 5.4: TDC 分布の例 (layer10)

**Xt 関数**

Xt シミュレーションの結果がある程度良く実験データを再現できることが過去の実験などから分かっているので、解析に用いる Xt 関数はシミュレーションによって求めた磁場の無い状況の Xt

分布から関数フィットして求めた。Xt 関数は前章で述べたように、5 次と 1 次の関数を入射角 10 度ごとに作り、それを各層ごとに用意した。解析では、この Xt 関数と T0 のタイミングを合わせるために 8ns だけ全体の時間をずらした。

### 5.2.2 解析

解析したデータは 10 月 25 日に取られた 20000 イベント (以下に述べる補正のためにさらに+20000 イベント) である。全イベントのうち、以下のようなイベントを選び分解能の評価に用いた。

- 1 イベントで飛跡が 2 本のみ
  CDC を完全に通過した宇宙線は、解析プログラムの特性のためにビームパイプから外側へ向かう 2 本の飛跡と判断される。電磁シャワーなどが無いイベントを使用するため。
- 飛跡再構成に使われたヒット点が 45 個以上
  宇宙線が CDC 内部で散乱されたイベントを無くすためと、飛跡の誤差の寄与を減らすため。
- 飛跡は z 軸から半径 1cm の範囲を通る ($-1$ <Helix-dr< 1cm)
  セルに対する入射角$\alpha$を 0 付近に制限するため。これは、解析プログラムの不備で、飛跡再構成に Xt 関数の入射角依存性が使われないため。

解析結果 (Layer29) を図 5.5、図 5.6、図 5.7 に示す。図 5.5 は、図 5.6、図 5.7 に用いられたデータの入射角$\alpha$と入射位置 $z$ の状態である。入射角分布から、位置分解能の評価に使われたデータは、ほぼ 0 度入射のみであることが分かる。

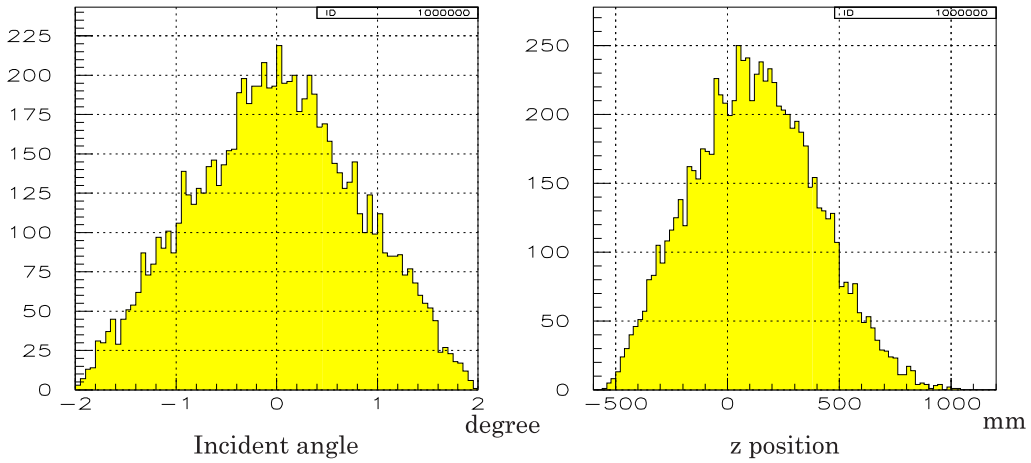



図 5.5: 分解能の評価に用いられたデータの入射角$\alpha$(左) と入射位置 $z$(右) の分布 (layer29)

図 5.6(左) に示した Xt 分布は、解析によって再構成された飛跡と注目するワイヤの位置との距離をドリフト距離とし、注目するワイヤの信号のドリフト時間としている。曲線は解析に用いられた Xt 関数である。ドリフト距離と Xt 関数との残差の分布を図 5.6(右) に示す。横軸はドリフト距離、縦軸は残差である。図中の黒丸は分布の平均を示している。これらの分布からも Xt シミュレーションから求められた Xt 関数が実験値と良く合っているといえる。

空間位置分解能 (残差の広がり) を図 5.7(左) に示す。横軸はドリフト距離である。センスワイヤ近傍とドリフトセルの境界付近で分解能が悪化しているが、これは荷電粒子によって電離された電

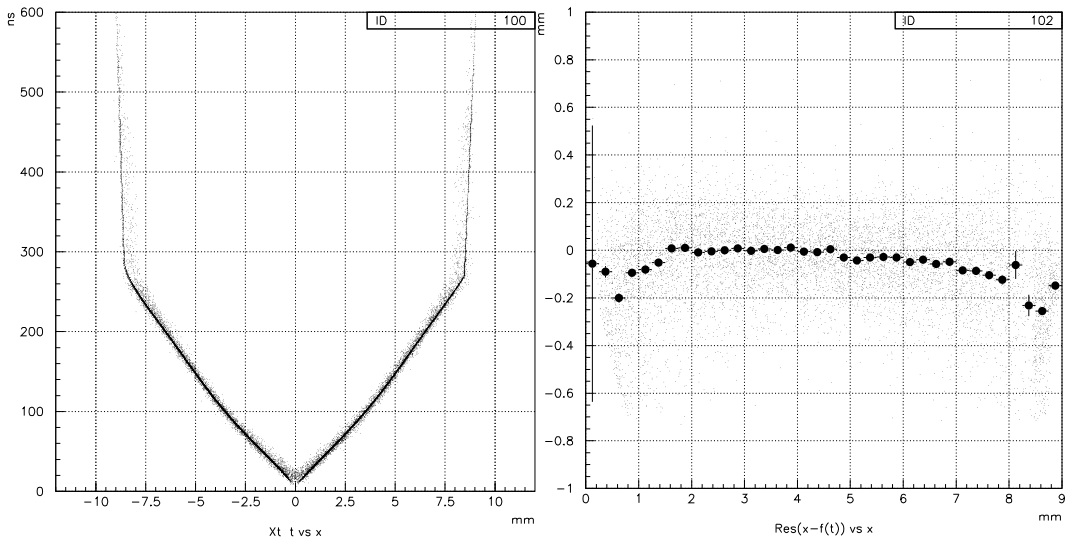



図 5.6: Xt 分布と残差の分布 (layer29)

子の空間分布の統計的ゆらぎによって引き起こされていると考える。つまり、ワイヤ近傍では、空間分布のばらつきによる経路差が大きく現れ、早いドリフト時間に到達する電子数がゆらぐためであり、セル境界付近では、ばらつきによる経路差は小さいが、電場の歪みによって時間差が生じ、見合った時間に到達する電子数がゆらぐために位置分解能が悪化する。

平均位置分解能を求めるため、ドリフト距離が 8.5mm までの部分にわたる残差分布を図 5.7(右) に示す。曲線はこの分布の中心値から $2\sigma$の範囲でガウス関数でフィットした結果である。

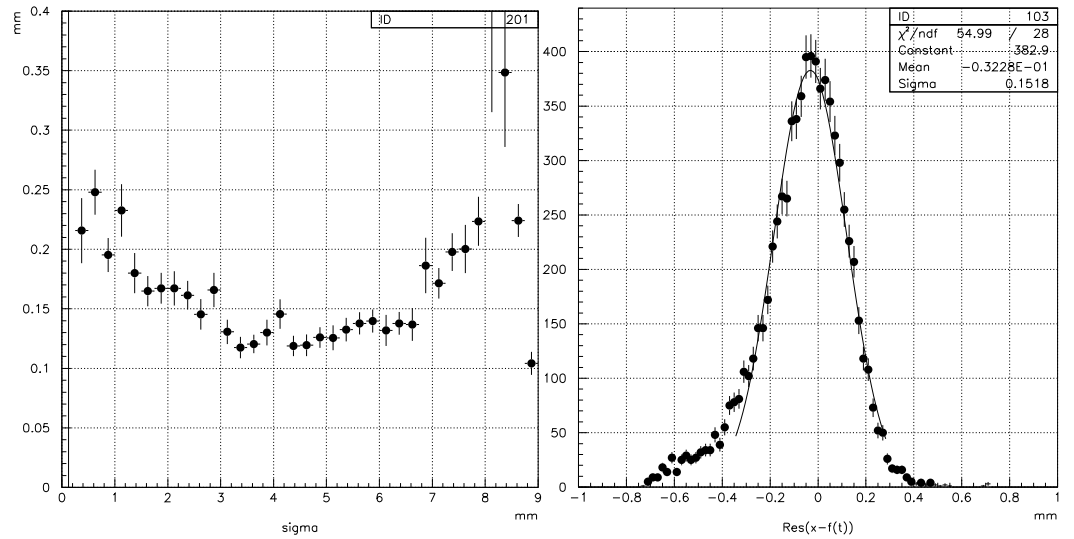



図 5.7: 位置分解能

この解析結果から、磁場が無い場合のドリフト領域での位置分解能は約 $150\mu m$ という結果が得られた。また、ドリフト領域の広い範囲で $150\mu m$ を下まわる位置分解能が得られていることが分かった。

## 5.3 補正

位置分解能が約 $150\mu m$ という結果であるが、これは CDC に対する要求や過去の実験結果である位置分解能 $130\mu m$ より悪い。このことは補正の必要性を示唆している。以下に補正の方法と結果について述べ、最終的に得られた位置分解能を示す。

### 5.3.1 T0 補正

5.2.1 において述べたように T0 は 16 チャンネルごとに TDC 分布から決められている。16 チャンネルごとの大きなタイミングのずれはこの方法で補正されるが、16 チャンネルの中でも、回路やケーブル内の経路差や TDC モジュールの時間原点のばらつきなどがあるため、各チャンネルごとに補正をする必要がある。

補正は、Xt 分布と Xt 関数の時間軸方向のずれを調べることで行う。Xt 分布を用いることでドリフト距離方向の時間情報が増え、TDC 分布よりも正確にタイミングを決められる。解析ではドリフト距離のずれをドリフト時間のずれに換算して行う。ドリフト距離を $X$、Xt 関数を $f(t)$ としたとき、$|X| - |f(t)|$ の残差の分布を作りその平均値$\Delta X_{\mathrm{mean}}$を求める。残差の分布には位置分解能が良い 50ns<t<150ns のドリフト時間のデータを使用した。平均値$\Delta X_{\mathrm{mean}}$から新しい T0 は次のように計算する。

$$T0_{\mathrm{new}} = T0_{\mathrm{old}} + \frac{\Delta X_{\mathrm{mean}}}{0.034[\mathrm{mm/nsec}]}$$

$T0_{\mathrm{old}}$、$T0_{\mathrm{new}}$は補正前後の T0 の値である。$0.034[\mathrm{mm/nsec}]$ は t-X 分布から 50ns<t<150ns の部分で求めたドリフト速度である。このような補正を全ワイヤについて 2 回繰り返して行った。

補正前後の残差の分布 (Layer29,50ns<t<150ns) を図 5.8 に示す。上側の分布がセル番号による残差の分布を示し、下側はその分布の平均値の分布を示す。イベント数が 100 以上のセルはガウス関数でフィットしたときの平均と$\sigma$を、それ以下のときは単純平均をプロットした。左側が補正前の分布で、この分布を元に T0 の補正をした後の分布が右側である。平均値の分布を見て分かるようにセルによるばらつきが少なくなっており、ばらつきの大きさは全体で $20\mu m$ 程度に抑えられた。おおよそ 1 ~ 2ns の補正を行ったが、この大きさは経路差では 30cm 程度となり考えにくい。この大きさはむしろ TDC の時間原点のばらつきによるものと考える。

### 5.3.2 アライメント

CDC を構成する各部は精度を測定しながら組立が行われたが、製作精度のために各部品の位置には誤差が生じる。そのため、各エンドプレートに固定してあるワイヤの位置もデザイン位置からずれてしまう。特に、Cathode part と Inner part の間はテーパー部の製作精度だけで位置を決めたので、多少大きな位置ずれを持っている可能性がある。解析と実際のワイヤ位置がずれている場合、飛跡を再構成したときにずれの方向に飛跡の偏りが生じ、曲率の測定に誤差を生じたり、位置分解能の悪化を招く。そこで、解析によって各エンドプレートの位置のアライメントを行った。

[Main part]

まず、Main part の前方と後方のエンドプレート間の、回転と平行移動のずれを調べた。測定では磁場が無いため、飛跡は直線になり飛跡を表す Helix パラメータの曲率を表す$\kappa$は 0 になる。しかし、回転や平行移動のずれがあれば$\kappa$の分布の中心は 0 からずれ、また飛跡の角度$\theta$、$\phi$に対して依存性が見られるはずである。しかし、解析に使ったイベント数が少なく、決定的なずれの大きさ

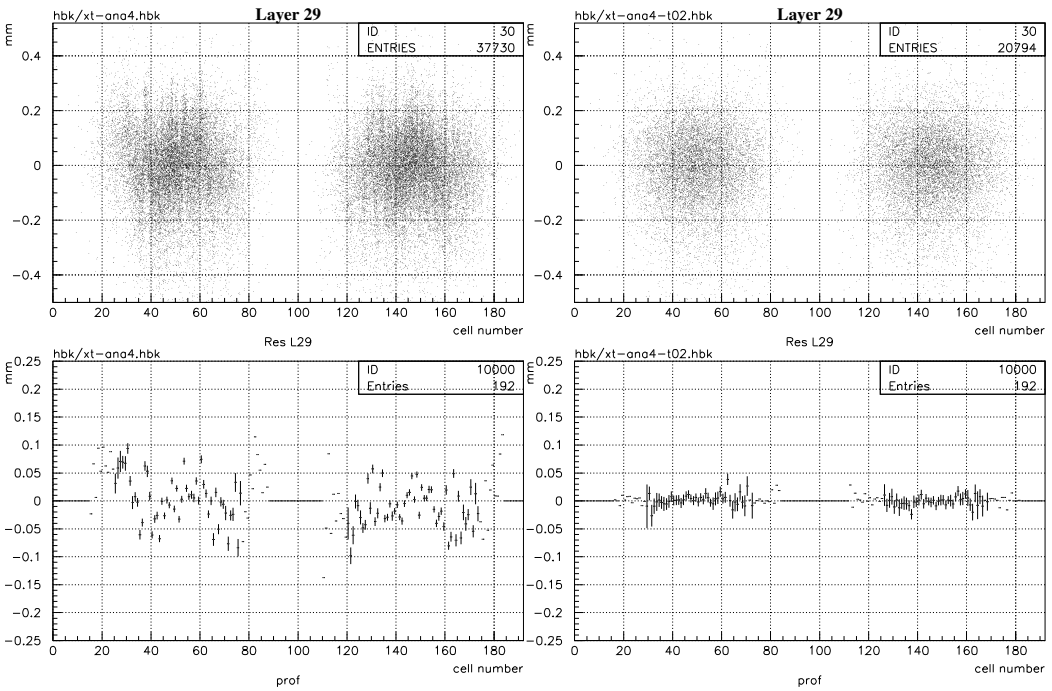



図 5.8: T0 の補正 (左:補正前、右:補正後) (layer29,50ns<t<150ns) イベント数の少ないセルについては関数フィットしなかったのでエラーはつけていない。

は見られなかった。そのため、今回の解析では、Main part のエンドプレートのアライメントは行わなかった。

[Inner part]

次に、Main part によって再構成される飛跡を基準として、Inner part のエンドプレートのアライメントを行った。Main part のワイヤヒット点のみを使用して飛跡の再構成を行い、それを Inner part の最外周 (Layer13) のレイヤーに外挿する。そのときの Xt 分布のずれからワイヤのずれを計算した。

この方法の概念図を図 5.9 に示す。プログラム上のワイヤの位置を $(R\cos\phi, R\sin\phi)$ とし、実際のワイヤ位置を $(R\cos(\phi+\Delta\phi)+x_0, R\sin(\phi+\Delta\phi)+y_0)$ とする。セルに対して垂直に入射する

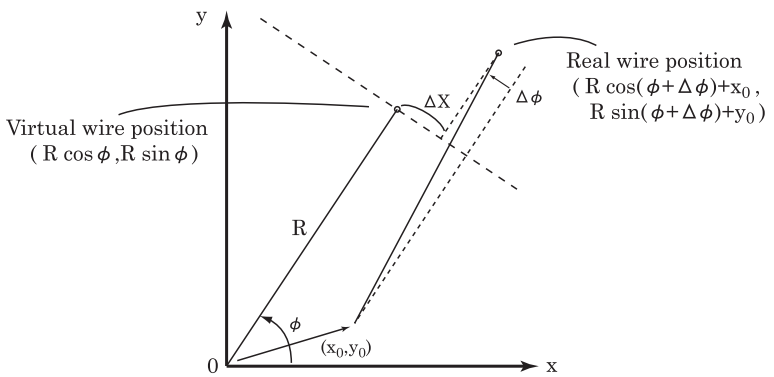



図 5.9: アライメント

飛跡を用いると、測定される飛跡位置 (Xt 関数 $f(t)$ によるドリフト距離) と再構成された飛跡の位置 $X$ の残差 $(X - f(t))$ は、図に示す$\Delta X$ になる。$\Delta X$ は

$$\Delta X = -R\sin\Delta\phi + \sqrt{x_0^2 + y_0^2}\sin(\phi - \alpha) \tag{5.1}$$
$$\cos\alpha = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad , \quad \sin\alpha = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}$$

となるため、セル番号 $(=\phi)$ による$\Delta X$ の分布を見ると、中心軸と位相がずれたサイン曲線になると考えられる。

解析によって求めたセル番号による$\Delta X$ の分布を図 5.10 に示す。横軸がセル番号、縦軸が$\Delta X$ の値を示す。下側は$\Delta X$ の中心値を示す。この分布に対して、式 (5.1) をフィットすれば回転と平行移動のずれ $(\Delta\phi, x_0, y_0)$ が分かる。

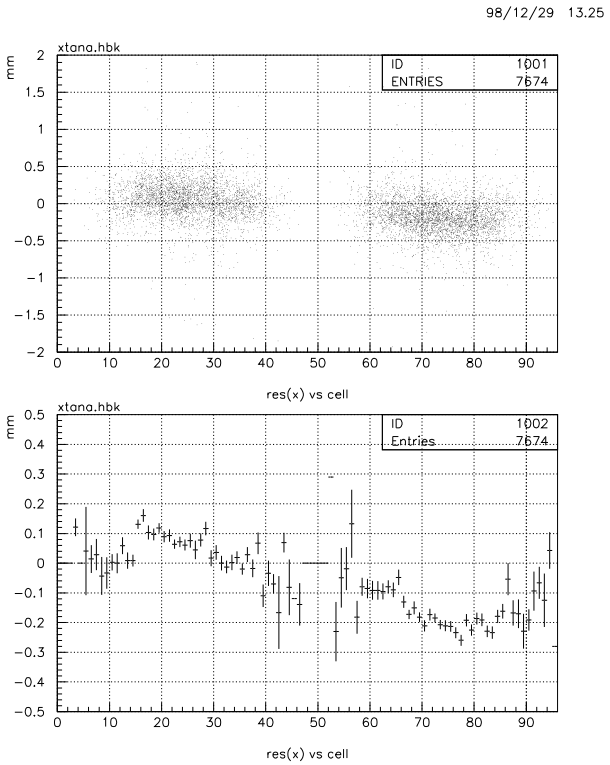



図 5.10: $\Delta X$ の分布 (Layer13)

しかし、この解析ではワイヤの Sag(たるみ) の効果を考慮していないため、飛跡の y 成分はあまり正確でない。ワイヤの Sag によるワイヤ位置のずれの中央部での大きさは、Cathode part や Inner part の内周では数 $10\mu m$ 程度で問題にならないが、Main part では約 $150\mu m$ にもなり、飛跡の再構成時に無視できない量である。現在は解析プログラムの開発段階であり、飛跡の再構成には Sag の効果は入れられていない。このため、ここでのアライメントは x 方向のみを行うこととした。測定したデータは宇宙線であるため、y 軸方向に入射する飛跡が多く、ここでは y 方向のずれは問題にしない。

式 (5.1) で $y_0 = 0$ とすると、

$$\Delta X = -R\sin\Delta\phi + x_0\sin\phi$$

さらに、$\phi = 90°$と、$\phi = 270°$の場合、

$$\begin{aligned} \Delta X_{90} &= -R\sin\Delta\phi + x_0 \quad (\phi = 90°) \\ \Delta X_{270} &= -R\sin\Delta\phi - x_0 \quad (\phi = 270°) \end{aligned}$$

となる。これらの関係式から、

$$\sin\Delta\phi = -\frac{\Delta X_{90} + \Delta X_{270}}{2R} \tag{5.2}$$

$$x_0 = \frac{\Delta X_{90} - \Delta X_{270}}{2} \tag{5.3}$$

が得られる。よって、$\phi$が 90 度方向と 270 度方向の$\Delta X$ を調べれば、回転方向と x 方向の軸のずれ $(\Delta\phi, x_0)$ が分かる。

90 度方向と 270 度方向の$\Delta X$ の分布を図 5.11 に示す。横軸は z 方向の入射位置を示し、縦軸は

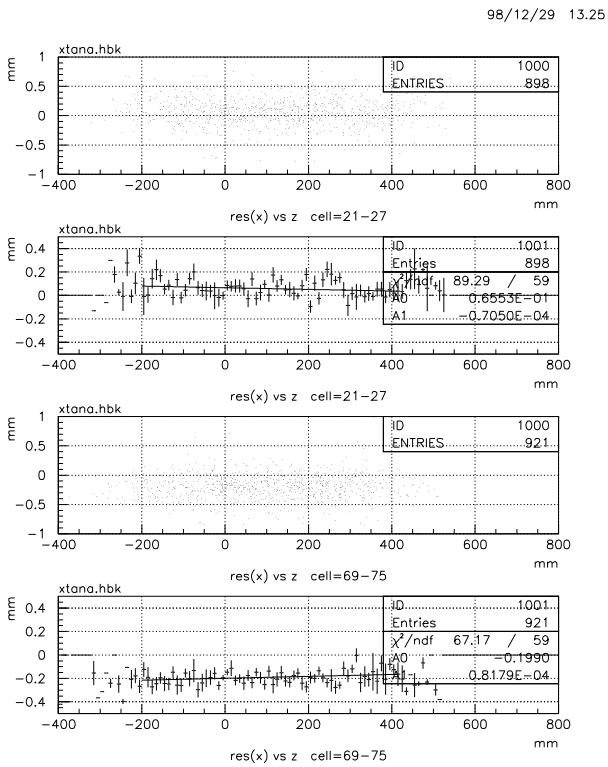



図 5.11: $\Delta X$ の z 方向依存の分布 (Layer13)

$\Delta X$ を示す。上側 2 つが 90 度方向 (セル番号で 21 ~ 27 番) で、下側が 270 度方向 (セル番号で 69 ~ 75 番) である。分布の中心値を取り、直線でフィットした結果が示してある。この結果からずれの大きさを計算すると ($R$=288mm)、表 5.1 に示した値になる。

補正後の$\Delta X$ の同様の分布を図 5.12、図 5.13 に示す。$\Delta X$ の$\phi$依存性が少し見えるが、これは y 方向のアライメントを行っていないためである。

[Cathode part]

| | $\Delta\phi$ [rad] | $x_0$ [mm] |
|---|---|---|
| Forward side (z=964.24mm) | $2.1 \times 10^{-4}$ | 0.0588 |
| Backward side (z=-529.66mm) | $2.4 \times 10^{-4}$ | 0.1726 |

表 5.1: Inner part のアライメントの結果

Cathode part に関しても Inner part の場合と同様の方法でアライメントを行った。Inner part をアライメントしたワイヤ配置で、Main part と Inner part のワイヤヒット点を用い飛跡を再構成し、Cathode part(Layer2) に外挿して$\Delta X$ を求めた。結果を図 5.14 に示す。

90 度方向と 270 度方向の$\Delta X$ の分布を図 5.15 に示す。上側 2 つが 90 度方向 (セル番号で 14 ~ 18 番) で、下側が 270 度方向 (セル番号で 46 ~ 50 番) である。分布の中心値を取り、直線でフィットした結果が示してある。この結果からずれの大きさを計算すると ($R$=108.5mm)、表 5.2 に示した値になる。

| | $\Delta\phi$ [rad] | $x_0$ [mm] |
|---|---|---|
| Forward side (z=451.6mm) | $-7.4 \times 10^{-4}$ | 0.1548 |
| Backward side (z=-242.4mm) | $-9.7 \times 10^{-4}$ | 0.0580 |

表 5.2: Cathode part のアライメントの結果

補正後の$\Delta X$ の同様の分布を図 5.16、図 5.17 に示す。図 5.16 で$\Delta X$ の$\phi$依存が大きく見られ、y 方向のアライメントが必要であることを示している。

以上の Inner part,Cathode part のアライメントの結果から、エンドプレートは接合部で本来のデザイン位置から 200$\mu m$ 程度ずれていることが分かる。これは、ケガキ線等を基準にして組み立てられた時の誤差 (100$\mu m$ 程度) や、Cathode part 組み込み位置の誤差 (3.2.2 参照。約 400$\mu m$ 以下) を考慮すると、妥当なずれの大きさだと言える。また、この補正を元に行った 2 回目のアライメントの結果から、上記のアライメントの誤差は約 20$\mu m$ と評価した。

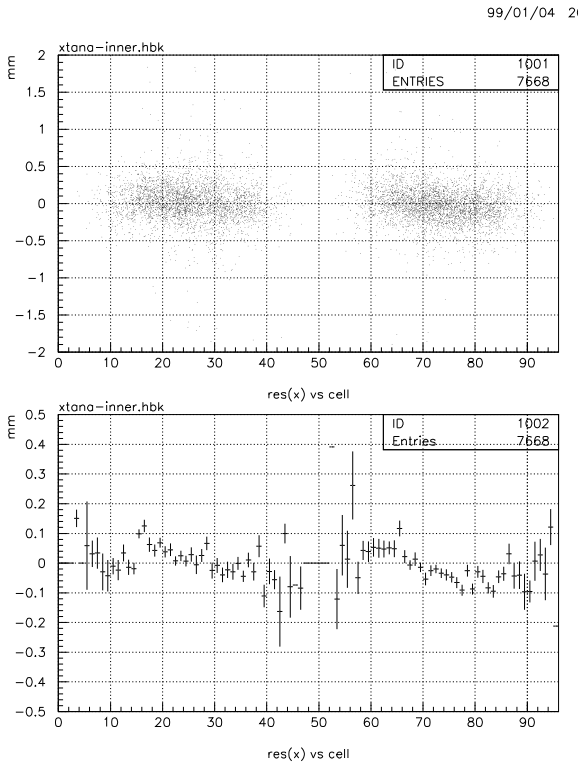



図 5.12: 補正後の$\Delta X$ の分布 (Layer13)

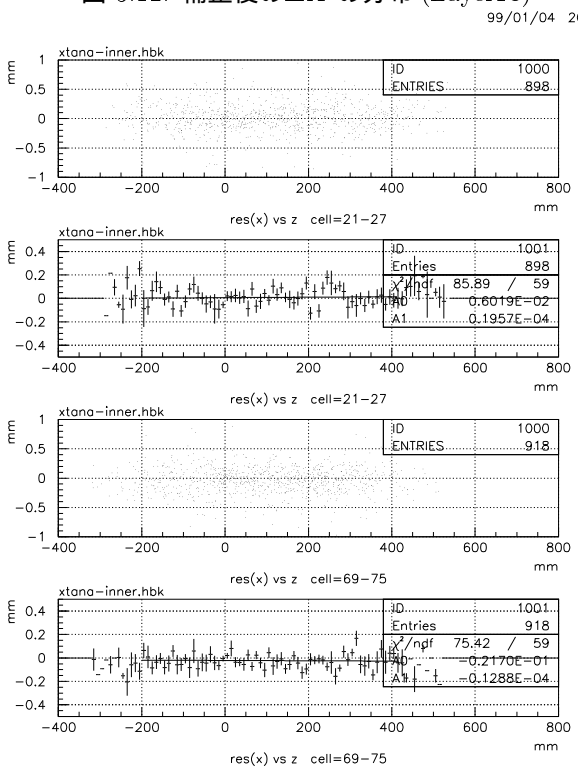



図 5.13: 補正後の$\Delta X$ の z 方向依存の分布 (Layer13)

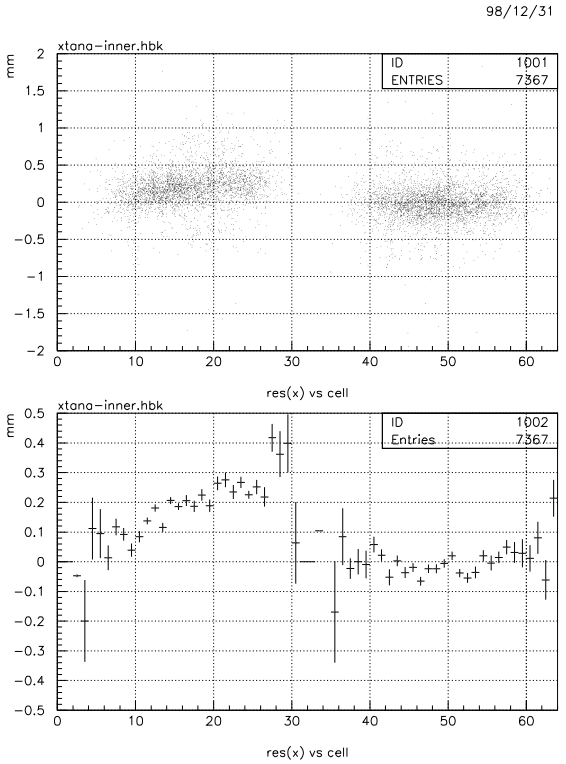



図 5.14: $\Delta X$ の分布 (Layer2)

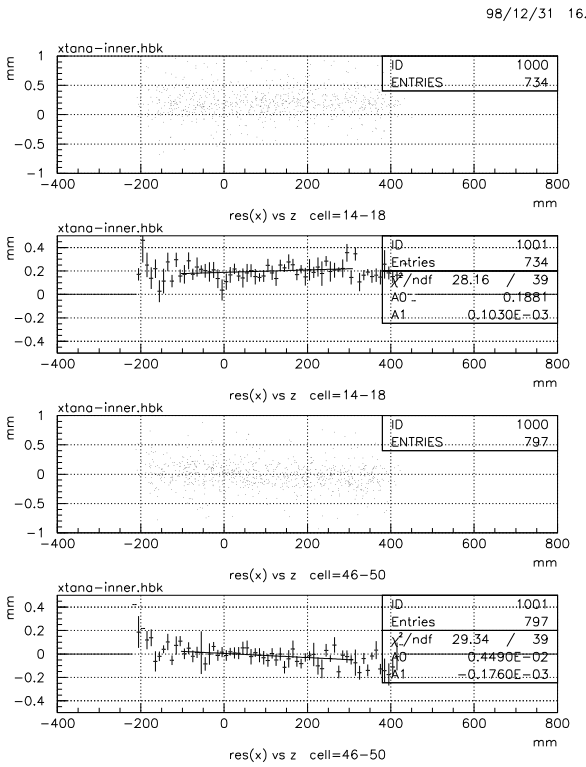



図 5.15: $\Delta X$ の z 方向依存の分布 (Layer2)

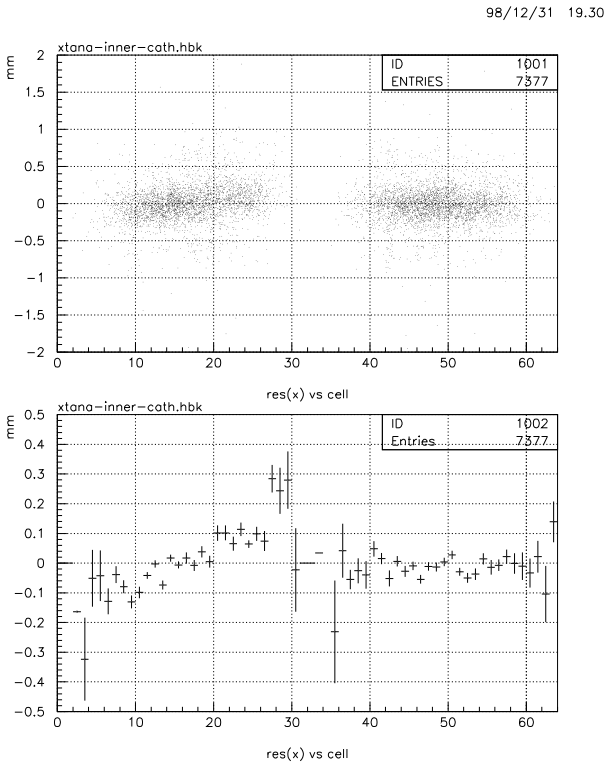



図 5.16: 補正後の$\Delta X$ の分布 (Layer2)

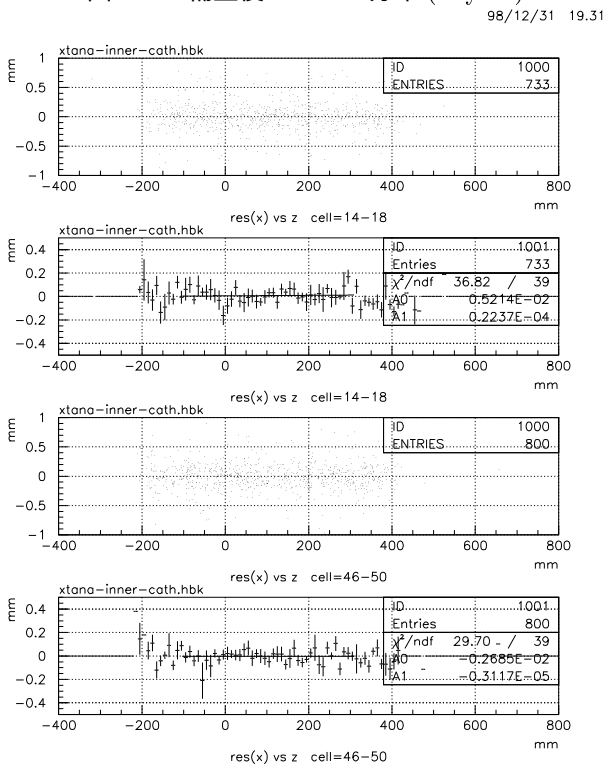



図 5.17: 補正後の$\Delta X$ の z 方向依存の分布 (Layer2)

### 5.3.3 Xt 関数の補正

図 5.6 から、Xt シミュレーションから求められた Xt 関数はある程度良く現実を再現していることが分かるが、セルの境界付近になると実験値からずれてくることが見てとれる。Xt 関数を実験値に即したものにするために、実験データを用いて Xt 関数をフィットし直しパラメータを作り直す。作り直した Xt 関数で再度 Xt 分布を作り、再び Xt 関数のフィットをしてパラメータを作り直す。このようなことを繰り返すこと (Iteration) で、Xt 関数は次第に実験データを再現するようになる。ある程度位置分解能の変化が無くなったところでこの繰り返しをやめる。この解析の中ではこの繰り返しを 4 回行った。

### 5.3.4 補正後の位置分解能

以上のような補正の結果得られた Xt 分布と残差の分布を図 5.18 に示す。前述の Xt 関数の補正の結果、Xt 関数が分布の中央を通るようになり、残差の平均値の分布も全てのドリフト距離において 0mm に近くなっており、実験データを良く再現するようになったことが分かる。

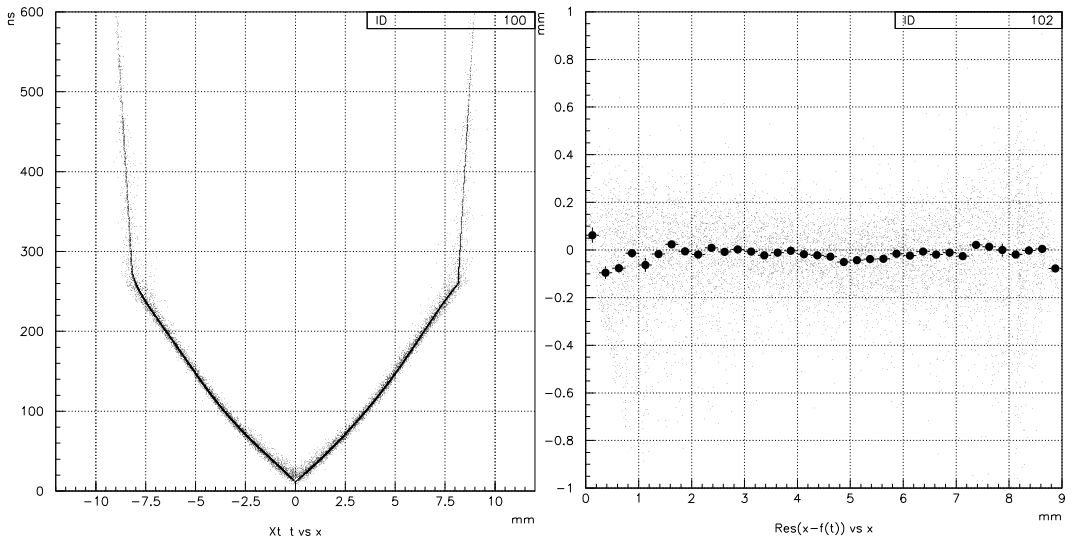



図 5.18: 補正後の Xt 分布と残差の分布

位置分解能の分布を図 5.19 に示す。ドリフト距離による位置分解能の分布 (左) を図 5.7 と比較すると、ほぼ全ての領域で位置分解能が向上していることが分かる。全体の位置分解能の分布 (右) から位置分解能は約 $140\mu m$ とわずかに向上している。

しかし、CDC に対する要求である位置分解能 $130\mu m$ には、いま一歩である。その原因としては、Main part のエンドプレートのアライメントを行っていないことや、ワイヤの Sag(たるみ) の効果を飛跡再構成にいれておらず、y 方向のアライメントを行っていないこと等が考えられる。これらの補正を入れることは今後の課題である。

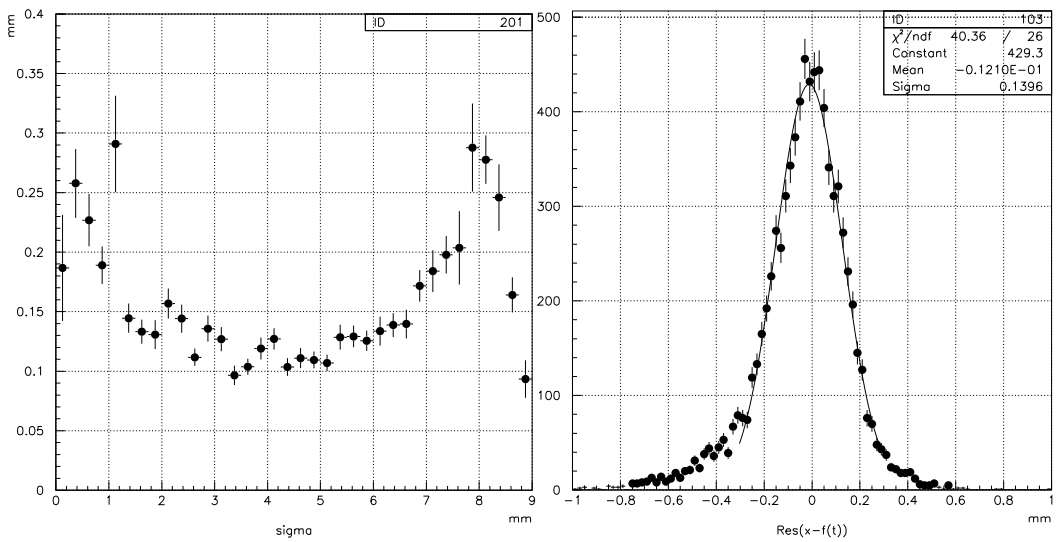



図 5.19: 補正後の位置分解能

# 第6章　結論

B ファクトリー実験に使用する BELLE 検出器内の測定器の一つの CDC の製作、実験準備を行ってきた。特に、我々名古屋大学では、CDC の一部分である Cathode part の製作を担当し、予備のものを含めて 2 台製作した。製作段階の精度測定などから、製作した Cathode part は十分実機として使えるものであることを確認した。また、KEK において製作された CDC 本体に、Cathode part を挿入する際の手法を確立し、治具の設計・製作の後、実際に挿入を行った。

さらに、CDC 内部のガス圧によって生じる Cathode part の内筒の歪みの大きさや、エンドプレートの膨張によって Cathode part に加わる引っ張り力に対する耐久性を測定し、CDC に加えることができるガスの差圧の上限を $0.08\mathrm{kgf/cm^2}$(1 気圧の約 8%) と評価した。また、差圧の変動による CDC 本体の変形を抑え込むために、Cathode part と CDC 本体を前方側で固定するフランジの設計・製作を行い、フランジの変形量や CDC の各部の変位量を測定した。フランジの形状を強化することで、Cathode part や SVD の基準面となる後方側のエンドプレートの変位量を、差圧が $0.04\mathrm{kgf/cm^2}$変動したときで $30\mu m$ 程度と、z 方向の位置分解能に対して問題ない程度にすることができた。

一方、ドリフト時間からドリフト距離に変換する Xt 関数の決定のためにシミュレーションを行い、Xt 分布に対する、荷電粒子の入射角$\alpha$依存性と入射位置 $z$ 依存性を調べた。その結果、位置分解能を悪化させないために、Xt 関数は通常のドリフト領域を 5 次関数で、セルの境界付近を 1 次関数で表すこととし、その関数を入射角 10 度ごとに用意し、間の角度は直線補間によって表すこととした。z 方向の入射位置依存性については、その依存性が小さいことを確認し、解析を簡便にするために省略することとした。

最後に、CDC 完成後、実際の実験で使用する読み出し系のセットアップで CDC の動作を行い、宇宙線を用いたデータ収集を行った。そのデータから CDC の位置分解能の評価を行った。その結果、r-$\phi$方向の位置分解能が約 $150\mu m$ という値を得た。また、位置分解能を向上させるために、T0 の補正、アライメント、Xt 関数の再フィットなどを行い、位置分解能が約 $140\mu m$ に向上することを確認した。この解析では、Main part や y 方向のアライメント、ワイヤ上の信号の伝搬時間、ワイヤのたるみなどの全ての補正が行えていない。このことは今後の課題であるが、それでも、位置分解能は $140\mu m$ という値が得られた。このことから、製作してきた CDC は十分な性能を持つものと思われる。

# 付 録A　xdriftx(ver.2.1)

この章では、xdriftx のマニュアル [8] を元に、シミュレーションに用いたプログラム (ver.2.1) についてまとめる。

## A.1　基本計算

### A.1.1　電場

プログラムでは、ワイヤ情報を入力するとワイヤに誘起される線電荷密度を計算し、その情報を元にドリフト領域での電場を計算する。以下にその手法を述べる。

入力するワイヤ情報は、以下のものである。

- ワイヤ位置 $\boldsymbol{r}_i$
- ワイヤ径 $R_i$
- 印可電圧 $V_i$

ラベル $i$ はワイヤ番号を意味する。

位置$\boldsymbol{r}$での電位は、

$$V(\boldsymbol{r}) = \sum_{i=1}^{n} \left(-Q_i \ln |\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_i|\right) + A \tag{A.1}$$

となる。ここで、$Q_i$は $i$ 番目のワイヤの線電荷密度を、$A$ はベース電位を示す。本プログラムでは、$A$ は次の境界条件を満たすように定義する。

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = 0 \tag{A.2}$$

ワイヤ上での電位 (境界条件) を考えると、式 (A.1) より、次式が成り立つ。

$$V_i = V(\boldsymbol{r}_j) = \sum_{i=1}^{n} \left(-Q_i \ln |\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|\right) + A \tag{A.3}$$

式 (A.2),(A.3) から、次のような行列式が導かれる。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} & 1 \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \\ A \end{pmatrix} \tag{A.4}$$

ここで、

$$D_{ij} = \begin{cases} -\ln|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i| & (i \neq j) \\ -\ln R_i & (i = j) \end{cases} \tag{A.5}$$

印可電圧 $V_i$ と行列成分 $D_{ij}$ は入力するワイヤ情報で与えられるので、(A.4) を逆に解くと、$Q_i$ と $A$ が得られる。

(A.1) から、位置 $\boldsymbol{r}$ での電場 $\boldsymbol{E}$ は、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) &= -grad V(\boldsymbol{r}) \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_i)}{|\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_i|^2} \end{aligned} \tag{A.6}$$

と与えられる。

### A.1.2 ドリフト速度

電子のドリフト速度は、電磁場中での古典的な運動と、ガス分子と衝突する過程を組み合わせた平均移動速度で与えられる。

ガス分子との各衝突の間では、次の運動方程式に従って運動する。

$$m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = e\boldsymbol{E} + e[\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}] \tag{A.7}$$

簡単のために、磁場 $\boldsymbol{B}$ が z 成分のみ、電場 $\boldsymbol{E}$ が x 成分のみの場合を考えると、

$$\dot{v}_x = \epsilon + \omega v_y \tag{A.8}$$

$$\dot{v}_y = -\omega v_x \tag{A.9}$$

$$\dot{v}_z = 0 \tag{A.10}$$

となる。ここで、

$$\epsilon \equiv \frac{e}{m}E \ , \ \omega \equiv \frac{e}{m}B$$

と定義した。

$t = 0$ で $\boldsymbol{v} = 0$ として上式を解くと次式のようになる。

$$v_x(t) = \frac{\epsilon}{\omega}\sin\omega t \tag{A.11}$$

$$v_y(t) = \frac{\epsilon}{\omega}(\cos\omega t - 1) \tag{A.12}$$

ガス分子との衝突によって、電子は等方的に散乱される。よって、多数の散乱過程においては、散乱後の平均初速度は 0 とできる。電子とガス分子との平均衝突時間を $\tau$ とすると、ドリフト速度 $\boldsymbol{u}$ は、次式のように時間平均を取ることで得られる。

$$u_x = < v_x(t) > = \frac{\epsilon}{\omega}\int_0^\infty \frac{1}{\tau}e^{-t/\tau}\sin\omega t \ dt = \frac{\epsilon\tau}{1+\omega^2\tau^2} \tag{A.13}$$

$$u_y = < v_y(t) > = \frac{\epsilon}{\omega}\int_0^\infty \frac{1}{\tau}e^{-t/\tau}(\cos\omega t - 1) \ dt = \frac{-\epsilon\omega\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} \tag{A.14}$$

磁場が無いときのドリフト速度 $u_0$ は、$\omega = 0$ として、

$$u_0 = \epsilon\tau' = \frac{e}{m}E\tau' = \frac{keE}{m}\tau \tag{A.15}$$

となる。ただし、平均衝突時間は、一般的に電場と磁場に依存するので、ここでは磁場がないときの平均衝突回数$\tau$を用いて、$\tau' = k\tau$とした。これを用いると、磁場中でのドリフト速度の大きさ$u_B$は、

$$u_B = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \frac{u_0/k}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \tag{A.16}$$

となる。

電場とドリフトする方向とのなす角 (ローレンツ角) を$\alpha_B$とすると、

$$\tan\alpha_B = \frac{-u_y}{u_x} = \omega\tau \tag{A.17}$$

となる。ここで、$\omega, \tau$を代入し、

$$\tan\alpha_B = \frac{u_0 B}{kE} \tag{A.18}$$

となる。

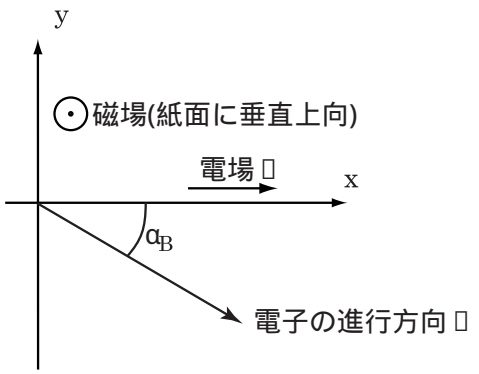



図 A.1: 電子のドリフト方向

プログラムでは、ドリフト速度 $u_0(E)$、定数 $k$、磁場$\boldsymbol{B}$を入力する。また、電子の位置$\boldsymbol{r}$での電場$\boldsymbol{E}$は式 (A.7) から計算する。これらのパラメータを用いて、式 (A.16)、(A.18) から電子のドリフト速度と方向 ($u_B$,$\alpha_B$) が計算できる。

## A.2 アルゴリズム

以下に、プログラムのおおまかな流れを subroutine ごとにまとめる。

setint

プログラムに必要な各パラメータの設定を行う。この中では、[user/chamber] と [fndq] が call される。

user/chamber

ワイヤ位置や印可電圧などのワイヤ情報など、chamber に関する情報を与える。

fndq

与えられたワイヤ情報から、前節の計算式を元に、線電荷密度を計算する。

xtmain

与えられた情報から、乱数によって飛跡・電離電子を生成し、ドリフト・シグナル形成をし、ドリフト距離とドリフト時間を出力する。以下に、その手順を示す。

1. 飛跡の生成: 一様乱数でドリフト距離を決め、入力した入射角で飛跡を作る。
2. 一次電子生成: 一様乱数で生成する一次電子数を決める。その後、飛跡に沿った位置で一様乱数をふり、電子の生成位置を決める。
3. 二次電子生成: 一次電子 1 つあたり生成する二次電子数をポワソン乱数で決める。二次電子の生成位置は位置電子と同じ場所とする。
4. 一次電子 1 つごとに、ドリフト時間と path length を計算:[diftpl] を参照。二次電子は生成元の一次電子と同じ値を持つとする。
5. (全ての) 生成電子 1 つごとに、step 毎の path length を拡散し、ドリフト時間を再度計算:[tracedrift] を参照。
6. — 以上の過程から、全電子数分のドリフト時間が得られる。
7. 得られたドリフト時間からパルスを疑似発生させ、シグナルの到達時間を計算:[ontime] を参照。

diftpl

電子の初期位置から、ワイヤまでのドリフト速度と path をステップ毎に計算する。以下に、その手順を示す。

1. 電場計算: 式 (A.7) を用いて、電子の位置での電場を計算する。[efield]
2. 電子のドリフト速度と移動方向の計算: 前節の計算式を用いて、電子の移動方向を示す単位ベクトルを計算する。[user/vel]
3. 1 step の移動量の決定: ワイヤからの距離によって、step 毎に移動する量を決定する。計算時間を短縮するために、ワイヤから遠いところでは 1 step で多く移動させる。[step]
4. 電子を移動: 計算結果を元に、電子の位置を移動させる。
5. ワイヤに到達していたら return

tracedrift

step 毎に path length に対して拡散の効果を与える。1 step の path length [StepPath(i)] を中心に、拡散定数関数 [EfdDif(E)] を用いて、$\sigma = \sqrt{\texttt{StepPath(i)}} \times \texttt{EfdDif(E)}$ のガウス乱数で拡散する。

ontime

各電子の到達時間から疑似パルスを発生させ、ノイズの効果を入れ、パルスが threshold を越える時間を返す。以下に、その手順を示す。

1. 電子の到達時間から疑似パルスを作り、各電子について足し合わせる。[pulswf] 1 つの電子が作る疑似パルスは、立ち上がりが 20ns で最高点に到達する線形関数で、立ち下がりが$\tau = 20$ns の $e^{-t/\tau}$の関数となっている。[ampwf]
2. ノイズを足す。[rnoiz]
3. パルスが threshold を越えたら return。越えなかったら、1ns 時間を進めて、再び計算する。

# 参考文献


[1] M.Kobayashi and T.Maskawa, *Progr. Theor. Phys.* **49**, (1973) 652.

[2] L.Wolfenstain, *Phys. Rev. Letter.* **51**, (1983) 1945.

[3] "KEKB B-Factory Design Report", *KEK Report* 95-7

[4] BELLE collaboration,"Technical Design Report", *KEK Report* 1995-1.

[5] BELLE collaboration,"Progress Report", *KEK Progress Report* 96-1 H

[6] 松本崇博「B ファクトリー用飛跡検出器 カソード部分の製作 及び 形状解析」名古屋大学 修士論文 (1997)

[7] R.L.Gluckstern, *Nucl. Inst. and Meth.* **24**, (1963) 381

[8] T.Tsukamoto, **9626002** *KEK internal 96-2*

[9] B Physics Task Force,"1992 Progress Report on B Physics Task Force Activities" *KEK Report* 93-1 H