

T2K 長基線ニュートリノ振動実験  
ミューオンモニターにおける  
CVDダイヤモンド検出器の研究

大阪市立大学大学院 理学研究科  
数物系専攻 高エネルギー物理研究室  
前田 圭介

2008年2月

## 概要

今回、T2K 長基線ニュートリノ振動実験におけるミュオンモニターで使用する、CVD ダイヤモンド検出器について研究した。

T2K 実験は、現在茨城県東海村に建設中の J-PARC でほぼ純粋なミュオンニュートリノビームを生成し、それを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで観測する次期長基線ニュートリノ振動実験である。2009 年 4 月に物理ラン開始予定であり、世界最大強度のニュートリノビームを達成する。このニュートリノビームを用いて、電子ニュートリノ出現事象の探索、ミュオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定を行う。しかし、これらのニュートリノ振動の詳細な研究を行うためには、ニュートリノビーム方向を精度よくモニターする必要がある。その役割を担うのが、ミュオンモニターである。

ミュオンモニターは、親の  $\pi$  中間子からニュートリノと共に出てくるミュオンの位置プロファイルを測定することでニュートリノの方向と強度をモニターする装置である。ニュートリノビームの方向をニュートリノ振動解析の物理的要請を満たすよう、1 mrad 以上の精度でパルスごとにモニターすることを目指す。

まず、ミュオンや他の粒子の強度、位置プロファイルの形、ミュオンモニターにおける放射線強度を調べ、検出器に必要な性能を求めた。見積もった放射線強度は約  $10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/pulse で、検出器にはこの大強度の放射線環境下での長期安定性が求められる。そこで、その大強度に耐えうる半導体検出器としてダイヤモンド検出器を採用した。物理ラン実験でダイヤモンド検出器を使用するのは、この T2K 実験が世界初となる。ダイヤモンドは CVD ダイヤモンドを用いる。

次に、CVD ダイヤモンド検出器の性能を評価するため、電子ビーム (100MeV 電子線形加速器) を照射するビームテストを行った。その結果、線形性についてはミュオンモニター検出器の要請を満たすことが分かり、それをもとに実機でのチャンネル数を決定した。また、各サンプルの応答に個体差が見られその電極を調べたところ、一部に剥離が確認された。そこで個体差との関連性を調べると、電極面積が応答の個体差に関係していると思われる結果が出た。よって、ダイヤモンド自体の個体差ではないと考えられる。

以上のビームテストの結果から、CVD ダイヤモンド検出器がミュオンモニターにおける必要な性能を満たすことが確かめられた。

# 目次

第1章 序論	1
1.1 ニュートリノの質量固有状態と混合状態	1
1.2 ニュートリノ振動	2
第2章 T2K 実験	5
2.1 実験の概要	5
2.1.1 J-PARC ニュートリノビームライン	6
2.1.2 スーパーカミオカンデ	7
2.1.3 Off-axis ビーム	10
2.2 実験の目的	11
2.2.1 電子ニュートリノ出現事象の探索	11
2.2.2 ミューオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定	13
2.3 実験計画	17
2.4 ミューオンモニターに対する物理的要請	18
第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計	19
3.1 T2K ビームラインシミュレーション	19
3.1.1 ミューオンモニターにおける粒子のフラックス、位置プロファイル、 エネルギー分布	22
3.1.2 陽子ビーム照射位置に対する感度	25
3.1.3 ミューオンモニターのサイズ	27
3.2 ミューオンモニターに用いる検出器	27
3.2.1 シリコン PIN フォトダイオード	27
3.2.2 CVD ダイヤモンド検出器	27
3.2.3 平行平板型イオンチェンバー	28
3.3 シミュレーションによるミューオンモニターのデザイン	28
3.3.1 放射線損傷	28
3.3.2 検出器の配置と系統誤差の評価	32

第 4 章	CVD ダイヤモンド 検出器	35
4.1	CVD ダイヤモンド 検出器の仕様	35
4.2	CVD ダイヤモンドの性質	36
4.2.1	ダイヤモンドの物理的性質	36
4.2.2	人工ダイヤモンドの生成方法	36
4.3	CVD ダイヤモンド 検出器の動作原理	38
第 5 章	ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価	43
5.1	ビームテスト 1、2	43
5.1.1	ビームテストのビームパラメータ	44
5.1.2	ビームテスト 1 (2005 年 10 月) のセットアップ	45
5.1.3	ビームテスト 2 (2006 年 7 月) のセットアップ	45
5.1.4	CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価	48
5.1.5	測定結果のまとめ	65
5.2	ビームテスト (2007 年 6 月)	67
5.2.1	セットアップとビームパラメータ	67
5.2.2	シグナルの波形	69
5.2.3	応答の個体差	69
5.2.4	電極面積との関係性	73
5.2.5	結果	76
第 6 章	ミュオンモニター的设计	80
6.1	検出器の配置とチャンネル数、プロファイル中心の決定精度	80
第 7 章	結論と今後	81
付 録 A	電磁ホーン	82
	謝辞	85
	参考文献	86

# 第1章 序論

ニュートリノは、重力相互作用を除き、弱い相互作用のみする中性レプトンである。1930年に Pauli によってその存在が予言され、1935年に Fermi によって理論づけられたが、弱い相互作用しかしないため、ニュートリノを直接検出するのは非常に困難であった。1956年に Reines と Cowan によってその存在が初めて確認された。

現在の素粒子標準模型において、ニュートリノには3世代あり、その質量は0として扱われている。ところが1998年、Super-KAMIOKANDEグループによる大気ニュートリノの観測から、ニュートリノは有限の質量をもち、なおかつ世代間で振動しているということが示唆された。そして現在、そのニュートリノ振動は先の長基線ニュートリノ振動実験である K2K 実験によって確立されたものになっている。しかし、3世代間のニュートリノ振動はまだ発見されておらず、ニュートリノの質量についても上限が与えられているにすぎない。ニュートリノ振動のパラメータを測定することで、素粒子論や宇宙論に大きな手がかりを与えることができる。

本章では、ニュートリノの質量固有状態の混合状態とニュートリノ振動について述べる。

## 1.1 ニュートリノの質量固有状態と混合状態

ニュートリノの質量のラグランジアンは、ニュートリノがディラック粒子のとき、

$$\mathcal{L}^m = - \sum_{l,l'} \bar{\nu}_{lR} M_{ll'} \nu_{lL} + \text{h.c.} \quad (1.1)$$

と書ける。ここで、 $l$  はフレーバー ( $e, \mu, \tau$ ) を表し、L, R はヘリシティを表している。また、 $M$  は複素  $3 \times 3$  行列である。この  $M$  を対角化するために、二重ユニタリ変換を行う

$$M^D = V m U^\dagger. \quad (1.2)$$

ここで、 $VV^\dagger = 1$ ,  $UU^\dagger = 1$ ,  $m_{ij} = m_i \delta_{ij}$ ,  $m_i > 0$  であり、式 (1.1) は、

$$\mathcal{L}^m = - \sum_{l,l',i} \bar{\nu}_{lR} V_{l'i} m_i (U^\dagger)_{il} \nu_{lL} + \text{h.c.} = - \sum_{i=1}^3 m_i \bar{\nu}_i \nu_i \quad (1.3)$$

となる。ここで、 $\nu_i$  は質量の固有状態で、

$$\nu_i = \nu_{iL} + \nu_{iR} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (1.4)$$

## 第1章 序論

$$\nu_{iL} = \sum_l (U^\dagger)_{il} \nu_{lL}, \quad (1.5)$$

$$\nu_{iR} = \sum_l (V^\dagger)_{il} \nu_{lR} \quad (1.6)$$

である。ニュートリノは弱い相互作用しかしないので、左巻きのもの(L)だけが観測できる。

したがって、ニュートリノの混合状態は、

$$\nu_{iL} = \sum_i U_{li} \nu_{iL} \quad (1.7)$$

と表される。

### 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ある種類のニュートリノが時間発展とともに別の種類のニュートリノに変化する現象である。この現象は、ニュートリノが有限な質量を持ち、かつフレーバー固有状態と質量固有状態が異なり、さらに3つの質量固有状態が1つに縮退していない場合に起こる。ニュートリノのフレーバー固有状態を  $|\nu_l\rangle$ 、質量固有状態を  $|\nu_i\rangle$  とすると、フレーバー固有状態は、

$$|\nu_l\rangle = \sum_i U_{li} |\nu_i\rangle \quad (1.8)$$

と表される。

行列  $U_{li}$  は、Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP) 混合行列と呼ばれ、

$$U_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

で表される。ここで、 $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$  であり、 $\theta_{ij}$  は  $\nu_i$  と  $\nu_j$  の混合角、 $\delta$  は CP 非保存の位相となっている。

次に時間発展について考える。質量の各成分は同じ運動量を持っているとすると、

$$E_i = \sqrt{\mathbf{p}^2 + m_i^2} \simeq |\mathbf{p}| + \frac{m_i^2}{2|\mathbf{p}|} \quad (1.10)$$

となるので、フレーバー固有状態の時間発展は、

$$|\nu_l(t)\rangle = \sum_i e^{-iE_i t} U_{li} |\nu_i\rangle \quad (1.11)$$

と表される。このとき、このニュートリノが  $\nu_{l'}$  として観測される確率は、

$$P(\nu_l \rightarrow \nu_{l'}) = |\langle \nu_{l'} | \nu_l(t) \rangle|^2 \quad (1.12)$$

$$= \left| \sum_i e^{-iE_i t} U_{li} U_{l'i}^* \right|^2 \quad (1.13)$$

となる。ここでニュートリノが極めて相対論的であることを考慮すると、 $m_i \ll E_i$  より、 $t \approx L$  および  $|\mathbf{p}| \approx E$  となる。簡単のため 2 フレーバーの場合を考えると、これらより、 $L = 0$  においてフレーバー  $l$  であったニュートリノが距離  $L$  を飛行した後にフレーバー  $l'$  になっている確率は、式 (1.13) から、

$$P(\nu_l \rightarrow \nu_{l'}) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2}{4E} L \right) \quad (1.14)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \quad (1.15)$$

となる。ここでは、ある決まったエネルギーのニュートリノを考えたため、 $E_i$  の代わりに  $E$  を用いた。また、 $\Delta m^2$  は質量 2 乗差である。

この式 (1.15) より、ニュートリノ振動の効果が最もよく現れるニュートリノのエネルギーは、

$$\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} = \frac{\pi}{2} \quad (1.16)$$

より求められる。加速器を用いたニュートリノ振動実験においては、距離  $L$  は定まっているので、ニュートリノのエネルギーをこの式に合うようにコントロールすることで、ニュートリノ振動に対する実験感度をあげることができる。

第1章 序論

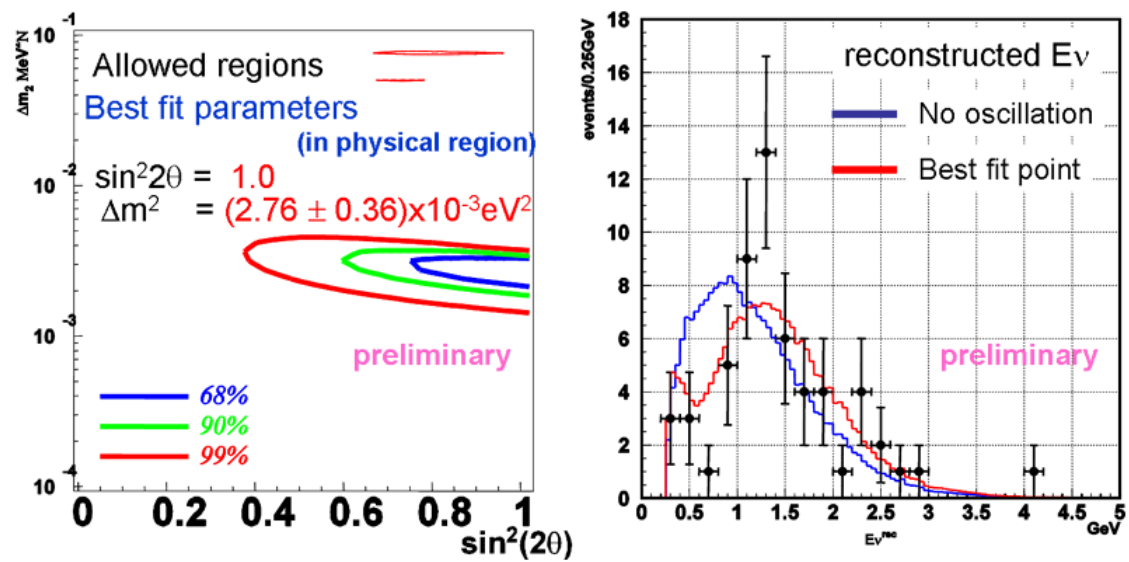


図 1.1: (左) K2K 実験グループのミュオンニュートリノ欠損の解析によって得られた、ニュートリノ質量の二乗差とニュートリノの混合度と信頼度。(右) スーパーカミオカンデで測定されたミュオンニュートリノのエネルギー分布。白丸は実際の測定値。青線と赤線はそれぞれニュートリノ振動がない場合とある場合の予測値。



## 第2章 T2K 実験

この章では、T2K 実験の概要と目的および特色について述べ、また T2K におけるミュオンモニターの役割についても説明する。

### 2.1 実験の概要

T2K ( Tokai to Kamioka ) 実験は、茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器計画 ( J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex ) でほぼ純粋なミュオンニュートリノビームを生成し、それを 295 km 離れた岐阜県飛騨市にある大型水チェレンコフ観測装置スーパーカミオカンデ ( Super-KAMIOKANDE: Super-KAMIOKA Neutrino Detection Experiment ( 通称 Super-K )) で観測する、次期長基線ニュートリノ振動実験である。

T2K 実験の主な目的は以下の 3 つである。

- 電子ニュートリノ出現事象 (  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  ) の探索
- ミュオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定
- 相互作用しないステライルニュートリノ (  $\nu_s$  ) の探索

これらのニュートリノ振動の効果は、ニュートリノ生成標的から 280 m の位置に設置する前置検出器 ( ND280 ) で、生成直後のニュートリノのフラックス、エネルギースペクトルを精密に測定し、それを Super-K での観測結果と比較することで測定する。

次に T2K 実験の特色を挙げる。

- 世界最大のニュートリノビーム強度  
J-PARC の 50 GeV 陽子シンクロトロンからの陽子ビーム ( ビーム強度: 750 kW ) を用いてニュートリノビームを生成する。5 年のランで  $5 \times 10^{21}$  POT ( Proton On Target: 標的に照射した陽子数 ) を目指す。表 2.1 に T2K 実験における陽子ビームパラメータ、図 2.1 に陽子ビームの時間構造を示す。
- 世界最大のニュートリノ観測装置 Super-K  
後置検出器として Super-K を用いる。Super-K は約 50 kt ( 有効体積: 22.5 kt ) の純

## 第2章 T2K 実験

水を湛える大型水チェレンコフ検出器で、実働する世界最大のニュートリノ観測装置である。

- Off-axis ビーム

ビーム軸を Super-K の方向から  $2 \sim 2.5^\circ$  ずらすことで、エネルギースペクトル幅の狭いニュートリノビームが得られる。これにより、スペクトルのピークをニュートリノ振動の効果が最大となるエネルギー領域 ( $0.5 \sim 0.7 \text{ GeV}$ ) に合わせ、かつバックグラウンド事象を引き起こすエネルギーのニュートリノの数を抑えることができる。

ビームエネルギー	50 GeV
ビーム強度	750 kW
スピル中の陽子数	$3.3 \times 10^{14}$ p/spill
スピルの振動数	0.285 Hz
スピル幅	5.6 $\mu\text{sec}$
バンチ数	8 /spill
バンチ幅	58 nsec
バンチ間隔	$\sim 700$ nsec

表 2.1: 陽子ビームパラメータ (デザイン値)

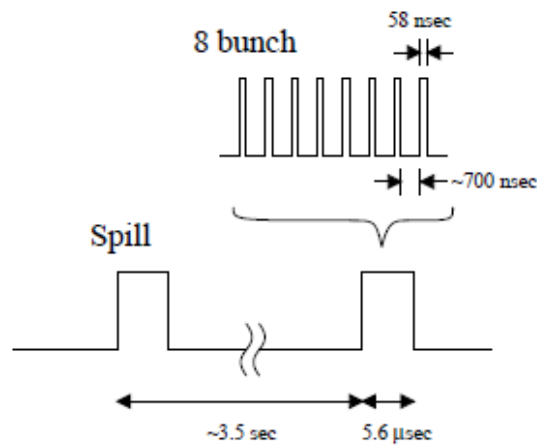
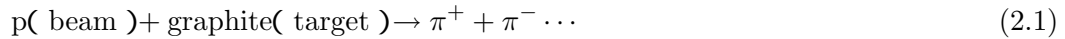


図 2.1: T2K 実験における陽子ビームの時間構造。

### 2.1.1 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC は、400 MeV 線形加速器 (LINAC: LINEar ACcelerator)、3 GeV 陽子シンクロトロン (RCS: Rapid-Cycling Synchrotron)、50 GeV 陽子シンクロトロン (MR: Magnetic

Resonance) で構成される (図 2.2)。MR の陽子ビームをグラファイト標的に照射し、生成した  $\pi$  中間子を電磁ホーンで収束させ、さらに 93 m 長の崩壊トンネルで崩壊させることでニュートリノビームを生成する。



崩壊トンネルの終端、グラファイトから 110 m の位置にはビームダンプが置かれ、ここで陽子や崩壊せずに残った  $\pi$  中間子などのハドロン、低エネルギーのミュオンなどが吸収される。

$\pi$  中間子の崩壊は 2 体崩壊なので、娘粒子のニュートリノとミュオンのプロファイルには強い相関がある。よって、ニュートリノビームの方向、つまりグラファイト標的とニュートリノプロファイル中心とを結ぶ直線の方向は、ビームダンプ直後のミュオンモニターでビームダンプを突き抜けてきたミュオンのプロファイルを測定することで間接的にモニターする。大強度のミュオンを測定するので、ミュオンモニターではバンチごとのモニターが可能である。

グラファイト標的から 280 m 下流に ND280 が設置される。ND280 は、ビーム軸上の on-axis 検出器と、崩壊トンネルの平均  $\pi$  中間子崩壊点と Super-K の線上に置かれる off-axis 検出器からなる。On-axis 検出器は、ニュートリノビームの方向をニュートリノ自身を用いてモニターするための検出器である。ニュートリノの反応断面積は非常に小さいが、T2K 実験のニュートリノビームは大強度であるので、1 日ごとのモニターが可能である。一方 off-axis 検出器は、生成直後のニュートリノのフラックスやエネルギースペクトルを精密に測定し、ニュートリノ振動がないとしたときの Super-K におけるフラックスやエネルギースペクトルを予測するための検出器である。また、Super-K でのニュートリノ反応を予測するために、ニュートリノの反応断面積の詳細な研究も行う。

### 2.1.2 スーパーカミオカンデ

後置検出器として Super-K を用いる。Super-K は岐阜県飛騨市の池ノ山内部にある神岡鉱山の地下 1000 m に設置された、円筒型タンク (直径: 39.3 m、高さ: 41.4 m) に約 50 kt (有効体積: 22.5 kt) の純水を湛える大型水チェレンコフ検出器で、世界最大のニュートリノ観測装置である (図 2.3)。

Super-K での宇宙線ミュオンの到来頻度は地上の  $10^{-5}$  倍程度で、約 2Hz である。また、タンク内を内部検出器と外部検出器に分け、外部検出器でタンクの外から来るミュオンによる事象を識別したり、岩盤からのガンマ線などが内部検出器に侵入できないよう

## 第2章 T2K 実験

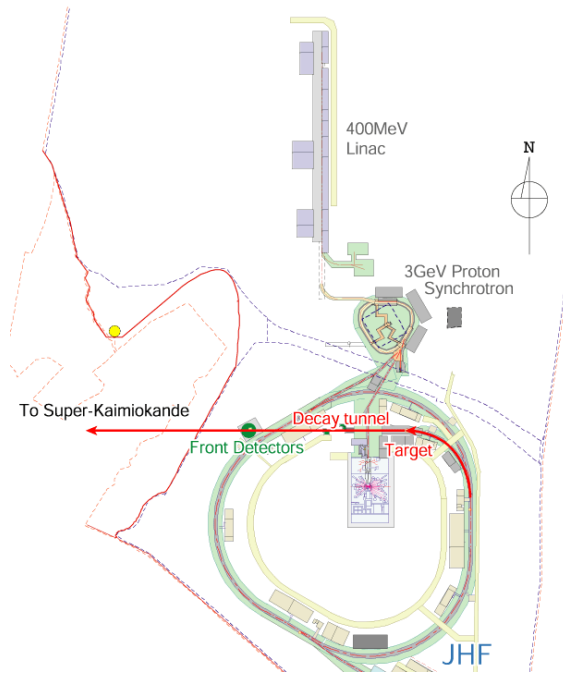


図 2.2: J-PARC の概観。

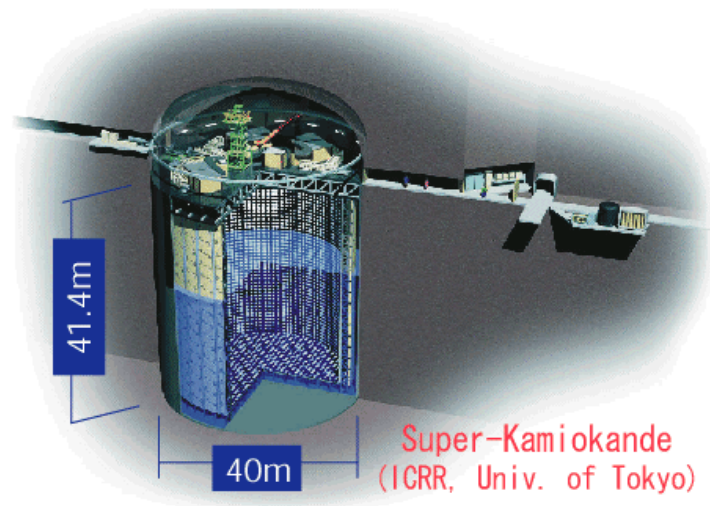


図 2.3: Super-K の概観。

遮蔽している。

Super-K は内部検出器に 11,146 本の 20 インチ光電子増倍管 (PMT)、外部検出器に 1,885 本の 8 インチ PMT を用いて、水中でニュートリノによって散乱された荷電粒子の発する

## 2.1. 実験の概要

チェレンコフ光のイメージを検出する。

$$\nu_e + n \rightarrow e + p, \quad \nu_\mu + n \rightarrow \mu + p \quad (2.3)$$

荷電粒子が水中での光速  $c/n$  ( $c$ : 光速、 $n$ : 水の屈折率) より速く走るとき、(2.4) 式で表される角  $\theta$  の方向に円錐状にチェレンコフ光を放射する。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.4)$$

ここで、 $\beta = v/c$  は荷電粒子の速度である。また、単位長さあたりに放出する光子数は、

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \int_{\beta n > 1} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

である。ここで、 $x$  は荷電粒子の飛跡の長さ、 $z$  は粒子の電荷、 $\lambda$  はチェレンコフ光の波長、 $\alpha$  は微細構造定数である。つまり、単一電荷粒子が  $\beta = 1$  で水中を 1 cm 走ると、PMT の有感波長領域 300 ~ 700 nm では、 $\theta = 42^\circ$  の方向に約 390 個の光子が放射される。

このチェレンコフ光は Super-K のタンクの壁に敷きつめた PMT 上でリング状のイメージを映すので、光が入射した各 PMT の信号の波高と時間情報を用いてチェレンコフリングを再構成し、粒子の生成点やエネルギー、運動方向を測定する。また、ミューオンによるチェレンコフ光は明瞭なリングになるのに対し、電子によるチェレンコフ光は電子が引き起こす電磁シャワーのため縁がぼやけた形のリングになるので、このリングの形の情報を用いることでミューオンと電子を識別する。

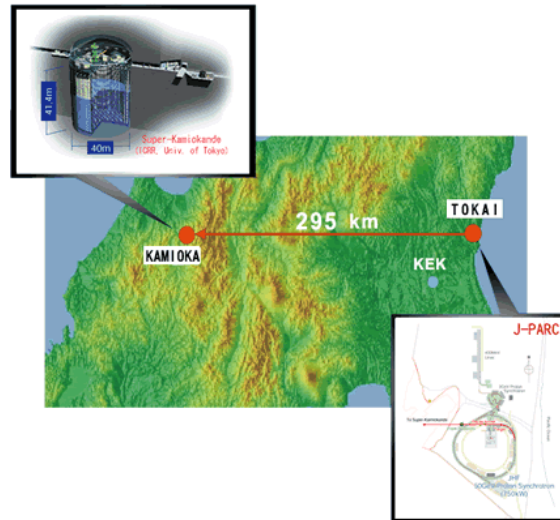


図 2.4: Tokai to Kamioka の位置関係。

振動パラメータは、

$$\frac{\text{Super - K で観測されたニュートリノの数}}{\text{J - PARC で生成されたニュートリノの数}} \quad (2.6)$$

## 第2章 T2K 実験

によって測定される。

### 2.1.3 Off-axis ビーム

T2K 実験では off-axis ビームを用いる。これは、ビーム軸を検出器の方向からずらすことでエネルギースペクトル幅の狭いニュートリノビームを得るもので、実用化されるのは世界で初めてである。

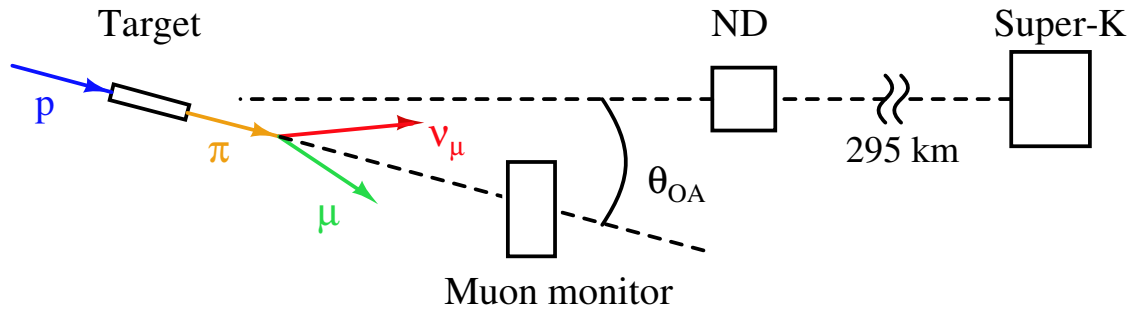


図 2.5: Off-axis ビームの概念図。

図 2.5 に示すように、グラフィット標的と Super-K とを結ぶ線とビーム軸とのなす角を off-axis 角  $\theta_{OA}$  と定義する。Off-axis 角はニュートリノビームのエネルギースペクトルのピークが、ニュートリノ振動の効果が最もよく現れるエネルギー領域にくるように設定する。T2K 実験では、 $\theta_{OA} = 2 \sim 2.5^\circ$  を用いる。

式 (1.16) より、 $\Delta m_{23}^2 = (1.9 \sim 3.0) \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$  としたとき、T2K 実験 ( $L=295[\text{km}]$ ) においてニュートリノ振動の効果が最もよく現れるニュートリノエネルギーは、

$$E_\nu = 0.45 \sim 0.72 [\text{GeV}] \quad (2.7)$$

である。

式 (2.2) のようにニュートリノは  $\pi$  中間子の 2 体崩壊から生成されるので、ビーム軸から角  $\theta_{OA}$  の方向に出るニュートリノのエネルギーは、エネルギー - 運動量保存則から、

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta_{OA})} \quad (2.8)$$

ここで、 $m_\pi$ ,  $p_\pi$ ,  $E_\pi$ ,  $m_\mu$  はそれぞれ  $\pi$  中間子の質量、運動量、エネルギー、ミューオンの質量を表している。式 (2.8) を  $p_\pi$  について微分すると、 $E_\nu$  は  $\frac{p_\pi}{E_\pi} = \cos \theta_{OA}$  のとき最大値

$$E_\nu^{\text{max}} = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2E_\pi \sin^2 \theta_{OA}} \quad (2.9)$$

をとることが分かる。

## 2.2. 実験の目的

式 (2.8) の  $p_\pi$  と  $E_\nu$  の関係を  $\theta_{OA} = 0, 2, 2.5^\circ$  について図示すると図 2.6 のようになる。この図から、on-axis ビーム ( $\theta_{OA} = 0^\circ$ ) の場合には  $E_\nu$  は  $p_\pi$  に比例するのに対し、off-axis ビーム ( $\theta_{OA} = 2, 2.5^\circ$ ) の場合にはそれぞれ  $p_\pi = 4.0, 3.2$  [GeV/c] で最大値 0.86, 0.69 GeV をとり、 $p_\pi > 1$  GeV では  $E_\nu$  は  $p_\pi$  にほとんどよらないので、ほぼ決まったエネルギーのニュートリノビームを得ることができる。

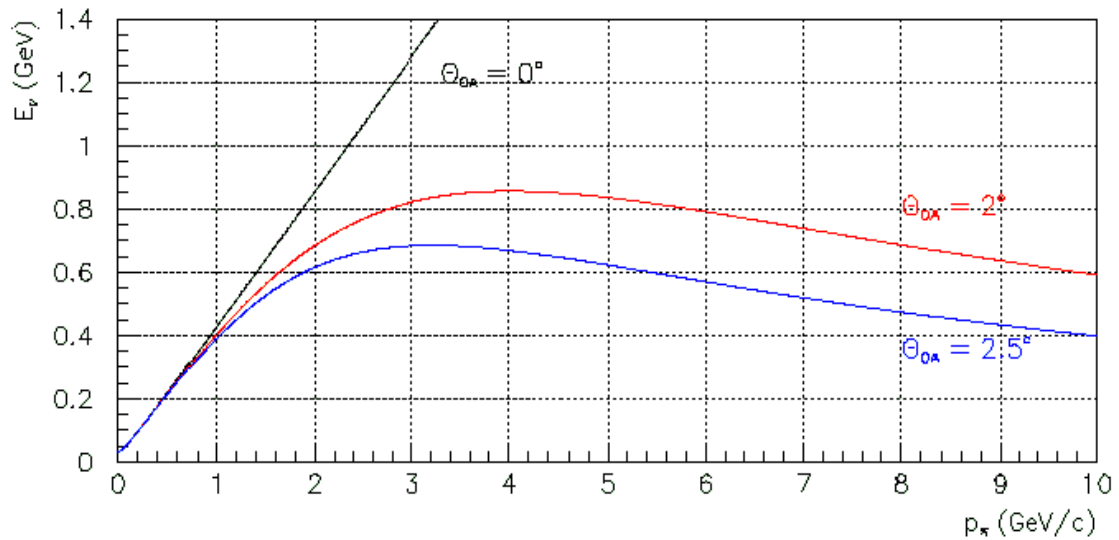


図 2.6: off-axis 角  $\theta_{OA} = 0, 2, 2.5^\circ$  における  $\pi$  中間子の運動量とニュートリノのエネルギーとの関係。

## 2.2 実験の目的

### 2.2.1 電子ニュートリノ出現事象の探索

T2K 実験では、ミューオンニュートリノが電子ニュートリノに振動するモード ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ) の発見を目指す。以下に Super-K で観測される  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動のシグナルとバックグラウンドおよび探索の手法と感度について述べる。

#### $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動のシグナル

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動の探索は、電子ニュートリノと酸素原子核との荷電カレント反応の検出によって行う。T2K 実験で用いるニュートリノのエネルギー領域 (0.5 ~ 0.7 GeV) では、以下の荷電カレント準弾性散乱 (CC-QE) が主要な反応である。

$$\nu_e + n \rightarrow e + p \quad (2.10)$$

## 第2章 T2K 実験

ここで、反跳陽子の運動量は水中でのチェレンコフ効果のしきい値よりも低いため、電子による水チェレンコフ光のみ観測される。

### バックグラウンド

電子ニュートリノ出現事象選別の後に残る主なバックグラウンドは、ミューオンニュートリノによる中性カレント  $\pi^0$  生成反応 ( $\nu_\mu\text{NC}$ ) 事象と、ビーム中に混入する電子ニュートリノ (beam  $\nu_e$ ) による事象である。

$\nu_\mu\text{NC}\pi^0$  生成反応  $\nu_\mu + n \rightarrow \nu_\mu + n + \pi^0$  が起こったとき、 $\pi^0$  崩壊  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  からのガンマ線の1つが再構成されないと、その事象は単一電子事象と間違われて電子ニュートリノ出現事象のバックグラウンドとなる。

また、ニュートリノビーム生成過程で、ミューオン崩壊  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  や K 中間子崩壊  $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ ,  $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$  によりビーム中に混入する電子ニュートリノも電子ニュートリノ出現事象のバックグラウンドとなる。ビーム中のミューオンニュートリノに対する電子ニュートリノの割合は、エネルギースペクトルのピーク (0.7 GeV) で約 0.4% である。

### $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動探索の感度

$5 \times 10^{21}$  POT において、 $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ 、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$  としたとき、モンテカルロシミュレーションによって得た全ての事象選択後に残るシグナル、バックグラウンドの事象数を表 2.2 に示す。

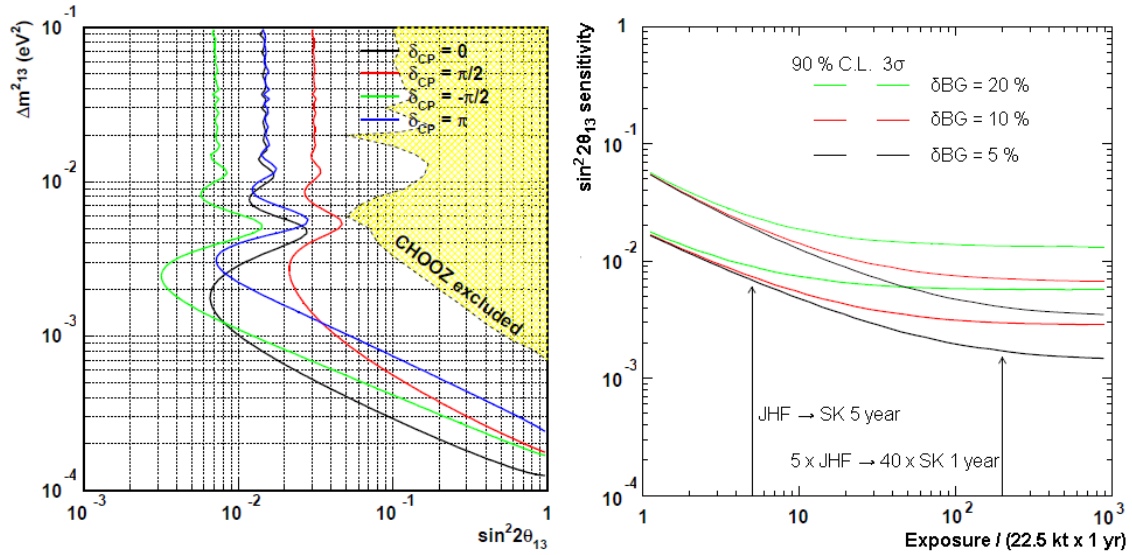
図 2.7 (左) に、 $5 \times 10^{21}$  POT において予測される  $\sin^2 2\theta_{13}$  の感度 (90% C.L.) を示す。ただし、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ 、 $\delta = 0, \pi/2, -\pi/2, -\pi$  とし、バックグラウンド除去の系統誤差 ( $\delta\text{BG}$ ) を 10% と仮定した。 $\Delta m^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$  において、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.008$  (90% C.L.) まで到達できる。

図 2.7 (右) に、 $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ 、 $\delta = 0$  において、 $\delta\text{BG} = 5, 10, 20\%$  としたときの陽子照射時間に対する  $\sin^2 2\theta_{13}$  の感度を 90% C.L.、 $3\sigma$  について示す。5 年のランに相当する  $5 \times 10^{21}$  POT において、バックグラウンド除去の系統誤差は 10% 程度に抑える必要がある。

$\nu_e$ シグナル	104
$\nu_\mu\text{NC}$ バックグラウンド	11
Beam $\nu_e$ バックグラウンド	14

表 2.2:  $5 \times 10^{21}$  POT において全事象選択後に Super-K で予測される事象数。



図 2.7:  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動探索の感度。

### 2.2.2 ミューオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定

すでに確立されているミューオンニュートリノ消失の振動モードを用いて、振動パラメータ ( $\sin^2 2\theta_{23}$ ,  $\Delta m_{23}^2$ ) の精密測定を目指す。以下に、ニュートリノ振動解析の手法とパラメータの到達感度について述べる。

#### ミューオンニュートリノ消失のシグナル

ミューオンニュートリノが 295 km 飛行後、振動せずに残る確率  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$  は、2 世代間ニュートリノ振動 ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ) において、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \quad (2.11)$$

と書ける。したがって、T2K 実験では、以下のような  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動シグナルが見える。

- ミューオンニュートリノ事象の欠損

T2K のニュートリノエネルギーはタウニュートリノ荷電カレント反応のしきい値よりも低いため、振動してできたタウニュートリノは Super-K で観測されない。したがって、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動によってミューオンニュートリノ事象の欠損が観測される。

- エネルギースペクトルの歪み

ミューオンニュートリノの飛行距離  $L$  は 295 km で一定なので、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$  はニュートリノのエネルギーの関数になる。したがって、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動の効果は、Super-K

## 第2章 T2K 実験

で観測されるニュートリノのエネルギースペクトルが式(2.11)に従って歪む形で現れる。

したがって、ND280で測定したミュオンニュートリノ事象の数およびニュートリノのエネルギースペクトルを、モンテカルロシミュレーションで得た外挿関数で Super-K に外挿し、それと Super-K での観測とを比較することで振動パラメータ ( $\sin^2 2\theta_{23}$ ,  $\Delta m_{23}^2$ ) を測定する。

ニュートリノのエネルギースペクトルは、主要な反応である式(2.10)の CC-QE 反応を仮定して再構成する。この反応は2体散乱であり、ニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  はミュオンの運動量  $p_\mu$  およびニュートリノビームの方向となす角  $\theta_\mu$  を用いて次式のように計算される。

$$E_\nu^{\text{rec}} = \frac{(m_n - V)E_\mu - m_\mu^2/2 - ((m_n - V)^2 - m_p^2)/2}{(m_n - V) - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (2.12)$$

ここで、 $E_\nu$ ,  $m_\mu$  はそれぞれミュオンのエネルギーと質量、 $m_n$ ,  $m_p$  は中性子、陽子の質量、 $V$  は原子核のポテンシャルエネルギー ( $^{16}\text{O}$  は 27 MeV) である。また、中性子のフェルミ運動は無視した。

### バックグラウンド

ニュートリノのエネルギーは CC-QE 反応を仮定して再構成するので、次式のような CC-QE 以外の荷電カレント反応 (CC-nonQE)、NC 反応はバックグラウンドとなる。

$$\text{CC/NC}1\pi\text{生成反応} : \nu + N \rightarrow l + N' + \pi \quad (2.13)$$

$$\text{CC/NC コヒーレント}\pi\text{生成反応} : \nu + {}^{16}\text{O}({}^{12}\text{C}) \rightarrow l + {}^{16}\text{O}({}^{12}\text{C}) + \pi \quad (2.14)$$

$$\text{CC/NC 深非弾性散乱} : \nu + N \rightarrow \nu + N' + m\pi \quad (2.15)$$

### 振動パラメータの到達感度

表2.3に、off-axis 角  $\theta_{\text{OA}} = 2.5^\circ$ 、 $5 \times 10^{21}$  POT のとき、モンテカルロシミュレーションによって得た全ての事象選択後に残る CC-QE、CC-nonQE そして NC 反応の数を示す。

図2.8(左)に、Super-Kで予測される  $\nu_\mu$  事象の  $E_\nu^{\text{rec}}$  スペクトルを示す。ただし、 $\Delta m_{23}^2 = 2.7 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ 、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$  を仮定した。網掛け部分は non-QE 反応によるものである。

図2.8(右)に、ニュートリノ振動があるときとないときの  $E_\nu^{\text{rec}}$  スペクトルの比を示す。0.65 GeV 付近に明瞭なディップが見られる。定性的には、ディップの深さが  $\sin^2 2\theta_{23}$ 、位置が  $\Delta m_{23}^2$  に対応する。予想される統計誤差は、 $\sin^2 2\theta_{23}$  については 0.009、 $\Delta m_{23}^2$  については  $5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  である。

$\Delta m_{23}^2 (\text{eV}^2)$	CC-QE	CC-nonQE	NC	全 $\nu_\mu$ 事象
振動なし	3,620	1,089	96	4,805
$2.0 \times 10^{-3}$	933	607	96	1,636
$2.3 \times 10^{-3}$	723	525	96	1,344
$2.7 \times 10^{-3}$	681	446	96	1,223
$3.0 \times 10^{-3}$	800	414	96	1,310

表 2.3:  $5 \times 10^{21}$  POT において Super-K で予測される  $\nu_\mu$  事象数。  $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ ,  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0$  とした。

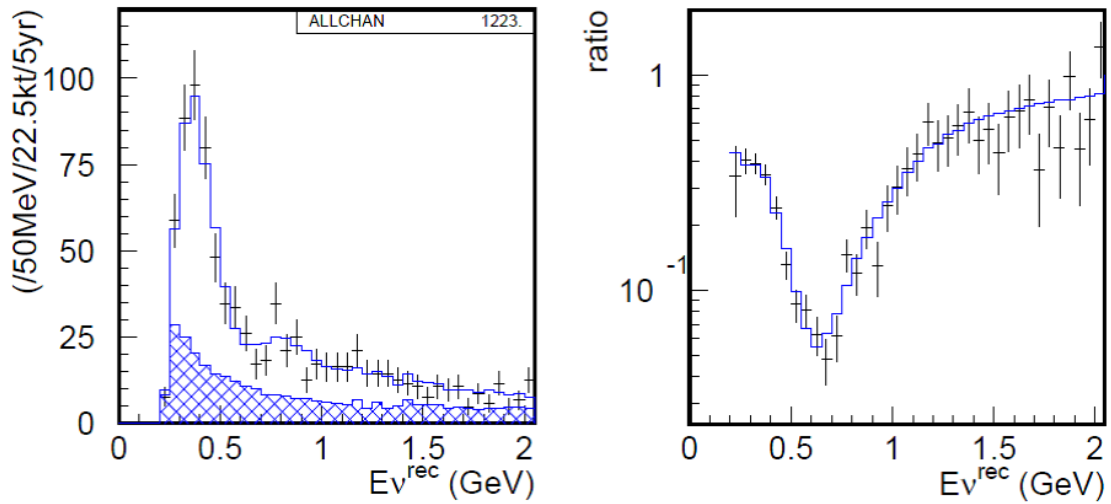


図 2.8: (左) Super-K で予想される  $\nu_\mu$  事象の  $E_\nu^{\text{rec}}$  スペクトル。(右) ニュートリノ振動があるきとないときの  $E_\nu^{\text{rec}}$  スペクトルの比。

図 2.9 に、真の  $\Delta m_{23}^2$  の関数として各振動パラメータの統計誤差を示す。ただし、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$  を仮定した。

図 2.10 に、系統誤差の影響を示す。破線は  $5 \times 10^{21}$  POT のときの系統誤差 ( $1\sigma$ ) で、以下の 4 つの系統誤差について考慮した。

- $\nu_\mu$  事象数規格化の不定性  
ND280 から Super-K に外挿する際の  $\nu_\mu$  事象数の誤差。赤線は事象数の規格化が 10% ずれたとき振動パラメータにかかる系統的バイアスを示す。
- non-QE/QE 比の不定性  
non-QE と QE の反応断面積の比の誤差。Super-K で予測されるニュートリノのエネルギースペクトルの形に影響する。緑線は non-QE/QE 比が 20% ずれたとき振動パ

第2章 T2K 実験

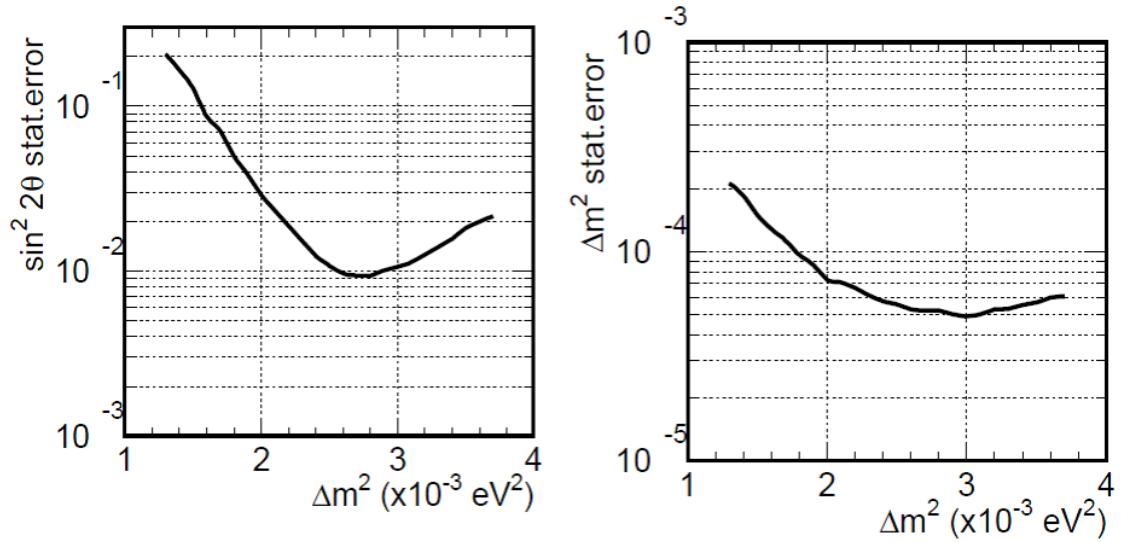


図 2.9: 真の  $\Delta m_{23}^2$  の関数として各振動パラメータの統計誤差。  $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$  を仮定した。

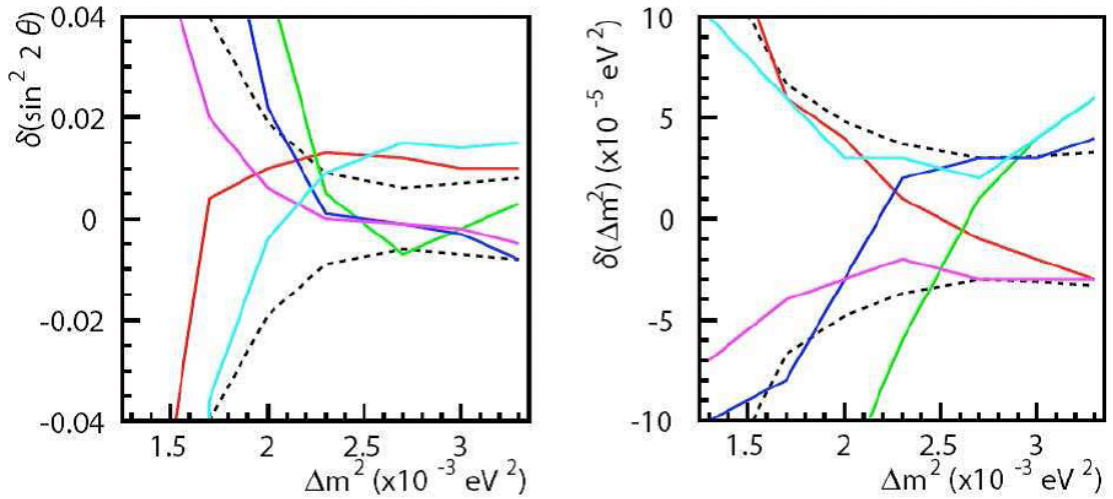


図 2.10: 振動パラメータの系統誤差。赤線は  $\nu_\mu$  事象数規格化が 10% 変化したとき、緑線は non-QE/QE 比が 20% 変化したとき、青線はエネルギースケールが 4% 変化したとき、ピンク線はスペクトルの形に 20% の線形な歪みを加えたとき、水色線はスペクトルの幅が 10% 変化したときを示す。破線は  $5 \times 10^{21}$  POT のとき  $1\sigma$  の系統誤差を示す。

ラメータにかかる系統的バイアスを示す。

- エネルギースケールの不定性

エネルギースケールの誤差。Super-K で予測されるニュートリノのエネルギースペクトルの形に影響する。青線はエネルギースケールが 4% ずれたとき振動パラメータに

かかる系統的バイアスを示す。

- エネルギースペクトルの形の不定性

Super-K で予測されるニュートリノのエネルギースペクトルの形に対する誤差。ピンク線は  $1 + 0.2(1 - E_\nu)$  の 20% の線形な歪みを加えたとき振動パラメータにかかる系統的バイアスを示す。この変化は 2 つのハドロン生成モデル MARS と FLUKA で予測されるスペクトルの違いに対応する。水色線はスペクトルの幅が 10% 変化したとき振動パラメータにかかる系統的バイアスを示す。

系統誤差を統計誤差よりも小さく抑えるためには、上の不定性についてそれぞれ、

- $\nu_\mu$  事象数規格化の不定性：5% 以下
- non-QE/QE 比の不定性：5~10% 以下
- エネルギースケールの不定性：2% 以下
- エネルギースペクトルの線形な歪みの不定性：20% 以下
- エネルギースペクトルの幅の不定性：10% 以下

に抑える必要がある。

## 2.3 実験計画

J-PARC は現在建設中で、2008 年 10 月に施設稼動予定である。ミュオンモニターのインストールは 2008 年 12 月に行い、T2K 実験は 2009 年 4 月に物理ランを開始する。

まず、デザイン値の 1% 強度 ( 7.5 kW ) のビームで、プロトンビームモニターやミュオンモニターを用いてニュートリノビームを調整する。

そして、最初の 1 年間は 100 kW のビーム強度で測定を行い、ニュートリノビームについて詳細に研究する。ここで  $2 \times 10^{20}$  POT のデータ量が見込まれるが、その最初の 1 年のランでも、電子ニュートリノ出現事象については、 $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ 、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$  のとき、シグナルが 4~5 事象、バックグラウンドが ~1 事象期待できる。また、ミュオンニュートリノ消失の振動パラメータについては、 $1\sigma$  で  $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) = 0.03$ 、 $\delta(\Delta m_{23}^2) = 1.6 \times 10^{-4}$  まで到達できる。その後、4 年間のランで  $5 \times 10^{21}$  POT を目指し、前節で述べたニュートリノ振動の研究を行う。

## 2.4 ミューオンモニターに対する物理的要請

T2K 実験においては、ニュートリノビームが Super-K の方向に飛んでいるという確証を得るために、ニュートリノビームの方向を正確に測定することが重要である。さらに、ミューオンニュートリノ消失パラメータを第 2.2.2 小節で述べた精度で測定するには、ニュートリノビームの方向を精密に 1 mrad 以上の精度で測定する必要がある。その役割を果たすのがミューオンモニターである。

ミューオンモニターは、

- 親の  $\pi$  中間子からニュートリノとともに出てくるミューオンの位置プロファイルを測定することで、ニュートリノビームの方向と強度を間接的にモニターする装置

である。

ニュートリノビームの方向を 1 mrad 以上の精度で測定することは、ミューオンモニターにおいてミューオンプロファイルの中心を 11 cm 以上の精度で測定することに対応する。陽子標的からミューオンモニターまでの距離が 110 m である。そこで、ミューオンモニターに要求するプロファイル中心の測定精度を 3 cm とし、より精度良く確証の得られる測定を目指す。

ミューオンモニターは大強度のミューオンを測定するので、バンチごとにプロファイルを測定することができる。このように、リアルタイムにニュートリノビームの方向をモニターすることができるのは、T2K 実験の測定器の中ではミューオンモニターだけである。したがって、ミューオンモニターは T2K 実験において欠かせない要素の 1 つで、ミューオンモニターが止まってしまった場合には、T2K 実験を止める必要がある。

また、ミューオンモニターは電磁ホーンのアラインメントや電流量、また標的に照射する陽子ビームのずれにも感度があるので、通常ランのみならずコミッショニングにおいてもビーム調整の上で重要な役割を担う。

よって、ミューオンモニターは以下のような要請を満たさなければならない。

- ニュートリノビームの方向を 1 mrad 以上の精度でモニターするため、ミューオンのプロファイル中心を 3 cm 以上の精度で測定する
- バンチごとにプロファイルを測定する
- 5 年間メンテナンスフリーで安定に動作し続ける
- コミッショニング時の 1% 強度のビームも同じ精度で測定できる

## 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

ミューオンモニターのデザインを考える上で、ミューオンモニターにおけるビームの性質を知ることが重要である。そこで本章ではまず、モンテカルロシミュレーションによるミューオンモニターにくる粒子の数や位置プロファイルの見積もり、またミューオンモニターの副次的機能について説明する。そしてミューオンモニターに用いる検出器の選定、検出器に求められる性能の見積もりについて述べる。

### 3.1 T2K ビームラインシミュレーション

ミューオンモニターでのビームの性質を調べるために、まず、T2K ビームラインシミュレーションプログラム ( jnubeam ) を使ってのモンテカルロシミュレーションを紹介する。jnubeam は T2K ビームラインにおいてニュートリノビームを生成する過程のシミュレーションを行うプログラムで、GEANT3 を用いて作られている。

図 3.1 が T2K ビームラインのジオメトリである。陽子ビームをコリメータを通して標的に照射する過程から、ダンプ直後のミューオンモニターへの粒子輸送までをシミュレートしている。陽子ビームはグラファイト標的に衝突し、2 次粒子を生成する。生成した  $\pi$  中間子は 3 台の電磁ホーンによって収束され、93 m 長の崩壊トンネル中で崩壊してニュートリノとなる。その崩壊から同時に生成されるミューオンや、崩壊せずに残った  $\pi$  中間子などのハドロンは、崩壊トンネル直後のビームダンプで吸収される。ビームダンプは主にグラファイト ( 315 cm 厚 )、鉄 ( 250 cm 厚 )、コンクリート ( 100 cm 厚 ) で構成される。なお、このビームダンプの物質質量では、ビームダンプを通過できるミューオンの運動量のしきい値は 5 GeV/c である。このしきい値は、陽子ビームの照射位置がずれたときに、ミューオンモニターでプロファイル中心のずれがもっともよく見え、かつミューオンモニターにおける中性子のフラックスが小さくなるように設定してある。

本節では、ビームダンプを通過してきた粒子のフラックス、エネルギー分布、位置プロファイルの見積もり、陽子ビームの標的照射位置がずれたときのミューオンプロファイルの変化について評価を述べる。

用いたシミュレーションのパラメータを表 3.1 に示す。

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

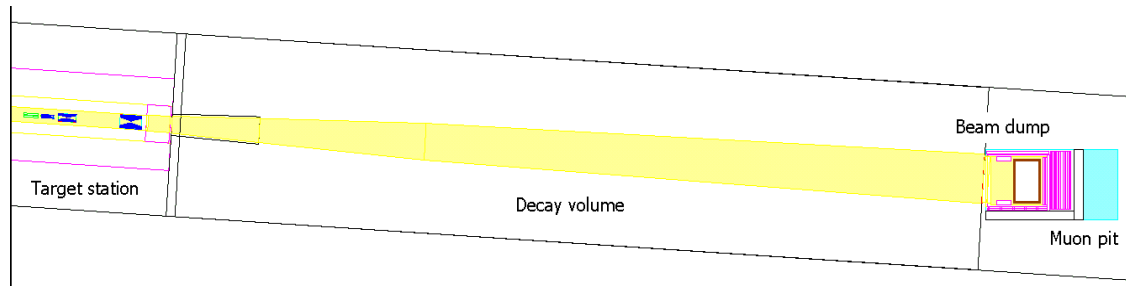


図 3.1: T2Kニュートリノビームラインのジオメトリ(横から見た断面図)。左端から、標的施設(コリメータ、グラファイト標的、電磁ホーン)、崩壊トンネル、ビームダンプ、ミュオンピット。標的施設、崩壊トンネル、ビームダンプ周囲は、冷却のためヘリウムガスで満たれている。

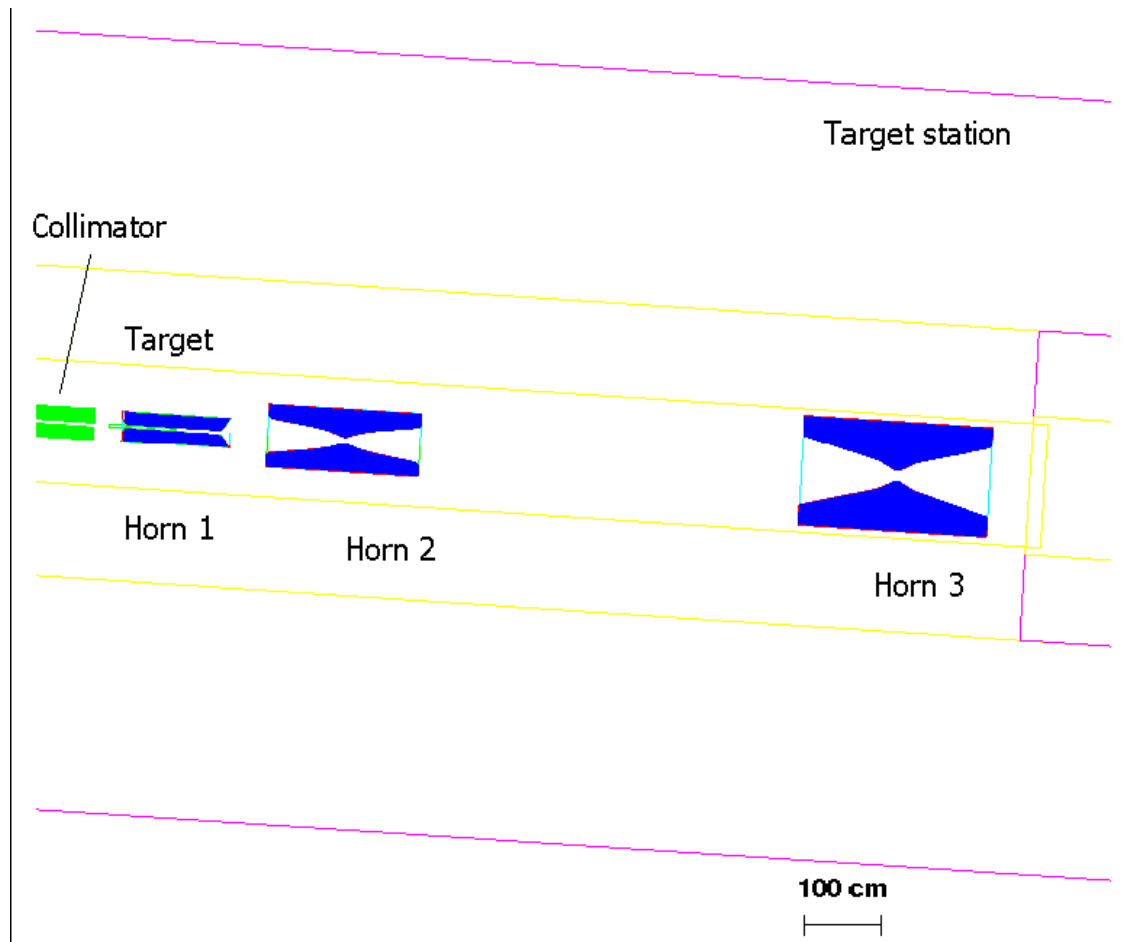


図 3.2: 標的施設(横から見た断面図)。コリメータを通して陽子ビームをグラファイト標的に照射し、生成した $\pi$ 中間子を3台の電磁ホーンで収束させる。



### 3.1. T2K ビームラインシミュレーション

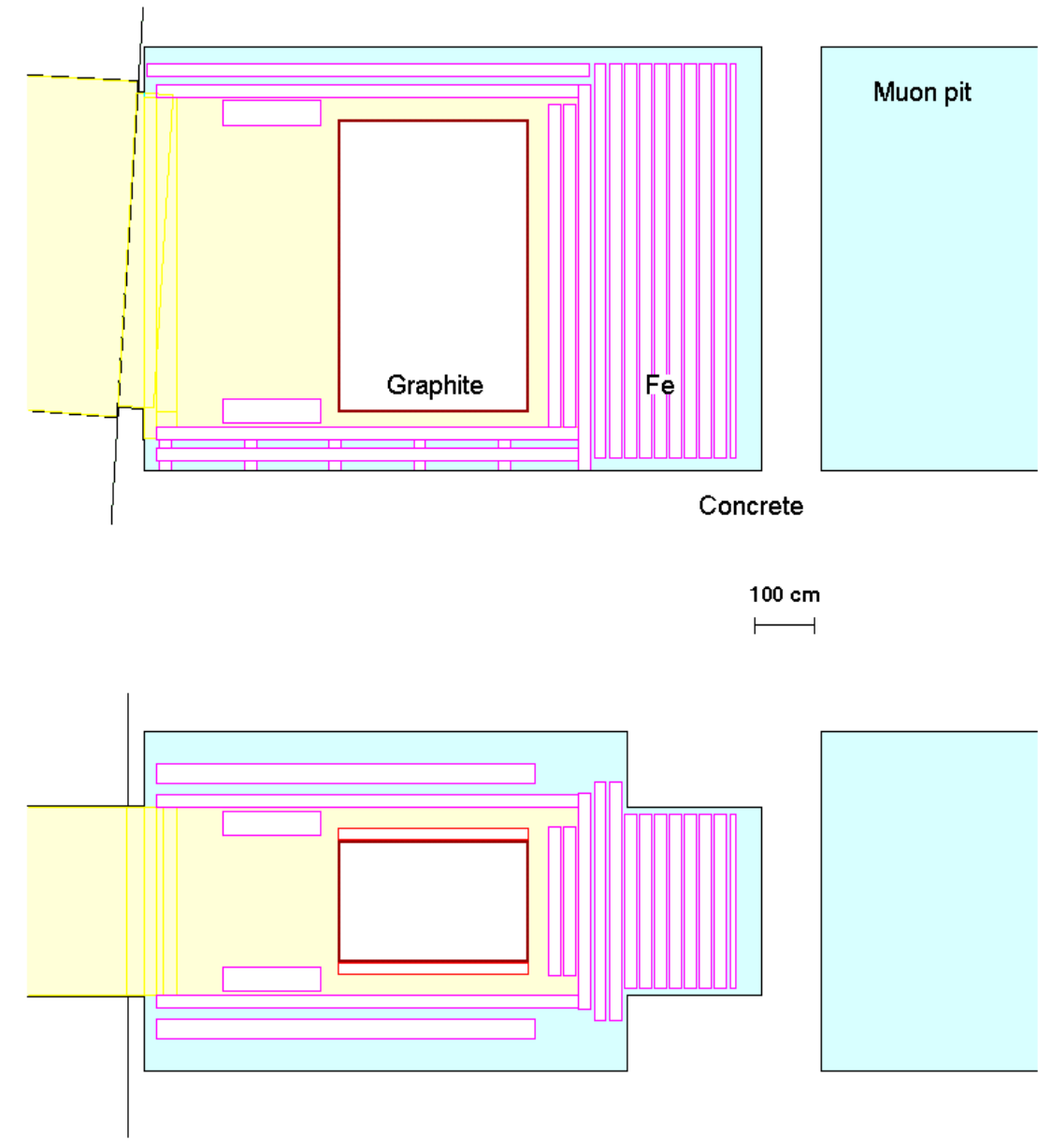


図 3.3: ビームダンプとミュオンピット (上は横から、下は真上から見た断面図)

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

off-axis 角	2.5°
陽子エネルギー	40.9 GeV
陽子ビーム径 $\sigma$	0.6 cm
電磁ホーン電流	320 kA
カットオフ運動エネルギー	
ガンマ線	10 keV
電子	10 keV
中性ハドロン	10 keV
荷電ハドロン	1 MeV
ミューオン	5 MeV

表 3.1: T2K ビームラインシミュレーションのパラメータ。

#### 3.1.1 ミューオンモニターにおける粒子のフラックス、位置プロファイル、エネルギー分布

シミュレーションによって得られたミューオンモニターにおける各粒子のフラックス、位置プロファイル、エネルギー分布をそれぞれ表 3.2、図 3.4、図 3.5 に示す。モンテカルロの統計は  $3.2 \times 10^6$  POT で、フラックスと位置プロファイルについてはこれを 1 spill 当たりの統計 ( $3.3 \times 10^{14}$  POT) にスケールしてある。

ミューオンモニターにおける全荷電粒子数は、ビーム軸上で  $1.33 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/spill と見積もられた。ミューオンピット全体で見ると、 $9.53 \times 10^{12}$  particles/spill となる。その内、ミューオンが占める割合が 84.0%、電子の占める割合が 15.7% である。したがって、ミューオンモニターで観測するのはほとんどミューオンと電子である。また、図 3.4 を見ると、荷電粒子の位置プロファイルはビーム軸 (0 cm, -22 cm) を中心にガウシアンに近い分布、中性子のプロファイルは一様な分布をしていることが分かる。したがって、ミューオンモニターにおいて全荷電粒子のプロファイルを測定することは、ミューオンのプロファイルを測定することと同値である。

全荷電粒子の位置プロファイル (図 3.4 左下) を 2 次元ガウシアン

$$f(x, y) = A \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

でフィットしたときのフィットパラメータを表 3.3 に示す。荷電粒子のプロファイルは、 $\sigma \approx 1$  m の分布をしていることが分かった。

### 3.1. T2K ビームラインシミュレーション

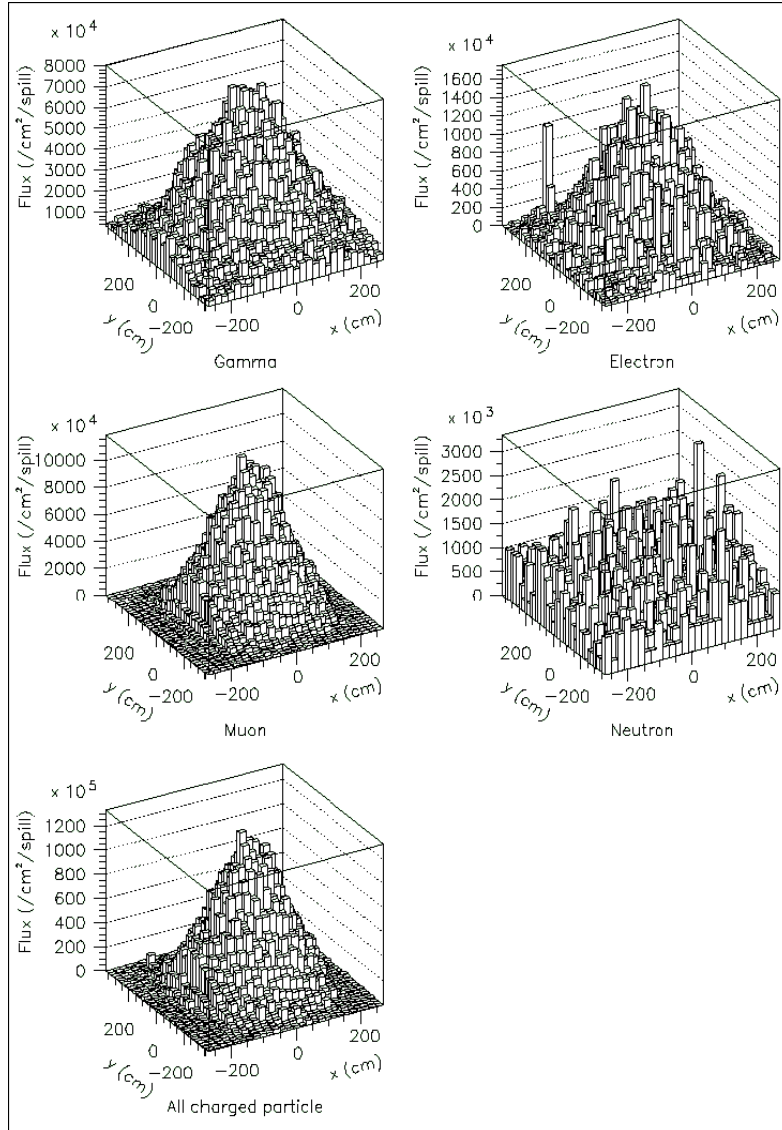


図 3.4: ミューオンモニターにおける各粒子の位置プロファイル。  $x$  は水平方向、  $y$  は鉛直方向を表す。

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

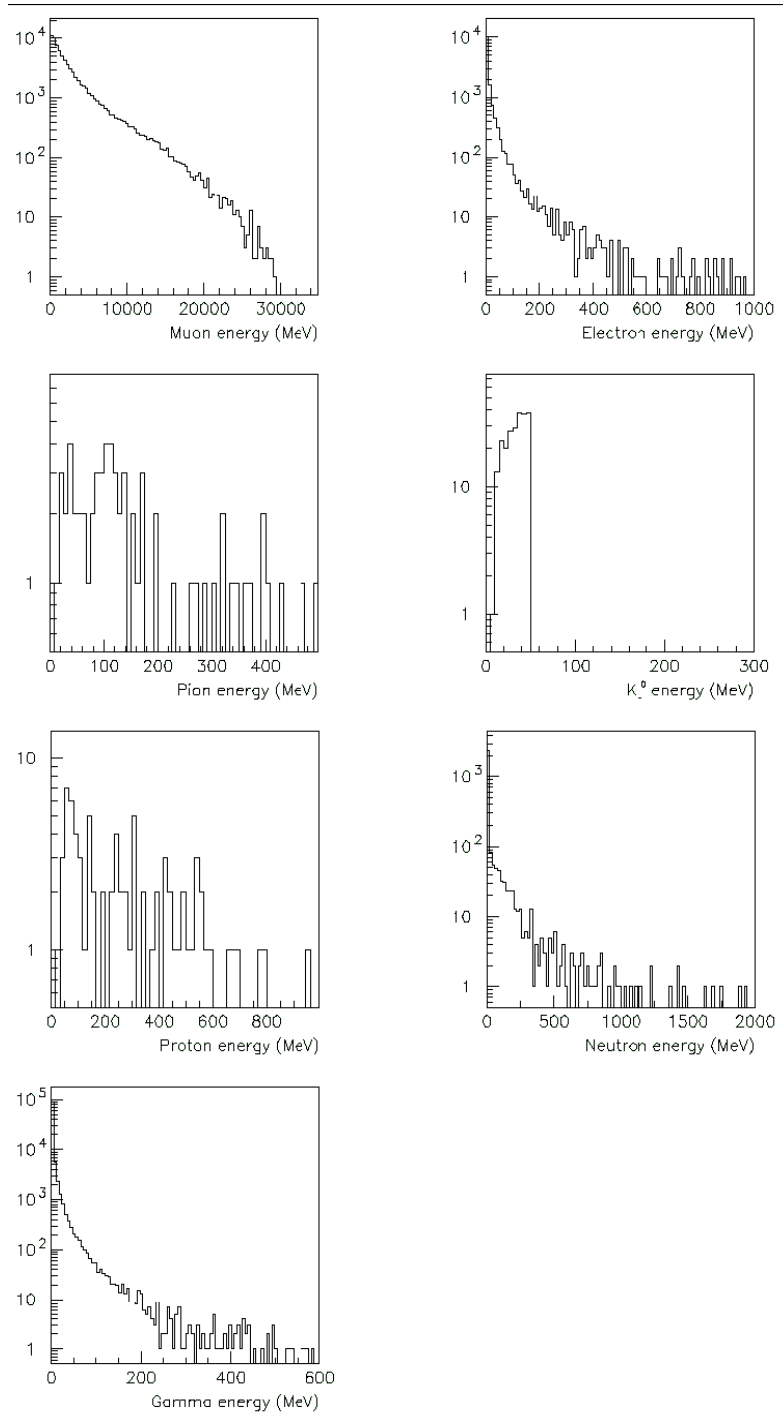


図 3.5: ミューオンモニターにおける各粒子のエネルギー分布。

### 3.1. T2K ビームラインシミュレーション

全荷電粒子	$1.33 \times 10^8$
ミューオン	$1.19 \times 10^8$
電子	$1.75 \times 10^7$
$\pi$ 中間子	$5.16 \times 10^5$
$K_L^0$	$7.73 \times 10^5$
陽子	$7.73 \times 10^5$
中性子	$3.35 \times 10^6$
ガンマ線	$8.02 \times 10^7$

表 3.2: ミューオンモニターにおけるビーム軸の粒子のフラックス [ $/\text{cm}^2/\text{spill}$ ]

$x_0[\text{cm}]$	$0.317 \pm 0.298$
$y_0[\text{cm}]$	$-22.77 \pm 0.54$
$\sigma[\text{cm}]$	$103.0 \pm 0.2$

表 3.3: ミューオンモニターにおける全荷電粒子のプロファイルパラメータのベストフィット。

#### 3.1.2 陽子ビーム照射位置に対する感度

標的に照射する陽子ビームの位置がずれることが、ニュートリノビームの方向がずれる主な原因となる。そこで、陽子ビームの照射位置がずれたとき、それがミューオンモニターにおいてどのように観測されるかを調べる。ここでは簡単のため、水平方向 ( $x$  方向) にずれた場合についてのみ考える。陽子ビームの照射位置の標的中心からのずれを  $\delta x$  として、 $\delta x = 0, 1, 5 \text{ mm}$  についてシミュレーションを行う。なお、モンテカルロの統計は  $1.0 \times 10^6$  POT である。各  $\delta x$  について得られた全荷電粒子の  $x$  プロファイルを図 3.6 に示す。各プロファイルの  $-75 \leq x \leq 75[\text{cm}]$  の領域をガウシアンでフィットして (図赤線)、プロファイル中心  $x_0$  を求める。 $\delta x$  と  $x_0$  との関係を図 (右下) に示す。

図 3.6 (右下) の 3 点を直線でフィットすると、傾きは  $-42.2$  となる。よって、陽子ビームの照射位置のずれは、ミューオンモニターにおいて約 40 倍に増幅されて見えることが分かる。すなわち、ミューオンモニターでプロファイル中心のずれを測定することで、陽子ビームの照射位置のずれを約 40 倍の感度で知ることができる。さらにミューオンモニターはバンチごとにプロファイルを測定するので、そのずれの情報をすぐさま陽子ビームラインにフィードバックすることができる。

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

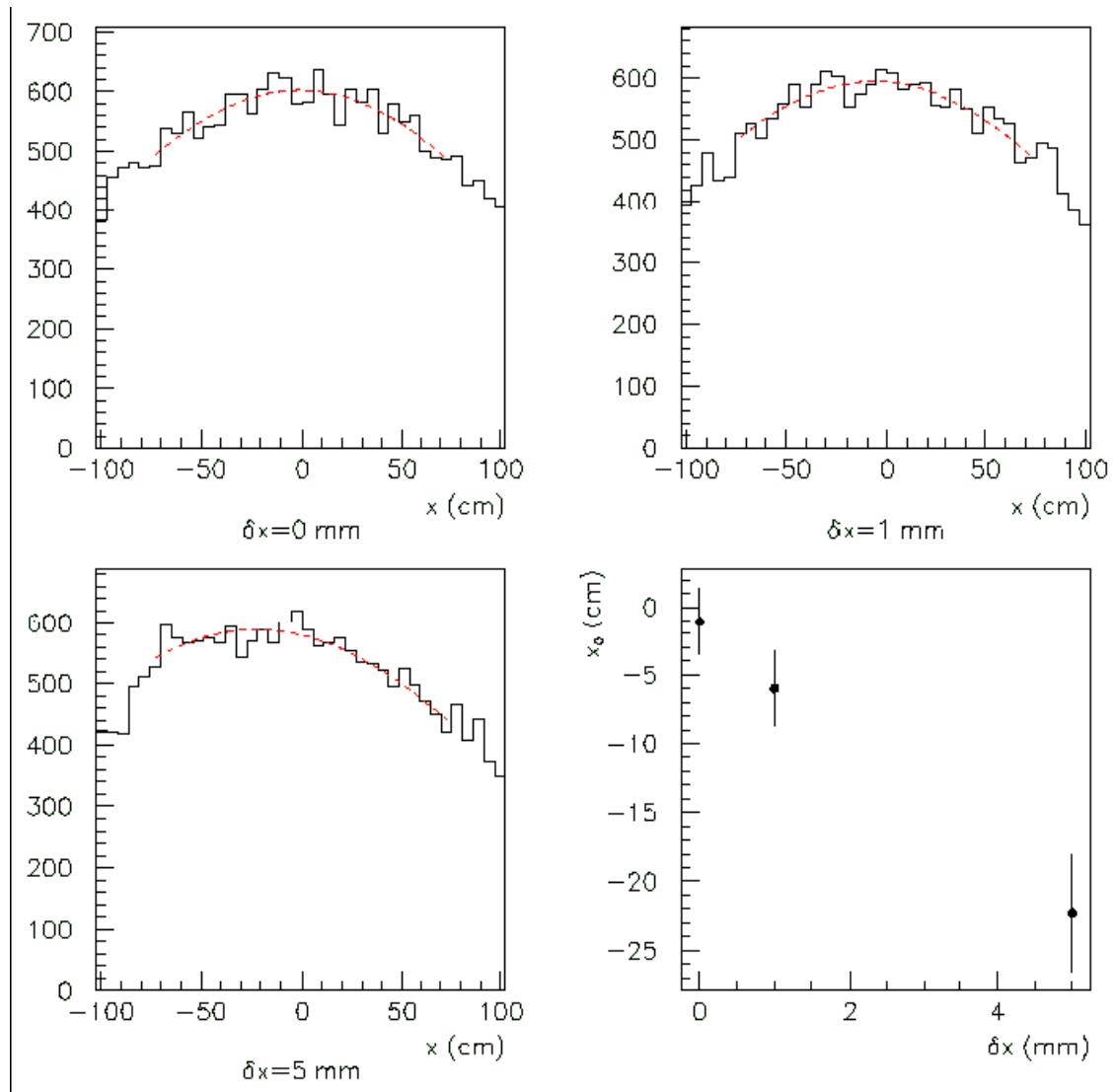


図 3.6: ミューオンモニターにおける全荷電粒子の  $x$  プロファイル。 $\delta x$  は、陽子ビームの照射位置のずれを表す。

### 3.1.3 ミューオンモニターのサイズ

前節のシミュレーション結果より、ミューオンプロファイルの中心がミューオンモニターの中心にあるとき、プロファイルを2次元ガウシアンでフィットしてプロファイル中心を求めるのに必要な領域は、 $\pm 50$  cmであることが分かった。しかし、陽子ビームの照射位置が標的中心から5 mmずれるとミューオンモニターでのプロファイル中心は約20 cmずれるが、そのときでもプロファイル中心の位置をおさえるためには、さらに20 cm以上領域を広げる必要がある。よって、 $150 \times 150$  cm<sup>2</sup>の領域をミューオンモニターの覆う領域とする。

## 3.2 ミューオンモニターに用いる検出器

シミュレーションによって、ミューオンモニターは $1.3 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/spillの大強度のビームを測定しなければならないことが分かった。さらに、第2.4節で述べたように、ミューオンモニターは、その高放射線環境下でも常に安定して動作していなければならない。そこで、2つの独立なシステムを用いて冗長性、重複性のある測定を行う。1つにはシリコンPINフォトダイオードとCVD(Chemical Vapor Deposition)ダイヤモンド検出器、もう一方には平行平板型イオンチェンバーを採用した。

以下に、選定の根拠となる各検出器の特徴について述べる。

### 3.2.1 シリコンPINフォトダイオード

シリコン半導体検出器は、高エネルギー実験において広く使用されている検出器である。また、先のK2K実験において、ミューオンモニターとして終始安定に動作していたという実績がある。しかし、T2Kミューオンモニターでは大強度のビームを測定することになるので、使用においてはシリコンの放射線損傷が問題となる。よって、ビーム強度の弱いビームコミッショニング時(通常ランの1%のビーム強度)あるいは、最初の1年(通常ランの10%のビーム強度)で使用することを考える。

### 3.2.2 CVDダイヤモンド検出器

CVDダイヤモンド検出器は、近年開発された放射線検出器である。ダイヤモンドは絶縁体であるが、動作原理は半導体検出器と同じなので、半導体検出器(あるいは固体検出器)として分類され、一般の半導体検出器と同じような応答を示す。そしてもっとも重要な特徴は、半導体検出器よりも非常に優れた耐放射線性を持つということである。その例とし

## 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

て、 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  の陽子 ( 24 GeV/c ) を照射した測定で、シリコン検出器は放射線損傷により応答しなくなったのに対し、CVDダイヤモンド検出器のシグナルには変化が見られなかったという報告がある。

### 3.2.3 平行平板型イオンチェンバー

平行平板型イオンチェンバーは、ガス容器の中で2枚の電極平板を、ある一定の間隔(ギャップ)を隔てて互いに平行に並べ、電極間ギャップに電圧をかけて信号を読み出す検出器である。これは以下に挙げるように、第2.4節で述べたミューオンモニターに対する物理的要請に合う。

- 単純な構造で、動作で壊れにくい。
- ギャップ間の電場が一樣なので、電子のドリフト速度を調整しやすい。すなわち、シグナルを増幅させずに読み出せるので、大強度のビームでも測定可能。
- ギャップを小さくすることで、大強度のビームに対しても高い収集効率および速い応答が可能。
- 使用するガスを適切に選ぶことで、容易に必要な応答を得ることができる。

イオンチェンバーに用いるガスの候補は、ヘリウムとアルゴンである。アルゴンは全比電離がヘリウムの約10倍あるので、この2種類のガスを使い分けることでより広い領域の強度のビームを測定することができる。すなわち、通常のランではヘリウムを使用し、ビームコミッシングのときなどビーム強度が通常ランの1~10%のときにはアルゴンを使用する。

## 3.3 シミュレーションによるミューオンモニターのデザイン

本節では、ミューオンモニターにおける検出器の配置を考える。そのために、放射線損傷について、ミューオンモニターに対する物理的要請についてのシミュレーションを行う。

### 3.3.1 放射線損傷

前節のシミュレーションにより、ミューオンモニターには  $1.3 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/spill という大強度のビームがくることが分かった。このような高放射線環境下においては、システムを設計する上で、用いる検出器やその部品などの放射線損傷を十分考慮しなくてはならない。



### 3.3. シミュレーションによるミュオンモニターのデザイン

また、半導体検出器の放射線損傷には電離による表面欠損と置換によるバルク欠損があるが、ここでは T2K ミュオンモニターでの動作に重大な影響を与えるバルク欠損についても述べる。

#### 点欠損

点欠損は、結晶格子の周期性からの "0次元" の乱れである。この点欠損が集結すると、熱的、電気的伝導率やキャリアの移動度などが変化し、半導体検出器の動作に大きく影響してくる。点欠損の模式図を図 3.7 に示す。点欠損があると、バンドギャップに新たなエネルギー準位が生まれるので、キャリアの捕獲や再結合が起こり、シグナルの減少につながる。

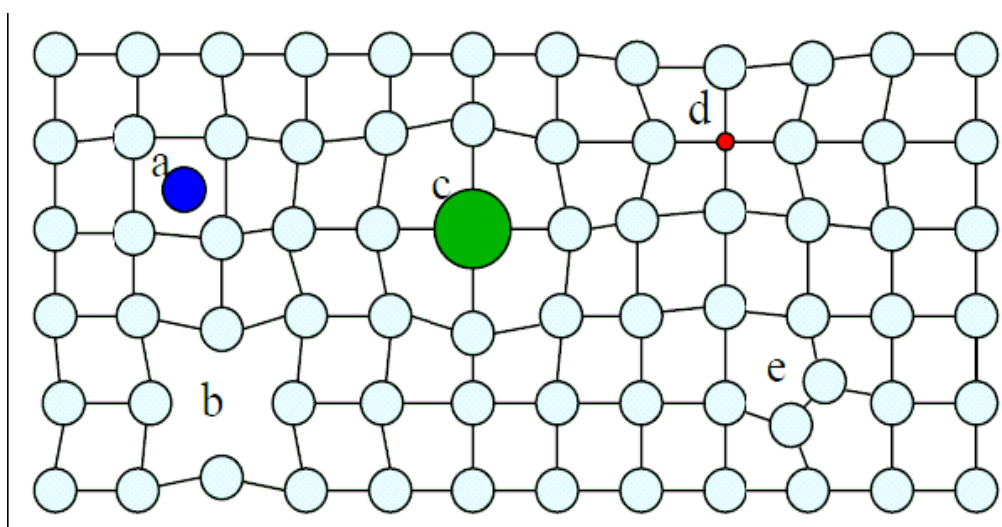


図 3.7: 点欠損の模式図。(a) 格子間侵入原子。(b) 格子欠如。(c),(d) 侵入置換。(e) 自己格子間侵入。

#### バルク欠損

物質に粒子が入射すると、結晶を構成する原子にエネルギーが与えられるが、そのエネルギーが十分大きいとき、その原子は結晶格子から弾き飛ばされて PKA ( Primary Knock-on Atom ) となる。そしてその PKA が別の原子を弾き飛ばして新たな SKA ( Secondary Knock-on Atom ) をつくることもある。よって PKA、SKA は格子欠如型、自己格子間侵入型の点欠損となる。PKA、SKA の連鎖が進むと、点欠損は集団欠損となって現れる。

こうした欠損は非電離相互作用によって生じ、バルクの中に現れる。バルク欠損は格子の配列を乱すので不可逆であり、放射線損傷として永久に残り続ける。

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

#### NIEL スケーリング

シリコンなどの固体検出器を用いる場合、放射線損傷による問題は主に、バルク欠損により引き起こされ、観測される検出器の劣化の度合いは、放射線量や粒子の種類、エネルギーに依存する。バルク損傷は PKA によって引き起こされるものだと仮定すると損傷に関係するのは、物質と粒子との一番最初の相互作用である。その最初の相互作用を表す物理量が NIEL ( Non Ionizing Energy Loss ) で、過去の測定から、NIEL によるスケーリングは多くの物質と粒子について信頼できるものと考えられている。そして関連する損傷関数  $EDK$  ( Energy spectrum averaged Displacement KERMA ( Kinetic Energy Released in Matter ) ) の値は、広いエネルギー範囲にわたって異なるエネルギーをもつ様々な粒子により引き起こされる放射線損傷の効果の違いを規格化するのに有用である。

NIEL スケーリングにより、あるスペクトル分布  $\phi(E)$  をもつ放射線量  $\Phi$  の任意のビームと同等の放射線損傷を引き起こす、1MeV 等価中性子線量  $\Phi_{eq}^{1MeV}$  を定義できる。

$$\Phi_{eq}^{1MeV} = \kappa \Phi \quad (3.2)$$

$\kappa$  はハードネスパラメータと呼ばれ、 $EDK$  を用いて次式で定義される。

$$\kappa = \frac{EDK}{EDK(1MeV)} \quad (3.3)$$

$EDK$  は、入射粒子のエネルギー  $E$  についての損傷関数  $D(E)$  のエネルギースペクトル平均である。

$$EDK = \frac{\int D(E)\phi(E)dE}{\int \phi(E)dE} \quad (3.4)$$

$$D(E) = \sum_k \sigma_k(E) \int dE_R f_k(E, E_R) P(E_R) \quad (3.5)$$

ここで、 $\sigma_k$  は反応  $k$  の断面積、 $f_k(E, E_R)$  は反応  $k$  において入射粒子がエネルギー  $E_R$  の反跳粒子をつくり出す確率、 $P(E_R)$  は分配関数 ( 置換に費やす反跳エネルギーの割合 ) である。また、 $EDK(1MeV)$  はエネルギー 1MeV の中性子についての損傷関数で、

$$EDK(1MeV) = D_n(1MeV) = 95[MeVmb] \quad (3.6)$$

である。

一方、NIEL は次式で計算される。

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{n.i.} = N \sum_{Z,A} \int_{E_R^{\min}}^{E_R^{\max}} \frac{d\sigma}{dE_R} P(E_R) dE_R \quad (3.7)$$

ここで、 $N = \frac{N_A}{A} \rho$  で、 $Z, A$  は物質の原子番号と質量数、 $N_A$  はアボガドロ定数、 $E_R^{\max}$  は運動学的エネルギー制限、 $E_R^{\min}$  は格子から原子を押し除けるのに必要な最小エネルギーに

### 3.3. シミュレーションによるミュオンモニターのデザイン

対応するカットオフエネルギーである。式 (3.7) の  $Z, A$  についての和は、式 (3.5) で全ての反応  $k$  について和をとることに対応するので、NIEL と  $D(E)$  には以下の関係式が成り立つ。

$$NIEL = \left. \frac{dE}{d(\rho x)} \right|_{n.i.} = \frac{N_A}{A} D(E) \quad (3.8)$$

したがって、 $A=28.086$  [g/mol] のシリコンについては以下の対応が見つく。

$$100[\text{MeVmb}] = 2.144[\text{keVcm}^2/\text{g}] \quad (3.9)$$

図 3.8 に、入射粒子のエネルギーに対するシリコンの損傷関数を示す。

前節のビームラインシミュレーションで得られたミュオンモニターにおける各粒子のスペクトル分布  $\phi(E)$  (図 3.5) に、図 3.8 の損傷関数  $D(E)/95\text{MeVmb}$  をかけ、式 (3.3)、式 (3.4) からハードネスパラメータを求めた。そして式 (3.2) より、ミュオンモニターにおける 1MeV 等価中性子線量を見積もった。ミュオンピットのビーム軸上にくる粒子のハードネスパラメータ  $\kappa$ 、線量  $\Phi$ 、1MeV 等価中性子線量  $\Phi_{\text{eq}}^{1\text{MeV}}$  を表 3.4 にまとめた。ミュオンモニターにくるビームの全 1MeV 等価中性子線量は  $9.7 \times 10^6$  1MeV neutrons/cm<sup>2</sup>/spill と見積もられた。

24 GeV/c の陽子を  $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  照射した結果、シリコン検出器のシグナルは見えなくなり、CVDダイヤモンド検出器のシグナルに減少は見られなかったという測定から、NIEL スケーリングを用いて、T2K ミュオンモニターにおけるシリコン PIN フォトダイオードおよび CVDダイヤモンド検出器の寿命を見積もることができる。24 GeV/c の陽子のハードネスパラメータは  $\kappa \sim 1$  であるから、 $1 \times 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup> は  $1 \times 10^{15}$  1MeV neutrons/cm<sup>2</sup>/spill に等しい。

したがって、T2K ミュオンモニターにおいては、 $1.03 \times 10^8$  spill $\approx$ 4000 日間、CVDダイヤモンド検出器はシグナルの減少なしに動作可能であると考えられる。一方、シリコン検出器は  $\sim 2 \times 10^{12}$  1MeV neutrons/cm<sup>2</sup> で型反転 (p 型が n 型に変わる現象) が起こるので、 $2.06 \times 10^5$  spill $\approx$ 8 日間で動作しなくなると予想される。(1日  $\sim$ 25000 spill)

	$e^\pm$	$\mu^\pm$	n	p	$\pi$
$\kappa$	0.07	0.08	1	1.51	0.64
$\Phi$ [cm <sup>2</sup> /spill]	$1.3 \times 10^7$	$8.6 \times 10^7$	$1.9 \times 10^6$	$2.2 \times 10^3$	$2.1 \times 10^4$
$\Phi_{\text{eq}}^{1\text{MeV}}$ [cm <sup>2</sup> /spill]	$9.3 \times 10^5$	$6.9 \times 10^6$	$1.9 \times 10^6$	$3.3 \times 10^3$	$1.4 \times 10^4$

表 3.4: ミュオンピットのビーム軸上にくる粒子のハードネスパラメータ  $\kappa$ 、線量  $\Phi$ 、1MeV 等価中性子線量  $\Phi_{\text{eq}}^{1\text{MeV}}$ 。Total :  $9.7 \times 10^6$  1MeV neutrons/cm<sup>2</sup>/spill。

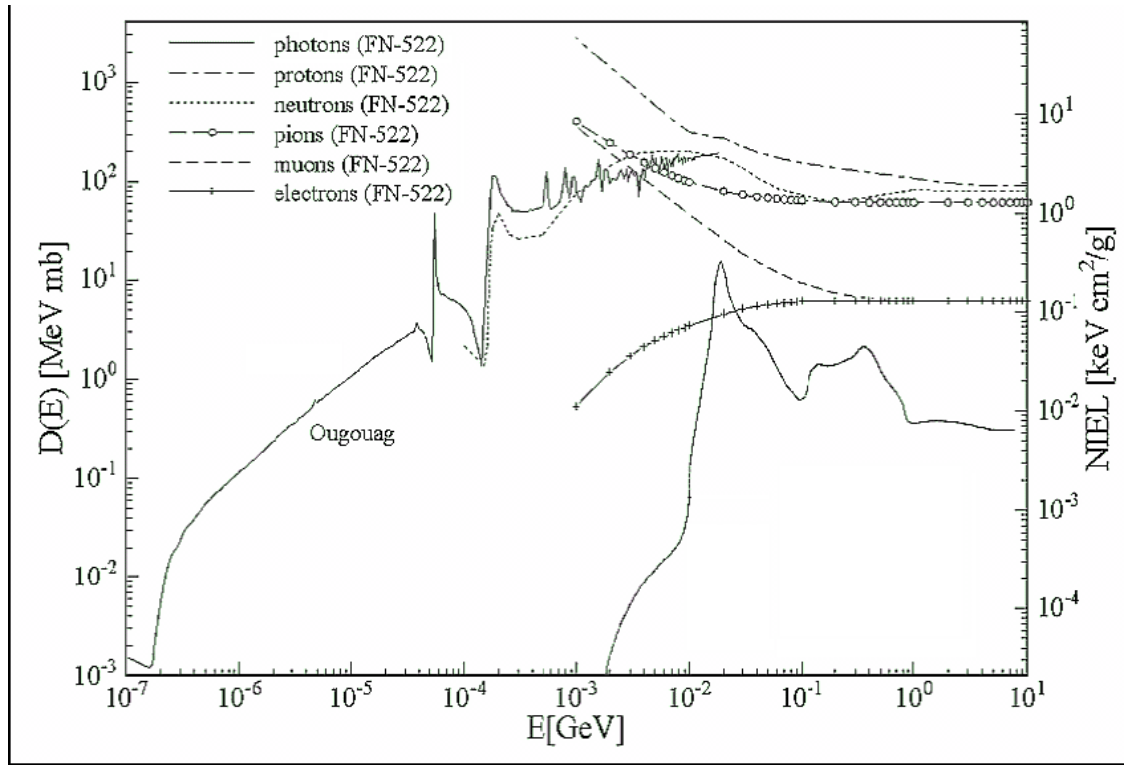


図 3.8: シリコンの損傷関数。

#### 吸収線量の見積り

ビームラインシミュレーションにおいて、ミューオンピットのビーム軸上に様々な物質を置き、その吸収線量を求める。その結果を表 3.5 に示す。なお、このときのモンテカルロの統計は  $1.4 \times 10^6$  POT で、表 3.5 に示した値はモンテカルロで得られた量を 1 年 (100 日) 当たりの量 ( $8.1 \times 10^{20}$  POT) にスケールしたものである。

シミュレーションにより、吸収線量はあまり物質の種類によらず  $\sim 60$  kGy/year であることが分かった。この値は、ミューオンモニターに用いる材料を選定する際に有用である。特に、ケーブルやコネクタの絶縁材料は、この放射線量でも使用可能なものを選ぶ必要がある。また、残留放射能をできるだけ抑えるために、放射化しにくい材料を使用することも重要である。

#### 3.3.2 検出器の配置と系統誤差の評価

ミューオンモニターの検出器の配置として、図 3.9 (上) のようなものを考える。ここでは、CVD ダイヤモンド検出器についてのみ述べる。

CVD はダイヤモンド検出器は高価であるため、使用するチャンネル数はできるだけ少な

### 3.3. シミュレーションによるミュオンモニターのデザイン

	吸収線量 [kGy/year]
シリコン	56.2
ダイヤモンド	58.3
ヘリウムガス	75.4
アルゴンガス	61.1
アルミニウム	62.5
アルミナセラミック	63.0
エポキシ樹脂	72.1
SUS304	96.0
空気	44.5

表 3.5: ミュオンピットのビーム軸上に置かれた物質の、1年(100日)のラン( $8.1 \times 10^{20}$  POT)当たりの吸収線量。

くしたい。そこで、図の(A)(B)(C)のような3つの配置を考案した。(A)は $5 \times 5$ のマスに交互に並べるもので、チャンネル数は13である。(B)は $5 \times 5$ のマスに放射状に並べるもので、チャンネル数は17である。そして(C)は $5 \times 5$ のマスをすべて埋めるもので、チャンネル数は25である。

検出器の配置において、ミュオンモニターに用いる検出器のチャンネルごとの測定誤差が、再構成するプロファイル中心の決定精度にどのような影響を及ぼすのかを、以下のようなトイモンテカルロシミュレーションで見積もる。

1. 検出器の測定誤差を  $s$  とする。
2. 検出器の配置を決める。
3. ビームラインシミュレーションで得た荷電粒子のプロファイルを、真のプロファイル  $F_{\text{true}}(x, y)$  とする。
4. 検出器  $i$  の位置  $(x_i, y_i)$  での応答を  $F_i = (1 + \delta_i)F_{\text{true}}(x_i, y_i)$  とする。なお、 $\delta_i$  は標準偏差  $s$  の正規分布に従うものとし、試行の度ランダムに与える。
5. 各検出器の  $F_i$  からプロファイルを再構成し、それを  $F_{\text{rec}}(x, y)$  とする。
6.  $F_{\text{true}}$  からの  $F_{\text{rec}}$  のプロファイル中心のずれ  $dr$  を求める。
7. 4~6 の試行を 10000 回繰り返す。
8. 得られた  $dr$  の分布で、 $\sigma(dr)$  をプロファイル再構成における系統誤差とする。

### 第3章 T2K ミューオンモニターへの物理的要請と設計

シミュレーションによって得られた検出器の測定誤差  $s$  とプロフィール再構成の系統誤差  $\sigma(dr)$  の関係を図 3.9 (下) に示す。

ミューオンモニターに用いる検出器に対する要請は、 $\sigma(dr)=3$  cm である。第 5 章で述べるビームテストによる検出器の性能評価により、その要請を満たすよう図 3.9 (下) のシミュレーション結果に基づいて、検出器の配置とチャンネル数を決定する。

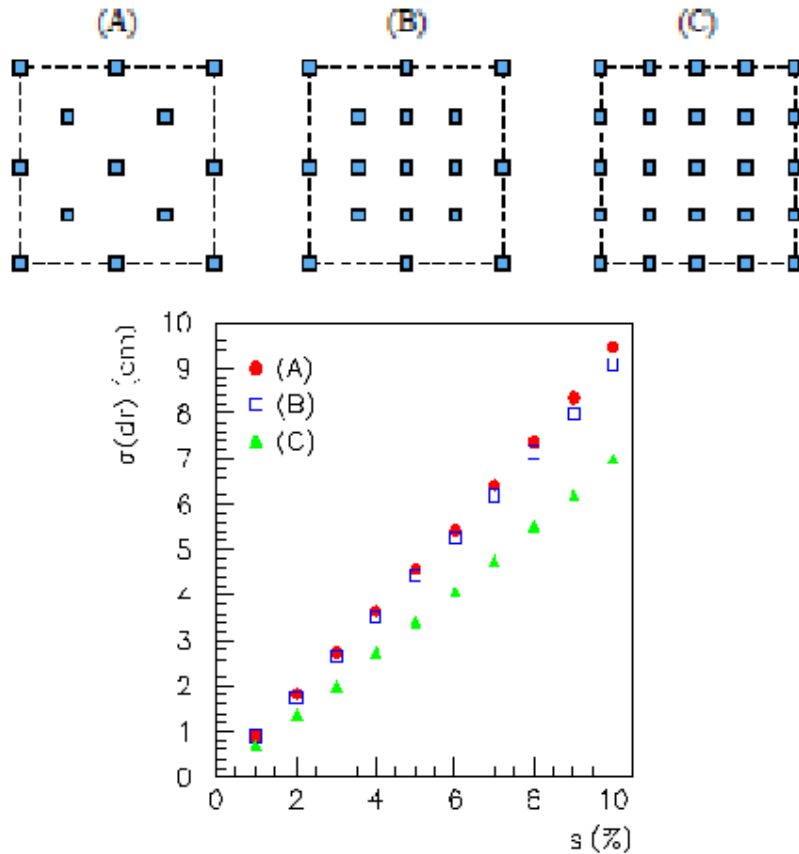


図 3.9: (上) 検出器の配置。後ろの破線は、ミューオンモニターが覆う  $150 \times 150$  cm<sup>2</sup> の領域を示す。(下) 検出器の測定誤差  $s$  とプロフィール再構成の系統誤差  $\sigma(dr)$  の関係。

## 第4章 CVDダイヤモンド検出器

本章では、T2K ミューオンモニターに用いる CVDダイヤモンド検出器についての仕様、性質、生成方法、動作原理について述べる。

### 4.1 CVDダイヤモンド検出器の仕様

本研究では、CERN RD42 で開発されたサンプルについてテストを行った。そのサンプルの仕様を表 4.1 に示す。図 4.1 はテストサンプルの写真である。



図 4.1: 本研究で用いる CVDダイヤモンド検出器の写真。

有感面積	$9.5 \times 9.5 \text{ mm}^2$
ウェハの厚さ	$500 \text{ }\mu\text{m}$
最大許容印加電圧	500 V

表 4.1: 本研究で用いる CVDダイヤモンド検出器の仕様。

## 第4章 CVDダイヤモンド検出器

### 4.2 CVDダイヤモンドの性質

#### 4.2.1 ダイヤモンドの物理的性質

表 4.2 に、ダイヤモンドとシリコンの物理的性質を示す。

	ダイヤモンド	シリコン
陽子数 $Z$	6	14
密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$	3.515	2.329
結合エネルギー $[\text{eV}/\text{atom}]$	7.37	4.63
バンドギャップ $[\text{eV}]$	5.48	1.124
電子移動度 $[\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec.}]$	1800	1350
正孔移動度 $[\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec.}]$	1200	440
電子-正孔対生成エネルギー $[\text{eV}]$	13	3.6
格子定数	3.57	5.43
比誘電率	5.7	11.9
熱膨張係数 $[\text{K}^{-1}]$	$0.8 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$
熱伝導係数 $[\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}]$	20	1.5
放射長 $[\text{cm}]$	12.03	9.4
絶縁破壊電界 $[\text{V}/\text{cm}]$	$10^7$	$3 \times 10^5$
抵抗率 $[\Omega\cdot\text{cm}]$	$10^{13}$	$20 \times 10^3$
融点 $[\text{°C}]$	4000	1420
平均電子-正孔対生成数 $[\text{pair}/100\mu\text{m}]$	3600	9000

表 4.2: ダイヤモンドとシリコンの代表的な物理的性質 (標準状態における値)

#### 4.2.2 人工ダイヤモンドの生成方法

次に、人工ダイヤモンドの生成方法について、いくつか簡単に紹介する。

- 高压高温合成 (HP/HT) 法

グラファイト、カーボンを原料として、5 万気圧、1300°C 以上の環境でダイヤモンドを合成する方法。結晶構造は、大型単結晶となる。

- 衝撃法

爆薬による衝撃でダイヤモンドを合成する方法。微細な研磨粒ができる。

- 気相合成法 (蒸着成長製法)



## 4.2. CVDダイヤモンドの性質

炭素を含む原料ガスをプラズマなどの高温状態にして、1000°C以下の基板に析出させる方法。薄膜コーティング、板状の多結晶体ができる。

これらの中で、本研究で用いたCVDダイヤモンドに関する生成方法は蒸着成長製法であり、これにはPVD法とCVD法がある。

- PVD (Physical Vapor Deposition) 成長製法

原料を蒸発、昇華などの方法で気体にし、これから結晶を成長させる。

- CVD (Chemical Vapor Deposition) 成長製法

成長させたい物質を含む化学物気体を、熱、プラズマなどにより分解し、結晶を成長させる。

CVD成長製法により、高純度で面積の人工ダイヤモンドを安価に製造することが可能となり、ダイヤモンドを検出器として利用することが実用的になった。さらにダイヤモンドは耐放射線性に優れていることから、高エネルギー物理実験においては、シリコンなど従来の半導体検出器に代わり得るものとして期待されている。

以下、CVDダイヤモンドについて詳しく述べていく。

### CVD成長製法

一般に人工ダイヤモンドは、高温 (>1000°C) 高圧 (>10<sup>5</sup> atm) の液体から作られるが、CVDダイヤモンドは低温 (<1000°C) 低圧 (≈0.1 atm) のガスを用いた非平衡過程から作られる。

CVDダイヤモンドは炭素、水素、酸素の混合ガスを入れた図4.2のような炉の中で、次のような過程を経て成長する。

1. CH<sub>4</sub>のようなガスから炭素が分離して、グラファイトやダイヤモンドの形で600°Cから1000°Cに熱せられた基板の上に堆積する。
2. ダイヤモンドよりもグラファイトのほうが速く堆積するので、水素原子や酸素原子、OH遊離基によってグラファイトを剥がしていく。
3. 一方、ダイヤモンドはそれらには不感であるので、徐々に堆積していき大きな結晶となる。

CVD成長の過程は、核形成と結晶成長の2つに分けられる。核形成は主にシリコンなどの基板上で起こり、そこからダイヤモンドの結晶が成長していく。よって、CVDダイヤモ

## 第4章 CVDダイヤモンド検出器

ンドは天然ダイヤモンドと違い、必然的に多結晶構造となる。また、CVDダイヤモンドは、図4.3のように基板側の核形成面と逆側の成長面とで結晶の大きさが異なるのが特徴である。

このように、CVDダイヤモンドは、その結晶の1つひとつ(結晶粒)が形、大きさとも異なるため、キャリアのドリフト速度は場所によって変化し得る。また、結晶粒間が欠損となりエネルギーギャップに非常に多くの不純中心をつくるので、一般にCVDダイヤモンド検出器の電荷収集間隔はウェハの厚さよりも小さくなる。

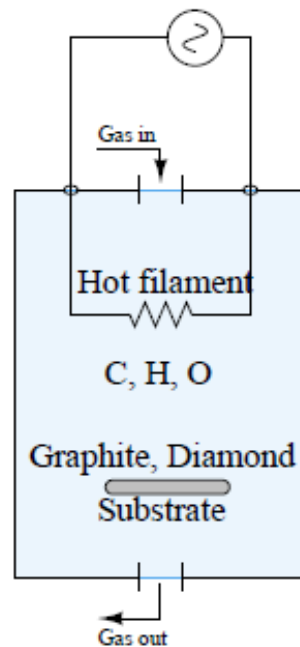


図 4.2: 蒸着炉の概観。

### エネルギーバンド構造

図4.4に、ダイヤモンドのエネルギーバンド構造を示す。ダイヤモンドは、バンドギャップ  $E_g=5.48[\text{eV}]$  の絶縁体である。

## 4.3 CVDダイヤモンド検出器の動作原理

ダイヤモンド検出器の動作原理を図式化したものを図4.5に示す。ダイヤモンドは  $E_g=5.48[\text{eV}]$  の絶縁体であるが、放射線検出器として用いる場合の動作原理は半導体検出器と同じである。したがって、ダイヤモンド検出器は半導体検出器として分類される。

### 電荷収集間隔

4.3. CVDダイヤモンド検出器の動作原理

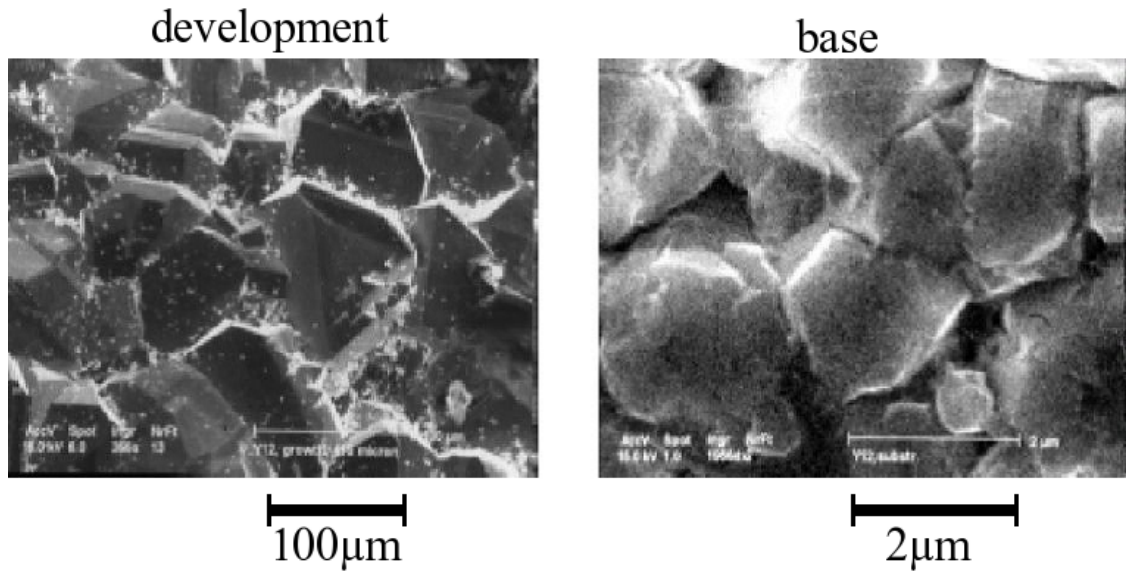


図 4.3: CVDダイヤモンドサンプルの電子顕微鏡写真。(左)成長面。(右)基板面(核形成面)

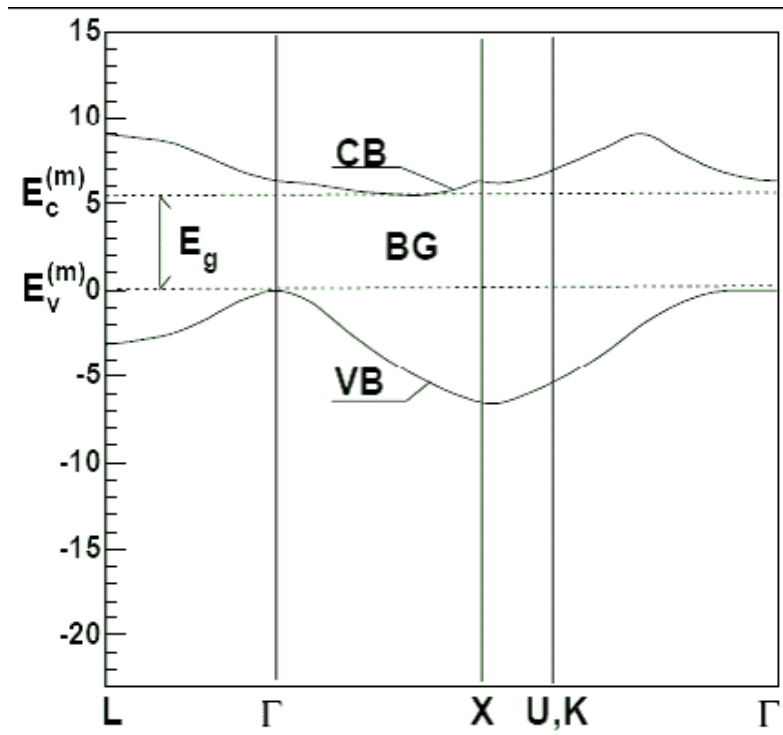


図 4.4: ダイヤモンドのエネルギーバンド構造。下側の曲線は価電子帯 (VB) の最高エネルギー、上側の曲線が伝導帯 (CB) の最低エネルギーを示す。その間がバンドギャップ (BG) である。 $\Gamma$  は  $\vec{k} = \vec{0}$  に対応する。

#### 第4章 CVDダイヤモンド検出器

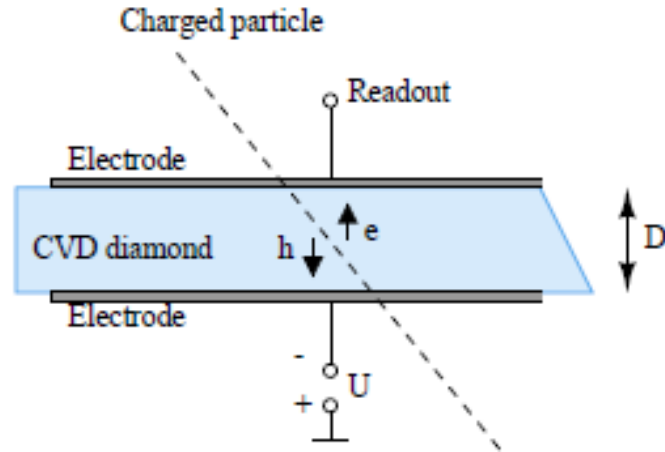


図 4.5: ダイヤモンド検出器の動作原理。

CVDダイヤモンド検出器のウェハーサンプルの性能を評価する指標として、電荷収集間隔  $\bar{d}$  が用いられる。

ダイヤモンドにバイアス電圧  $V(E = -dV/dx)$  をかけたとき、電子、ホールがダイヤモンド中を移動できる距離をそれぞれ  $d_e$ 、 $d_h$  とすると、

$$\begin{cases} d_e = \mu_e \tau_e E \\ d_h = \mu_h \tau_h E \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで、 $\tau_e, \tau_h$  はそれぞれダイヤモンド中での電子、ホールの寿命を表す。また、 $E$  がある大きさを超えると、 $\mu_e E$ 、 $\mu_h E$  は飽和速度  $\mu_e E = v_e$ 、 $\mu_h E = v_h$  で一定になる。電荷収集間隔  $\bar{d}[\mu\text{m}]$  は、

$$d \equiv d_e + d_h \quad (4.2)$$

$$= (\mu_e \tau_e + \mu_h \tau_h) E \quad (4.3)$$

となる。ダイヤモンド中で生成された電子とホールは、バイアス電圧によって電極に移動するとき、不純物によるエネルギー準位などに一部が捕獲される。厚さ  $D$  のダイヤモンドにおいて、 $\bar{Q}_{\text{mip-generated}}$  を生成された電荷量の平均値、 $\bar{Q}_{\text{collected}}$  を電極まで到達した電荷量の平均値とすると、

$$d \approx \frac{\bar{Q}_{\text{collected}}}{\bar{Q}_{\text{mip-generated}}/D} \quad (4.4)$$

$$= \frac{\bar{Q}_{\text{collected}}}{36[e^-/\mu\text{m}]} \quad (4.5)$$

となる。科学の進歩のより、CVDダイヤモンドについては、電荷収集間隔が約  $250 \mu\text{m}$  のウェハーまで製造することが可能となっている。

### Pumping 効果

CVD ダイヤモンドは多結晶構造のため、主に結晶粒の境界が不純中心となりシグナルの減少を招く。この現象は pumping 効果として知られている。Pumping 効果は、それらエネルギー準位がキャリアによって埋め尽くされる ( pumped 状態 ) まで続く。ここである特定の波長の光を照射するか熱すると元の状態 ( depumped 状態 ) に戻る ( depumping ) が、そうでなければ pumped 状態は長く ( 数ヶ月 ) 続くことが知られている。

図 4.6 に pumping、depumping 効果の概念図を示す。CVD ダイヤモンドの不純中心は、主に 2 つのエネルギーバンドからなるとされている。1 つは  $1.7 < E < 2.7$  にある A バンド、もう 1 つは  $1.2 < E < 1.7$  にある B バンドで、双方ともエネルギーギャップの中心より下のエネルギーに位置する。Pumped 状態では両バンドとも中性で、一方 depumped 状態では、A バンドは正に帯電しており、B バンドは負に帯電している。

Depumped 状態において、エネルギー  $E > 5.5$  eV の光子により価電子帯から電離された電子は A バンドに捕獲され正電荷を中性化する ( 図 4.6(a) )。一方、価電子帯のホールは B バンドに捕獲され負電荷を中性化する ( 同図 (b) )。また、 $E > 3.7$  eV の光子により B バンドの電子は伝導帯に励起され、A バンドの正電荷を中性化し得る ( 同図 (c) )。A バンドの正電荷も同様に B バンドの負電荷を中性化する ( 同図 (d) )。

Pumped 状態においては、 $E > 2.7$  eV の光子は A バンドから電子を電離して A バンドを正に帯電させ、さらに伝導帯に励起された電子は B バンドに捕獲され B バンドを負に帯電させる ( 同図 (e) )。また、同様に  $E > 1.7$  eV の光子により B バンドは負電荷に、A バンドは正電荷に帯電し得る ( 同図 (f) )。

すなわち、CVD ダイヤモンドは入射光子のエネルギーによって pumping されるか depumping されるかが決まる。 $E = 1.2 \sim 1.7$  eV、 $2.7 \sim 3.7$  eV の光子は depumping に寄与し、 $E = 1.7 \sim 2.7$  eV および  $E > 3.7$  eV の光子は pumping に寄与する。

Pumping 効果を定量的に評価するため、簡単なモデルを考える。単一の深い不純中心 ( エネルギーギャップの中心付近にある不純中心 ) を仮定する。そして、サンプルへの照射は一樣であるとし、キャリア捕獲の確率は捕獲していない不純中心濃度と放射線量に比例するとしたとき、電荷収集間隔  $\bar{d}$  は放射線量  $\Phi$  の関数として次式で表される。

$$\bar{d}(\Phi) = \frac{\bar{d}(\infty)}{1 + \alpha \exp(-\Phi/\tau)} \quad (4.6)$$

ここで、 $\alpha$  は捕獲可能な不純中心と捕獲できない不純中心の比で、 $\tau$  は時定数である。これより、放射線量が小さい場合には pumping 効果はより顕著に現れることが分かる。37 MBq の  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  線源を用いた測定では、 $\tau=64$  min という結果が報告されている。また、電荷収集間隔の収束値  $\bar{d}(\infty)$  は印加バイアスに依存することが知られている。

第4章 CVDダイヤモンド検出器

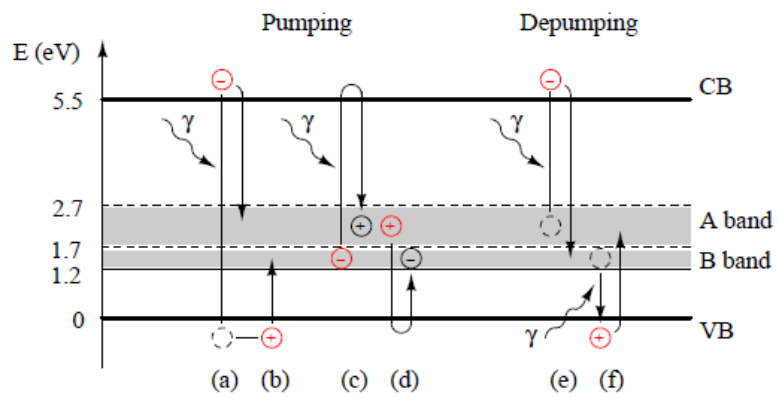


図 4.6: Pumping、depumping 効果。

## 第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

本章では、T2K ミューオンモニターで用いる CVD ダイヤモンド検出器について、第 3.1.1 小節で見積もった  $1.3 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/spill のビームに対する応答を評価するために行ったビームテストの概要と評価結果を述べる。

CVD ダイヤモンド検出器に対するビームテストは、1 週間ずつのビームタイムで、2005 年 10 月、2006 年 7 月、そして 2007 年 6 月に、京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センターにある 100 MeV 電子線形加速器 (LINAC) を用いて行った。図 5.1 に LINAC の概観を示す。図上部の電子蓄積リングは用いず、LINAC からの電子ビームを直接照射した。以下、2005 年 10 月、2006 年 7 月のビームテストをそれぞれ、ビームテスト 1、ビームテスト 2 と呼ぶ。

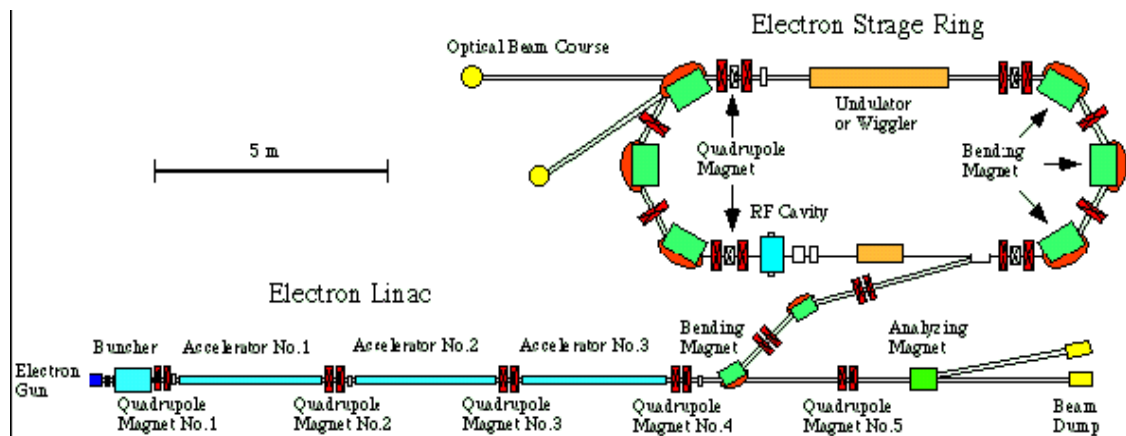


図 5.1: 100 MeV 電子線形加速器の概観。電子ビームを発生させる熱電子銃、ビームを進行方向に圧縮するバンチャー、高周波電界によって 100 MeV まで電子を加速する 3 本の加速管から構成される。

### 5.1 ビームテスト 1、2

まずは、ビームテスト 1 と 2 について説明する。

## 第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

CVD ダイヤモンド 検出器について、まずビームテスト 1 で大強度のビームに対してどのような応答を示すか確認し、次にビームテスト 2 で動作特性について研究した。

測定項目を以下に挙げる。

- シグナルの波形
- 印加電圧依存性 ( バイアススキャン )
- 応答の個体差
- リニアリティ
- Warm-up 時間
- 時間安定性

### 5.1.1 ビームテストのビームパラメータ

ビームテストのビームパラメータについて述べる。

ここで、T2K デザイン値 ( MR : 40 GeV, 0.60 MW ) のビーム強度を  $J_{T2K}^{max}$  と定義する。 $J_{T2K}^{max}$  のときのミュオンモニターにおけるビーム強度は、第 3.1.1 小節のシミュレーションから、最大で  $\sim 1.3 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup>/spill と見積もられた。ミュオンモニターではバンチごとの測定を行うので、1 スピルおよび単位面積当たりのビーム強度を、1 バンチおよび検出器の有感領域当たりの入射ビーム強度に換算すると、CVD ダイヤモンド 検出器では  $\sim 1.5 \times 10^7$  particle/(0.95 cm)<sup>2</sup>/bunch となる。

第 3.1.1 小節のシミュレーションによると、ミュオンモニターにくる荷電粒子の 84% はミュオンである。ミュオンの平均エネルギーは 2.9 GeV であり、ダイヤモンドについて 2.9 GeV ミュオンのエネルギー損失と 100 MeV 電子のエネルギー損失は、ほぼ MIP のエネルギー損失に等しく  $\sim 2$  MeV cm<sup>2</sup>/g である。さらに電離エネルギーは入射粒子の種類とエネルギーにほとんど依存しない。したがって、T2K ビームにおける 1 粒子当たりの電荷生成数と、LINAC ビームによる 1 電子当たりの電荷生成数はほぼ同じと考えられる。ビームテストでは、CVD ダイヤモンド 検出器に対してビーム中心 0.95 × 0.95 cm<sup>2</sup> の部分を有感領域に入射するので、 $J_{T2K}^{max}$  強度のビームは  $1.5 \times 10^7$  e/(0.95 cm)<sup>2</sup>/pulse に対応する。よって検出器の測定の際には、この入射ビーム強度を狙ってビームを調節した。なお、ビーム強度は熱電子銃のフィラメントに印加する電圧を変えることで調整できる。

表 5.1 に各ビームテストで用いたビームパラメータをまとめた。



	ビームテスト 1	ビームテスト 2
電子エネルギー [MeV]	100	100
ビーム強度 [e/pulse]	(Si, Dia) $(1.6\sim 7.6)\times 10^8$	$3\times 10^5\sim 2\times 10^8$
ビーム半径 $\sigma$ [cm]	$\sim 1.0$	$\sim 0.79$
有感領域への入射ビームの割合 [%]	(Dia) 8.54	17.7
パルス幅 [nsec]	$\sim 40$	$\sim 50$
パルス振動数 [Hz]	$\sim 15$	$\sim 15$

表 5.1: 測定で用いた LINAC のビームパラメータ。

### 5.1.2 ビームテスト 1 (2005 年 10 月) のセットアップ

セットアップの概観を図 5.2 に示す。図(上)のように、ビームパイプの先(図 5.1 の分析電磁石のすぐ後ろ)から約 1.5 m 下流の位置に、3 つの CVD ダイヤモンド検出器サンプル (Dia1, 2, 3) および、レファレンスとしてのシリコン PIN フォトダイオードサンプル (Si1) をビーム軸に一直線に並べこれらを同時に測定した。ここで、物質によるビームの散乱はなく、各検出器に入射する単位面積当たりの粒子数は同じと仮定する。この検出器一式は 2 軸型移動ステージで固定した。ビームプロファイルを測定するときはその検出器一式を移動ステージから外し、代わりにプロファイルモニターを取り付けて測定した(同図(下))。なお、プロファイルモニターは、Si3 がビーム中心にくるように配置した。

図 5.3 に測定回路図を示す。測定機器は実験室内に置き、検出器のシグナルを直ちに読み出した。各シグナルはアッテネータで -38~-52 dB に減衰し、測定レンジ 1 nC のチャージ積分型 ADC で測定した。DAQ 制御、バイアス設定、ゲートの調整、オシロスコープの波形取り込みはコントロール室で行った。トリガーには加速器電子銃からの TTL 信号を用いた。

### 5.1.3 ビームテスト 2 (2006 年 7 月) のセットアップ

セットアップの概観を図 5.4 に示す。ビームパイプの先端直後に CT1、そこから約 1m 下流に CT2 を配置し、ビーム強度を測定した。4 つの CVD ダイヤモンド検出器サンプル (Dia1, 2, 3, 4) および、2 つのシリコン PIN フォトダイオードサンプル (Si2, 3) をビーム軸に一直線に並べ、これらを CT2 の後ろに配置し同時に測定した。CVD ダイヤモンド検出器の両側をシリコン PIN フォトダイオードで挟むことで、検出器によるビーム散乱の効果を検証する。最下流には 9 つのシリコン PIN フォトダイオードで構成するプロファイルモニターを置いてビームプロファイルを測定した。なお、プロファイルモニターは、中心のチャンネルがビーム軸上にくるように配置した。

第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

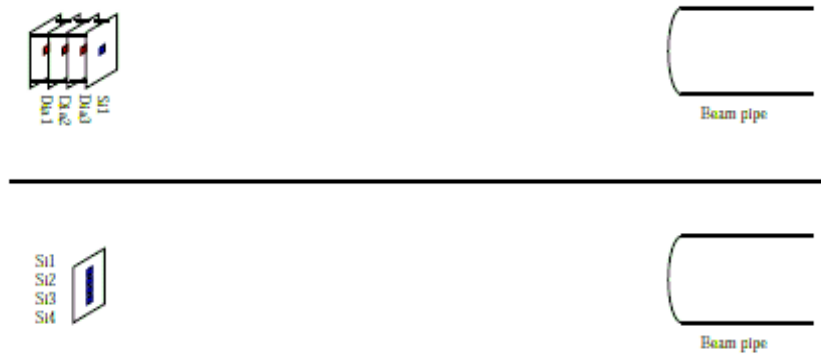


図 5.2: ビームテスト 1、CVD ダイヤモンド 検出器測定のためのセットアップ図。シリコン PIN フォトダイオードはプリント基板、CVD ダイヤモンド 検出器は薄いアクリル板に固定してある。

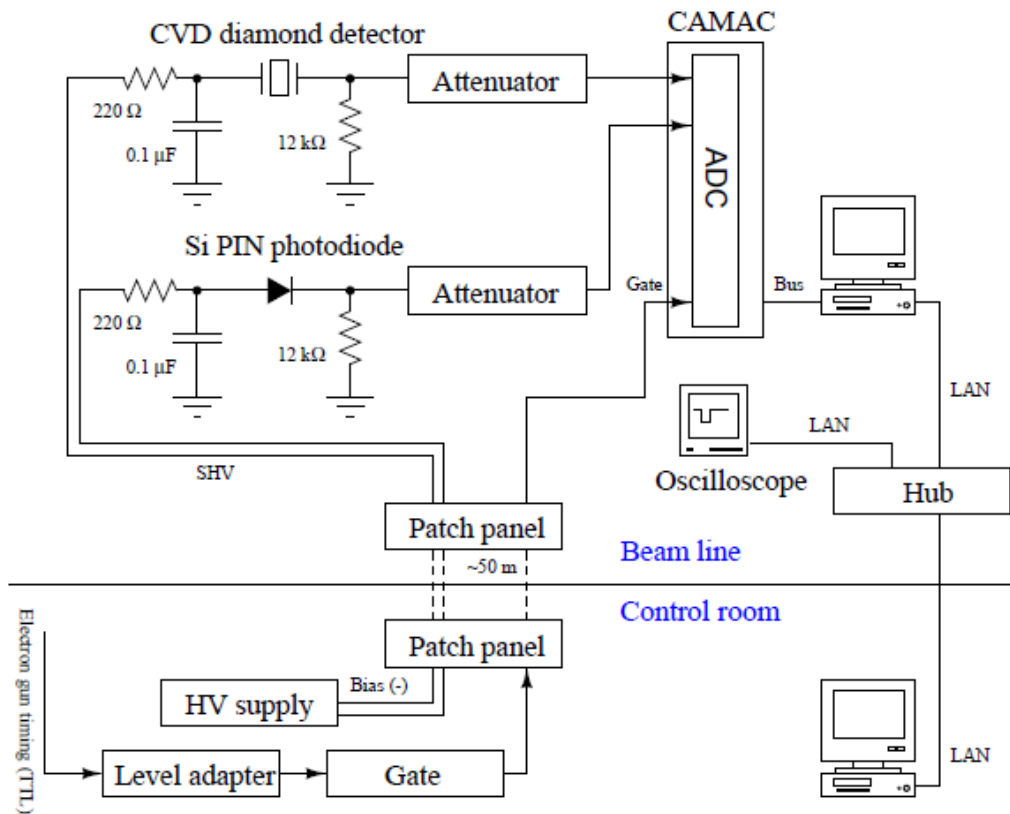


図 5.3: ビームテスト 1、CVD ダイヤモンド 検出器測定の回路図。上側が LINAC のあるビームライン室で、下側が LINAC を制御するコントロール室。

5.1. ビームテスト 1、2

図 5.5 に測定の回路図を示す。基本的にビームテスト 1 と同じである。CVD ダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードのシグナルはアッテネータで -10~-54 dB に減衰し、測定レンジ 1 nC のチャージ積分型 ADC で測定した。また、CT1、2 のシグナルは PMT アンプで 10 倍に増幅し、同じく ADC で測定した。



図 5.4: ビームテスト 2、CVD ダイヤモンド検出器測定のセットアップ図。

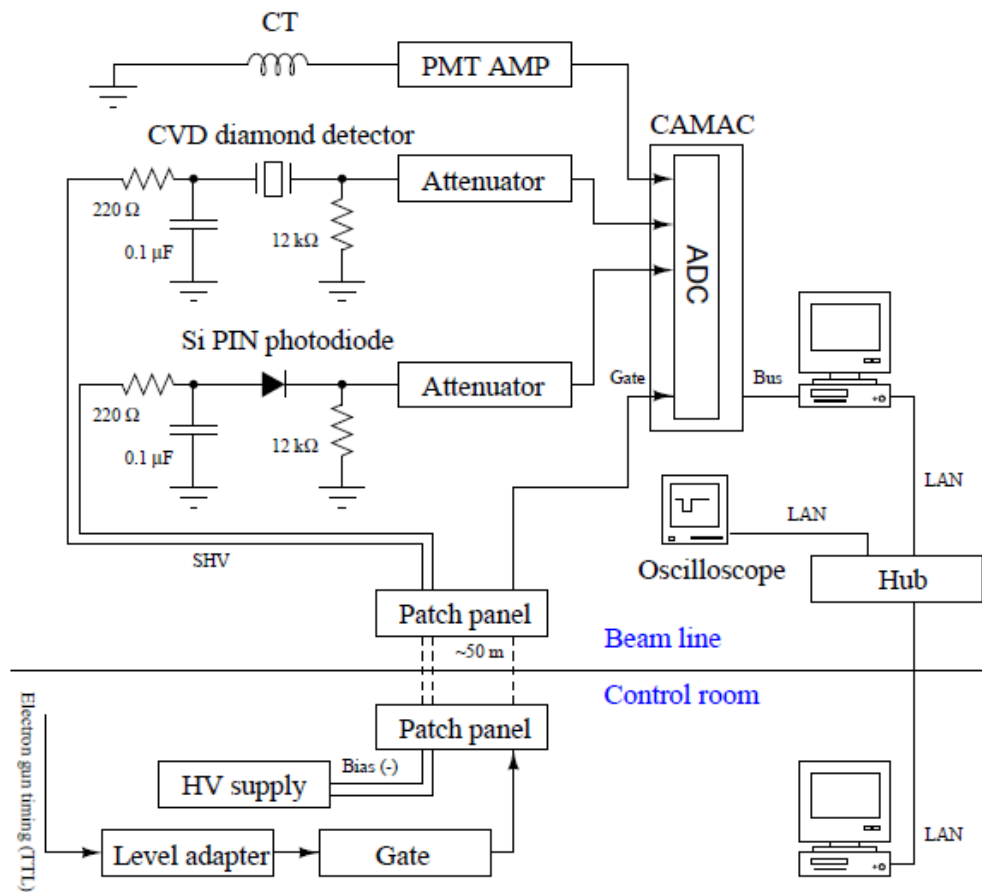


図 5.5: ビームテスト 2、CVD ダイヤモンド検出器測定の回路図。

## 第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

### 5.1.4 CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

$j_{T2K}^{max}$  強度のビーム ( ミューオンモニターにおいて、 $\sim 1.6 \times 10^7$  particles/cm<sup>2</sup>/bunch ) に対する CVD ダイヤモンド 検出器の性能を評価する。4 つのサンプル ( Dia1, 2, 3, 4 ) について以下の項目を測定した。

- シグナルの波形  
オシロスコープでシグナルの波形を測定し、応答が十分速く、バンチごとの測定が可能かどうか評価する。
- 印加電圧依存性 ( バイアススキャン )  
印加電圧 ( バイアス ) に対する応答を測定し、動作電圧を決定する。
- 応答の個体差  
一般に CVD ダイヤモンド 検出器は、そのウェハーの製造工程および結晶構造のため、応答に個体差が現れる。バイアススキャンの結果から 4 つのサンプルの個体差を評価する。
- リニアリティー  
T2K ミューオンモニターにくる大強度ビームに対する応答のリニアリティーを評価する。
- Warm-up 時間  
Pumping 効果を検証し、Warm-up に必要な時間を測定する。
- 時間安定性  
1 時間の連続動作で、応答の安定性を評価する。

#### シグナルの波形

ビームテスト 1 において、オシロスコープで測定した CVD ダイヤモンド 検出器の波形を図 5.6 に示す。図はバイアスを変えていったときの応答の変化を測定したものである。入射ビーム強度は  $\sim 5.0 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  313% ) である。バイアスを上げるにつれ、電荷収集間隔が広がり、徐々にパルスが高くなっていく様子が分かる。

CVD ダイヤモンド 検出器のパルス幅は約 50 nsec で、T2K ビームのバンチ間隔 (  $\sim 700$  nsec ) より十分速いので、バンチごとの測定が可能である。

ここで、ダイヤモンド中のキャリアのドリフト速度について考察する。今、厚さ 500  $\mu$ m のウェハーにバイアス 500 V を印加している。このときすでに飽和電場に達しているので、

## 5.1. ビームテスト 1、2

キャリアは飽和速度で移動する。ダイヤモンド中の電子の飽和速度は  $2 \times 10^7$  cm/sec、ホールの飽和速度は  $10^7$  cm/sec である。したがって、キャリアの平均収集時間は 1.7 nsec となる。よって、CVD ダイヤモンド 検出器のシグナルの波形は、ほぼ入射ビームの形を示すと予測される。本測定におけるビームのパルス幅は約 40 nsec であり、これは測定の結果とよく一致している。

### バイアススキャン

ここでは、ビームテスト 2 の測定結果について述べる。バイアスを 0 V から 600 V まで 8 点スキャンし、各バイアスでの CVD ダイヤモンド 検出器の応答を測定した。検出器の応答が安定するまでの時間を空けるため、測定はバイアスを変更してから 1 分間待って行った。ビームテスト 1 での warm-up 時間の測定 (第 5.1.4 小節) から、バイアス印加 1 分後以降のシグナルの変動は 1% 以内であった。測定の結果を図 5.7 (緑三角点) に示す。縦軸に Si1 との収集電荷の比をとった。このとき、入射ビーム強度は  $\sim 7 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $J_{T2K}^{max}$  44%) である。また、入射ビーム強度  $\sim 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $J_{T2K}^{max}$  500%) においても同様の測定を行い、同じ図上にプロットした (青四角点)。

第 5.1.4 小節で議論したとおり、バイアス 500 V はすでに飽和電圧を越えており、これ以上バイアスを上げてシグナルの増加は見込めない。本測定においても、バイアス 500 V を超えてもシグナルはまだ徐々に増加しているものの、600 V における応答のバイアス依存性は 0.1% /V 以下で十分小さい。次節で詳しく述べるが、低バイアスでの応答は入射ビーム強度が高くなると飽和してくるので、できるだけ高いバイアスで動作することが必要である。よって、動作電圧はもっとも電荷収集効率の良い最大印加許容電圧の 500 V に設定した。

バイアス 500 V における Dia1、2、3、4 の収集電荷は、入射ビーム強度  $\sim 7 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse においてそれぞれ、シリコン PIN フォトダイオードの収集電荷 (32.9 nC) の 25.9%、31.7%、29.2%、30.1% であった。式 (4.5) より、これらサンプルの電荷収集間隔はバイアス 500 V においてそれぞれ、231  $\mu$ m、287  $\mu$ m、261  $\mu$ m、269  $\mu$ m である。入射ビーム強度  $\sim 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse においては、収集電荷比は 21.8%、29.5%、23.4%、24.2%、電荷収集間隔は 138  $\mu$ m、186  $\mu$ m、148  $\mu$ m、153  $\mu$ m であった。入射ビーム強度によって電荷収集間隔が異なるのは、CVD ダイヤモンド 検出器の応答がこれらのビーム強度に対してはリニアでないことを示している。

表 5.2 に電荷収集間隔の値をまとめる。

第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

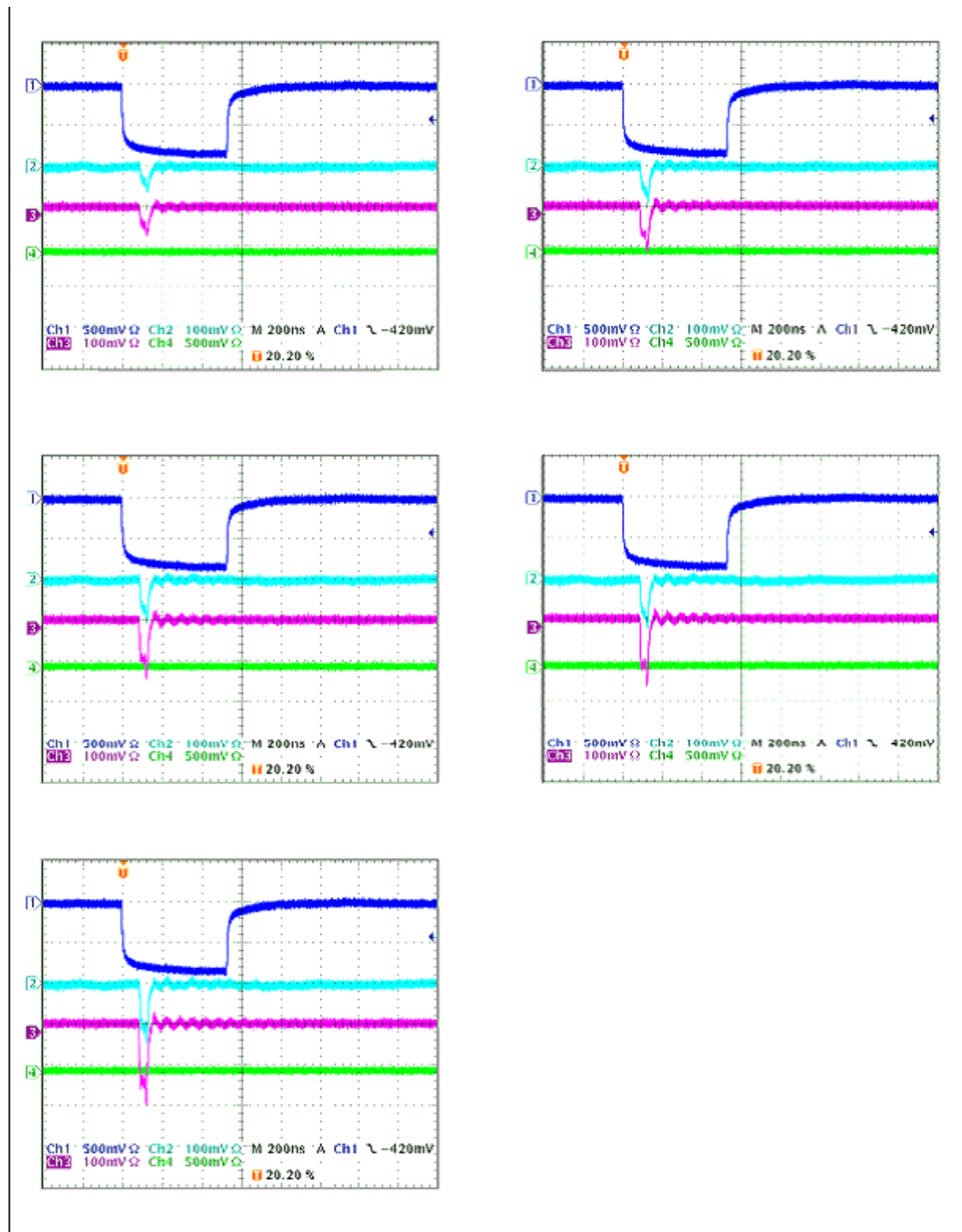


図 5.6: オシロスコープで測定したCVDダイヤモンド検出器の波形。上から、ゲート、Dia1、Dia2 の波形である。Dia1、2 にかけるバイアスを変えて測定した。左上：100 V、右上：200 V、左中：300 V、右中：400 V、左下：600 V。シグナルは-52 dB に減衰してある。

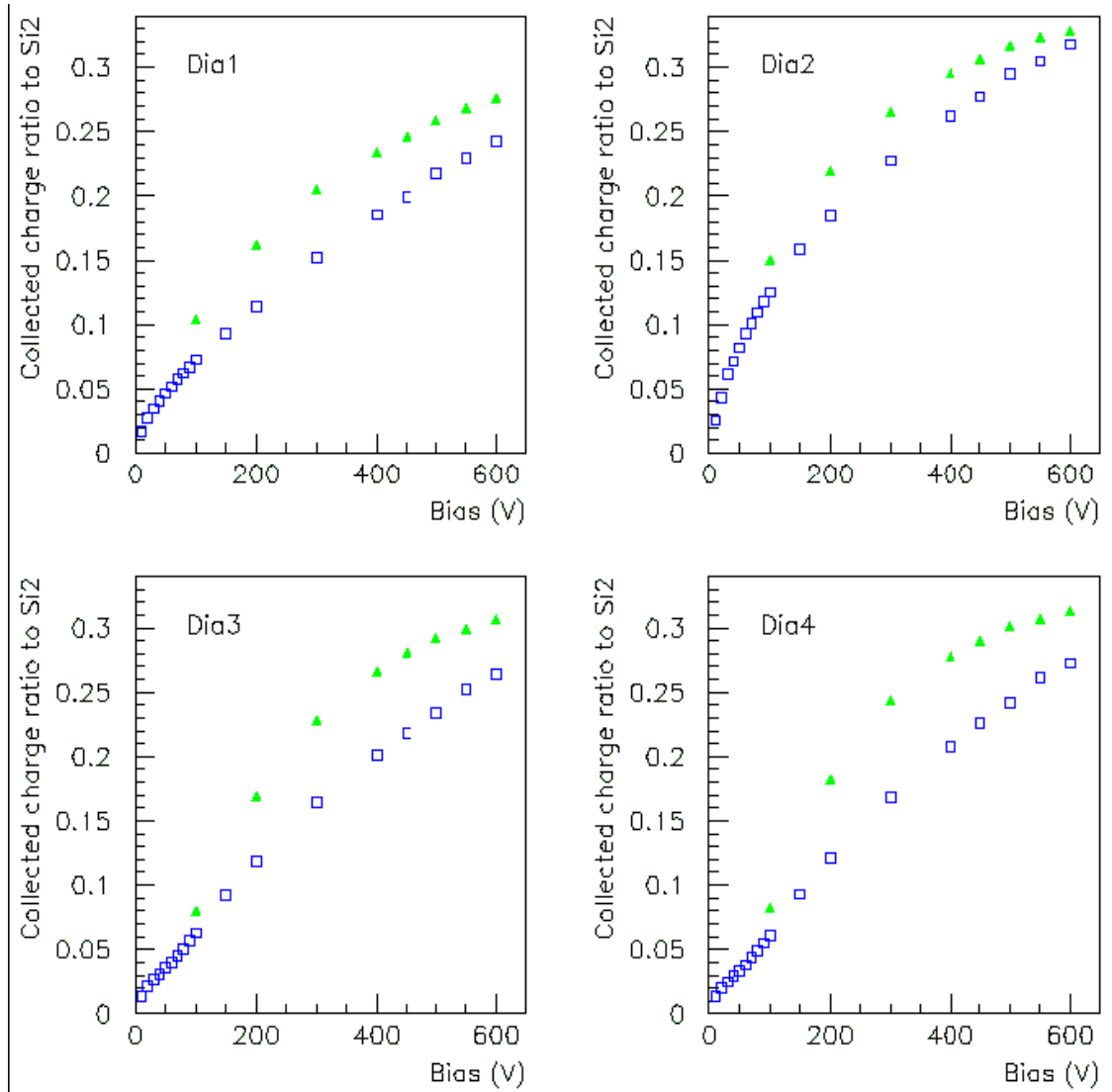


図 5.7: CVD ダイヤモンド検出器のバイアス依存性。縦軸に Si2 との収集電荷比をとった。緑三角点は  $\sim 7 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse、青四角点は  $\sim 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse で測定した結果を示す。

入射ビーム強度 [e/cm <sup>2</sup> /pulse]	$\sim 7 \times 10^6$	$\sim 8 \times 10^7$
Dia1	231	138
Dia2	287	186
Dia3	261	148
Dia4	269	153

表 5.2: CVD ダイヤモンド検出器の電荷収集間隔 [ $\mu$ m]。

## 第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

### 応答の個体差

前節の測定から分かるように、4つのサンプル間の応答には個体差があり、バイアス 500 V において最大約 30% になった。検出器の並び順によって物質によるビーム散乱が影響し、入射粒子数が各サンプルで異なるが、シグナルの大きさの順番は並び順とは異なるので、この個体差の原因として入射粒子数の違いという可能性は否定される。他に考えられる原因としては、バイアスを印加する電極の違いが挙げられる。CVD ダイヤモンド 検出器の電極に極性はないが、ウェハーには成長面と核形成面がありそれぞれ結晶の大きさが異なるので、どの向きにバイアスをかけるかで応答に違いが現れる可能性がある。この可能性を検証するため、ビームテスト 2 で以下の測定を行った。

まずバイアスをかける電極を任意に選んで測定し、次に逆側の電極からバイアスをかけて同様の測定を行い、両者の違いを検証した。図 5.8 の赤丸点が前者の、青四角点が後者の測定結果である。また、両者の差を図 5.9 に示す。なお、この測定でのビーム強度は、前者のときが  $\sim 6 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max}$  375%)、後者のときが  $\sim 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max}$  500%) である。

バイアス電極による応答の系統的な違いは見られなかった。しかし、本測定の入射ビーム強度は  $\sim 6, 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse で、次節で述べるリニアリティー測定の結果から、この入射ビーム強度では CVD ダイヤモンド 検出器とシリコン PIN フォトダイオードの応答は飽和してきていることを考慮しなくてはならない。特にシリコン PIN フォトダイオードの飽和の方が著しいため、入射ビーム強度が高くなるにつれ Dia/Si の比は大きくなる。すなわち本測定においては、後の測定 (図 5.8 の青四角点) の方が前の測定 (同図赤丸点) よりも Dia/Si の比は大きくなるはずである。しかし、Dia1 の低バイアス側および Dia4 の測定点は、それとは逆になっている。また、Dia3 には両測定間にその比の変化は見られない。つまり、Dia/Si の比が予想よりも小さくなっているのは、バイアスをかける向きを変えたことに起因する可能性がある。これについては、CVD ダイヤモンド 検出器、シリコン PIN フォトダイオードとも線形な応答を示す入射ビーム強度で再度測定して確かめる必要がある。

以上の結果から、4つのサンプルの応答の個体差は、単純に各サンプルのウェハーに起因するものとも考えられる。CVD ダイヤモンド ウェハーの製造工程上、別々に作られたウェハーの性能はばらついてしまう。この4つのサンプルのウェハーは同一のウェハーから切り取ったものであるが、それでも応答に個体差が生じるのは、同じ1枚のウェハーでも図 4.3 のように結晶粒の構造は様ではなく、切り取る場所によってその性能に違いが現れるためと考えられる。したがって、実機で使用する場合は検出器1つひとつについて測定し、あらかじめ個体差を評価しておく必要がある。



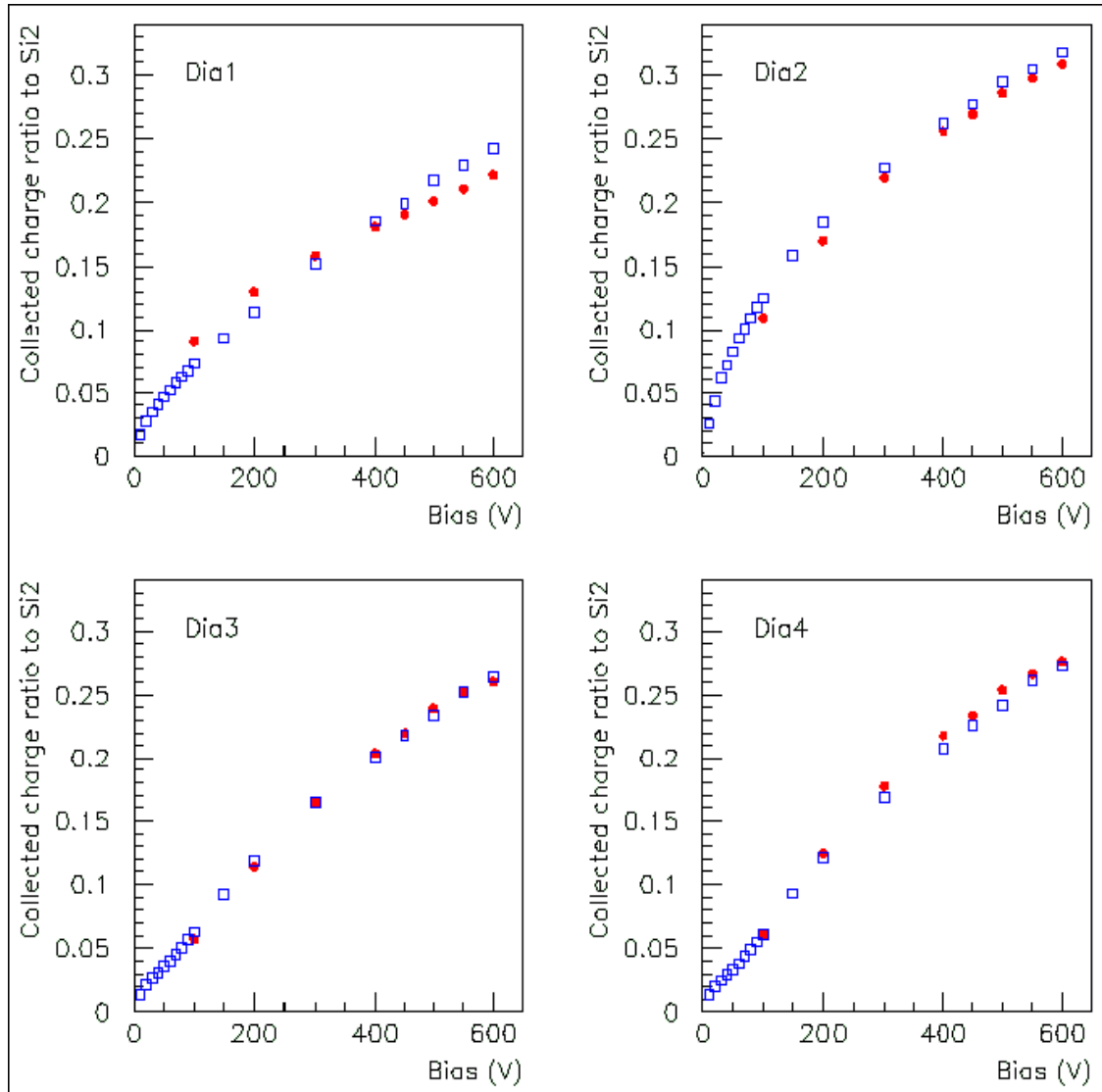


図 5.8: CVDダイヤモンド検出器のバイアス依存性。縦軸に Si2 との収集電荷比をとった。赤丸点は最初の測定、青四角点はバイアスをかける電極を変えて測定した結果を示す。

第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

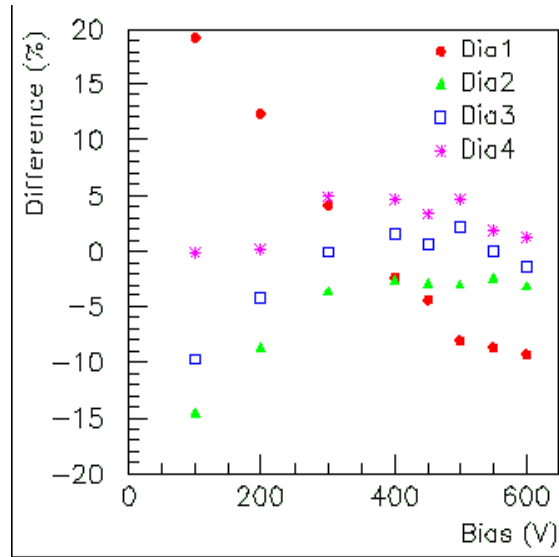


図 5.9: バイアス電極を変えたときの応答の変化の割合。

リニアリティーの評価

ここでは、ビームテスト 2 の測定結果について述べる。バイアス 100 V と 500 V において、入射ビーム強度  $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  ( $j_{T2K}^{max} 1.9 \sim 31\%$ ) に対する CVD ダイヤモンド検出器の応答を測定した。図 5.10 にバイアス 100 V、図 5.11 にバイアス 500 V のときの結果を示す。横軸に Si2 の収集電荷、縦軸に CVD ダイヤモンド検出器の収集電荷をとった。Si2 の収集電荷 6.8 nC が  $j_{T2K}^{max} 10\%$  に対応する。また、バイアス 500 V において、入射ビーム強度  $6.6 \times 10^6 \sim 2.2 \times 10^8 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  ( $j_{T2K}^{max} 41 \sim 1400\%$ ) に対する応答も測定した。このビーム強度ではシリコン PIN フォトダイオードの応答が飽和して線形でないので、レファレンスには CT1 を用いる。その結果を図 5.12 および図 5.13 に示す。CT1 の収集電荷 0.004 nC が  $j_{T2K}^{max}$  に対応する。

バイアス 100 V では、低いビーム強度に対しても応答が飽和してきている。一方、バイアス 500 V では、Si2 の収集電荷 1~22 nC に対して、どのサンプルも +1.5, -2.0% 以内の線形な応答を示した。しかし、図 5.11 (右) を見ると、入射ビーム強度が高くなるにつれて徐々に応答が飽和してきていることがわかる。実際、図 5.12 で CT1 の収集電荷が 0.005 nC を越えたあたりから、応答の飽和が顕著に現れている。なお、Dia2 のグラフで CT1 の収集電荷 0.04 nC 以降は ADC がオーバーフローしている。図 5.13 (右) より、入射ビーム強度  $6.6 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  ( $j_{T2K}^{max} 41 \sim 125\%$ ) におけるフィット直線からのずれは、Dia1, 2, 3, 4 についてそれぞれ、+1.3, -1.0%、+1.3, -1.0%、+1.8, -1.7%、 $\pm 1.7\%$  であった。なお、CT1 の出力電荷 0.002 nC の点のフィット直線からのずれが大きいのは、シ

## 5.1. ビームテスト 1、2

リコン PIN フォトダイオードもその点で同じような振る舞いをしていたので、検出器の応答ではなくビームによるものと考えられる。

入射ビーム強度  $3 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max} 1.9 \sim 150\%$ ) の範囲で図 5.11 と図 5.12 の結果をまとめると図 5.14 のようになる。横軸に Si2、CT1 から求めた入射ビーム強度をとった。Si2 をレファレンスにしたときの測定点を緑で、CT1 をレファレンスにしたときの測定点を青で示した。図(左)より、入射ビーム強度  $3 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max} 1.9 \sim 100\%$ ) におけるフィット直線からのずれは、Dia1、2、3、4 についてそれぞれ、+1.5、-12.5%、+8.7、-1.9%、+2.0、-10.6%、+2.1、-10.0% で、電荷収集間隔(表 5.2)の大きいサンプルほどリニアリティーがよいという結果を得た。

### Warm-up 時間

CVD ダイヤモンド検出器の warm-up の特性を調べるため、ビームテスト 1 において以下の手順により測定を行った。

バイアススキャンを終えた後バイアスを切って、ビームを照射しない状態で 10 分待ち、それから Dia1, 2, 3 の順にバイアスを 500 V までかけた。なお、1ch バイアスをかけるのに 1 分弱要している。そして Dia3 のバイアスをかけ終わると同時に、ビーム照射とデータの読み出しを開始した。その時間を 0 とする。そのまま約 11 分間、CVD ダイヤモンド検出器の応答を測定した。得られた応答の時間分布を図 5.15 に示す。縦軸に Si1 との収集電荷の比をとった。なお、この測定での入射ビーム強度は  $\sim 5 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max} 313\%$ ) である。

Dia1 は測定の 11 分間、 $\pm 0.5\%$  以内の変動でずっと安定に動作している。Dia2 の応答はビーム照射開始時から徐々に減衰しているが、時間 0 sec と 650 sec の間の下がり幅は 1.4% 程度である。一方、Dia3 は pumping 効果と思われる応答を示している。ビーム照射開始時から徐々に立ち上がり、100 sec 以降は  $\pm 0.2\%$  以内の変動で安定する。Dia3 の電荷収集間隔の時間分布を式 (4.6) でフィットしたときのパラメータの値を表 5.3 に示す。立ち上がりの時定数  $\tau$  は 40.7 sec であった。

$\bar{d}(\infty)$ [ $\mu\text{m}$ ]	244
$\alpha$	$3.00 \times 10^{-2}$
$\tau$ [sec]	40.7

表 5.3: Dia3 の pumping パラメータのベストフィット。

ここで、この測定はバイアススキャンの 10 分後に行ったということに注意したい。すなわち、一度 pumping されるとその状態は数ヶ月のオーダーで続くことから、Dia3 はす

## 第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

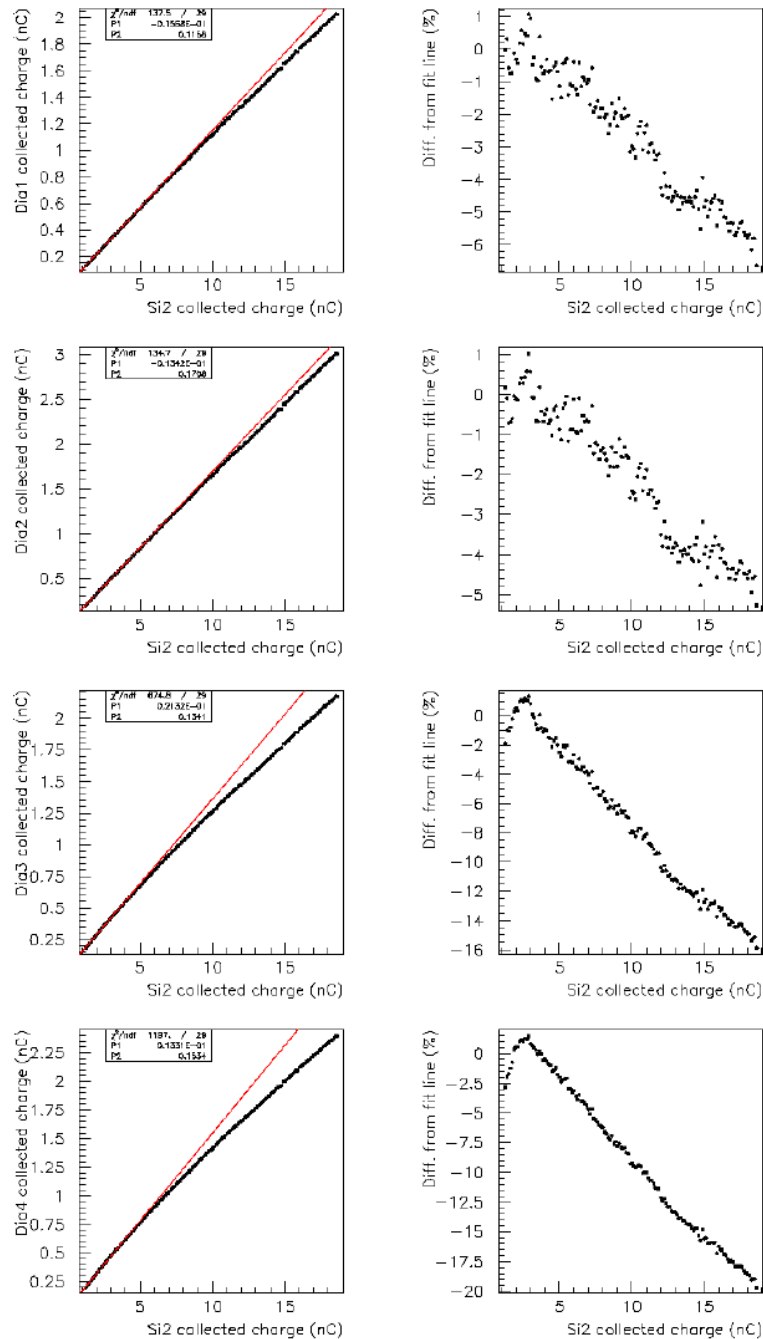


図 5.10: バイアス 100 V。  $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse における CVD ダイヤモンド検出器のリニアリティ。(左)横軸に Si2 の収集電荷、縦軸に Dia1, 2, 3, 4 の収集電荷。直線は、ビーム強度の低い方 31 点でフィットしたもの。(右)測定点のフィットからのずれ。

## 5.1. ビームテスト 1、2

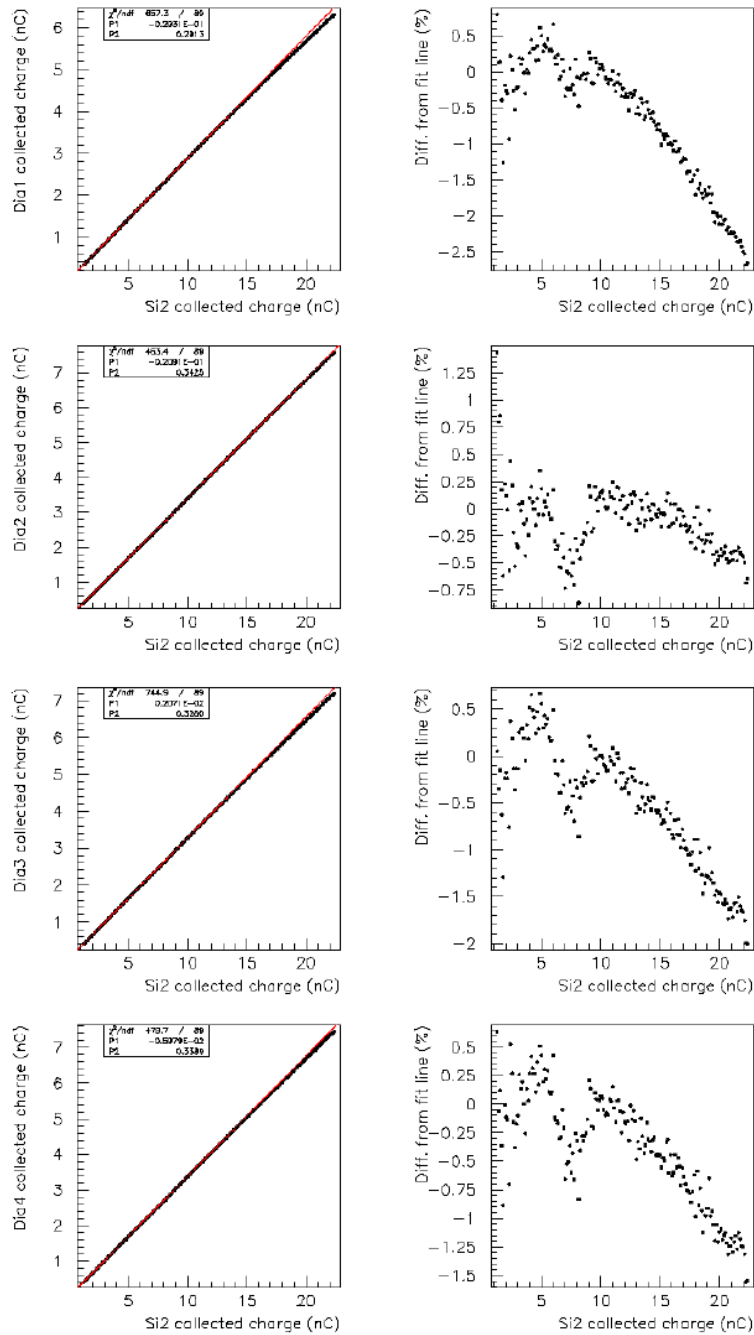


図 5.11: バイアス 500 V。  $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse における CVD ダイヤモンド検出器の線arity。(左)横軸に Si2 の収集電荷、縦軸に Dia1, 2, 3, 4 の収集電荷。直線は、ビーム強度の低い方 91 点でフィットしたもの。(右)測定点のフィットからのずれ。

## 第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

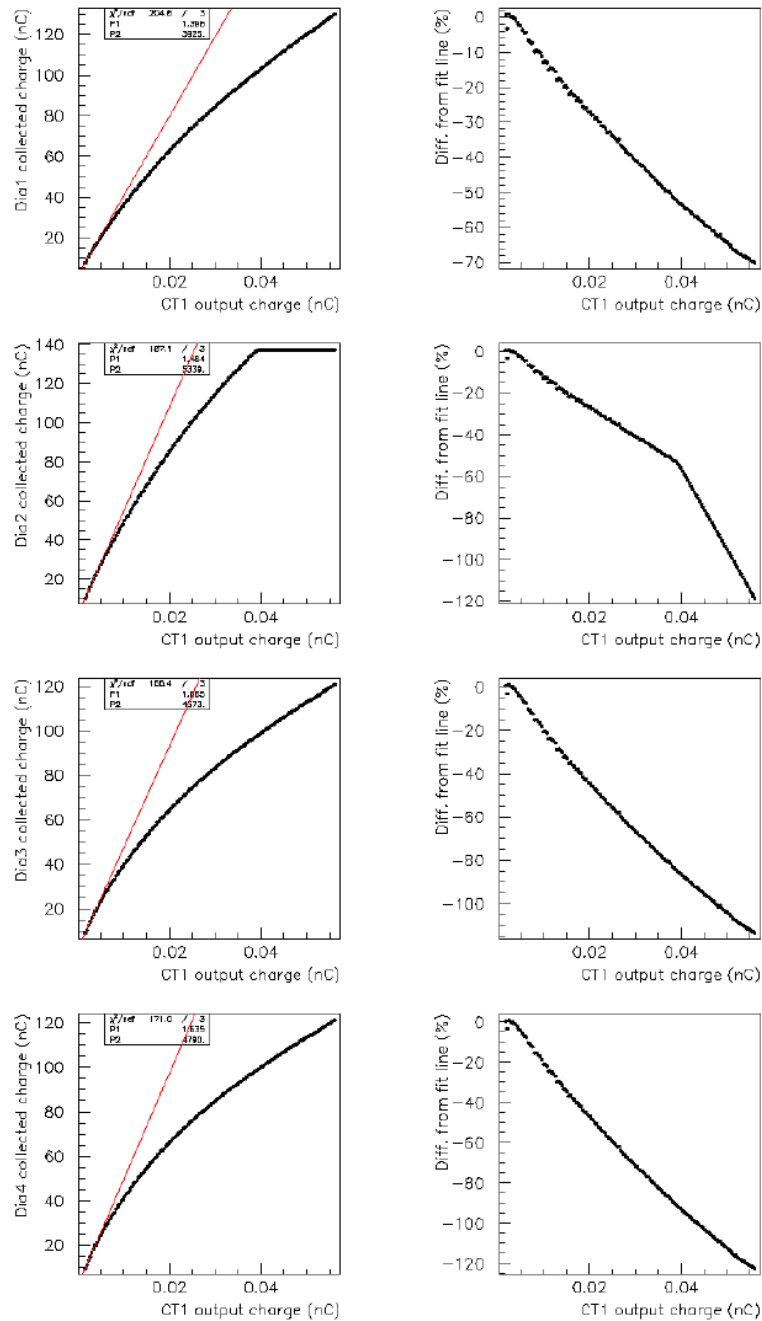


図 5.12:  $6 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ におけるCVDダイヤモンド検出器のリニアリティ。 (左)横軸にCT1の出力電荷、縦軸にDia1, 2, 3, 4の収集電荷。直線は、ビーム強度の低い方5点でフィットしたものである。 (右)測定点のフィットからのずれ。

## 5.1. ビームテスト 1、2

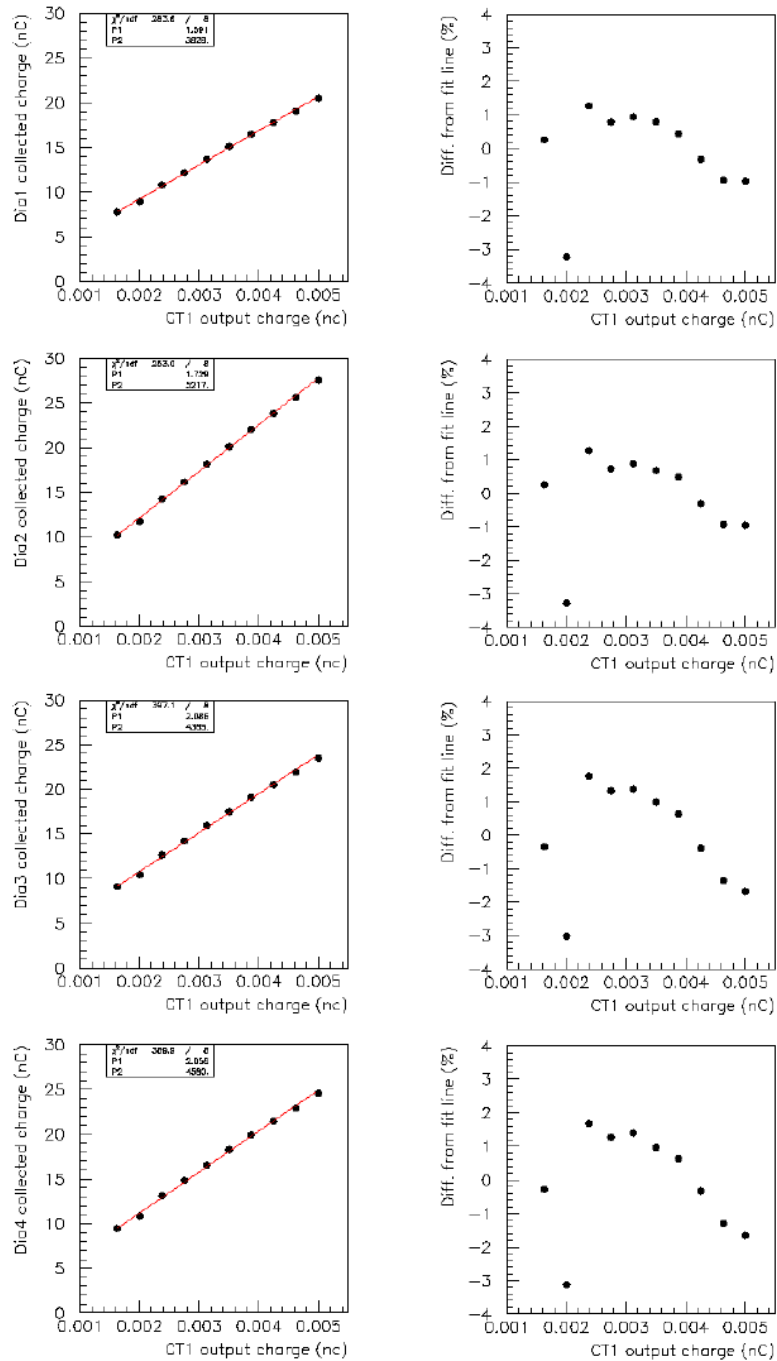


図 5.13:  $6 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ における CVD ダイヤモンド 検出器の線形性。 (左) 横軸に CT1 の出力電荷、縦軸に Dia1, 2, 3, 4 の収集電荷。 (右) 測定点のフィットからのずれ。CT1 の出力電荷 0.002 nC の点のずれはビームによるものである。

第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

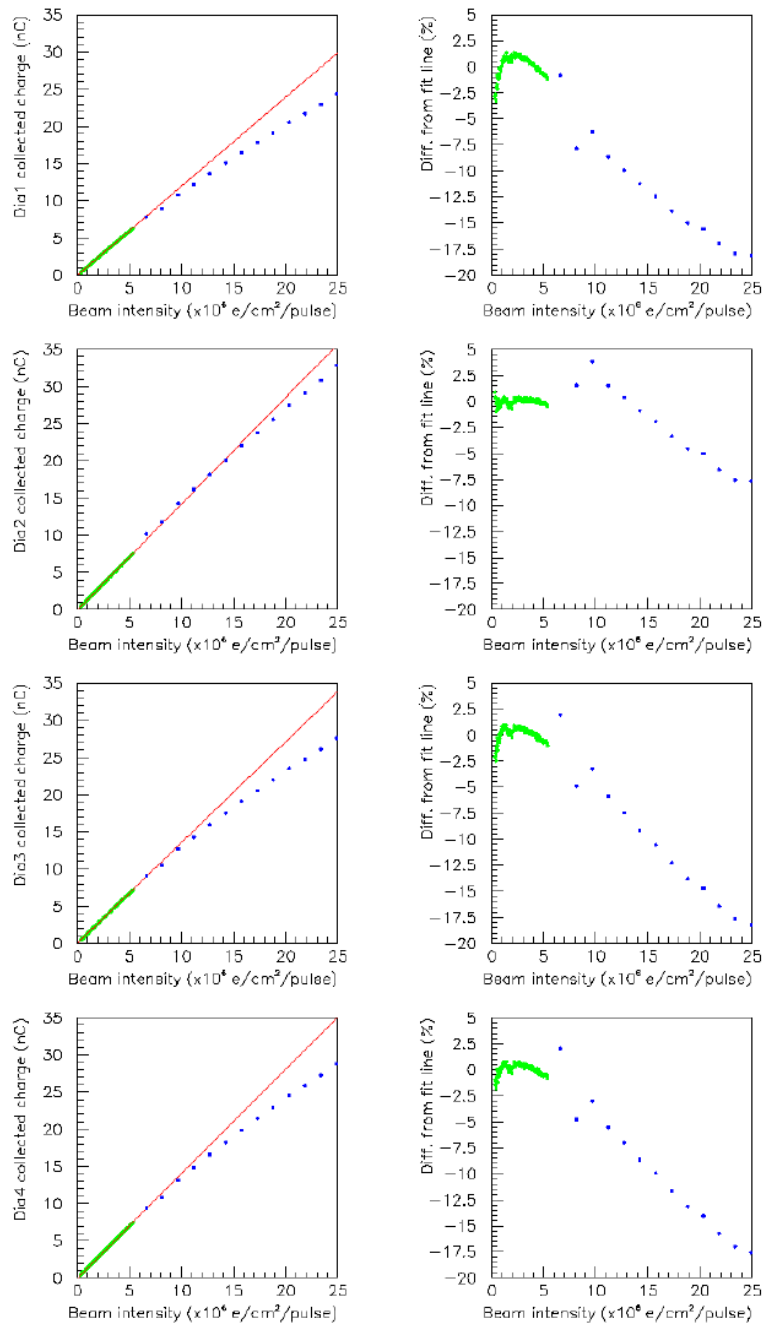


図 5.14:  $3 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^7 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  における CVD ダイヤモンド 検出器のリニアリティー。(左) 横軸に Si2 および CT1 から求めた入射ビーム強度 ( $\times 10^6 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ )、縦軸に Dia1, 2, 3, 4 の収集電荷。緑点が Si2、青点が CT1 をレファレンスにしたときの測定点を示す。赤線は、緑点をフィットしたもの。(右) 測定点のフィットからのずれ。



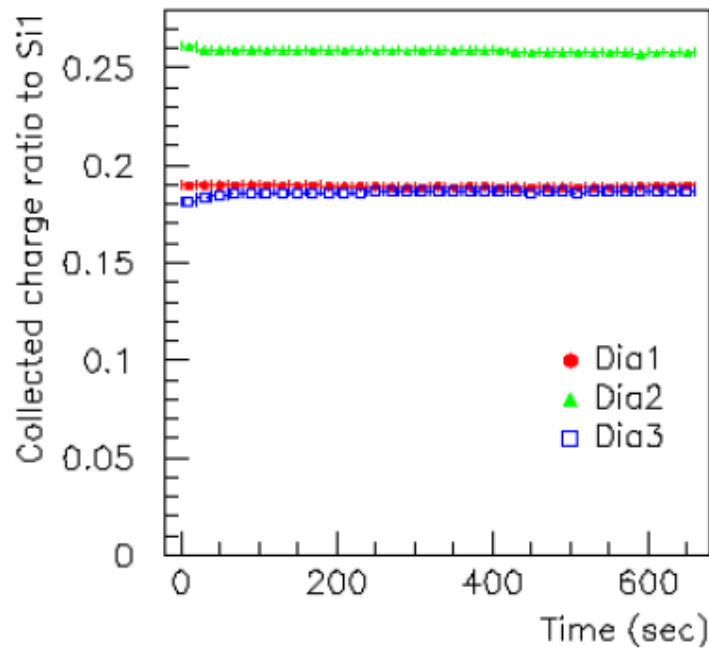


図 5.15: CVD ダイヤモンド 検出器の応答の時間分布。

に pumped 状態にあるはずである。しかし、このように応答の立ち上がりが遅いのは、数 eV の光子が入射するなどして depumping が起こったか、あるいは pumping 効果以外の機構が働いているものと思われる。Depumping については、CVD ダイヤモンド 検出器は銅テープシールドで覆われているので、数 eV の光子がウェハーに入射することは考えにくい。本測定では Dial、2 には応答の立ち上がりが見られなかったが、Dia3 と違い Dial、2 にはビーム照射開始（測定開始）の 1~2 分前にバイアスを印加していることを考えると、バイアスの印加時間が立ち上がりに影響している可能性もあると考えられる。

この可能性を検証するため、ビームテスト 2 において、次の 2 通りの方法で CVD ダイヤモンド 検出器の応答を測定した。

1. バイアスをかけて約 1 分後にビームを照射し始める。
2. ビームを照射し始めて約 1 分後にバイアスをかける。

なお、この測定での入射ビーム強度は  $\sim 9 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse ( $j_{T2K}^{max}$  55%) である。

1., 2. の測定結果を同じ図上にプロットした。図 5.16 がその結果である。ビーム照射開始時間またはバイアス印加開始時間を 0 min とし、1. の測定を青線で、2. の測定を赤線で

## 第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

示した。赤線の方が立ち上がりが遅いのは、バイアスを設定値の 500 V までかけるのに約 0.2 min 要したためである。ビーム自身の立ち上がり時間は 1 秒程度である。

Dia1, 2 と Dia3,4 で異なる応答を示すことが分かった。Dia1, 2 の応答が安定点まで達するのに要する warm-up 時間は Dia3, 4 よりも速く、5 秒程度である。一方、Dia3, 4 の warm-up 時間は約 3 分である。この結果は前述のビームテスト 1 の結果と一致する。なお、時間 0 で青線がオーバーシュートしているのは、ビームの出始めで Si2 のシグナルが非常に小さいためである。

測定方法 1, 2. による応答の違いは見られなかった。これは、ある程度の量のキャリアがダイヤモンドのウェハー内をドリフトしない間は、キャリアが何らかの理由で失われてしまうということを示している。これは、伝導帯あるいは価電子帯の近傍に浅い不準中心があって、一般的な pumping 効果よりもごく短い時定数で pumping 効果が起こっているためと考えられる。

さらに、ビームテスト 2 において、バイアスをかけた状態でビーム照射オン-オフを繰り返す測定を行った。バイアスを 500 V かけ、ビームオフの状態での測定を開始し、約 2 分後にビーム照射を開始し、その後約 5 分間隔でビーム照射オフ-オンを 3 度繰り返した。その結果を図 5.17 に示す。このときの入射ビーム強度は  $\sim 8 \times 10^7 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  ( $j_{\text{T2K}}^{\text{max}} 490\%$ ) である。

ここでも Dia1, 2 と Dia3, 4 で異なる応答を示すことがわかった。Dia1, 2 の応答の warm-up 時間は、最初のビーム照射時は 5 秒程度で、2 回目以降も変わらず 5 秒程度であった。一方、Dia3, 4 の warm-up 時間は、最初のビーム照射時は約 3 分で、2 回目以降は約 20 秒であった。

この測定により、ビーム照射間隔が 5 分空くと CVD ダイヤモンド 検出器の応答の立ち上がりを考慮しなければならないことが分かった。しかし、LINAC のビーム繰り返し 15 Hz では、一度応答が立ち上がれば安定に動作するので、ビーム照射間隔 60 msec 以下、すなわち T2K ビームのバンチ間 ( $\sim 700 \text{ nsec}$ ) の応答の立ち上がりは考慮しなくてよい。しかし、スパイル間隔 ( $\sim 3.5 \text{ sec}$ ) の応答の立ち上がりについては今後確認が必要である。

### 時間安定性

ビームテスト 2 において、強度  $\sim 1 \times 10^7 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$  ( $j_{\text{T2K}}^{\text{max}} 62\%$ ) のビームを約 1 時間照射し、CVD ダイヤモンド 検出器の応答の時間安定性を測定した。バイアスを切ってビームを照射している状態でデータを取り始め、その時間を 0 とした。バイアスはその後 Dia1, 2, 3, 4 の順に 500 V まで印加した。図 5.18 にその結果を示す。図左に Si3 との収集電荷の比、図右に各測定点の平均値 (測定開始から 10 分後以降のデータの平均) からのずれ

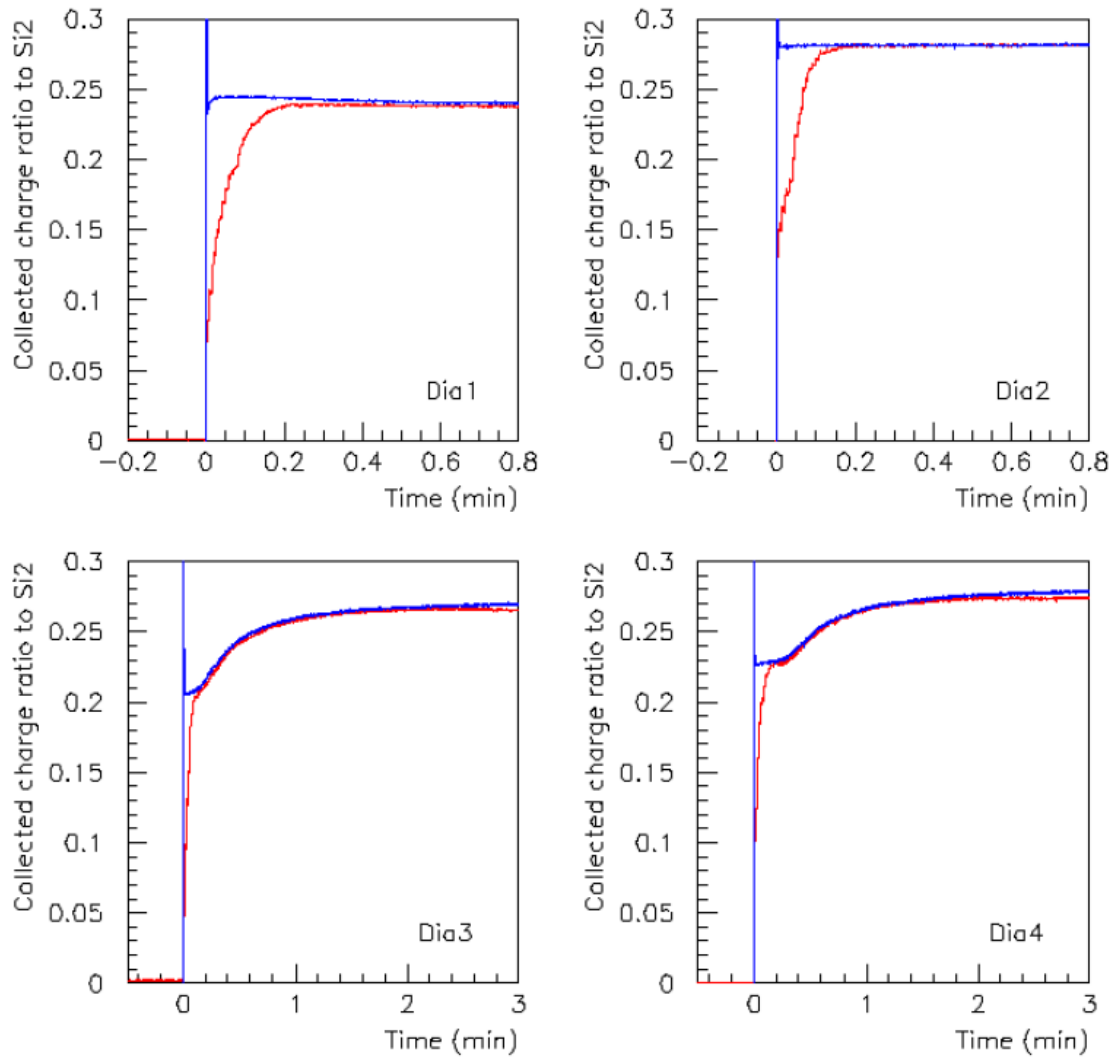


図 5.16: CVDダイヤモンド検出器の warm-up 時間。バイアスのかけた状態でビームを照射し始めたときの応答が青線、ビームを照射した状態でバイアスをかけ始めたときの応答が赤線である。

第5章 ビームテストによる CVD ダイヤモンド 検出器の性能評価

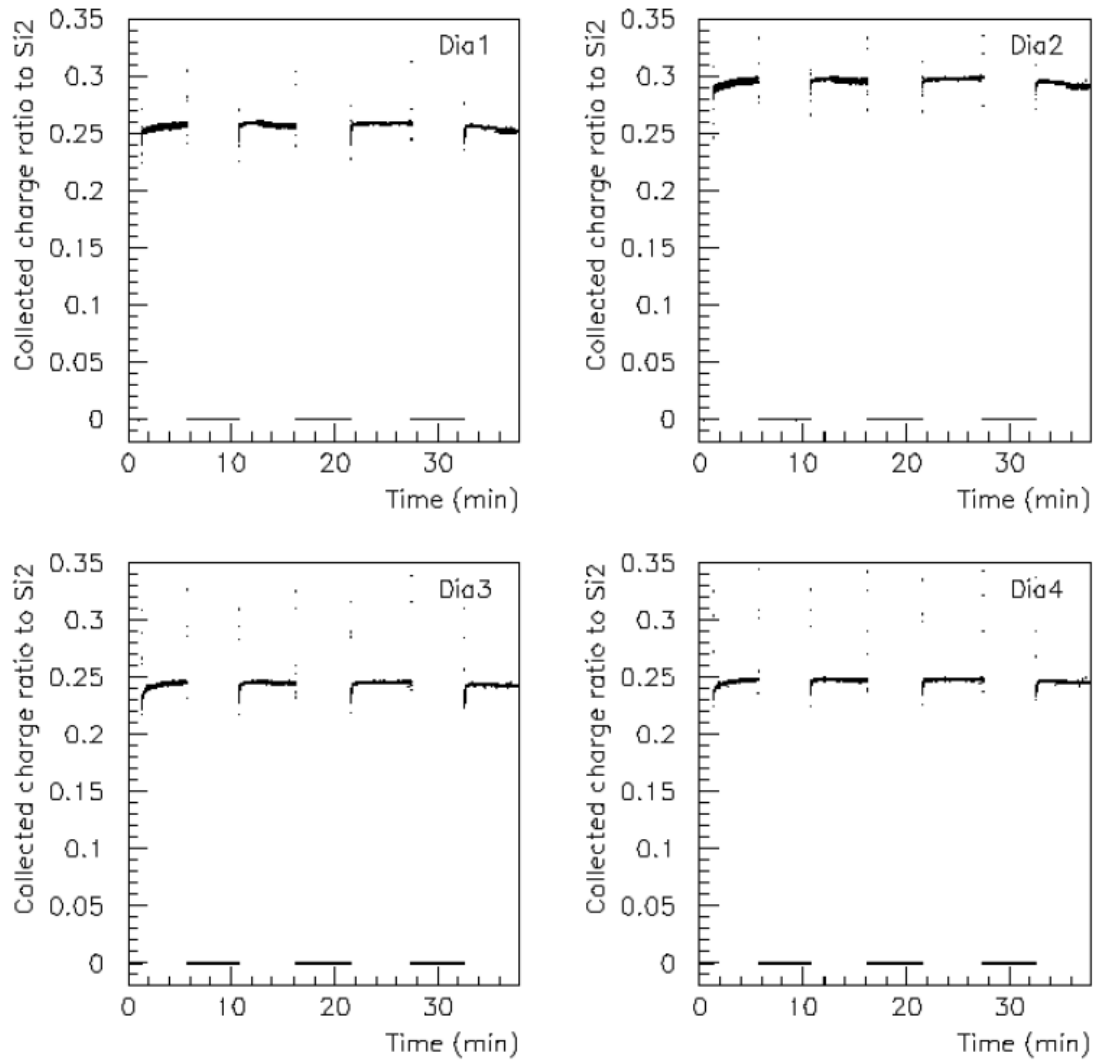


図 5.17: CVD ダイヤモンド 検出器の warm-up 時間。ビームのオン-オフを約 5 分間隔で繰り返した。

をプロットした。図中プロットが途切れているのは、ADCのオーバーフローによるものである。

初めの warm-up 時間を除けば、バイアス印加後 10 分以降はどのサンプルも  $\pm 2\%$  以内の変動で安定に動作していることが分かった。時間 45 min の点など途中シグナルが急激に変化しているのは、どのサンプルも同じような挙動を示しているため、検出器の性能ではなくビーム由来のものと考えられる。

### 5.1.5 測定結果のまとめ

LINAC の電子ビームを用いて、 $j_{T2K}^{max}$  強度 ( ミューオンモニターにおいて  $\sim 1.6 \times 10^7$  particles/cm<sup>2</sup>/bunch ) のビームに対する CVD ダイヤモンド検出器の応答を測定し、以下の結果を得た。

- シグナルの波形

強度  $\sim 5 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  313% ) パルス幅約 40 nsec にビームに対して、パルス幅約 50 nsec の応答を示す。すなわち、T2K ミューオンモニターにおいて、バンチごとの測定が可能である。

- 印加電圧依存性 ( バイアススキャン )

バイアス 500 V を越えてもなおシグナルは増加し続けるが、バイアス依存性は 500 V において 0.1% /V 以下である。リニアリティーを良くするため、動作電圧は最大許容電圧の 500 V に設定する。Dia1、2、3、4 の電荷収集間隔は、入射ビーム強度  $\sim 7 \times 10^6$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  44% ) バイアス 500 V においてそれぞれ、231  $\mu$ m、287  $\mu$ m、261  $\mu$ m、269  $\mu$ m である。入射ビーム強度  $\sim 8 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  500% ) に対しては、138  $\mu$ m、186  $\mu$ m、148  $\mu$ m、153  $\mu$ m である。

- 応答の個体差

CVD ダイヤモンド検出器は応答に個体差がある。4 つのサンプルについて、バイアス 500 V における個体差は最大で約 30% ある。

- リニアリティー

バイアス 100 V では 500 V に比べ早く飽和し始める。バイアス 500 V では、強度  $3 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  1.9~100% ) のビームに対して、Dia1 は +1.5, -12.5%、Dia2 は +8.7, -1.9%、Dia3 は +2.0, -10.6%、Dia4 は +2.1, -10.0% のリニアリティーがある。電荷収集間隔の大きいものほどリニアリティーも良い。また、強度  $6.6 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7$  e/cm<sup>2</sup>/pulse (  $j_{T2K}^{max}$  41~125% ) のビームに対するリニアリティー

## 第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

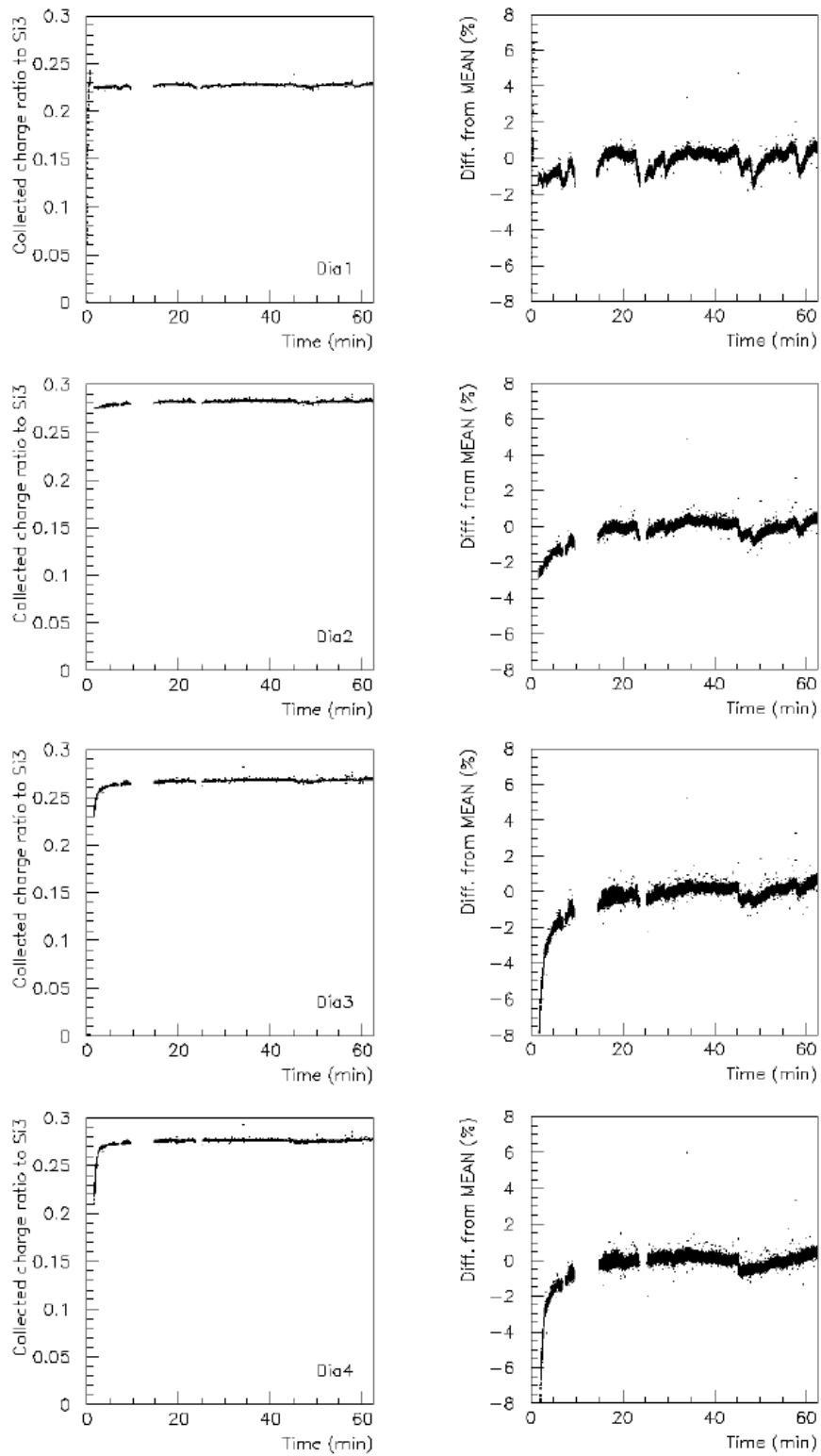


図 5.18: CVDダイヤモンド検出器の応答の時間安定性。

## 5.2. ビームテスト (2007年6月)

は、Dia1 は+1.3, -1.0%、Dia2 は+1.3, -1.0%、Dia3 は+1.8, -1.7%、Dia4 は ±1.7% である。

- Warm-up 時間

最初のビーム照射時の応答の warm-up 時間は、Dia1, 2 は約 5 秒、Dia3, 4 は約 3 分である。また、ビーム照射間隔が 5 分のときの warm-up 時間は、Dia1, 2 は約 5 秒、Dia3, 4 は約 20 秒である。

- 時間安定性

応答が安定点まで立ち上がってから約 1 時間、どのサンプルも ±2% 以内の変動で安定に動作する。

シグナルの大きさについて、本測定においてはバイアスの向きによる系統的な違いは見られなかったが、検出器の応答が線形な領域のビーム強度で再度測定し直す必要がある。warm-up 時の応答としては、Dia3, 4 に比較的時定数の短い pumping 効果が現れたが、なぜ Dia3, 4 にだけ現れているのかは分かっていない。また、T2K ビームのスパイル間隔 ( ~3.5 sec ) での応答の warm-up 時間を今後評価する必要がある。

## 5.2 ビームテスト (2007年6月)

次に、2007年6月11日～15日に行ったビームテストについて説明する。

ここでは、CVDダイヤモンド検出器サンプルの応答の個体差についての考察を述べる。

### 5.2.1 セットアップとビームパラメータ

今回のビームテストで用いたビームパラメータを表 5.4 にまとめた。

電子エネルギー [MeV]	100
ビーム強度 [e/pulse]	$10^6 \sim 10^9$
	$J_{T2K}^{max} = 1.6 \times 10^8 \text{ e/cm}^2/\text{pulse}$
ビーム半径 $\sigma$ [cm]	~0.6
パルス幅 [nsec]	~50
パルス振動数 [Hz]	15

表 5.4: 測定で用いた LINAC のビームパラメータ

セットアップの概観を図 5.19 に示す。ビームパイプの先端から約 8 cm のところに CT1、そこから約 63.5 cm 下流に CT2、またそこから約 5.5 cm 下流に CT3 を配置し、ビーム強

第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

度を測定した。その下流約 12.3 cm のところに、9つのシリコン PIN フォトダイオードで構成するプロファイルモニターを置いてビームプロファイルを測定した。そしてその約 7 cm のところに5つのCVDダイヤモンド検出器サンプル ( Dia1, 2, 3, 4, 5 ) および、2つのシリコン PIN フォトダイオードサンプル ( Si1, 2 ) をビーム軸に一直線に並べ、同時に測定した。なお、プロファイルモニターは、中心のチャンネルがビーム軸上にくるように配置した。

図 5.20、図 5.21 に測定の回路図を示す。

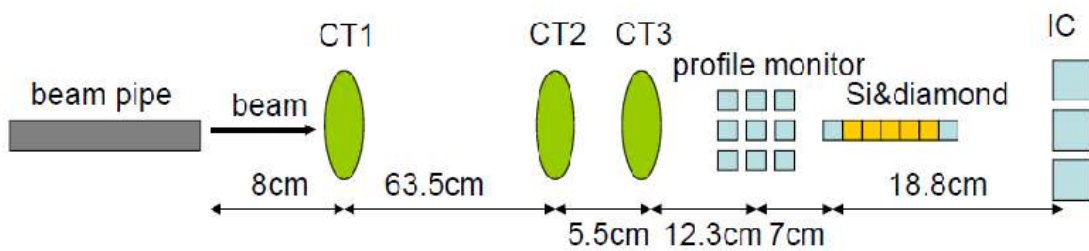


図 5.19: CVDダイヤモンド検出器測定のセットアップ図。

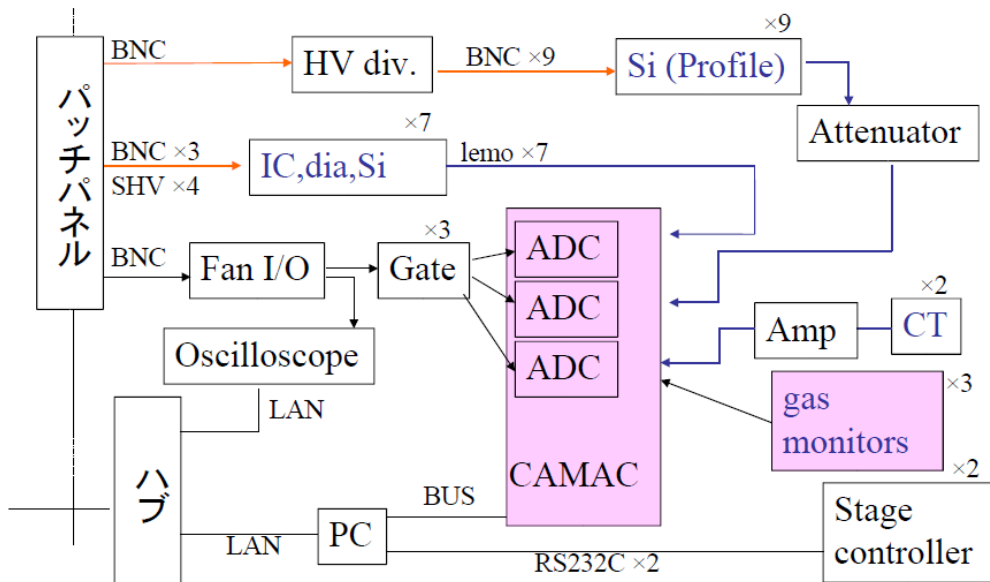


図 5.20: CVDダイヤモンド検出器測定の回路図。LINACのあるビームライン室。



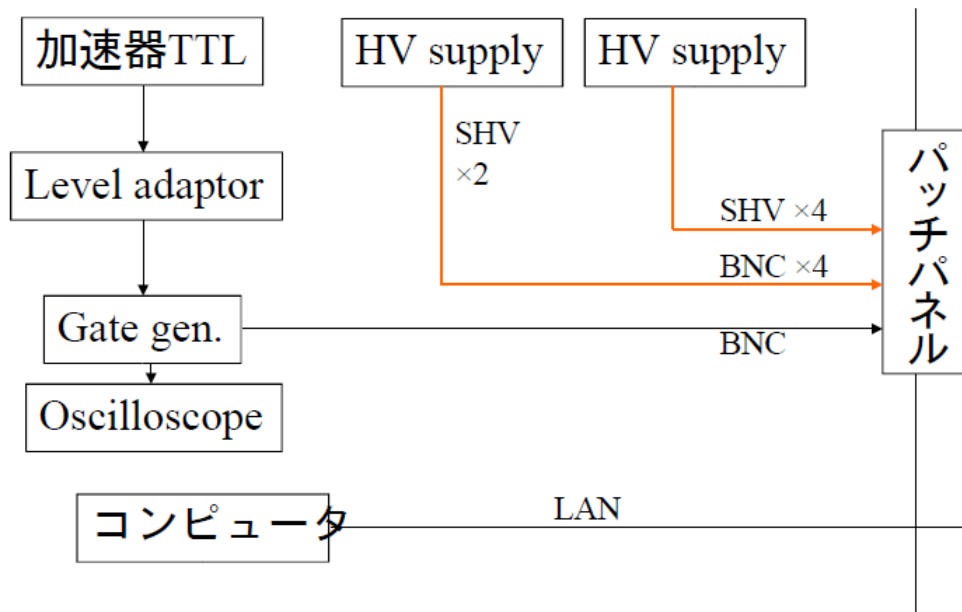


図 5.21: CVDダイヤモンド検出器測定の回路図。コントロール室。

### 5.2.2 シグナルの波形

オシロスコープで測定したCVDダイヤモンド検出器の波形を図5.22に示す。図(上)はバイアス300V、図(下)はバイアス500Vを印加したときの波形である。

CVDダイヤモンド検出器のパルス幅は約60 nsecで、T2Kビームのバンチ間隔(～700nsec)より十分速いので、バンチごとの測定が可能である。

### 5.2.3 応答の個体差

応答の個体差が見られるかどうかを検証するため、それぞれのCVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナルを見た。そのバイアスごとの比較を、図5.23～図5.25に示す。

これらの図から、Dia2に比べ、Dia1, 3, 4が違う挙動を示していることが分かる。

この結果から、Dia2を基準にとって、Dia1, 3, 4のシグナルの違いをバイアスごとに比較してみた。その比較を、図5.26～図5.28に示す。

これらの図から、Dia1がDia3, 4とは違う挙動を示していることが分かる。しかし、バイアスを上げるにつれ、Dia1, 3, 4の個体差は小さくなっている。実際T2KミュオンモニターのCVDダイヤモンド検出器で印加する予定のバイアス500Vにおいては、個体差は15～20%になっている。

第5章 ビームテストによる CVDダイヤモンド検出器の性能評価

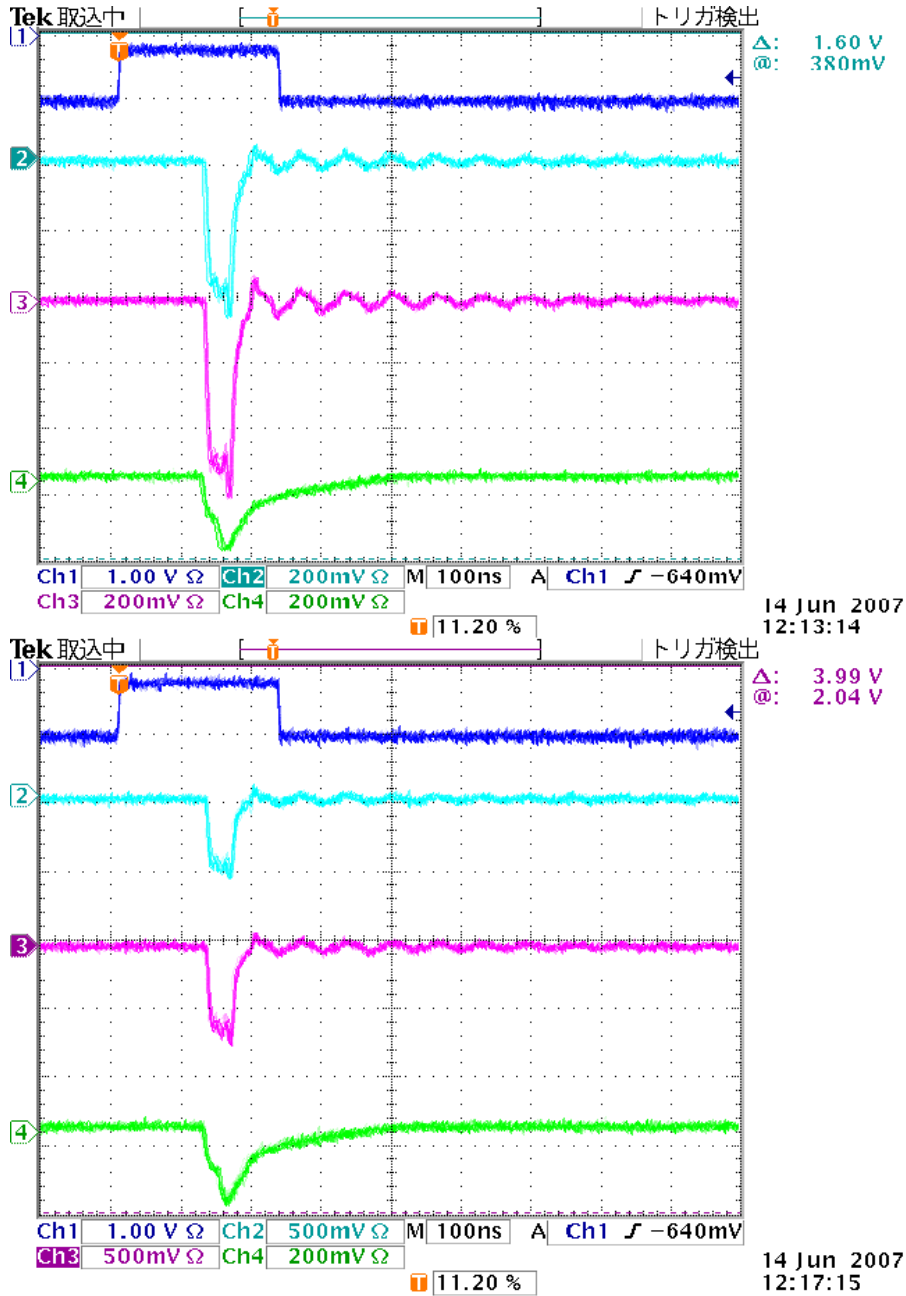


図 5.22: オシロスコープで測定した CVDダイヤモンド検出器の波形。上から、ゲート、Dia1、Dia2、Si1 の波形である。Dia1、2 にかけるバイアスを変えて測定した。上：300 V、下：500 V。シグナルは、Dia：-30 dB、Si：-46 dB に減衰してある。

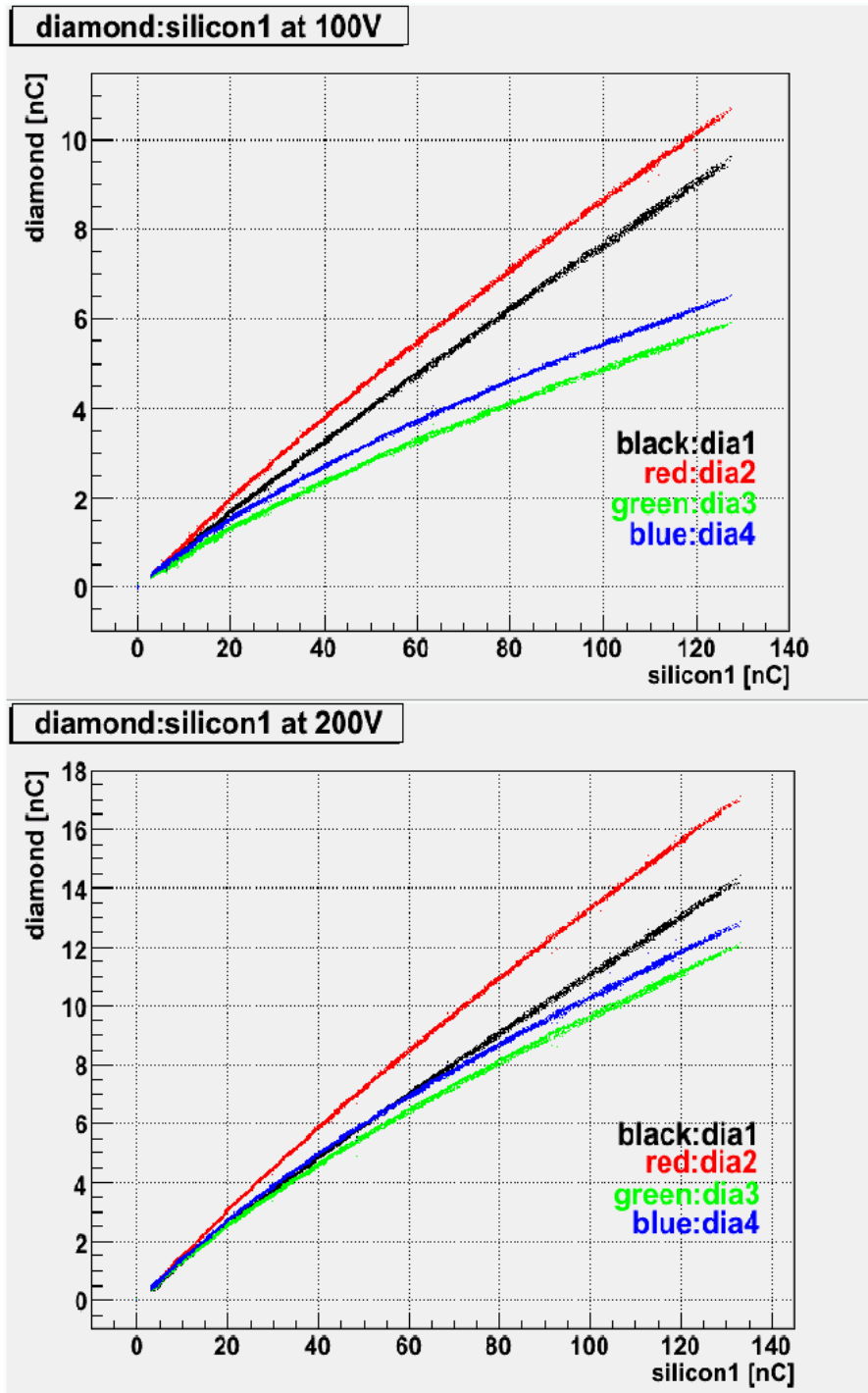


図 5.23: CVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia[nC] にとった。(上)バイアス 100 V のとき。(下)バイアス 200 V のとき。

第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

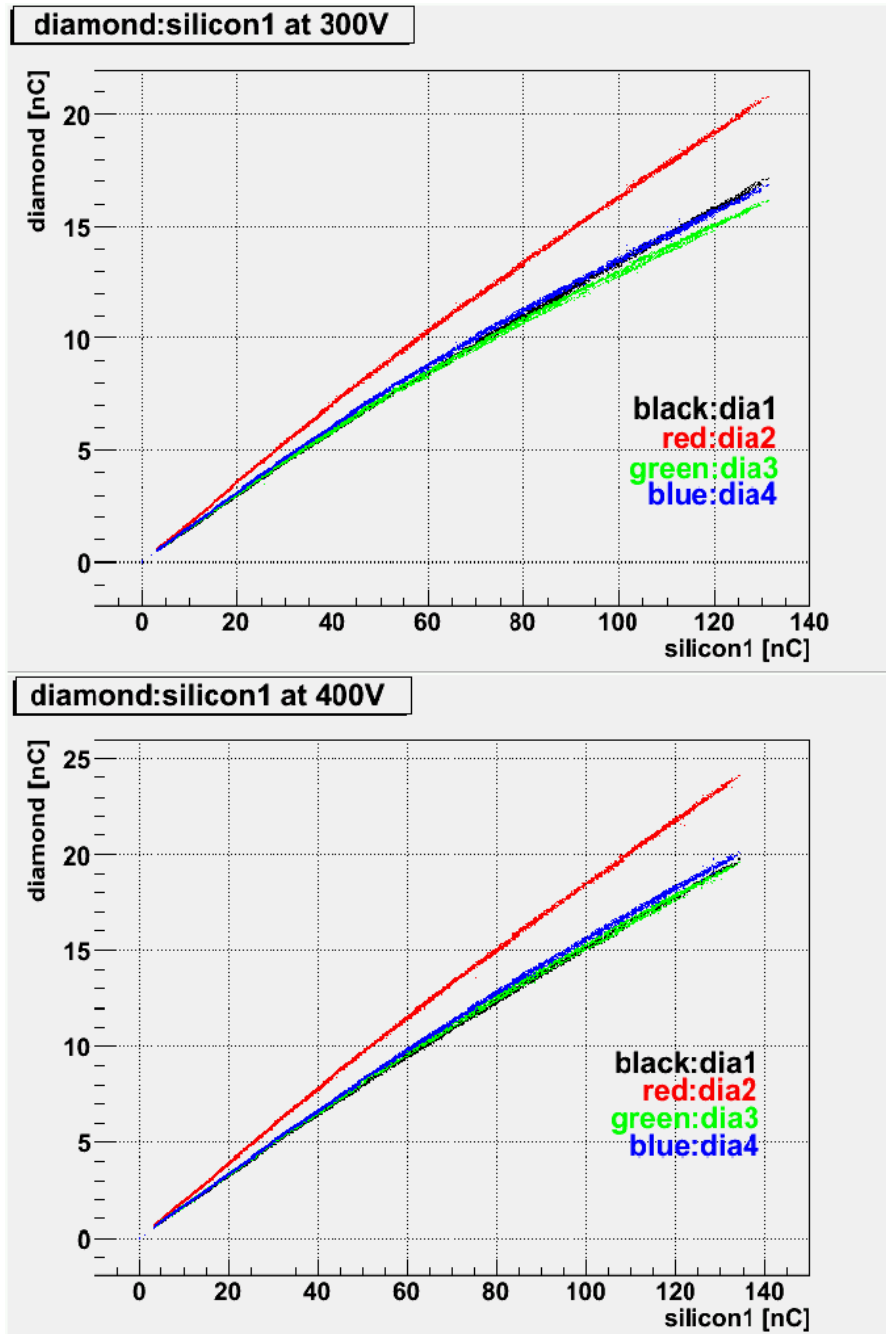


図 5.24: CVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia[nC] にとった。(上) バイアス 300V のとき (下) バイアス 400V のとき

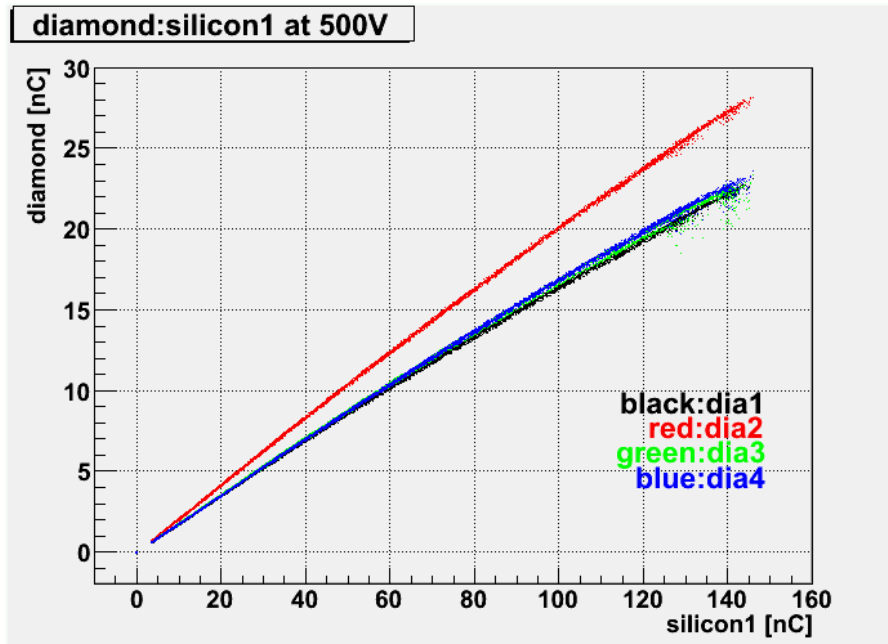


図 5.25: CVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia[nC] にとった。バイアス 500 V のとき。

#### 5.2.4 電極面積との関係性

前回までのビームテストにおいて、サンプルの応答の個体差の原因として、各サンプルのウェハの結晶構造の違いが考えられていた。

ここで、その他の原因を探るため、銅テープとカプトンテープおよびアクリル板で覆われていた CVD ダイヤモンド検出器そのものを見てみたところ、電極に使われている金が剥離しているものがあることが分かった。

その電極部分の写真を図 5.29 に載せる。図(上)は Dia1 の写真で、表裏を載せている。左の写真の電極部分で黒くなっているところが、剥がれたあとである。同図(中)は Dia2 の写真で、同じく表裏を載せている。Dia2 の電極はきれいなままであった。同図(下)は左が Dia3、右が Dia4 の写真である。この 2 つのサンプルの電極は、両面ともきれいなままであった。

各サンプルの元々の電極面積の大きさについては、Dia1 と 2、Dia3 と 4 がそれぞれ同程度の大きさになっていて、Dia1, 2 の電極面積の方が、Dia3, 4 のものよりも大きいものになっていた。

次に、電極の剥離を考慮した電極面積の比較を行った。Dia1 の剥がれていた電極の面積を計算し、他のサンプルとの面積比を、表 5.5 に示す。ここでは、Dia2 を基準にとった。

第5章 ビームテストによる CVDダイヤモンド検出器の性能評価

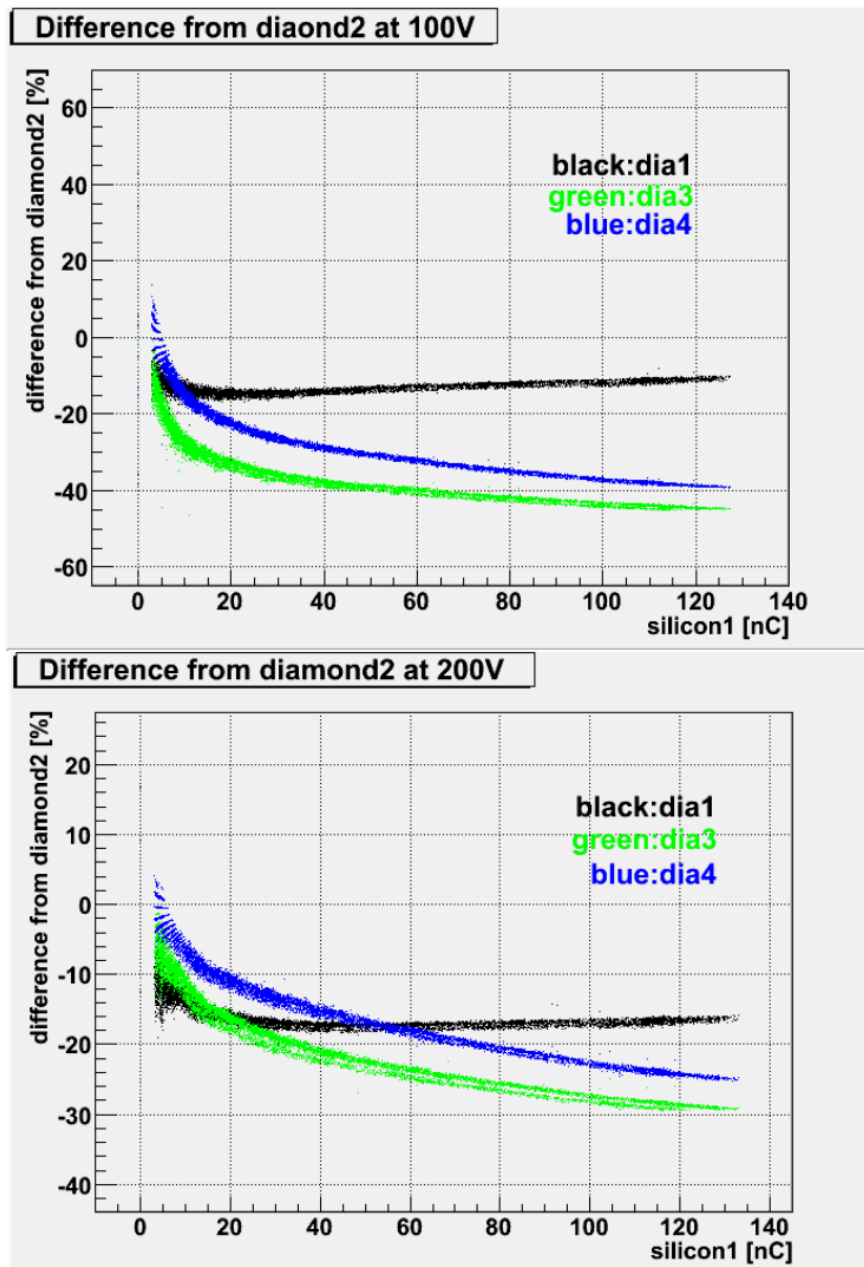


図 5.26: CVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia1, 3, 4 と Dia2 との比にとった。(上) バイアス 100 V のとき。(下) バイアス 200 V のとき。

ダイヤモンドサンプル	1	2	3	4
電極面積比	0.797	1	0.800	0.787

表 5.5: 電極面積の比較。Dia2 を基準にとってある。

5.2. ビームテスト (2007年6月)

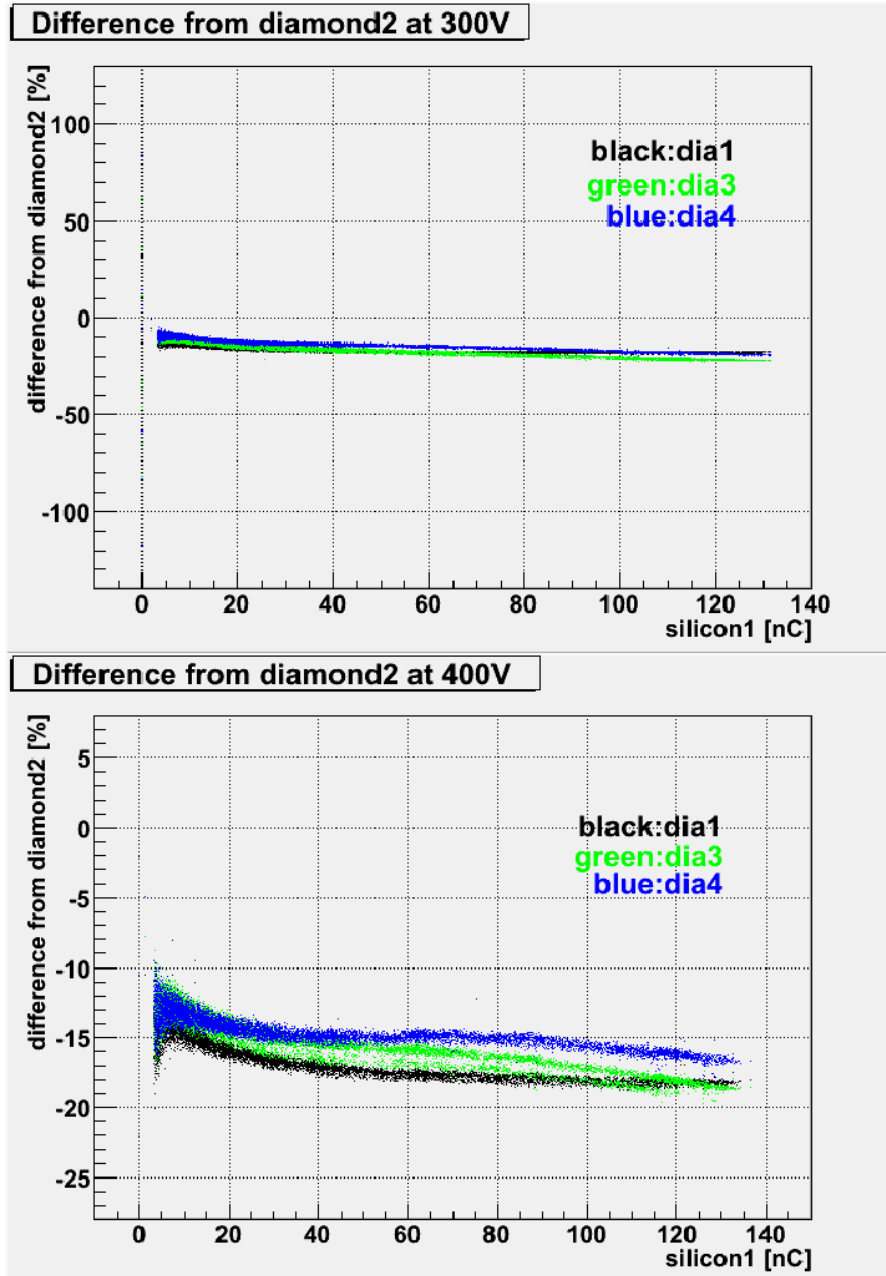


図 5.27: CVDダイヤモンド検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia1, 3, 4 と Dia2 との比にとった。(上)バイアス 300 V のとき。(下)バイアス 400 V のとき。

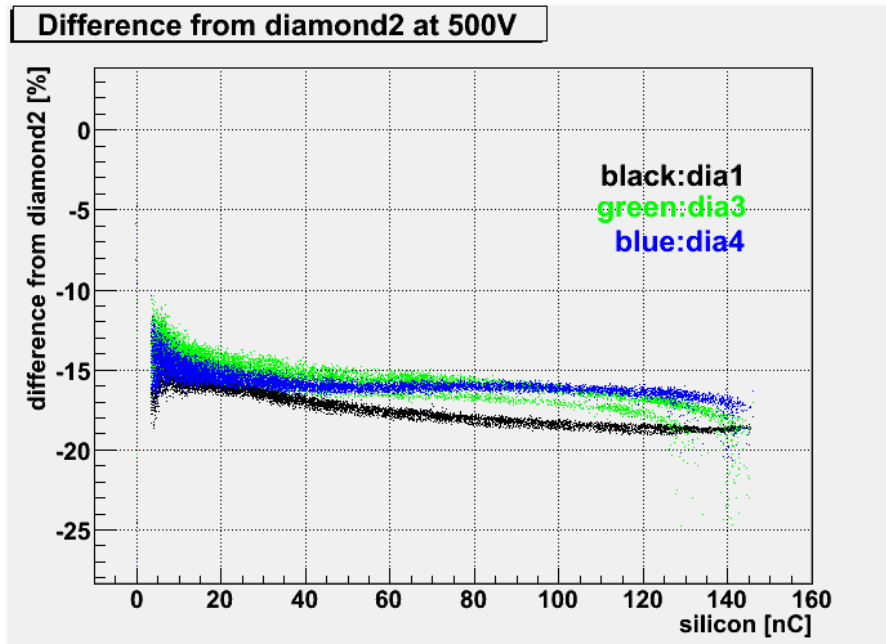


図 5.28: CVD ダイヤモンド 検出器サンプルのシグナル比較。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia1, 3, 4 と Dia2 との比にとった。バイアス 500 V のとき。

この面積比を基に、各サンプルの収集電荷量の見積り値を計算した。ここで Dia1 に関して、実際には片面の電極の剥離しかないが、そこから考えられる電場と収集電荷量との関係を計算するのは難しいので、両面とも同じように剥がれているものとして考えた。

その見積り値と各サンプルとを比較したものを図 5.30、図 5.31 に示す。

これらの図から、印加するバイアスを上げるにつれて各サンプルの収集電荷量の比が、電極面積の違いから見積もった収集電荷量の値に近づいていることが分かる。

### 5.2.5 結果

以上の結果をまとめる。

印加バイアス 500 V において、応答の個体差は約 15~20% となった。

次に、電極部分を見てみたところ、電極がきれいな場合 (Dia3, 4) と電極が剥がれている場合 (Dia1) とでは印加するバイアスの変化による挙動の違いも見られた。その原因としては、Dia1 の電極の剥がれ方が複雑であったことから、電極の剥がれ方によるものではないかと考えられる。

また、印加バイアスを上げるにつれ、各サンプルの収集電荷量の比が電極面積からの見積り値に近づいていることから、今まで見られていた応答の個体差はサンプルの電極面積



5.2. ビームテスト (2007年6月)



図 5.29: CVD ダイヤモンド 検出器サンプルの電極写真。(上) Dia1。 (中) Dia2。  
(下) Dia3, 4。

第5章 ビームテストによるCVDダイヤモンド検出器の性能評価

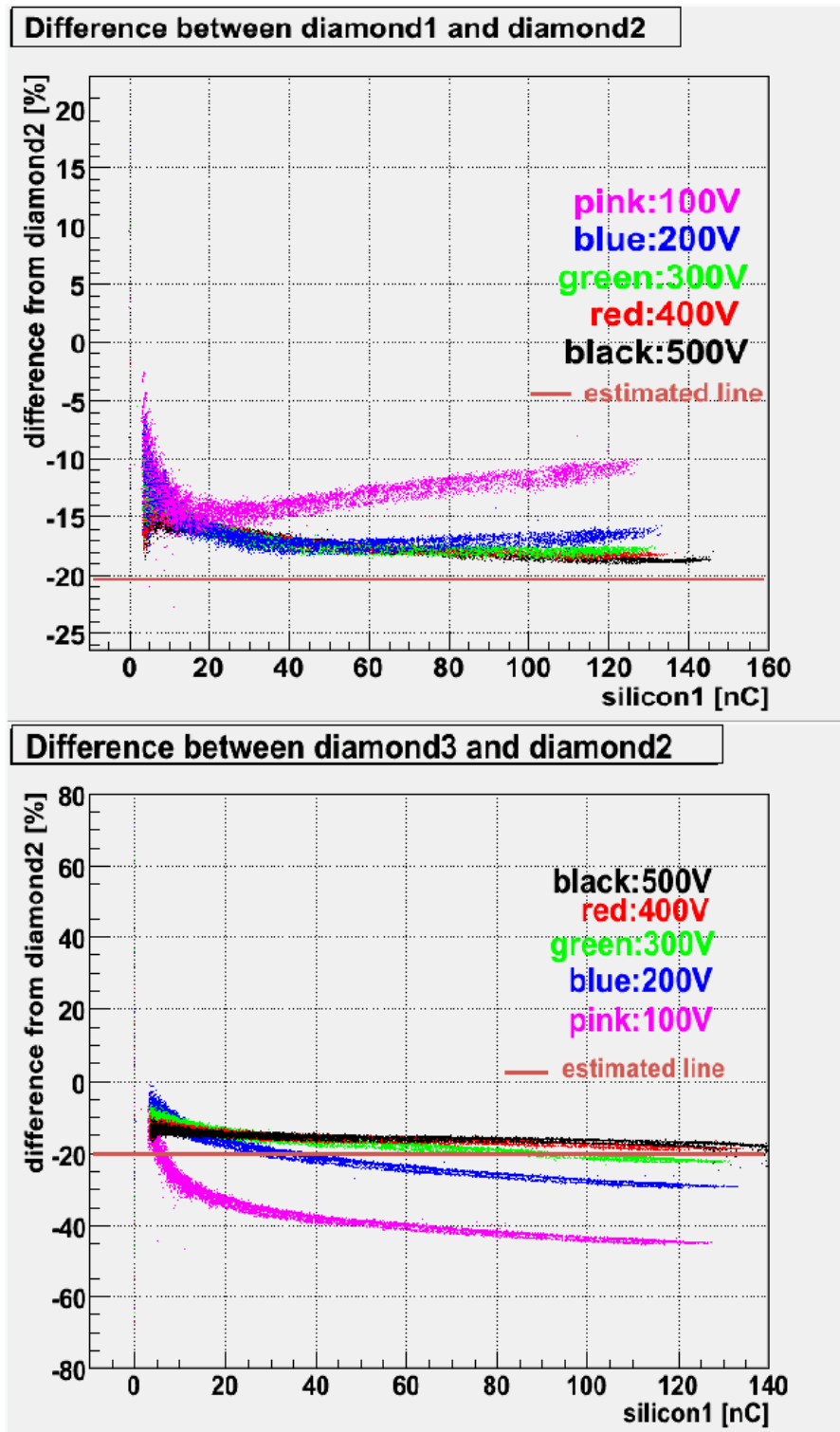


図 5.30: 面積比から見積もった収集電荷量の比。(上) Dia1 について、(下) Dia3 について。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia2 との比にとった。

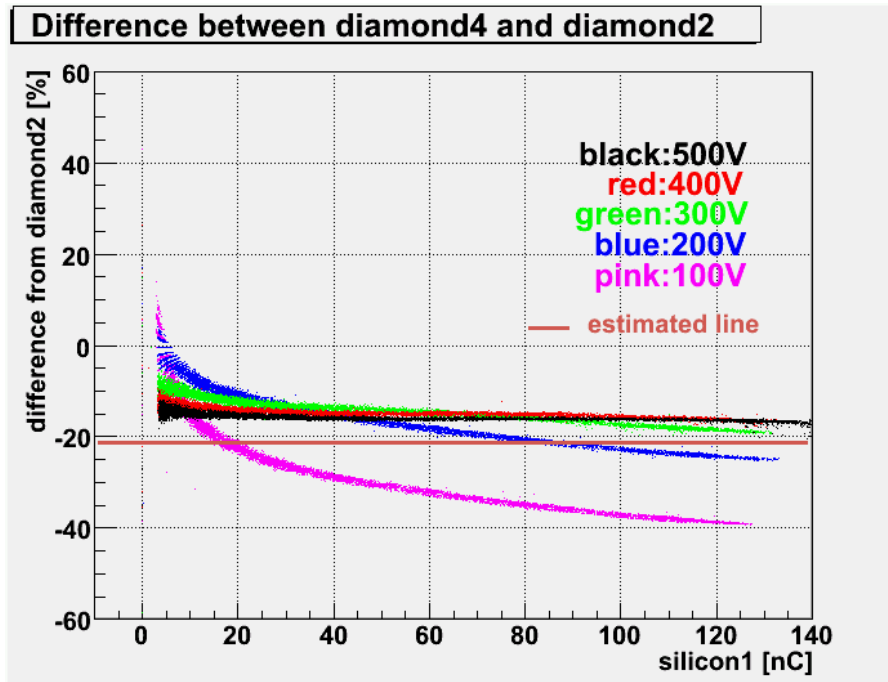


図 5.31: 面積比から見積もった収集電荷量の比。Dia4 について。横軸を Si1[nC]、縦軸を Dia2 との比にとった。

によるものだと考えられる。

## 第6章 ミューオンモニターのデザイン

### 6.1 検出器の配置とチャンネル数、プロファイル中心の決定精度

第5章の結果から、検出器の測定誤差は、CVDダイヤモンド検出器について $\pm 1.8\%$ 以内であることが分かった。第3.3.2小節のシミュレーション結果(図3.9(下))から、このとき図3.9(上)の(A)、(B)、(C)の場合の系統誤差はそれぞれ、 $\sigma(dr)=1.8, 1.7, 1.4[\text{cm}]$ となっており、どの配置の場合についてもミューオンモニターに対する要請( $\sigma(dr)\leq 3\text{ cm}$ )を満たしていることが分かる。よって、これらの配置のうち最もチャンネル数の少ない(A)を採用することにした。チャンネル数は13チャンネルとなっている。

## 第7章 結論と今後

T2K 長基線ニュートリノ振動実験のためのミュオンモニターにおける CVD ダイヤモンド検出器についての研究を行った。

まず、T2K 実験においてミュオンモニターに要請される精度を満たすような検出器の配置やチャンネル数について、シミュレーションの結果からとビームテストの結果を用いて決定した。ミュオンモニターに要請される値は、ミュオン位置プロファイル中心を 3 cm 以上の精度でバンチごとに測定することである。結果、ミュオンモニターの覆うサイズは  $150 \times 150 \text{ cm}^2$  で、チャンネル数は 13 チャンネルと決定した。

CVD ダイヤモンド検出器については、ビーム照射開始時には応答が小さく、それから徐々に安定点まで立ち上がるという特性があり、さらにその warm-up 時間はサンプルごとに異なっており、今回測定した 4 つのサンプルの内 2 つは約 5 秒、別の 2 つは約 3 分であった。また、5 分の間隔を空けて測定した場合にも warm-up 時間があり、それぞれ約 5 秒と約 20 秒であった。しかし、後の 1 時間は  $\pm 2\%$  の変動で安定に動作することが分かった。また、応答のリニアリティを良くするため、動作電圧は最大許容電圧の 500V にする。また、CVD ダイヤモンド検出器の応答は速く ( $\sim 50 \text{ nsec}$ )、バンチビとの測定が可能である (T2K ビームのバンチ間隔 ( $\sim 700 \text{ nsec}$ ))。応答の個体差については、サンプルごとの結晶構造の違いによるものと考えられていたが、今回各サンプルの電極面積の違いが見付かりそれとシグナルとの関係性について検証したところ、収集電荷量と電極面積が関係しており、個体差の原因となっていると思われる結果となった。

また、今後については、

- より多くのダイヤモンド検出器サンプルについてのテスト
- T2K 実験におけるミュオンモニター準備と製作
- 2009 年 4 月に T2K 物理ラン開始予定

のようになっている。

## 付 録 A 電磁ホーン

ここでは、T2K 実験の標的施設に設置される電磁ホーンについて述べる。

ニュートリノは中性レプトンであり軌道の制御ができないため、その親の  $\pi$  中間子の軌道を制御する必要がある。しかし、陽子ビームをグラファイト標的に照射して生成された  $\pi$  中間子は、ばらばらの方向を向いている。そのため、この  $\pi$  中間子の向きをそろえるために電磁ホーンという装置で収束させる。

図 A.1 に電磁ホーン の概念図を示す。電磁ホーンはアルミニウムの管が二重になった装置で、内側の管から電流を流し、端板を通して外側の管で戻すというものである。この電流によって、内管と外管の間には内管に巻き付くように磁場が発生し、この磁場によって、ばらばらの方向を向いている  $\pi$  中間子は前方を向くように曲げられるのである。このアルミ管の形が楽器のホルンに似ていることから、電磁ホーンと呼ばれている。

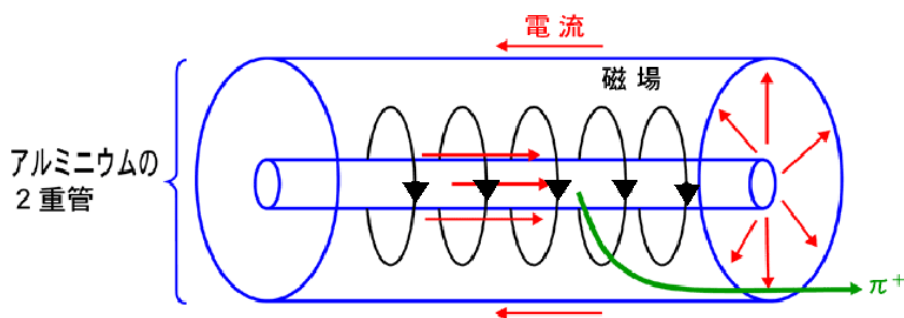


図 A.1: 電磁ホーン の概念図。

図 A.2 に第 1 電磁ホーン の断面概念図を示す。 $\pi$  中間子を収束させるには 2T の磁場が必要で、その磁場を発生させるためには 320 kA という大電流を流す必要がある。このような大電流を流し続けると巨大なジュール熱が発生しアルミニウムが融けてしまうため、陽子ビームのパルスに合わせて、100 分の 1 秒程度の瞬間的なパルス電流を発生させる。その瞬間、発生した磁場と管を流れる電流が電磁相互作用 (ローレンツ力) を起こして、20 気圧の圧力が内管にかかることになる。このため、パルス電流を流すたびにローレンツ力によって弾かれた金属が、パツーンという大きな音と振動を發する。冷水ノズルが

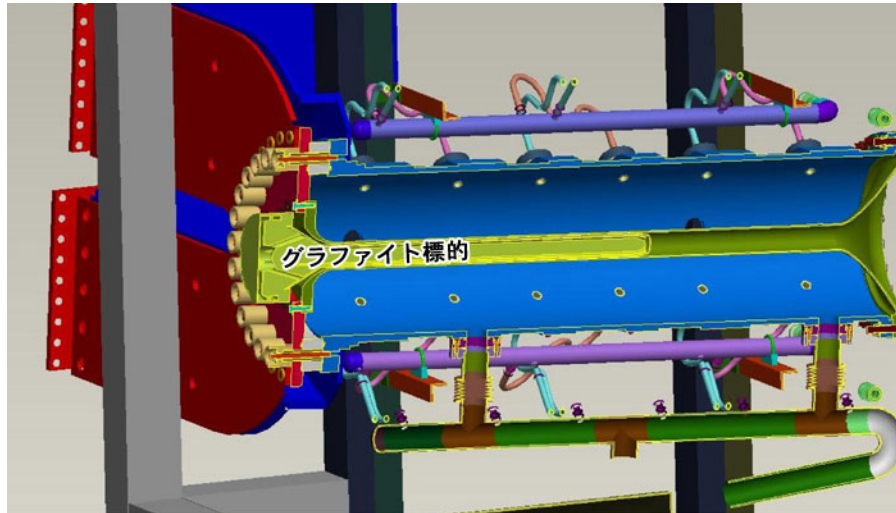


図 A.2: 第1 電磁ホーンの断面概念図。内管の中心に挿入されているのが、グラファイト標的である。左側の赤い部分を通して電流が流される。外管にはジュール熱やビームによって発生する熱を水冷するためのノズルが付いている。

曲線を描いているのは、この振動を吸収するために設計されたものである。

図 A.3 に、電磁ホーンの写真を載せる。

付録 A 電磁ホーン



図 A.3: 電磁ホーンの写真。(上)全体写真。(下)外管および冷水ノズル。



## 謝辞

本研究にあたって、本研究室の奥沢 徹先生、清矢 良浩先生、山本 和弘先生、ならびに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 高エネルギー物理学研究室の松岡 広大氏、久保 一氏には多大なご迷惑をおかけしてしまいました。、お詫び申し上げます。

先生方には、最後まで適切なご指導とお心遣いや励ましをいただき、心から感謝致します。また、T2K 実験という大きな実験の一端に触れることができ嬉しく感じています。ありがとうございました。

また、現在 fermi 研究所に滞在中の脇坂 隆之氏、社会人になられた柳田 大樹氏には、生活面でも色々お世話になりました。同研究室で同じ学年の濱口 敦成氏には、一緒に KEK のシフトに行ったりと、色々お世話になりました。同研究室の田代 一晃氏、篠原 奈生氏、吉田 美奈氏は若いパワーで楽しく過ごさせてもらいました。重力波実験物理学研究室の徳田 充氏、宇宙・素粒子実験物理学研究室の中川 真介氏、中山 雅央氏とはいつも一緒に話をしたり食事をしたりとお世話になりました。影ながら支えてくれた家族にも感謝したいと思います。

皆様、本当にありがとうございました。これから、支えて下さった皆様のためにも、頑張っていきたいと思ひます。

## 関連図書

- [1] T2K 長基線ニュートリノ振動実験 ミューオンモニターの開発,  
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 高エネルギー物理学研究室 松岡広大, 修士論文,( 2007 )
- [2] Beam test(2007/6),  
ND280\_kubo\_0808.pdf, 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 高エネルギー物理学研究室 久保一,
- [3] Diamond detector,  
J.Conway et al., 'The Status of Diamond Detectors and a Proposal for R & D for CDF Beyond Run II', CDF/DOC/TRACKING/PUBLIC/4233, July 10, 1997
- [4] Diamond detector,  
The RD42 Collaboration, 'Review of the Development of Diamond Radiation Sensors', May 25, 1999
- [5] Diamond detector,  
Property of radiation detector using synthetic diamond, Tukasa ASO
- [6] Diamond detector,  
ダイヤモンド薄膜, 犬塚直夫・澤邊厚仁 著
- [7] Diamond detector,  
ダイヤモンド薄膜 -非平衡状態からの出発, 犬塚直夫 著
- [8] Neutrino oscillation,  
Donald H.Perkins, ' Introduction to High Energy Physics -4th edition-' GAMBRIDGE
- [9] Neutrino oscillation,  
Halzen, F., Martin, Alan D. , 'Quarks and leptons : an introductory course in modern particle physics'

- [10] Neutrino oscillation,  
<http://www.kek.jp/newskek/2005/julaug/k2k-5.html>
- [11] Electromagnetic Horn,  
<http://www.kek.jp/newskek/2006/julaug/T2Kmagnet2.html>