

K2K実験における
シンチレーティングファイバー飛跡検出器の
ファイバー位置較正と
イメージンテンシファイアの安定性

神戸大学 自然科学研究科 博士前期課程 物理学専攻
恩地正裕

平成12年2月10日

概要

1999年4月、ニュートリノ振動現象の検証を目的とした「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」(KEK-PS E362、通称、K2K実験)が開始された。

K2K実験では、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(通称 KEK)内の12GeV-陽子シンクロトロンを用いてニュートリノビームを生成、同機構内の前置検出器およびそこから250km離れた岐阜県神岡町にある水チェレンコフ検出器のスーパーカミオカンデに向けて発射し、両検出器でのニュートリノの数とエネルギー分布を比較することにより、ニュートリノ振動現象を検証する。

前置検出器は複数の検出器で構成されており、その一つとして、ニュートリノ反応により生成される2次荷電粒子の飛跡の検出を目的とした、シンチレーティングファイバー飛跡検出器(Scintillating Fiber Tracker、以下 SFT)を設置している。SFTは、水標的とシート状に並べられたシンチレーティングファイバー(Scintillating Fiber、以下ファイバー)の多層サンドイッチ構造をもつ飛跡検出器である。

SFTにおいて、ファイバーは、イメージインテンシファイアチューブ(Image Intensifier Tube、以下 IIT)および光学レンズ、CCDカメラからなるIIT-CCDチェーンに接続されており、検出器内を荷電粒子が通過することにより発生した光は、最終的にCCD画像として読み出される。そのため、CCD画面上でのファイバーの位置を把握することは必要不可欠であり、その精度は検出器の性能を左右する。

K2K実験では、CCD画面上でのファイバー位置較正に、特定のファイバー(fiducial fiberと呼ぶ)を光らせて、その位置を測定し、そこから他のファイバーを算出する手法を用いている。本論文では、そのfiducial fiberの位置較正の方法の開発およびその評価を行い、CCD座標のx軸方向に対しては全fiducial fiberの99.6%が0.5ピクセル以内、y軸方向に対しては全fiducial fiberの99.3%が0.5ピクセル以内の精度をもつことを確かめた(1ピクセルはIIT表面で $130\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ に相当、ファイバー直径は約 $700\mu\text{m}$)。

また、実験期間中のCCD上でのファイバー位置の安定性を確かめるために、較正されたファイバー位置の時間変化を調べ、30日間のfiducial fiberの移動は、その全体の99%以上が1ピクセル以内であり、この期間内での移動は実験を遂行するのに必要な精度に比べ十分に小さいことを確かめた。

続いて、30日間の実験期間の前後に取った宇宙線データの比較を行い、21本のIITのうち、20本のヒット検出効率の変動が4%以下であることを確認し、実験期間中のIITの応答が安定であることを確かめた。

目次

第 1 章	序論	6
1.1	ニュートリノ振動	6
1.1.1	ニュートリノ	6
1.1.2	ニュートリノ振動	7
1.2	ニュートリノ振動実験	8
第 2 章	つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K 2 K 実験)	10
2.1	実験の概要	10
2.2	ニュートリノビームの生成	11
2.3	前置検出器	11
2.3.1	1kt 水チェレンコフ検出器	11
2.3.2	Fine Grained Detector	15
2.4	後置検出器 (スーパーカミオカンデ)	16
第 3 章	シンチレーティングファイバー飛跡検出器	17
3.1	シンチレーティングファイバー	17
3.2	シンチレーティングファイバーシート	19
3.3	シンチレーティングファイバー飛跡検出器	19
3.4	ファイバーバンドル	20
3.5	読み出しシステム	20
3.5.1	IIT - CCD チェーン	20
第 4 章	CCD 画面上でのシンチレーティングファイバー位置較正について	28
4.1	ファイバー位置較正の概要	28
4.2	Fiducial fiber table の作成	28
4.2.1	Fiducial fiber への EL 光の照射	28
4.2.2	Fiducial fiber table の作成方法	29
4.2.3	算出した fiducial fiber の位置のもつ精度	32
4.2.4	Fiducial fiber の補完	32
4.3	Fiducial fiber 以外のファイバーの位置較正	39
4.3.1	Fiducial fiber がある層でのファイバーの位置較正	39
4.3.2	Fiducial fiber がない層でのファイバーの位置較正	41
4.4	位置較正後の飛跡再構成	42

第 5 章	イメージインテンシファイアの安定性	45
5.1	ファイバーバンドルの位置安定性	45
5.1.1	CCD 座標上でのファイバーバンドルの移動	45
5.1.2	ファイバー位置較正の間隔	45
5.2	IIT のヒット検出効率安定性	55
第 6 章	結論	66
付 録 A	種々の作業を行った際の fiducial fiber の移動	67
	謝辞	69
	参考文献	70

目次

2.1	つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験	10
2.2	K2K 実験が探索する振動のパラメータの領域	12
2.3	ニュートリノビームライン	13
2.4	前置検出器	14
2.5	スーパーカミオカンデ	16
3.1	一般的なプラスチックシンチレーティングファイバー	18
3.2	K2K 実験で使用される「SCSF-78M改良11」の模式図	19
3.3	シンチレーティングファイバー中におけるシンチレーション光の伝播	20
3.4	ファイバーシート	22
3.5	ハニカム板とファイバーシート	23
3.6	シンチレーティングファイバー飛跡検出器のサンドイッチ構造	24
3.7	ファイバーバンドルの製作過程	25
3.8	ファイバーバンドル	26
3.9	IIT－CCD チェーン	27
3.10	シンチレーティングファイバー飛跡検出器	27
4.1	EL でのファイバー照射方法	29
4.2	EL データのセットアップ	30
4.3	Fiducial fiber の CCD 画面上での積分画像の例	31
4.4	スムージング	33
4.5	ピーククラスタの範囲の決定方法	33
4.6	Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 1	34
4.7	Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 2	34
4.8	Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 3	34
4.9	Fiducial fiber map の例	35
4.10	繰り返し行った 4 度の測定より求められた fiducial fiber の位置の標準偏差の分布	36
4.11	平行四辺形の仮定を利用した fiducial fiber の算出	37
4.12	平行四辺形の仮定を利用して求めた fiducial fiber の位置と実際の位置との差	38
4.13	直線性を仮定した fiducial fiber の算出	39
4.14	直線上に等間隔で並んでいることを仮定して求めた fiducial fiber の位置と実際の位置との差	40

4.15	ファイバーの中での fiducial fiber の位置	43
4.16	ファイバーの内挿の方法 (等間隔:直線と 2 次関数)	43
4.17	ファイバーバンドル拡大写真	43
4.18	FGD 内イベントの例	44
5.1	IIT1,2,3,4 の fiducial fiber の動き (36 日間)	46
5.2	IIT5,6,7,8 の fiducial fiber の動き (36 日間)	47
5.3	IIT9,10 の fiducial fiber の動き (36 日間)	48
5.4	IIT13,14,15,16 の fiducial fiber の動き (50 日間)	49
5.5	IIT17,18,19,20 の fiducial fiber の動き (50 日間)	50
5.6	IIT21,22,23,24 の fiducial fiber の動き (50 日間)	51
5.7	fiducial fiber の動き (X IIT)	52
5.8	fiducial fiber の動き (Y IIT)	53
5.9	全についての fiducial fiber の移動の分布	54
5.10	CCD 画面上でのヒット認識	57
5.11	IIT のヒット検出効率の安定性を見るために選択した宇宙線イベントの例	58
5.12	各 IIT のヒット数の分布 (1)	59
5.13	各 IIT のヒット数の分布 (2)	60
5.14	IIT のヒット検出効率	61
5.15	IIT のヒット検出効率の変動	62
5.16	大きな変動があった IIT のピクセルクラスターサイズの分布	63
5.17	各層のヒット検出効率 (X 射影)	64
5.18	各層のヒット検出効率 (Y 射影)	65
A.1	近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT1)	67
A.2	近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT4)	67
A.3	近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT6)	68
A.4	近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT7)	68
A.5	近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT11)	68

表 目 次

1.1	クォークとレプトン	6
1.2	ニュートリノ質量の上限値	6
3.1	SCSF-78M改良11の材質およびその屈折率	18

第1章 序論

1.1 ニュートリノ振動

1.1.1 ニュートリノ

現在の素粒子の標準理論では、物質は6種類のクォークと6種類のレプトンより構成されていると考えられている。レプトンのうち電荷をもたないものをニュートリノ (ν) と呼び、電荷をもつ電子 (e)、ミュー粒子 (μ)、タウ粒子 (τ) に対応して、 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ と呼ばれている (表 1.1)。

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u	c	t
	d	s	b
レプトン	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ

表 1.1: クォークとレプトン

ニュートリノは、強い相互作用をせず、また、電荷をもたないため、電磁相互作用もしない。そのため、他の物質との相互作用は極めて弱く、観測しにくい粒子である。

素粒子の最も基本的な性質の一つとして質量が挙げられる。しかし、ニュートリノの質量については、現在までに様々な直接的測定が行われてきたが、以下に示すように、その上限値が得られているに過ぎない。

m_{ν_e}	$< \sim 10 \text{ eV}$
m_{ν_μ}	$< 0.17 \text{ MeV}$
m_{ν_τ}	$< 18.2 \text{ MeV}$

表 1.2: ニュートリノ質量の上限値 [1]

現在の素粒子の標準理論はニュートリノの質量をゼロと仮定して構築されている。しかし、その理論的な根拠はなく、ニュートリノが有限の質量をもつことを確かめることがで

できれば、現在の標準理論を越える新しい物理を示唆することとなる。

1.1.2 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、空間を伝わる間に他の種類のニュートリノに変化してしまう現象である。

この現象は、以下の2つの条件が満たされた場合に起りうる。

- (1) 弱い相互作用の固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) が質量の固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) の混合状態である。
- (2) ν_1, ν_2 および ν_3 のうち、少なくとも一組が異なる質量をもつ。

以下、簡単のために、2種類のニュートリノ (ν_μ, ν_τ) 間の振動について考える。

弱い相互作用の固有状態 (ν_μ, ν_τ) が、質量の固有状態 (ν_1, ν_2) と混合角 θ で混合している場合、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{cases} |\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \\ |\nu_\tau\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \end{cases} \quad (1.1)$$

真空を伝播する質量の固有状態の時間発展はシュレーディンガー方程式により表すことができる。したがって、質量の固有状態 ($\nu_i(t)$) ($i=1,2$) に対するシュレーディンガー方程式は、次式のように記述できる。ここで、 E_i はそれぞれの固有状態のエネルギーである。

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_it}|\nu_i(0)\rangle \quad (1.2)$$

式 (1.1) と式 (1.2) より、時間 t 後の ν_μ の状態は以下の式で表される。

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta e^{-iE_1t}|\nu_1(0)\rangle + \cos\theta e^{-iE_2t}|\nu_2(0)\rangle \quad (1.3)$$

これより、ある時刻で発生した ν_μ が、時間 t 後に ν_μ として観測される確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ は、式 (1.4) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu(t) | \nu_\mu(0) \rangle|^2 \\ &= |\sin^2\theta e^{iE_1t} + \cos^2\theta e^{iE_2t}|^2 \\ &= \sin^4\theta + \cos^4\theta + \sin^2\theta\cos^2\theta(e^{i(E_1-E_2)t} + e^{-i(E_1-E_2)t}) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{E_1 - E_2}{2} t \end{aligned} \quad (1.4)$$

ニュートリノの質量 m_i が運動量 p に比べて非常に小さい場合、エネルギー E_i は、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \sim p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.5)$$

と近似することができる。式 (1.5) を式 (1.4) に代入すると、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ は次式のようにになる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{m_1^2 - m_2^2}{4p} t \quad (1.6)$$

さらに、 $E \sim p$ と近似し、 $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ 、飛行距離 $L(t)$ を用いると式 (1.6) は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV] L(t) [km]}{E [GeV]} \right) \quad (1.7)$$

となる。よって、 ν_μ が距離 $L(t)$ 進む間に ν_τ に振動する確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV] L(t) [km]}{E [GeV]} \right) \quad (1.8)$$

と表すことができる。

式 (1.8) は、種類の違うニュートリノが、有限な質量差をもち、且つゼロでない混合角をもつ場合にのみ、ニュートリノ振動が起ることを示しており、ニュートリノ振動の存在は、3種類のニュートリノうち、少なくとも一つのニュートリノは質量をもつことの証拠となる。

ニュートリノ振動が観測されれば、その振動確率から、振動パラメーター $\sin^2 2\theta$ 、 Δm^2 を限定することができる。

1.2 ニュートリノ振動実験

これまでに、ニュートリノ振動現象を検証するために、様々な実験が行われてきている。実験に利用されるニュートリノの生成過程も様々で、自然現象により生成されたニュートリノや人工的に生成したニュートリノを使用したものがある。このうち、人工的に生成したニュートリノを利用した実験には、原子炉からのニュートリノを利用した Bugey[2] や Chooz[3]、加速器による高エネルギーニュートリノを利用した CHORUS[4] や NOMAD[5]、また、中間子ファクトリーを利用した低エネルギーニュートリノを利用した KARMEN[6] や LSND[7] 等がある。また、自然現象により生成されたニュートリノには、太陽の内側で生成される太陽ニュートリノや宇宙線と大気反応で生成される大気ニュートリノがあるが、それらを利用した実験として、SAGE[8] や Gallex[8]、IMB[9] や Fréjus[10]、NUSEX[11]、Soudan-II[12]、カミオカンデ [13]、スーパーカミオカンデ [14] 等がある。

これらの実験は、式 (1.8) における L/E の値が大きい長基線 (long-baseline) ニュートリノ振動実験と、 L/E の値が小さい短基線 (short-baseline) ニュートリノ振動実験に大別される。このうち、長基線ニュートリノ振動実験は、 Δm^2 の小さい振動パラメーター領域を探索しやすいという特徴をもち、また、短基線ニュートリノ振動実験は、ニュートリノの飛行距離が短い環境で実験が可能のため、高い統計を得ることが出きるため、 $\sin^2 2\theta$ の小さな振動パラメーター領域を探索しやすいという特徴をもち、

1998年、スーパーカミオカンデが、大気ニュートリノのフラックスの天頂角分布が ν_μ が飛行中に ν_e 以外の他のニュートリノに変わってしまうと考えなければ説明できないことを発表し、ニュートリノ振動の存在を証明した [14, 15]。

現在、この結果が十分に信頼できるものであることを確めるため、加速器を使って人工的に生成されたニュートリノを使った実験の結果が待たれている。MINOS[16]、OPERA[17]、ICANOE[18] など幾つかの実験が現在も計画中であるが、それに先駆けて、1999年よりK2K実験が開始されている。第2章では、このK2K実験について説明する。

第2章 つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K 2 K 実験)

2.1 実験の概要

つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (KEK－PS E362、以下 K2K 実験) では、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) 内にある 12GeV 陽子シンクロトロンで加速された陽子を使い、平均エネルギー 1.4GeV のミュオンニュートリノビームを生成し、250km 離れた岐阜県吉城郡神岡町にあるスーパーカミオカンデに向けて発射する。(図 2.1 参照)



図 2.1: つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K2K 実験)。茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構から約 250km 離れた岐阜県吉城郡神岡町のスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを発射する。

実験では、KEK 内に設置された、ビームモニターと前置検出器を用いて、生成直後の

ニュートリノビームを測定、250km 先にあるスーパーカミオカンデでのエネルギー分布を予想し、その分布と実際のスーパーカミオカンデでの観測と比較することにより、ニュートリノ振動現象を検証する。

図 2.2 に、 ν_μ から ν_τ への振動を考えた場合に、K2K 実験が探索することができる振動パラメータ領域を示す。

2.2 ニュートリノビームの生成

図 2.3 に、ニュートリノビーム生成のためのビームラインの概観を示す。12GeV 陽子シンクロトロンにより生成、加速された陽子は、西に 90 度、下方に 1 度曲げられて、スーパーカミオカンデの方向に向けられ、アルミニウム電磁ホーンマグネットに照射される。ホーンマグネットは、ビーム生成のための標的と収束装置を兼ねており、陽子とアルミニウム原子核内の核子の衝突により生成する正の電荷をもつ粒子が、より多くスーパーカミオカンデの方向に向けられるように設計されている [20]。

ホーンマグネットの後方にある 200m の崩壊トンネルを通過中に、生成された π^+ 粒子および K^+ 粒子は、



という反応で崩壊し、ニュートリノビームが生成される。崩壊トンネル通過後、未反応の陽子や未崩壊の π^+ 粒子、 μ 粒子などは、前置検出器までは到達しないように、ビームダンプと呼ばれる鉄や土などの吸収材で吸収される。

ホーンマグネット直後の π 粒子の運動量および角度分布は、リングイメージ型ガスチェレンコフ検出器 (π 粒子モニタ [21]) により測定される。また、崩壊トンネル直後には、崩壊からの μ^+ 粒子を測定するためのイオンチェンバー (μ 粒子モニタ) が設置されている。

2.3 前置検出器

前置検出器は、ニュートリノ生成のための標的から約 300m 後方に設置され、生成直後のニュートリノビーム特性を調べることをその目的としている。ここで ν_μ のエネルギー分布、 ν_e の混入率等を測定し、スーパーカミオカンデでの ν_μ のエネルギー分布を予想する。図 2.4 にその概観を示す。ニュートリノビーム上流から 1kt 水チェレンコフ検出器、Fine Grained Detector の順に設置されている。

2.3.1 1kt 水チェレンコフ検出器

半径 540.0cm、高さ 1225.0cm の円筒形リングイメージ水チェレンコフ型検出器。スーパーカミオカンデと同じ水標的、検出装置、解析方法を用いることで系統誤差を軽減している。

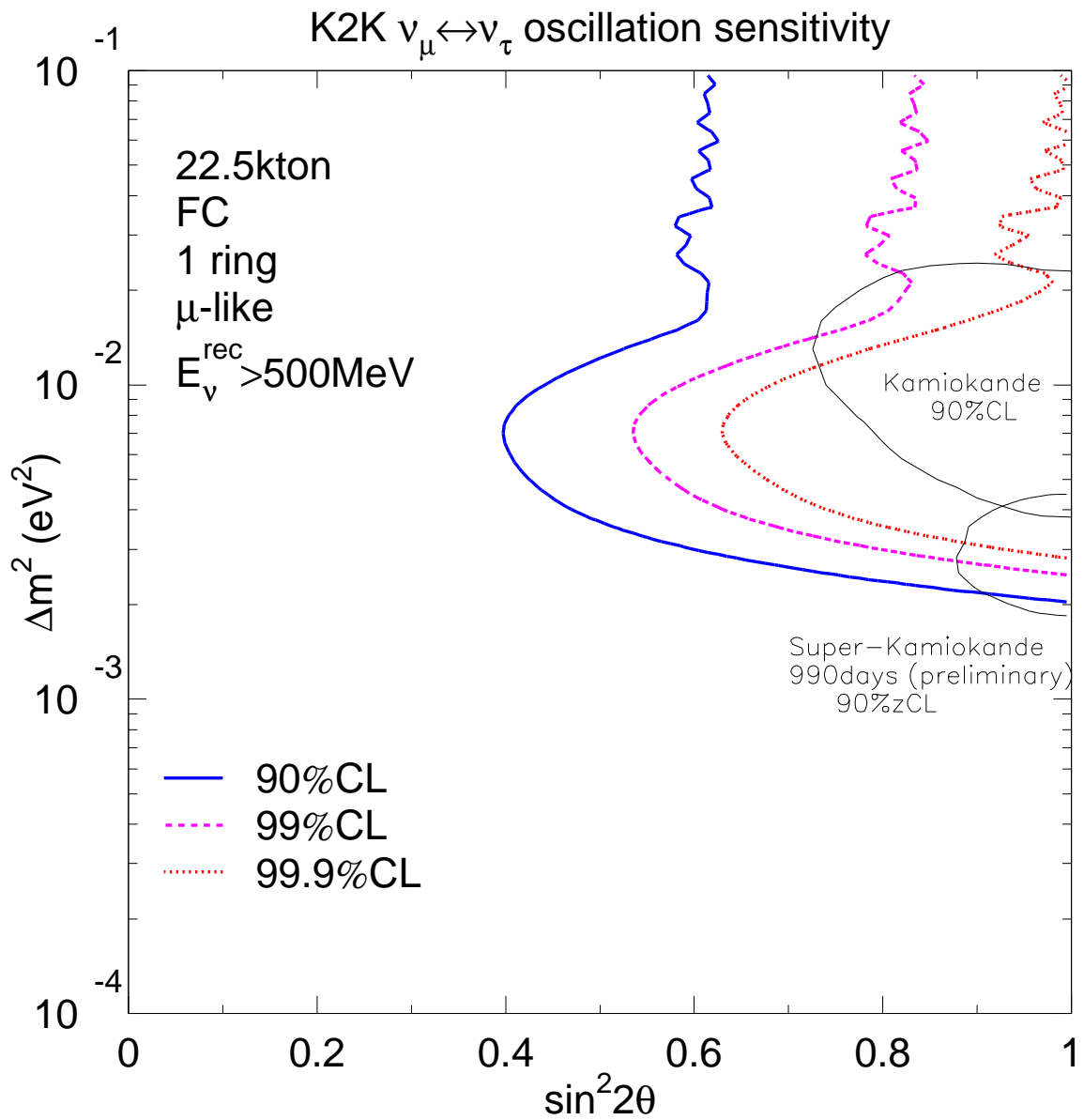


図 2.2: K2K 実験が探索する振動のパラメータの領域

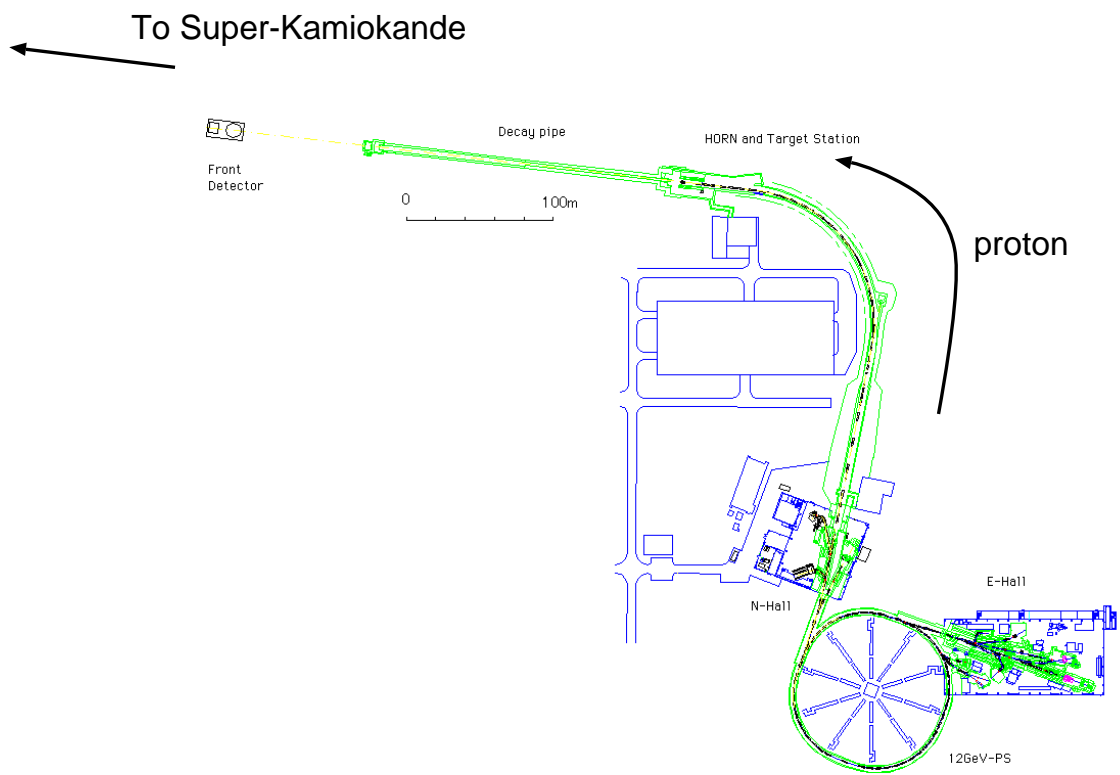


図 2.3: ニュートリノビームライン

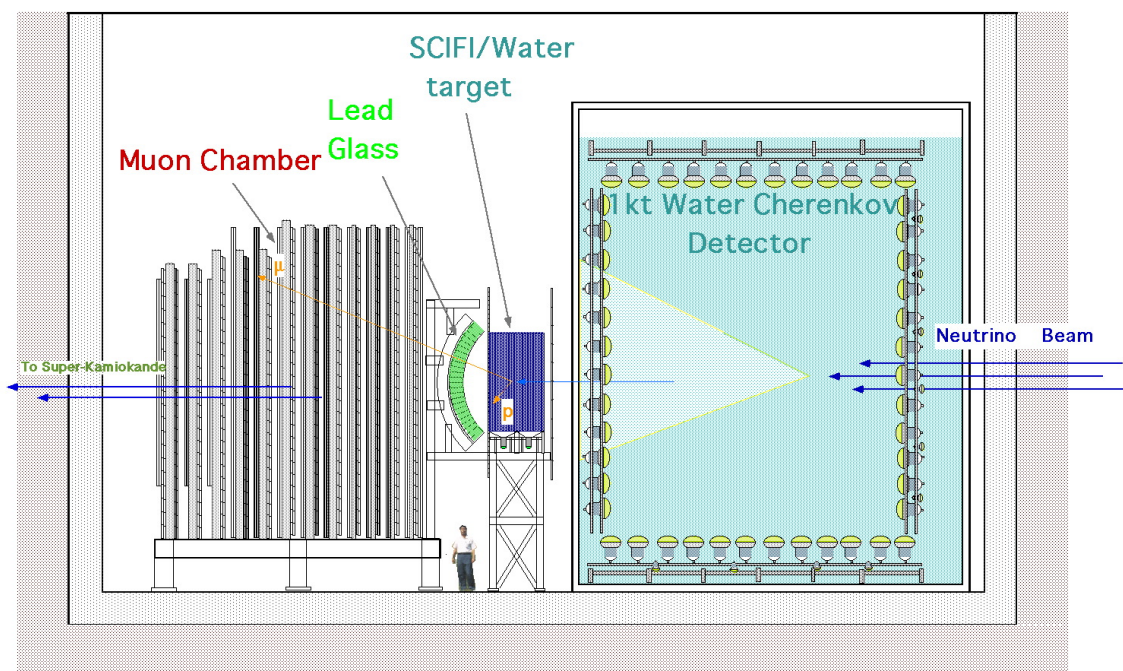


図 2.4: 前置検出器

ニュートリノビーム上流から 1kt 水チェレンコフ検出器、Fine Grained Detector の順に設置されている。Fine Grained Detector は、シンチレーティングファイバー飛跡検出器、VETO トリガーカウンター、鉛ガラスカロリメータ、 μ 粒子検出器からなる。

2.3.2 Fine Grained Detector

Fine Grained Detector の主な目的は、 ν_μ と水標的内の核子との荷電カレント準弾性散乱反応、

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (2.2)$$

の結果生成される μ^- 粒子の生成角とエネルギーを測定し、 ν_μ のエネルギー分布を再構成することである。(2.2) の反応の場合、 ν_μ のエネルギー (E_{ν_μ}) の再構成は、次式のようにしてなされる。

$$E_{\nu_\mu} = \frac{m_N E_\mu - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (2.3)$$

$m_N, m_\mu, p_\mu, E_\mu, \theta_\mu$ は、それぞれ、核子の質量、 μ 粒子の質量、運動量、エネルギー、生成角を表している。ただし、中性子の原子核内での運動は無視している [30]。

Fine Grained Detector は以下の 4 つの検出器からなる。

- 水標的/シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (S F T)

シンチレーティングファイバー飛跡検出器は、シート状にしたシンチレーティングファイバーと、アルミ容器に内包された水標的のサンドイッチ構造をもつ飛跡検出器である。主に (2.2) の反応点とそこからの μ 粒子の生成角の測定を目的としている。(第 3 章参照)。

- VETO トリガーカウンター [22]

VETO トリガーカウンターはシンチレーティングファイバー飛跡検出器の前後に設置され、 μ 粒子検出器のスタート信号の発信と、シンチレーティングファイバー飛跡検出器の上流からの荷電粒子イベントの除去のために使用されている。

- 鉛ガラスカロリメータ [23, 29]

鉛ガラス電磁カロリメータで、主にビームに混入している ν_e が水標的内の核子と荷電カレント準弾性散乱反応 (2.4) した結果生成される電子の同定およびそのエネルギーの測定を目的としている。

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p \quad (2.4)$$

- μ 粒子検出器

μ 粒子の飛跡の同定と、そのエネルギーおよび角度分布の測定を行う。縦 7.6m、横 7.6m、厚さ 0.1/0.2m の鉄板とドリフトチェンバーが交互に設置された、多層サンドイッチ構造になっている。

2.4 後置検出器（スーパーカミオカンデ）

スーパーカミオカンデは、50kton リングイメージ水チェレンコフ型検出器（図 2.5 参照）である。直径 39.3m、高さ 41.4m の円筒形の検出器で、岐阜県吉城郡神岡町、地下約 1000m のところに設置されている。

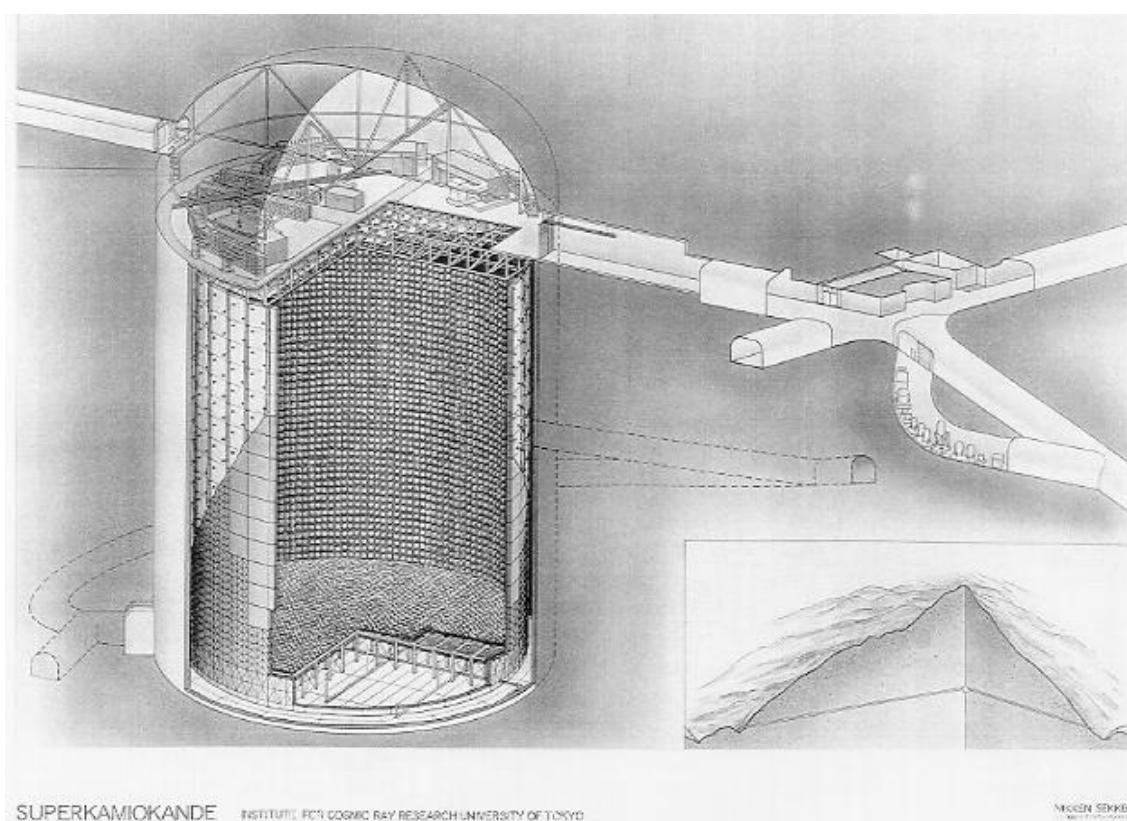


図 2.5: 後置検出器（スーパーカミオカンデ）

第3章 シンチレーティングファイバー飛跡検出器

図 3.10 にシンチレーティングファイバー飛跡検出器の概観を示す。以下、シンチレーティングファイバー飛跡検出器について説明する。

3.1 シンチレーティングファイバー

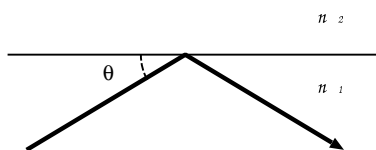
シンチレーティングファイバー (Scintillating Fiber、以下ファイバー) とは、荷電粒子の通過により自らが発光する光ファイバーで、中央のコアと呼ばれる部分と、そのまわりのクラッドと呼ばれる部分からなる。

荷電粒子が蛍光特性をもつコアを通過すると、等方的にシンチレーション光が発生する。発生した光は、コアとクラッド、クラッドと空気等の境界で全反射を繰り返すことで、ファイバー端面まで到達し、その光を検出することで、粒子の通過を知ることができる。(図 3.1 参照)

屈折率の違う二つの物質の境界面での全反射の条件は、次の式で与えられる。

$$\cos \theta \geq \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

ここで、 n_1 および n_2 はそれぞれの物質の屈折率であり、 θ は屈折率 n_1 の物質から屈折率 n_2 の物質に光が入射した角度である。



プラスチックシンチレータを発光体として使用したシンチレーティングファイバーの場合、一般に、コアにポリスチレン (屈折率 $n_1 = 1.59$)、クラッドにポリメチルメタアクリル (屈折率 $n_2 = 1.49$) が使用されることが多く、この場合、全反射の臨界角はコアとクラッドの境界面で 20.4 度、クラッドと空気の間では 47.8 度となる。(図 3.1 参照)

K2K 実験では、Kuraray 社のシンチレーティングファイバー「SCSF - 78M 改良 11」を使用している。このファイバーは、ポリスチレンのコア、ポリメチルメタアクリルのクラッドのまわりに、フッ化ポリマーでできたクラッドがもう一つあり、二重クラッド構造となっ

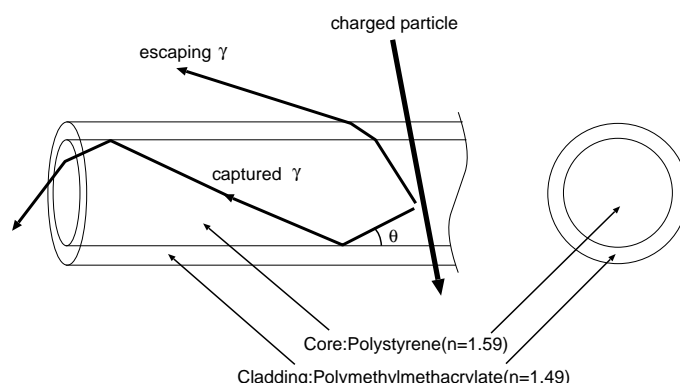


図 3.1: 一般的なプラスチックシンチレーティングファイバー

コアにポリスチレン（屈折率 $n_1 = 1.59$ ）、クラッドにポリメチルメタクリル（屈折率 $n_2 = 1.49$ ）を使用した場合、全反射の臨界角はコアとクラッドの境界面で 20.4 度、クラッドと空気の間では 47.8 度となる。

ている。ファイバーの直径は $692\mu\text{m}\pm 18$ である [26]。ファイバーをシート状にする際に接着剤としてシリコン系ペイントをファイバー表面に塗るため、クラッドと空気の境界に達する光は吸収されてしまうことが多く、伝播しにくい。そのため、伝播効率を上げるためには、クラッドとコアに用いる物質の屈折率の差が大きくなり、そこでの全反射の臨界角を大きくする必要があった。フッ化ポリマーの屈折率は 1.42 とポリメチルメタクリル比べて低いですが、この物質をポリスチレンと接着させることは通常困難であるため、1 層目のクラッドのポリメチルメタクリルを媒介として接着を行っている。これにより、ポリメチルメタクリルのみのクラッドをもつものに比べ、1 層目と 2 層目のクラッドの境界で全反射する光も伝播することができるため、より多くの光を伝播することができる。全反射の臨界角は、1 層目と 2 層目のクラッド面で 17.6 度、2 層目と空気面で 45.2 度となり、1 層目と 2 層目のクラッドの境界で全反射するためのコアから 1 層目のクラッドに入射する角度は 26.7 度となる。（図 3.3 参照）

また、このファイバーのコアには数種類の波長変換蛍光体（ウエーブレングスシフター）が混入されている。ポリスチレンからのシンチレーション光の波長は 340nm 付近にピークをもっているが、この光は、波長変換蛍光体に吸収、放出されることによって、伝播しやすい 430nm の波長の光に変換される。

表 3.1: SCSF-78M改良11の材質およびその屈折率

	材質	屈折率
コア	ポリスチレン	1.59
クラッド (1 層目)	ポリメチルメタクリル	1.49
クラッド (2 層目)	フッ化ポリマー	1.42

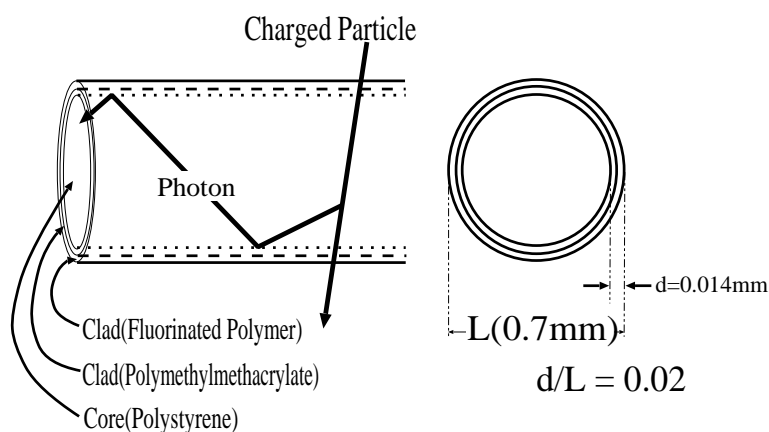


図 3.2: K2K 実験で使用される「SCSF-78M改良11」の模式図
 二重クラッド構造をもっており、クラッドが一層のものより多くの光を伝播することができる。

3.2 シンチレーティングファイバーシート

シンチレーティングファイバー飛跡検出器では、シンチレーティングファイバーをシート状にしたもの（以下ファイバーシート）を使用している。

図 3.4 にファイバーシートの概観を示す。粒子通過の検出効率を高くするため、シンチレーティングファイバーは 2 層俵積みにならされている。一枚のファイバーシートは、長さ約 370cm、幅約 40cm で、1142 本のファイバーからなっている。K2K 実験ではこのようなファイバーシートを 240 枚使用している。これらのファイバーシートはすべて神戸大学で製作され [26]、その後、ファイバー端面に研磨およびアルミ蒸着が施されている。蒸着面の反射率の測定および β 線を用いた光量測定で品質が検査され、光量の減衰長が約 320cm、アルミ蒸着面での反射率が約 74% で、読み出し部分からもっとも遠い位置 (3.7m) に β 線を設置した場合の光量が約 8p.e であることが確かめられている [27]。

また、シンチレーティングファイバーは酸素や熱、紫外線などの影響により劣化することが知られているが、ファイバーシートの経年変化測定の結果、室温 15 度の空気中環境下で光量が 90% 減少するのに約 4000 日間かかることが予想されており、使用するファイバーシートが実験期間中の光量を十分保証するものであることが確かめられている [26]。

3.3 シンチレーティングファイバー飛跡検出器

シンチレーティングファイバー飛跡検出器は、両面にファイバーシートを張られたハニカム板 20 層と、それと交互に設置した標的となる水の入ったアルミコンテナ 19 層からなる。ファイバーシートは、このハニカム板の両面に 6 枚ずつ直交するように張られている。

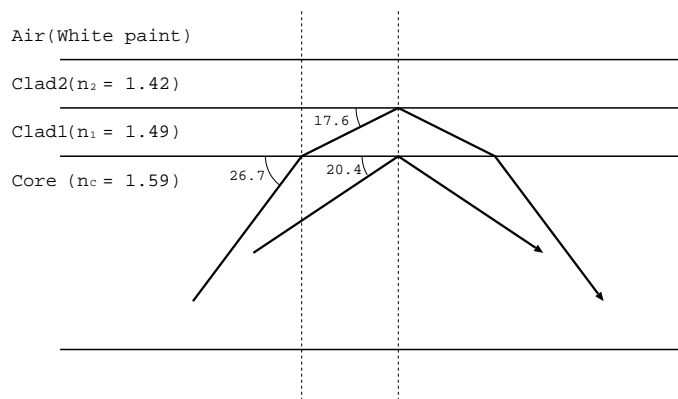


図 3.3: シンチレーティングファイバー中におけるシンチレーション光の伝播。コアと1層目のクラッド、および1層目と2層目のクラッドの境界で全反射するシンチレーション光の様子。

3.4 ファイバーバンドル

シンチレーティングファイバー飛跡検出器のデータ読み出しには、イメージインテンシファイアチューブ (Image Intensifier Tube、以下 IIT) と光学レンズ、CCD カメラからなる IIT - CCD チェーンを使用している。IIT の有効光電面は直径約 10cm の円形をしており、光電面を有効に使用するために、ファイバーシートの読み出し側は、図 3.7 および図 3.8 のように、5つの部分に分割 (これをファイバーリボンと呼ぶ。) され、その後、10枚のファイバーシート分が一つに束ねられて (この束をファイバーバンドルと呼ぶ。) IIT に接続されている。一つのファイバーバンドルは 11420 本のファイバーからなる。粒子通過の際の誤認を避けるためにファイバーリボン間には厚さ 200 μ m のアクリルフィルムが挿入されている。

3.5 読み出しシステム

3.5.1 IIT - CCD チェーン

前述のようにシンチレーティングファイバーからの光の読み出しには、24 本の IIT - CCD チェーンを用いている。(図 3.9 参照)

IIT - CCD チェーンは、2つのイメージインテンシファイアと光学レンズおよび CCD カメラからなる。2つのイメージインテンシファイアのうち前段には、広範囲の画像を得るために、直径約 100mm の有効光電面をもつ大口径静電型のイメージインテンシファイアが使用されている。光電面にはバイアルカリが用いられ、シンチレーティングファイバーからの光のピーク値である 430nm の波長をもつ光に対して約 22 % の量子効率を持っている。この前段では、電子レンズの効果により 100mm ϕ の像は 23mm ϕ まで縮小され、約 5 倍の利得を得ることができる。後段のイメージインテンシファイアには位置情報を保った

まま数千倍の高利得を得ることができるマイクロチャンネルプレート（MCP）が用いられている。

光学レンズは画像のサイズを $1/3$ に縮小し、CCDカメラの撮像面積内（ $12.8\text{mm} \times 9.6\text{mm}$ ）に収まるようにしている。CCDカメラは約 $800 \times$ 約 500 画素をもち、1画素は中心付近でPIT表面の $165\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ に対応している。

SCIFI sheet

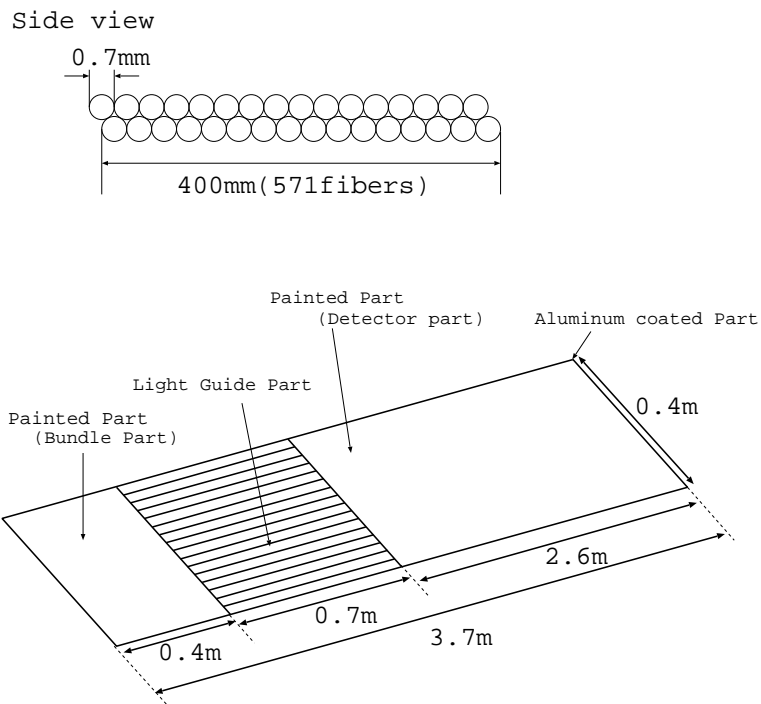


図 3.4: ファイバーシート

検出器部とバンドル部は、白色のシリコンペイントで固められる。また、その間のライトガイド部分は、接着されずに1本1本のファイバーがバラバラの状態になっており、フレキシブルなライトガイドとして使用することができる。

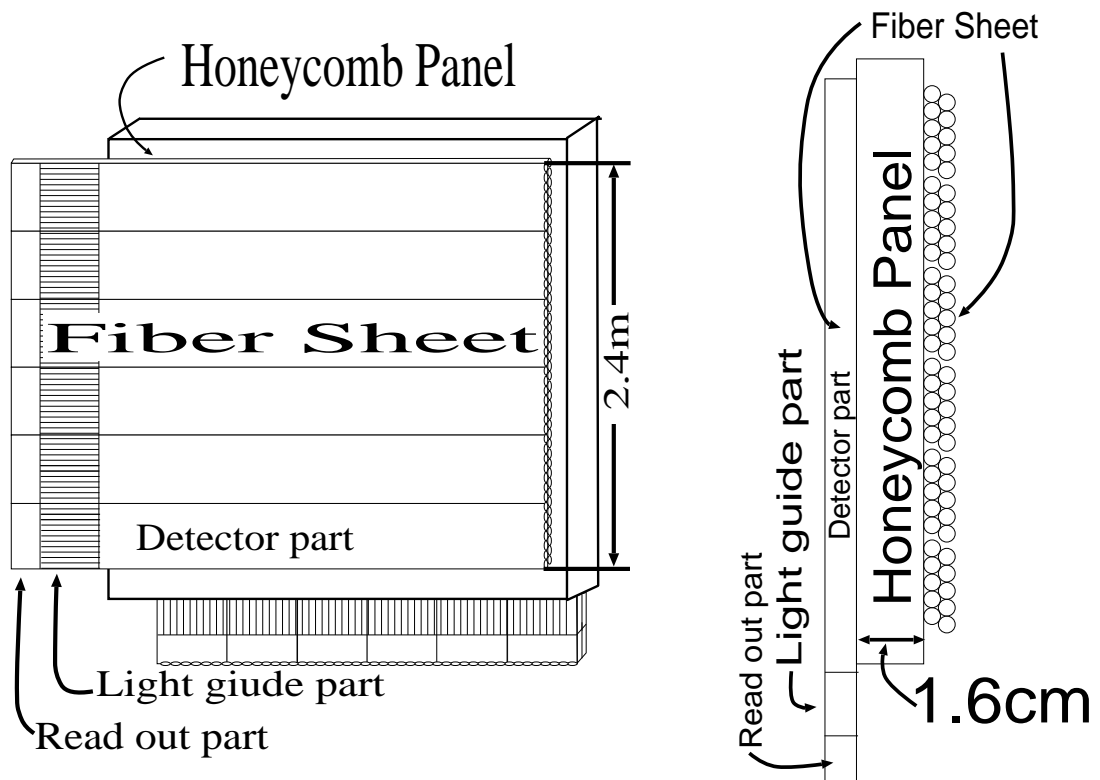


図 3.5: ハニカム板とファイバーシート。

左が正面図、右が側面図を表す。ファイバーシートはハニカム板の両面に6枚ずつ、互いが直交するように張りつけられる。左の図で、紙面表側にあるファイバーシートが鉛直方向の位置を検出し(右図では右のファイバーシート)、裏側にあるファイバーシートが水平方向の位置を検出する(右図では左のファイバーシート)。

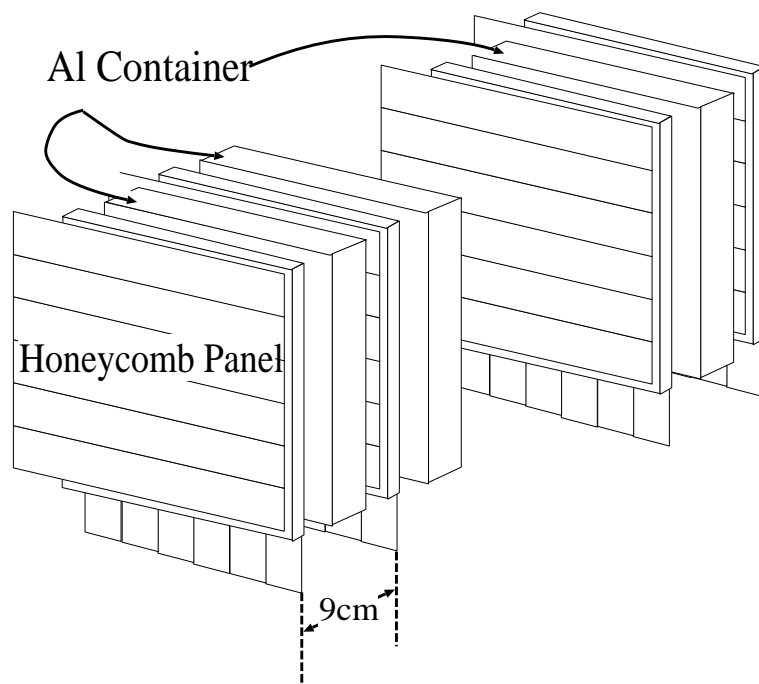


図 3.6: シンチレーティングファイバー飛跡検出器のサンドイッチ構造

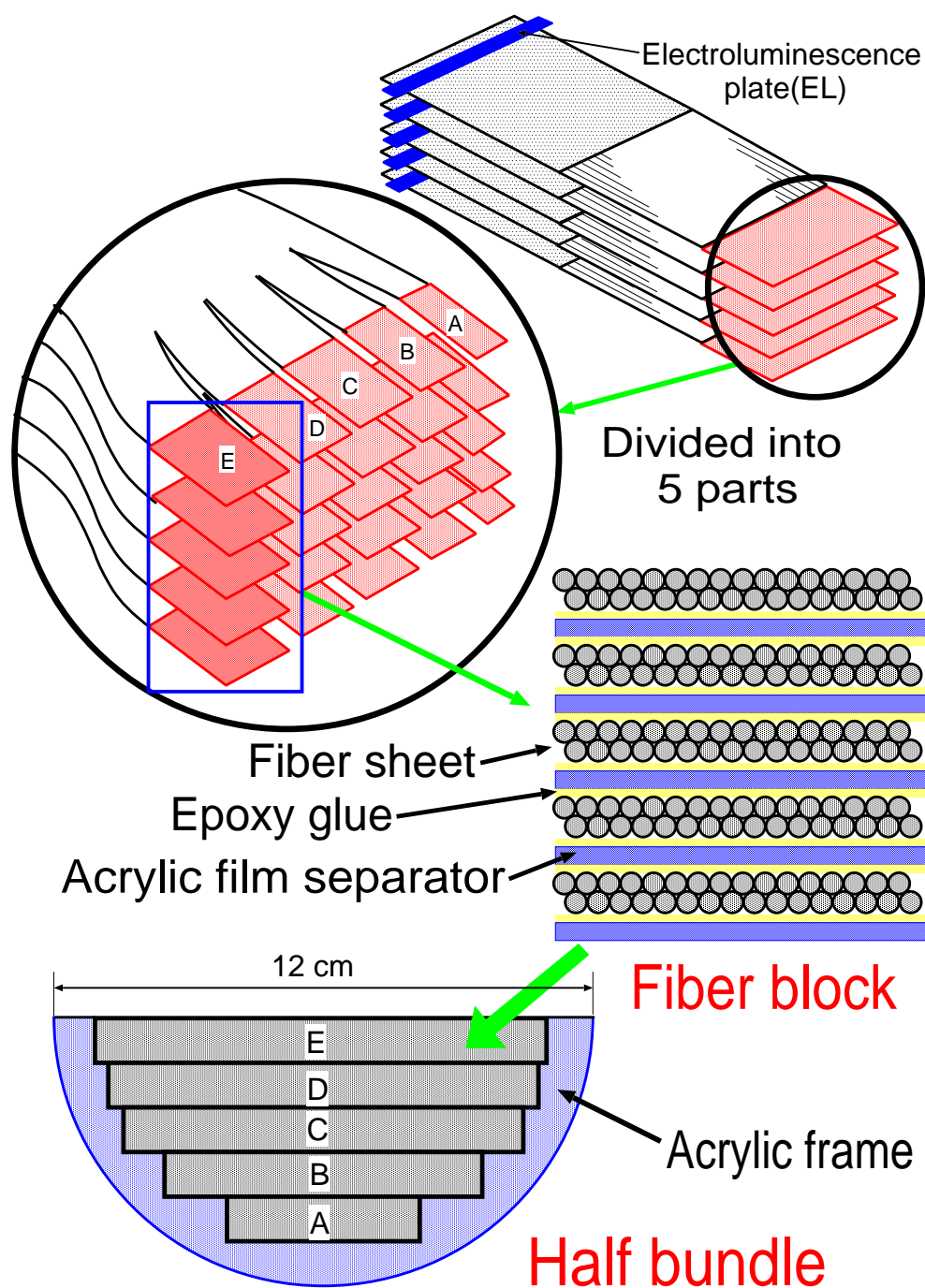
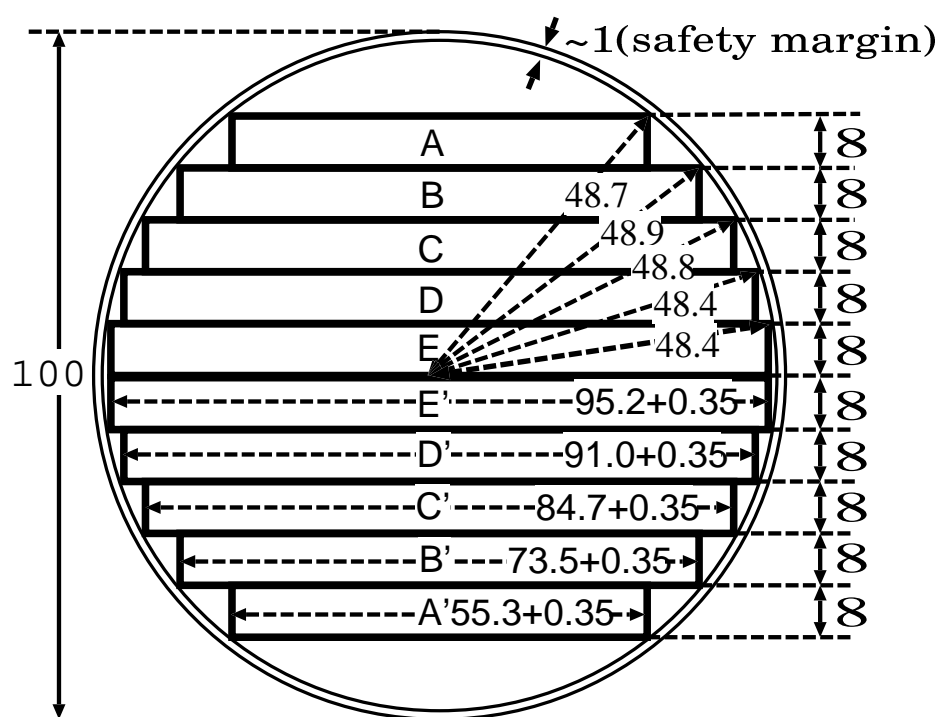
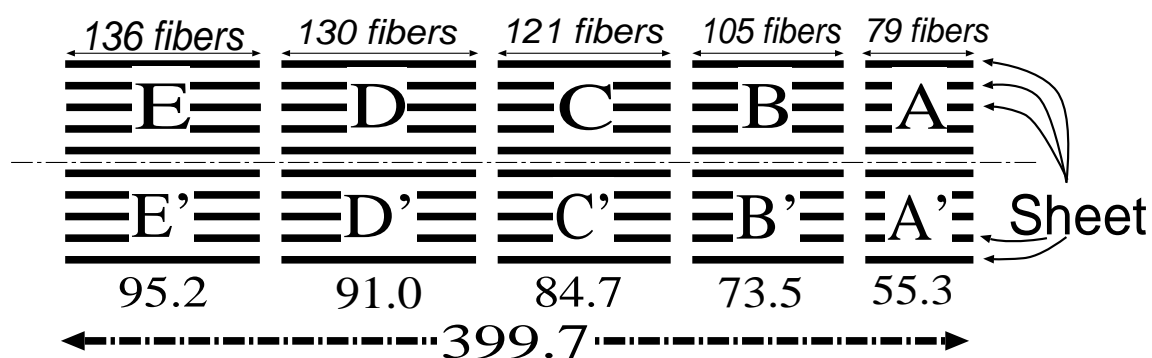


図 3.7: ファイバーバンドルの製作過程

一枚のファイバーシートの読み出し部は幅の異なる5枚（ファイバーリボンと呼ぶ）に分割される。10枚のファイバーシートを一つのIITに接続する。まず、上下各5枚のファイバーシートの同じ幅のファイバーリボンを間に厚さ $200\mu\text{m}$ のアクリルフィルムが挿入しながら接着し（ファイバーブロックと呼ぶ。図のA~Eに当る。）、その後、上下のファイバーブロックを一つに束ねて、ファイバーバンドルを製作した。



One bundle contains 10 fiber blocks (A~E')

図 3.8: ファイバーバンドル

各ファイバーシートの読み出し部は図のように幅の異なる5枚に分割される（これをファイバーリボンと呼ぶ）。5枚のファイバーシートの同じ幅のファイバーリボン、厚さ $200\mu\text{m}$ のアクリルフィルムが挿入しながら接着し（ファイバーブロックと呼ぶ。図のA~Eに当る。）、それらを組み合わせることでファイバーバンドルを形成する。10枚のファイバーシートの読み出し部をひとつに束ねたファイバーバンドルは、IITの有効光電面 $10\text{mm}\phi$ の中に収まっている。

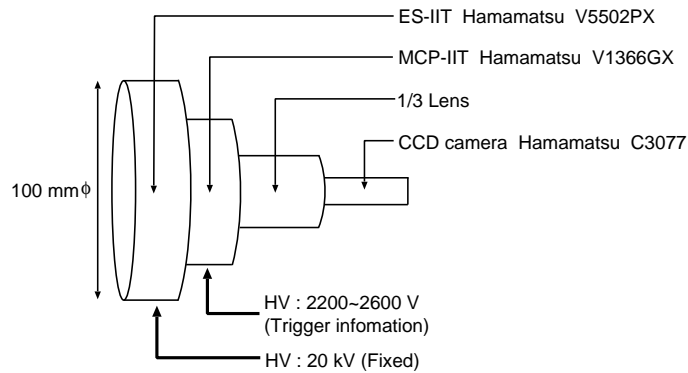


図 3.9: IIT - CCD チェーン

二つのイメージンシファイアと光学レンズ、CCD カメラからなる。二つのイメージンシファイアのうち、前段には広範囲の像をえるために直径 100mm の有効光電面をもつ静電型イメージンシファイアを、後段には位置情報を保ったまま高利得を得ることができるマイクロチャンネルプレートを用いたイメージンシファイアが使用されている。

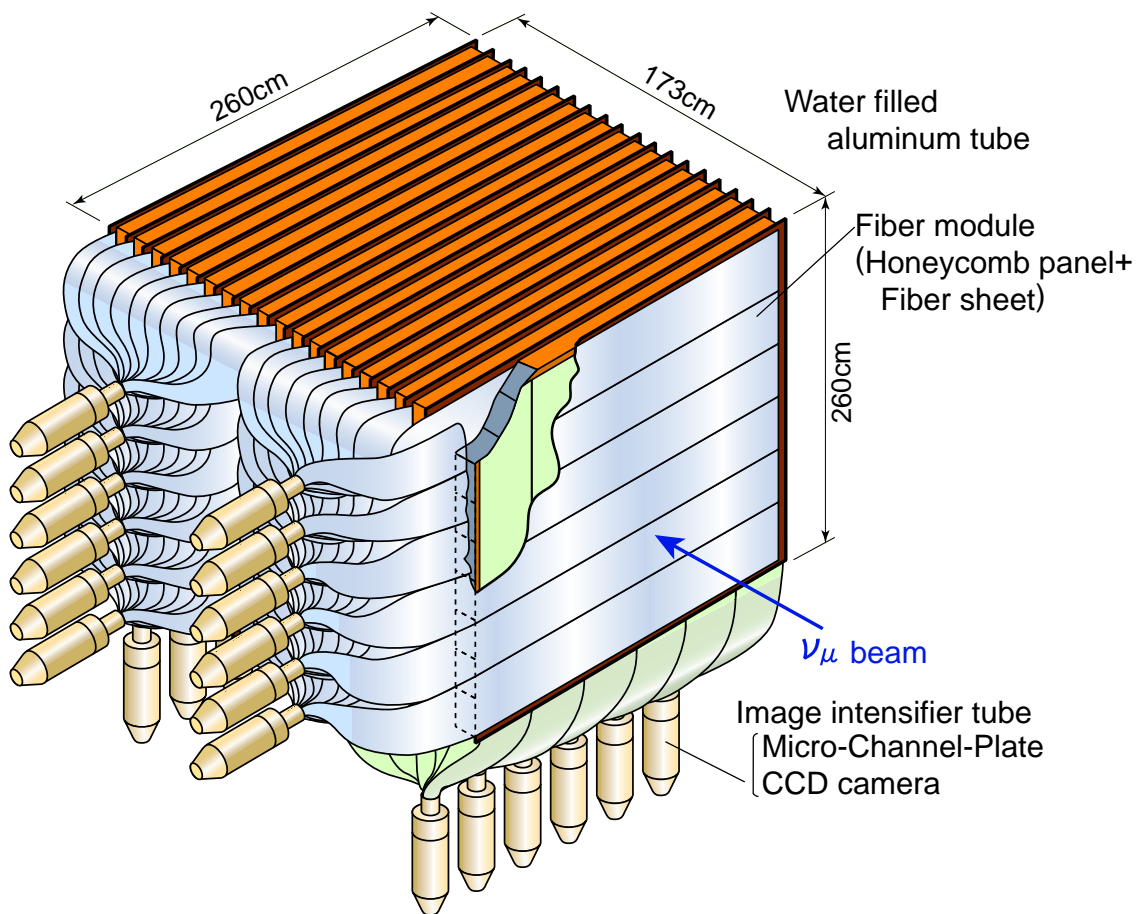


図 3.10: シンチレーティングファイバー飛跡検出器

第4章 CCD画面上でのシンチレーティングファイバー位置較正について

4.1 ファイバー位置較正の概要

前述のように、シンチレーティングファイバー飛跡検出器において、シンチレーティングファイバー（以下ファイバー）からの光は、IITを通して検出され、最終的にはCCD上での座標と輝度の情報として読み出される。したがって、どのファイバーからの光なのかを知るためには、CCD座標上でのファイバーの位置を正確に知る必要があり、その精度は飛跡検出の精度に大きく影響する。

ファイバーの位置較正は以下の二つの段階に大きく別れる。

- 特定のファイバーを光らせ、そのCCD座標を測定する。
（このファイバーをfiducial fiberと呼ぶ。）
- Fiducial fiberの位置からその間にある他のファイバーの位置を算出する。

4.2 Fiducial fiber table の作成

4.2.1 Fiducial fiber への EL 光の照射

Fiducial fiber へは平坦で均一な面発光体である EL (Electro-Luminescence) を用いて光を入射する。ELは図 3.7 右上のようにファイバーシートの呼び出し側と反対の部分に設置している。Fiducial fiber の EL による照射は図 4.1 ように行っている。ファイバーシートの EL を設置する部分全体に、一旦黒色ペイントを塗り、fiducial fiber の部分のペイントのみを剥ぎ取ることにより、選択的に fiducial fiber だけに光を入射している。EL はファイバーシートの片側にしか設置できないため、fiducial fiber はファイバーシートの俵済みの 2 層のうち 1 層にのみ設けられている。

図 4.2 に EL データを取る際のセットアップを示す。EL driver への 1msec の入力信号に対し、そのスタートから 200 μ sec 遅れて、IIT の MCP に 100 μ sec の入力信号を送っている。

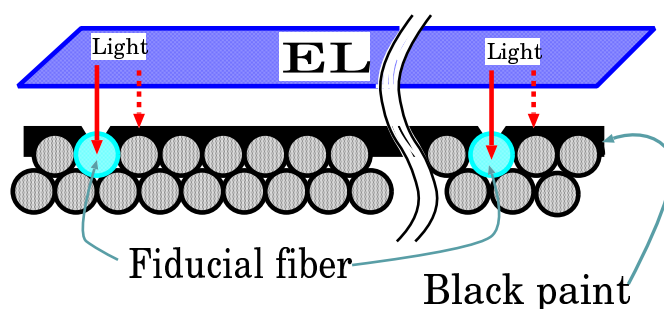


図 4.1: EL でのファイバー照射方法

ファイバーシートの EL を設置する部分全体に、一旦黒色ペイントを塗り、fiducial fiber の部分のペイントのみを剥ぎ取ることにより、選択的に fiducial fiber だけに光を入射している。

4.2.2 Fiducial fiber table の作成方法

Fiducial fiber 間の他のファイバー位置の算出は、40 本のファイバーのうち 1 本を fiducial fiber として光らせるだけで、CCD 座標の垂直、水平方向共に IIT 表面において $100\mu\text{m}$ 以内と十分な精度を得られることが確かめられている [28]。K2K 実験においては、ファイバーシート中のファイバー 40 本毎に 1 本のファイバーと、ファイバーリボンで端になるファイバーを fiducial fiber として、EL を用いて光らせている。

K2K 実験では、240 枚のファイバーシート、約 27 万本のファイバーを用いている。fiducial fiber だけでも約 10000 本にのぼり、fiducial fiber の位置較正を効率よく行う必要がある。今回、その方法を開発し、K2K 実験において、全 fiducial fiber の CCD 座標上での位置を算出した。

CCD 座標上での各 fiducial fiber の位置の算出方法は以下の通りである。

- (1) EL を用いて光らせた fiducial fiber からの光を IIT - CCD チェーンを用いて検出し、その CCD 画像を輝度の重みをつけて積分する。図 4.3 積分画像の一例を示す。

積分の際、各画像ごとに孤立したピクセルを取り除くなどして、偶発的な電氣的ノイズによる影響を減少することが考えられるが、そのようなピクセルの持つ輝度は小さく、重心を求める際の影響は少ないと考えられるため、今回はそのような孤立ピクセルの除去は行っていない。

- (2) 図 4.4 のように、隣接している実ピクセルの加算輝度をもつ仮想ピクセルを考える。これは、後に二階微分を用いて変曲線の求める際の局所的な揺らぎによる影響を減少させるためである。
- (3) 二階微分を用いて変曲線の内側の領域を選別した後、残った仮想ピクセルの塊（以下、クラスター）を認識する。（図 4.5 参照）

the integrated image of the fiducial fibers

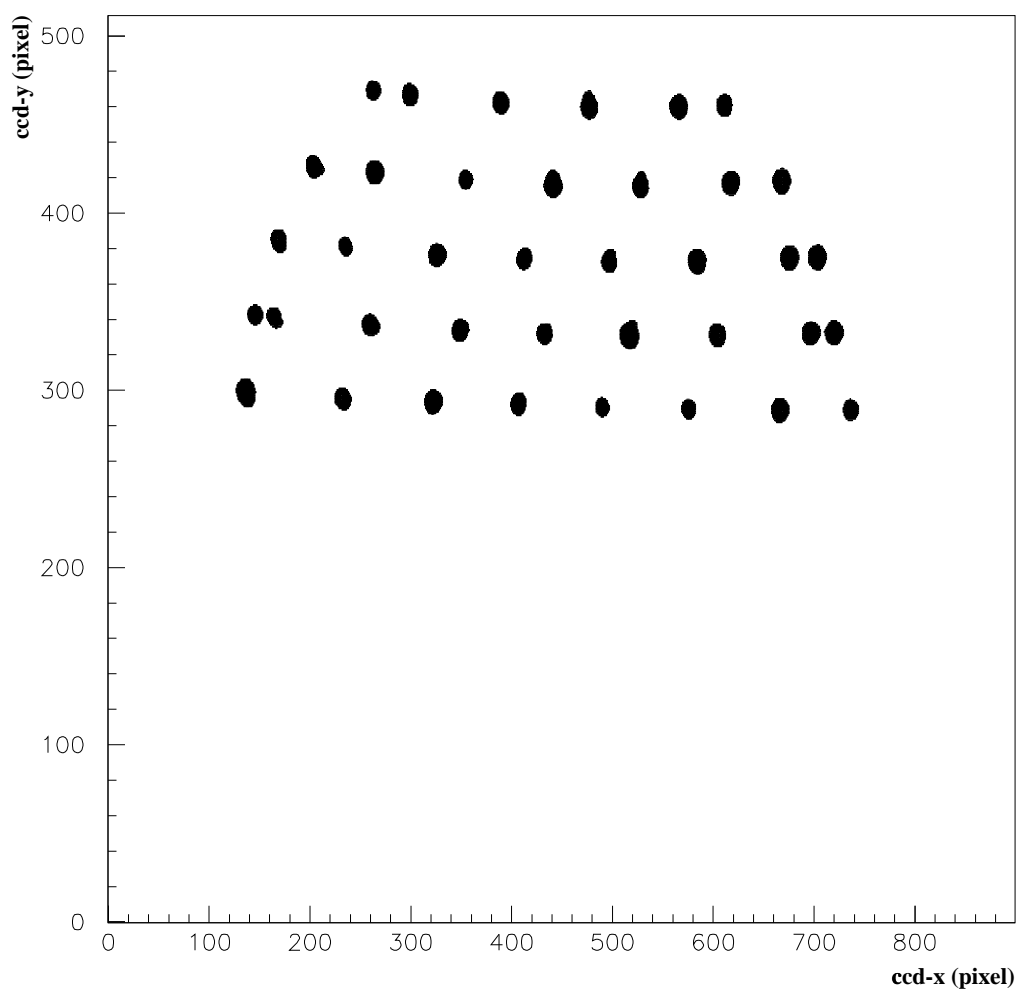


図 4.3: Fiducial fiber の CCD 画面上での積分画像の例

積分後の各 fiducial fiber の像が完全に分離しており、fiducial fiber 以外の像が全くないことが理想であるが、実際には図 4.5 に示すように隣り合う fiducial fiber の像が重なり合い、そのうえ、単一の閾値ですべての fiducial fiber を認識、分離することが困難な場合がある。このような場合、局所的に閾値を設定することも考えられるが、EL 光量の安定性に信頼がない限り、測定毎に閾値の設定と確認作業が必要となり、大変な労力を強いられることになる。

- (4) 各クラスターについてそれを構成する仮想ピクセルの輝度で重みをつけた重心と輝度の総和を求める。
- (5) 以前に測定した fiducial fiber の位置などの参照点を中心に、縦 20 ピクセル、横 20 ピクセルの範囲で最大の輝度を持つクラスターを求め、その重心を fiducial fiber の位置とする。

各クラスターの重心を求めた段階では、条件にもよるが、求めたい fiducial fiber の数の数百倍が候補として残っている。以前は、除去作業を人間が行っていたが、今回、この方法を用いることにより、所要時間が大幅に減少した。

また、参照点として以前の fiducial fiber の位置を利用することができるのは fiducial fiber の位置がほとんど移動していないと思われる場合のみであり、IIT を一旦取り外した場合などは、CCD 上での fiducial fiber の位置が大きく変わっている可能性があり、以前の fiducial fiber の位置をそのまま参照するわけにはいかない。そのような場合には、積分画像を見ながら、以前の fiducial fiber の位置を全体的に回転させたり、各点を移動させるなどして参照点を設定し、解析を行っている。(図 4.6 ~ 図 4.8 参照)

図 4.9 に、このようにして求めた、ある IIT での fiducial fiber の CCD 座標上での位置を示す。

4.2.3 算出した fiducial fiber の位置のもつ精度

図 4.10 は、繰り返し行った 4 回の測定から求められた各 fiducial fiber の位置に対し、その標準偏差を求め、全 fiducial fiber について分布を取ったものである。CCD 座標の x 軸方向に対しては全 fiducial fiber の 99.6 % が 0.5 ピクセル (1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}$ ~ $170\mu\text{m}$ に相当) 以内に、y 軸方向に対しては全 fiducial fiber の 99.3 % が 0.5 ピクセル以内に分布しており、算出された fiducial fiber の位置の精度は、非常に高いことがわかる。標準偏差が大きくなるもののほとんどは、そのクラスターの輝度の総和が小さなものであり、この値に閾値をもうけることで除去することができる。

4.2.4 Fiducial fiber の補完

ほぼすべての fiducial fiber の位置は前述の方法で求めることができるが、EL や黒色ペイントの剥ぎ取りの状態により、求めることができないものがいくつかある。

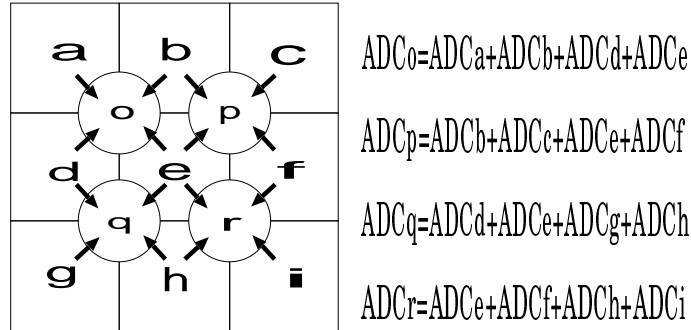


図 4.4: ピークを求める際の局所的な揺らぎによる影響を減少させるため、接している実ピクセルの加算輝度をもつ仮想的なピクセルを考える。

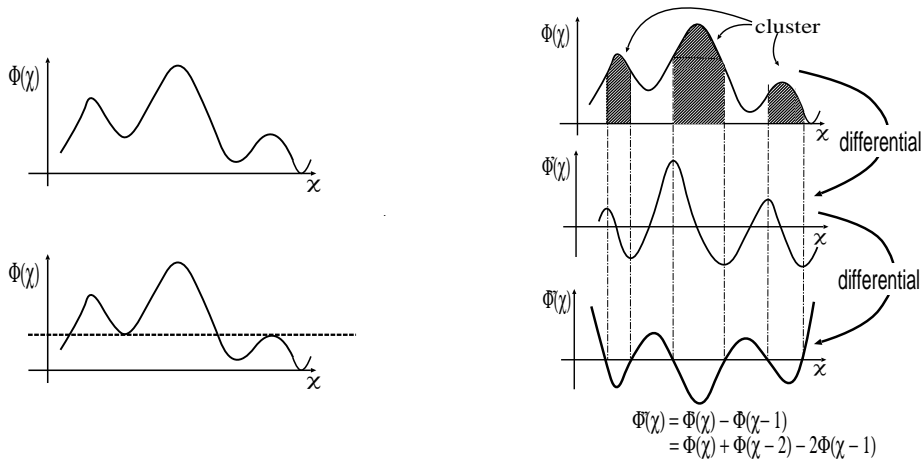


図 4.5: ピーククラスターの範囲の決定方法。左の図のように、隣り合う fiducial fiber の像が重なり合い、そのうえ、単一の閾値では同じ画面内にあるすべての fiducial fiber を分離、認識することが困難な場合がある。そのため、右図のような二階微分を用いて、fiducial fiber の像のクラスターを認識する。

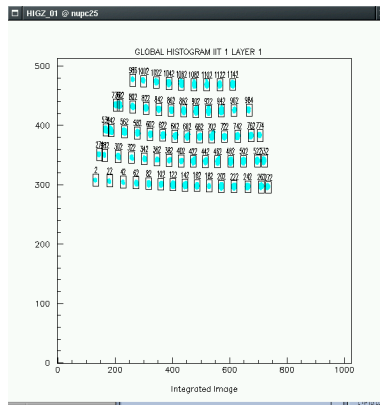


図 4.6: Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 1

以前に求めた fiducial fiber の位置を中心に幅 20 ピクセルの正方形をとる。前回の測定との間に IIT を取り外しを行うなどで、大きくずれている場合は、全体を平行移動や回転移動させたり、正方形の各領域を移動するなどして、手動で設定する。

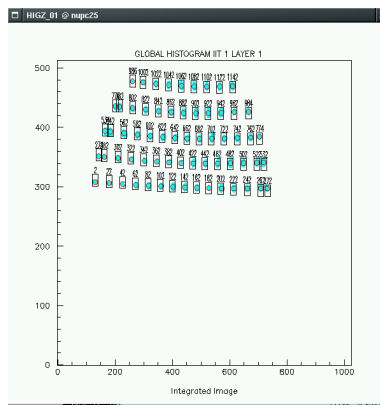


図 4.7: Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 2

設定された範囲の中で最大の輝度をもつクラスターの重心を求め、fiducial fiber の位置とする。

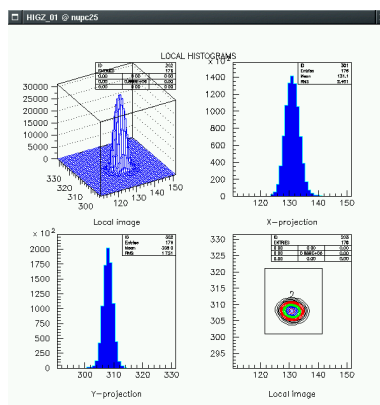


図 4.8: Table 製作のためのソフトウェアの作業画面 3

各領域を拡大し、積分画像の頂点が検出できているかを確認する。

Fiducial fiber map for IIT 1

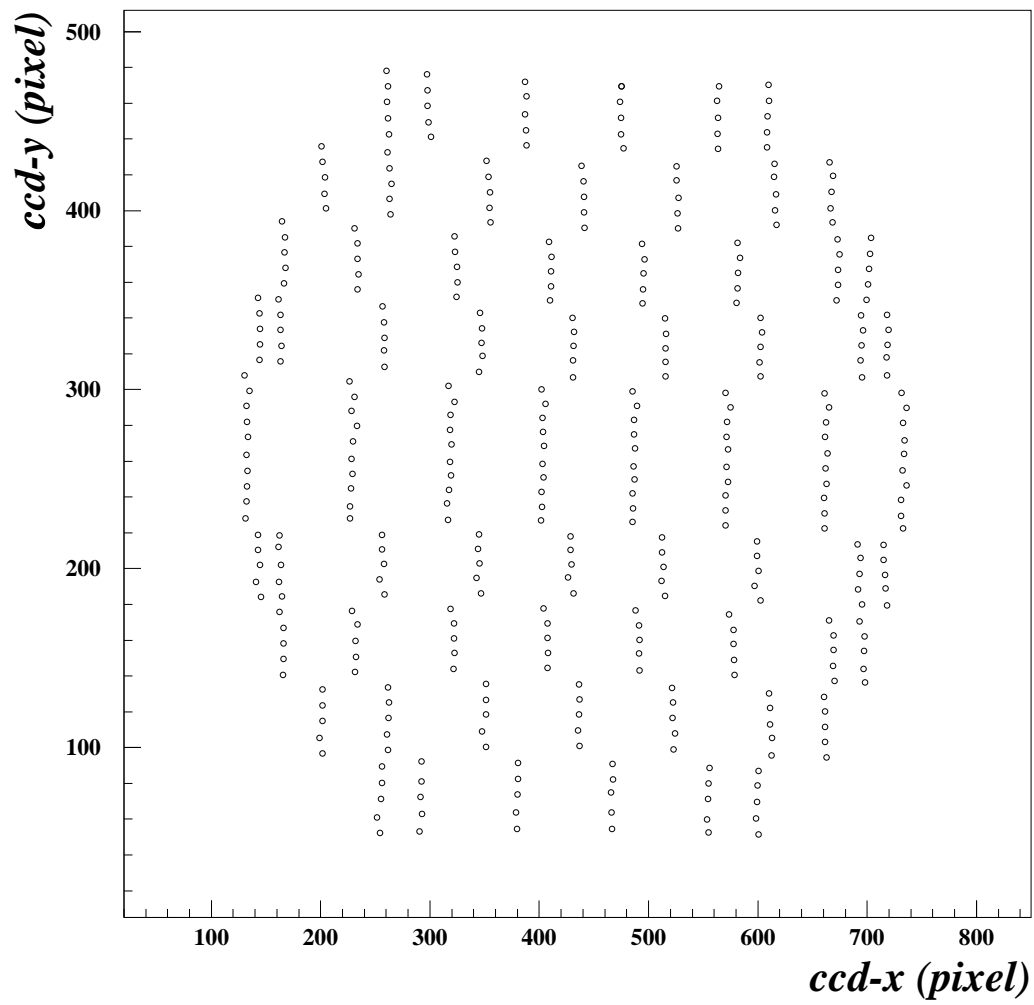


図 4.9: Fiducial fiber map の例

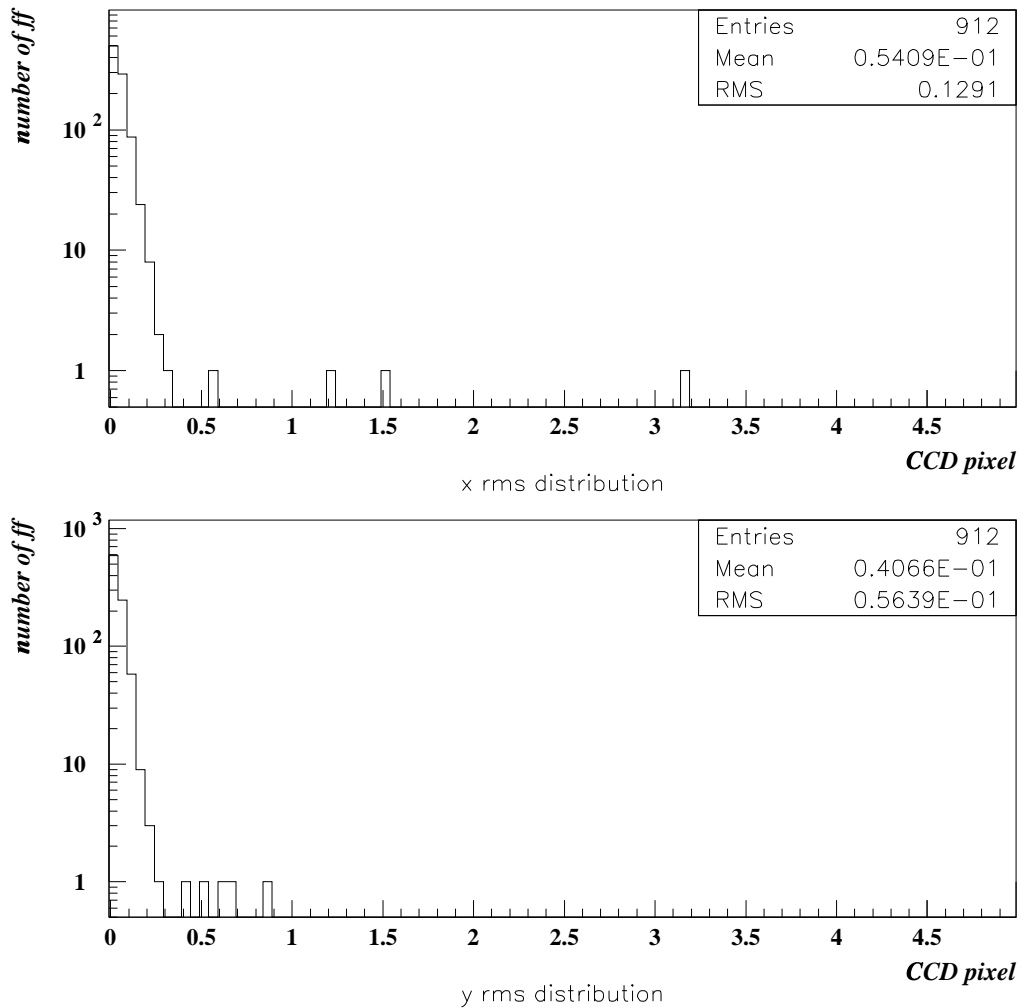


図 4.10: 繰り返し行った 4 度の測定より求められた fiducial fiber の位置の標準偏差の分布。標準偏差が大きなものはいくつかあるが、これは EL 光の強度が弱いためであり、より多くのイベントを積分したり、第 4.2.4 節で述べる方法を用いることでその信頼性を改善することができる。1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu m \sim 170\mu m$ に相当する。

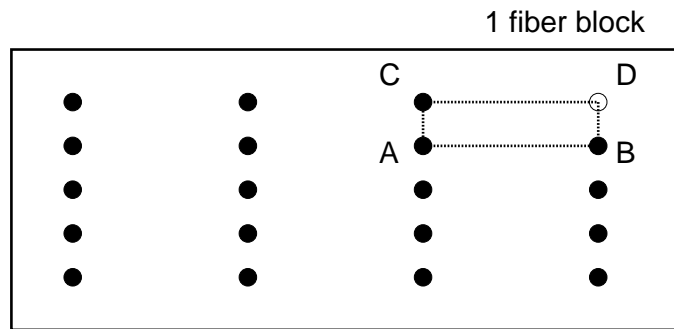


図 4.11: 平行四辺形の仮定を利用した fiducial fiber の算出。一つのファイバブロック内の近傍にある 4 つの fiducial fiber が平行四辺形に並ぶことを仮定して、fiducial fiber の位置を算出する。D にあるはずの fiducial fiber の位置を算出する場合、ABCD が平行四辺形であることを仮定し、A、B、C の位置から残りの頂点 D の位置を計算する。

それらは、

- 1 ファイバブロックのうち、ほとんどの fiducial fiber は求めることができたが、数本の fiducial fiber のみを求めることができない場合。
- 同じファイバブロックのすべての fiducial fiber を求めることができない場合。

に、大別される。

以下、それぞれの場合の fiducial fiber の補完方法について説明する。

まず、1 ファイバブロックのうち、ほとんどの fiducial fiber は求めることができたが、数本の fiducial fiber のみを求めることができない場合、図 4.11 に示すように、求めたい fiducial fiber とその近傍にある 3 つの fiducial fiber との関係が平行四辺形であると仮定し、fiducial fiber の位置を算出した。

図 4.12 は、第 4.2.2 節の方法を用いて求めることができた fiducial fiber の位置と、上記の方法で求めた位置との差の分布である。x 軸方向の差が 1 ピクセル以内のものは全体の 95.5 %、y 軸方向の差が 1 ピクセル以内のものは全体の 99.2 % である。y 軸方向に比べ x 軸方向の差が大きなものが多いが、これは、仮定する平行四辺形が x 方向に細長いものであるために、像の歪みの影響を受けやすいこと、また、誤ったファイバーのペイントが剥ぎ取られ、本来とは別のファイバーが光っていること等情况があることが考えられる。

次に、同じファイバブロックに属するすべての fiducial fiber を求めることができない場合、図 4.13 に示すように、求めたい fiducial fiber が同じファイバブロック内の対応する 2 つ fiducial fiber を結んだ直線上にあり、fiducial fiber はその直線上に等間隔に並んでいるという仮定を用いて、その位置を算出した。

図 4.14 に、このようにして求めた fiducial fiber の位置と、第 4.2.2 節の方法を用いて求めた位置との差の分布を示す。y 軸方向の差は、その 98.9 % が 1 ピクセル以内であり、上記の方法が非常に良い精度をもっていることを示しているが、それに比べ、x 軸方向の差は非常に大きい。これは、ファイバブロック作成の際、y 軸方向に関しては、各ファイ

residual dist. between parallelogram method and real

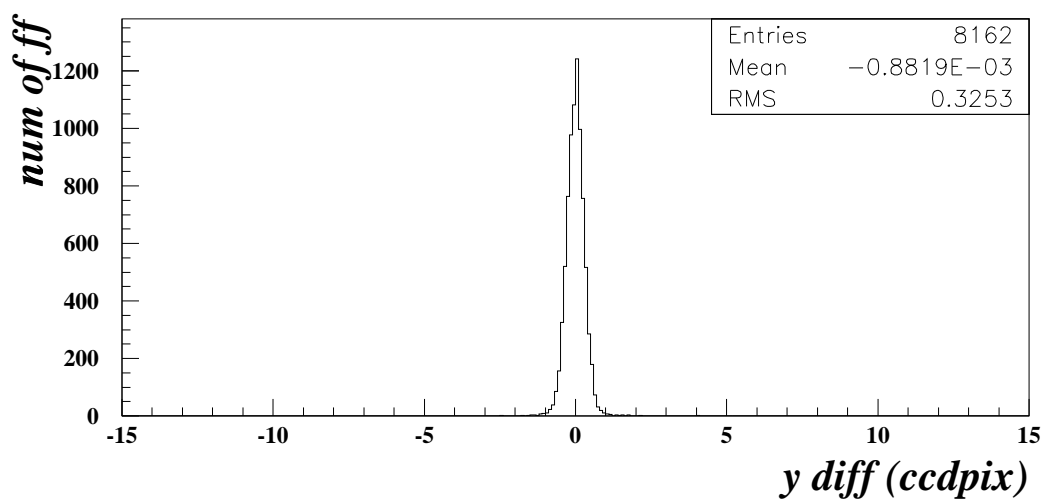
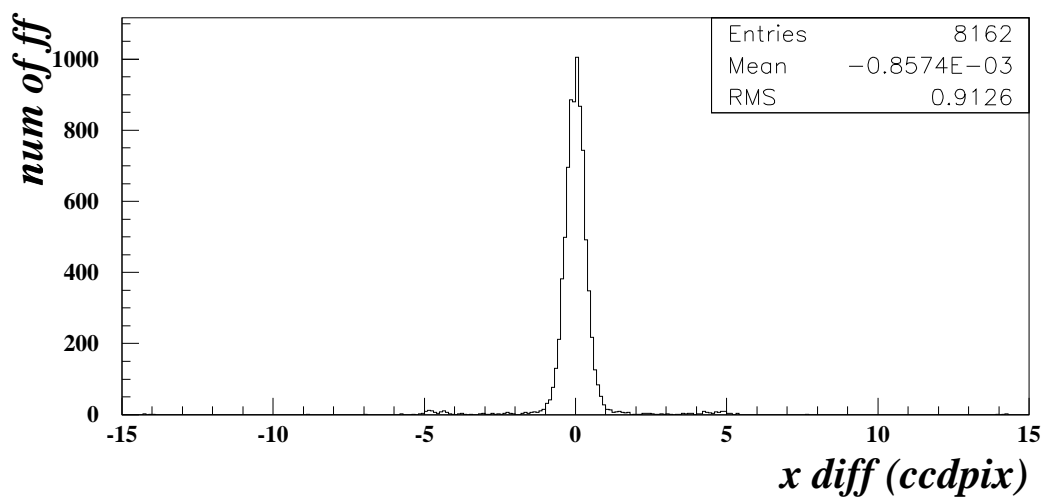


図 4.12: 第 4.2.2 節の方法を用いて算出した fiducial fiber の位置と平行四辺形の仮定を利用して求めた fiducial fiber の位置との差。上図は x 座標の差、下図は y 座標の差である。1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu m \sim 170\mu m$ に相当する。

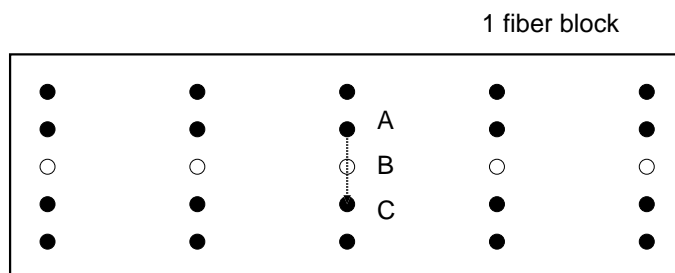


図 4.13: 直線性を仮定した fiducial fiber の算出。求めたい fiducial fiber は同じファイバーブロック内の対応する 2 つ fiducial fiber を結んだ直線上にあり、それらは直線上に等間隔に並んでいると仮定している。この場合、B は A と C を結ぶ線分の中央、すなわち、A と C との midpoint に位置すると仮定し、B の位置を計算する。ファイバーブロックの端にあたるファイバーリボンの fiducial fiber については、外分を用いて計算する。

バーリボン間の接着剤が均一になるようにしっかりと押さえ付けて固定していたために、ファイバーリボン同士が等間隔に並んだのに対し、x 軸方向に関しては、作業の効率や接着剤を逃がす等のためにファイバーブロック作成のための鋳型とファイバーリボンの間に隙間を設けていたために、ファイバーリボンが横方向にずれていることが考えられる。

今回行った補完は、ファイバーバンドル内でファイバーが理想的な状態で整列していることを仮定しているが、今後、ファイバーバンドルの写真解析によって得られたファイバーバンドル内でのファイバーの相対的な位置を利用することにより、より高い精度で fiducial fiber を補完することが可能であると考えられる [31]。

4.3 Fiducial fiber 以外のファイバーの位置較正

fiducial fiber 以外のファイバーの位置較正は、fiducial fiber のある層と fiducial fiber のない層とで大きく分かれる。

4.3.1 Fiducial fiber がある層でのファイバーの位置較正

fiducial fiber がある層でのファイバーの位置較正の方法は、現在、以下の 2 種類が開発されている。

- (1) **ファイバーが等間隔に並んでいると仮定した方法:** CCD 座標上で、2 本の fiducial fiber の間を N_{fiber} 本のファイバーが等間隔で並んでいるとし、fiducial fiber から n 本離れたファイバーの x 座標 X_n を、

$$X_n = X_{fid} + n \frac{X}{N_{fiber} + 1} \quad (4.1)$$

residual dist. between line method and real

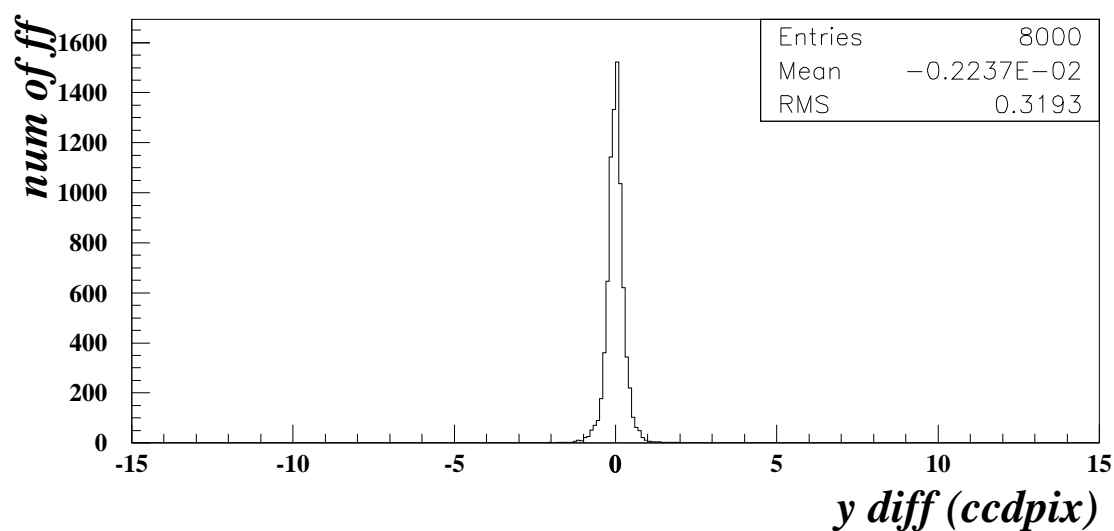
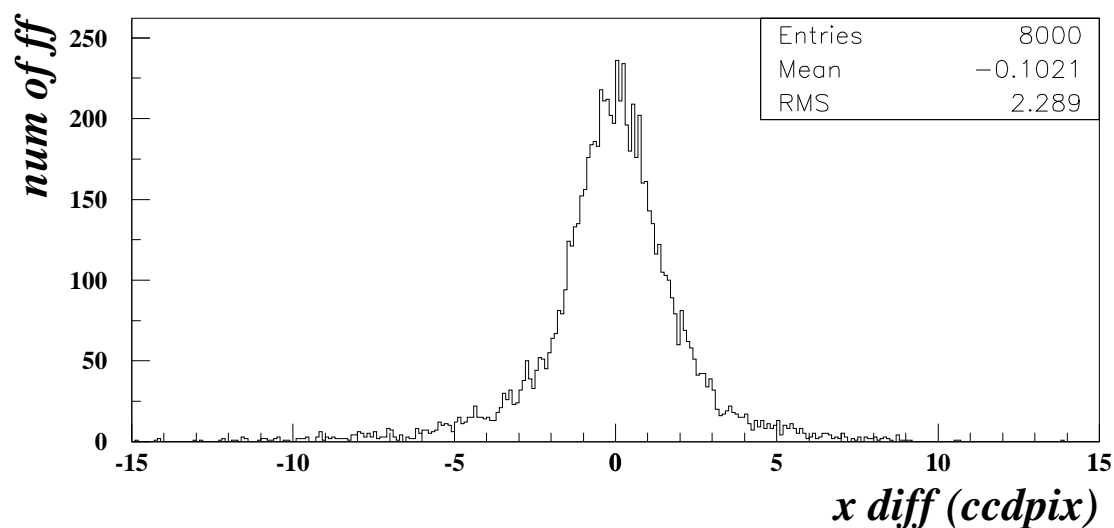


図 4.14: 直線上に等間隔で並んでいることを仮定して求めた fiducial fiber の位置と実際の位置との差。1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m} \sim 170\mu\text{m}$ に相当する。

という式を用いて算出する。ここで、 X_{fid} は fiducial fiber の x 座標、 N_{fiber} は fiducial fiber 間のファイバー数、 X は fiducial fiber 間の距離である。

ファイバーの y 座標は、20 本毎に fiducial fiber を設けた場合、ファイバーが、2 本の fiducial fiber 間の直線上に並んでいると仮定して算出した位置と、3 本の fiducial fiber で求められる 2 次曲線上に並んでいると仮定して算出した位置とでは、精度に大きな差がないため、前者を採用して算出している [28]。(図 4.16 参照)

- (2) **像の縮小率の違いを考慮した方法:** CCD 座標上でのファイバー半径は、IIT - CCD チェーンによる像の歪みのために、その座標により変化するが、同一ファイバーリボン内において、ファイバー半径 r とファイバーの x 座標 X は、 $r = AX^2 + BX + C$ (A 、 B 、 C は定数) でよく近似できることが確かめられている。fiducial fiber の位置からこの関数を求め、それを用いて、fiducial fiber から順に隣接するファイバー半径を求めていき、それを足し合わせることで、ファイバーの x 座標を算出していく。fiducial fiber を結んだ直線上にあると仮定し、算出した x 座標に対応する y 座標を求める [28]。

(1) の方法は、x および y 座標においての $100\mu\text{m}$ 程度の精度をもっており、(2) の方法は、x 座標に対して $50\mu\text{m}$ 程度、y 座標に対して、 $100\mu\text{m}$ 程度の誤差をもってしている。(1) の方法の方がよりよい精度をもってしているが、現段階では、実際の解析には導入されていない。ファイバー直径が $700\mu\text{m}$ 程度であることを考慮すると、(1) の方法の精度でも実験を遂行するに十分な精度であると思われる。しかし、今後、検出器の能力の更なる向上のために、(2) の方法が導入されることを期待する。

4.3.2 Fiducial fiber がない層でのファイバーの位置較正

Fiducial fiber のない層でのファイバーの位置較正の方法も、現在、以下の 2 種類が開発されている。

- (1) **ファイバーバンドルの写真解析を利用した方法:** 求めたいファイバーが属するファイバーリボンの fiducial fiber のある層とそのすぐ下のファイバーリボンの fiducial fiber のある層との実空間での距離 a と、fiducial fiber のある層とない層との実空間での距離 b を、ファイバーバンドルの写真解析 [31] より求める (図 4.17 参照)。距離 a は、 2mm 以内であり、これに対応する CCD 座標上での像の歪みは無視できるものとする。CCD 座標において a にあたる距離を L とすると、fiducial fiber のある層のファイバー同士の接点から距離 $L\frac{b}{a}$ だけ垂線を下ろした位置に fiducial fiber がない層のファイバー中心があるとする [28]。
- (2) **x 軸方向の歪みを y 軸方向に適用する方法:** 第 4.3.1 節で述べたように、x 軸方向の IIT - CCD チェーンによる像の歪みは、fiducial fiber の位置を利用して測定することが可能である。像の歪みがファイバーバンドルの中心に対して対称であると仮定し、x 軸方向の像の歪みを y 軸方向に適用できるとする。y 軸方向の半径に x 軸方向

のファイバー半径を歪みの関数で補正して求めた値を用い、ファイバーシートが理想的な2層俵済みであるとして、fiducial fiber のない層のファイバー半径を求める。

4.4 位置較正後の飛跡再構成

以上ようにして求めたファイバーの CCD 座標上での位置と実空間での位置を対応づけることにより、図 4.18 のように粒子飛跡を再構成することに成功している。

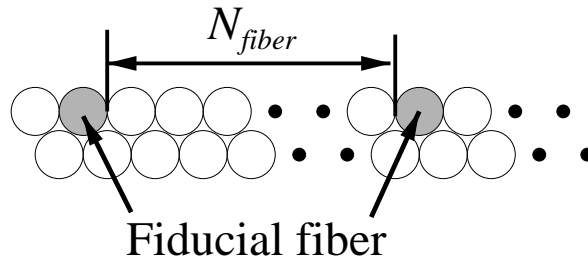


図 4.15: 図に見られるように、fiducial fiber と fiducial fiber の間に N_{fiber} 本ファイバーがあるとする。

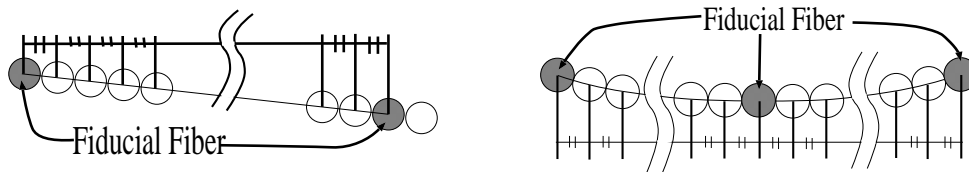


図 4.16: ファイバーの内挿の方法 (等間隔:直線と 2 次関数)。左図がファイバーの並び方を直線とおいた時の内挿の方法で、右図が 2 次関数とおいた時の内挿の方法。それぞれ、ファイバーは CCD 座標で等間隔に並んでいるものとしている。

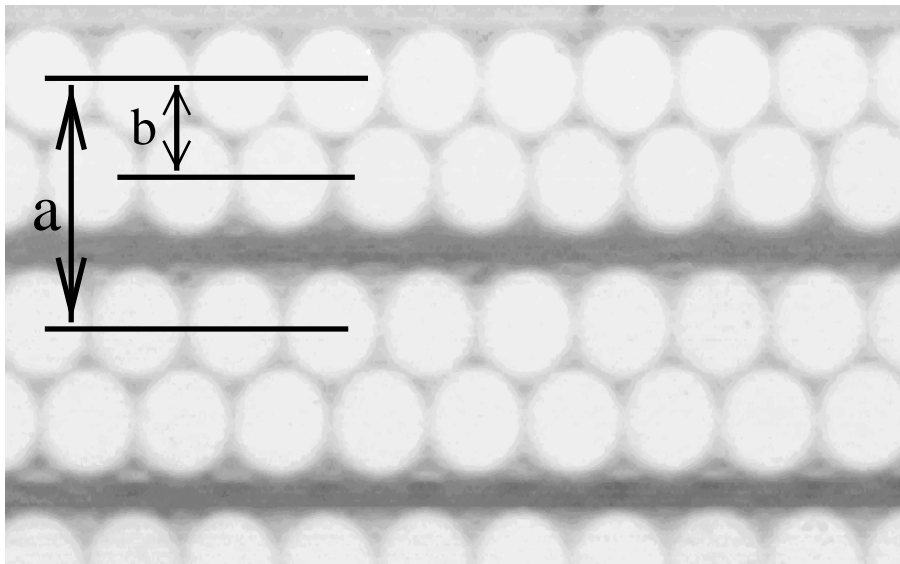


図 4.17: ファイバーバンドル拡大写真白く丸く見えるのがファイバーである。図中の a、b が fiducial fiber のない層を算出する為に使用する距離である。

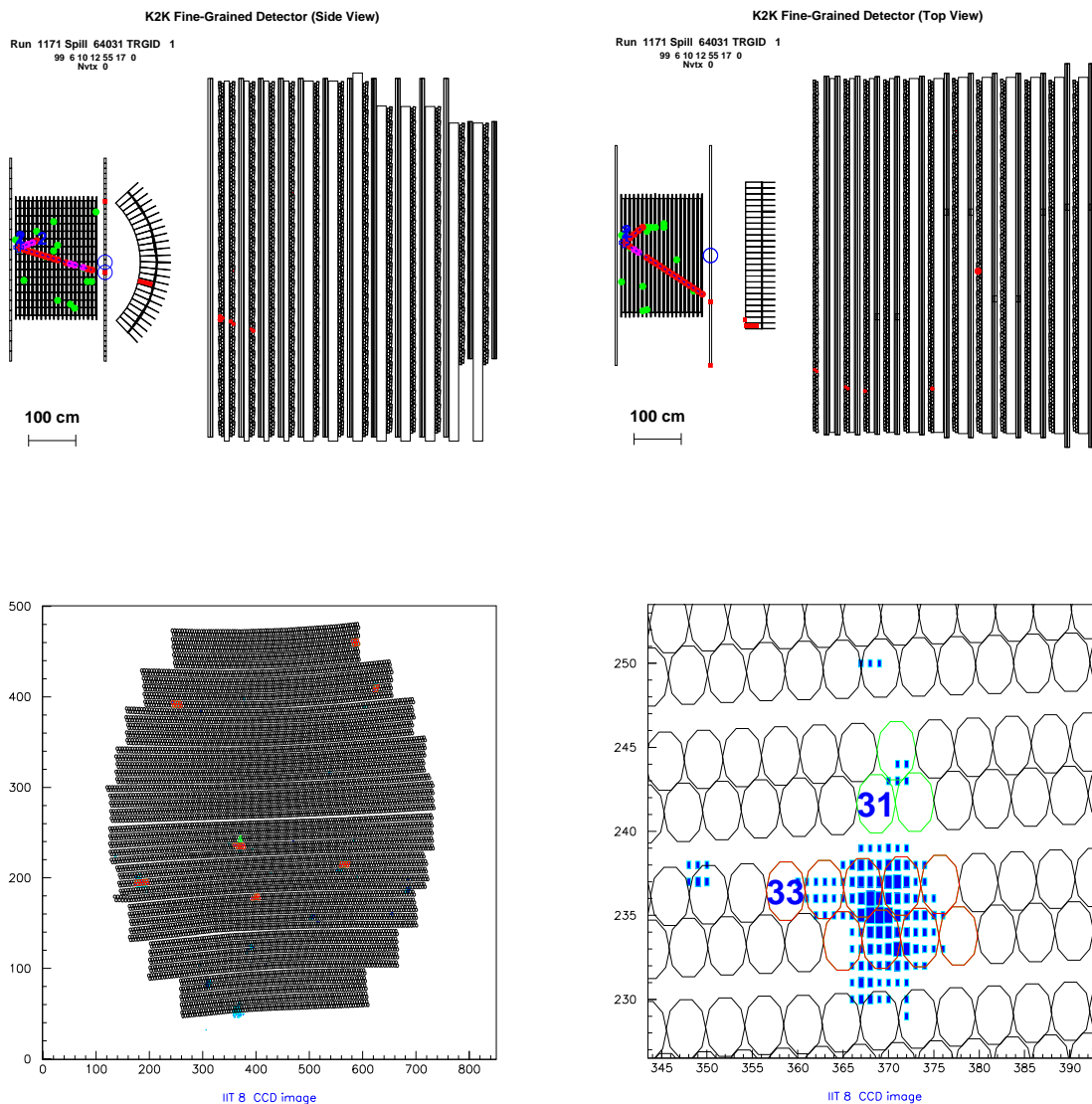


図 4.18: FGD 内イベントの例左上は、FGD を横の視点から、右上は、FGD を上の視点から見ている。左下は、ある CCD での画像で、求められたファイバーの位置が表示されている。右下はその一部を拡大したものである。

第5章 イメージインテンシファイアの安定性

5.1 ファイバーバンドルの位置安定性

5.1.1 CCD 座標上でのファイバーバンドルの移動

ファイバーバンドルや IIT のサポートの移動により、実験期間中に CCD 座標上でのファイバーの位置が変わってしまうことが危惧されていた。

ここでは、第 4.2 節の方法を用いて求めることができた fiducial fiber の CCD 座標上での位置が、ある期間内にどれだけ移動しているかを見ることで、CCD 上でのファイバー位置の安定性を調べる。

今回使用するデータは、以下のものである。

- 36 日間の期間を隔てて測定された、水平 (X 軸) 方向測定用の 10 本の IIT の fiducial fiber の位置
- 50 日間の期間を隔てて測定された、鉛直 (Y 軸) 方向測定用の 12 本の IIT の fiducial fiber の位置

図 5.1 から図 5.3 は、X 軸方向の測定に用いられる IIT に関して、36 日間の fiducial fiber の位置の移動を、図 5.4 から図 5.6 は、Y 軸方向の測定に用いられる IIT に関して、50 日間の fiducial fiber の位置の移動を表している。また、それぞれの IIT の fiducial fiber の移動の平均と標準偏差の分布を図 5.7 および図 5.8 に示す。図 5.1 から図 5.6 の左図より、いくつかの IIT に関しては、fiducial fiber の移動に傾向が見られることが分かる。しかし、図 5.7 および図 5.8 からわかるように、すべての IIT の平均および標準偏差は 1 ピクセル (IIT 表面で $130\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ に相当) 以下であり、その移動はわずかである。

次に、ファイバーバンドルや IIT のサポートが緩やかに連続的に移動すると仮定し、30 日あたりに換算した fiducial fiber の CCD 上での x 方向および y 方向の移動の分布を図 5.9 に示す。これにより、30 日あたりの fiducial fiber の移動は全体の 99 % 以上が 1 ピクセル以内であることが良く分かる。

5.1.2 ファイバー位置較正の間隔

CCD 上のファイバーの位置較正には、x 軸方向、y 軸方向共にファイバー半径 (CCD の 2 ~ 2.5 ピクセルに相当) の精度が要求される。これらは、完全に隣のファイバーを通過した

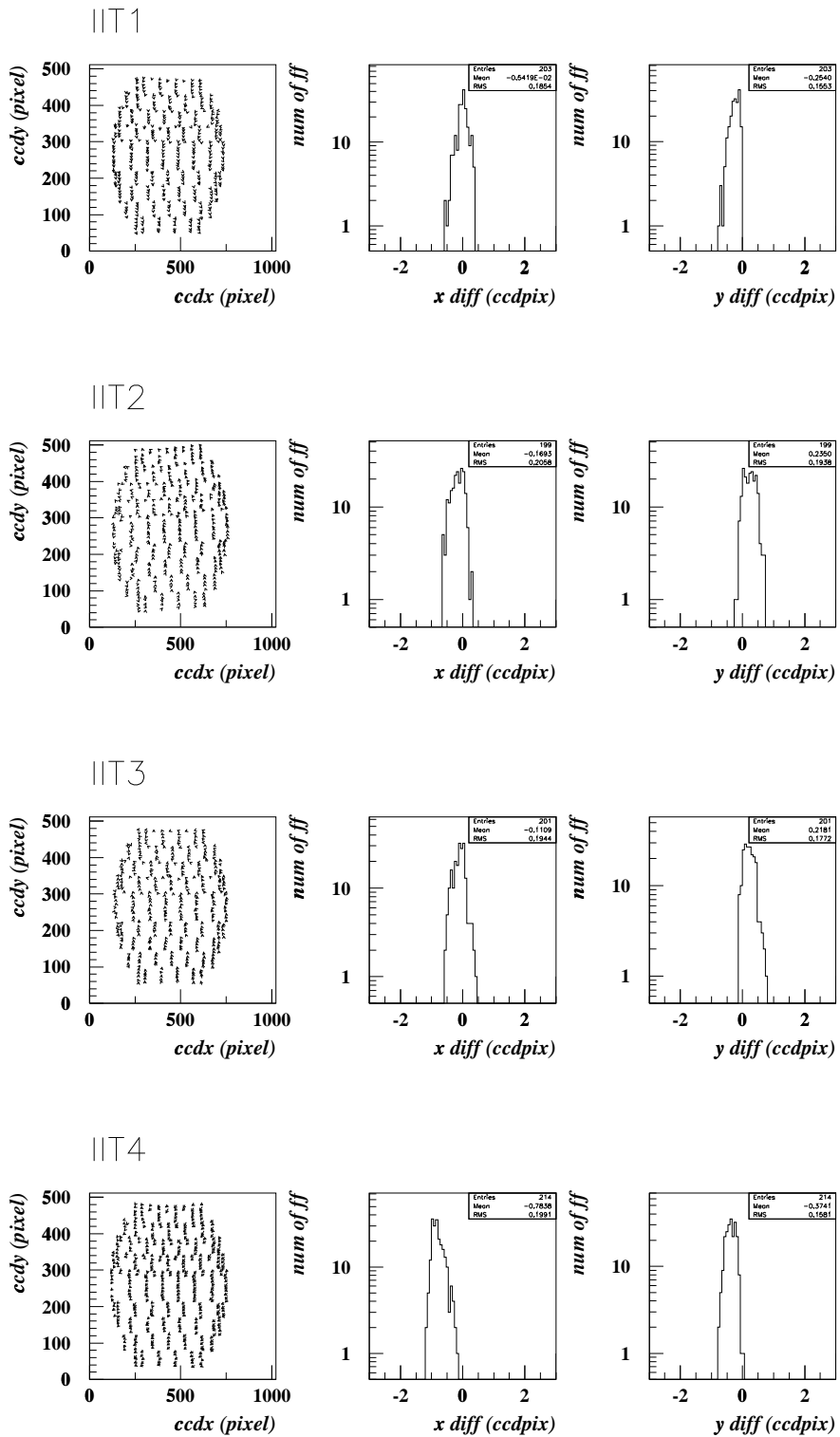


図 5.1: IIT1,2,3,4 の fiducial fiber の動き (36日間) 1ピクセルは IIT 表面で $130\mu m \sim 170\mu m$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

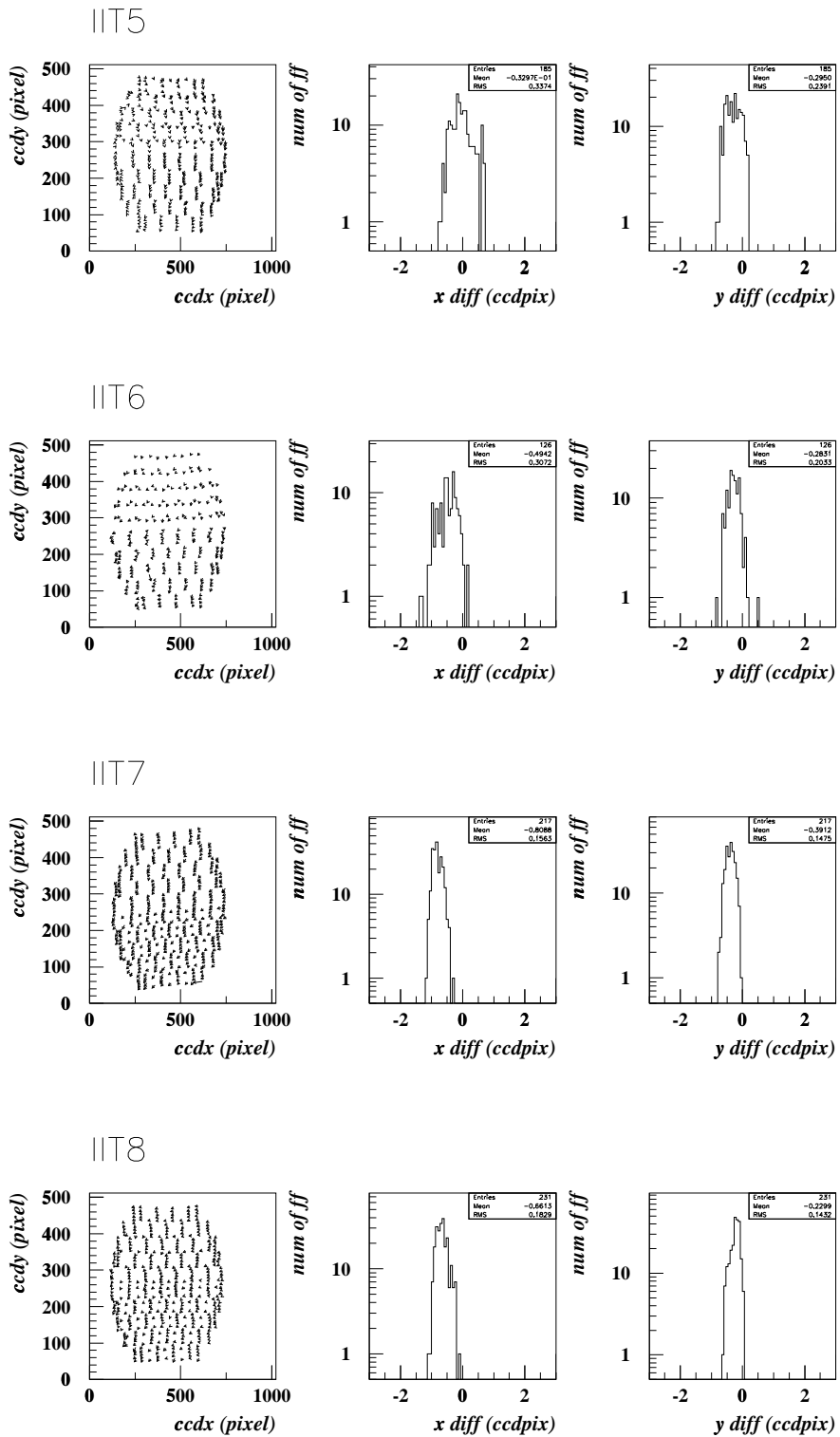


図 5.2: IIT5,6,7,8 の fiducial fiber の動き (36日間) 1ピクセルは IIT 表面で $130\mu m \sim 170\mu m$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

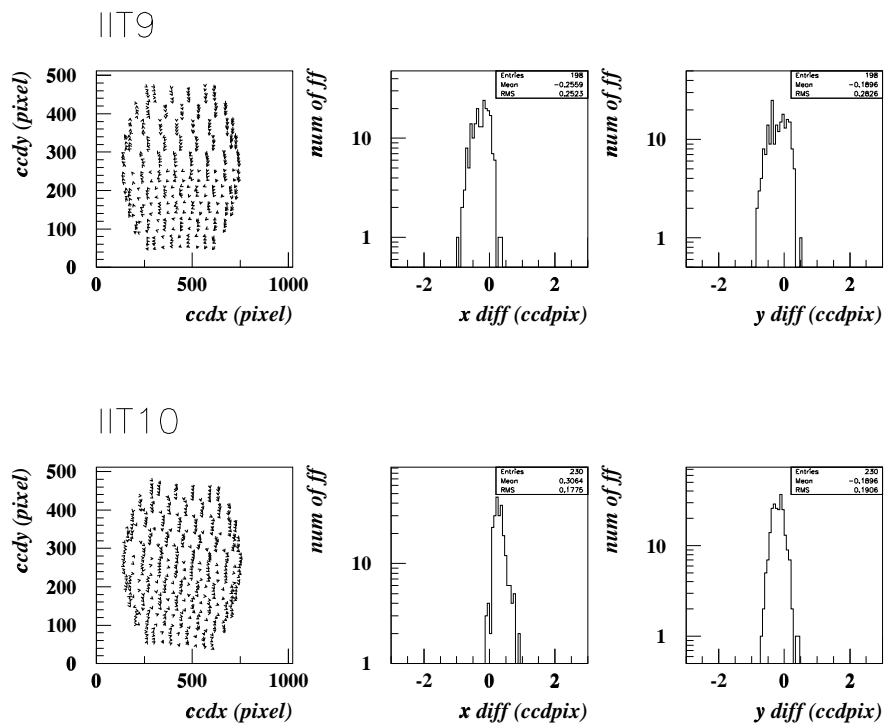


図 5.3: IIT9,10 の fiducial fiber の動き (36 日間) 1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

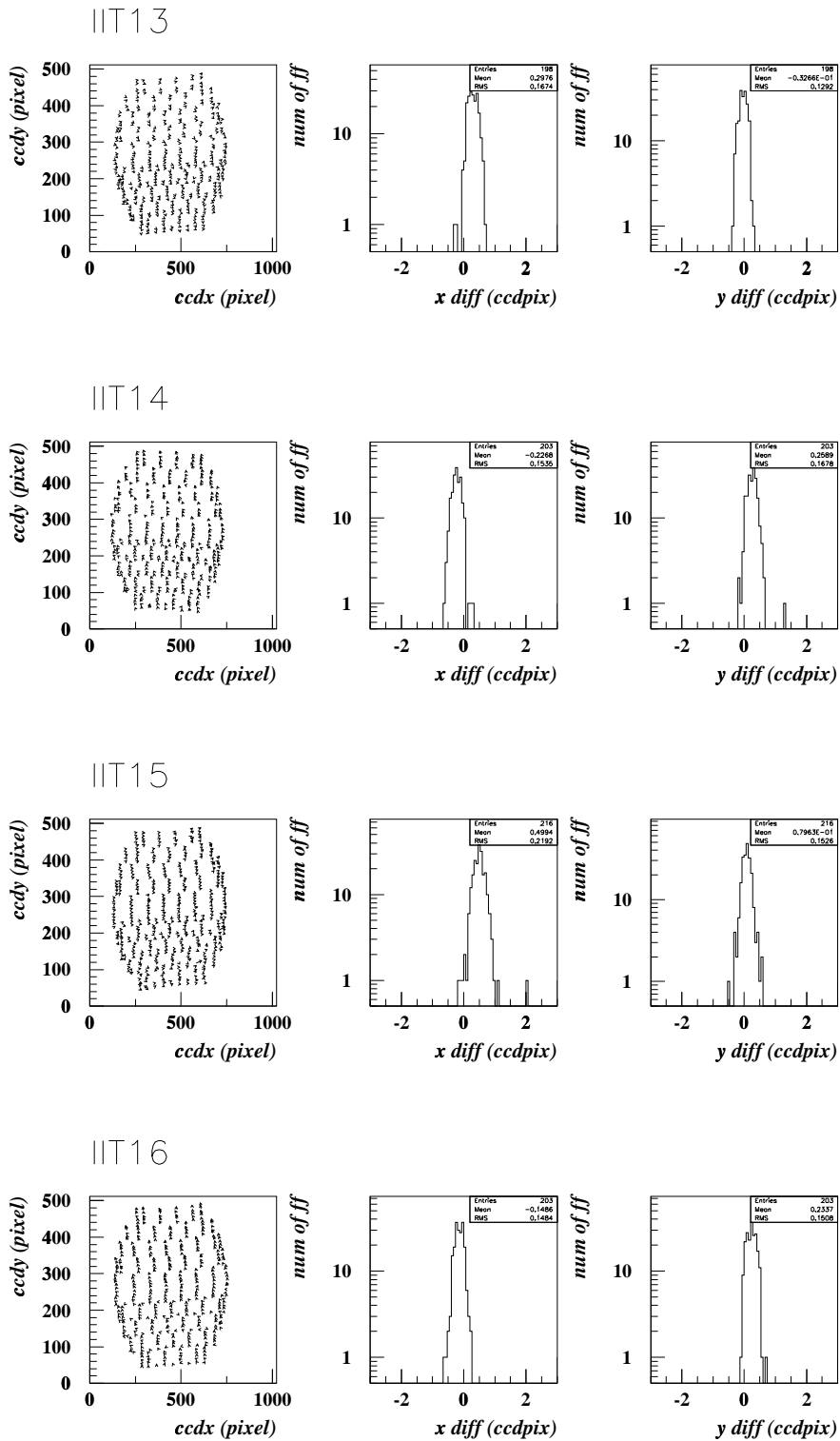


図 5.4: IIT13,14,15,16 の fiducial fiber の動き (50 日間) 1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}$ ~ $170\mu\text{m}$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

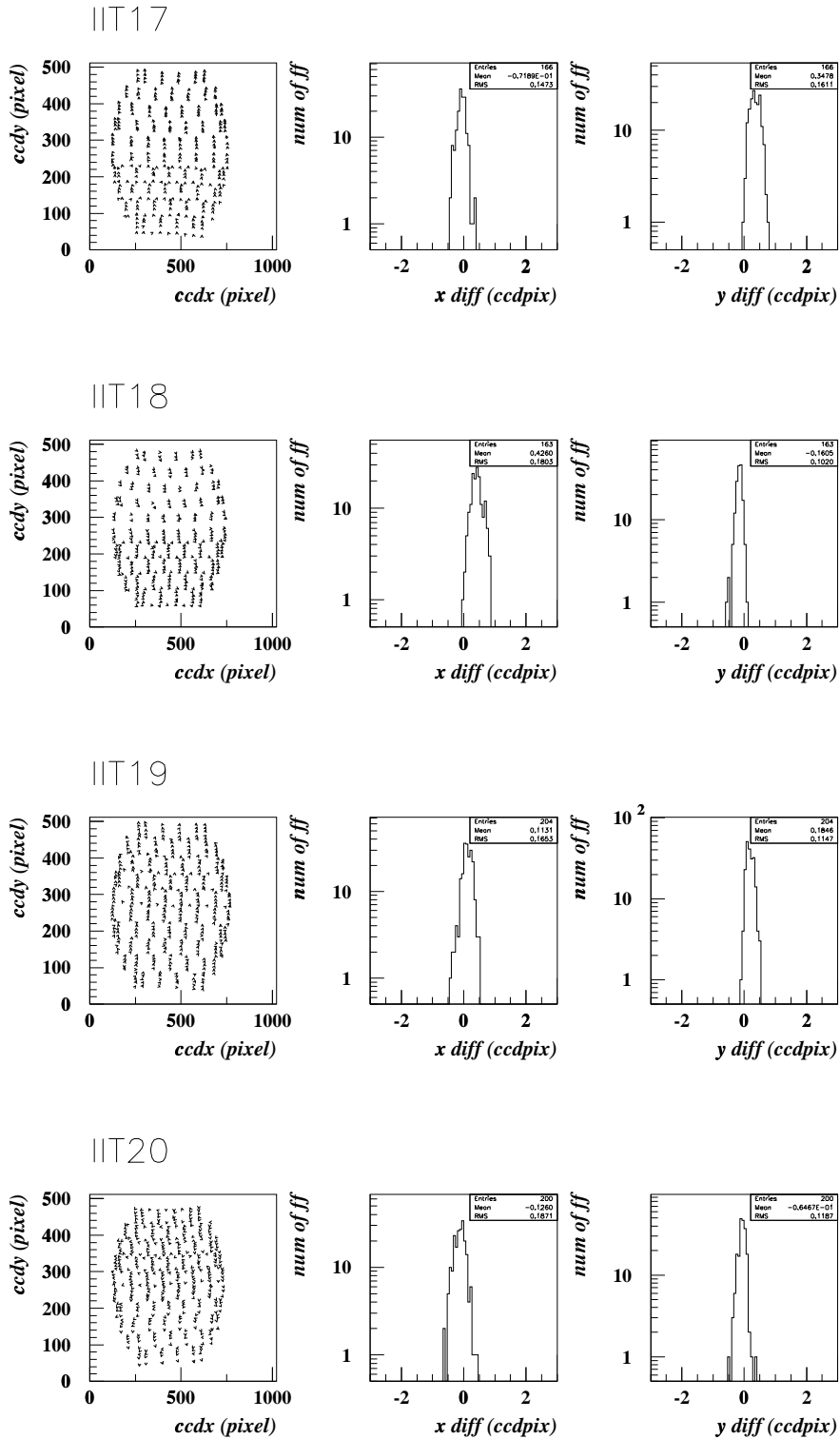


図 5.5: IIT17,18,19,20 の fiducial fiber の動き (50 日間) 1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}$ ~ $170\mu\text{m}$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

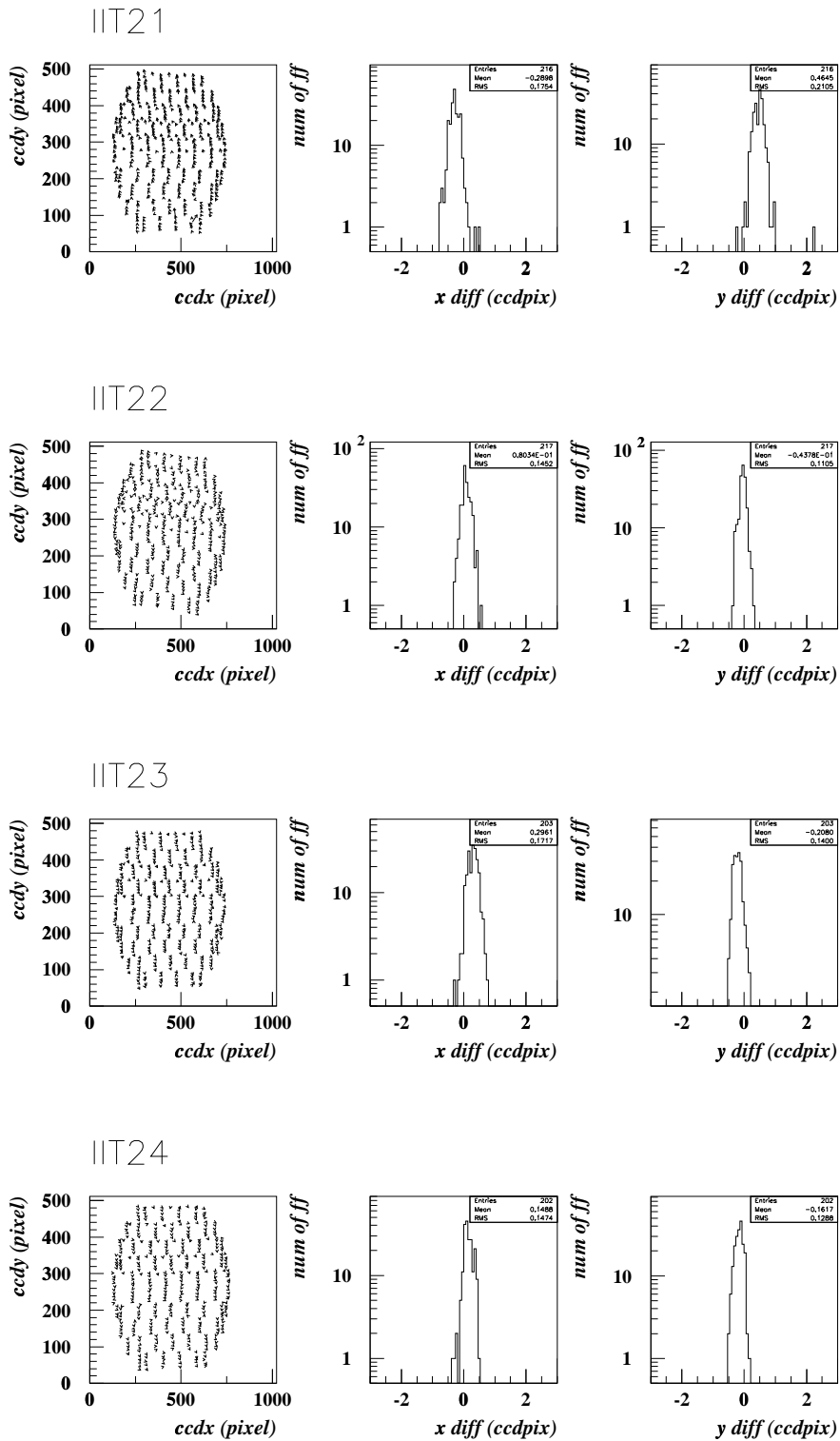


図 5.6: IIT21,22,23,24 の fiducial fiber の動き (50 日間) 1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}$ ~ $170\mu\text{m}$ に相当する。左図は移動を矢印で示している。矢印の長さは実際の移動の 15 倍を示している。

x IIT movement for 36 days

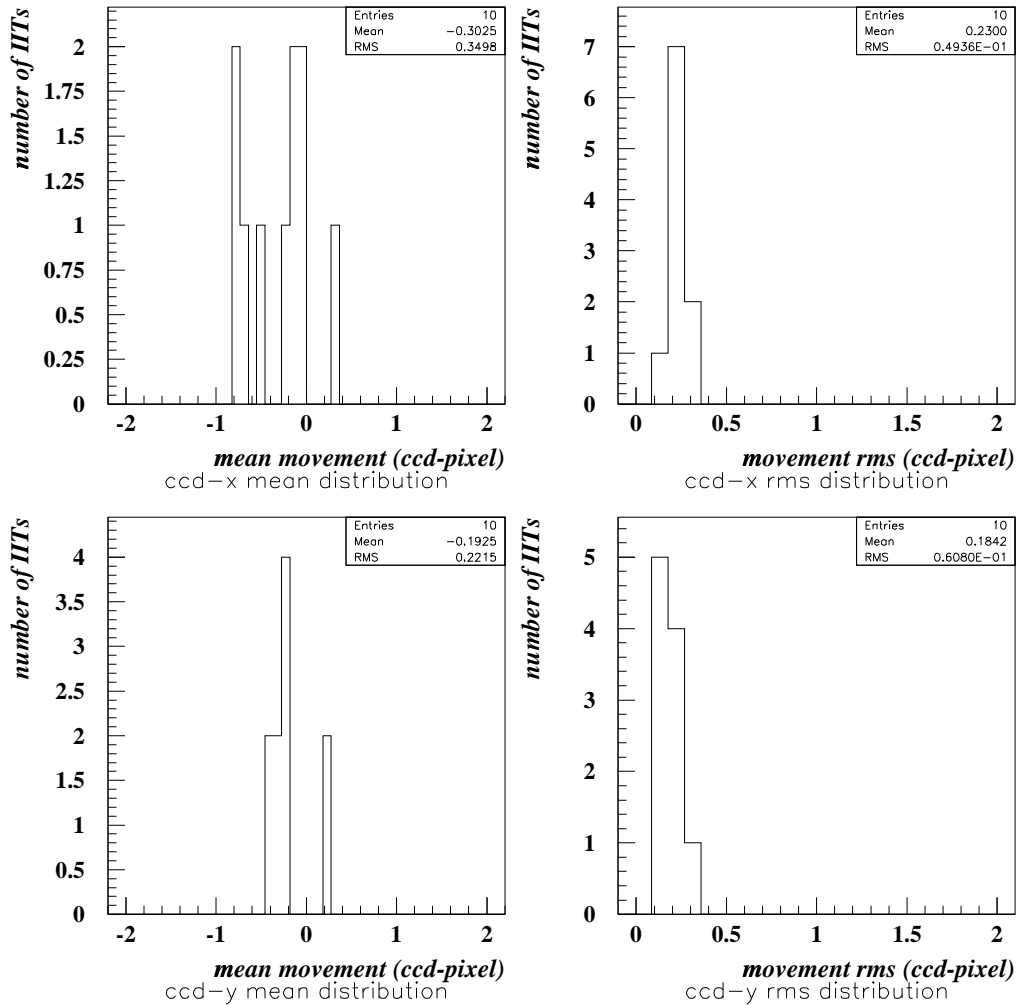


図 5.7: X 軸方向に設置された IIT の fiducial fiber の動き (36 日間)

左上は、CCD 座標上での fiducial fiber の x 方向の移動の平均、右上は、その標準偏差の分布を示している。また、左下は、CCD 座標上での fiducial fiber の y 方向の移動の平均、右上は、その標準偏差の分布を示している。CCD 座標上での fiducial fiber の動きは 4~5 ピクセルのファイバー直径に対し非常に小さい。1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}$ ~ $170\mu\text{m}$ に相当する。

y IIT movement for 50 days

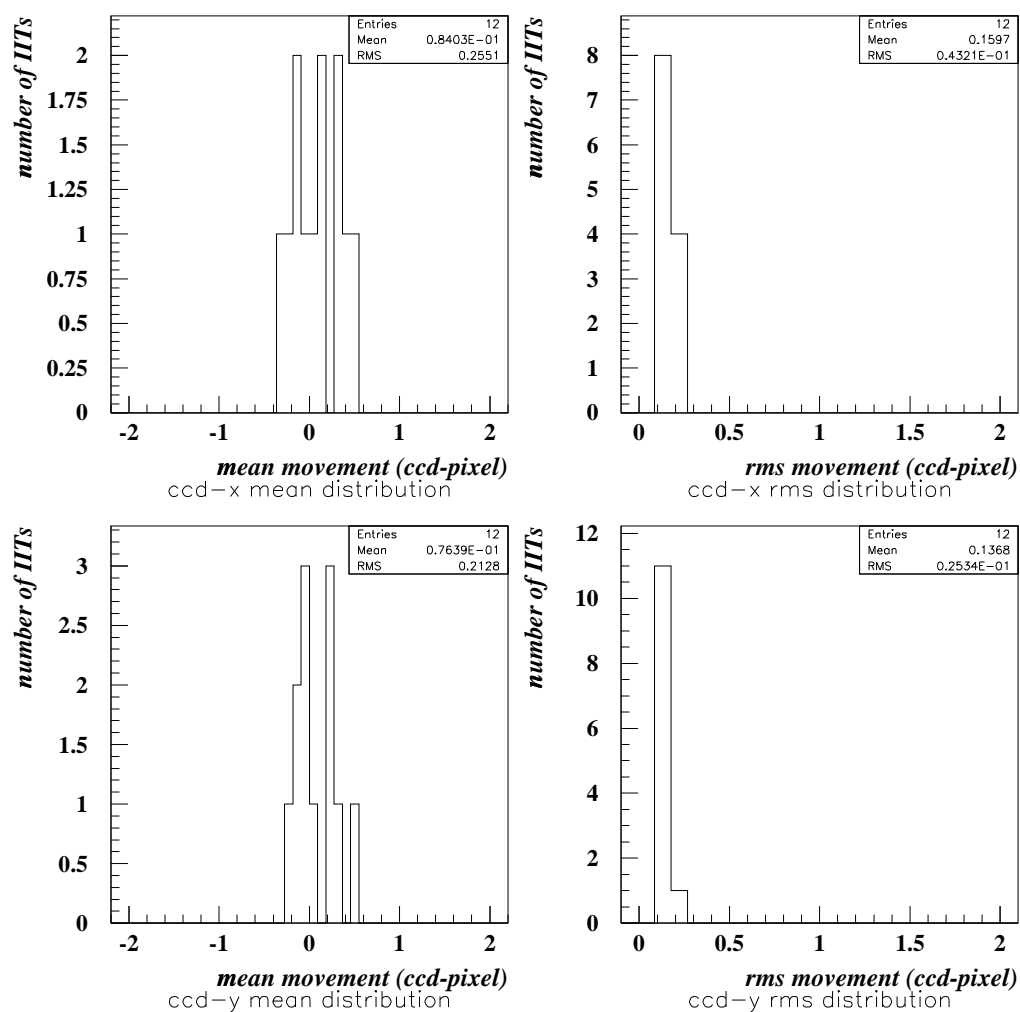


図 5.8: Y 軸方向に設置された IIT の fiducial fiber の動き (50 日間)

左上は、CCD 座標上での fiducial fiber の x 方向の移動の平均、右上は、その標準偏差の分布を示している。また、左下は、CCD 座標上での fiducial fiber の y 方向の移動の平均、右上は、その標準偏差の分布を示している。CCD 座標上での fiducial fiber の動きは 4~5 ピクセルのファイバー直径に対し非常に小さい。

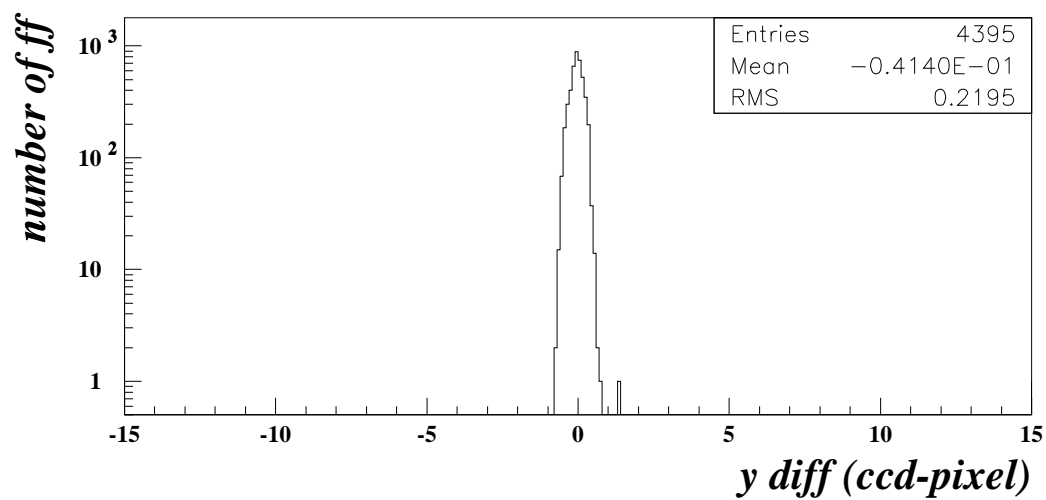
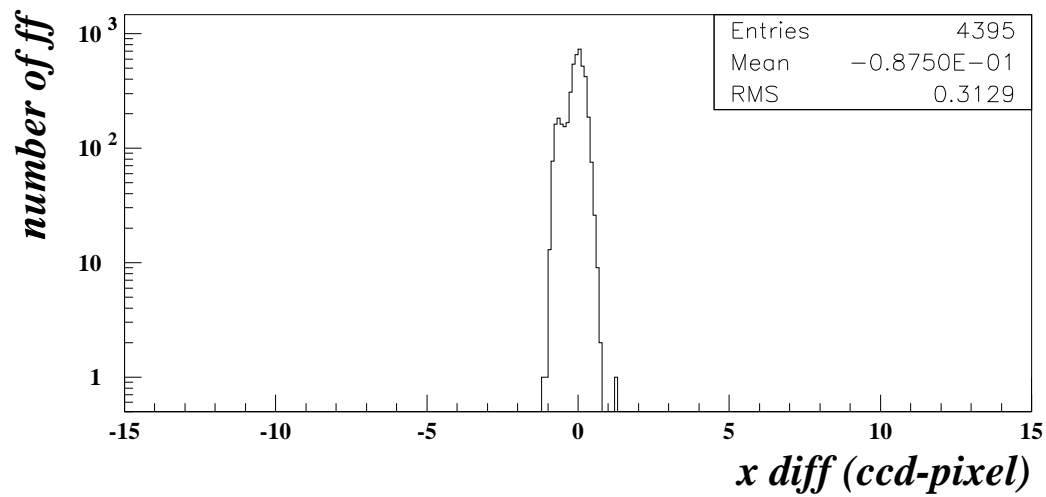


図 5.9: 全についての fiducial fiber の移動の分布

解析に用いたデータの測定間隔が X 軸方向の IIT と Y 軸方向の IIT の間で異なるため、30 日間あたりに換算して表示している。CCD1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu m \sim 170\mu m$ に相当する。

と誤認しないために、また、ファイバーバンドルにおいて上下に隣接しているファイバーリボンを通過したと誤認しないために必要な精度である。

第5.1.1節の結果から、IITとファイバーバンドルの取り外しなどの作業を行わない限り、CCD上でのファイバー位置は安定であり、ファイバーの位置較正は一ヶ月に一度行なうことで十分な精度を得られることわかる。

5.2 IITのヒット検出効率安定性

実験期間中にIITからの応答が安定であることを確かめるために、1999年11月に約1ヶ月間続いたニュートリノビーム実験期間の前後に取られた宇宙線データを用いて解析を行った。比較に用いる2つのデータは30日の期間を隔てて収集されている。

まず、2つのデータの比較のために行ったファイバーシートの粒子通過（以下、ヒット）の認識方法と飛跡の選択について述べる。

ヒットの認識: 今回の解析では以下の手順に従い、ヒットを定義した。

- (1) 各ピクセルの輝度に対して、閾値を設け、カットをかける。
データ収集システムにおいて、各IITごとにCCDピクセルの輝度に閾値を設け、その閾値以上の輝度をもつピクセルのデータを選択的に収集している。しかし、これは、データサイズの許す限り閾値を低く設け、できる限り多くのデータを収集できることを優先しているため、解析時には、まず、この閾値よりさらに高い閾値を設け、各ピクセルデータに対してカットをかける。特に今回の解析では、2つのデータを比較するために、実験期間中の解析に用いるよりも高い閾値をもうけている。
- (2) ビデオ信号などによる偶発的なノイズを取り除くために孤立したピクセルを除去。
- (3) 各ファイバーの内側に入るピクセル数をカウントし、IIT毎に設けられた閾値でカットをかけ、ヒットファイバーを定義する。
- (4) 2層俵積みのファイバーシートにおいて、隣接するヒットファイバーをつなぎあわせた魂（以下ファイバークラスター）を認識し、これをヒットと定義する。利得率の高いIITに対しては、ファイバーシートの俵積みの上下層にファイバークラスターが跨っていることを要求し、IITでの像のにじみやその他のノイズを除去する。（図5.10参照）

飛跡の選択: 上記のようにして認識したCCD上でのヒットを、実空間の座標になおして飛跡認識[35]を行った後に、その飛跡に対して、X軸およびY軸射影が20層のファイバーシートを通過していることを要求した。これは、エネルギーの高い粒子による飛跡を選択するためである。実験期間の前に取ったデータに対して1317本の飛跡を、実験期間の後に取ったデータに対して1711本の飛跡を選択している。図5.11に選択されたイベントの例を示す。

このようにして選択した飛跡に付随するヒットのみを用いて、ヒット検出効率を計算した。

図 5.12 および図 5.13 に、ニュートリノビーム実験期間の前に取ったデータでの、IIT の各ファイバーシートのヒット数を示しておく。

IIT のヒット検出効率を求めるにあたって、まず、240 枚のファイバーシートについてヒット検出効率を求めた。各ファイバーシートのヒット検出効率 ε_{sheet} は以下の定義に従う。

$$\varepsilon_{sheet} = \frac{\text{ファイバーシートにヒットが存在した回数}}{\text{飛跡のファイバーシート通過回数}} \quad (5.1)$$

各 IIT には、図 3.10 に示したように、それぞれ 10 枚のファイバーシートが設置されている。このため、各 IIT のヒット検出率は、その IIT が設置されているファイバーシートの検出効率の平均として計算できる。ただし、ニュートリノビーム上流から見て 1 層目と 20 層目に当たるファイバーシートは、選択した飛跡が 20 層にわたるという条件により、常に完全なヒット検出効率を得ることになるため、計算からは除外する。

図 5.14 に上記のようにして求めた各 IIT のヒット検出効率を示す。図中の黒丸と白丸は、それぞれニュートリノビーム実験期間の前に取ったデータと後に取ったデータでのヒット検出効率を示している。ここで、3 本の IIT については、この期間中に MCP の利得率をなどの設定を変更したために除外している。

また、図 5.15 に、20 本の IIT のヒット検出効率の変動の分布を示す。

ここで、ヒット検出効率の変動 f は、

$$f = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \times 100 \quad (5.2)$$

という定義にしたがって計算した値である。ただし、 ε_b および ε_a は、それぞれ、30 日の期間の前と後の IIT のヒット検出効率を表している。この図より、30 日間の実験期間中の IIT のヒット検出率の変動 f は、21 本の IIT のうち、1 本を除いては、4 % 以内であったことがわかる。図 5.16 は、ヒット検出効率に大きな変動がみられた IIT での、ヒットに付随するピクセルクラスターのピクセル数の分布を示している。図中の上段は期間の前、下段は期間の後の分布である。この平均値は大きく減少しており、ここからも IIT での応答が変動していることが分かる。

最後に、6 枚のファイバーシートからなる各層のヒット検出効率を図 5.17 および図 5.18 に示しておく。図 5.17 は、シンチレーティングファイバー飛跡検出器の X 軸方向について、また、図 5.18 は、シンチレーティングファイバー飛跡検出器の Y 軸方向についての各層のヒット検出効率を示している。これらの図からも実験期間中飛跡検出器として安定であったことが分かる。

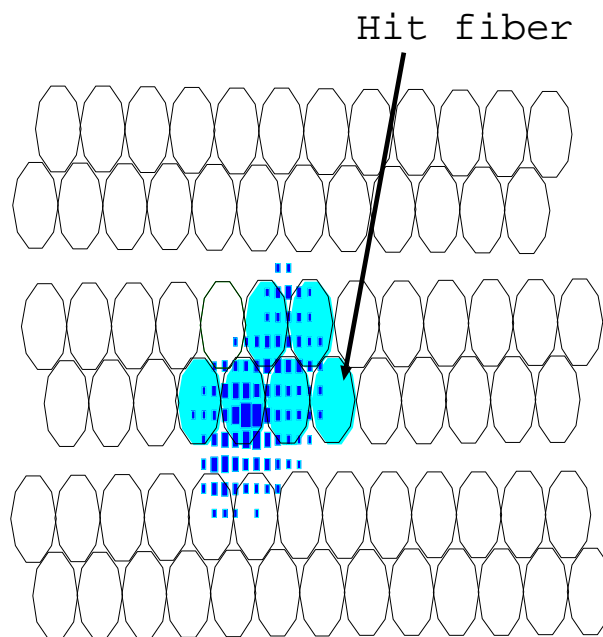


図 5.10: CCD 画面上でのヒットの認識。閾値以上のピクセル数をもつファイバーをヒットファイバーと定義し、さらにヒットファイバーの魂をファイバークラスタと呼ぶ。このファイバークラスタに属するピクセルの重心をヒット位置としている。利得率の高い IIT のヒット認識に対しては、ファイバークラスタがファイバーシートの俵積みの上下2層に跨っていることを要求する。

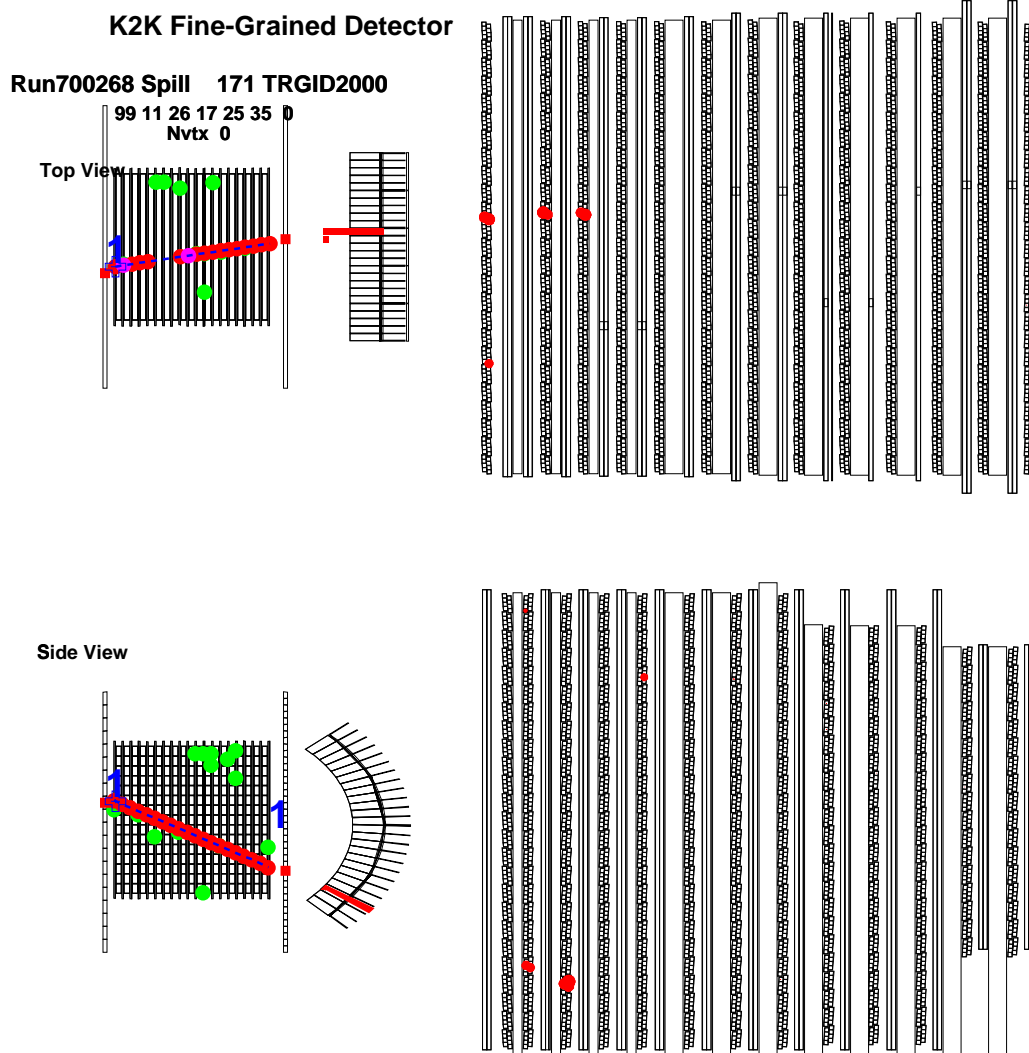


図 5.11: IIT のヒット検出効率の安定性を見るために選択した宇宙線イベントの例。上図は、X 軸方向の射影（検出器上方からの視点）、下図は、Y 軸方向の射影（検出器横からの視点）を示している。X 軸および Y 軸射影が 20 層のファイバーシートを通過しているもののみを選択した。

IIT hit entries

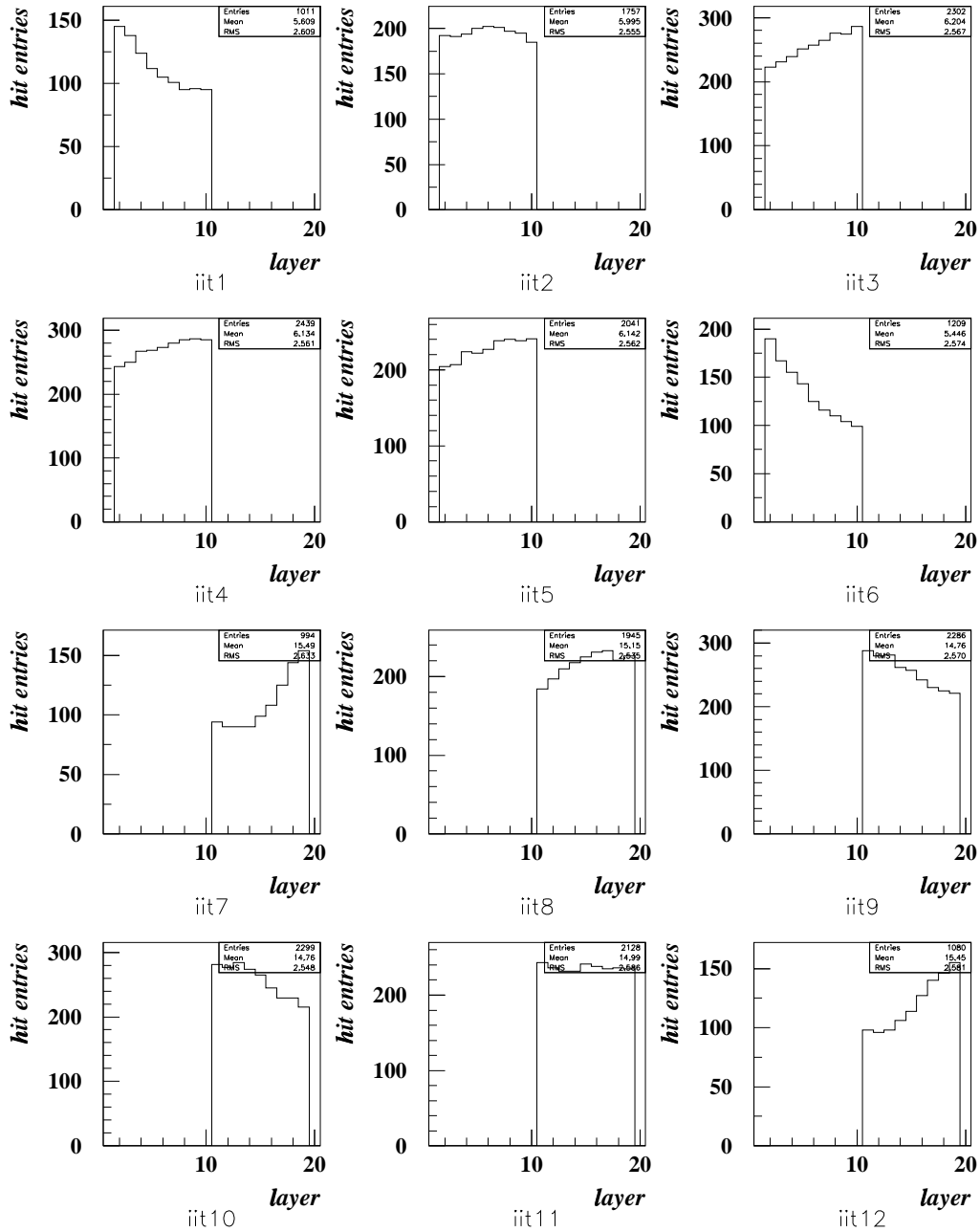


図 5.12: 各 IIT のヒット数の分布 (1)

IIT hit entries

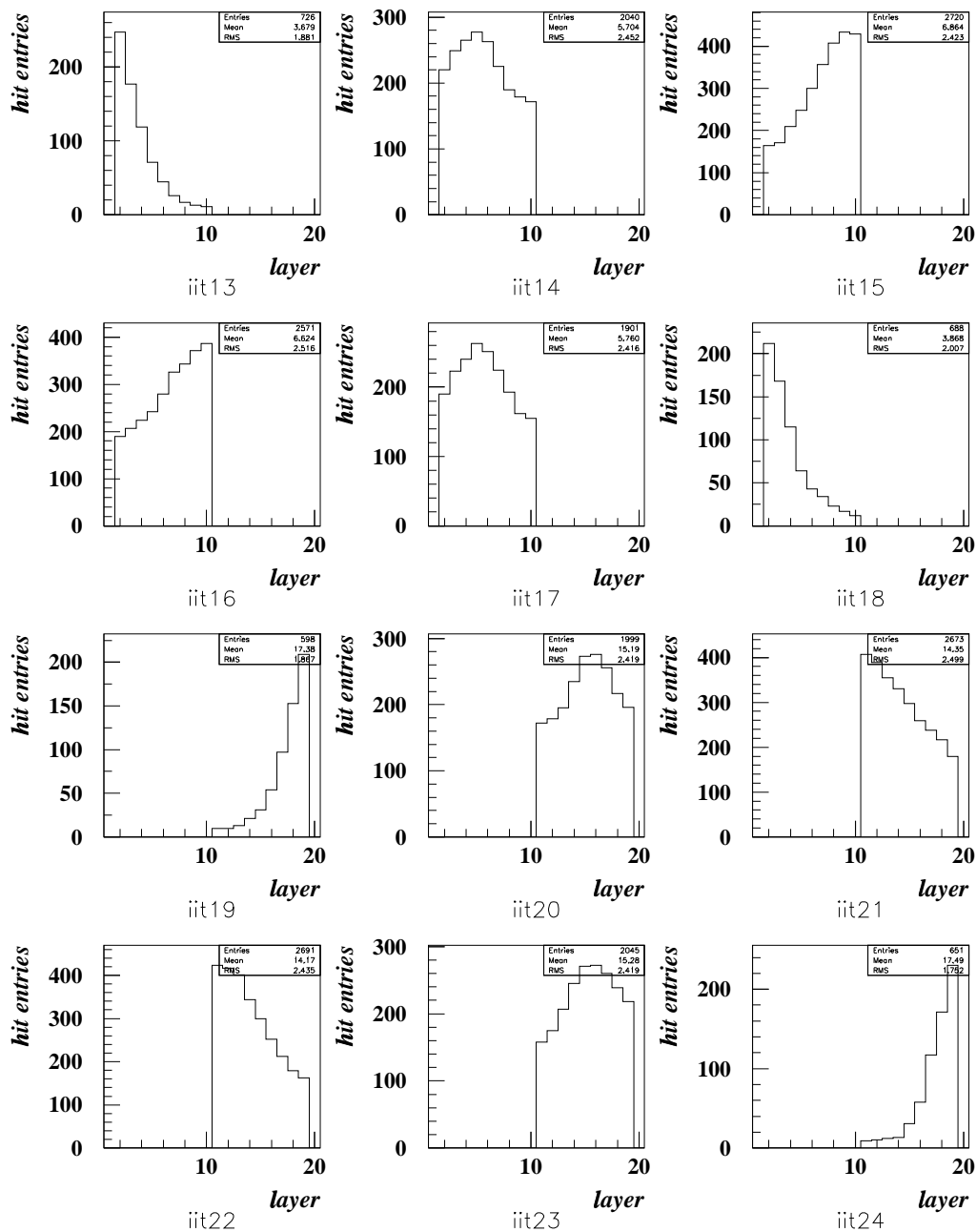


図 5.13: 各 IIT のヒット数の分布 (2)

IIT efficiencies

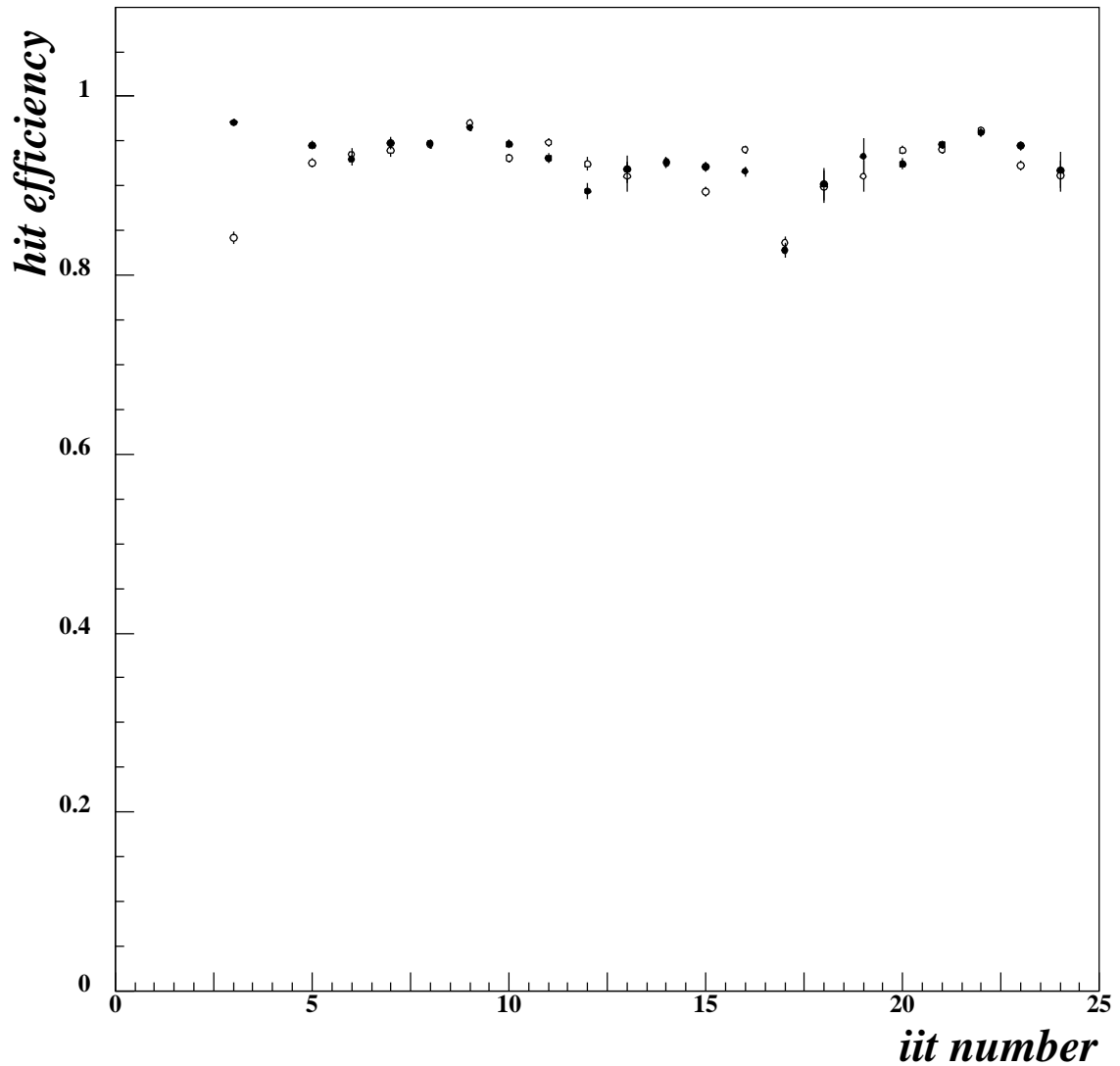


図 5.14: 30 日の期間を隔てて取った宇宙線データより求められた IIT のヒット効率。黒丸と白丸は、期間の前と後のヒット効率を示している。IIT1、IIT2 および IIT4 は、この期間中に MCP の利得率をなどの設定を変更したために、掲載していない。また、2 つのデータの解析条件を揃えるために、ピクセルのもつ輝度に対し通常よりも高い閾値を設けて解析を行ったため、通常の解析よりもヒット検出効率は若干低くなっている。

efficiency fluctuation

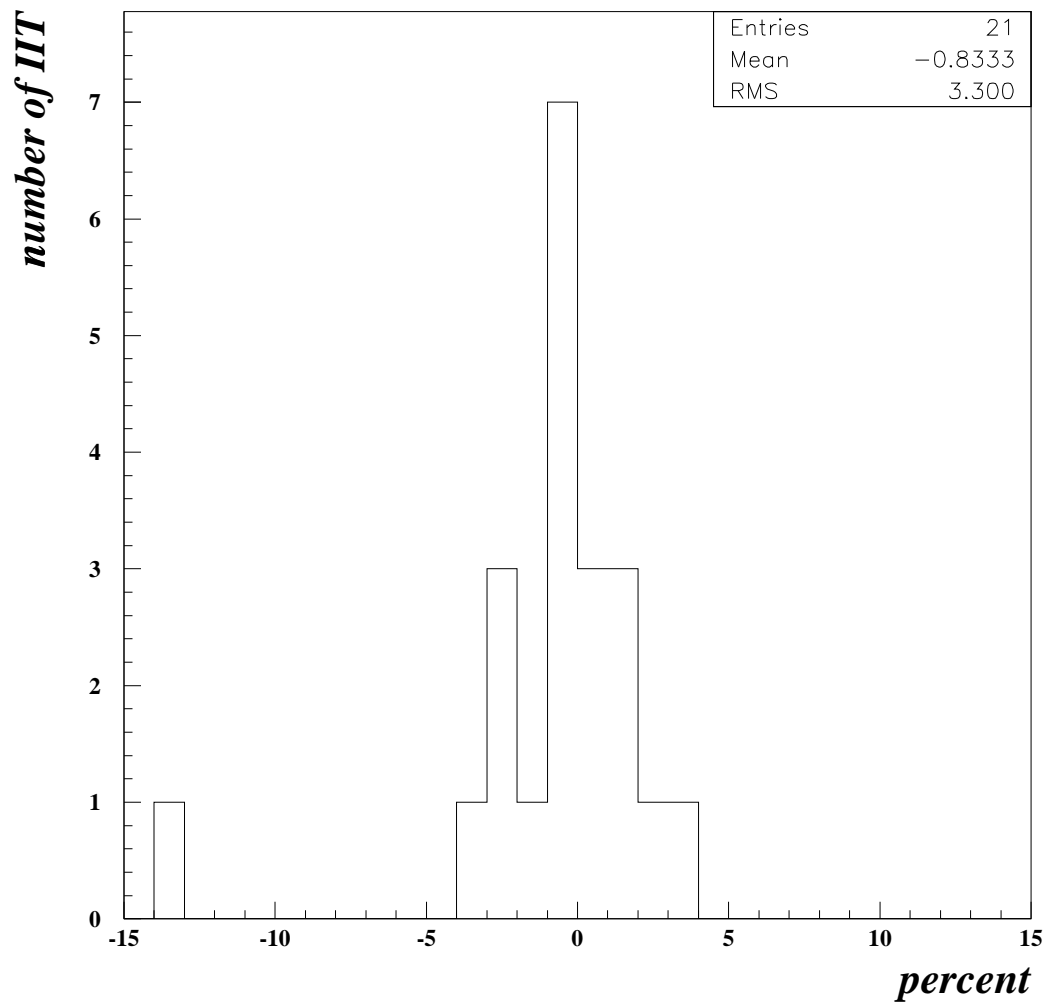


図 5.15: 30 日の期間を隔てて取った宇宙線データより求められた IIT のヒット効率の変動。

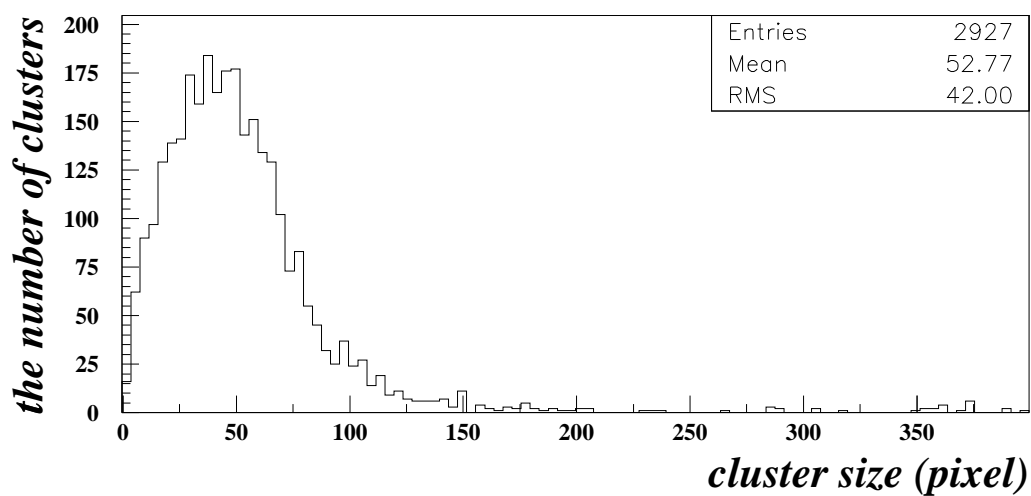
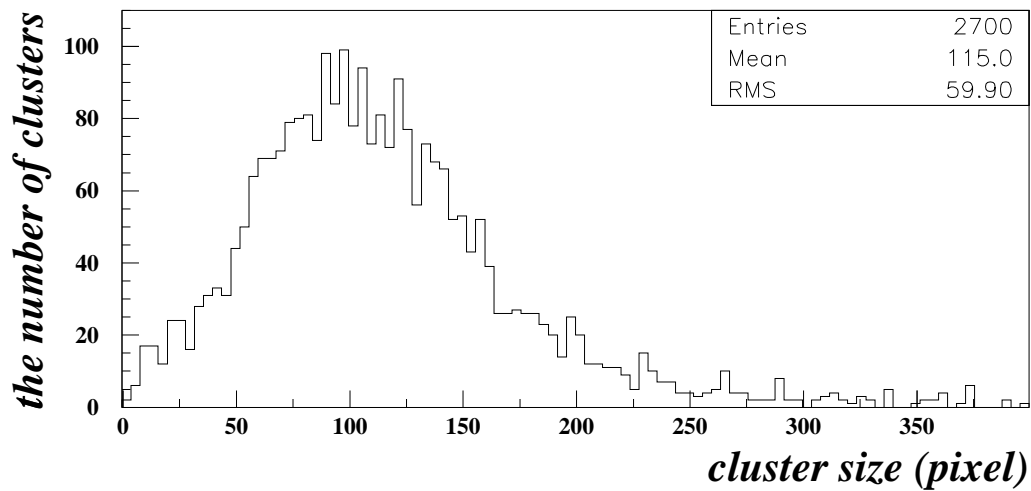


図 5.16: 大きな変動があった IIT (IIT3) のピクセルクラスターサイズの分布。上段は 30 日の期間の前、下段は期間の後のヒットに付随するピクセルクラスターのサイズの分布。ここでのピクセルクラスターのサイズは、そのクラスターを形成するピクセル数である。

x layer hit efficiencies

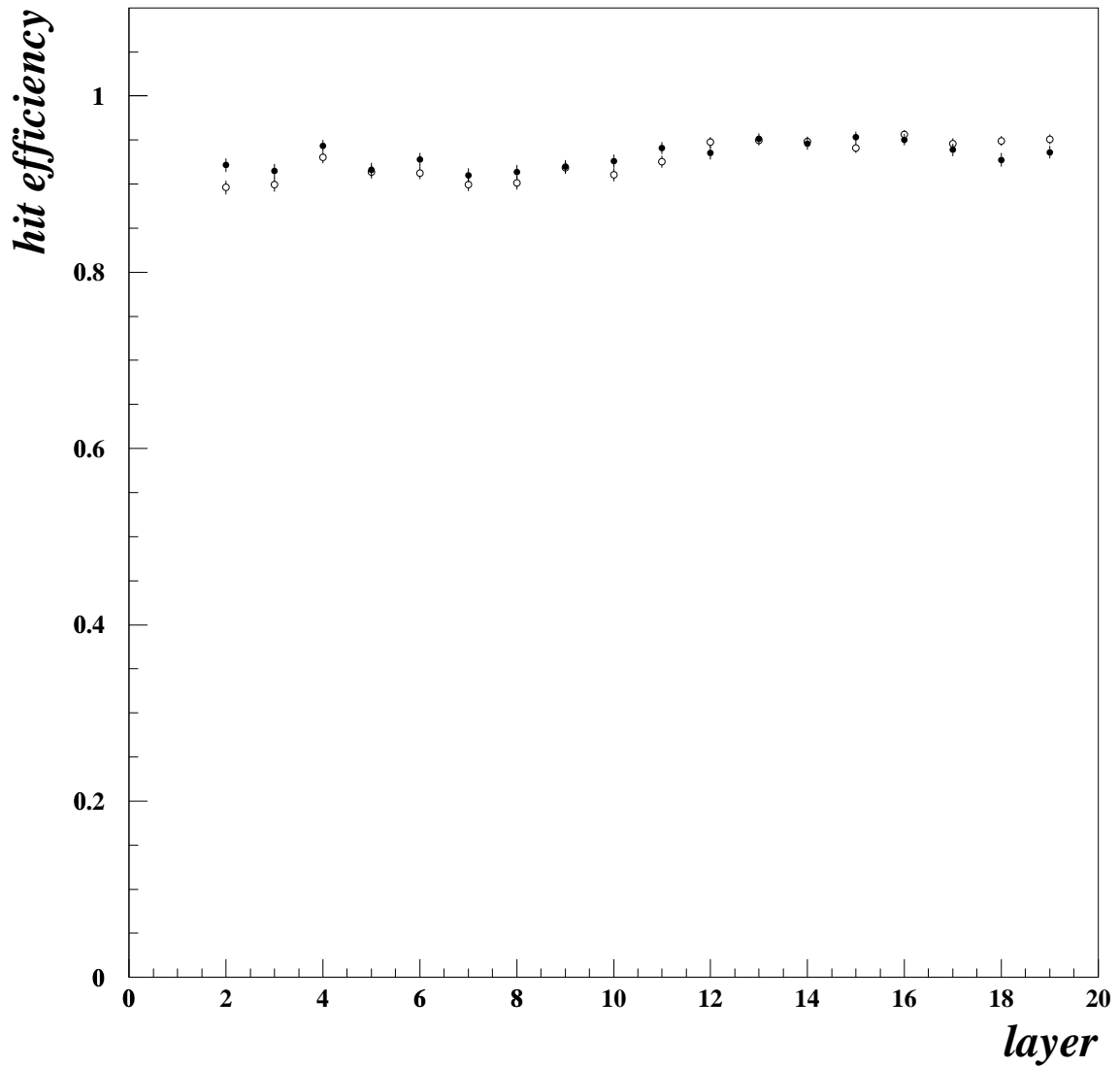


図 5.17: 30日の期間を隔てて取った宇宙線データより求められた各層のヒット検出効率 (X射影)。黒丸と白丸は、期間の前と後のヒット検出効率を示している。

y layer hit efficiencies

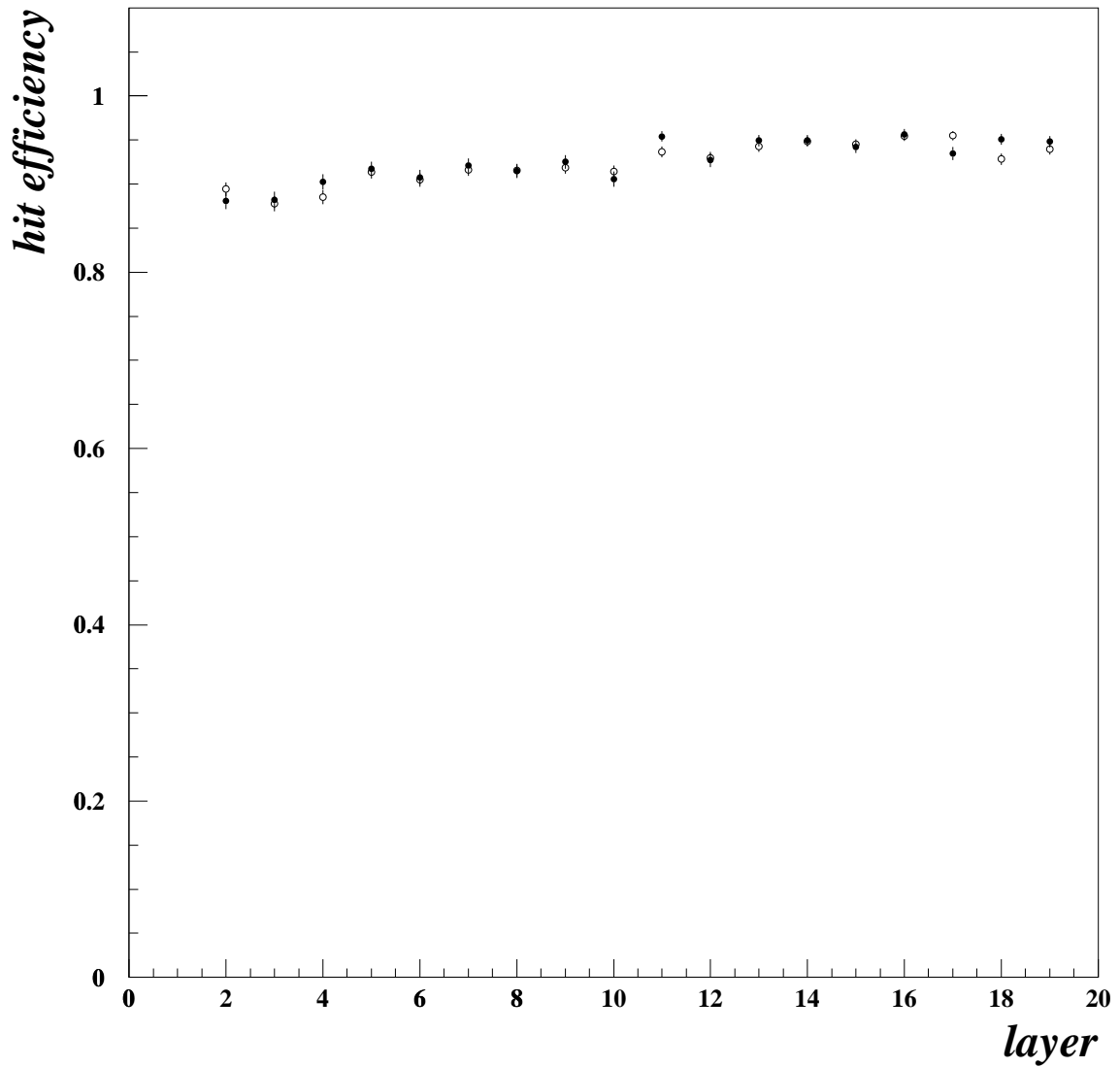


図 5.18: 30日の期間を隔てて取った宇宙線データより求められた各層のヒット検出効率 (Y射影)。黒丸と白丸は、期間の前と後のヒット検出効率を示している。

第6章 結論

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験では、前置検出器にシンチレーティングファイバー飛跡検出器を使用している。本論文では、この飛跡検出器の CCD 座標上でファイバー位置較正に関し、fiducial fiber の位置を測定する方法の開発と評価を行い、CCD 座標の x 軸方向に対しては全 fiducial fiber の 99.6 % が 0.5 ピクセル以内、y 軸方向に対しては全 fiducial fiber の 99.3 % が 0.5 ピクセル以内の精度をもつことを確かめた (1 ピクセルは IIT 表面で $130\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ に相当、ファイバー直径は約 $700\mu\text{m}$)。

また、さらに、実験期間中のイメージンテンシファイアの安定性について研究を行った。まず、fiducial fiber の位置の移動について調べ、30 日間の fiducial fiber の移動は、その全体の 99 % 以上が 1 ピクセル以内であり、この期間内での移動は実験を遂行するのに必要な精度に比べ十分に小さいことを確かめた。さらに、実験期間の前後に取った宇宙線データを比較し、21 本の IIT のうち、20 本の IIT のヒット検出効率の変動が 4 % 以下であることを確認し、実験期間中の IIT の応答が十分に高く、安定であることを確かめた。しかし、1 本の IIT についてはヒット検出効率が大きく変動しているという結果が得られており、今後も、引き続き IIT の応答の変化に注意を払っていく必要があると考えられる。

付 録 A 種々の作業を行った際の fiducial fiber の移動

参考として、図 A.1 から図 A.5 にシンチレーティングファイバー飛跡検出器内で様々な作業を行った際の fiducial fiber の CCD 座標上での動きを示す。右図の矢印は、それぞれの fiducial fiber の移動を 15 倍にして表示している。

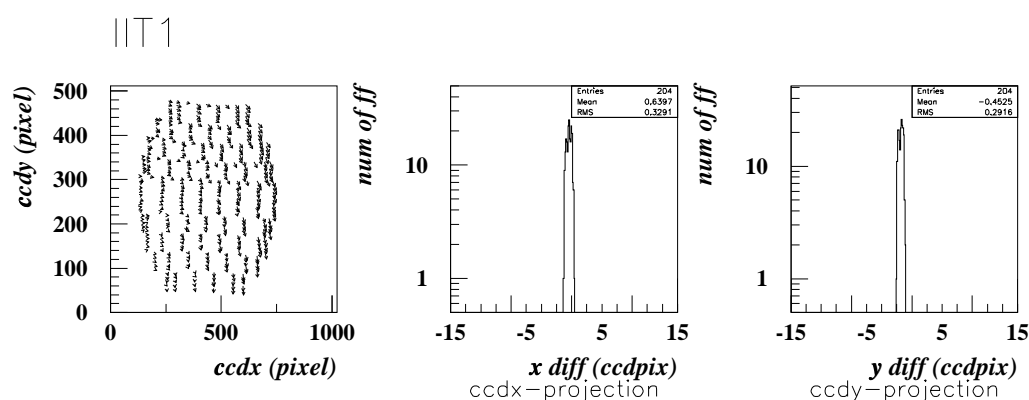


図 A.1: 近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT1)
この IIT はファイバーバンドルと IIT が横にずれるのを防ぐための輪状の器具の取外しを行った。

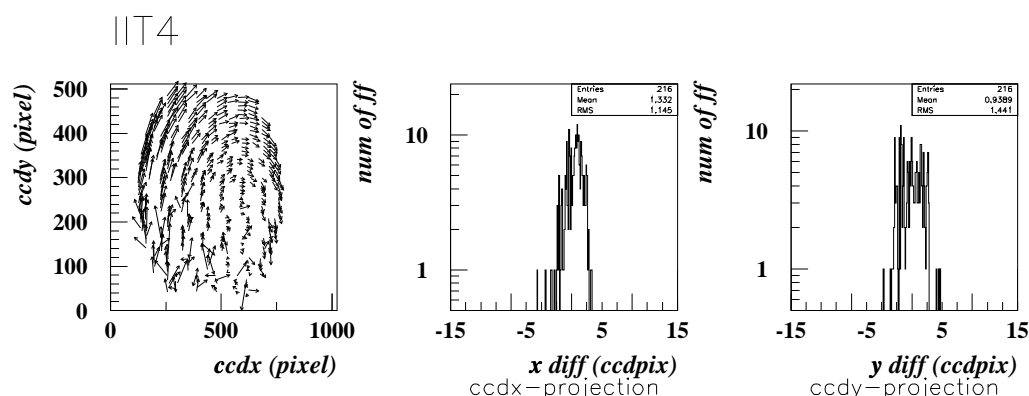


図 A.2: 近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT4)
この IIT はファイバーバンドルと IIT 表面が離れていたため付け直しを行った。

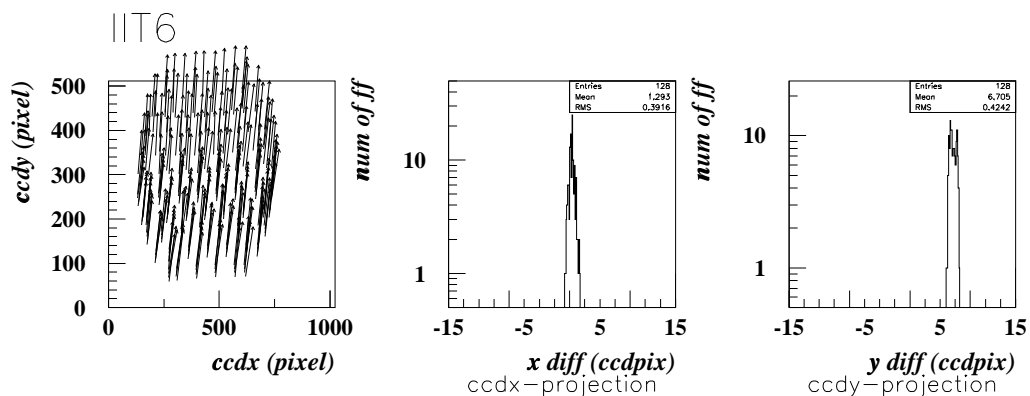


図 A.3: 近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT6)
この IIT はファイバーバンドルと IIT 表面が離れていたため付け直しを行った。

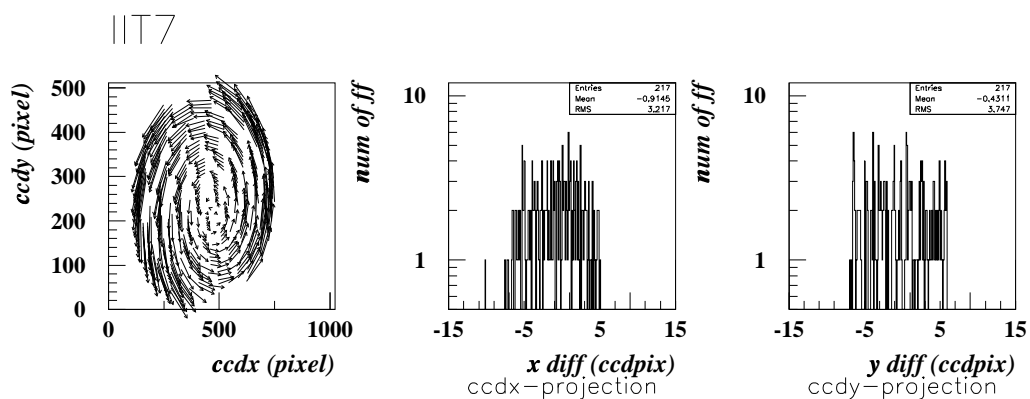


図 A.4: 近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT7)
この IIT はファイバーバンドルと IIT 表面が 1mm 程度離れていたため付け直しを行った。

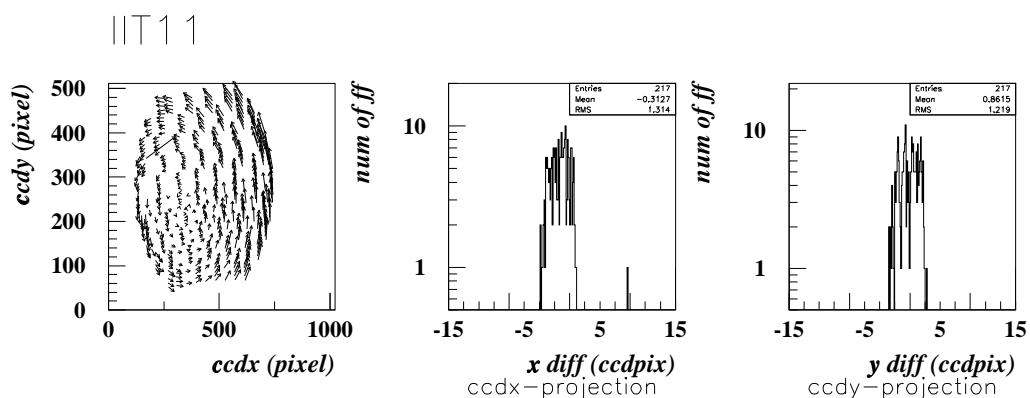


図 A.5: 近辺で作業を行った際の IIT の fiducial fiber の動き (IIT11)
この IIT はファイバーバンドルと IIT 表面が 1mm 程度離れていたため付け直しを行った。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々に感謝を申し上げます。

初めに、「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」に参加する機会を与えて下さいました神戸大学の武田 廣教授、野崎 光昭教授に深く感謝致します。

京都大学の西川 公一郎教授、高エネルギー加速器研究機構の中村 健蔵教授の御二方には、本実験の責任者としてお世話になりました。

神戸大学の原 俊雄先生、青木 茂樹先生、鈴木 州先生には、研究についてはもちろんのこと、多岐ににわたり御指導頂きましたことを深く感謝致します。

高エネルギー加速器研究機構の作田 誠助教授、早戸 良成助手、石田 卓助手、酒井 敦博士、石野 宏和博士、H.Park 博士、カリフォルニア大学アーバイン校の峰 俊一博士には、本研究を進めるにあたって、度々御助言を頂きましたことを深く感謝致します。

高エネルギー加速器研究機構の石井 孝信助手、大山 雄一助手、小林 隆助手、東北大学の長谷川 琢哉助手には、研究に望む際の姿勢を教わりました。有難うございました。

神戸大学の小浜 光洋さん、東北大学の丸山 和純さん、東京大学の稲垣 隆宏さん、大阪大学の吉田 誠さん、新潟大学の中村 雅利さんには、高エネルギー加速器研究機構での研究生活、その他様々なことにおいてお世話になり、有難うございました。

神戸大学の岩下 大器君、久米 剛生さん、田中 康之君、東京理科大学の門脇 徹人さん、岸 正太郎君、横山 広美さん、京都大学の横山 弘和君、向井定篤君には、高エネルギー加速器研究機構での研究、生活において色々お世話になりました。

越後 慎也さん、田代 和也さん、北村 雅裕さん、佐藤 幸一さん、竹中 和彦さん、藤井 公雄さん、高月 美知代さん、大瀧 智子さん、岩尾 亮君、野田 俊介君、山田 有紀さん、西山 正吾君には神戸大学で大変お世話になりました。

最後に、家族の協力と理解がなければ、本研究はとても成し得なかったと思います。心から感謝します。

参考文献

- [1] Caso *et al.*, Particle Data Group, Eur. Phys. J. **C 3**, 1-794 (1998).
- [2] B. Achkar *et al.*, Nucl. Phys. **B 434**, 503-532 (1995)
- [3] M. Apollonio *et al.*, **hep-ex/9711002** (1997)
- [4] E. Eskut *et al.*, “The CHORUS collaboration, Search for ν_μ to ν_τ oscillation using the taudecay modes into single charged particle”, Phys. Lett. **B 434** (1998)
- [5] J. Altegoer *et al.*, “THE NOMAD EXPERIMENT AT THE CERN SPS”, CERN-PPE/97-059 (1997).
- [6] K. Eitel, *et al.*, **hep-ex/9706023** (1997)
- [7] C. Athanassopoulos, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77** 3082 (1996))
- [8] Y. Suzuki, Y. Totsuka edited, “Proceedings of the XVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics” (1998)
- [9] R.Becker-Szendy *et al.*, Phys. Rev. **D 46**, 3720 (1992).
- [10] K. Daum *et al.*, Z. Phys. **C 66**, 417 (1995).
- [11] M. Aglietta *et al.*, Europhys. Lett. **8**, 611 (1989).
- [12] W.W.M. Allison *et al.*, “The Atmospheric Neutrino Flavor Ratio from a 3.9 Fiducial Kiloton-Year Exposure of Soudan 2” **hep-ex/9901024** (1999)
- [13] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. **B 335**, 237 (1994).
- [14] Y. Fukuda *et al.*, “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos” Phys. Rev. Lett **81** (1998)
- [15] Mark Messier , private talk (1999)
- [16] E. Ables *et al.*, “P-875:A Long-baseline Neutrino Oscillation Experiment at Fermilab” (1995).

- [17] K. Kodama *et al.*, “The OPERA ν_τ appearance experiment in the CERN-Gran Sasso neutrino beam” CERN/SPSC 98-25 (1998)
- [18] ICARUS & NOE collaborations, “A proposal for a CERN-GS long baseline and atmospheric neutrino oscillation experiment” INFN/AE-99-17 (1999)
- [19] K. Nishikawa *et al.*, “Proposal for a Long Baseline Neutrino Oscillation experiment, using KEK-PS and Super-Kamiokande” (1995).
- [20] 小浜 光洋, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (1997).
- [21] 稲垣 隆宏, 東京大学理学系研究科修士論文 (1998).
- [22] 梅田 智幸, 岡山大学理学研究科修士論文 (1998).
- [23] 剣持 範, 新潟大学自然科学研究科修士論文 (1998).
- [24] 衛藤 雅之, 東海大学大学院理学研究科修士論文 (1997).
- [25] 越後 慎也, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (1998).
- [26] 田代 和也, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (1998).
- [27] 門脇 徹人, 東京理科大学理工学研究科修士学位論文 (1999).
- [28] 北村 雅裕, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (1999).
- [29] 稲田 具貞, 東京理科大学理工学研究科修士学位論文 (1999).
- [30] 久米 剛生, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (2000).
- [31] 佐藤 幸一, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (2000).
- [32] 田中 康之, 神戸大学理学部学士學位論文 (1999).
- [33] 越後 慎也, “Status report of SFT”, K2K internal report (1997).
- [34] 峰 俊一, “大口径 IIT イメージチェーンユニットのテスト”, K2K internal report (1997).
- [35] H. Park, “Scifi Tracker”, K2K internal report (2000).