

K2K 実験のシンチレーティングファイバー飛跡検出器に
おける写真画像解析

神戸大学 自然科学研究科 博士前期課程 物理学専攻
佐藤 幸一

平成 12 年 2 月 10 日

論文要旨

現在、ニュートリノは最低3種類存在することが確認されているが、その質量は極めて小さいと考えられている。素粒子の標準理論では質量をゼロと仮定しているが、その理論的根拠はない。もし2種類以上のニュートリノが異なる質量を持てばニュートリノが飛行中に他の種類のニュートリノに変わるニュートリノ振動現象が起こり得る。

1999年3月よりニュートリノ振動現象を検証するための実験、「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験(K2K実験)」が開始された。K2K実験では茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)から岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器まで人工のニュートリノを飛ばして、その両方でニュートリノのエネルギー分布を測定し、ニュートリノ振動現象を検証してニュートリノの質量を検出する。

KEK側の前置検出器にシンチレーティングファイバーを用いた粒子飛跡検出器がある。この装置は水標的とシート状にしたファイバーが交互にある多層構造になっていて、ニュートリノと水標的の反応で生成された二次粒子の飛跡を捕らえる。この装置の読みだし部分はファイバーを切り分けてまとめたファイバーバンドルとなっており、ここからイメージングインテンシファイアチューブ(IIT)とCCDカメラを用いてCCD画像としてデータを得る。このデータはファイバーバンドル上で荷電粒子通過により発光したファイバーにあたる部分の位置と輝度情報からなる。この情報から実空間上での荷電粒子が通過した位置を特定するにはCCD画像上の位置と実際のファイバーの位置の対応関係を知る必要がある。K2K実験では特定のファイバーを光らせ、そのファイバーの位置の対応関係をあらかじめ測定し、それ以外のファイバーの位置は相対位置から算出している。

本研究ではこのファイバー位置算出の方法の検証、補正に利用できるよう、ファイバーバンドル端面の写真から実際のファイバー位置座標を求めた。その結果、全ファイバー274,058本のうち99.8%について重心法と呼ぶ方法を用い、残りは直接測定法と呼ぶ方法を用いてx、y座標それぞれ $2.31 \text{ pixel}_{photo}$ 、 $1.55 \text{ pixel}_{photo}$ の誤差で求めることができた。ただし、 1 pixel_{photo} はおよそ $26.4 \mu\text{m}$ である。

本研究で得られた結果により、今後ファイバー検出器で得られる結果の質を向上させることができると期待される。

目次

第 1 章	序論	6
1.1	ニュートリノ	6
1.2	ニュートリノ振動	7
1.3	大気ニュートリノ異常	9
1.3.1	大気ニュートリノ異常	9
1.3.2	ニュートリノ振動の証拠	10
1.4	ニュートリノ振動実験	12
1.4.1	短基線ニュートリノ振動実験	12
1.4.2	長基線ニュートリノ振動実験	12
第 2 章	つくば—神岡間長基線ニュートリノ振動実験	13
2.1	概要	13
2.2	ニュートリノビームライン	15
2.3	前置検出器	15
2.3.1	1kt 水チェレンコフ検出器	15
2.3.2	ファイン・グレイン検出器 (FGD)	17
2.4	スーパーカミオカンデ検出器	19
2.5	ニュートリノイベント	19
第 3 章	シンチレーティングファイバー 飛跡検出器	21
3.1	シンチレーティングファイバー	21
3.2	ファイバーシート	23
3.3	シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (SFT)	23
3.4	HIT-CCD チェーン	24
3.5	ファイバーバンドル	25
3.6	ファイバー位置較正	25
第 4 章	画像解析によるファイバー位置座標の算出	30
4.1	ファイバー位置座標算出の目的	30
4.2	ファイバー位置座標算出の方法	30
4.3	写真の撮影と前処理	31
4.3.1	写真の撮影	31
4.3.2	前処理と 2 値化	31

4.4	ファイバー中心座標の取得	35
4.4.1	ファイバー中心座標算出	35
4.4.2	重心法で得られなかったファイバーの処理 (直接測定法)	36
4.5	中心座標の誤差の評価	39
4.5.1	重心法の再現性による誤差	39
4.5.2	2値化閾値の依存性による誤差	40
4.5.3	直接測定法の再現性による誤差	40
4.5.4	方法の違いによる誤差 (重心法と直接測定法の比較)	40
4.5.5	写真の歪みによる誤差	44
4.5.6	ファイバー中心座標の誤差	47
4.6	写真画像解析データの活用と今後	47
第5章	結論	51
	謝辞	52
	参考文献	53

目次

1.1	一次宇宙線と大気ニュートリノ	9
1.2	大気ニュートリノ観測実験が示唆する振動パラメータ領域	11
2.1	K2K 実験	14
2.2	スーパーカミオカンデで期待される μ^- のエネルギー分布	14
2.3	ニュートリノビームライン	16
2.4	前置検出器	17
2.5	水標的/シンチレーティングファイバー飛跡検出器	18
2.6	スーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器	20
3.1	シンチレーティングファイバー	21
3.2	コアモードとクラッドモード	22
3.3	ファイバーシートの断面	23
3.4	シンチレーティングファイバーシート	23
3.5	HT-CCD チェーン	25
3.6	ファイバーストリップ製作	26
3.7	ファイバーストリップ	27
3.8	ファイバーストリップの写真	28
3.9	EL での fiducial fiber の光らせ方	29
4.1	ストリップ写真でのピクセル値の傾斜	32
4.2	直接 2 値化を行った例	33
4.3	前処理を行って 2 値化した例	33
4.4	dilation 処理の例 (1 次元)	33
4.5	dilation 処理前、処理後のピクセル値の分布の例	34
4.6	典型的なファイバーの形状	36
4.7	周囲の塊とくっつきやすいファイバーの例	36
4.8	傷があるファイバーの例 2	37
4.9	傷があるファイバーの例 3	37
4.10	本研究で得られたデータの例	39
4.11	重心法による測定ごとの中心座標のばらつき	41
4.12	閾値の変動によるファイバー中心の変動	42
4.13	重心法と直接測定の比較	44
4.14	EL でのファイバー位置較正の単位処理領域	45
4.15	写真の歪みの測定	46

4.16 fiducial fiber が規則正しく並んでいない例	48
4.17 ファイバー列が規則正しく並んでいない例	49
4.18 位置座標データ活用の一例	49

表 目 次

1.1	ニュートリノの質量の上限値	6
1.2	大気ニュートリノの観測結果	10
3.1	SFT の構成物質の割合	24
4.1	各バンドルのファイバーの本数と修正が必要なファイバーの本数	38
4.2	使用した写真画像のサイズと中心の直接測定の誤差	43
4.3	得られたファイバー中心座標の誤差	47

第1章 序論

1.1 ニュートリノ

物質を構成する要素で最も基本的なものを素粒子と呼ぶ。現在、素粒子の現象をほとんど矛盾なく説明できている理論として標準理論がある。この理論では物質は全てクォークとレプトンで構成されると考えられている。クォーク、レプトンはそれぞれ6種類存在することが確認されている。このうちレプトンに関しては以下のように2つずつの組み合わせで3世代が存在する。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

下段のレプトン (e^- 、 μ^- 、 τ^-) はそれぞれ電荷を持っているが、上段のレプトン (ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ) は電氣的に中性である。これら電氣的に中性なレプトンはニュートリノと呼ばれ、それぞれ電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという。

このニュートリノの特徴としてひとつには自然界を形成する4つの力のうち、弱い相互作用によってのみ他の粒子と反応するということがある。もうひとつはニュートリノの質量が対となるレプトンに比べても非常に小さいということである。標準理論においてはニュートリノの質量は0と仮定されているが、この仮定に理論的根拠はなく、実験的証明もなされていない。したがってニュートリノは質量を持ってよく、これまでこれを測定しようという努力がなされてきた。しかし現在のところニュートリノが質量を持ち、かつその確定値を得ることができた実験はなく¹、ただ質量の上限値が示されているだけである(表1.1参照)。ニュートリノが質量を持つことが確定的になれば、標準理論を越えるものとして新しい物理の存在を示唆することになる。さらには素粒子物理学だけでなく、ニュートリノが宇宙物理学の問題の一つである暗黒物質の候補となるなど大きな意義を持っている。

表 1.1: ニュートリノの質量の上限値

	ニュートリノの質量の上限値
m_{ν_e}	$< \sim 10 \text{ eV [1]}$
m_{ν_μ}	$< 0.17 \text{ MeV [1]}$
m_{ν_τ}	$< 18.2 \text{ MeV [1]}$

¹ニュートリノが質量を持つ証拠をつかんだという実験は存在する(スーパーカミオカンデ実験、後述)

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは例えば時刻 $t=0$ において飛行していた ν_μ が t 秒後に ν_e や ν_τ に変化しているといった現象のことをいう。この現象が起こり得ると考えると、ある時点で生成されたニュートリノが大気中を飛ぶ間に振動して他の種類のニュートリノに変化することになる。このことにより一方のニュートリノのフラックスは減少し、他のニュートリノのフラックスは増加する。以下でニュートリノ振動が起きるための条件とその確率を求める。

ニュートリノに関して2つの固有状態が考えられる。ひとつはニュートリノが唯一関与する弱い相互作用についての固有状態であり、もうひとつはそれぞれのニュートリノが持つ質量 (0 でもよい) についての固有状態である。弱い相互作用で観測される固有状態をそれぞれ $|\nu_e\rangle$ 、 $|\nu_\mu\rangle$ 、 $|\nu_\tau\rangle$ と記し、質量の固有状態を $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ 、 $|\nu_3\rangle$ と記すと、弱い相互作用 (質量) の固有状態は一般に質量 (弱い相互作用) の固有状態の混合状態となる (式 1.1、ただし U_{lk} はユニタリ行列の (l, k) 成分)。

$$|\nu_l\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{lk} |\nu_k\rangle \quad (l = e, \mu, \tau) \quad (1.1)$$

一般には3世代間の振動であるが、ここでは簡単のために ν_e 、 ν_μ の2成分による真空中での振動を考える。

弱い相互作用の固有状態と質量の固有状態はそれぞれ別に測定されるもので必ずしも一致する必要はない。したがってこの2種類の固有状態間の混合角 (mixing angle) θ を考えると式 1.1 は式 1.2 と書くことができる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

またニュートリノの真空中の飛行による質量の固有状態の時間発展は Schrödinger 方程式で表すことができ、その解は

$$\begin{pmatrix} |\nu_1(t)\rangle \\ |\nu_2(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1(0)\rangle \\ |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

となる (ただし E_1 、 E_2 はそれぞれ ν_1 、 ν_2 のエネルギー)。したがって式 1.2、1.3 から時間 t 後の弱い相互作用の固有状態は、

$$\begin{pmatrix} |\nu_e(t)\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e(0)\rangle \\ |\nu_\mu(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

と書くことができる。これから時刻 $t=0$ で発生した ν_μ が時間 t 経ったときに ν_e として観測される確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ を算出することができる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e(t) | \nu_\mu(0) \rangle|^2 \\ &= \left| \cos\theta \sin\theta \left(-e^{-iE_1 t} + e^{-iE_2 t} \right) \right|^2 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta (1 - \cos(E_1 - E_2)t) \quad (1.5)$$

ここでニュートリノのエネルギー E_1 、 E_2 は、ニュートリノの質量 m_1 、 m_2 が運動量 p に比べて十分に小さいとき以下のようにおける。

$$\begin{cases} E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2} \approx p + \frac{m_1^2}{2p} \\ E_2 = \sqrt{p^2 + m_2^2} \approx p + \frac{m_2^2}{2p} \end{cases} \quad (1.6)$$

したがって式 1.5 は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos \frac{m_1^2 - m_2^2}{2p} t \right) \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos \frac{\Delta m^2}{2E} t \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4E} t \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi L}{L_\nu} \end{aligned} \quad (1.7)$$

となる。ただし、 $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ 、 $E \approx p$ としている。また L はニュートリノの飛行距離、 L_ν は真空の振動長で、

$$\begin{aligned} L_\nu &= \frac{4\pi E}{\Delta m^2} \\ &= 2.48 \frac{E [\text{GeV}]}{\Delta m^2 [\text{eV}^2]} [\text{km}] \end{aligned} \quad (1.8)$$

である。

したがって $t=0$ で存在していた ν_μ が $L[\text{km}]$ の飛行後に ν_e として観測される確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \quad (1.9)$$

となる。

この式からわかるようにニュートリノ振動が起こるためには

$$\begin{cases} \theta \neq 0, \pi/2 \\ \Delta m^2 \neq 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

という条件が必要となる。したがってニュートリノ振動現象が起きていることが証明できれば 3 世代のニュートリノのうち少なくとも 1 世代は質量を持つことになる。また式 1.9 から振動確率は 2 つのパラメータ、 $\sin^2 \theta$ と Δm^2 の関数となり、振動のパラメータ領域を定めることができる (図 1.2)。

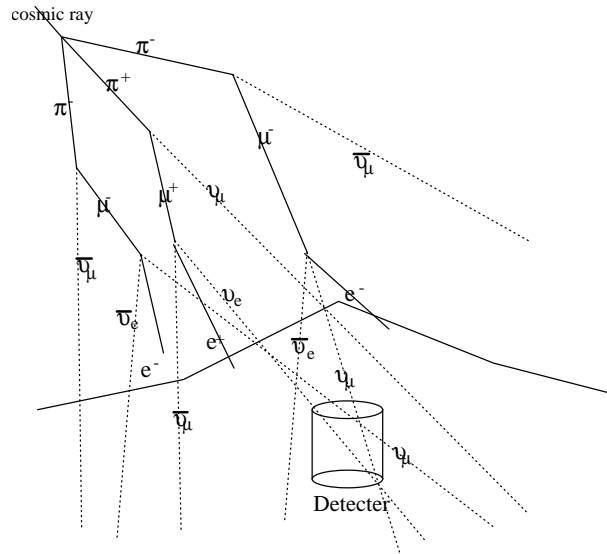


図 1.1: 一次宇宙線による大気ニュートリノの生成

1.3 大気ニュートリノ異常

1.3.1 大気ニュートリノ異常

ニュートリノが質量を持つことで解決すると考えられている問題のひとつに大気ニュートリノ異常の問題がある。

地球に降り注いでいる陽子を主成分とする一次宇宙線は、大気中の原子核と反応してハドロンと呼ばれる π 粒子や K 粒子などを生成する。電荷を持った π 粒子、K 粒子は弱い相互作用によって大部分が μ 粒子 (反 μ 粒子) とその対である反 μ ニュートリノ (μ ニュートリノ) に崩壊する。

$$\left. \begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \end{aligned} \right\} (\text{分岐比 : } 99.9\%) \quad (1.11)$$

$$\left. \begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \\ K^- &\rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \end{aligned} \right\} (\text{分岐比 : } 63.5\%) \quad (1.12)$$

さらにこの (反) μ 粒子も崩壊し、電子 (陽電子) と対応したニュートリノができる。

$$\left. \begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow e^+ \mu_e \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- \bar{\mu}_e \nu_\mu \end{aligned} \right\} (\text{分岐比 : } \sim 100\%) \quad (1.13)$$

こうして生成されたニュートリノは反応断面積が非常に小さいため、ほとんど反応することなく地表に降り注ぐ。このニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶ。式 1.11、1.12、1.13 から、地上での大気ニュートリノ (ν_μ, ν_e) のフラックスの比は、式 1.14 に示すようにおよそ 2 となることが期待される。

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \sim 2 \quad (1.14)$$

世界各地で大気ニュートリノの観測が行われており、そこでは観測結果を式 1.15 に示す R (flavor ratio) で表している。これは式 1.14 の観測値とモンテカルロシミュレーションによる期待値の比を求めたものである。本来、宇宙線によるフラックスの絶対値には 30% の不定性があるが、このように比で表すことでこの不定性を 5% ほどに抑えることができる [2]。

$$R = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{DATA}}{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{MC}} \quad (1.15)$$

各実験で得られた R の値を表 1.2 に示す。

表 1.2: 大気ニュートリノの観測結果

実験	観測時間 ($kton \cdot year$)	R
Kamiokande(Sub-GeV)	7.7	$0.60_{-0.05}^{+0.06} \pm 0.05$ [3]
Kamiokande(Multi-GeV)	6.0 ~ 8.2	$0.57_{-0.07}^{+0.08} \pm 0.07$ [3]
IMB	7.7	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$ [4]
Fréjus	2.0	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$ [5]
NUSEX	0.74	$0.99_{-0.25}^{+0.35}$ [6]
Soudan2	3.9	$0.64 \pm 0.12 \pm 0.06$ [7]
Super-Kamiokande(Sub-GeV)	45	$0.67 \pm 0.02 \pm 0.05$ [8]
Super-Kamiokande(Multi-GeV)	45	$0.66 \pm 0.04 \pm 0.08$ [8]

これらの観測結果では、Fréjus、NUSEXにおいて期待値に近い値が得られているものの、神岡実験(Kamiokande、Super-Kamiokande)、IMB、Soudan2においてはいずれも期待値の6割程度という結果が出ている。ただしFréjus、NUSEXにおいては観測時間が他の実験に比べて少ない。

この大気ニュートリノ異常は標準理論からは説明できない。現在この問題を説明するもっとも有力な解は、飛行中にニュートリノ振動が起きているという解である。各実験で示唆される振動のパラメータ $\sin^2 \theta$ と Δm^2 の存在可能領域を図 1.2 に示す。

1.3.2 ニュートリノ振動の証拠

ニュートリノ振動の存在を証明した報告が1998年6月に神岡実験の観測結果からなされている [8, 9]。神岡実験による大気ニュートリノの測定では、ニュートリノフラックス(イベント数)の世代の比 R (式 1.15) が振動を仮定しない場合のモンテカルロシミュレーションの期待値に対して $R < 1$ となること、 ν_μ の天頂角分布が非対称といった事実が得られている。これらはニュートリノ振動を仮定しないと説明できないことからこれがニュートリノ振動が存在する証拠であり、振動のモードは $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ であると報告している。またそ

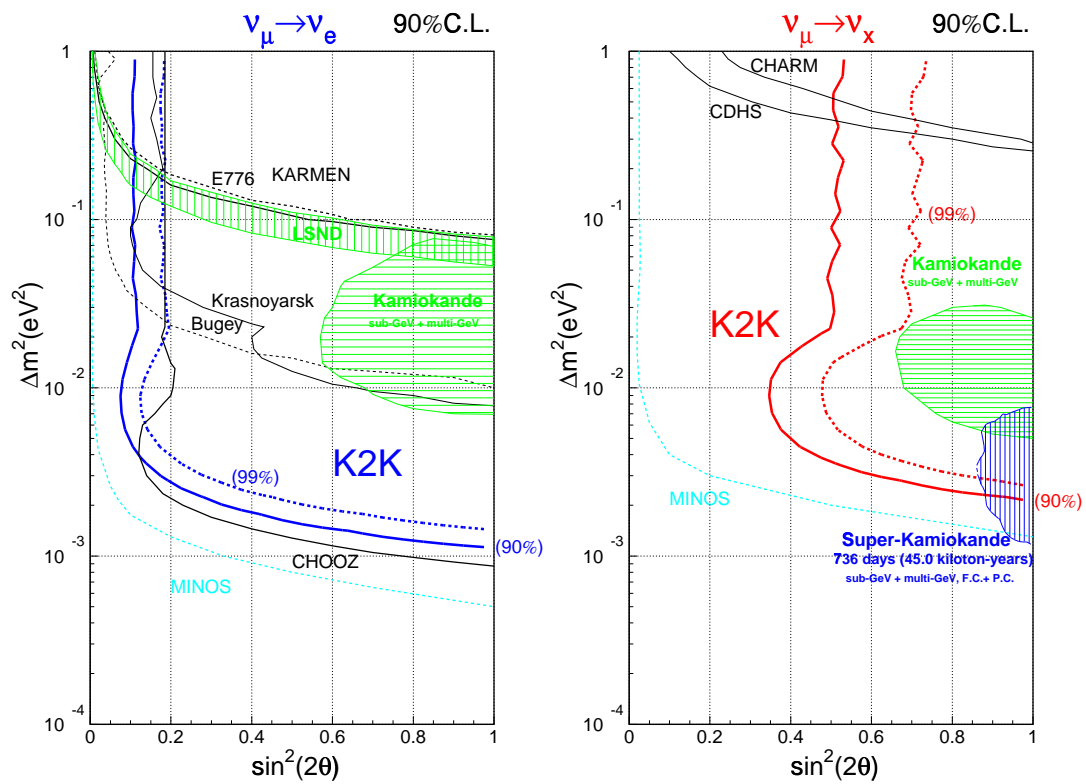


図 1.2: 左図は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ に関して、右図は $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ に関してのパラメータ領域。 ν_x は ν_e, ν_μ 以外のニュートリノを意味する。Kamiokande、Super-Kamiokande、LSND の結果はパラメータの存在が許される領域。K2K、MINOS が示しているのは探索可能領域。その他は実験で排除された領域。いずれも実線で信頼度 90%、破線で信頼度 99% を示している。

の可能なパラメータ領域は

$$\begin{cases} \sin^2 2\theta > 0.8 \\ \Delta m^2 = 10^{-3} \sim 10^{-2} eV^2 \end{cases}$$

である。

1.4 ニュートリノ振動実験

大気ニュートリノを観測する実験はこれまで各地で行われており、1.3.2で述べたようにニュートリノ振動の存在を確定的にした実験もある。しかしこれら大気ニュートリノの測定ではフラックスの予測値の不定性が大きく、また宇宙から到来する過程で生成されるニュートリノを観測するので、振動確率のパラメータである L/E の不確定性は避けられず質量差の決定精度も悪くなる。

宇宙線からの大気ニュートリノを観測する実験の一方で、原子炉や加速器からの人工ニュートリノを用いようという実験がある。これらの実験の最大の特長として、測定するニュートリノの素性がわかるということが挙げられる。これは大気ニュートリノ観測実験の弱い部分を補えるもので、最初から飛行距離 L が決定しているので質量差の決定精度も良くなる。さらには他世代のニュートリノの混入率もある程度まではコントロールできるため、他世代ニュートリノへの振動の測定も比較的容易になるなどの利点がある。

この人工ニュートリノを使った実験には L/E が小さい短基線 (short baseline) ニュートリノ振動実験と、 L/E が大きい長基線 (long baseline) ニュートリノ振動実験とがある。

1.4.1 短基線ニュートリノ振動実験

L/E が小さい実験を短基線ニュートリノ振動実験という。式1.9からわかるように、 L/E が小さい場合は Δm^2 については主に大きい領域の探索になるが、一方で $\sin^2 2\theta$ が小さい領域の探索が可能である。短基線実験には CHORUS[10]、NOMAD[11] などがある。

1.4.2 長基線ニュートリノ振動実験

L/E が大きい長基線ニュートリノ振動実験には K2K[12, 13]、MINOS[14]、OPERA[15]、CHOOZ[16] などがある。これらの多くは発生源から検出器 (far detector) までの距離が数百 km と非常に長い。そのため Δm^2 が小さい領域を探索するのに有効である。これらの実験のうち、2000年2月の時点で稼働しているものはK2Kのみで、他は現在準備中である。またK2K実験では ν_μ のエネルギーが大気ニュートリノに近く、神岡実験の示唆するパラメータ領域に感度がいいこと、同じスーパーカミオカンデ検出器を用いるので神岡実験の結果を検証、確認するのに都合がいい。長基線ニュートリノ振動実験としてはK2K実験は世界に先駆けての実験でもあり、大きな注目を浴びている。

次章で我々神戸大学をはじめとした日本、アメリカ、韓国のグループが参加しているこのK2K実験について詳しく説明する。

第2章 つくば—神岡間長基線ニュートリノ振動実験

2.1 概要

「つくば—神岡間長基線ニュートリノ振動実験」(K2K実験)は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)で人工的にニュートリノを生成し、250km離れた岐阜県の地下1,000mにあるスーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器(Super-Kamiokande, SK)にそのニュートリノを入射しニュートリノ振動の証拠をとらえようという実験(図2.1)で、1999年3月(本格稼働は4月)から開始されている。この実験はニュートリノ振動の存在を証明した神岡実験(Kamiokande, Super-Kamiokande)が示唆するニュートリノ振動のパラメータの領域($\sin^2 2\theta > 0.8$, $\Delta m^2 = 10^{-3} \sim 10^{-2} eV^2$)に十分な感度があり、神岡実験の結果の確認としても意義がある。

本実験(K2K実験)はおおまかに3つの部分からできている。それは人工ニュートリノビームを生成するためのニュートリノビームラインと生成直後のニュートリノビームの状態を調べるためにビームライン終端から100m先に設置された前置検出器、そして250km飛行後のニュートリノの状態を調べるためのスーパーカミオカンデ検出器である。

本実験で検証するニュートリノ振動の様式は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ である。ニュートリノの検出はまず標的粒子の核子との荷電カレント準弾性散乱反応(Charged Current Quasi-Elastic interaction, ccqe反応)によって生成される荷電粒子(主にレプトン)の検出によって間接的に行われる。

$$\nu_l + n \rightarrow l + p \quad (l = e, \mu, \tau) \quad (2.1)$$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動の場合、スーパーカミオカンデで τ 粒子が観測されればこのモードの振動が起きていることがいえる。しかし本実験では τ 粒子の生成に必要なエネルギー閾値3.45GeVを越える ν_μ はほとんどないため $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ が起きているても τ 粒子の生成はほとんど期待できない。そこでビームラインのモニタシステムや前置検出器の測定結果からスーパーカミオカンデでの ν_μ のエネルギー分布を予測して実際の測定結果と比較する。この予測はニュートリノ振動を仮定しない場合で、振動が起きていれば当然測定結果は予測と異なってくる。この2つの結果に有意な差が生じた場合ニュートリノ振動が起きたと結論づけることができる(図2.2はその例)。このようなアプローチは ν_μ の消失分を見ることから消失(disappearance)実験と呼ばれる。

一方 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動モードの場合は電子が生成され直接測定ができる。このアプローチは電子の出現を直接測定することから出現(appearance)実験と呼ばれる。しかし ν_e の場合、実際には ν_μ ビームの生成過程でいくらかの ν_e 生成があるため(混入率は約1%)、測定された電子が振動で生じた ν_e によるものか、最初から含まれていた ν_e によるものかはすぐにはわからない。したがってこの ν_e の混入率の正確な測定は重要である。



図 2.1: 茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) から岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデ検出器へニュートリノビームを射出し、ニュートリノ振動を検証する。

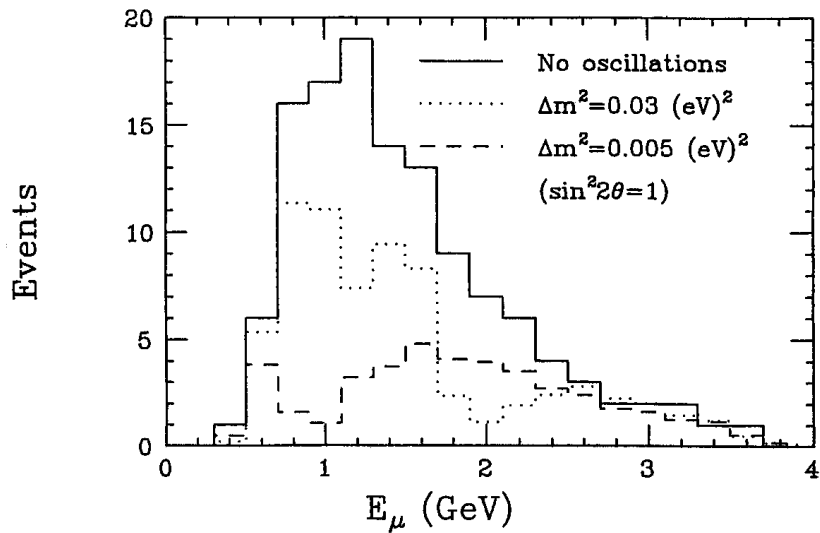


図 2.2: スーパーカミオカンデ検出器で予測される μ 粒子のモンテカルロシミュレーションによるエネルギー分布。ニュートリノ振動がないとしたときの分布 (実線) に対して実際の測定で有意な差があれば振動が起こったといえる (例: 点線、破線の分布)

以下で本実験の各部分について説明する。

2.2 ニュートリノビームライン

ビームラインは KEK 施設内にある 12GeV の陽子シンクロトロンから陽子を取り出してニュートリノを生成する役割を持つ。2.2 秒毎に $6.0 \times 10^{12} \text{protons/spill}$ の強度で取り出された陽子はスーパーカミオカンデの方向 (西北西) に正確に曲げられ電磁ホーンシステム内のアルミ標的に当てられる。アルミ標的の大きさは直径 30mm(1999 年 6 月までは 20mm)、長さ 665mm で陽子は原子核との反応で π 粒子や K 粒子を生成する。電磁ホーンシステムは陽子ビームがアルミ標的に衝突して生成した荷電粒子を収束させる装置である。荷電粒子の飛行空間にトロイダル状の磁場を発生させ、電荷の違いでスーパーカミオカンデの方向に揃えたり外に弾き飛ばしたりする。これによって生成粒子のうち正電荷粒子の広がりを抑え、負電荷粒子を取り除くことができる [17]。その結果向きが揃った十分な数の正電荷を持った π 粒子、K 粒子などが得られる。また、この電磁ホーンマグネットの直後に「 π 粒子モニタ」と呼ばれるリングイメージガスチェレンコフ検出器を設置し π 粒子のエネルギーと角度分布を測定している [18]。これを用いて前置検出器およびスーパーカミオカンデでのニュートリノビームのエネルギー分布や広がりを予測する。ホーンを出た π^+ 粒子は 200m の崩壊領域 (decay pipe) を通過する間に崩壊し、 μ^+ 粒子と ν_μ になる;

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.2)$$

崩壊領域最後にある鉄や土などのビームダンプ (吸収材) で ν_μ 以外の粒子 (μ^+ 粒子、未反応陽子など) を止め最終的に ν_μ だけが得られる。また ν_μ の方向を知るためこの μ^+ 粒子を測定する「 μ 粒子モニタ」と呼ばれるイオンチェンバーを設置している [18]。

2.3 前置検出器

前置検出器は崩壊領域の終端から 100m 先にある深さがおよそ 15m の穴の中に設置されている。そこには 2 種類の検出器が設置されている。ひとつはスーパーカミオカンデの縮小版といえる 1kt 水チェレンコフ検出器でもうひとつはファイン・グレイン検出器 (Fine-Grained Detector, FGD) である。

2.3.1 1kt 水チェレンコフ検出器

後置検出器であるスーパーカミオカンデと同様に 1kt のタンク内壁に光電子増倍管 (PMT) を敷き詰めたイメージング水チェレンコフ検出器である。この検出器では ν_μ のフラックスと約 1% の混入があると考えられる ν_e のフラックスを測定する。ただし ν_μ に関しては水との反応でできた μ 粒子のうち、タンク内で停止した低エネルギーのものしか測定できない。つき抜けたものに関しては FGD と組み合わせてエネルギーを測定する。後置されているスーパーカミオカンデと同じ構造、解析方法の検出器を用いることにより、水チェレンコフ検出器の系統誤差を減らすことができる。E261A 実験 [19] で使用したものを再

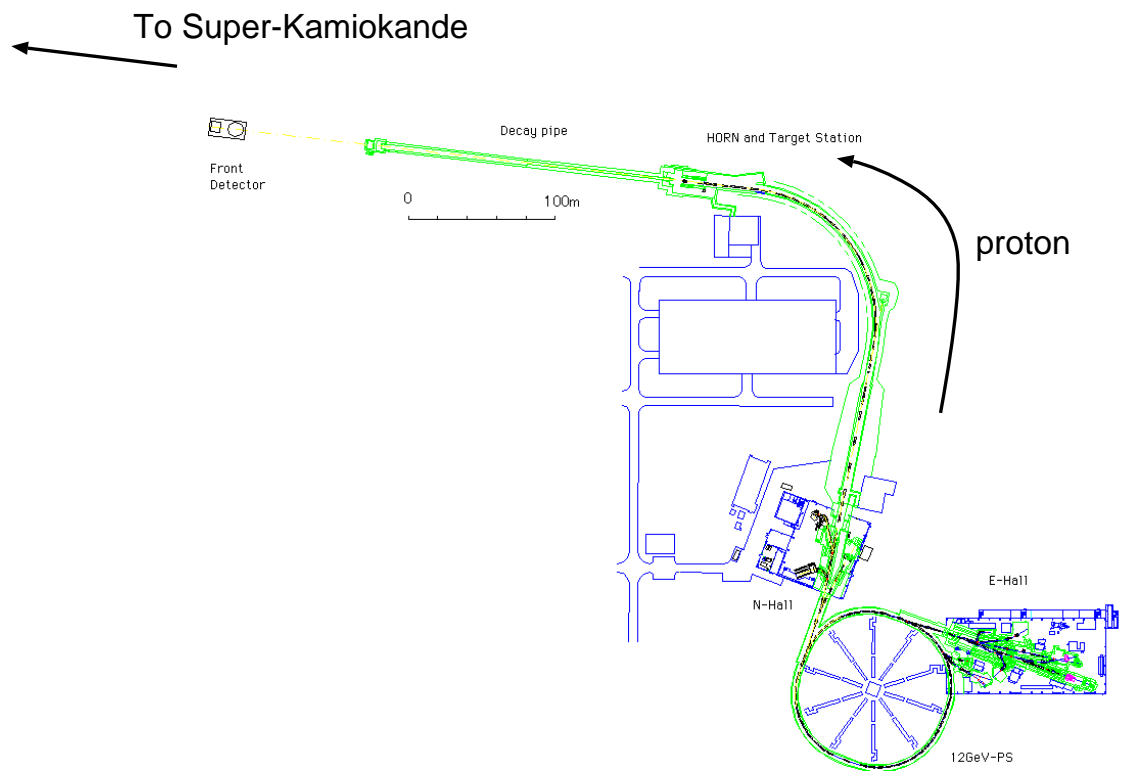


図 2.3: KEK 内に設置されたニュートリノビームライン。陽子シンクロトロンで 12GeV まで加速された陽子を取り出しスーパーカミオカンデの方向に曲げ、アルミ標的にぶつける。それによって生成された π 粒子を収束させ 200m の崩壊領域を通過する間に崩壊させて ν_μ を生成する。

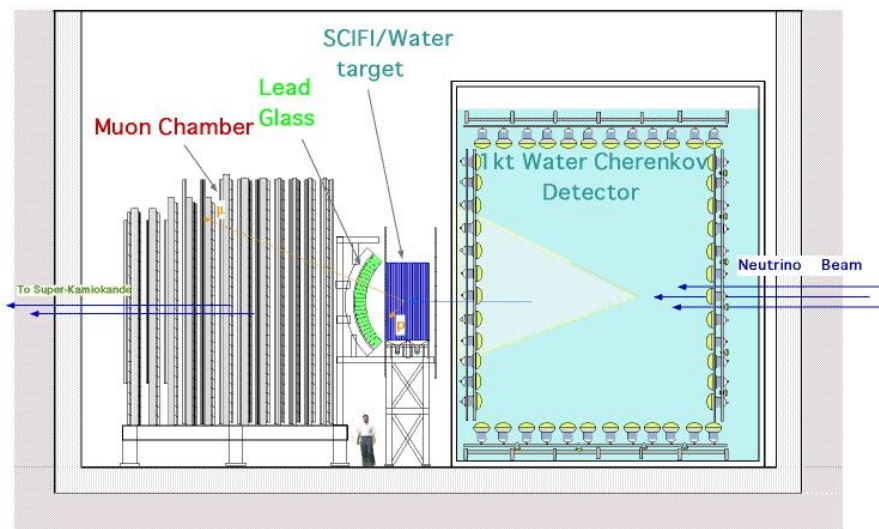


図 2.4: ニュートリノ生成のための標的から 300m 下流の地下に設置された検出器。1kt 水チェレンコフ検出器とファイン・グレイン検出器からなる。

利用している。

2.3.2 ファイン・グレイン検出器 (FGD)

ファイン・グレイン検出器は水標的／シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (Scintillating Fiber Tracker, SFT)、ベトー・トリガーカウンタ、鉛ガラスカロリメータ、 μ 粒子検出器からなる。これらの検出器全体で、水標的内の核子と ν_μ による ccqe 反応



で生成される μ^- 粒子の飛程と生成角を測定し、 ν_μ のエネルギーの再構成を行い、 ν_μ のフラックスとエネルギー分布を求める。

核子の質量を m_N 、 μ^- 粒子の質量、運動量、エネルギーとその生成角をそれぞれ m_μ 、 p_μ 、 E_μ 、 θ とおくと、ccqe 反応における ν_μ のエネルギー E_ν は、

$$E_\nu = \frac{E_\mu m_N - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta} \quad (2.4)$$

となり、生成 μ^- 粒子の飛程からわかる運動量と生成角から ν_μ のエネルギーを得ることができる。以下で各部分について説明する。

- 水標的／シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (SFT)

プラスチックシンチレータでできた光ケーブルであるシンチレーティングファイバー (Scintillating Fiber、以下ファイバー) を並べてシートに

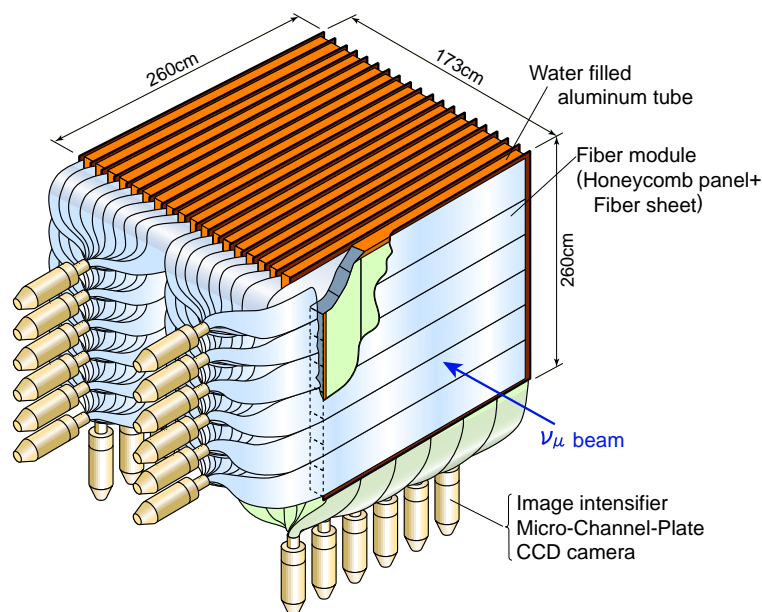


図 2.5: 水標的とシンチレーティングファイバー飛跡検出器。シンチレーティングファイバーを並べたシートを x 座標読みだしと y 座標読みだし用にそれぞれ重ねて厚さ 6cm の水標的と交互に 20 層のサンドイッチ構造になっている。

したものを方向が直交するように重ねたものと厚さ 6cm のアルミ製の水タンクを 1 組としてこれを 20 層並べたサンドイッチ構造をした検出器 (図 2.5) で、この中の水と ν_μ との反応をとらえる。標的部分の大きさは $2.4m \times 2.4m$ である。ファイバーは荷電粒子の通過で発光するので、どのファイバーが発光したかで粒子の通過位置を測定する。本実験において前置検出器中、SFT だけが新たに作られたものである。ファイバーならびに SFT については次章以降で改めて取り上げる。

- ベトー・トリガーカウンタ [20]

ベトー・トリガーカウンタは 2 種類の大きさのプラスチックシンチレータ ($466.0cm \times 10.8cm \times 4.6cm$, $400.0cm \times 13.0cm \times 4.5cm$) を並べて敷き詰めたもので SFT の前後に設置する。VENUS、TOPAZ 実験のカウンタを再利用している。

用途はひとつには下流の μ 粒子検出器の TDC のスタート信号の発信のため、もうひとつはビーム上流からの荷電粒子の入射によるイベントや宇宙線イベントの除去である。現在 SFT の側面にも設置して SFT の端で発生したイベントに対する補強を行おうという研究がなされている。

- 鉛ガラスカロリメータ [21]

電子の同定とそのエネルギー測定のための電磁カロリメータ。TOPAZ 実験で用いられたものを利用している。先に述べたようにビームラインで生成されたニュートリノビームには約 1% の ν_e が混入していると考えら

れている;

$$\begin{aligned}\mu^+ &\rightarrow e + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ K^+ &\rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e \\ K_L^0 &\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e\end{aligned}\tag{2.5}$$

スーパーカミオカンデでの $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の appearance 実験のためにはこれらビーム中の ν_e のフラックス測定を行う必要がある。

この検出器では ν_e が SFT で反応して発生した電子のフラックスとエネルギーを測定する。電子は電磁シャワーを起こして全エネルギーを出し尽くして検出器内で止まるため光量を測定することで電子のエネルギーがわかる。エネルギー分解能は約 $10\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ である。

- μ 粒子検出器

μ 粒子検出器は鉄とドリフトチェンバーのサンドイッチ構造をしていて、 μ 粒子の飛跡の再構成と飛程によるエネルギーの測定を行う。VENUS 実験のものを再利用している。

2.4 スーパーカミオカンデ検出器

スーパーカミオカンデ検出器は岐阜県吉城郡神岡町の神岡鉱山の地下 1,000m に建設された高さ 41.4m、直径 39.3m の円筒形をした水槽で、内壁に 11,146 本の PMT が取り付けられておりこれで検出器内で発生したチェレンコフ光を測定し、光量、時間情報などから通過粒子のエネルギーと方向、粒子の同定などを行う。本実験ではまずニュートリノと水槽内の水の核子との ccqe 反応によって発生した荷電レプトンを測定することで研究を行う。

2.5 ニュートリノイベント

2.2 秒毎におよそ 1 度下向きに打ち出されるニュートリノは 1 ミリ秒の間にスーパーカミオカンデに到達する。ニュートリノ反応点からスーパーカミオカンデまでの距離は GPS(Global Positioning System) を用いて正確に測定されており ($249.7834 \pm 0.0012 \text{ km}$ [22])、予想到達時刻の前後 1 マイクロ秒の間のイベントを本実験のニュートリノビームによるものとしている。この時間内に大気ニュートリノによる反応が起こる確率はおよそ $1/10,000$ である。

1999 年 6 月 19 日、世界で初めて 250km もの距離を隔てて人工ニュートリノによるイベントが観測された。本実験では 3 年間でおよそ 10^{20} p.o.t.(protons on target) を得、スーパーカミオカンデでは 200~300 のニュートリノイベントを期待している。

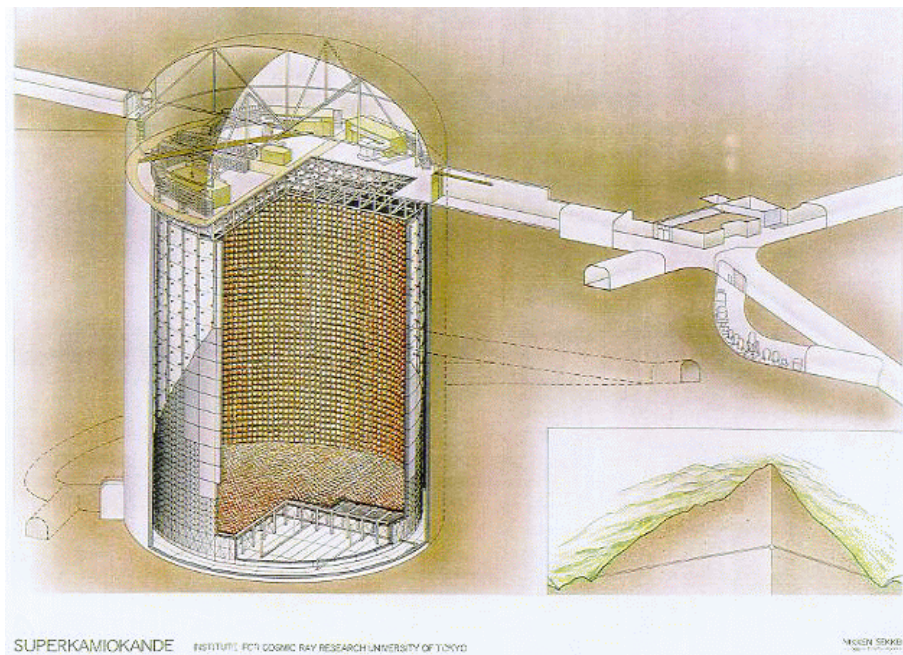


図 2.6: スーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器。50kt の水槽の内壁にある 1 万本の光電子増倍管でチェレンコフ光を測定している。

第3章 シンチレーティングファイバー 飛跡検出器

この章ではシンチレーティングファイバー (以下、ファイバー) と K2K 実験 (以下、本実験) の前置検出器のひとつであるシンチレーティングファイバー飛跡検出器 (以下、SFT) について述べる。

3.1 シンチレーティングファイバー

ファイバーは、その大部分がシンチレータ (ポリスチレン) でできた光ファイバーの一種で、その材質から荷電粒子が通過したときに自らシンチレーション光を発する。

ファイバーはコアとそれを取り巻くクラッドからなり、コアで発生した光はコア、クラッド、空気層の屈折率の差を利用してファイバー端面まで伝播される。

コアの屈折率を n_{core} 、クラッドの屈折率を n_{clad} としたときコアで発生した光は、境界面への入射角 θ が、

$$\cos \theta \geq \frac{n_{clad}}{n_{core}} \quad (3.1)$$

を満たすとき全反射する。この全反射の繰り返しで光を伝播していく (図 3.1)。

ファイバーは経年変化により劣化し、得られる光量が減少することがわかっている。本実験は少なくとも 3 年行われるのでこの間ファイバーが十分な性能を維持するかどうか神戸大学で事前に寿命や劣化の原因を調べた [25, 26]。それによると経年変化による劣化の主原因が酸素によるものであることがわかった。そこで酸素対策を施したファイバー、「SCSF-78M 改良 11」を Kuraray 社と共同で開発し本実験で使用している。このファイバーはクラッドが 2 層のマルチクラッド構造になっており、クラッドの厚さは直径の 2%

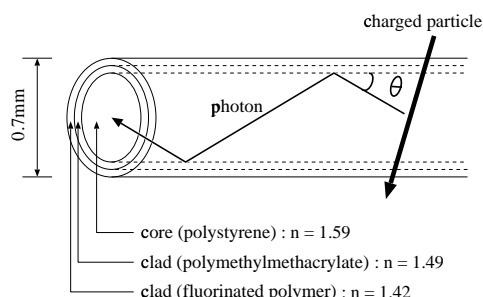


図 3.1: シンチレーティングファイバー内でのシンチレーション光の発生と伝播の様子の例。

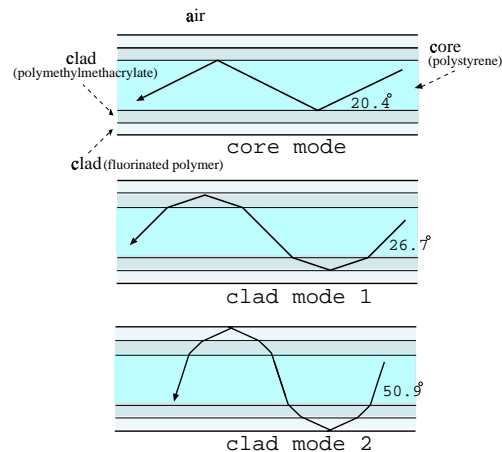


図 3.2: コアモードによる伝播とクラッドモードによる伝播の例。

(13 μm)、コアにポリスチレン (屈折率 1.59)、内側のクラッドにポリメチルメタクリレート (PMMA、屈折率 1.49)、外側のクラッドにフッ化ポリマー¹ (屈折率 1.42) を用いている。コア-クラッド境界面での反射による光伝播をコアモード、クラッド-クラッド境界面、あるいはクラッド-空気の境界での反射による光伝播をクラッドモードと呼ぶが (図 3.2)、コアモードでの全反射は境界面に 20.4 度以下で入射した場合に起きる。またクラッドモードに関しては、クラッド-クラッドの境界で全反射するためには 26.7 度以下、クラッド-空気層の境界では 50.9 度以下でコア-クラッド境界に入射しなければいけない。クラッドモードは光の反射回数が多くなることから減衰も早い。また本実験ではこのファイバーをシート状に固めるためにファイバーに接着剤としてペイントを塗るのでクラッド-空気層での全反射はなくなる。したがって実質コアモードのみが重要になる。クラッドが 1 層だけのシングルクラッドファイバーを用いた場合コアモードは、入射角 20.4 度以下の光である。一方でマルチクラッドファイバーの場合、クラッド-クラッド間境界の反射は残るので光の伝播する条件が 26.7 度以下となる。ファイバーの中心軸を含む面での伝播だけを考えた場合シングルクラッド、マルチクラッドではそれぞれ全立体角の 3.2%、5.3% が伝播されることになり、マルチクラッドのほうが約 1.7 倍多くの光を伝播できる²。こういった理由から本実験ではマルチクラッドファイバーを採用した。

またこのファイバーには他にも伝播の効率をよくする工夫が施してある。それは、コアの中に波長変換蛍光剤 (wavelength shifter) と呼ばれるものを 2 種類混ぜ、発生した短波長の光を伝播効率の良い長波長の光に変換しているのである。ポリスチレンの発光波長はピークが 300nm 程度であるが、1 種類目の蛍光剤がこの光を吸収し、より長波長の光 (350nm あたりにピークを持つ) を放出する。放出された光はその波長に吸収特性を持つ 2 種類目の蛍光剤に吸収され、さらに長波長 (430nm) の光までシフトさせる。しかしこの蛍光剤は吸収・放出スペクトルに幾分かの重なりがあるため再吸収される可能性がある。し

¹PMMA にフッ素化合したもの

²より低い屈折率の材質はコア材のポリスチレンとの接合相性が悪いなどの理由から、そういった材質を用いる場合はマルチクラッドのようになじみのよい材質同士をくっつけるといった工夫が必要となる

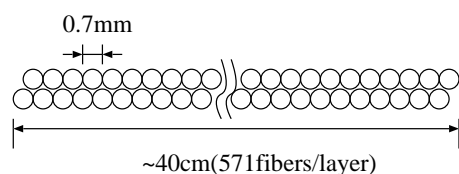


図 3.3: ファイバーシートの断面。2層積みにする事で荷電粒子の通過距離を場所に依存しなくなる。

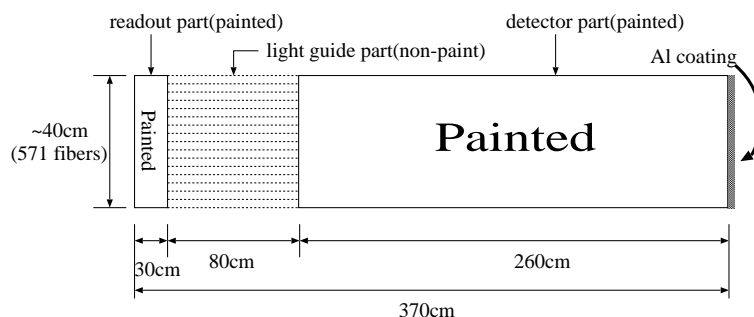


図 3.4: 240枚製作されたファイバーシートの概観。

たがって光伝播の効率がよいよう濃度が調整されている。

3.2 ファイバーシート

本実験ではファイバーを並べてシート状にし、荷電粒子の飛跡検出に用いる。ここで検出効率を上げるため1層ではなく2層積みにしたものを一組のシートとしている(図3.3)。

シートとして固める際、基本的には全面をペイントでコーティングするが、後で読み出し部分をファイバーバンドルとして束ねるために一部ペイント無しの部分を作っている(図3.4)。また読み出し部分の反対側にくるファイバー端面はきれいに研磨し、アルミ蒸着することで反射光も得られるようにしている。

本実験では1,142本のファイバーからなるシートを全部で240枚使用する。この製作を1998年7月からおよそ1年かけて全て神戸大学で行った[26]。このシートは製作後KEKに送られ、端面の研磨、アルミ蒸着を行って品質検査、反射率測定などを行った[28]。

3.3 シンチレーティングファイバー飛跡検出器(SFT)

SFTはファイバーシート20層の間にニュートリノの標的である水が入ったアルミ製水チューブが19層並べられている。信号読みだしにはイメージ・インテンシファイア・チューブ(IIT)とCCDカメラのユニット(IIT-CCDチェーン、セクション3.4参照)を用いている。SFTの建設は1998年8月から1999年1月にかけて行われた。ファイバーシートはコ

物質	物質量 [kg]	割合 [%]
水	367.6	74.9
アルミ	75.75	15.4
ハニカムパネル	30.41	6.2
ファイバー	13.57	2.3
エポキシ系接着剤	1.40	0.3
緩衝材	1.20	0.2
シート製作用ペイント	0.64	0.1
全体	490.57	100.0

表 3.1: SFT を構成する物質の物質量と割合。

アが紙製のハニカムパネルの両面に 6 枚ずつ、ファイバー方向が直交するように (図 2.5 参照) エポキシ系接着剤で接着された。この両面のファイバーをそれぞれ一方の端から読み出すことで荷電粒子通過点の実空間での x 、 y 座標を得ることができる。この検出器の飛跡の位置分解能は $250\mu\text{m}$ 、反応点の位置分解能は x 、 y 方向で 2mm 以下、 z 方向で 3.3mm である [29]。また主にニュートリノと水の反応について研究するため、検出器において水に対するその他の物質の物質量が小さくなくてはならない。本実験の SFT では各物質の物質量は表 3.1 にあるように水が全体の 7 割以上を占めていることがわかる。

3.4 IIT-CCD チェーン

SFT では 24 本のイメージ・インテンシファイア・チューブ (Image Intensifier Tube、以下 IIT) と CCD カメラでどのファイバーがどれくらいの光量で発光したかを読み出す。その際、検出効率を上げるためファイバーからの光は 2 段に組んだ IIT で増幅される。

- 前段：静電型 IIT

光電面に入射した光子の光電効果により発生した電子が真空チューブ内で印加電圧により加速され、蛍光面に衝突して、増幅された光として取り出される。増幅の利得は 10 倍程度だが高解像度、明暗の再現の比率がよい、低雑音という利点がある。本実験で用いるタイプは $100\text{mm}\phi$ の光電面に対して電子レンズの効果で出力は $23\text{mm}\phi$ まで縮小される。

- 後段：MCP 型 IIT

真空チューブ内にマイクロチャンネルプレート (Micro Channel Plate、以下 MCP) を挿入することで電子のエネルギーとその数を増倍させる。MCP は直径 $10\mu\text{m}$ 程度の小さな穴をたくさん持つ厚さ 1mm 程度の導電性のガラス板で穴の内壁に印加した電圧により継続的な 2 次電子を放出する。印加電圧は可変で $\sim 10^4$ まで利得を調節できる。

2 段の IIT によって増幅された光は光学レンズで絞られて CCD カメラで位置と輝度の情報を得る。これら一連のユニットを IIT-CCD チェーンと呼ぶ (図 3.5 参照)。

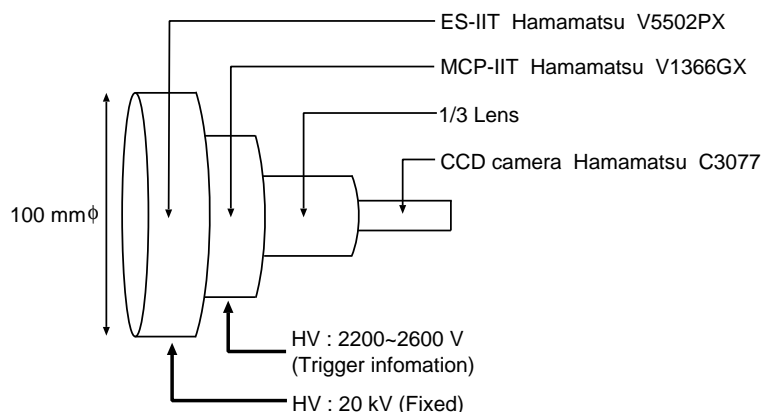


図 3.5: IIT-CCD チェーンの様式図。前段 IIT(静電型)、後段 IIT(MCP 型)、光学レンズ、CCD カメラからなる。

3.5 ファイバーストック

SFT では読み出し IIT の光電面 ($100\text{mm}\phi$) を有効に使うため、ファイバーストックの読み出し部分を分割し、光電面の形に近くなるように並べる。具体的には 1 枚のシート (571 本 \times 2 層) を 79、105、121、130、136 本 (幅はそれぞれ 55.3mm、73.5mm、84.7mm、91.0mm、95.2mm) で 5 分割し、同幅のものを 5 層分重ねてエポキシ系接着剤で接着する (これをファイバーストックと呼ぶ)。こうしてできたファイバーストック 10 個 (ビーム方向 10 層分) を組み合わせてアクリルフレームの治具で固定し接着して固める。(図 3.6 参照)。このファイバーストックの束をファイバーストック (または単にストック) と呼んでいる (図 3.7、3.8 参照)。ファイバーストックの表面は IIT の光電面とすき間なく接触し、光の損失がないよう専用の研磨機で研磨する。

3.6 ファイバーストック位置校正

SFT では荷電粒子の通過による情報を IIT-CCD チェーンによりストック表面での光の位置と輝度として読み出す。このとき粒子が通過したファイバーストックを特定するためには、ストック上の各ファイバーストックと CCD 画像上の各座標との対応関係をあらかじめ知っておく必要がある。本実験ではファイバーストック位置の校正の方法として特定のファイバーストックを光らせ、このファイバーストックから他のファイバーストックの位置を内挿するという方法を使っている [27]。この特定のファイバーストックのことを fiducial fiber と呼ぶ。本実験では 2 層から成るファイバーストックのうち片側の 1 層に関して 10 本ないし 20 本ごとの 1 本と、ストックにまとめたときに両端にくるファイバーストックを fiducial fiber に設定した

fiducial fiber は、エレクトロルミネッセンスプレート (Electro-Luminescence plate、以下 EL) と呼ばれる蛍光板を使い発光させている (図 3.9 参照)。

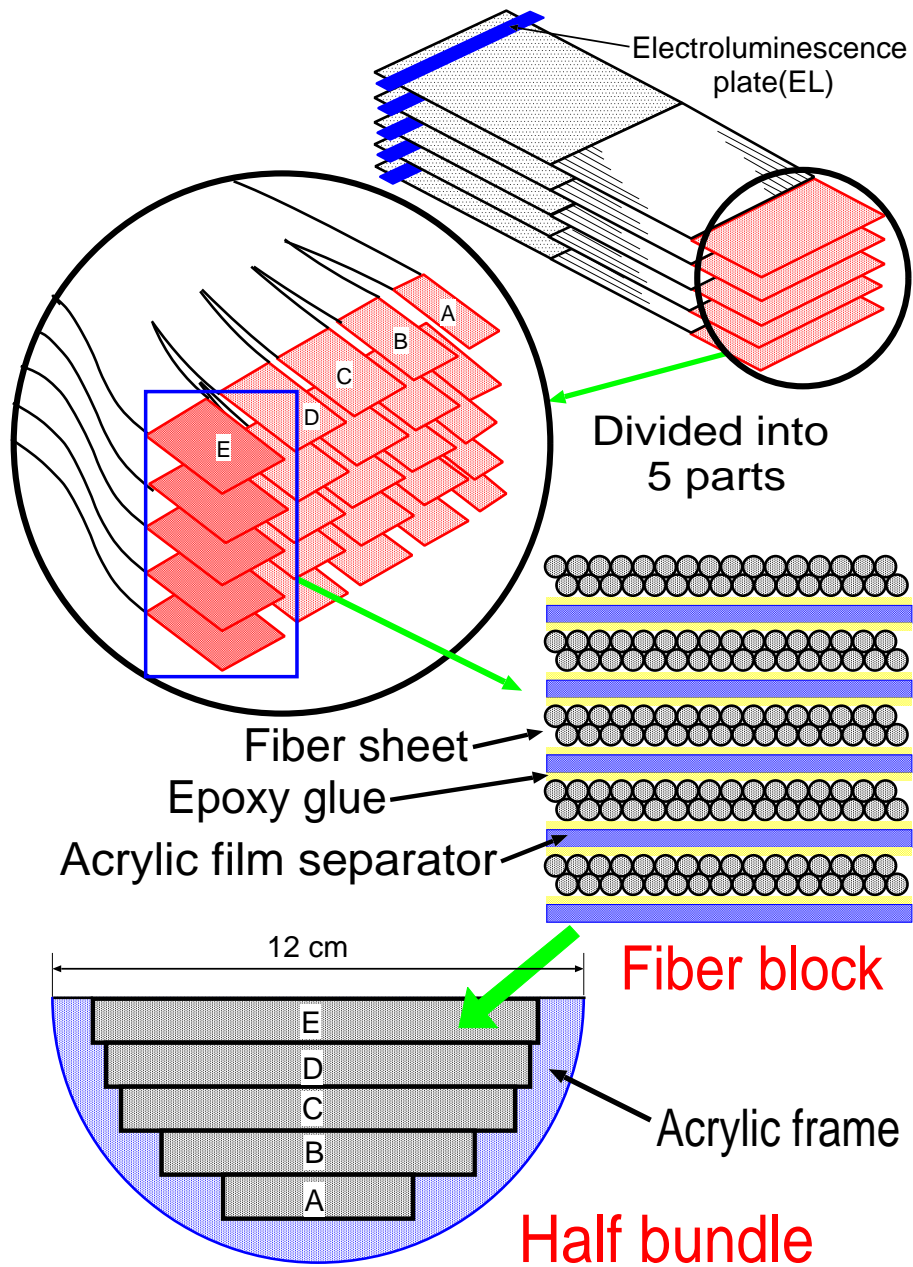


図 3.6: ファイバーブロック、ファイバーバンドル製作の過程を示した図。上記の半円形の亚克力フレームの治具2つを組み合わせてファイバーバンドルを作る。

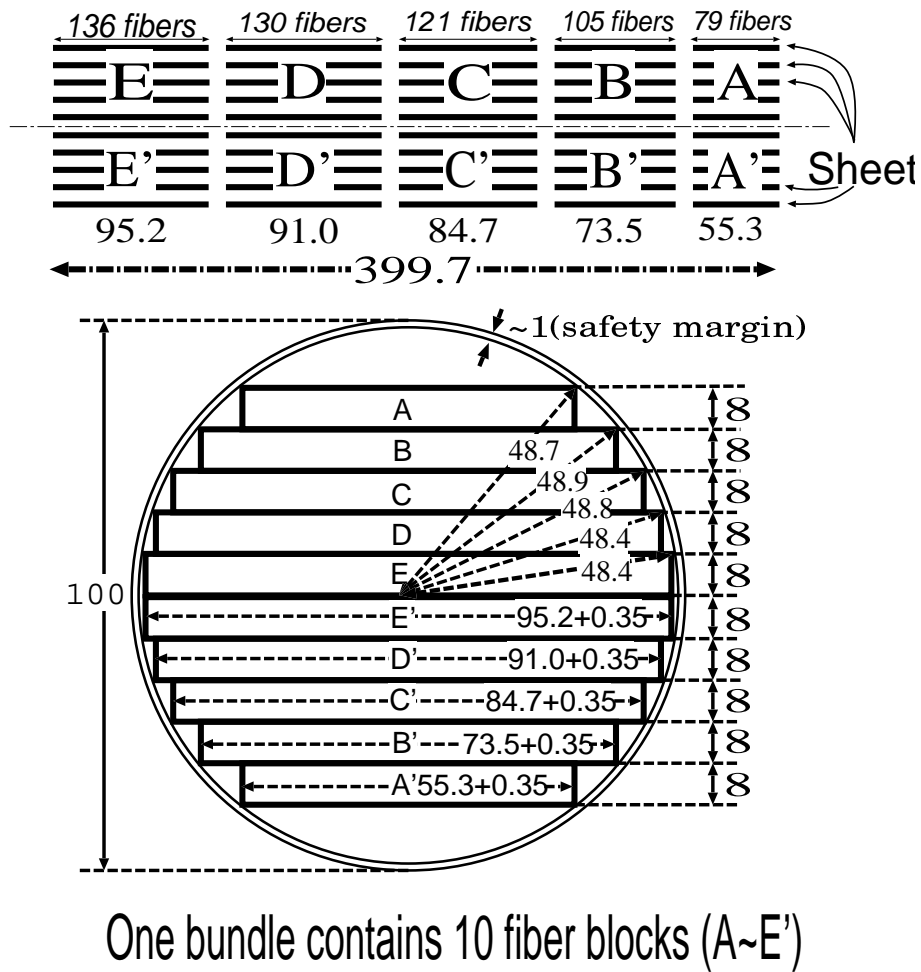


図 3.7: 製作されたファイバーバンドルの寸法。単位は全て mm。

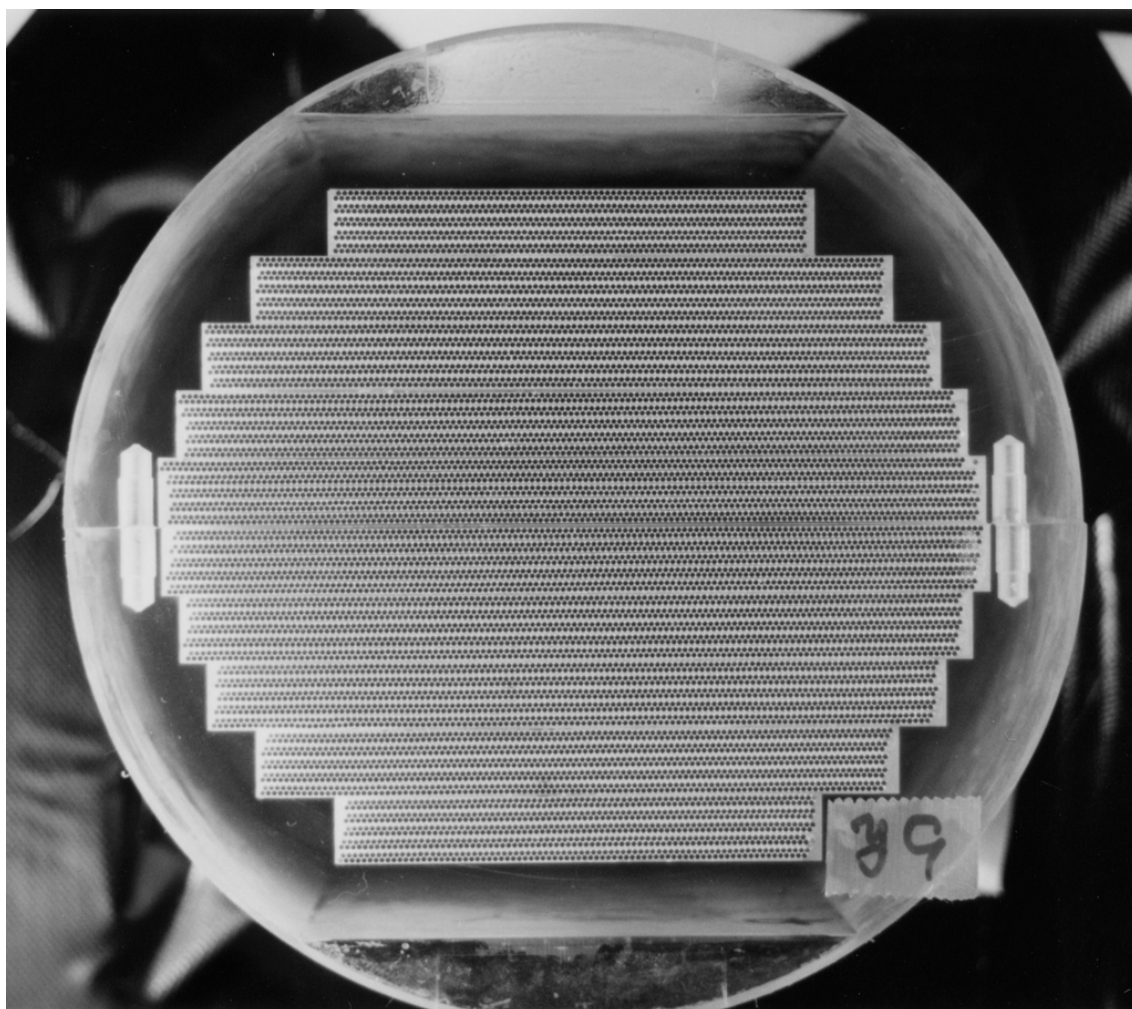


図 3.8: 実際に製作されたファイバーバンドルの表面。

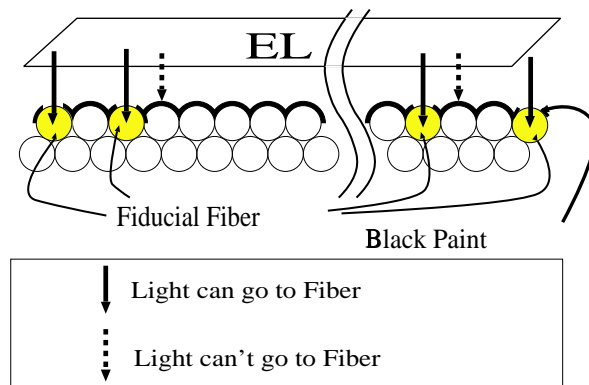


図 3.9: 本実験では特定のファイバー (fiducial fiber) を EL で光らせることによってファイバーの位置較正を行っている。10 本ないし 20 本おきと、ファイバーバンドルでの両端のファイバーを fiducial fiber に設定している。ファイバーシートは EL を当てる部分に黒ペイントを塗ることで遮光し、fiducial fiber の部分だけ黒ペイントを剥ぎ取ることで EL の光が入射できるようにしている。

第4章 画像解析によるファイバー位置座標の算出

4.1 ファイバー位置座標算出の目的

K2K 実験のシンチレーティングファイバー粒子飛跡検出器では荷電粒子の通過の情報を、シンチレーティングファイバーを束ねたファイバーバンドルから IIT を介し CCD カメラで測定する。その際、得られた CCD 画像から粒子が通過したファイバーを特定するために EL を用いたファイバー位置較正を行っている。この位置較正では、前章で述べたように何本かの直接測定したファイバーを基にして他のファイバーの位置を算出している。この算出を行うにあたってはすべてのファイバーバンドルが理想的に作られ、各ファイバーが規則正しく並んでいることを仮定している。しかし実際に出来上がったバンドルの端面を見てみるとどうしても不規則な並びをした部分がある。こうした不規則な並びの部分全体でどの程度あるのか、EL でのファイバー位置較正から得た位置と実際の位置がどれくらいずれているのか、といったことはファイバー検出器で得られた結果の精度、信頼性を評価するのに知っておかなければならない。そのためには実際のバンドルでのファイバーの位置を知る必要がある。逆に実際のファイバーの位置を知っていれば、EL 板によるファイバー位置較正が正しいことを証明することもできるし、そこから外れているファイバーについては実際の位置の補正を行うことができる。そこで本研究ではバンドルの写真からファイバー位置座標の算出を行った。

4.2 ファイバー位置座標算出の方法

ファイバーバンドル端面の写真解析によるファイバー位置座標算出の方法についてまず軽く触れておく。まずは完成したファイバーバンドルの端面を写真に撮影する。実験開始後はこの面に IIT の光電面がつき、原則として実験中は外さないで撮りこぼしのないよう注意した。そして撮影した写真をイメージスキャナで計算機に取り込み、この写真画像を解析する。解析の手順は大筋としては以下の通りである。

1. 照明ムラなどを取り除くため、適切な前処理を行う
2. ある閾値で 0 と 1 に 2 値化し、ファイバー部分となる塊を抽出する
3. ファイバー部分の塊について重心を求め、これをファイバー中心とする
4. 1 回の処理で適切に処理できなかった部分は再処理など行って補完する

今後 1 から 4 の一連の手法を重心法と呼ぶことにする。以下でこれらの処理について細かく述べる。

4.3 写真の撮影と前処理

4.3.1 写真の撮影

おおもとがファイバーバンドル端面の写真であるので、この撮影は個々のファイバーが認識できるようになされなければならない。そこで撮影のときに気をつけた点をいくつか述べる。まず撮影場所自体は実験中は完全に遮光してしまうためもともと明るい場所ではない。したがって照明、もしくはフラッシュが必要になる。しかしファイバーバンドルの表面はIIT受光面とできるだけ密着させることができるようきれいに磨いてあるので正面からのフラッシュは表面での反射があるためフラッシュは使用できない。したがって照明を当ててフラッシュ無しで撮影することにしたが、一方向からのみだと明るさにムラができるので反対方向からも照明を当てた。直接バンドル端面に照明を当てるとファイバー端面での光の反射により、その面が白く光ってファイバーを認識しにくくなるので間接照明にし、塗料部分の白色に対して全てのファイバー部分が黒色に写るよう調整した。さらにファイバーシートのライトガイド部分(無塗料部分)に照明が当たってファイバーが発光するのを防ぐためそこを遮光した。

上記のような点に注意して撮影を行い、目で見える限りでは全ファイバーについて見分けが出来るような写真を撮影することができた。

こうして得た写真をイメージスキャナを用いて光学解像度¹ 600 × 600 dpi のイメージスキャナを用いて、補完解像度² 1200 × 1200 dpi の大きさと取り込んだ。その結果、写真画像の大きさは縦、横ともに 2,000~3,000 ピクセルで画素の大きさは平均 $26.4\mu\text{m} / \text{pixel}$ ($24.0 \sim 33.6 \mu\text{m} / \text{pixel}$ 、写真写りの大きさによる) となった。1本のファイバーの直径 ($692 \mu\text{m}$) は平均 26.2pixel に相当することになる (実際に処理する塊はこれ以下の大きさになる)。CCD は $\sim 180 \mu\text{m} / \text{pixel}_{\text{CCD}}$ なので、1 CCD pixel $\approx 6.9\text{photo pixel}$ となる。

以後、写真画像の計算機上での画素を単にピクセル (もしくは $\text{pixel}_{\text{photo}}$ 、pixel) と表記し、CCD 画像の画素は CCD ピクセル (もしくは $\text{pixel}_{\text{CCD}}$) と表記することにする。また各ピクセル部分での濃淡を数値化した画素濃度値をピクセル値と呼ぶことにする (他に階調、深度などの呼び方もある)。

また本研究でのファイバーバンドルの ID の付け方は x 座標用バンドルに x01~x12 (本実験での IIT01~IIT12 に相当)、y 座標用バンドルに y01~y12 (IIT13~IIT24) としている。

4.3.2 前処理と 2 値化

4.3.1 のように撮影時は照明の当て方に注意をして撮影をしたが、どうしても写真の両端では明るさにいくらかの差が生じてしまう (図 4.1 参照)。そうすると全ピクセルに対し一括して一定の閾値で 2 値化を行うことができない。明るい部分のファイバーが認識できるような閾値で処理すると暗い部分のファイバーは全体がその閾値の下に沈んで認識されなくなり、逆に暗い部分のファイバーに合わせた閾値だと明るい部分のファイバーは複数

¹ イメージスキャナの取り込み精度を示す値。(CCD 素子の設置密度 [dots/inch]) × (光学ヘッドの移動精度 [dots/inch]) で示されている。

² 物理的な限界を示す光学解像度に対し、取り込まれた画素と画素の間を補間することで得られる見掛け上の精度。高解像度を実現できるが元画像の持つ情報以上に精密な情報は得られない。

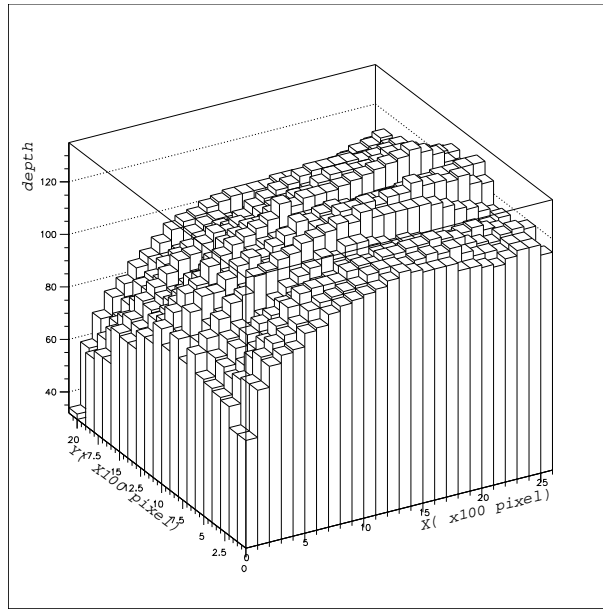


図 4.1: バンドル y09 について各 $100 \times 100 \text{pixel}$ の領域でのピクセル値の平均をプロットしたものの。x 座標が小さい側が暗く、x 座標が大きくなるにつれ全体的に明るくなっていることが分かる。単位は写真画像のピクセル。
 $(1 \text{ pixel} \equiv 1 \text{ pixel}_{\text{photo}} \approx 0.14 \text{ pixel}_{\text{CCD}} \approx 26.4 \mu\text{m})$

のファイバーがお互にくっついたひとつの大きな塊になり同じように認識されないからである (図 4.2 参照)。

したがって適切な前処理によってこの明るさの差を取り除いてやる必要がある。そこで今回は次に示す dilation(膨張) という処理を施した：

1. 画像中の各ピクセルの濃度値を隣接する 8 つのピクセル (8 近傍ピクセル) の中で最大の値に置き換える
2. これを 3 回繰り返す
3. 得られた値から元画像のピクセル値を引く
4. ピクセル値を反転させる (ここではグレースケール 256 階調の画像を用いているので 255 から上で得られた値を引く)

といった処理を行っている。簡単のため 1 次元データで説明したのが図 4.4 である。そして実際にこの方法で得られた画像と適当な閾値で 2 値化した例が図 4.3 となる。これからも全ファイバーが個々に判別でき大きさもほぼ揃っていることがわかる。図 4.5 は一つのバンドルでピクセル値分布を用いて dilation 処理の有効性を示している。処理前の分布からはファイバー部分とバックグラウンド部分がどこで分かれるかはっきりしないが、処理後の分布を見ると大体ピクセル値が 200~230 あたりで二つのピークに分離されていることが分かる。実際にこの谷の部分の値 (229) をこのバンドルの閾値として 2 値化を行うと全ファイバー 11,418 本 (2 本はバンドル製作の過程で損失したと思われる) を認識することができた。

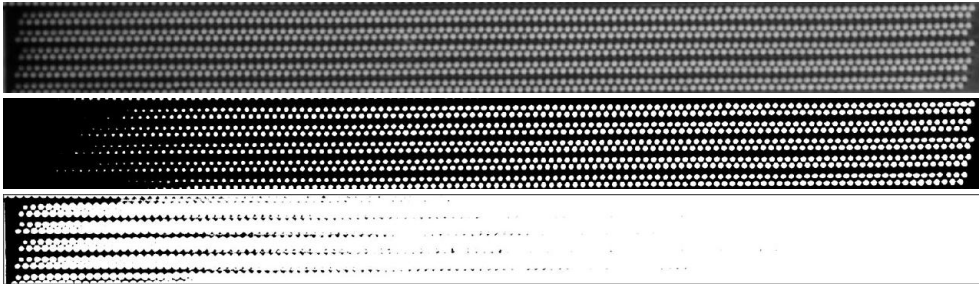


図 4.2: バンドル y09 の下側 B ブロックの部分に対して直接 2 値化処理を行った例。一番上の元画像に対して、真中は右側のファイバーを認識できるように設定した閾値で処理した結果で、一番下は左側のファイバーを認識できるように設定した閾値で処理した結果である。

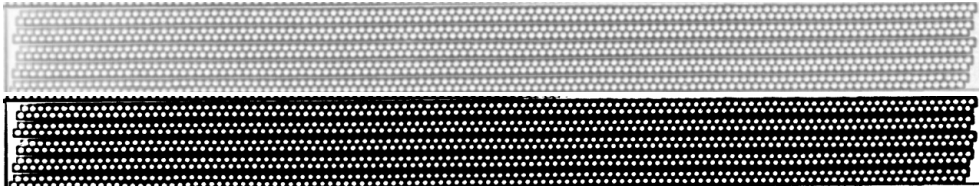


図 4.3: 図 4.2 の元画像に対して前処理を行った上で 2 値化処理した例。上は前処理を行った結果、下はそれを適当な閾値で 2 値化した結果である。

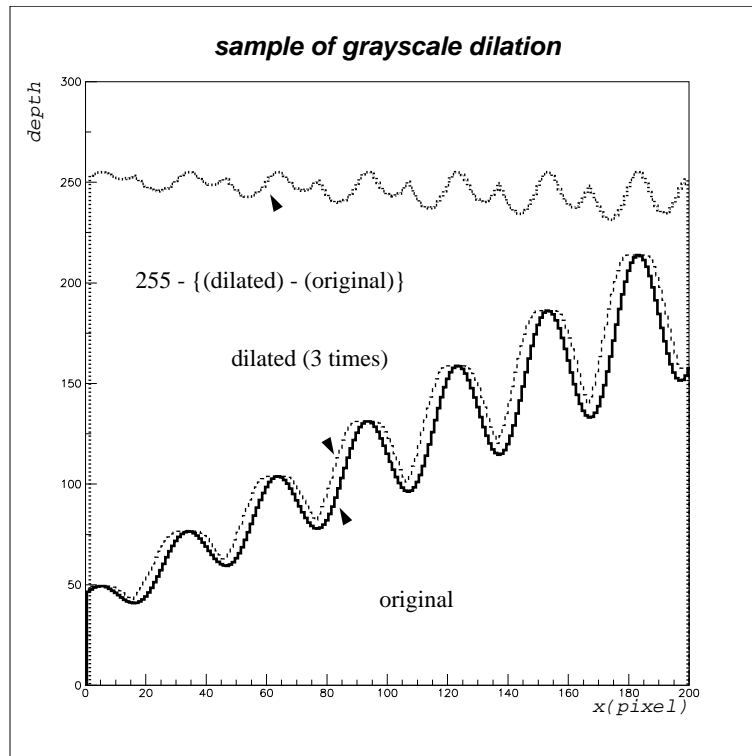


図 4.4: 1 次元で dilation 処理を行った例。元になるデータ (太線) に対して dilation を施したのが破線のヒストグラムで、これから元のデータを引いた結果が上のほうの点線のヒストグラムになる。x の小さい部分は認識しにくいほぼ全てのピークがくっつくことなく分離できる閾値が存在することがわかる。

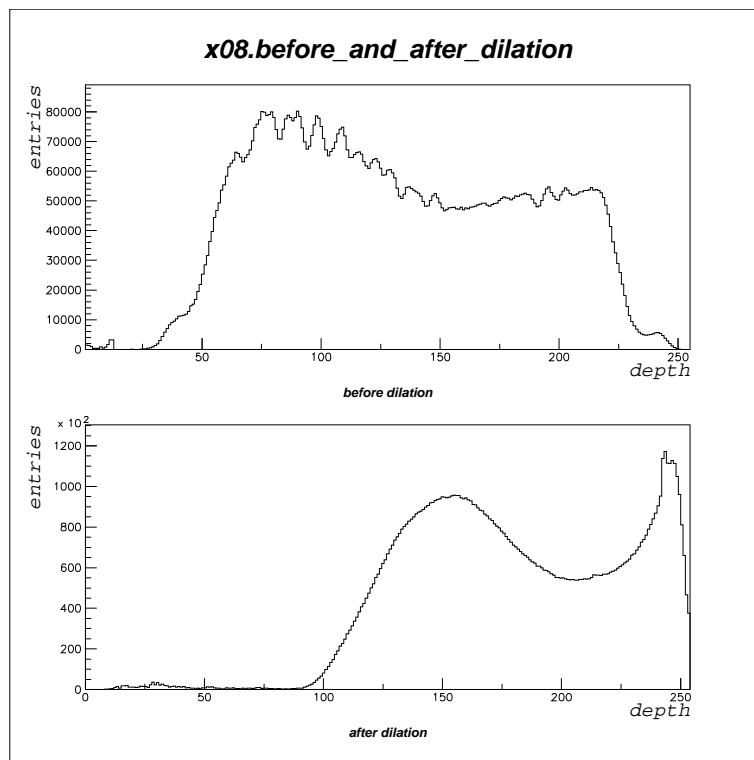


図 4.5: バンドル x08 についての ピクセル値の分布の図。上は dilation 処理を施す前、つまりスキャナで計算機に取り込んだ状態である。下は dilation 処理を施した後の分布で、だいたい 200~230 で 2 つのピークに分離できていることがわかる。

4.4 ファイバー中心座標の取得

4.4.1 ファイバー中心座標算出

dilation 処理で 2 値化された画像データが得られたので、この画像から個々のファイバーに相当する塊(クラスター)を選び出す。具体的にはひとつの塊の面積(塊を構成するピクセル数)が 100~700 のものをファイバー候補とした。こうして得られた塊の重心をとり、この座標をその部分にあるファイバーの中心座標とする(図 4.6 参照)。しかしファイバーである塊は確実にファイバー候補とするよう設けた基準のため認識された塊が全てファイバーであるというわけではない。そこで得られた重心を中心とする円を描いた写真画像を表示することで視覚的にファイバーと無関係な塊(の重心)を取り除いた。しかしバンドル製作の過程で出来た傷などによりファイバー中心を得られていない、もしくはファイバーが存在する範囲に重心をとっているものの 2 値化の段階で正しく円状にカットできなかったせいで本来の中心からずれた位置に重心が存在するなど正しく中心を得ていないファイバーがある。主なものとして、

- 2 値化に用いた閾値がその部分に対しては適切でなくファイバーの塊が隣接するファイバーやアクリルのセパレータや製作時に使用したマーカーのにじみなどくっついたもの：図 4.7
- ファイバー端面の部分に傷があるもの(ファイバーそのものにあった傷とバンドル研磨の時点ですいた傷がある)：図 4.8
- バンドル研磨の時点でファイバーとその周囲に傷が入ったもの：図 4.9

が挙げられる。隣接ファイバー等と塊がくっついたものに関しては、閾値を変えてその部分だけ再処理を行ってやればよいと思われるが、閾値の変更だけで個々の塊を分離させるのはほぼ不可能なものも存在する。傷に関しては、その傷の部分が影となり 2 値化したときにファイバーの塊の一部が欠けたり、その傷で二分されたりしている。それによって十分なピクセル数が得られなかったり、重心をとっても欠けなかった部分に偏るといったことが起きている。そこで後でこういったファイバーについて補完をするため、無関係な塊を取り除くと同時に画像データ上のファイバーと得た重心で描いた円が大きくずれているもの、重心が得られていないものを選別した。その結果 x 座標用のバンドルで平均 7.7 本(0.07%)、y 座標用のバンドルで平均 124 本(1.1%)のファイバーについて追加修正が必要となることが分かった(表 4.1 参照)。ここで y 座標用のバンドルの要修正本数が x 座標用に比べかなり多いことに気づく。これは y 座標用のバンドル製作や端面研磨の作業が非常にやりにくく、その影響で作業過程でバンドル表面に傷を残すことが多かったからと考えられる。

この後、上記で修正が必要とわかったファイバーに対し、再び閾値を変えて 2 値化し重心を得る作業を行った。具体的にはあらかじめ全バンドルに対して検査をしておき、大きく外れた場所に重心を求めているファイバーを特定し、手入力で中心位置を得ておく。そしてその点を含むファイバーの部分だけを切り取り、閾値を 1 ずつ変えて重心法を行う。各閾値で得られた重心のうち、手入力による中心位置から距離にして 10 ピクセル以内に得られたものの重心を求め、これをそのファイバーの中心とした。この処理により、形状

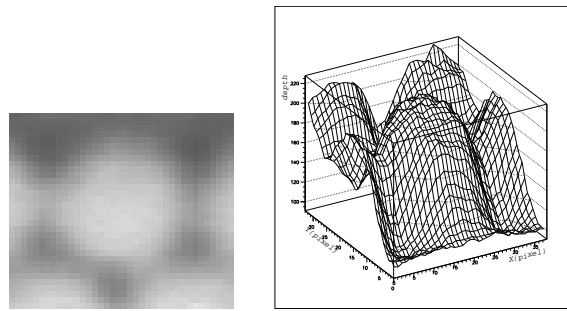


図 4.6: ほとんどのファイバーは隣接ファイバーとの区別が付き、孤立化させるための閾値も比較的見つけやすい。

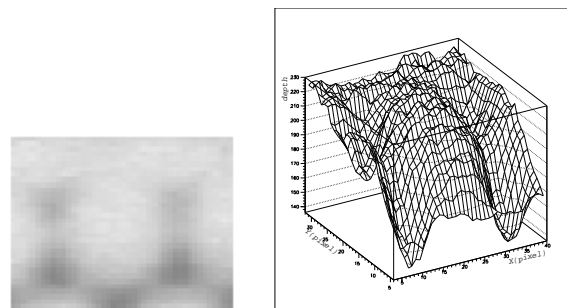


図 4.7: この場合ファイバーシート間を分離するセパレータの部分 (画像の上の部分) とファイバーを分けるような閾値を探すのは困難である。

は正常ながら周囲のファイバーに比べて暗いため最初に用いた閾値の下に沈んでいたファイバーなどについても重心を得ることができた。この方法により新たに 1,059 本のファイバーの重心が求められ、結局 x 座標用バンドルで 136,993 本 (99.9%)、 y 座標用バンドルで 136,543 本 (99.7%) のファイバー重心が求められた。

4.4.2 重心法で得られなかったファイバーの処理 (直接測定法)

重心法で 99.8% のファイバーについて中心を求めることができたが、まだ 1,581 本については十分正しいと思える中心座標を得ることができていない。そこで次にこれらのファイバー中心を求めることを考える。重心法で得られなかったファイバーというのは図 4.7、図 4.8、図 4.9 などだが、このようにいくつかのパターンがあり、また程度の差もさまざままで個々に対応した手法を考案したりその手法のパラメータを調整するといった作業は、対象となるファイバーの数を考えると効率的ではない。また CCD 画像上での 1 pixel_{CCD} 程度の精度が要求されているとしたとき、本研究に要求される精度は $6.9 \text{ pixel}_{photo}$ となり、十分余裕がある。これらの点から考えると、0.1% 以下のファイバーに対して様々な手法を考えたりパラメータ調整を行うよりも拡大した写真画像を目で見て直接中心を決定するほうが効率がよく、十分な精度で値が得られると期待できる。そこでこれらのファイバーについては写真画像をディスプレイに表示させ、中心と思える点をマウスでクリック

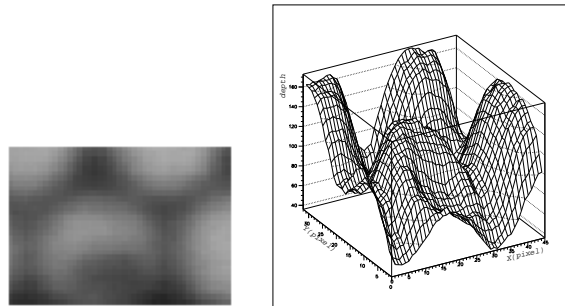


図 4.8: ファイバーの右下 (左画像) が欠けているため重心が左上に偏る。ただしファイバー自体が欠けているわけではなく、ファイバーの円内に白い傷が入った状態になっている。

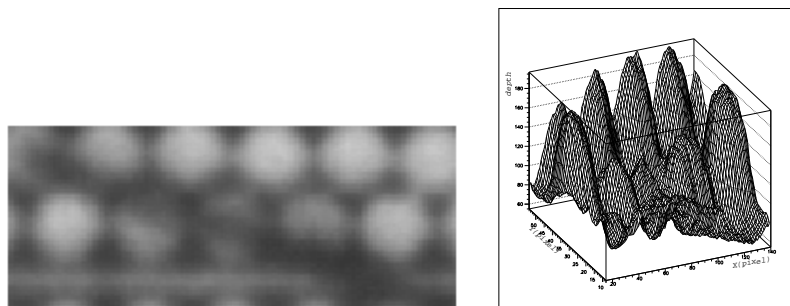


図 4.9: バンドルの端面研磨でできた傷のうち明らかに傷と認識できるものの例。ほとんど 2 値化で完全な円を抽出するのは不可能である。

バンドル	全ファイバー本数	修正が必要なファイバーの本数
<i>x01</i>	11,420	6 (2)
<i>02</i>	11,420	29 (19)
<i>03</i>	11,420	18 (7)
<i>04</i>	11,419	2 (0)
<i>05</i>	11,418	3 (0)
<i>06</i>	11,420	4 (3)
<i>07</i>	11,418	2 (0)
<i>08</i>	11,418	0 (0)
<i>09</i>	11,419	2 (1)
<i>10</i>	11,420	6 (0)
<i>11</i>	11,418	5 (1)
<i>12</i>	11,419	15 (3)
<i>y01</i>	11,420	77 (21)
<i>02</i>	11,419	1 (1)
<i>03</i>	11,420	6 (4)
<i>04</i>	11,420	106 (68)
<i>05</i>	11,420	6 (1)
<i>06</i>	11,418	587 (31)
<i>07</i>	11,420	313 (78)
<i>08</i>	11,419	33 (20)
<i>09</i>	11,419	5 (5)
<i>10</i>	11,419	29 (15)
<i>11</i>	11,418	114 (43)
<i>12</i>	11,417	212 (199)

表 4.1: : 各バンドルの全ファイバー本数と、dilation 処理→2 値化→重心取得の処理で正しく中心を得ることが出来なかったファイバーの本数の表。一番右の列の () の中は要修正ファイバーに対して再処理を行い、それでも正しくファイバーの中心を得ることが出来なかったファイバーの本数。これらの扱いについては 4.4.2 を参照。

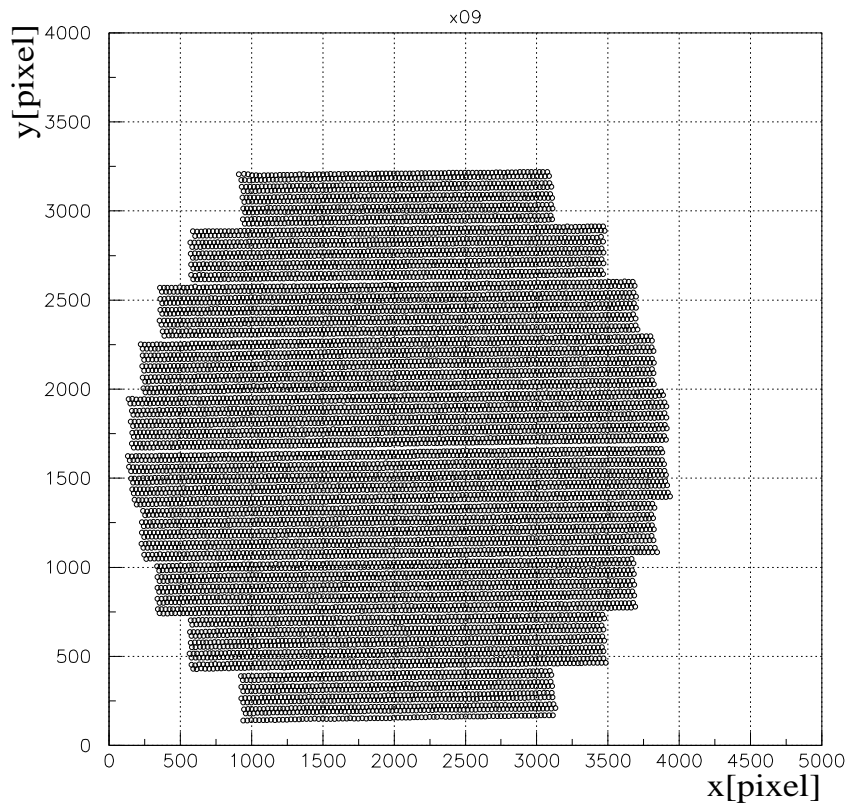


図 4.10: バンドル x09 について本研究で得られた位置座標のデータを中心として描いたファイバー断面の円。ただし写真画像では原点が左上にくるので写真とは上下が逆になっている。
($1 \text{ pixel} \equiv 1 \text{ pixel}_{photo} \approx 0.14 \text{ pixel}_{CCD} \approx 26.4 \mu\text{m}$)

し、この点をそのファイバーの中心座標とした。得られた結果の一部を図 4.10 に示す。また、本研究ではこのファイバー中心を直接測定する方法を直接測定法と呼ぶことにする。

4.5 中心座標の誤差の評価

重心法および直接測定によって全てのファイバーについて中心座標を得ることができた。ここでは得られた座標に関してその系統誤差を評価してみる。なお、各バンドルの写真画像は異なる解像度を持つので最終的な値は平均の解像度に換算して求めることにする。

4.5.1 重心法の再現性による誤差

まず重心法の複数回測定での再現性による統計誤差を調べる。そのためにイメージスキャナによる同一写真の複数回取り込みを行った。取り込み時にはイメージスキャナへの

写真の設置をその都度やり直し、その後の重心法は全く同じにして測定した。測定回数は10回である。ここで、取り込んだ画像同士で絶対座標は一致していないため、比較する画像の間で平行移動と回転で調整する必要がある。具体的には比較画像間で一方を固定し、他方の結果について回転の中心の位置 (x,y) と回転角 θ をパラメータにして、比較写真画像間で対応するファイバー同士の中心の距離を全ファイバー分足し合わせた和が最小になるよう微調整した。この測定はバンドル x08(IIT 番号 8) について行った。結果の一部を図 4.11 に示す。

ここで本研究での再現性の統計誤差を各ファイバーの x 、 y 座標の分布 (統計数 10) の標準偏差についての算術平均で定義することにする。そうすると x 、 y それぞれで $0.084 \text{ pixel}_{photo}$ 、 $0.095 \text{ pixel}_{photo}$ となった。これを写真画像の平均解像度 ($1 \text{ pixel}_{photo} \approx 26.4 \mu\text{m}$) に換算すると $0.092 \text{ pixel}_{photo}$ 、 $0.10 \text{ pixel}_{photo}$ となる。

4.5.2 2値化閾値の依存性による誤差

次に中心座標の2値化のための閾値への依存性を調べた。対象としたバンドルは x08 で、4.3.2 で述べたような dilation 処理後のピクセル値の分布 (図 4.5) の谷の部分で閾値を変えて、最終的にこのバンドルで使用している閾値 (229) での結果との残差を調べた。図 4.12 は閾値を 195 から 235 まで変動させて得た結果と閾値 229 で得た結果の残差である。

これを見ると閾値への依存はほとんどなく、 1 pixel_{photo} の範囲での変動にとどまることがわかる。これは dilation 処理によってファイバー部分とそうでない部分の分離がはっきりとできている結果とも言える。

4.5.3 直接測定法の再現性による誤差

次に直接測定法の再現性による誤差を見てみる。4.4.2 で述べたように十分に写真画像が大きいことから、直接測定の方法で CCD 画像のピクセルに比べて十分な精度で位置座標が得られると予想できる。そこで同一ファイバーに関して 20 回直接入力を行った (表 4.2 参照)。その結果各バンドル写真での標準偏差の算術平均は x 座標で $0.63 \text{ pixel}_{photo}$ 、 y 座標で $0.55 \text{ pixel}_{photo}$ となり、ファイバー中心を求める手法として本研究において直接測定法は十分用いることができることがわかる。

4.5.4 方法の違いによる誤差 (重心法と直接測定法の比較)

重心法と直接測定法によって得られる中心座標の差を見てみる。具体的には何本かのファイバーに対して重心法と直接測定法による中心座標差を調べた (図 4.13)。この結果、標準偏差は x 、 y 座標でそれぞれ $0.96 \text{ pixel}_{photo}$ 、 $0.93 \text{ pixel}_{photo}$ であり、写真画像の平均解像度 ($1 \text{ pixel}_{photo} \approx 26.4 \mu\text{m}$) に換算すると $1.06 \text{ pixel}_{photo}$ 、 $1.02 \text{ pixel}_{photo}$ となる。これを方法の違いによる誤差と定義する。

4.5.3 での結果を見ると直接測定法の再現性による誤差は重心法の誤差に比べて精度がいいとは言えない。したがって直接測定法の誤差については重心法との方法の違いによる誤差を含む。以降の議論では重心法と直接測定法の誤差は同等に取り扱い、単に中心座標

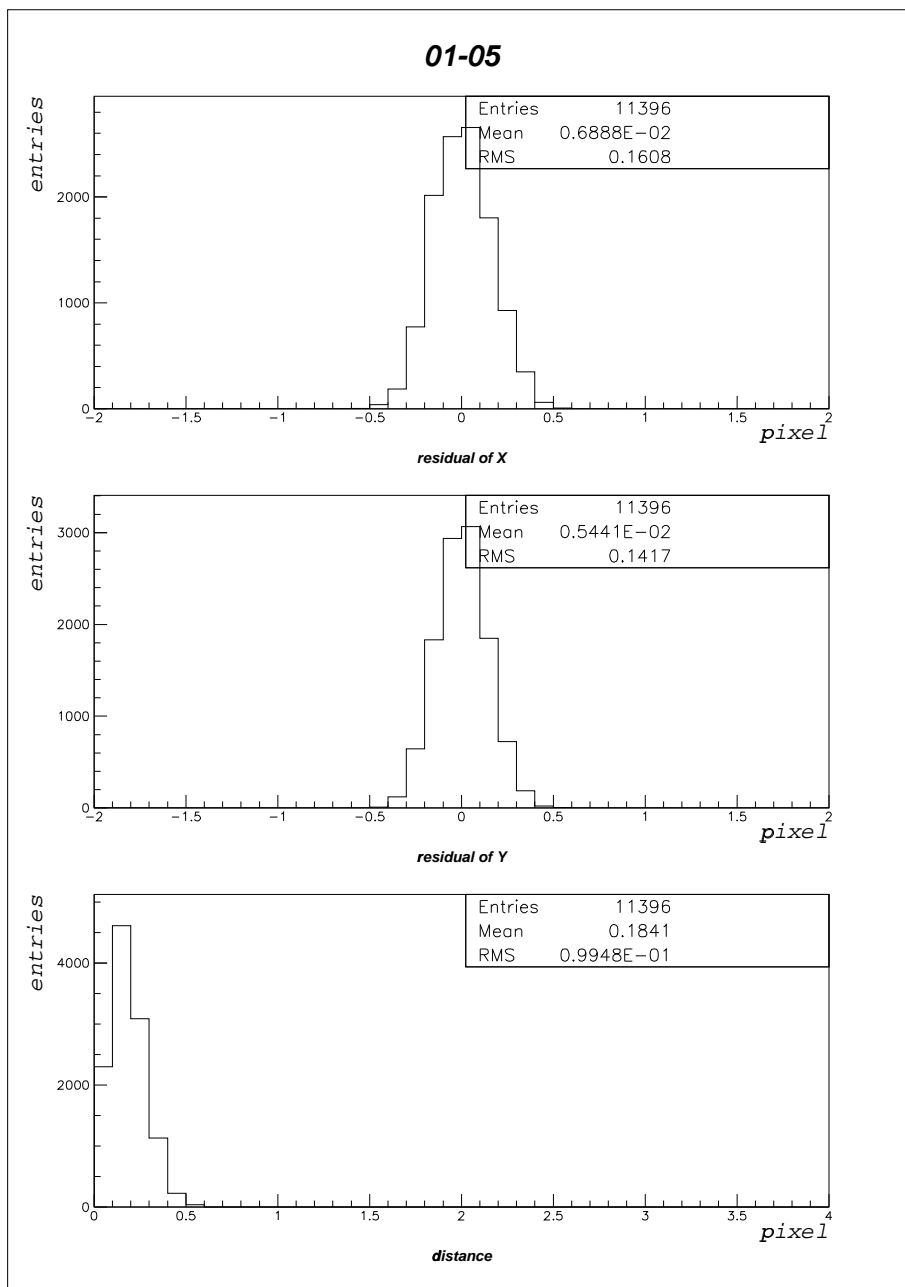


図 4.11: 同一写真について画像取り込みから重心法による処理でファイバーの位置座標を算出するまでの一連の処理を 10 回行い、そのうちの 2 つの結果 (1 回目と 5 回目) の間のずれを示している。上から x 座標の残差、y 座標の残差、2 つの座標間の距離の分布。
 (1 pixel \equiv 1 pixel_{photo} \approx 0.14 pixel_{CCD} \approx 26.4 μ m)

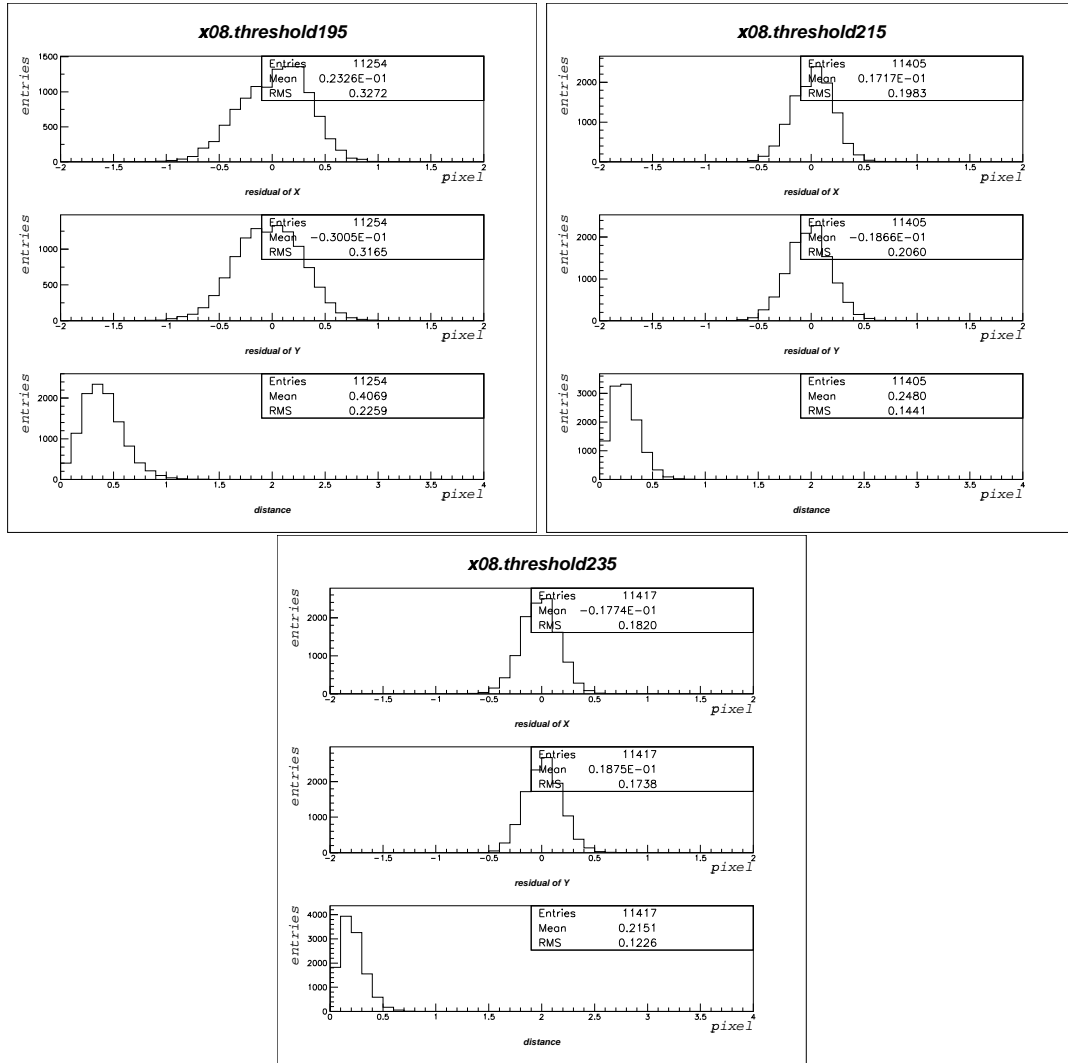


図 4.12: バンドル x08 について dilation 処理後のピクセル値分布の谷の部分での閾値の変動でファイバー中心がどれくらいずれるかを見た分布。閾値 229 で処理した結果を基準として閾値 195、215、235 で処理した結果との x、y 座標それぞれの残差と距離を求めている。分布の谷の部分では閾値によってファイバー中心がずれることがないことがわかる。
 (1 pixel \equiv 1 pixel_{photo} \approx 0.14 pixel_{CCD} \approx 26.4 μ m)

バンドル	1ピクセルサイズ [μm / pixel]	ファイバー直径 [pixel]	1回の直接測定の誤差	
			x [pixel]	y [pixel]
<i>x01</i>	24.3	28.5	0.59	0.60
<i>02</i>	24.0	28.8	0.87	0.71
<i>03</i>	25.0	27.7	0.98	0.50
<i>04</i>	24.2	28.6	0.83	0.64
<i>05</i>	24.3	28.5	0.89	0.54
<i>06</i>	24.9	27.8	0.57	0.56
<i>07</i>	24.4	28.4	0.73	0.48
<i>08</i>	24.6	28.1	0.73	0.40
<i>09</i>	24.7	28.0	0.77	0.43
<i>10</i>	24.7	28.0	0.62	0.71
<i>11</i>	24.5	28.2	0.64	0.65
<i>12</i>	24.5	28.2	0.62	0.62
<i>y01</i>	33.6	20.6	0.49	0.73
<i>02</i>	31.5	22.0	0.54	0.58
<i>03</i>	30.7	22.5	0.57	0.40
<i>04</i>	28.8	24.0	0.74	0.60
<i>05</i>	26.3	26.3	0.46	0.54
<i>06</i>	24.8	27.9	0.62	0.64
<i>07</i>	28.1	24.6	0.65	0.57
<i>08</i>	30.5	22.7	0.46	0.44
<i>09</i>	27.8	24.9	0.50	0.50
<i>10</i>	25.0	27.7	0.62	0.54
<i>11</i>	27.1	25.5	0.71	0.54
<i>12</i>	24.0	28.8	0.50	0.62

表 4.2: 本研究で用いたバンドル写真画像1ピクセルの大きさとファイバー直径 ($692 \mu\text{m}$) に相当するピクセル数。アクリルフレームのEブロックの部分の幅 (95.2mm) と写真上の長さから求めた。実際には収差などで輪郭がぼやけ隣接ファイバーと幾分くっつくため、2値化したときには塊の大きさはこれより小さくなる。また直接測定の誤差は写真画像での1ピクセル以内と、十分な精度を持っていることがわかる。なお、表中の pixel はすべて写真画像でのピクセル ($pixel_{photo}$) である。

($1 \text{ pixel} \equiv 1 \text{ pixel}_{photo} \approx 0.14 \text{ pixel}_{CCD} \approx 26.4\mu\text{m}$)

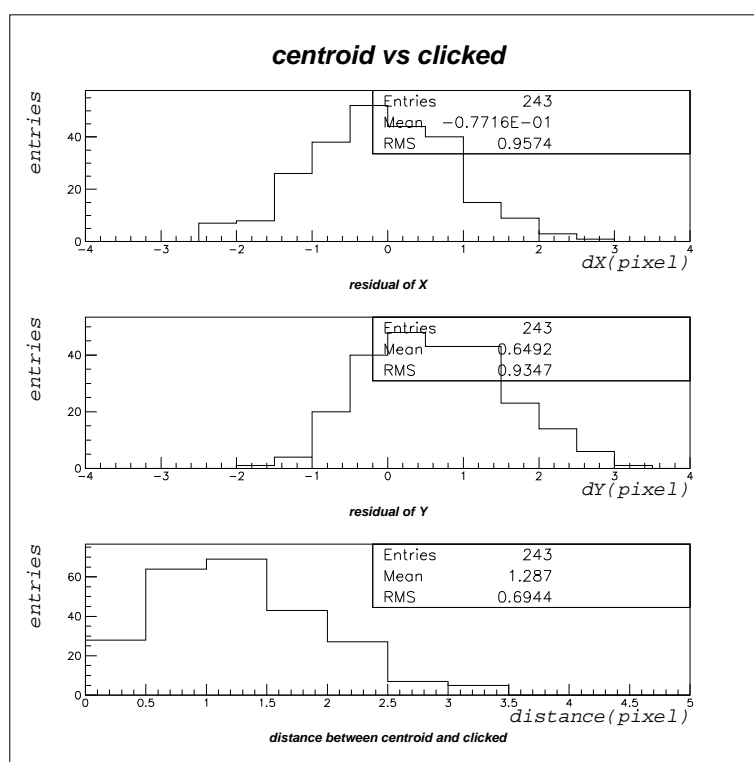


図 4.13: バンドル x12 の一部 (ファイバー 243 本) に対して、重心法と直接測定の両方を行い得られた x、y 座標それぞれの差 (重心法による点の座標から直接測定の点の座標を引いた) と 2 点の距離の分布。図の単位は写真画像でのピクセル。
(1 pixel \equiv 1 pixel_{photo} \approx 0.14 pixel_{CCD} \approx 26.4 μ m)

の誤差とする。

4.5.5 写真の歪みによる誤差

本研究で用いた画像は光学カメラで撮影したものである。したがって像の歪みについて調べる必要がある。

今回はレンズ系で生じる 5 収差³のうちで、収差がないときとで座標が変わってくる歪曲収差による像の歪曲について検証する。歪曲収差は光軸から離れるほど大きくなり、直線が糸巻型あるいは樽型に歪むのが特徴である。またこの他に今回の撮影で考えられるのは、カメラの光軸とバンドル表面が垂直でない場合に平行直線が平行でなくなるといった歪みである。そこで本研究では被写体内の平行 2 直線について直線性、平行性を調べた。対象としたのはバンドルを型どるアクリルフレーム (図 3.6 参照) の境界部分で、これは機械的精度で直線でおかつ向かい合う直線はほぼ平行と考えた。

直線性の測定については写真画像上でのアクリルフレームの境界部分について 20 点ほど位置座標を直接測定し、これを 2 次曲線でフィットしてみた。これを 5 回繰り返した。対象となる部分は写真 (図 3.8) の一番上のブロックの上の辺と一番下のブロックの底辺で

³Seidel の 5 収差と呼ばれる。球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲収差の 5 つ。

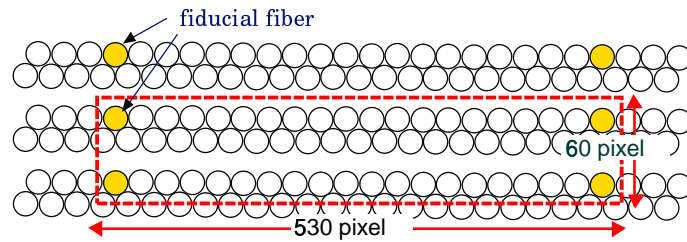


図 4.14: EL を用いたファイバー位置較正では隣り合う 2 つの fiducial fiber との位置関係、ならびに下の fiducial fiber がある層との位置関係を用いて処理が行われるため、上記の点線領域の範囲で写真の歪みの影響を考慮すればよい。

ある。写真 (図 3.8) での垂直方向の直線部分に関しては十分な長さがとれる部分がないため今回は測定しなかった。

フィットの結果の一例を図 4.15 左に示す。

写真の歪み具合を見るため各バンドルの上下辺についてサジッタ⁴を求めた。その結果、サジッタの平均は $0.99 \pm 0.69 \text{ pixel}_{photo}$ となった。ただし誤差は各写真でのサジッタの値のばらつきである。また、撮影状態が悪いものは除いている。

この平均の値を用いて歪曲収差による影響を考えてみる。弦の長さがおよそ $2000 \text{ pixel}_{photo}$ なのに対してサジッタが 1 pixel_{photo} となることから $\Delta y/\Delta x < 1/1000$ となる。一方、本実験の EL を用いたファイバー位置較正 [27] では x 方向は隣接する fiducial fiber 間 (最大 20 本)、y 方向は fiducial fiber を含む層の間の領域をひとつの単位とし、この単位領域ごとにファイバー位置の算出が行われている。本研究で得られたデータは基本的にこのファイバー位置較正データに対して利用されるので、歪みの影響もこの領域でどれくらいかで判断してよいといえる。したがっておよそ $530 \times 60 \text{ pixel}_{photo}$ の領域 (図 4.14) を考えることになる。

これからすると x 方向で $0.5 \text{ pixel}_{photo}$ 程度、y 方向で $0.06 \text{ pixel}_{photo}$ 程度のずれが生じると考えられる。ファイバー直径を 1 とすると 1.91×10^{-2} 、 2.29×10^{-3} 程度のずれということになる。

また写真撮影時に起こり得る像の歪みの別の要因として、カメラの光軸 (レンズの回転対象軸) とバンドル表面が垂直でない場合に起きる歪みについて検証した。この歪みでは平行な 2 直線が平行でなくなる。そこでこの影響がどれくらいあるかを歪曲収差と同様にアクリルフレーム境界部分の直線を用いて調べた。写真の垂直方向の直線については歪曲収差の測定と同様の理由で省略した。したがって縦方向の平行な 2 直線についても同じだけの歪みが生じたとして考えることにする。歪曲収差の測定のときに得ている上下の境界部分 2 直線を直接測定した点を直線でフィットしてみた。

バンドル y08 についてのフィットの結果を図 4.15 右に示す。全部のバンドルの写真について調べた結果、 1 pixel_{photo} 毎に平均で $(2.98 \pm 3.21) \times 10^{-3} \text{ pixel}_{photo}$ ずつずれが生じる可能性があることがわかった。これは歪曲収差のときと同じように隣接する 2 つの fiducial fiber 間に換算すると平均で $1.6 \text{ pixel}_{photo}$ 、fiducial fiber がある 2 つの層の間 (60 pixel_{photo}) では $0.2 \text{ pixel}_{photo}$ のずれがそれぞれ水平、垂直方向に生じてくることになる。

⁴sagitta。円弧の中心から弦の中心までの長さ。

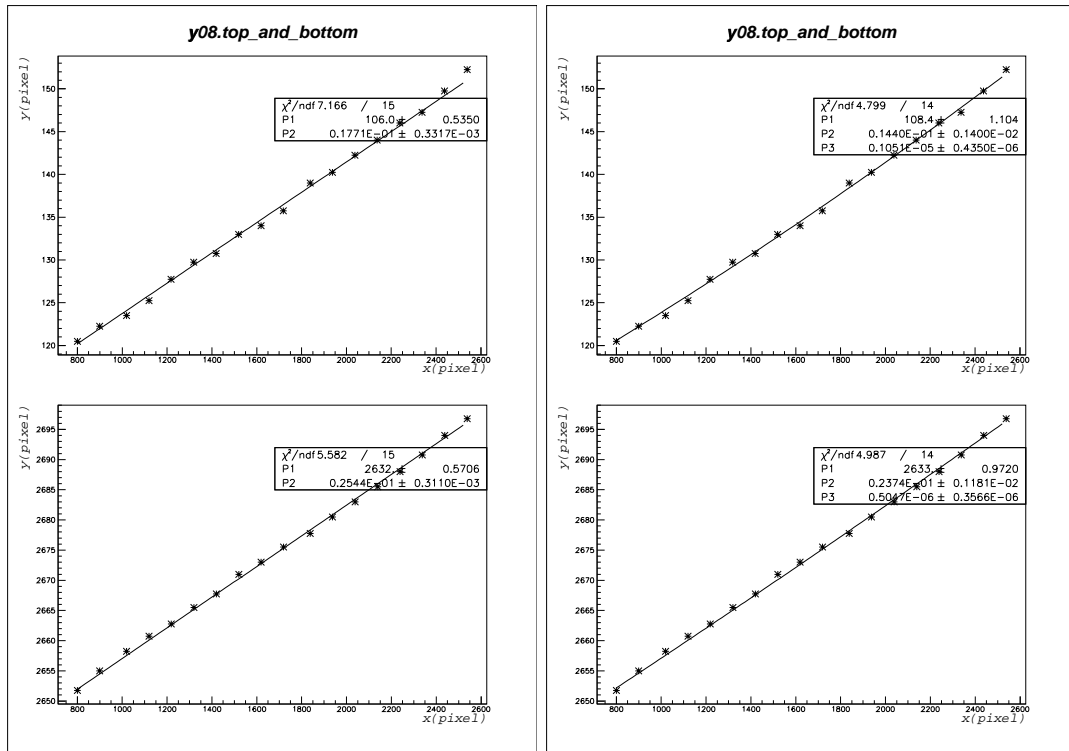


図 4.15: バンドル y08 に関して、写真上側のアクリルフレームの境界部分、写真下側のフレームの境界部分を 20 点測定し 2 次曲線 (左図) と直線 (右図) でフィットした結果。上図、下図がそれぞれ写真上側、下側のフレームに対応している。2 次曲線フィットに関して、このサジッタの値は上が $0.79 \pm 5.0 \text{ pixel}_{photo}$ 、下が $0.38 \pm 4.2 \text{ pixel}_{photo}$ である。また直線フィットでの傾きは上下それぞれ $(1.77 \pm 0.03) \times 10^{-2}$ 、 $(2.54 \pm 0.03) \times 10^{-2}$ である。
 $(1 \text{ pixel} \equiv 1 \text{ pixel}_{photo} \approx 0.14 \text{ pixel}_{CCD} \approx 26.4\mu\text{m})$

誤差の種類	x 座標 [$pixel_{photo}$]	y 座標 [$pixel_{photo}$]
重心法の再現性による誤差	0.092	0.10
2 値化閾値への依存性による誤差	< 1	< 1
直接測定法の再現性による誤差	0.63	0.55
異なる方法の比較による誤差	1.06	1.02
写真の歪みによる誤差	1.68	0.21
歪曲収差による誤差	0.5	0.06
光軸のずれによる誤差	1.6	0.2
計	2.31	1.55

表 4.3: 本研究で行った重心法ならびに直接測定法で得られたファイバー中心座標の誤差の表。歪曲収差、光軸のずれによる誤差に関しては各写真で得られた誤差の平均で、図 4.14 の領域での影響について求めている。また直接測定法の再現性による誤差は各写真で測定した誤差の平均である。その他の値は写真画像の平均解像度 ($1\ pixel_{photo} \approx 26.4\ \mu m$) に換算したものである。

ただし、この平行 2 直線の間の開きの別の要因として、図 3.6 にあるようなファイバーバンドルの製作過程で半円のファイバーバンドル同士の張り合わせが一部不完全であったことも考えられる。そうするとこの開きの全てが歪みのせいとは言い切れないが、本実験が稼働中で確認することはできないためここでは考慮しないことにする。

これらの考察から、4 つの fiducial fiber で囲まれる領域 (図 4.14) で考えるとき写真の歪みによって x、y 方向それぞれに $1.68\ pixel_{photo}$ 、 $0.21\ pixel_{photo}$ 程度のずれが生じ得ることが言える。

4.5.6 ファイバー中心座標の誤差

これら 2 つの方法、ならびに写真の歪みの評価から最終的なファイバー中心座標の誤差を考える。なお、ここでの値は平均解像度 ($1\ pixel_{photo} \approx 26.4\ \mu m$) のときの値である。

重心法の再現性による誤差、2 値化の閾値への依存性、直接測定法の再現性による誤差ならびに重心法、直接測定法の方法の違いによる誤差、写真の歪みから、 $\sigma_{sys.x} = (\pm 0.092 \pm 1 \pm 0.63 \pm 1.06 \pm 1.68)\ pixel_{photo}$ 、 $\sigma_{sys.y} = (\pm 0.10 \pm 1 \pm 0.55 \pm 1.02 \pm 0.21)\ pixel_{photo}$ となる。誤差の 2 乗和を取ると $\pm 2.31\ pixel_{photo}$ 、 $\pm 1.55\ pixel_{photo}$ となる。バンドル端面の寸法に直すとそれぞれ $\pm 61.0\ \mu m$ 、 $\pm 40.9\ \mu m$ で、EL を用いた位置較正の精度 (x、y ともに $100\ \mu m$ 以内 [27]) に比べても十分であることがわかる。

4.6 写真画像解析データの活用と今後

本実験ではシンチレーティングファイバー飛跡検出器において全ファイバーの 4.2 % 程度 (fiducial fiber) に関しては CCD 画像上の位置座標を直接測定しているが、残りはすべて規則正しく並んでいると仮定した上で fiducial fiber からの相対的な位置関係から求めている [27]。しかし実際にはバンドル製作の過程で並びが不規則になったりする部分も出てきている。本研究で実物を写真に収めた上で位置座標を求めることで、実際に製作された

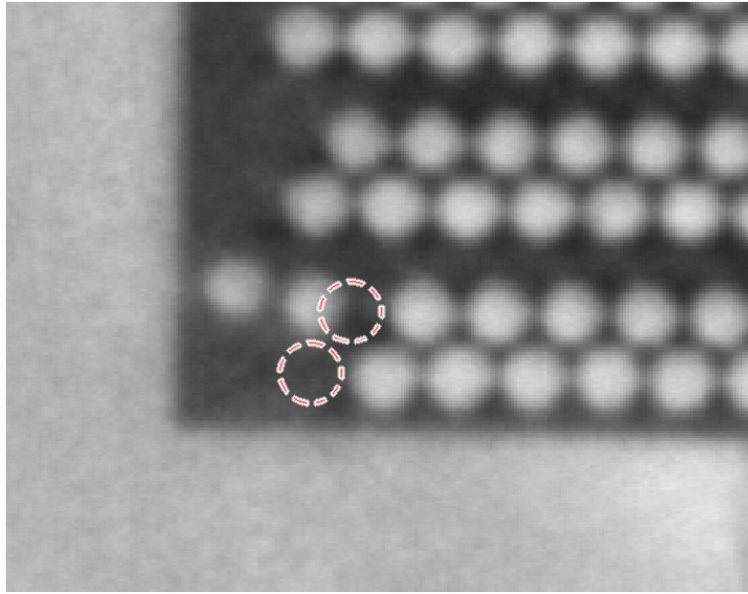


図 4.16: fiducial fiber だけがファイバーの並びから外れている例。このバンドルの場合 fiducial fiber を設定する層が 2 層のうちの下層である。したがって左に大きく外れているのが fiducial fiber となる。点線の円が本来ファイバーがあるべき位置である。この場合は作業中にこの部分だけ裂けて離れ、そのまま固まったと思われる。

ファイバーバンドルの評価を行うことができる。それは例えば先に述べた規則的に並んでいないファイバーの検出、ならびにその補正である。本実験では隣り合う 2 つの fiducial fiber の間のファイバーは直線に並んでいるとして位置の算出を行っている。しかしこれがどれくらい正しいのかは保証できないため、本研究のデータによりこの直線からずれているファイバーがどれくらいあるのか、またどの程度のずれがあるのか、といったことを調べることができ、またその補正を行うこともできる (図 4.16、4.17 は補正が必要と思われる例)。

またずれが小さいことがわかれば、結果の信頼性を上げることもつながる。そこでこの位置座標データの活用の一例として全バンドル中最もファイバーの並びが不規則な部分 (図 4.17 下) に対して検証を行った。この層はファイバーストック E (ファイバー 136 本) で、fiducial fiber を含む層について検証した。この層の fiducial fiber はファイバー 10 本おきと両端に設定してある (14 本)。本実験の EL を用いた位置較正では隣接する 2 つの fiducial fiber の間のファイバーはこの 2 点を結んだ線分上に並んでいるとして y 座標を算出している。そこで隣接する 2 つの fiducial fiber を結ぶ線分から実際の位置の y 座標がどれくらいずれているかを調べた。その結果を図 4.18 に示す。

見るとわかるように 1 pixel_{CCD} 分 ($6.9 \text{ pixel}_{photo}$) 以上ずれているものも多く、中にはファイバーの直径分 ($26.2 \text{ pixel}_{photo}$) 近くずれているものもある。また位置較正で fiducial fiber を含まない層は fiducial fiber を含む層のファイバーとの位置関係から算出するため、fiducial fiber を含む層が正しく求められないと fiducial fiber を含まない層も影響を受けることになる。そしてこの位置較正のずれは光ったファイバーを誤って認識することになる。特に y 方向のずれは各シートの間にはさまっているアクリルフィルムセパレータ ($200 \mu\text{m}$

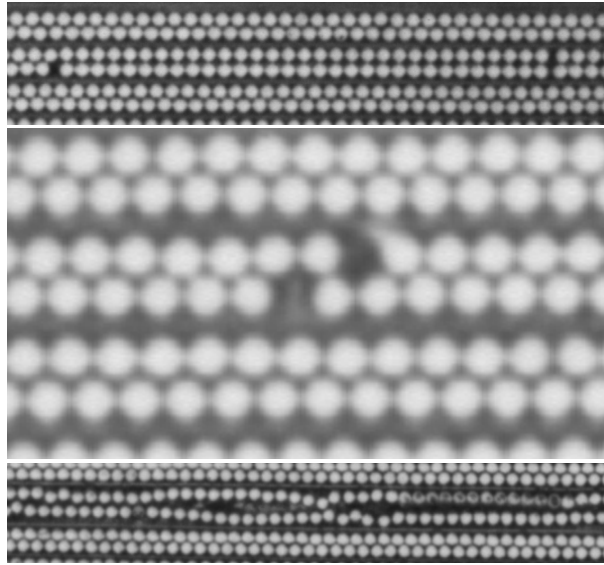


図 4.17: ファイバーの列自体が不規則になった例。上の 2 つはいずれもファイバーシート製作からファイバーブロック製作までの間で一部が裂けたまま固定されたと思われる。下は 2 層の間の接着が不十分であったためにファイバーブロック製作の時点で 2 層が剥離したもので修復は不可能だった。

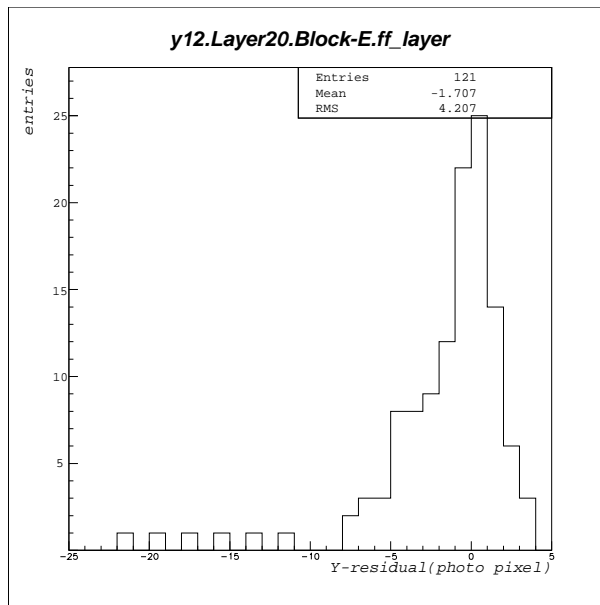


図 4.18: 図 4.17 下の不規則な並びの層について EL を用いた位置較正を適用し、この位置較正が与えるファイバーの位置座標と本研究で得た位置座標データの y 座標の残差をプロットした。ファイバー 1 本分近く ($26.2 \text{ pixel}_{photo}$) ずれているものもあることがわかる。
($1 \text{ pixel} \equiv 1 \text{ pixel}_{photo} \approx 0.14 \text{ pixel}_{CCD} \approx 26.4 \mu\text{m}$)

厚)を越えるほどになるとまったく無関係の場所のファイバーが光ったと誤認することになるため、結果への影響が大きく注意する必要がある。具体的にはファイバー半径程度のずれ ($350 \mu\text{m} \approx 16 \text{ pixel}_{photo}$) が生じると光ったファイバーを誤認してしまうと考えると、今回の例ではこれに近い残差を持つファイバーは3本あることになり、今後の補正の対象になると思われる。しかし図 4.17 下のような最も並びが不規則な部分でもこの程度の補正で済むと考えれば、現在の方法で得られるデータは十分信頼できるといえる。

このように本研究で得られた位置座標のデータを用いてファイバーバンドル、ならびに本実験での位置較正の検証ができ、加えて補正も行えることがわかる。

そしてこの fiducial fiber 間のファイバーのずれ以上に影響が大きいと考えられるのが fiducial fiber 自体の位置のずれである。他のファイバーが規則的に並んでいる中で fiducial fiber のみはその並びから外れていると、内挿されるファイバーまでがそのずれに引っ張られることになるため、fiducial fiber が他のファイバーの並びの中に収まっているかどうかの確認ならびにその補正は重要である。図 4.16 はその例と言える。実際、各ファイバースロットの両端に設定された fiducial fiber においては製作過程で一番作業の影響を受けやすく、本来あるべき位置から大きくずれたものも存在している。

さらにはこの fiducial fiber が正しく 10 本、ないし 20 本おきに設定されていない部分や、端の fiducial fiber が誤って 2 本続けて設定されている部分、作業中に端の fiducial fiber を折って損失してしまったりと、製作する量を考えると完全になくすことのできないような作業上のミスによって検出器の性能に少しずつ影響を与え兼ねない。したがって上に挙げたような評価や補正は重要であり、今後本研究のデータを用いてこれらのことがなされることを期待する。

第5章 結論

本研究では、つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験の前置検出器であるシンチレーティングファイバー飛跡検出器の読み出し部分となるファイバーバンドルの端面の写真から、ファイバーの位置を求めた。

現在シンチレーティングファイバー飛跡検出器ではバンドル端面上でのファイバーの位置については、全体の4.2%のファイバーのみを光らせて直接測定して、その他は測定したファイバーとの位置の相対関係から算出している(ファイバー位置較正)。試験的に作ったファイバーブロックでの測定では $100\mu\text{m}$ の精度で正しい位置を得ているという結果があるが、実際に1998年末から1999年初頭にかけて製作された24本のファイバーバンドルでは製作過程でのトラブル等で理想的な並びをしたファイバーばかりというわけではないため、実際のファイバーバンドルでのファイバーの並び方は把握しておく必要がある。そこで本研究では実際のファイバーバンドルでのファイバーの位置関係を求めた。その結果、ファイバーバンドル全24本中にある全ファイバー274,058本のうち99.8%については、重心法と呼ばれる方法(本文4.2)を用い、残りのファイバーは中心を直接測定(直接測定法)することで全ファイバーの位置を得ることができた。誤差は計算機に取り込んだ写真画像上のピクセル(1 pixel_{photo} は平均で $26.4\mu\text{m}$ に相当)でx、yそれぞれ $2.31\text{ pixel}_{photo}$ ($61.0\mu\text{m}$)、 $1.55\text{ pixel}_{photo}$ ($40.9\mu\text{m}$)である。そしてバンドルの一部にこのデータを用いることによってファイバー位置較正を検証することができ、不規則な並びをした部分を選び出すことが可能なことが示せた。

今後はこうした作業をバンドル全体で行うことでファイバー位置較正の信頼性、そしてシンチレーティングファイバー飛跡検出器のデータの質を向上させることができると期待される。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々に多岐にわたりお世話になったことに深く感謝の意を表します。

初めに、「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」に参加する機会を下さいました武田 廣 教授、野崎 光昭 教授に深く感謝します。

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 助教授、青木 茂樹 助教授、鈴木 州 助手には、常日頃から研究のみならず多岐にわたり直接の御指導、御助言を頂きましたことを深く感謝いたします。

高エネルギー加速器研究機構の作田 誠 助教授には、同研究所でのシンチレーティングファイバー検出器関係の研究で、直接御指導頂きましたことを深く感謝いたします。

Washington 大学 Seattle 校の Jeff Wilkes 教授、Eric Zager さんには、御自身の貴重なプログラムを参考にと提供していただいたことを深く感謝いたします。

東京理科大学の門脇 徹人さん、神戸大学の恩地 正裕君、岩下 大器君、東京理科大学の岸 正太郎君には、シンチレーティングファイバー検出器の研究で様々な問題を一緒に取り組んだ時に色々お世話になりました。

California 大学 Irvine 校の峰 俊一 博士、高エネルギー加速器研究機構の酒井 敦 博士、早戸 良成 助手、神戸大学の小浜 光洋さん、東北大学の長谷川 琢哉 助手、丸山 和純さん、京都大学の稲垣 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研究していた時に、多岐にわたり御指導、御助言を頂き有難うございます。

神戸大学の北村 尚さん、神戸大学 OB の越後 慎也さん、田代 和也さん、同僚の北村 雅裕君、久米 剛生君、竹中 和彦君、藤井 公雄君には、学部生のころや普段から助言や協力など大変お世話になりました。

同じく神戸大学の田中 康之君、大瀧 智子さん、高月 美知代さん、岩尾 亮君、野田 俊介君、西山 正吾君、山田 有紀さんには、本研究での作業を手伝ってもらったりしてお世話になりました。

最後になりましたが、博士前期課程修了まで私のわがままにつき合ってくれ、支えてくれた家族や友人たちに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] R.M.Barnett *et al.*, E.phys.J.C **3** 23 (1999).
- [2] M.Honda *et al.*, Phys.Lett. B 248 (1990).
- [3] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. **B 335**, 237 (1994).
- [4] R.Becker-Szendy *et al.*, Phys. Rev. **D 46**, 3720 (1992).
- [5] K. Daum *et al.*, Z. Phys. **C 66**, 417 (1995).
- [6] M. Aglietta *et al.*, Europhys. Lett. **8**, 611 (1989).
- [7] 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)
- [8] Y. Fukuda *et al.*, “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos” Phys. Rev. Lett **81** (1998)
- [9] T. Kajita *et al.*, “Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande and Kamiokande” Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 77 (1999)
- [10] 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)
- [11] J. Altegoer *et al.*, “THE NOMAD EXPERIMENT AT THE CERN SPS”, CERN-PPE/97-059 (1997).
- [12] K. Nishikawa *et al.*, “Proposal for a Long Baseline Neutrino Oscillation experiment, using KEK-PS and Super-Kamiokande” (1995).
- [13] K. Nishikawa *et al.*, “Status of K2K (KEK to Kamioka long baseline neutrino oscillation experiment)”, Nucl. Phys. B Proc. Suppl.(1999)
- [14] E. Ables *et al.*, “P-875:A Long-baseline Neutrino Oscillation Experiment at Fermilab” (1995).
- [15] K. Kodama *et al.*, “The OPERA ν_τ appearance experiment in the CERN-Gran Sasso neutrino beam” CERN/SPSC 98-25 (1998)
- [16] M. Apollonio *et al.*, Phys. Lett. **B 420**, 397(1998)

- [17] 小浜 光洋, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (1997).
- [18] 稲垣 隆宏, 東京大学理学系研究科修士論文 (1998).
- [19] S. Kasuga *et al.*, Phys. Lett. **B 374**, 238 (1996).
- [20] 梅田 智幸, 岡山大学理学研究科修士論文 (1998).
- [21] 剣持 範, 新潟大学自然科学研究科修士論文 (1998).
- [22] H.Noumi *et al.*, “Precision positioning of SuperKamiokande with GPS for a long-baseline neutrino oscillation experiment” KEK Internal 96-17
- [23] . 越後 慎也, “Status report of SFT”, K2K internal report (1997).
- [24] 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).
- [25] 越後 慎也, 神戸大学大学院自然科学研究科修士論文 (1998).
- [26] 田代 和也, 神戸大学大学院自然科学研究科修士論文 (1998).
- [27] 北村 雅裕, 神戸大学大学院自然科学研究科修士論文 (1999).
- [28] 門脇 徹人, 東京理科大学理工学研究科修士学位論文 (1999).
- [29] H.Park *et al.*, talk presented at INSTR99, Hamamatsu, 1999; “Design, construction, and operation of SciFi tracking detector for K2K experiment”, to be published in special issue of Nucl.Instr. and Meth. **A**.