

つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験に使用する
シンチレーティングファイバー飛跡検出器の製作
および性能評価

神戸大学 自然科学研究科
博士前期課程 物理学専攻
田代 和也

1998年2月10日

概要

つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノビーム源の直後に設置する前置検出器の中で、シンチレーティングファイバーを用いた飛跡検出器を使用する。シンチレーティングファイバーを飛跡検出器として使用するには、ファイバーを多層に精度よく並べてシートの形にする必要がある。具体的には、直径 0.7 mm の円形の断面を持つファイバーを用いて、長さ 370 cm、幅 41 cm の 2 層俵積みのファイバーシートを、240 枚製作しなければならない。

このファイバーシートを効率よく製作するために、我々はファイバーシート製作装置を作成した。この装置は現在順調に稼働しており、1 日 1 枚のペースでファイバーシートを製作できるシステムが完成している。

また、この装置を用いて製作したファイバーシートの性能についての評価も行った。光量、経年変化の測定の結果、15°C 環境下で光量が 90% に劣化する寿命が 3910 ± 1730 日、実験中最も条件の悪いときに得られる光量が 6.72 ± 1.26 p.e. と予測され、このファイバーシートが実験期間中十分使用に耐え得ることが確認できた。さらに、シート中のファイバーの直線性の測定も行い、ファイバーの歪みは中心からファイバー 1 本分以内に収まっていることを確認した。

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	6
1.2 大気ニュートリノ異常	8
1.3 つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験	9
第2章 シンチレーティングファイバー飛跡検出器	12
2.1 前置検出器	12
2.2 シンチレーティングファイバー	15
2.3 シンチレーティングファイバー飛跡検出器	17
第3章 ファイバーシートの製作	19
3.1 ファイバーシート	19
3.2 ファイバーシート製作装置	21
3.2.1 ボビン取り付け部	24
3.2.2 ファイバー引き出し部とテンションコントロール部	24
3.2.3 レーザー寸法測定器	26
3.2.4 ファイバーガイド部	27
3.2.5 ドラム	27
3.2.6 装置の制御	30
3.3 ファイバーシート製作の手順	31
3.3.1 準備	31
3.3.2 ファイバーの巻き取り	32
3.3.3 接着および切断	33
3.4 ファイバーシートの大量生産	33
3.4.1 ファイバーシート製作の環境	34
3.4.2 真空パック	34
3.4.3 大量生産の効率	34
3.4.4 ドラムの変形	36

第4章	ファイバーシートの性能評価	40
4.1	ファイバーシートの光量	40
4.1.1	光量測定	40
4.1.2	光量測定の結果	40
4.2	ファイバーシートの経年変化	41
4.2.1	経年変化の測定	43
4.2.2	経年変化測定の結果	44
4.2.3	検出効率の推算	47
4.3	ファイバーシートの直線性	48
4.3.1	直線性の測定	49
4.3.2	直線性測定の結果	50
第5章	結論	52
	謝辞	53
	参考文献	54

目 次

1.1	カミオカンデ実験が示唆するニュートリノ振動のパラメータ領域	10
1.2	本実験で探索するニュートリノ振動のパラメータ領域	11
2.1	前置検出器の概観	13
2.2	Fine grained detector の概念図	14
2.3	シンチレーティングファイバー	15
2.4	ファイバー内の光の伝搬	16
2.5	シンチレーティングファイバー飛跡検出器の概念図	17
3.1	ファイバーシートの概観	20
3.2	ファイバーシートの断面	20
3.3	ファイバーシートの IIT への接続	21
3.4	シート製作の方法	22
3.5	ファイバーシート製作装置の概観	23
3.6	ボビン取り付け部	24
3.7	パーマトルクの構造	24
3.8	ファイバー引き出し部とテンションコントロール部	25
3.9	レーザー寸法測定器	26
3.10	ファイバーガイド部	28
3.11	ドラム	29
3.12	ファイバーシート製作装置の制御系	30
3.13	ファイバーのドラムへのセット	32
3.14	真空パックの手順	35
3.15	ドラムの測定のセットアップ	37
3.16	ドラム軸のぶれの測定結果	38
3.17	ドラムの真円度の測定結果	39
4.1	ファイバーの光量測定の測定装置	41
4.2	シート製作前後の光量の比較	42
4.3	経年変化測定の保存環境	43
4.4	ファイバーシートの光量測定の測定装置	44
4.5	ファイバーシートの光量の変化	45
4.6	シート製作前後の経年変化の比較	46

4.7	直線性測定の設定アップ	49
4.8	直線性測定の結果	51

表 目 次

1.1	大気ニュートリノ実験の結果	9
3.1	4 軸制御ボードと装置の対応	31
4.1	シート製作前後のファイバーの光量	43
4.2	シート製作前後の寿命の比較	47

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においては、物質は全てクォークとレプトンから構成されていると考えられている。レプトンは、3種類の荷電レプトンと、それに対応した3種類の中性レプトンに分類される。特に3種類の中性レプトンはニュートリノと呼ばれ、他の粒子とは異なる特徴を持つ。その一つは、電氣的に中性であるため、通常弱い相互作用にしか関与しないということであり、もう一つは、対応する荷電レプトンに比べて極端に質量が軽いという点である。

実際、これまでには、実験的にニュートリノの質量を直接測定することはできておらず、以下に示すような質量の上限値しか得られていない。

$$m_{\nu_e} < 15 \text{ eV} [1]$$

$$m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV} [2]$$

$$m_{\nu_\tau} < 24 \text{ MeV} [3]$$

また、素粒子の標準理論においては、その質量は0と仮定されている。しかし、ニュートリノの質量が0であるという理論的根拠は、今のところ特にない。

もし仮にニュートリノが有限の質量を持つことが証明できれば、素粒子の標準理論を超える初めての実験的事実となるだけでなく、宇宙論の分野においてはダークマターの有力な候補としてニュートリノを考えることができるなど、非常に大きな影響を及ぼす発見になると思われる。

1.1.2 ニュートリノ振動

もし、3種のニュートリノが各々異なる有限の質量を持ち、なおかつレプトンの世代間にクォークと類似した混合があるとすれば、3種のニュートリノがお互いに交換し合う現象が起こると考えられる。これをニュートリノ振動という。ニュートリノ振動が起こっているという実験事実が得られれば、ニュートリノが質量を持つことが証明できることになる。

以下、ニュートリノ振動について簡単に説明する。

ここでは、簡単のため、2種のニュートリノ ν_e 、 ν_μ 間の真空中での振動について考える。ニュートリノが弱い相互作用をするときには、その固有状態を ν_e 、 ν_μ と表すことができる。

一方、弱い相互作用のない真空中においては、ニュートリノは質量の固有状態 ν_1 、 ν_2 で表される。

レプトンの世代間の混合の度合いを表すパラメータである混合角を θ とすると、2つの固有状態の関係は、ユニタリ行列 M を用いて次式のように書ける。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad \left(M = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \right) \quad (1.1)$$

シュレディンガー方程式によれば、質量固有状態の時間発展は、エネルギー固有値 E_1 、 E_2 を用いて次式のように表される。

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

この方程式の解は、

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

となる。この式に、式(1.1)を代入すると、

$$\begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} M^{-1} \begin{pmatrix} \nu_e(0) \\ \nu_\mu(0) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

となる。この式から、例えば時刻 0 において発生した ν_μ が、時間 t だけ真空中を進んだ後、 ν_e として観測される確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= \left| \langle \nu_e(t) | \nu_\mu(0) \rangle \right|^2 \\ &= \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} M \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} M^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2 \\ &= \left| (e^{-iE_2 t} - e^{-iE_1 t}) \sin \theta \cos \theta \right|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{E_2 - E_1}{2} t \end{aligned} \quad (1.5)$$

と計算できる。

運動量保存則により、時刻 0、時刻 t それぞれのニュートリノの運動量は等しいので、これを p とすると、相対性理論により、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.6)$$

となる。ただし、ここで $p \gg m_i$ という近似を用いた。この式を式(1.5)に代入すると、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4p} t \quad (1.7)$$

という式が得られる。ここで、 Δm^2 は、 $\Delta m^2 = |m_{\nu_1}^2 - m_{\nu_2}^2|$ で定義される量である。ニュートリノの質量が小さいことから、ニュートリノの飛行距離 $L = t$ 、ニュートリノのエネルギー $E = p$ と考えると、 L 、 E を用いて、

$$\frac{\Delta m^2}{4p} t = \frac{\Delta m^2}{4E} L \quad (1.8)$$

と書き換えることができる。これを式 (1.7) に代入し、 L の単位を km、 E の単位を GeV、 Δm^2 の単位を eV^2 に変換すると、

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

となる。

これが、最初 ν_μ として発生したエネルギー E GeV のニュートリノが、真空中を L km 走行した後、 ν_e として観測される確率を表す式となる。他のニュートリノの世代間の振動についても、同様に計算できる。

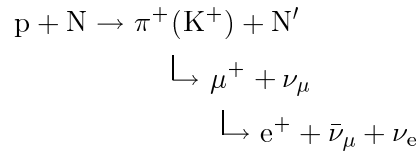
もし、ニュートリノ振動が実験的に観測できれば、観測から得られた振動の確率 P と、その実験の L 、 E の値を式 (1.9) に代入することによって、振動のパラメータ $\sin^2 2\theta$ と Δm^2 の値がとり得る領域が求められる。それによって、ニュートリノの質量の大きさを限定することができる。

1.2 大気ニュートリノ異常

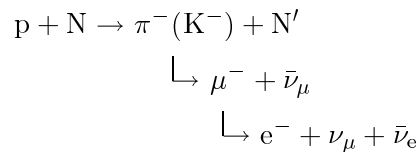
ニュートリノ振動は、理論的に予想されるだけでなく、その存在を示唆する実験事実もあがっている。それは、大気ニュートリノ異常と太陽ニュートリノ欠損である。

ここでは、特に我々の実験の直接的な動機ともなった大気ニュートリノ異常について説明する。

一次宇宙線の主成分である陽子は、大気中の原子核 (N) と反応して、 π 中間子や、K 中間子を発生させる。これらの粒子は、崩壊の過程で $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 、および $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ を放出する。これらのニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶ。宇宙線から大気ニュートリノが発生する過程は、以下のような反応による。



あるいは、



このような反応によって生じた $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ と $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ のフラックスは、一次宇宙線のフラックスの絶対値に左右されるので、厳密に予測することは困難である。しかし、ニュートリノ生成の過程がわかっているため、全大気ニュートリノ中の $\nu_e + \bar{\nu}_e$ と $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ の存在比は、ほぼ2になることが予測できる。

ところが、これまで行われた大気ニュートリノを観測する実験のうちいくつかで、この比が2にならず、 ν_e に対して ν_μ が少ないという結果が出ている。これを大気ニュートリノ異常という。

表 1.1 に、各大気ニュートリノ実験の結果が示されている。表中の実験結果を表す値 R は、次式で定義されている。

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

ここで、添え字 EXP は実際に観測された ν_μ/ν_e 比を、添え字 MC はモンテカルロシミュレーションで得られた ν_μ/ν_e 比であることを表している。この比は、モンテカルロシミュレーションの方法が違っていても、5%程度の精度で一致する。

表 1.1: 大気ニュートリノ実験の結果

実験名	観測時間 [kton.years]	R
NUSEX[4]	0.74	$0.96^{+0.32}_{-0.28}$
Fréjus[5]	2.0	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
SOUNDAN-2[6]	1.52	$0.72 \pm 0.19^{+0.05}_{-0.07}$
IMB-3[7]	7.7	0.54 ± 0.05
Kamiokande-II,III[8]	7.7	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$

表 1.1 から、NUSEX、Fréjus ではシミュレーションとほぼ同じという結果が出ているが、SOUNDAN、IMB、カミオカンデでは明らかにシミュレーションより小さい ν_μ/ν_e 比が得られていることがわかる。

このような観測結果は、 ν_μ が大気中を伝搬する過程で、ニュートリノ振動によって ν_e あるいは ν_τ に変化したためと解釈することができる。特にカミオカンデでは、 R の天頂角依存性が観測されている。この結果がニュートリノ振動によるものと仮定したときの、ニュートリノ振動のパラメータ ($\Delta m^2, \sin^2 2\theta$) の 90% 信頼度での存在領域を、次ページ図 1.1 に示す。

1.3 つくば－神岡間長基線ニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動を、加速器や原子炉で生成されるニュートリノを用いて観測しようとする実験がこれまでいくつか行われた。これらのニュートリノ振動実験は、大きく短基線のものと長基線のものに分類できる。

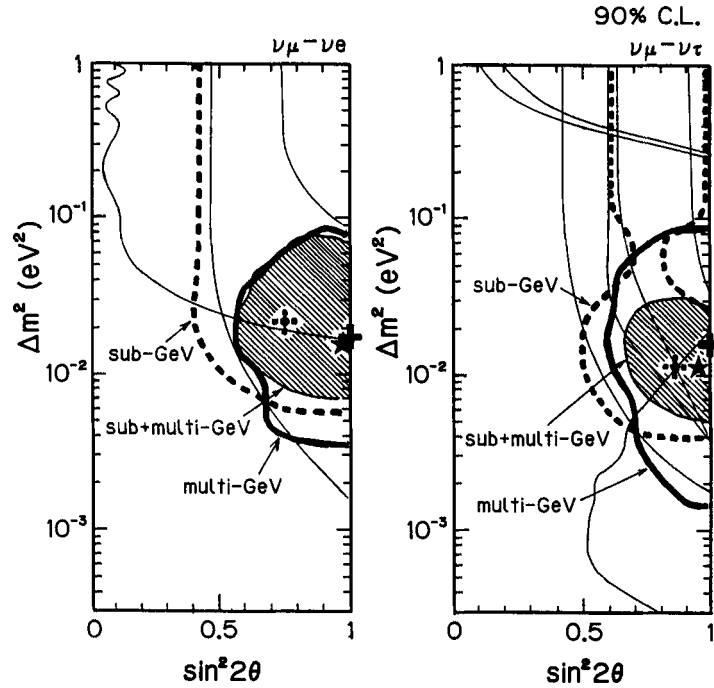


図 1.1: カミオカンデ実験が示唆するニュートリノ振動のパラメータ領域

左図は $\nu_\mu-\nu_e$ 間、右図は $\nu_\mu-\nu_\tau$ 間の振動のパラメータ領域を表している。斜線部が、カミオカンデ II, III 実験の全観測結果に基づく、振動のパラメータが 90% 信頼度でとり得る領域である。

短基線ニュートリノ振動実験は、式 (1.9) の中に含まれる L/E の値が小さいもので、主として振動のパラメータのうち $\sin^2 2\theta$ が小さい領域を探索することができる。長基線ニュートリノ振動実験は、 L/E の値が大きい実験で、主として Δm^2 の小さい領域を探索することが可能である。

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、以下本実験) は、加速器によるニュートリノビームを使った長基線ニュートリノ振動実験である [9]。ニュートリノの平均エネルギーは 1.4 GeV、ニュートリノビーム源から検出器までの距離が 250 km あり、 Δm^2 が $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ eV}^2$ 程度の領域まで探索することができる (次ページ図 1.2)。本実験で探索するニュートリノ振動のパラメータ領域は、カミオカンデで観測された大気ニュートリノ異常がニュートリノ振動によるものと考えた場合のパラメータ領域を含んでいる。そのため、カミオカンデ実験の結果がニュートリノ振動によるものかどうか検証することが可能となる。

本実験の概要は、以下の通りである。

まず、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にある陽子シンクロトロンで、エネ

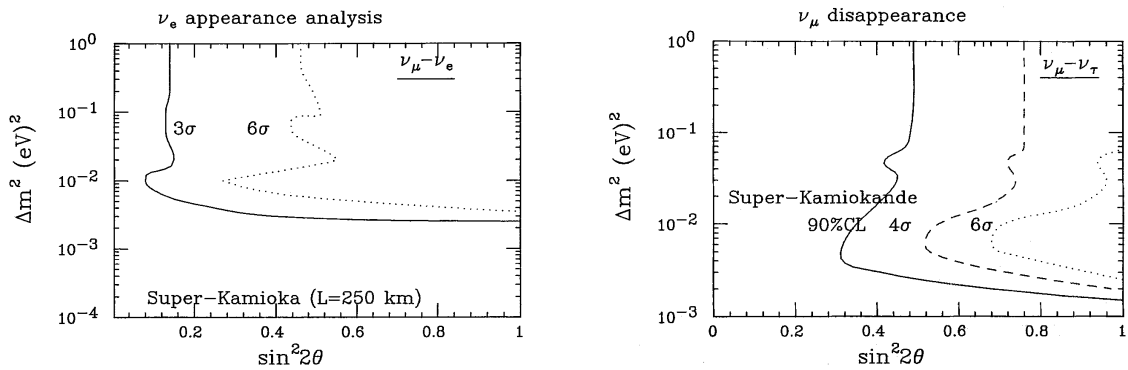


図 1.2: 本実験で探索するニュートリノ振動のパラメータ領域

左図が $\nu_\mu\text{-}\nu_e$ 間、右図が $\nu_\mu\text{-}\nu_\tau$ 間の振動のパラメータ領域を表す。

ルギー 12 GeV の陽子ビームを生成させる。これを、ターゲットのアルミニウムと反応させて、 π 中間子のビームを得る。ターゲットは電磁ホーンと一体になっており、これによって発生した π 中間子のうち π^- は除かれ、 π^+ だけの非常によく向きの揃えられたビームが作られる [10]。この π^+ は、200 m の崩壊領域を走る過程で $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ という反応によって崩壊する。崩壊によって発生した μ^+ は、崩壊領域の最後に設置されたビームダンプによって吸収され、ニュートリノだけがビームダンプを通過する。その結果、向きの揃った平均エネルギー 1.4 GeV の ν_μ のビームが得られる。

ニュートリノのフラックス、およびエネルギースペクトルを測定するため、2つの検出器が用意される。一つは、アルミニウムターゲットから 300 m の地点に設置される前置検出器である。これについては、次章で詳しく説明する。

もう一つは、ニュートリノビーム源から 250 km 離れた岐阜県吉城郡神岡町にある、50 kton の水をターゲットとしたチェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデである。

ニュートリノは、ほとんど物質との反応を起こさずに地中を進む。そのため、ニュートリノ振動が起こらない場合、スーパーカミオカンデで観測されるニュートリノのフラックスは、前置検出器での観測結果から外挿できる。しかし、ニュートリノ振動によって ν_μ が ν_τ もしくは ν_e に変化していれば、スーパーカミオカンデにおいては、前置検出器の測定によって予測されるより少ない ν_μ しか観測できないことになる。特に、ニュートリノ振動の確率はエネルギーに依存するので、両者のエネルギースペクトルを比較すれば、より敏感にニュートリノ振動を探索できる。

第2章 シンチレーティングファイバー飛跡検出器

2.1 前置検出器

前置検出器は、本実験においてアルミニウムターゲットから 300 m 離れた地点に設置され、ニュートリノビームが作られた直後のニュートリノのフラックス、およびエネルギースペクトルを正確に測定するために使用される。前置検出器の概観は、次ページ図 2.1 に示した通りである。

前置検出器は、1 kton の水をターゲットとしたチェレンコフ検出器と、Fine grained detector からなる。

1 kton 水チェレンコフ検出器は、規模は小さいもののスーパーカミオカンデと同様の構造をしており、スーパーカミオカンデのデータと比較する際、検出器の影響による系統誤差を減らすことができる。

Fine grained detector は、ターゲットとして使われる水とシンチレーティングファイバーのサンドイッチ構造による飛跡検出器、鉛ガラスカロリメータ、およびミュオンレンジカウンタから構成されている (14 ページ図 2.2)。

Fine grained detector では、主として次式に示される荷電カレント準弾性散乱によるイベントを観測することを目的としている。

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$$

この反応によって発生した μ^{-} の、ビーム軸に対する角度、およびエネルギーを測定することによって、反応を起こしたニュートリノのエネルギーを決めることができる。その計算式は、次のようなものである。

$$E_{\nu_{\mu}} = \frac{m_n E_{\mu} - m_{\mu}^2/2}{m_n - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$

ここで、 m_n 、 m_{μ} はそれぞれ n、 μ^{-} の質量、 E_{μ} 、 p_{μ} 、 θ_{μ} はそれぞれ測定によって得られた μ^{-} のエネルギー、運動量、生成角である。 μ^{-} の生成角は、ターゲットの水の間に 6 cm 間隔で置かれたシンチレーティングファイバー飛跡検出器によって決定される。また、 μ^{-} のエネルギーは、鉄板とドリフトチェンバーのサンドイッチ構造からなるミュオンレンジカウンタによって測定される。

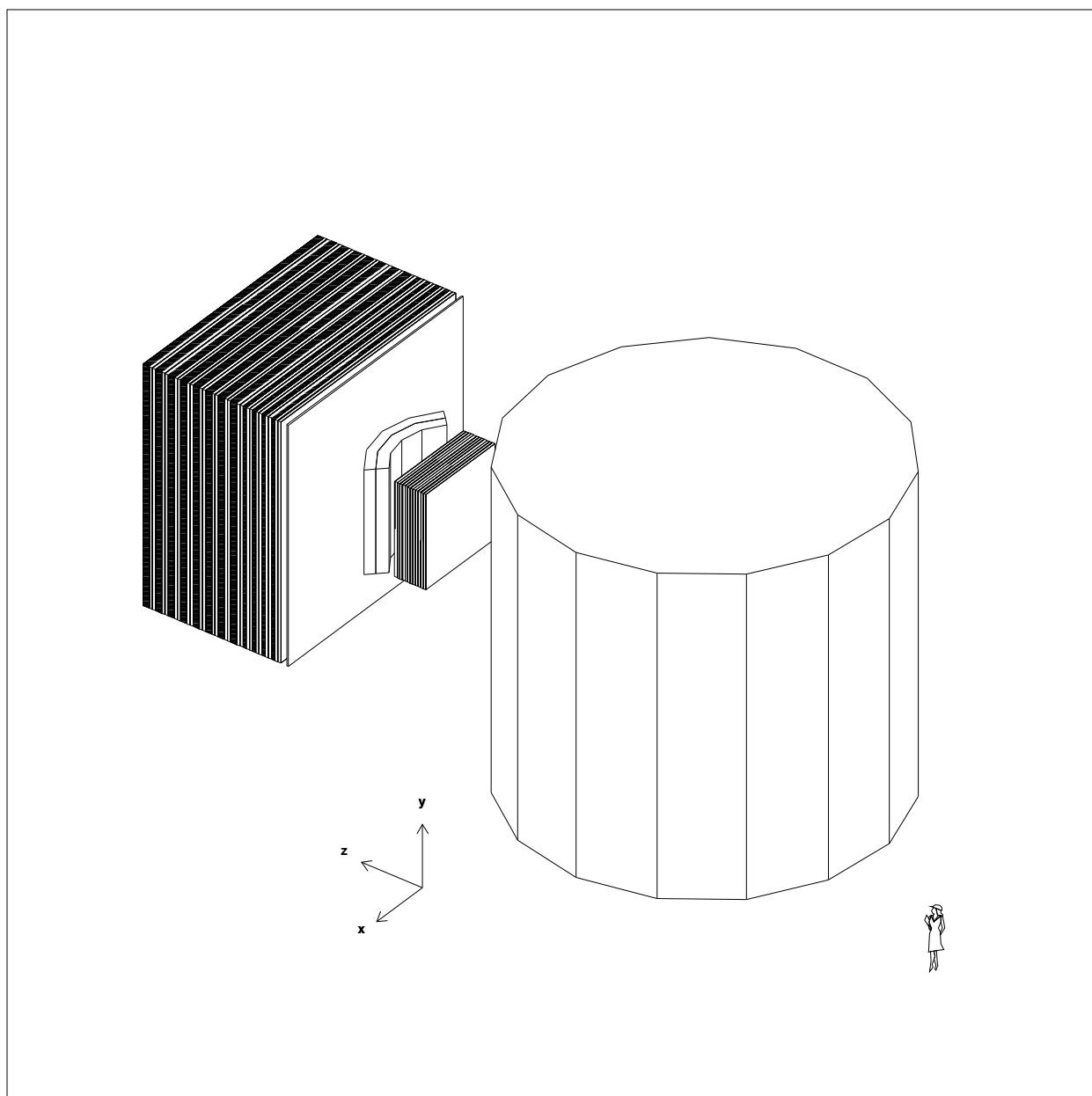


図 2.1: 前置検出器の概観

右側から順に水チェレンコフ検出器、水ターゲット+シンチレーティングファイバー飛跡検出器、鉛ガラスカロリメータ、ミュオンレンジカウンターを表す。ニュートリノビームは図の右下から入射する。

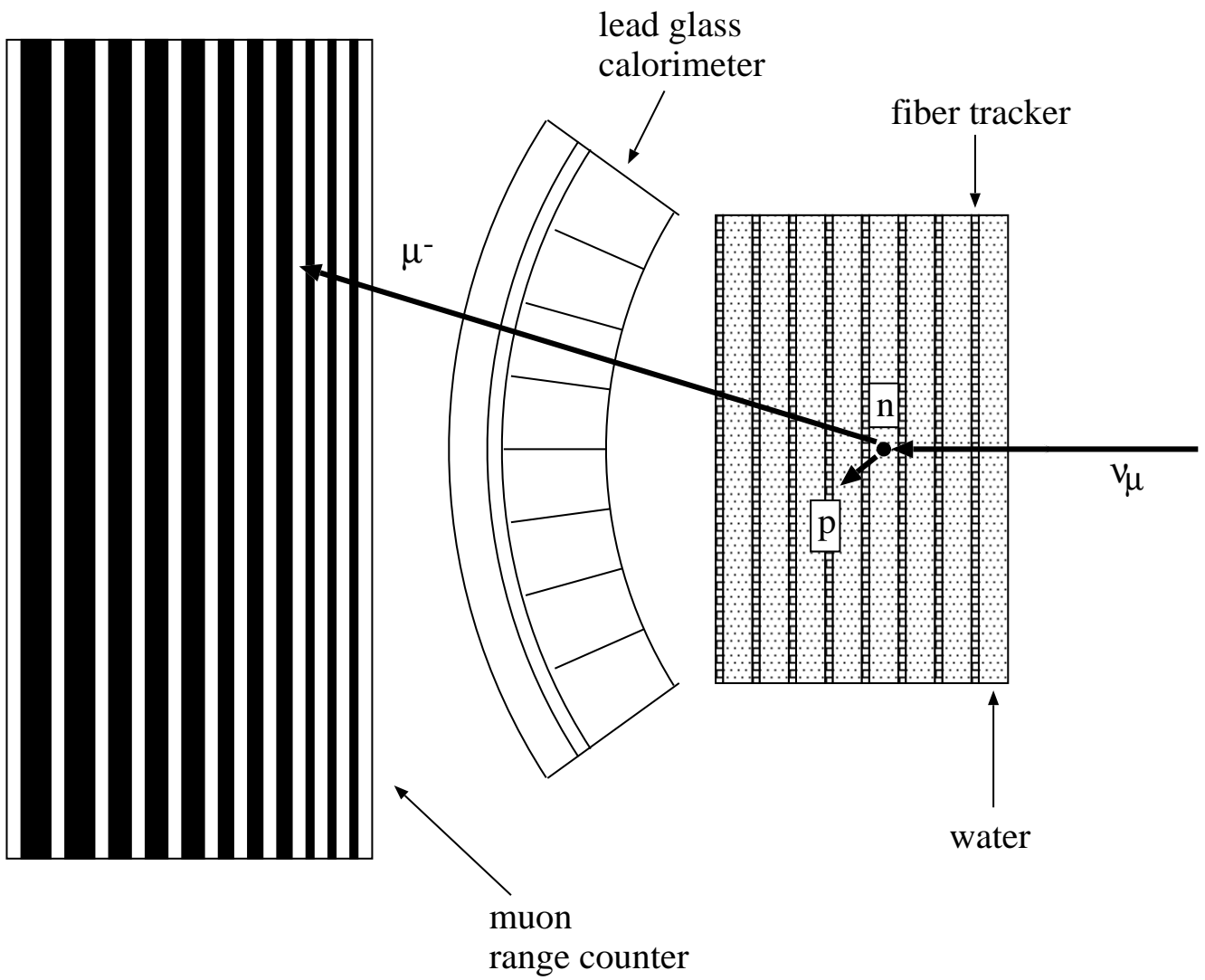


図 2.2: Fine grained detector の概念図

鉛ガラスカロリメータは、電子の同定のために用いられる。これは、 ν_μ ビーム中に混じっている ν_e の割合を、 ν_μ の場合と同じ荷電カレント準弾性散乱を利用して測定するために必要となる。

スーパーカミオカンデは、同じ構造の検出器を使った実験によって電子とミューオンをよく同定できることが既に検証されている [11]。よって、前置検出器でも電子とミューオンを分離することができれば、 ν_μ のフラックスだけでなく、 ν_e のフラックスの比較によってもニュートリノ振動を検証できるのである。もし、前置検出器で測定された ν_e の割合より、スーパーカミオカンデで観測された ν_e の割合の方が多ければ、 ν_μ が ν_e に変化する振動が起きていることが直接的に証明される。

2.2 シンチレーティングファイバー

本実験で飛跡検出器として使用されるシンチレーティングファイバーは、それ自体が発光し、なおかつその光を伝搬しやすい構造をしている蛍光体である (図 2.3)。

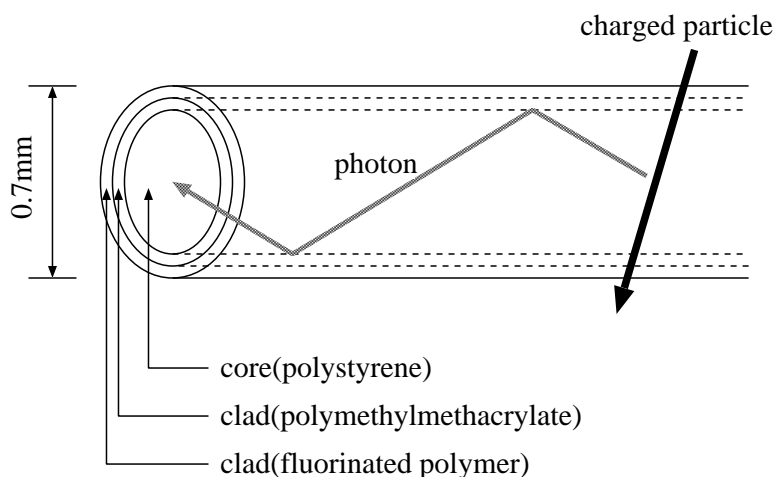


図 2.3: シンチレーティングファイバー (我々の使用する SCSF-78M の例)

シンチレーティングファイバーは、シンチレーション光を発生させる中心部のコアと、それを取り囲むクラッドから構成されている。クラッドに、コアより屈折率の小さい物質を使用することによって、コアとクラッドの境界面で全反射した光がファイバー内を伝搬する。

代表的なプラスチックシンチレーティングファイバーは、コアにポリスチレン (屈折率 1.59)、クラッドにポリメチルメタクリレート (以下 PMMA、屈折率 1.49) が使われている。この場合、ファイバー内で全反射が起こる角度はファイバーの軸方向に対して 20.4 度以内になり、片側だけ考えた場合、発生した光のうち約 3% しかファイバー内を伝搬しない。そのため、伝搬する光量を増やしたり、伝搬効率をよくするため、様々な工夫がなされている。

ポリスチレンは、荷電粒子の通過によって波長 300 nm 付近にピークを持つシンチレーション光を放出する。ポリスチレンには波長変換用の蛍光体が何種類か混ぜられており、ポリスチレン中で発生した光子は、この物質に吸収、再放出されることによって、段階的に伝搬しやすい波長の光に変換される。

クラッドと外部の空気との間の屈折率の違いにより、コア-クラッド間の境界面では全反射しない光が、クラッドと空気の境界面で全反射して伝搬する場合がある。このような伝搬を、コア-クラッド間の全反射による伝搬であるコアモードに対して、クラッドモードという。クラッドモードは、反射、屈折の回数がコアモードに対して多いため、コアモードより早く減衰する(図 2.4)。本実験では、ファイバーを 370 cm という長さで使用する上に、ファイバーをシート状にする際接着剤としてペイントをファイバー表面に塗るので、クラッドモードの光は表面で吸収されてしまいほとんど伝搬しない。そのため、クラッドモードより、コアモードの光量が重要となる。

コアモードの光量を増やすには、クラッドにできる限り屈折率の小さい物質を使用すればよい。そのための方法の一つとして、マルチクラッドと呼ばれるものがある [12]。これは、PMMA にフッ素を混ぜて屈折率を 1.42 にした物質をクラッドとして用いるための方法である。この物質は通常ポリスチレンと接着させにくいので、クラッドを二重にすることにより、PMMA を媒介として接着させるのである。このようにして屈折率の小さな物質をクラッドに使用することによって、コアモードの光量を増やすことができる。

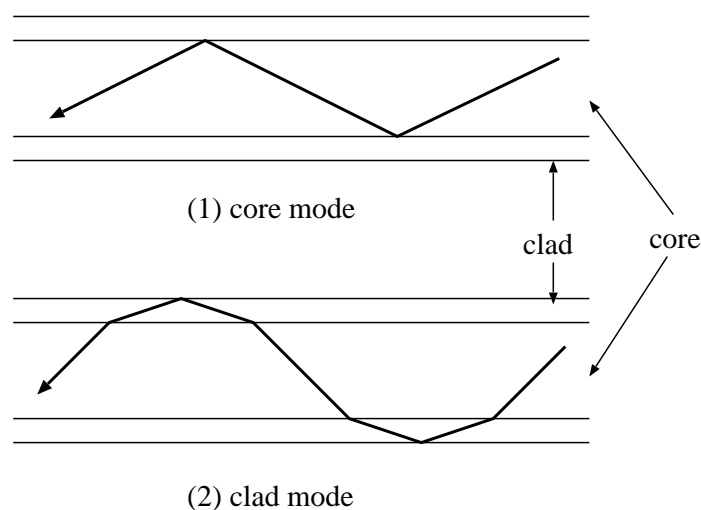


図 2.4: ファイバー内の光の伝搬

本実験では、何種類かのファイバーの特性を試験した結果、クラレ社のマルチクラッドファイバー SCSF-78M を使用することが決まっている [13]。その中でも、我々が使用するのは、経年変化を起こしにくいように改良された SCSF-78M 改良 11 [14] と呼ばれるものである。

また、ファイバーの断面積については、大きいほど光量が大きい、その分信号の読み出しに使用するイメージインテンシファイアチューブ (Image Intensifier Tube、以下 IIT) が多数必要となる。複数のサイズのファイバーを試験した結果、本実験では直径 692 μm の円形

の断面を持つファイバーを使うことが決まっている [13]。

2.3 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を使った飛跡検出器の概念図を図 2.5 に示す。この図には、ファイバー飛跡検出器 1 モジュールと、ターゲットとして使われる水が入った奥行き 6 cm のコンテナの 1 組だけが示されている。実際には、水コンテナと飛跡検出器を交互に 20 層並べて使用する。

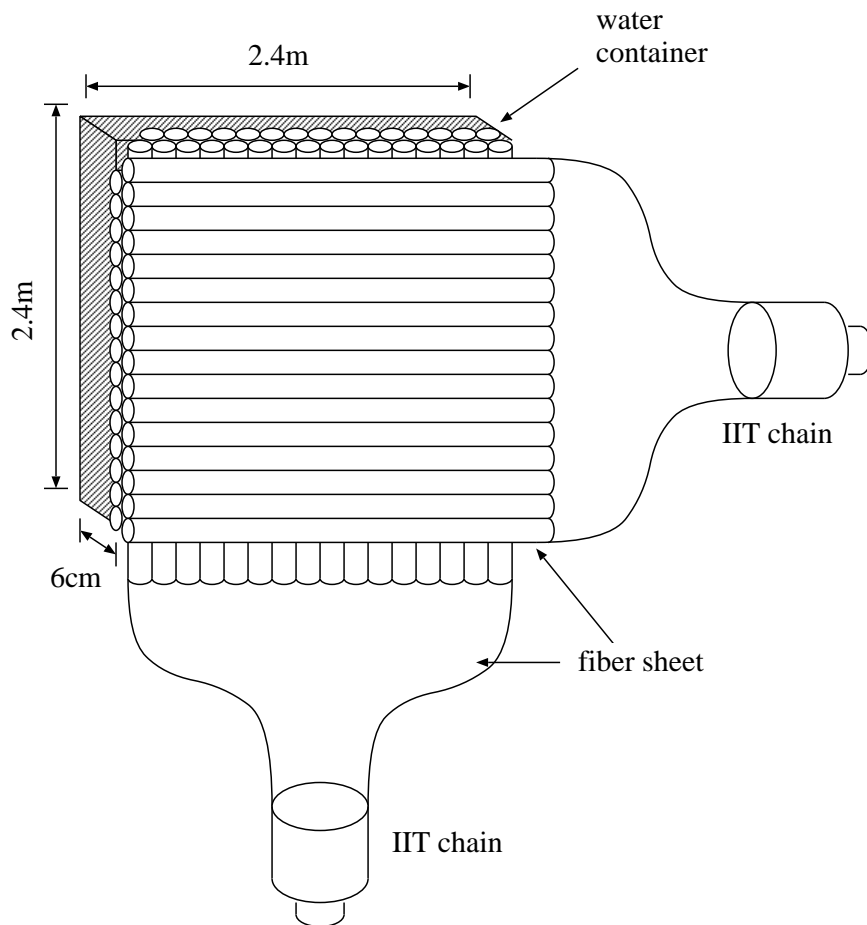


図 2.5: シンチレーティングファイバー飛跡検出器の概念図

シンチレーティングファイバーは、シート状にして使用する。ファイバーを幅 2.4 m の大きさに並べたファイバーシートを用意し、それをファイバーの向きが直交するように 2 枚重ねて 1 モジュールとすることによって、ファイバーシートの面を通過した荷電粒子の、x 方向、y 方向それぞれの位置を検出する。

シンチレーティングファイバーを飛跡検出に用いるには、ファイバーシート中のどのファイバーが発光したかを、正確に決定する必要がある。そのため、ファイバーから伝搬した光の読み出しには、イメージンテンシファイアチューブを2段重ねたIITチェーンを使用する。

IITチェーンは、静電型¹とMCP型²の2種のIIT、光学レンズ、CCDカメラからなる。その光電面は直径10cmの円形をしており、光電面に入射したファイバーからの光は、その位置情報を保存したまま増幅される。

2段のIITによって増幅された光は、最終的にCCDカメラで光の強度と位置の情報として読みとられ、そのビデオ信号はフラッシュADCモジュールによってデジタル化される。

このようにして、ファイバーを通過した μ^- の位置を検出することによって、水中の核子と反応して発生した μ^- の飛跡を決定することができる。

¹電子を1回だけ加速するIIT

²Micro Channel Plateを用いて電子のエネルギーだけでなく数も増倍させるIIT

第3章 ファイバーシートの製作

3.1 ファイバーシート

本実験で必要となるシンチレーティングファイバー飛跡検出器の大きさは、検出器部分だけで、ビーム軸に対し垂直な面が 2.4 m×2.4 m になる。

現実にはこの大きさの 1 枚のシートを作るのは困難なので、我々は幅 40 cm のシートを 6 枚並べて使うことによって、幅 2.4 m のシートを実現する。6 枚のシートは、2.6 m×2.6 m の大きさのハニカムパネルに並べて貼りつけて使用する。この方法を採用すると、本実験のために必要な幅 40 cm のシートの数は、全部で 240 枚になる。

$$6(\text{subsheets/sheet}) \times 2(X, Y) \times 20(\text{modules}) = 240$$

1 枚のシートは、長さ 260 cm の検出器部分、長さ 80 cm のライトガイド部分、および長さ 30 cm のバンドル部分からなる。ライトガイド部分は IIT の光電面まで光を伝搬するため、バンドル部分は光電面のサイズに合わせてファイバーをまとめるために必要となる。また、ファイバーシートの両サイドは傷つきやすいので、幅を 1 cm 大きめにしておき、ハニカムパネルに貼りつける直前にその分を割いて取り除くことにする。したがって、我々が製作するファイバーシートは、次ページ図 3.1 に示されるような長さ 370 cm、幅 41 cm のサイズのものになる。

本実験で使用するファイバーの断面は円形であり、これをただ単に並べてシート化しても、荷電粒子を検出する効率は非常に悪く、また通過した位置によって検出効率が大きく変化してしまう。そこで、ファイバーシートは多層化して使う必要がある。多層化する際には、最も高い密度で並べる方法として俵積みと算盤積みの 2 つが考えられるが、我々は次ページ図 3.2 に示されるような 2 層俵積みの形を採用した。

検出器部分とバンドル部分は、接着剤を塗ることによってファイバーを接着する。使用する接着剤としては、最初 CHORUS 実験で実績のあったアクリルペイント [15] を考えたが、マルチクラッドファイバーの場合には、表面のフッ化ポリマーに塗りにくいという問題がある。そこで、アクリルペイントと同様に適度な接着力、硬化時間、ファイバーに対して非活性であるなどの条件を満たし、フッ化ポリマーとも相性の良いシリコン系のペイントを使用することにした。その中でも、わずかながら発生した直後に外部に逃げようとする光子を反射できることから、白色のシリコンペイントを選択した。

検出器部分とバンドル部分の間のライトガイド部分は、接着せずに 1 本 1 本バラバラのままにしておくことによって、自由に曲げられるようにした。これによって、21 ページ図 3.3 のようにバンドル部分を IIT の光電面に合わせた形にまとめることができ、少ない本数の IIT で全てのファイバーをカバーすることができる。

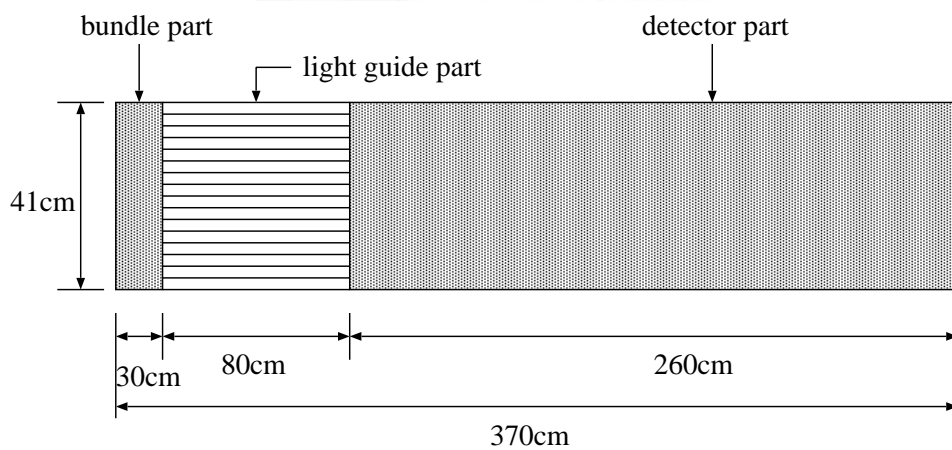


図 3.1: ファイバーシートの概観

■ はペイント部分を表す。

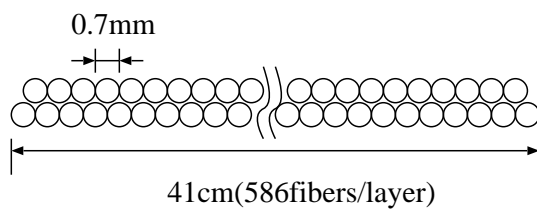


図 3.2: ファイバーシートの断面 (2層俵積み)

本実験では、直径 10 cm の円形の光電面を持つ IIT を用いて、幅 40 cm のシート 10 枚、ファイバーの本数にして約 11400 本分の信号を読み出すことになっている。この場合、ファイバーシートが全部で 240 枚なので、24 本の IIT チェーンが必要となる。

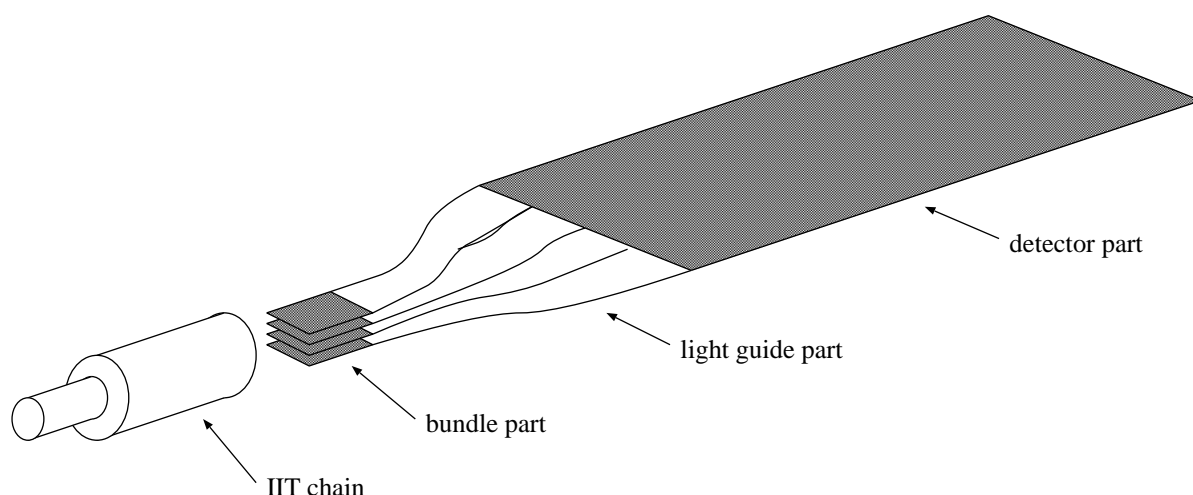


図 3.3: ファイバーシートの IIT への接続

3.2 ファイバーシート製作装置

前節で示したように、本実験では高精度のファイバーシートが大量に必要となる。これを、我々は以下に示すような方法で製作することにした (次ページ図 3.4)。この方法は、名古屋大学 F 研究室で CHORUS 実験用に開発されたシステムを参考にしたものである [12][15]。

まず、ファイバー径に合わせたピッチの溝が彫られた直径 1.2m のドラムを用意する。そして、この溝に沿ってファイバーを 586 周分巻きつけて、ペイントを塗って接着させる。

我々が必要とするのは 2 層のシートなので、接着させたファイバーの上からもう 1 層分のファイバーを巻きつけ、再びペイントを塗って接着させる。

ペイントが十分に乾いたら、ファイバーに垂直な方向にシートを切断し、ドラムからはがす。そして最後に、シートのドラムに接していた面にもペイントを塗る。

これで、1 枚のシートが完成する。

このような方法でファイバーシートを製作するため、我々はファイバーシート製作装置を作成した。

ファイバーは、クラレ社からボビンに巻かれた形で出荷される。ファイバーシート製作装置は、このボビンからファイバーを引き出し、溝付きのドラムに巻きつけていく装置である (23 ページ図 3.5)。

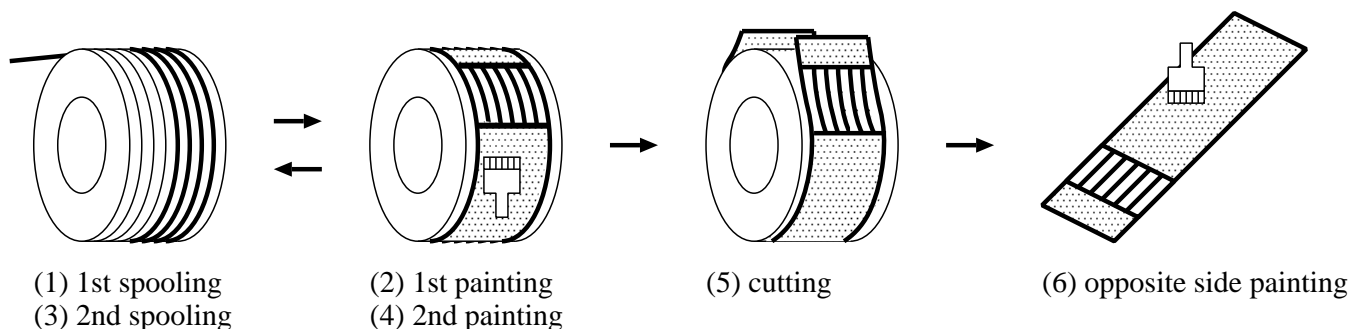


図 3.4: シート製作の方法

ファイバーシート製作装置は、ポビン取り付け部 (図 3.5(a))、ファイバー引き出し部 (図 3.5(b))、テンションコントロール部 (図 3.5(c))、ファイバー径測定部 (図 3.5(d))、ファイバーガイド部 (図 3.5(e))、そしてドラム (図 3.5(f)) からなる。

実際にシートを製作するときには、ポビン取り付け部にファイバーが巻かれたポビンを取り付ける。ポビンに巻かれているファイバーは、ファイバー引き出し部で引き出され、テンションコントロール部で一定の張力を与えられる。

ファイバーに一定の張力を与えるのは、ドラムに巻きつけた形で接着したファイバーを、ドラムからはがした後、平らなシートの形にする必要があるためである。普通にファイバーをドラムに巻きつけて接着した場合、ドラムからはがしてもファイバーはドラムの形状を保ったまま固定されてしまい、平坦な形にならない。そこで、ファイバーに常に一定の張力をかけながらドラムに巻きつけ、さらに 2 層めのファイバーにかかる張力を、1 層めに対して強めにする。すると、平らにしたときに 1 層めと 2 層めのファイバーの長さが同じになり、シートが平坦な形になるのである。

我々は、ファイバーにかかる張力を決定するため、 $0.7\text{ mm}\phi$ の断面を持つファイバーを用いてヤング率の測定を行い、 $3.1 \times 10^{10}\text{ dyne/cm}^2$ という値を得た。直径 1.2 m のドラムに断面 $0.7\text{ mm}\phi$ のファイバーを巻きつける場合、1 層めと 2 層めで周長に 4.4 mm の差があるので、その分の伸びを生じさせることができる張力を計算すると、 140 gw となる。実際のシート製作の際には、1 層めを巻くときにも張力をかけてファイバーを引っ張る必要があるため、1 層めに約 150 gw 、2 層めに約 300 gw の張力を与えることにした。

こうして一定の張力を与えられたファイバーは、ファイバー径測定部で直径の値をチェックされ、ファイバーガイド部で常にドラムの溝に沿って巻きつけられるように誘導される。そして最終的に、ファイバー径に合わせた溝を持つドラムに巻きつけられていくのである。

以下、装置の各部について詳しく解説する。

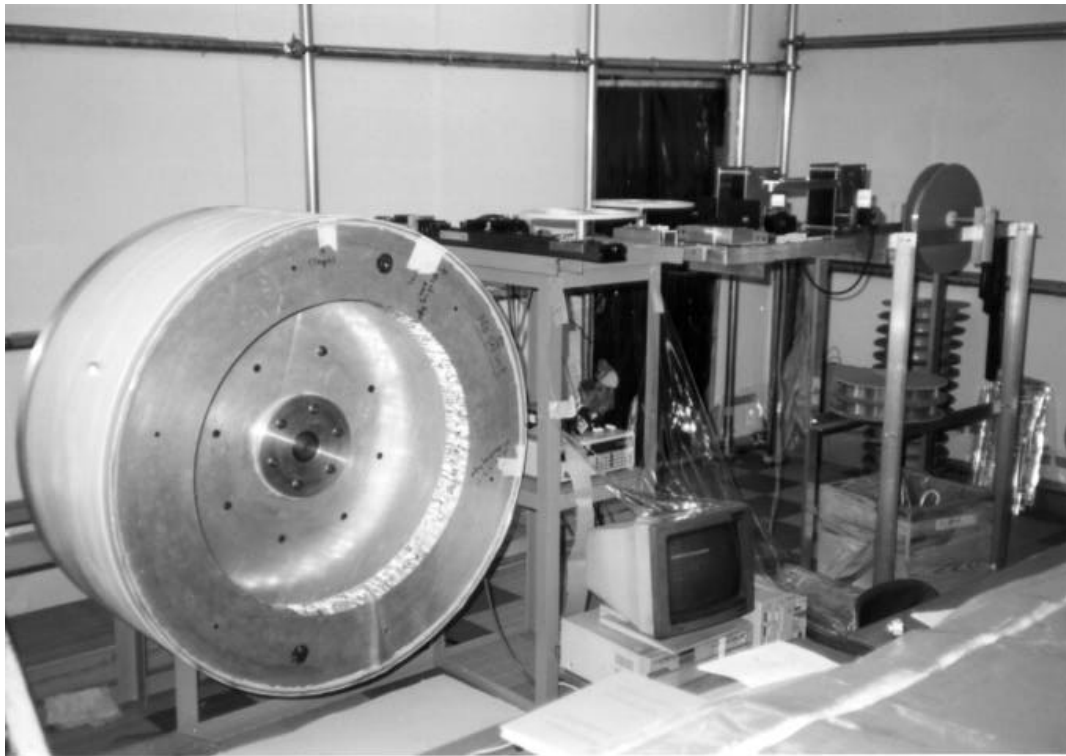
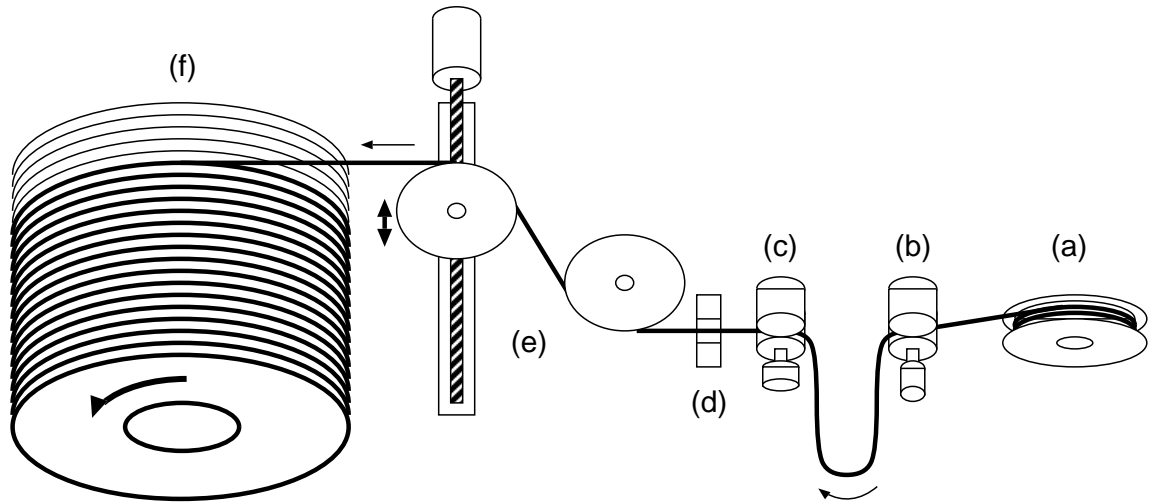


図 3.5: ファイバーシート製作装置の概観

3.2.1 ボビン取り付け部

クラレ社から出荷されるファイバーは、直径 40 cm、幅 6 cm のボビンに巻かれている。1 つのボビンに巻かれているファイバーは、全長 2.6~3.5 km 程度である。

これを直径 2.5 cm の軸に通して、自由に回転でき、なおかつ左右にずれないように装置に取り付ける (図 3.6)。

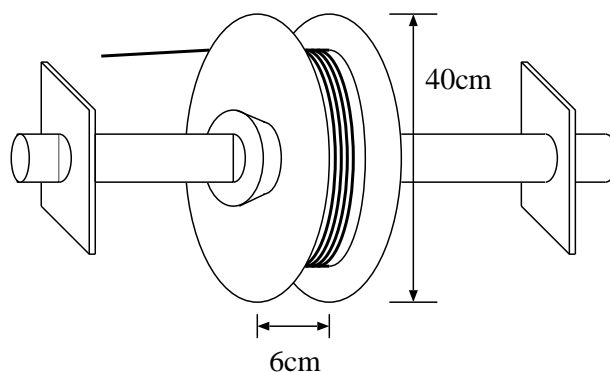


図 3.6: ボビン取り付け部

3.2.2 ファイバー引き出し部とテンションコントロール部

ファイバーにかかる張力の制御は、一定の回転トルクを発生させる受動的な素子 (商品名 パーマトルク) を用いて行う。

パーマトルクは、2 枚のマグネットと 1 枚のディスクからなる装置である (図 3.7)。ディスクはシャフトに固定されており、このシャフトを外部の装置の軸と接続する。ディスクが回転すると、2 枚のマグネットの間の磁力線がディスクの回転を妨げる力を発生させる。この抵抗力により、ファイバーの張力を制御することが可能になる。

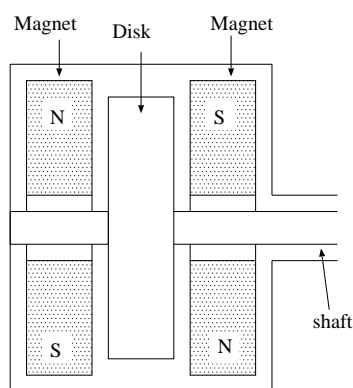


図 3.7: パーマトルクの構造

また、我々が実際にファイバーシートを作る際には、1層めと2層めのファイバーにかかる張力を変える必要がある。パーマトルクのディスクにかかる抵抗は、マグネットの磁極の相対位置により変化するので、マグネットの片方を回転させることによって、簡単にファイバーにかかる張力を変更することができる。

しかし、たとえテンションコントロール部で一定の張力を生成したとしても、ボビンからファイバーを引き出す際に抵抗があると、その分ファイバーに余計な力がかかってしまい、張力を一定に保つことはできない。そのため、ボビンとテンションコントロール部の間にファイバー引き出し部を用意して、ボビンからのファイバーの引き出しを担当させ、ファイバー引き出し部とテンションコントロール部の間のファイバーは常にたるませて余分な力がかかっていない状態にするような制御が必要となる。

ファイバー引き出し部、およびテンションコントロール部の構成は、図 3.8 に示した通りである。

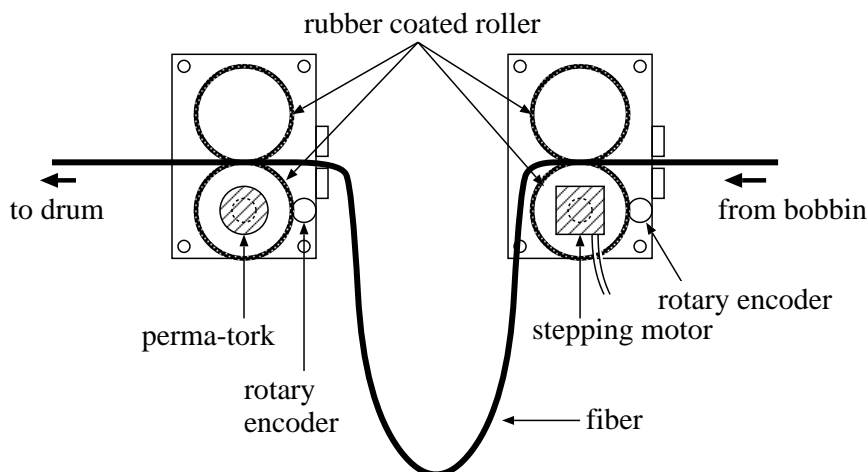


図 3.8: ファイバー引き出し部とテンションコントロール部

これは横から見た図である。右側がファイバー引き出し部、左側がテンションコントロール部。

ファイバー引き出し部は、2台のゴムローラー、およびステッピングモーターとロータリーエンコーダからなる。

2台のゴムローラーは、直径10 cm、幅6 cmのアルミニウムで作られた中空の円筒の側面に、薄いゴムをコーティングしたものであり、この2台のローラーを上下に並べてその間にファイバーを通す。下側のローラーにはステッピングモーターが接続されており、このステッピングモーターを駆動することによってファイバーをボビンから引き出す。また、ゴムローラーにはロータリーエンコーダが接触しており、このロータリーエンコーダを介してローラーの回転数をコンピュータで読みとれるようになっている。

テンションコントロール部も、ファイバー引き出し部とほぼ同様の構成をしている。ファイバー引き出し部と全く同じゴムローラーを上下に並べ、下側のローラーにはロータリーエンコーダを接触させる。ただし、ステッピングモーターの代わりに、下側のゴムローラーにパーマトルクを接続し、これによってファイバーにかかる張力を制御している。

それぞれの装置のロータリーエンコーダからの出力を読みとり、常に両者の回転数が同じになるように引き出し用のステッピングモーターを制御することによって、装置の運転中ファイバー引き出し部とテンションコントロール部の間のファイバーをたるませておくことが可能となる。

3.2.3 レーザー寸法測定器

ファイバーの直径の平均値は、 $692\mu\text{m}$ である。しかし、実際に出荷されるファイバーの径は必ずしも均一ではなく、平均値から大きくずれる部分もある。そのような部分がシートの中に入ると、シートに隙間ができたり、ファイバーが蛇行したりして、機械的精度が悪くなる。また、光量の伝搬効率も悪くなる。

そこで、ファイバーを巻きながら常に直径をモニターし、異常があった場合、一旦装置を停止してその部分を取り除くようにした。

ファイバーの直径を調べるために、レーザー寸法測定器をテンションコントロール部とファイバーガイド部の間に設置した。レーザー寸法測定器は、レーザー光線を回転鏡(ポリゴンミラー)とレンズを用いて平行にスキャンし、測定する物体に照射する装置である。照射されたレーザー光線は受光レンズで集光され、その光が遮断される時間によって、物体の大きさを測ることができる(図3.9)。

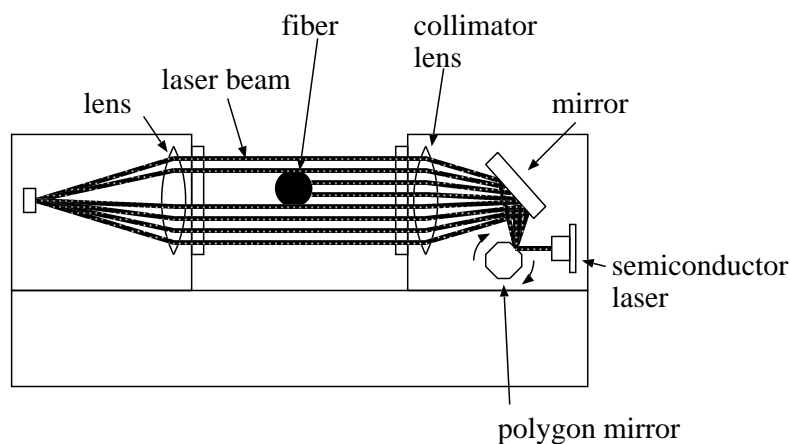


図 3.9: レーザー寸法測定器

レーザー寸法測定器の分解能は $0.1\mu\text{m}$ で、ファイバーの直径に対して十分な精度がある。測定は 2.5ms に 1 回の頻度で行われ、64 回の測定の平均値が出力される。装置が最高速度のとき、ファイバーは約 1m/s のスピードで送られるので、64 回のサンプリングの間に約

16 cm 進むことになる。ただし、データ自体は 20 ms ごとに更新されるので、約 2 cm 間隔で、その地点までの約 16 cm の平均を測定値として出力する。

この出力された測定値をチェックし、 $692\ \mu\text{m}$ に対して $\pm 18\ \mu\text{m}$ 以上ずれている場合、その部分のファイバーを取り除くことにした。

3.2.4 ファイバーガイド部

ファイバーガイド部は、ファイバーをガイドする 2 つのテフロン製のプーリーとリニアアクチュエータ、およびリニアアクチュエータを駆動するためのステッピングモーターからなる (次ページ図 3.10)。

プーリーは、ファイバーをひっかけられるように側面に溝が作られており、自由に回転できるようにそれぞれの台に取り付けられている。2 つのプーリーのうち、上流側のプーリーはレーザー寸法測定器の直後に固定されており、下流側のプーリーはリニアアクチュエータに取り付けられていて、ステッピングモーターによって直線上を動くようになっている。下流側のプーリーをドラムに同期した速度で動かすことで、ファイバーをドラムの溝に正確に誘導することができる。

ドラムにファイバーを誘導し、幅 40 cm のシートを作るためには、ファイバーガイド部でファイバーを曲げる必要がある。しかし、ファイバーは大きな曲率で曲がるとクラッドが破壊されてしまう。そのため、プーリーは直径 30 cm という十分大きなサイズにしてある。また、ファイバーの張力を一定に保つため、できるだけ低いトルクでプーリーが加減速できるように、穴をあけることによって慣性モーメントを小さくしている。

ステッピングモーターは、ドラムが 1 回転するごとに 0.07 回転するように設定されている。リニアアクチュエータは、1 回転するごとに 10 mm 進むので、モーター 0.07 回転に対してプーリーが $700\ \mu\text{m}$ 進み、 $700\ \mu\text{m}$ のピッチで作られているドラムの溝に正確にファイバーをガイドすることができる。また、ステッピングモーターの動作を正確に把握するため、モーターにはロータリーエンコーダが接続されている。

3.2.5 ドラム

ドラムは、直径 120 cm、幅 55 cm の円筒形をしている (29 ページ図 3.11)。

このドラムは、厚さ 8 mm、幅 55 cm のアルミニウムを円形に丸めてパイプ状にして作られており、このアルミパイプの真円度を保つため、3 枚の円形のハニカム板で内側から支えている。ドラムの表面には、ファイバーの直径に合わせて、ピッチ $700\ \mu\text{m}$ 、深さ $200\ \mu\text{m}$ の溝が螺旋状に彫られている。これは最初から最後まで一定のピッチの一本の溝で、これに沿ってファイバーをドラムに巻きつけることによって、精度よく並べることができる。

ドラムは、直径 7 cm、長さ 85 cm のドラム軸によって支えられている。ドラム軸は、タイミングベルトと 2 つの歯車を通じて AC サーボモーターと接続しており、コンピュータ制御によって回転するようになっている。

ドラムは極力慣性モーメントが小さくなるように設計されているが、それでも加減速を行う

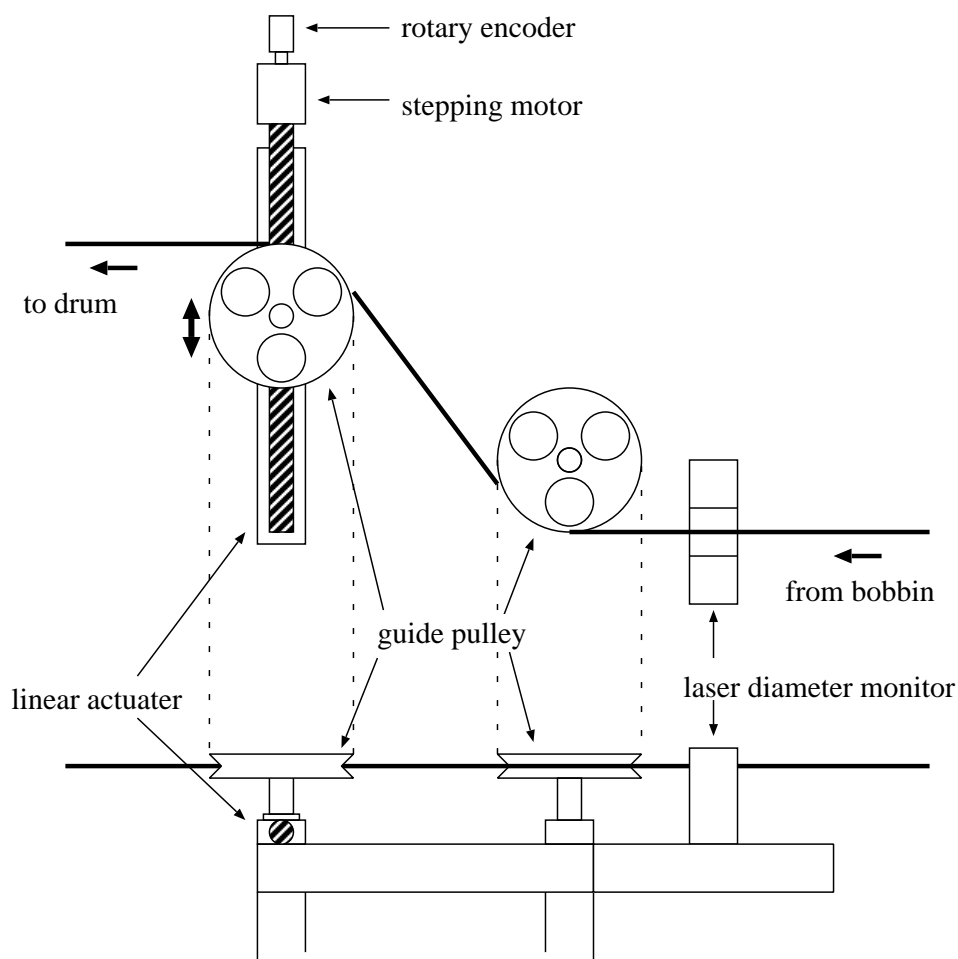


図 3.10: ファイバーガイド部

上図は平面図、下図は側面図である。

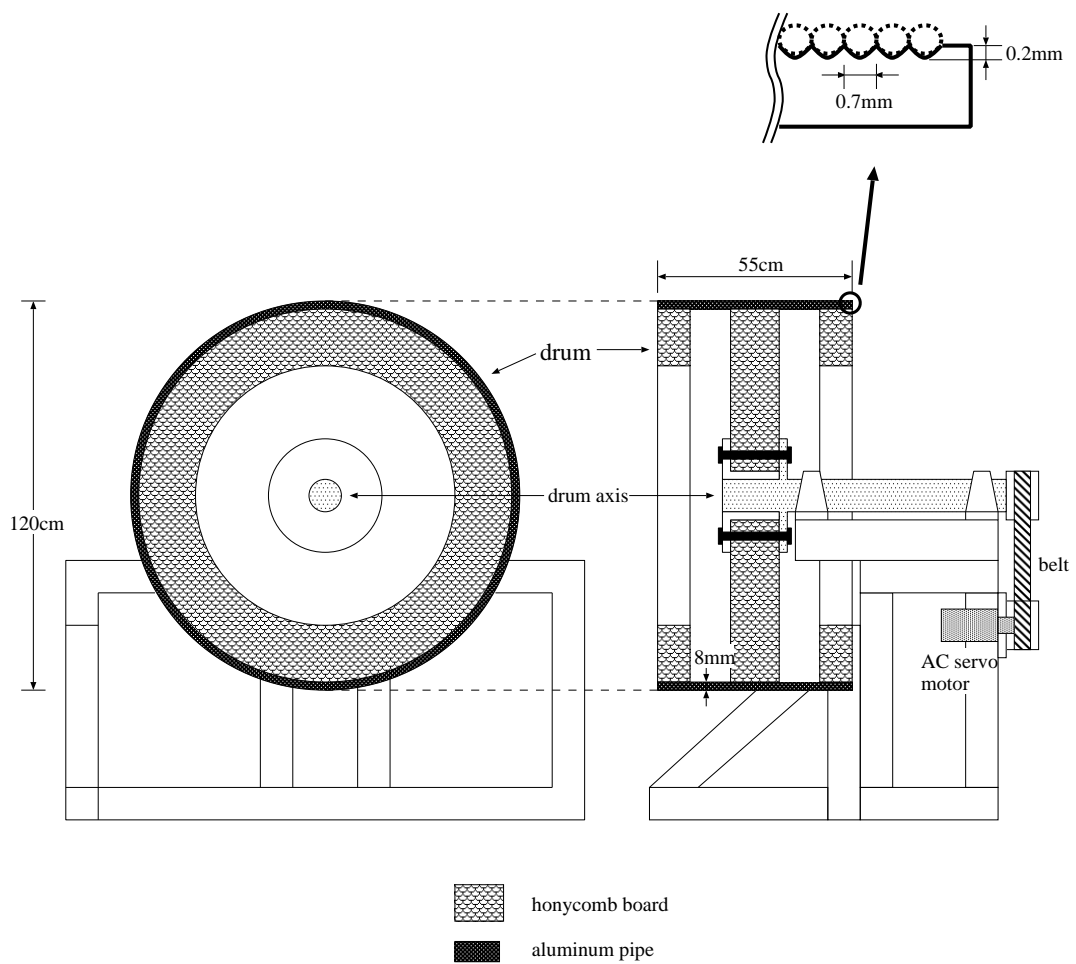


図 3.11: ドラム

左は側面図、右はドラム軸を含む面で切った断面図である。右上の図は、ドラム表面の溝を表している。

には非常に大きなトルクが必要となる。この装置の場合、 $0.6\text{ N}\cdot\text{m}$ の定格トルクを持つモーターにギア比 1:50 のギアヘッドを取り付けて使用している。

3.2.6 装置の制御

装置全体の制御は、パーソナルコンピュータを用いて行う。コンピュータには、外部とのデータのやりとりのため、2枚のインターフェースボードを取り付けてある (図 3.12)。

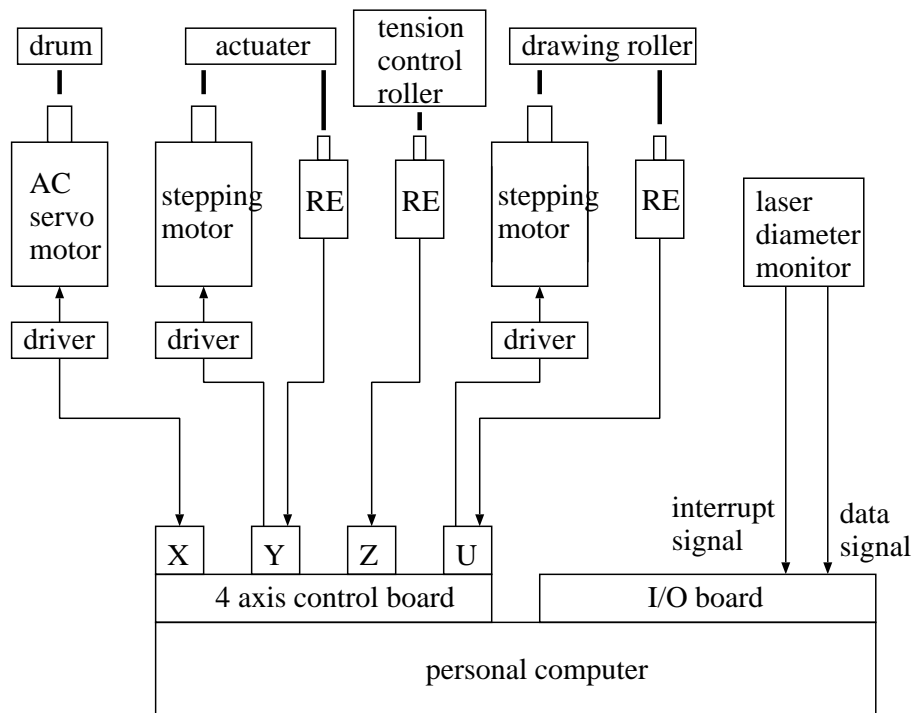


図 3.12: ファイバーシート製作装置の制御系

“RE” は、ロータリーエンコーダを表す。また、矢印はデータの流れを表している。

1枚は、モーターの動作を管理するための4軸制御ボードである。これによって制御する各装置は、次ページ表 3.1 の通りである。

使用する3つのモーターは全てパルス制御が可能で、制御ボードから TTLレベルの信号を出力することによってモーターを回転させる。また、3つのロータリーエンコーダ、および ACサーボモーター内のエンコーダからの出力を読みとることによって、4軸の位置を常にモニターすることが可能である。ここから読みとったデータを元に、ドラムに同期したリニアアクチュエータの動作、および常にファイバーにたるみを作るための引き出し用モーターの制御を実現している。

もうひとつのインターフェースボードは、レーザー寸法測定器からのデータを読み込むた

表 3.1: 4 軸制御ボードと装置の対応

X 軸	ドラム用 AC サーボモーター (ロータリーエンコーダ内蔵)
Y 軸	リニアアクチュエータ用ステッピングモーター リニアアクチュエータ用ロータリーエンコーダ
Z 軸	テンションコントロールローラー用ロータリーエンコーダ
U 軸	ファイバー引き出しローラー用ステッピングモーター ファイバー引き出しローラー用ロータリーエンコーダ

めのバイナリデータ入出力用ボードである。

レーザー寸法測定器は、常時ファイバーの直径をモニターし、20 ms おきに測定データを更新する。そして、新しいデータが出力される際、データが更新されたことを知らせるパルス信号を出力する。このパルス信号は、入出力ボードに合わせた形にするためインバータで変換された後、ボードに入力される。

入出力ボードはこの信号をハードウェア割り込みとして処理するので、コンピュータはこのパルス信号の入力によって装置の制御の処理を一時中断する。そして、BCD 形式¹で出力されるファイバー径のデータを割り込みルーチンで処理し、ファイバー径に異常があれば自動的に装置を停止する。

装置全体の制御のため、C 言語を用いて制御プログラムを作成した。このプログラムによって、ロータリーエンコーダからのデータの読み込みとそれに応じたモーター制御、レーザー寸法測定器からのデータ出力による割り込み処理、キーボードからの入力による装置の運転と装置の状態のディスプレイ表示などを実現している。

3.3 ファイバーシート製作の手順

次に、具体的に装置を使ってファイバーシートを製作する手順を示す。

3.3.1 準備

まず、ドラムの溝に垂直な方向に、両面テープを貼る。これは、ドラムに巻きつけるファイバーを1周ごとにドラムに仮どめするためである。これによって、ファイバー径の異常などで装置を停止したとき、巻いている途中のファイバーを切断することができ、取り除くファイバーを両面テープの部分からドラム1周か2周分の量に抑えることができる。さらに、シートを巻き終えた後、この両面テープの位置で切断して両端の部分を捨てるようにすれば、シートの中にテープやファイバーの継ぎ目が残らず、巻く途中でファイバーを切断しても問題に

¹Binary Coded Decimal(10 進数 1 桁を 2 進数 4 桁で表すデータ形式) の略

ならない。

続いて、パーマトルクを1層めのファイバーにかかる張力に合わせて調整し、あらかじめガイドの原点に合わせて決められているドラム上のファイバーのスタート位置に、ファイバーをセットする(図 3.13)。

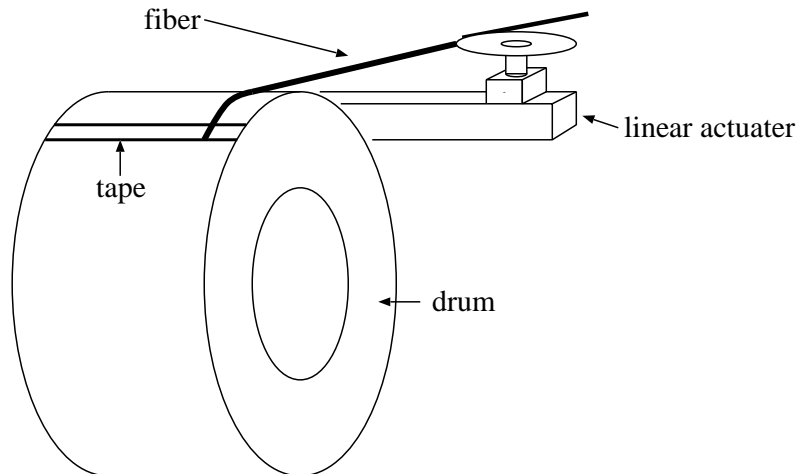


図 3.13: ファイバーのドラムへのセット

3.3.2 ファイバーの巻き取り

コンピュータを操作して装置をスタートさせると、ドラムが一定スピードで回転し始める。

それと同時に、リニアアクチュエータ、ファイバー引き出し用モーターが連動して、一定の張力でファイバーをドラムに巻きつけていく。

装置の運転中は、キー入力によってドラムの回転スピードを調節することができる。また、テンションコントロール部では、ゴムローラーが完全に同期していても、ゴムローラー前後のファイバーの張力の違いによって徐々にたるみの量は変化してしまう。そこで、常に1名がたるみの量を監視し、キー操作によって適当な頻度でファイバーのたるみを調節する必要がある。

特に問題が発生しなければ、このままドラムが586周して41 cm分のファイバーが巻かれるまで、装置を運転し続ければよい。しかし、実際には以下にあげるような要因のため、途中で運転を停止させる必要がある。

- レーザー寸法測定器がファイバー径の異常を検出すると、自動的に装置が停止する。このときは、その部分のファイバーを手作業で取り除く必要がある。
- ボビンに巻かれているファイバーを全て使い切ると、レーザー寸法測定器の測定範囲にファイバーがなくなるので、自動的に装置が停止する。このときは、使い切ったボビンを新しいボビンに交換して再開する。

- ファイバーガイド部がうまくファイバーを誘導できずに、ファイバーが誤った溝に乗ってしまうことがある。その場合、すぐにキー操作によって装置を停止させ、ずれた箇所の直前の両面テープの位置まで戻り、ファイバーをセットし直して装置を再スタートさせる。
- ボビンに巻かれているファイバーが絡まって、うまく引き出せずに切れてしまう場合がある。そのようなときには、装置が自動的に停止するので、絡まっている部分を取り除き、スムーズにファイバーが引き出されるようになってから巻き取りを再開しなければならない。

ドラムが 586 周して、ファイバーが 41 cm 分巻きつけられると、装置は自動的に停止する。

3.3.3 接着および切断

1 層分のファイバーを巻き終えたら、白色のシリコンペイントを塗って接着させる。

十分時間をおいてペイントを乾燥させたら、パーマトルクを再調整し、1 層めのファイバーの上に両面テープを貼って 2 層めのファイバーを巻きつけていく。

2 層めのファイバー 585 本を巻き終えたら、まず水で 90% にうすめたペイントを塗る。これは、2 層めの上からペイントを浸透させることによって、1 層めと 2 層めの間を接着させるためである。

これが乾燥したら、その次に水でうすめていないペイントを塗って 2 層めのファイバーを接着し、乾燥させる。

ここまでの過程が全て終了したら、両面テープを貼ってある部分をカッターで切断し、シートをドラムからはがす。

その後、シートをドラムに接していた面にもペイントを塗って、更に丸一日乾燥させる。同時に、ドラムに付着したペイントを取り除き、次回シートをドラムからはがしやすいように、シリコン離型剤をドラムにスプレーする。

これで、1 枚のファイバーシートが完成である。

1 枚のシートを製作するのにかかる時間は、通常 7~9 時間である。また、巻いているときの装置の監視、シートの取り扱いなどのため、シートの製作には 2 名の人員が必要である。

3.4 ファイバーシートの大量生産

3.1 節で、本実験用に必要なファイバーシートの枚数が 240 枚であることを述べた。ファイバーシートは 1 日に 1 枚のペースでしか製作できないので、約 1 年かけて製作する必要がある。

本節では、実際に大量生産をするにあたって必要な処置、問題点などについて述べる。

3.4.1 ファイバーシート製作の環境

シンチレーティングファイバーは、経年変化によってその性能が劣化することが知られている。ファイバーシートの製作には約1年の期間がかかり、また本実験自体も3~4年の長期にわたるため、経年変化の影響は無視できない。

具体的にファイバーの経年変化を加速させる要因として、紫外線の照射、高温などがある。そこで、これらの要因を防ぐために、ファイバーシート大量生産のための部屋を新たに用意した。この部屋は、エアコンによって真夏でも室温が20°C前後に保たれるようにしてある。また、紫外線を出さない蛍光灯をとりつけるとともに、外部からの光は遮断するようにした。

3.4.2 真空パック

経年変化の直接的な原因は、酸素であることがわかっている [12]。そこで、保存、輸送の際の劣化を軽減するために、製作したシートを一時的に真空パックすることにした。

真空パックは、5枚のシートを製作した時点で、5枚一組で行う。その手順は、以下のようなものである (次ページ図 3.14)。

1. まず、5枚のシートを、傷つけないようにシートと同じサイズに切ったポリエチレン製の発泡材 (商品名ソフトロン) を間に挟んで並べる (図 3.14(1))。
2. 全体を、アルミニウムとポリエチレンのラミネートシートでくるむ (図 3.14(2))。
3. あらかじめ空気を抜くための穴を開けた上で、ラミネートシートの端の部分全てシーラーで熱接着する (図 3.14(3))。
4. 3で開けた穴から、真空ポンプでラミネートシート中の空気を抜く。最後に空気を抜いた箇所もシーラーで熱接着し、ファイバーシートを密閉する (図 3.14(4))。

3.4.3 大量生産の効率

ファイバーシートの生産におけるファイバーの歩留まりは、現在までのところ約91%である。

ファイバーの損失の要因として以下のようなものがある。

1. シートの横幅のマージン
2. ファイバー径の異常およびポピンの引き出し不良
3. ファイバーのガイドのミス

1は、3.1節でも書いたように、シートの両サイドの傷みを避けるためのものである。シートを取り扱う際、どうしても両サイドは依積みが崩れやすい。また、シート製作後ファイバーの端面を研磨するのだが、その際にも両サイドの部分から壊れる危険性がある。そのため、このマージンは必要不可欠である。

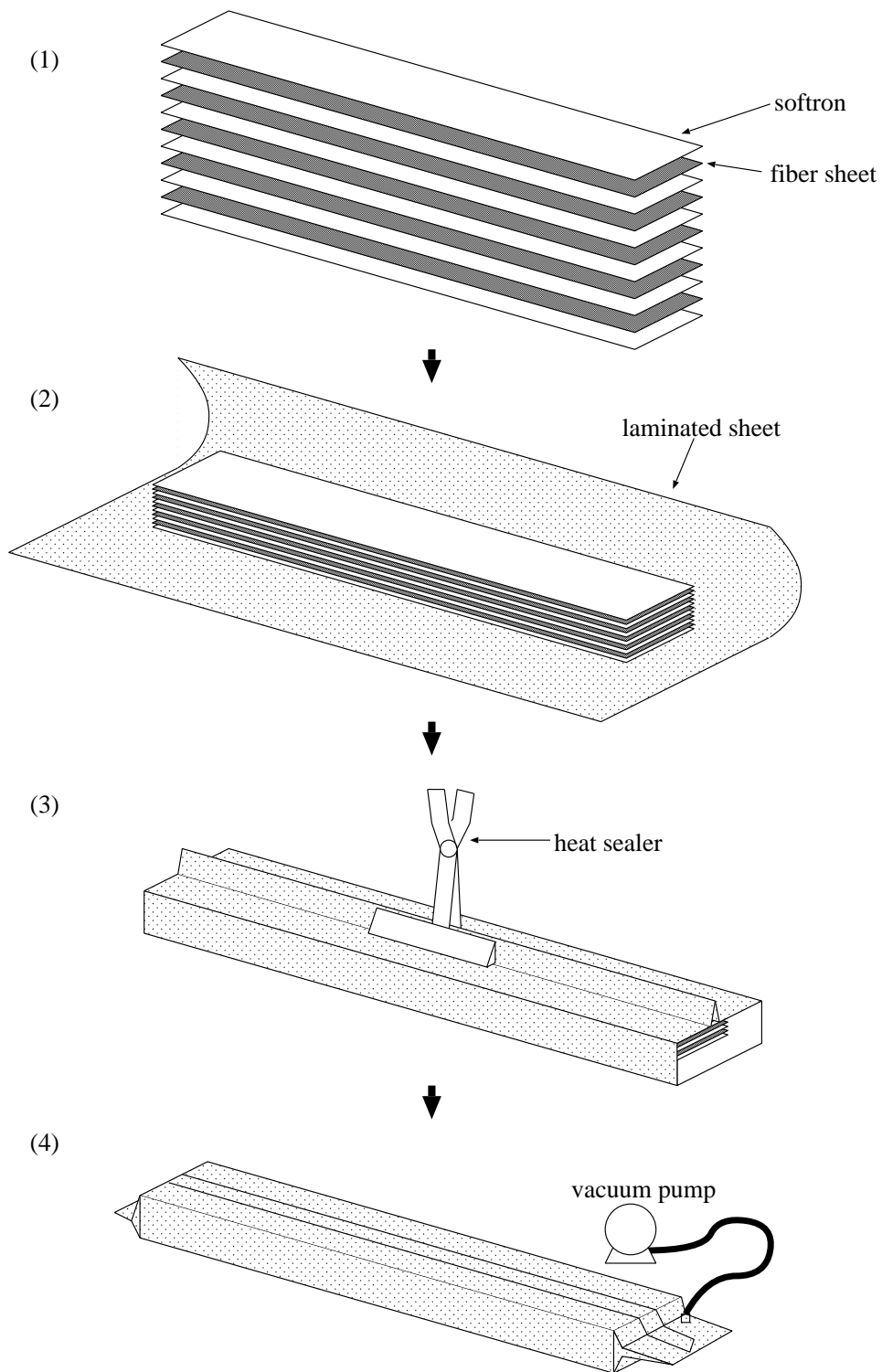


図 3.14: 真空パックの手順

2は、クラレ社から出荷されるファイバーの問題である。ファイバーの直径の異常による装置の停止は、1枚のシートにつき平均30回くらいの頻度で起こる。このとき、ファイバーは両面テープで仮どめしてある箇所ではしか切断できないので、異常のあった箇所だけでなくその周囲のドラム1、2周分の長さのファイバーを捨てなければならない。

引き出し不良というのは、ポビンに巻かれたファイバーが絡まっているために、引き出し用モーターで引き出そうとしても引き出せず、ファイバーが切れてしまうという問題である。特にひどい状態のポビンは、それ以上使用することができなくなってしまう。そのようなポビンが、これまでのところ9個に1個程度の割合で含まれている。

3は、もっとも改善する余地が残っている問題である。

ガイドプリーは常にドラムに同期して動き、ファイバーを溝にガイドするようになっているが、ときどきファイバーが正しい溝に乗らず、1本分左右にずれてしまうことがある。このような場合、一度装置を止めて、ずれた部分までのファイバーを捨て、巻き直さなければならない。

このようなファイバーの乗り違いは、2層めではほとんど起こらず、1層めの特に毎回ほぼ同じ箇所ですよく起こることから、ファイバーガイド部の動作の異常ではなくドラムの状態の問題と考えられるが、正確な原因はまだよくわかっていない。

3.4.4 ドラムの変形

大量生産は約1年間にわたって継続的に行われるので、装置自身の劣化も懸念される。特にドラムの変形は、先に挙げたようなファイバーの乗り違いの原因となるだけでなく、できあがったシートの機械的精度にも悪影響を及ぼす可能性があるという点で、非常に重要な問題である。

そのため、大量生産開始前と、開始から約半年後の2回にわたって、ドラムの真円度、およびドラム軸のぶれの測定を行った。

ドラムの歪みは、リニアエンコーダを用いて測定した。測定したい箇所に対してリニアエンコーダを垂直にあてて、ある基準とする点に対するエンコーダの値のずれを、0.5radドラムを回転させるごとに読みとった。

測定位置と測定のセットアップは、次ページ図3.15に示した通りである。

測定結果は、38ページ図3.16および39ページ図3.17に示されている。図3.16はドラムの側面から測ったドラム軸のぶれ、図3.17はドラムの表面に垂直に測ったドラムの真円度の測定結果をそれぞれ表している。

ドラム軸のぶれについては、大量生産開始前で最大240 μm 、半年後で最大315 μm のずれが見られる。半年後の方が若干悪くなっているが、ファイバー径の半分以内に収まっているので、特に問題にはならないと思われる。

しかし、真円度については、大量生産開始前は特に異常が見られなかったのに対し、半年

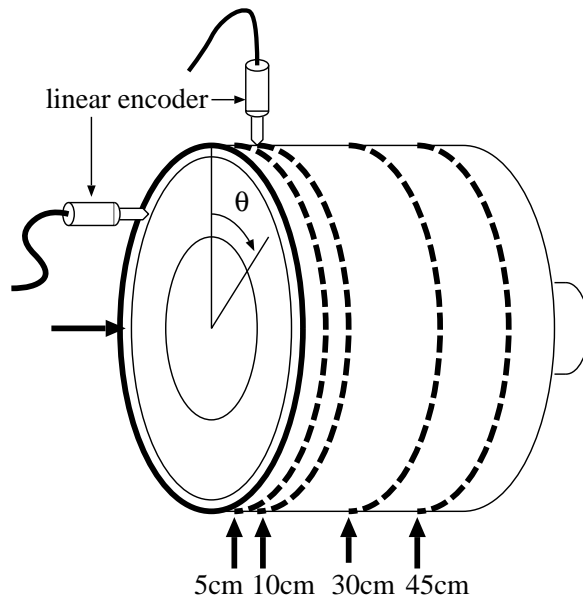


図 3.15: ドラムの測定のセットアップ

太い実線はドラム軸のぶれの測定を行った位置、4本の破線はドラムの真円度の測定を行った位置を示す。

後には角度 3 rad の付近で大きく変形してしまっていることがわかる。具体的には、大量生産開始前は最大でも $294 \mu\text{m}$ の歪みしかなかったのに対し、半年後には最大 $1335 \mu\text{m}$ もの歪みが測定されている。これはファイバー径の2倍近くの値になるので、ファイバー巻き取りの際の悪影響が懸念される。特に、この変形している箇所は、ドラム製造の際にアルミ板を円筒形に丸めて溶接した箇所、ファイバーの乗り違いもこの場所で起こることが多い。そのため、この歪みがファイバーの乗り違いの原因となっていることも考えられる。

今のところ、変形の原因、および乗り違いとの因果関係はよくわかっていないので、今後も測定を継続し、究明していく必要がある。

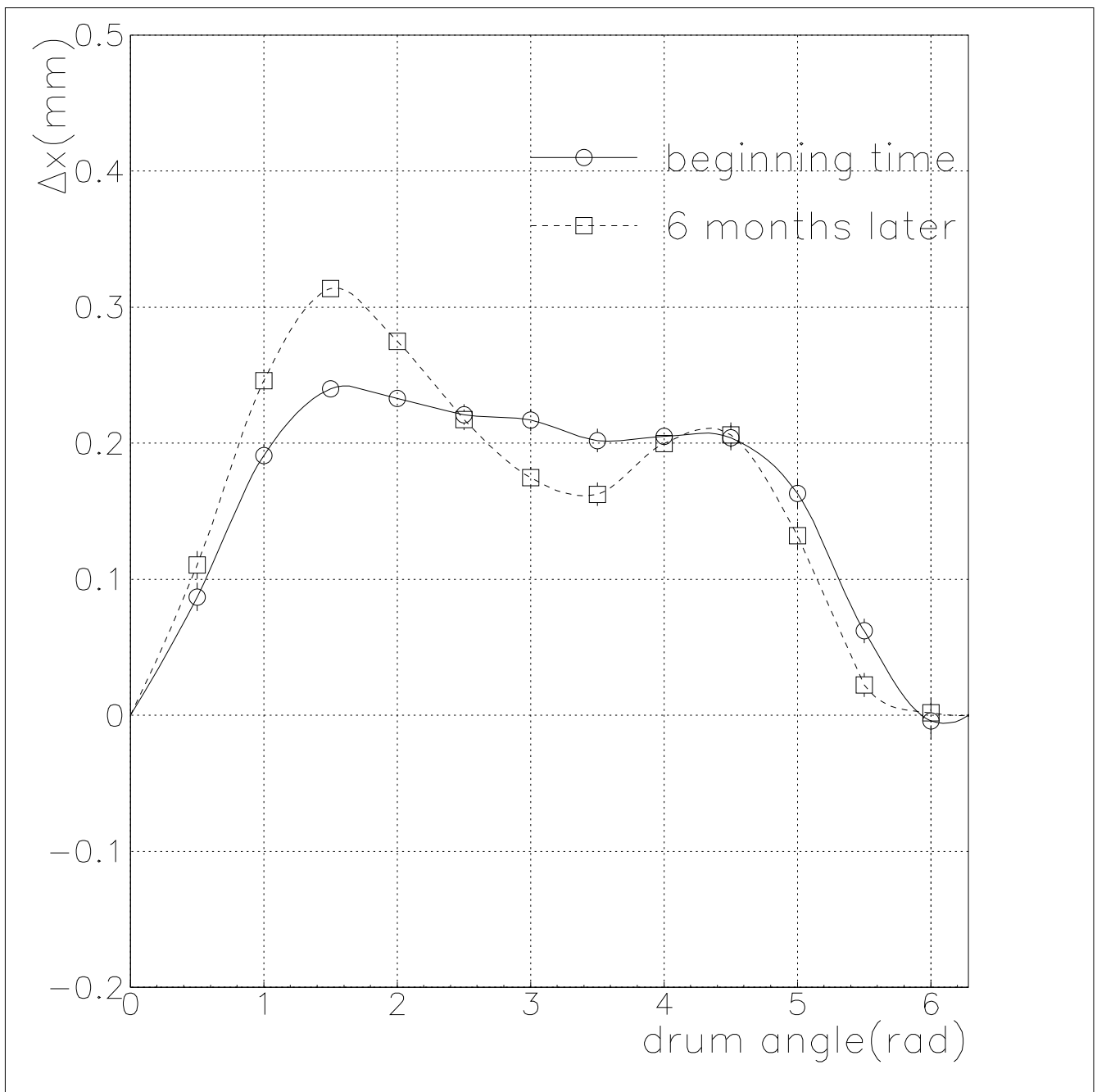


図 3.16: ドラム軸のふれの測定結果

横軸は測定位置、縦軸は 0 rad の点を基準としたずれを表す。実線が大量生産開始前、破線は開始後半年経過したときの測定結果である。

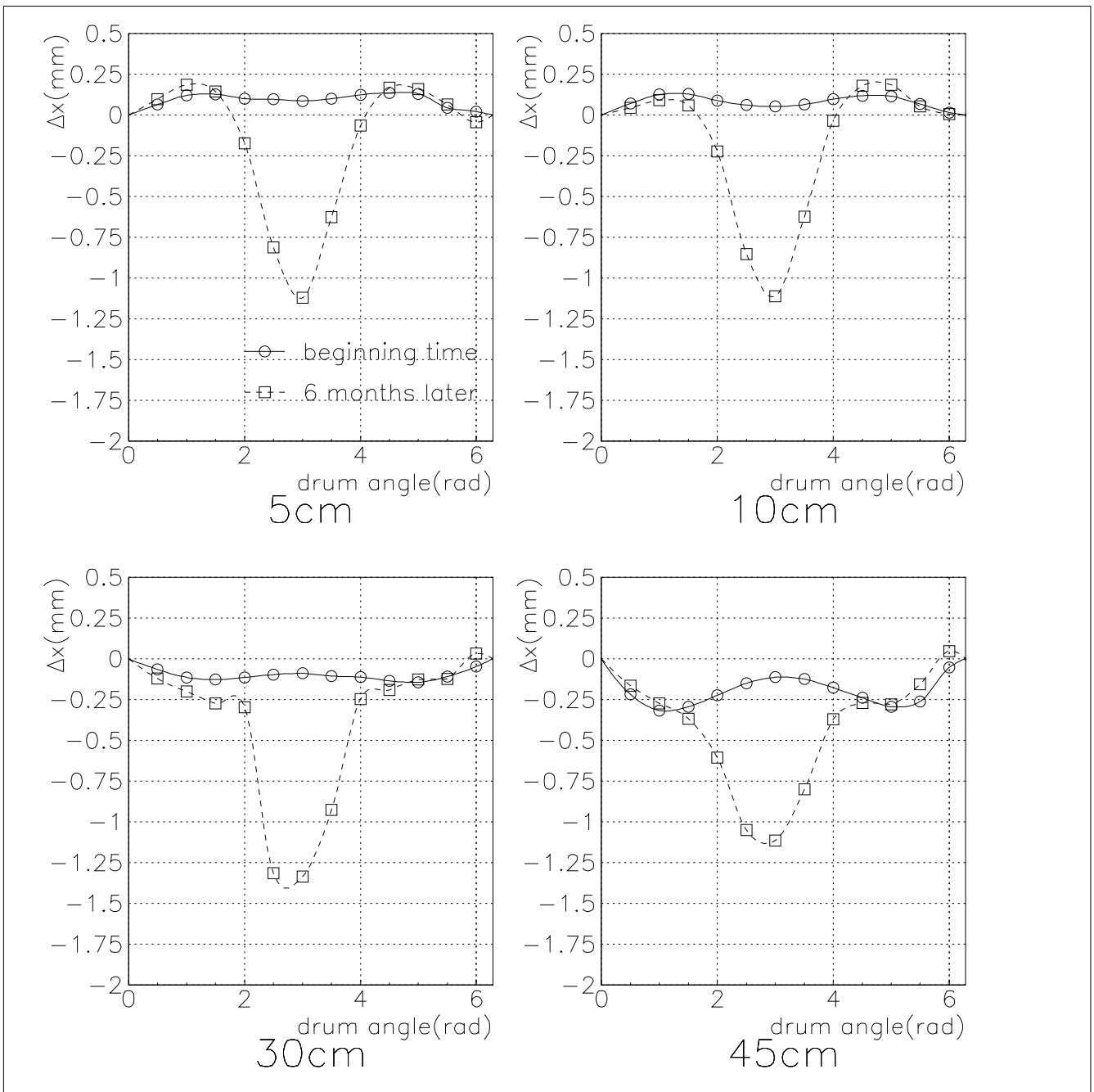


図 3.17: ドラムの真円度の測定結果

横軸は測定位置、縦軸は 0 rad の点を基準としたずれを表す。実線が大量生産開始前、破線は開始後半年経過したときの測定結果である。

第4章 ファイバーシートの性能評価

4.1 ファイバーシートの光量

シンチレーティングファイバーは、機械的なストレスによってダメージを受け、得られる光量が減ってしまう。しかし、我々の装置でファイバーシートを製作する場合、数時間にわたってドラムに巻きつけた状態でファイバーに張力を与える必要がある。そのため、機械的ストレスの影響によるファイバーの劣化が懸念される。

そこで、ファイバーシート製作前後のファイバーの光量を比較し、製作の過程でファイバーへの悪影響があるかどうかを調べた。

4.1.1 光量測定

光量測定は、ファイバーに β 線源(^{90}Sr)を照射し、そこで発生してファイバー内を伝搬した光を、端面に接触させた光電子増倍管を用いて観測することにより行った。光量測定の測定装置は次ページ図4.1に示した通りである。

本実験で使用するファイバーの長さは370 cmであるが、測定装置のサイズの問題でこの長さのファイバーの測定は無理だったので、今回の測定は270 cmの長さのファイバーを用いて行った。また、 β 線源を照射する位置は、光電子増倍管に接触させる端面からそれぞれ10 cm、50 cm、100 cm、150 cm、185 cm、220 cm、260 cmの7点とした。

測定した光量の絶対値を比較したいので、シート製作前のファイバーとシート製作後のファイバーは、同じ条件で測定する必要がある。そこで、シート製作前のファイバーは表面にペイントを塗ったものを使用し、製作後のファイバーはシートを糸で割いて再び1本の形に戻したものを使用した。また、ファイバーの個性による光量のばらつきがあるので、それぞれの条件について10本のサンプルを用意した。

全てのファイバーは、測定する側の端面を研磨し、反対側の端面は反射光の影響をなくすように斜めに切断した。また、測定の際には、ファイバーの端面にオプティカルグリースをつけて光電子増倍管の光電面に接触させた。

4.1.2 光量測定の結果

測定結果は、42ページ図4.2に示した通りである。

光がファイバー内を十分長い距離伝搬した後では、コアモードの光量のみが観測される。コアモードの光量を求めるため、次式で示すような関数によるフィットを、伝搬距離が150 cm

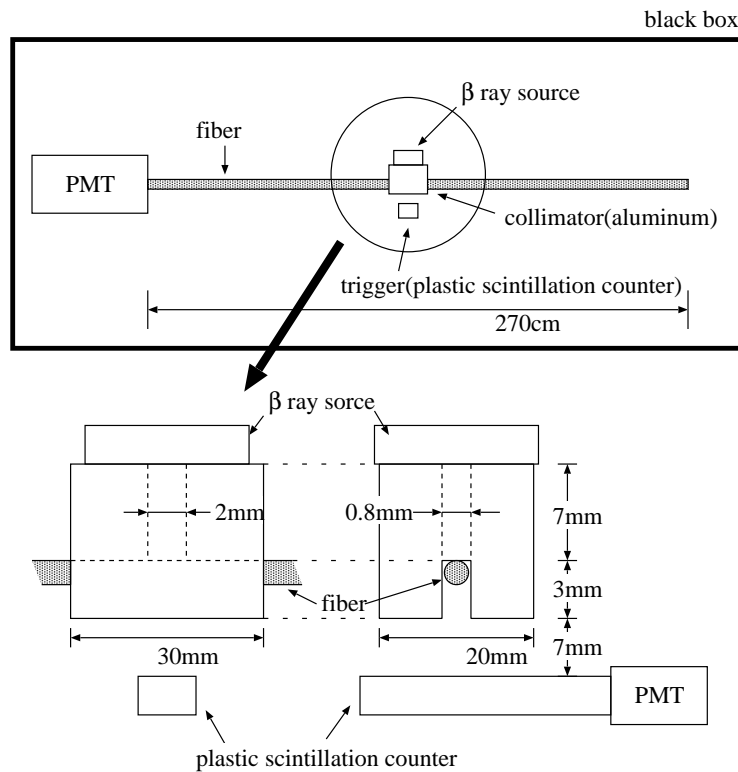


図 4.1: ファイバーの光量測定の測定装置

“PMT” は、光電子増倍管を表す。下図は、コリメータの形状を示している。

以上のデータに対して行った。

$$Y(\ell) = Y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ell}{\lambda}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 $Y(\ell)$ は ℓ cm ファイバー内を伝搬した後の光量を表している。 Y_0 、 λ をそれぞれ 0 点光量、減衰長と呼ぶ。

図を見ればわかるように、シート製作後の方が若干光量が少ないものの、両者は誤差の範囲内で一致しているという結果が出ている。測定された光量の数値は、43 ページ表 4.1 に示されている。

4.2 ファイバーシートの経年変化

ファイバーの経年変化の測定により、機械的なストレスが劣化の速度を速めていることがわかっている [14]。そのため、シート製作直後の光量の変化だけでなく、シート製作前後で劣化の速度が変化してしまうことも考えられる。

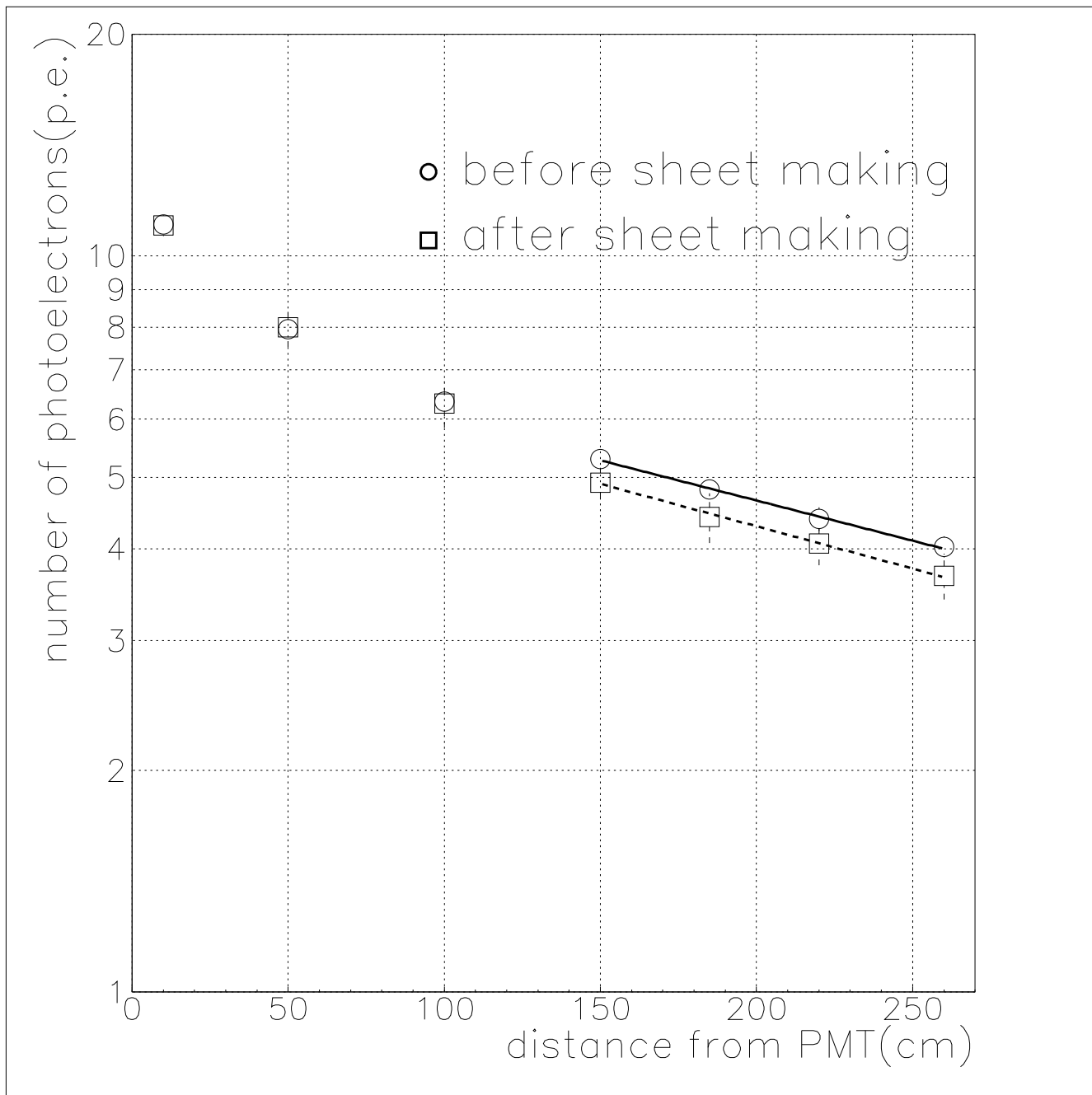


図 4.2: シート製作前後の光量の比較

○はシート製作前のペイントを塗ったファイバー 10 本、□はシートから割いたファイバー 10 本の平均光量を表す。直線は、150 cm、185 cm、220 cm、260 cm の 4 点の光量の値を式 (4.1) でフィットしたものである。

表 4.1: シート製作前後のファイバーの光量

条件	0 点光量	減衰長	260 cm での光量
シート製作前	7.4±0.4 p.e.	430±40 cm	4.0±0.1 p.e.
シート製作後	7.2±0.4 p.e.	390±40 cm	3.7±0.3 p.e.

そこで、シート製作前のファイバーと我々の装置を用いて製作したファイバーシートの経年変化の測定を行った。

4.2.1 経年変化の測定

経年変化の測定は、シート製作前後のサンプルを 70°C 環境下に保存し、定期的に光量を測定してその変化を調べることによって行った。

経年変化は、光量の相対的な変化によって表されるので、シート製作前後において絶対光量を比較する必要はない。そこで、シート製作前のサンプルはファイバー 1 本のままの状態、シート製作後のサンプルはファイバーシートの形状を保った状態で測定を行った。サンプル数は、保存環境の都合上シート製作前のファイバーについては 5 本、製作後のファイバーシートについては幅 1.5 cm のものを 3 枚とした。長さは、ともに光量測定と同じ 270 cm である。

270 cm のファイバー、およびファイバーシートをまっすぐに 70°C の状態で保存するために、図 4.3 のような水槽を用意した。

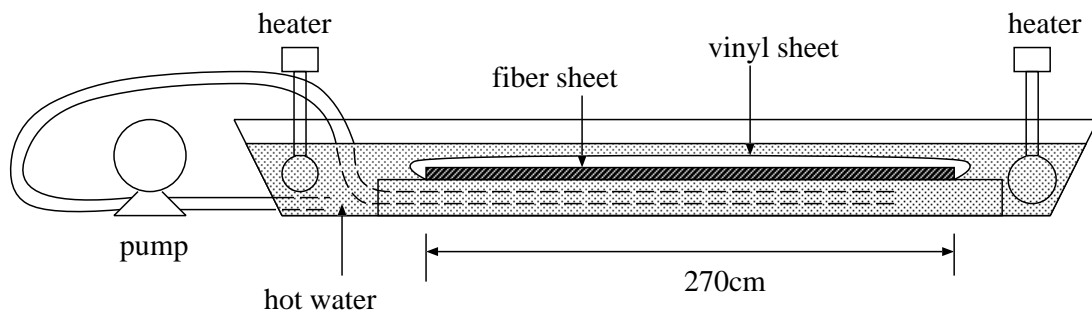


図 4.3: 経年変化測定の保存環境

ファイバーの寿命は、特に 70°C 付近では、わずかな温度差によって大きく変化してしまう。そこで、約 2ヶ月の測定期間中水槽全体の温度を常に 70°C に保つために、蒸発した分の水を供給する場合必ず 70°C に温めた水を使うようにした。その際、水の供給は水位モニターと連動して開閉する電磁弁によって行い、水槽内の水の量を常に一定に保つようにした。また、水槽全体の温度を均一にするため、ポンプを用いて水槽内の水を循環させた。

水槽の両端、および中央の計 3 カ所について、サーミスタ¹を用いて、常時水温を測定し

¹温度によって抵抗値が変化する半導体素子

た。その結果、水槽内の温度は3カ所とも $70 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれていることを確認した。

ファイバー、およびファイバーシートは、およそ7日おきに水槽から取り出し、光電子増倍管と β 線源を用いて光量の測定を行った。光量測定の装置は4.1節で述べたものと同じだが、ファイバーシートの測定については、設置の都合上ファイバー1本のとときは異なる形状のコリメータを使用した(図4.4)。

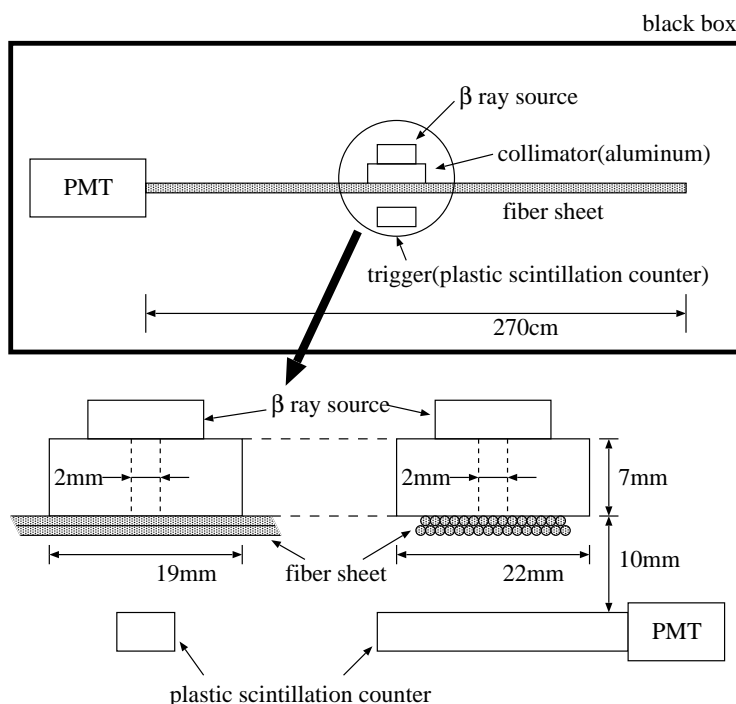


図 4.4: ファイバーシートの光量測定の測定装置

“PMT” は、光電子増倍管を表す。下図は、コリメータの形状を示している。

4.2.2 経年変化測定の結果

経年変化の測定は、54日間 70°C 環境下に保存することによって行い、計9回の測定結果によって寿命を評価した。

次ページ図4.5は、ファイバーシートの光量が経年変化によって減少していく様子を示している。光量の値は、3枚のシートの平均値である。

これに対して、46ページ図4.6は、シート製作前後の経年変化を比較した結果である。この光量の値は、光電面からの距離が最も遠い260cmの点でのデータを用い、各条件の全てのサンプルの平均値を使っている。

2層俵積みのシートでは、ファイバー約2本分の光量が得られるので、絶対値は1本のファイバーに比べて約2倍になっている。端面の状態の違いやペイントの影響のため単純な絶対

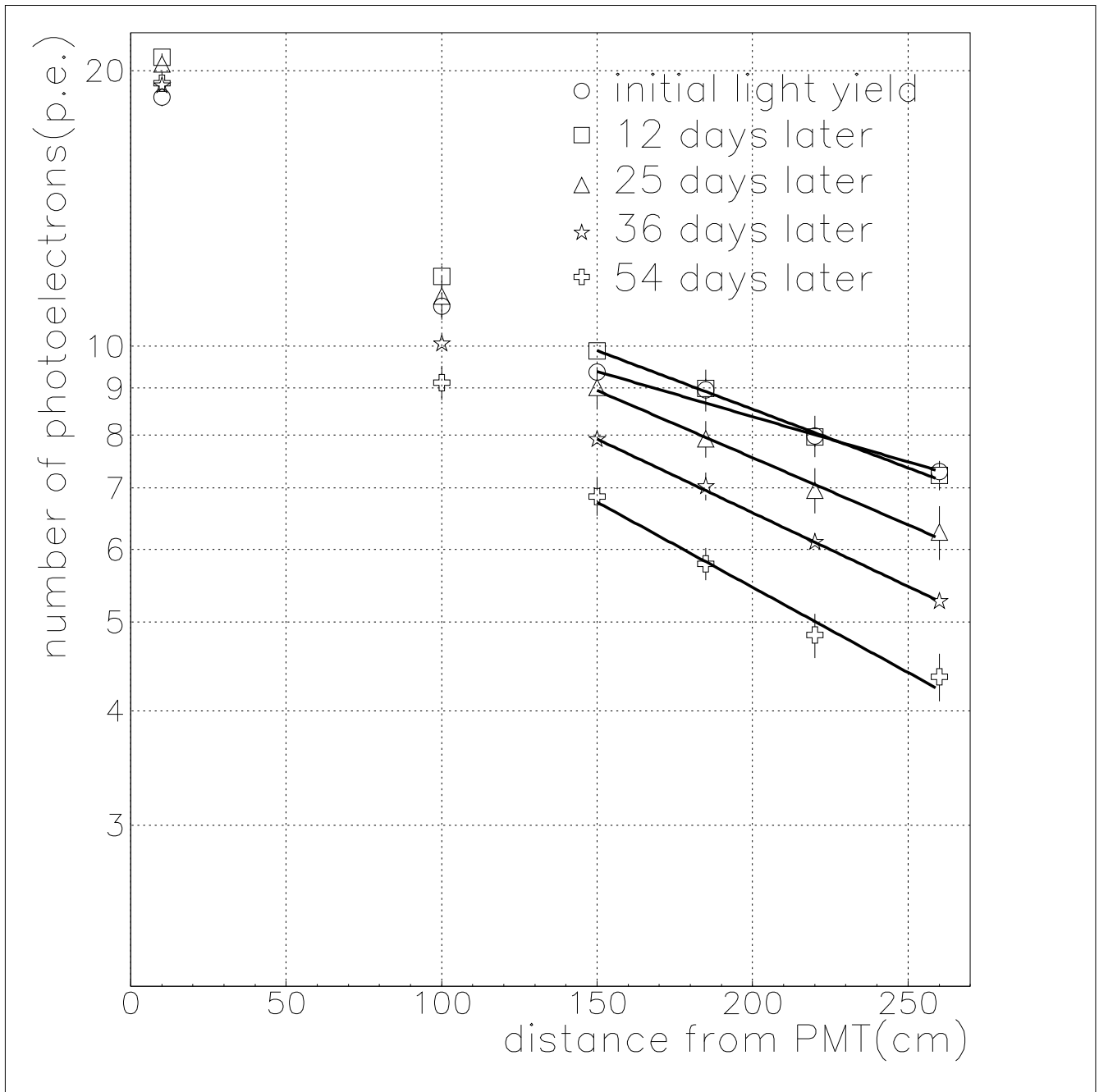


図 4.5: ファイバーシートの光量の変化

図には、保存開始前、および開始後12日、25日、36日、54日の時点でのファイバーシートの光量が示されている。横軸は光電子増倍管と β 線源との距離、縦軸は3枚のファイバーシートの平均光量を表している。

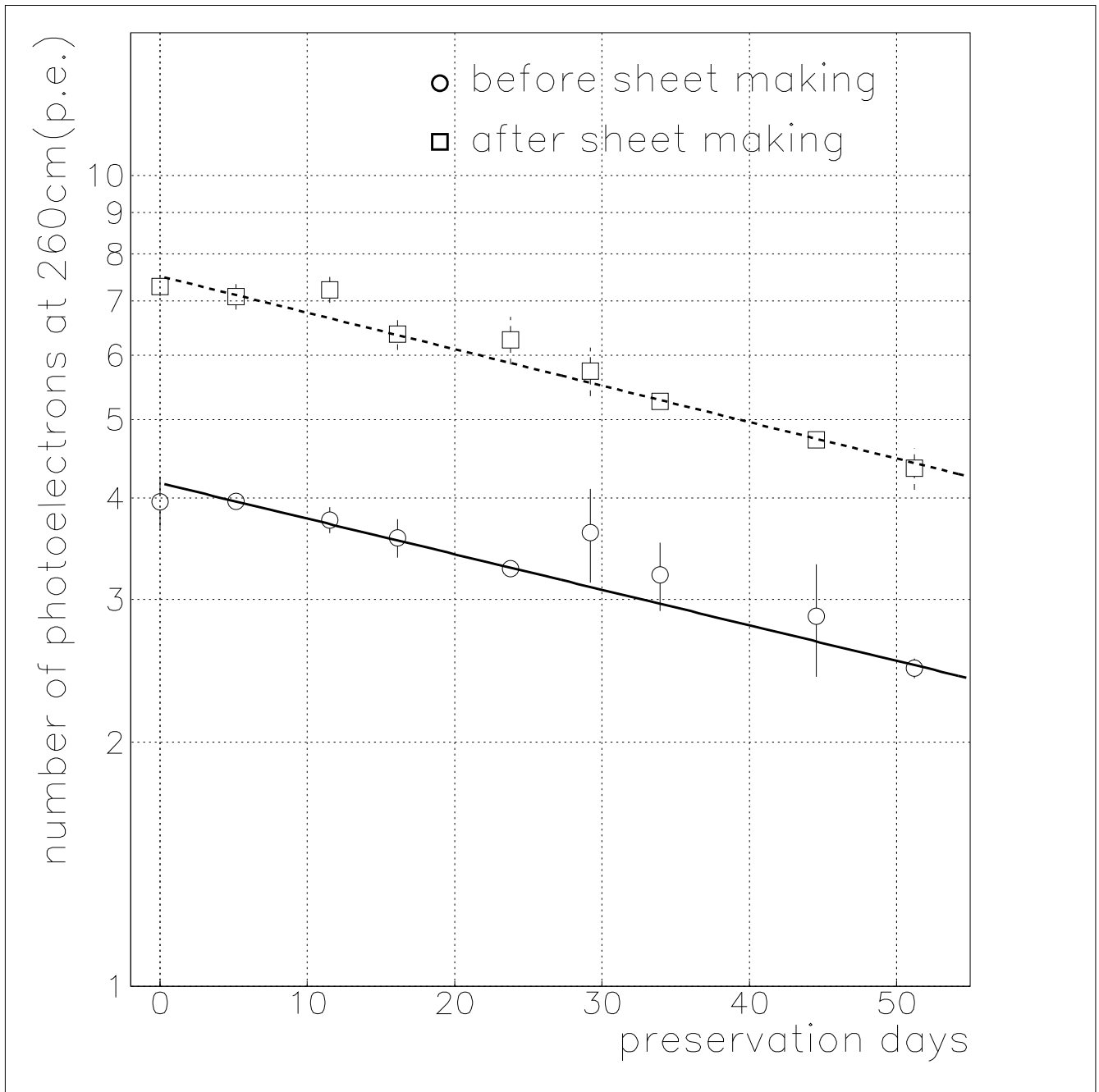


図 4.6: シート製作前後の経年変化の比較

○がシート製作前のファイバー、□がファイバーシートの経年変化の速度を表している。横軸は保存日数、縦軸は光電子増倍管と β 線源との距離が260 cmのとき測定された光量である。データは、各々の条件の全サンプルの平均値である。

値の比較はできないが、劣化の速度は相対的なものなので、図の直線の傾きを使って直接比較することができる。

各条件について、光量が $1/e$ になる寿命は、表 4.2 に示した通りである。

表 4.2: シート製作前後の寿命の比較

条件	$1/e$ に劣化する寿命
シート製作前	113 ± 12 日
シート製作後	95 ± 5 日

表に示されているように、シート製作後の方が製作前のファイバーに対し若干寿命が短くなるという結果が得られた。

この寿命の値を元に、我々の製作したシートの光量が低温の環境で 90% に減少するまでにかかる時間を見積もった。

経年変化については、アレニウスが発見した経験則として、以下のような温度依存性があることが一般に知られている [16]。

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (4.2)$$

ここで、 τ は寿命、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 E は、化学反応の活性化エネルギーに対応し、反応に固有の値である。我々が使用する SCSF-78M 改良 11 の劣化については、この値が 0.933 ± 0.009 eV になることがファイバーの経年変化測定によってわかっている [14]。

今回測定したシートの 70°C での寿命 95 ± 5 日を用いて、式(4.2) 中の A の値は $(1.90 \pm 0.61) \times 10^{-12}$ と求められる。この値を使って、低い温度でのファイバーの寿命が計算できる。

本実験中は、ファイバー飛跡検出器は 15°C 環境下に設置される予定である。式 (4.2) に $T = 288\text{K}$ を代入すると、 15°C でのファイバーシートの寿命は、 39100 ± 17300 日となる。これを光量が最初の 90% まで劣化する期間に換算すると、 3910 ± 1730 日となり、本実験とその準備時間である約 5 年の間、十分な光量が保てると予測される。

4.2.3 検出効率の推算

今回の測定では、ファイバーシート製作の過程により、寿命が若干短くなっているという結果が得られた。そのため、測定された光量、寿命を元に、このファイバーシートが本実験中十分な光量を得られるかどうかを検証した。

ファイバー内を距離 l だけ伝搬した後の光量 Y は、 l が十分に長い場合、0 点光量 Y_0 、減

衰長 λ を用いて、

$$Y(\ell) = Y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ell}{\lambda}\right) \quad (4.1)$$

と表される。この式から、検出器中の IIT から最も遠い場所を荷電粒子が通過したときの光量を見積もることができる。

本実験では、ファイバーシートの IIT に接触する面の反対側の端面は、アルミニウムで反射面を形成させることによって光量を増やすことになっている。反射面での反射率は、およそ 75% になることが確かめられている。よって、IIT から距離 ℓ cm 離れた点でファイバーが発光したときの光量は、次式によって計算できる。

$$Y(\ell) = Y_0(e^{-\ell/\lambda} + 0.75e^{-(2L-\ell)/\lambda}) \quad (4.3)$$

ここで、 L は、ファイバーの全長 370 cm である。

式中の Y_0 、 λ は、シートの光量の測定結果から、 $Y_0=14.8\pm 1.9$ p.e.、 $\lambda=368\pm 50$ cm という値になることがわかっている。

ただし、光電子増倍管の量子効率が 24.5% である [17] のに対し、IIT の量子効率は $22\pm 3\%$ である [18] ことを考慮する必要がある。安全のため、ここでは IIT の量子効率を 20% とし、 Y_0 の値を 20/24.5 倍して評価した。さらに、経年変化により実験終了までに光量が最初の 90% に減少すると考えると、 Y_0 を 0.9 倍する必要がある。

これらの要素を全て考慮に入れると、本実験において最も IIT から遠い点でファイバーが発光した場合、期待できる光電子数は式 (4.3) から 6.72 ± 1.26 p.e. と計算される。

IIT は、光電面から光電子が 1 個出てくればそれを認識することができる。したがって、最も光量が少ない場合の検出効率を、

$$\epsilon = 1 - \text{Poisson}(1; 6.72) = 1 - e^{-6.72} = 0.999$$

となる。この結果から、我々の製作したシートは、本実験期間中十分な検出効率を得ることができると考えられる。

4.3 ファイバーシートの直線性

シンチレーティングファイバー飛跡検出器は、粒子の飛跡を知ることによって反応点を再構成するために使われる。そのためには、発光したファイバーが実際に装置の中でどの位置にあるかを、正確に知る必要がある。そのため、ファイバーシートの機械的精度、すなわちファイバーシート中の検出器として使用される部分のファイバーがまっすぐ精度よく並んでいるかどうかということは、非常に重要な問題である。

そこで、ファイバーシート中のファイバーが、どの程度直線性を保っているかの測定を行った。

4.3.1 直線性の測定

直線性の測定は、まっすぐに張ったワイヤーと、目標となるファイバーとの差を、目盛り付きの顕微鏡で観測することによって行った。セットアップは、図 4.7 に示した通りである。

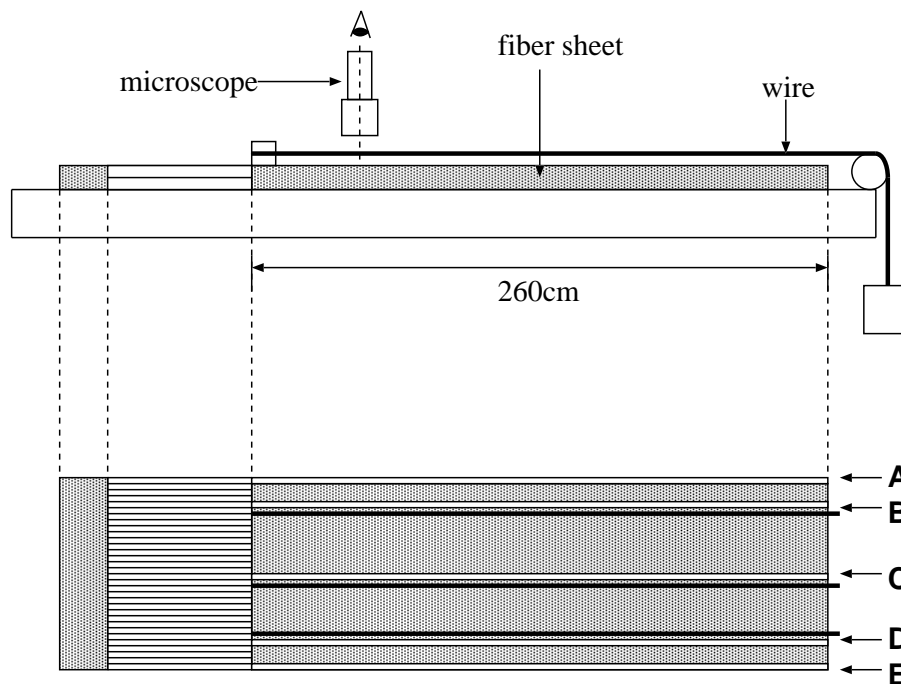


図 4.7: 直線性測定のセットアップ

アルファベット (A~E) は、測定したファイバーを表している。

まず、測定するシート中のファイバーに、それとわかるような目印をつける必要がある。測定したファイバーのうち、両サイド、および両サイドから 5 本めのファイバーは顕微鏡を覗きながら測定するファイバーを特定することができるが、シートの中央のファイバーだけはそれが困難なので、あらかじめペンで 1 本のファイバーに沿って印をつけた。

次に、直径 $140\ \mu\text{m}$ のワイヤーの一端を、シートの検出器部分とライトガイド部分の境界にテープで貼りつけた。このとき、ワイヤーをシートにぴったりくっつけてしまうとまっすぐ張ることができなくなるが、シートとワイヤーとの間の距離が大きいと視差が生じてしまうので、テープの厚みによってごくわずかだけワイヤーがシートから浮くように調節した。そして、ワイヤーをファイバーに沿って張り、テープで固定したのとは反対側の端におもりをつけてまっすぐ引っ張った。

その後、ファイバーに沿って 50 cm おきに、顕微鏡でワイヤーの一方の端とファイバーの一方の端の間の距離を測定した。

測定を行ったファイバーは、シートの両サイドのファイバー (A、E)、両サイドから 5 本めのファイバー (B、D)、およびシート中央のファイバー (C) の全部で 5 本である。ワイヤー

は、両サイドから5本めのファイバー、および中央のファイバーに沿った3カ所にセットした。

4.3.2 直線性測定の結果

測定の結果は、次ページ図 4.8 に示されている。

全てのデータは、3本のワイヤーが横軸に平行になるように補正した。また、各測定点でのファイバー5本分の幅を平均して顕微鏡の目盛りを較正し、図の縦軸はファイバー1本分の幅が単位になるようにしてある。

この測定の結果、ファイバーの歪みは、最もずれが大きい点でもファイバー径の約80%程度で、中心からファイバー1本分以内に収まっていることがわかった。

しかし、本実験ではシートを2.6 m×2.6 mのハニカムパネルに並べて貼りつけて使用するため、ハニカムパネルに貼りつけた後のシートの直線性を調べることが重要である。この点については、今後さらに研究する必要がある。

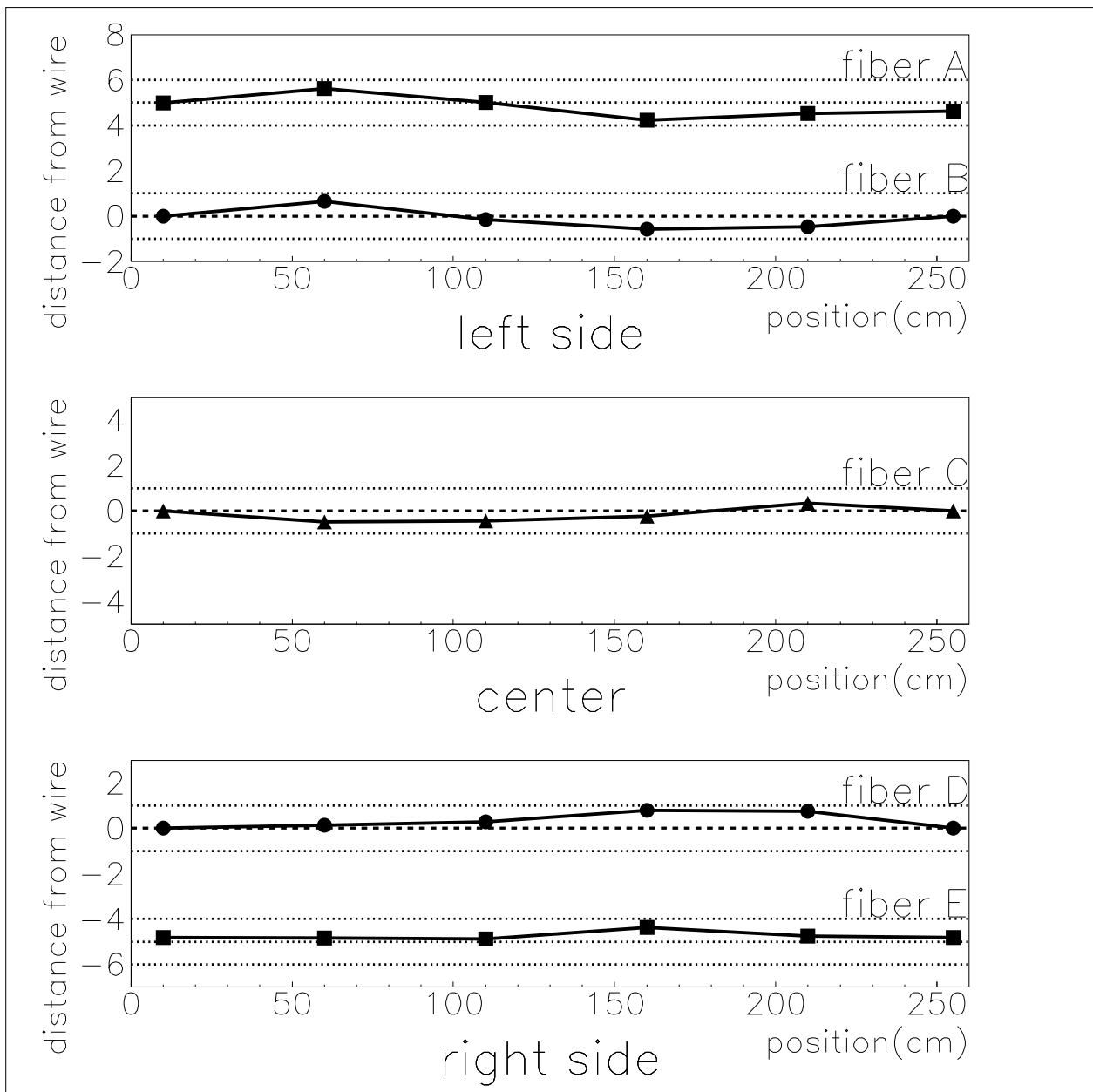


図 4.8: 直線性測定の結果

横軸は、ライトガイド部分と検出器部分の境界を原点としたときのファイバーに沿った方向の測定位置、縦軸は、ファイバーの直径を単位としたファイバーのワイヤーからのずれの大きさを表す。濃い破線は、横軸に平行になるように補正したワイヤーの位置を示している。測定結果は上から順に、バンドル部分側から見て左側の端、左側の端から5本め、中央、右側の端から5本め、右側の端の5本のファイバーのものである。

第5章 結論

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験では、その前置検出器の中で、シンチレーティングファイバーを利用した飛跡検出器を使用する。シンチレーティングファイバーを飛跡検出器として使用するためには、ファイバーを精度よく並べてシート状にしなければならない。本実験の場合、長さ370cm、幅41cmの大きさの2層俵積みのファイバーシートが全部で240枚必要となる。このようなファイバーシートを効率よく製作するため、ファイバーシート製作装置を作成した。

この装置によって、現在本実験用のファイバーシートの大量生産が、1日1枚のペースで行われている。

また、我々が作ったファイバーシートの性能評価を行った。

まず、シート製作前後のファイバーの光量と経年変化について調べた。その結果、我々の作ったファイバーシートの光量が90%に劣化する寿命は、 3910 ± 1730 日となった。また、90%に劣化した後シートがIITから最も遠い点で発光したとき期待される光量は、IITを接続する側と反対の端面で75%の光が反射することを考慮に入れた場合、 6.72 ± 1.26 p.e.となることがわかった。これは、いずれも本実験での使用に十分耐えうる性能である。

さらに、ファイバーシートの直線性についても調べた。その結果、ファイバーシート中のファイバーの歪みは、ファイバー1本分以内に収まっていることがわかった。

ファイバーシートの大量生産は順調に進行中であり、1998年1月末現在、125枚のシートが完成している。このペースで生産が続けられれば、1998年7月末までには本実験に必要な全240枚のシートが完成する。

大量生産と並行して実機の組み立てが始まり、1998年10月からは実験ホールへの設置が始まる。そして、1999年1月より本実験が開始される予定である。

謝辞

この論文の作成にあたり、多くの方の御指導、御協力を賜りました。

神戸大学の野崎光昭先生には、指導教官として研究全般にわたっ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、直接私の研究の指導をしていただき、論文作成に際しても様々な助言をいただきました。

神戸大学の武田廣先生には、粒子物理学について、様々な点で御教授いただきました。

高エネルギー加速器研究機構の中村健蔵先生、西川公一郎先生には、実験グループの責任者としてお世話になりました。

名古屋大学F研究室の丹羽公雄先生、中村光廣先生、大学院生のみなさま、また装置開発室の石川秀蔵様、金属工作室の河合利秀様には、ビームテスト用ファイバーシート製作、およびファイバーシート製作装置の作成のため大変お世話になりました。特に、我々のファイバーシート製作装置の設計については、石川様、河合様に全面的に協力していただきました。また、装置の制御方法に関しては、F研究室の中野敏行様に御教授いただきました。

高エネルギー加速器研究機構の作田誠先生、峰俊一様には、シンチレーティングファイバー関係の研究で御協力いただきました。

東北大学の衛藤雅之様には、ファイバー関係の研究でいろいろな助言をいただきました。また、名古屋大学でのファイバーシート製作の際、大変お世話になりました。

クラレ社の新治修様には、シンチレーティングファイバーの開発に関して御協力いただきました。

神戸大学の小浜光洋様には、研究室の先輩としていろいろとお世話になりました。

神戸大学の越後慎也君、北村雅裕君、久米剛生君、竹中和彦君、佐藤幸一君、岩下大器君、恩地正裕君、竹内秀樹君には、私の研究の様々な場面で協力していただきました。特に、現在行っているファイバーシート大量生産の準備は、みなさんの協力なしにはできませんでした。

その他にも、実験グループのみなさま、研究室のみなさまには、様々な形でお世話になりました。

みなさま、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Particle Data Group, Phys. Rev. **D 54**, 280 (1996).
- [2] K. Assamagan *et al.*, Phys. Rev. **D 53**, 6065 (1996).
- [3] D. Buskulic *et al.*, Phys. Lett. **B 349**, 585 (1995).
- [4] M. Aglietta *et al.*, Europhys. Lett. **8**, 611 (1989)
- [5] K. Daum *et al.*, Z. Phys. **C 66**, 417 (1995).
- [6] M. Goodman *et al.*, Phys. Lett. **B 391**, 491 (1997).
- [7] R. Becker-Szendy *et al.*, Phys. Rev. **D 46**, 3720 (1992).
- [8] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. **B 335**, 237 (1994).
- [9] K. Nishikawa *et al.*, “Proposal for a Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, using KEK-PS and Super-Kamiokande”, (1995).
- [10] 小浜 光洋, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (1997).
- [11] S. Kasuga *et al.*, Phys. Lett. **B 374**, 238 (1996).
- [12] H. Ishikawa *et al.*, 放射線 **Vol.21, No.3**, 85 (1995).
- [13] 衛藤 雅之, 東海大学理学研究科修士学位論文 (1997).
- [14] 越後 慎也, 神戸大学自然科学研究科修士学位論文 (1998).
- [15] 名古屋大学 F 研究室, 研究成果報告書 “高精度多層シンチレーティングファイバートラッカー” (1993).
- [16] 技報堂, 有機化学ハンドブック.
- [17] 浜松ホトニクス社, “R329-05S 較正データ” (1995).
- [18] 浜松ホトニクス社, “High Sensitivity Image Intensifier Testing Data” (1996).